

ネットワーク均衡モデルを応用した 都市圏レベルの交通政策分析

2004年8月

円山琢也

論文の内容の要旨

論文題目 ネットワーク均衡モデルを応用した都市圏レベルの交通政策分析
氏 名 圓 山 琢 也

都市における交通問題は、数多くの人々が関わる身近な問題であり、その解決のための計画や政策について、さまざまな意見が存在する。しかしながら、その議論の中には、観念的・情緒的なレベルのものも少なくない。例えば、混雑地域において道路混雑を緩和するために新たな道路を建設するという計画については、道路容量の増加は、新たな交通量の増加を招くだけで、結局混雑は緩和されず、道路投資は無駄である、という主張が存在する。また、道路利用に対する混雑課金政策の導入についても、課金は低所得者に対して相対的に大きな影響を与え、所得間公平性の問題が生じるため望ましくないという反対意見がある。しかしながら、財源制約下で多数の主体が関わる都市・地域の計画や政策においては、科学的、客観的な手法を用いた判断が求められる。

この判断においては、社会経済構造を単純化・抽象化した理論モデルを用いた考察から得られる知見は少なくない。上述の道路建設による誘発交通の問題についての最も単純化した議論は、空間、時間を捨象した、横軸に交通量、縦軸に交通費用をとったグラフにおける需要曲線とトリップ費用曲線を用いたものである。誘発交通が存在しない場合は、垂直な需要曲線が想定され、誘発交通が存在する場合は、需要曲線が傾いているときに相当する。これらを用いて、誘発交通が存在することによる道路投資の便益のゆがみなどを、定性的に議論することが可能となる。

これらの理論的考察は、経済学を中心に行われてきた。そこでは、さらに、道路混雑に対するファーストベストな対策として、混雑課金が古くから提案され、その課金額の最適設定法や政策の所得間公平性の議論についても同様に単純なグラフを用いた議論がなされてきた。

これら理論的議論は、定性的なものでありながら、一般性・規範性に優れている。しかしながら、現実の政策判断に必要な定量的な評価値を得るためには、グラフで想定されている需要曲線、トリップ費用曲線をどう推定するのか、ネットワークから構成される現実の都市施設をどのように考えればよいのかという問題があり、これらの議論は現実の政策評価に直接利用できるものではなかった。

一方、実際の都市圏において現実の評価を行うために、工学的に実用的なモデルが数多く開発され、実務の現場で幅広く用いられてきた。四段階推定法に

基づく都市圏レベルの交通需要予測，交通政策分析はその典型といえよう．しかし，四段階推定法は，工学的な実用性の一方で，理論との整合性，モデル内部の整合性に問題があることが古くから指摘され，この欠点により，前述した誘発交通などの扱いが不十分となっており，それらの分析に有益な情報を提供しうるものではなかった．

工学的な実用性を重視したモデルを用いた予測，分析が一般的となったのは，現実都市の複雑なネットワークや，利用者の多種多様な行動を想定した場合，理論の厳密性，一般性を維持した展開は困難と考えられていたためと思われる．

本研究では，これら一見困難と思える理論との整合性を堅持した政策分析フレームの拡張は，ネットワーク均衡モデルを応用することで可能となることを明らかにし，その特徴を生かした，現実の都市圏レベルの交通政策分析を行うことを目的とする．

ネットワーク均衡モデルの概念自体は，目新しいものではなく，最近では，実都市圏への適用事例も少なからず存在する．しかしながら，残念なことに既存研究では，これらのモデルは四段階推定法の代替案としての工学的需要予測ツールとしてしか利用されていなかった．モデルが理論と整合性があることを利用した分析例は意外なほど少なかった．本研究では，この点に着目し，単純なグラフを用いて展開されていた理論考察のいくつかを，複数交通手段を考慮した現実の大規模なネットワーク上で，利用者の異質性を考慮しながら利用者の多次元選択行動を明示した場合にも展開可能であることを示し，その知見を用いた現実都市圏での分析を行う．

本論文は，全8章から構成される．第1章では，上述の内容を含む本論文の背景と目的を詳述し，第2章では，本研究に関連する既存研究の動向を整理している．第3章では，本研究の政策分析の基礎となるモデルの構築を行い，第4章から第7章は，このモデルを用いた政策分析を行っている．第4章は，既存の工学的実用性を重視したモデルと本研究のモデルによる政策評価の違いが端的に示される章である．理論の厳密性，一般性を維持した展開及び整合性を活かした分析例は，第5，7章および第4章の一部に含まれる．また，第5，6，7章は，都市交通政策の多様化に応じた内容ともなっている．

具体的に，第3章では，現実の東京都市圏を対象に，マルチクラス Nested Logit 型ネットワーク均衡モデルの定式化，解法の構築を行った．トリップ目的別の利用者のセグメントを行いつつ，発生レベルまでの統合を行うために，片側制約型の分布モデルを採用し，目的地選択肢集合の確率的形成を考慮したパラメータ推定を行った．これらの改良によりモデルの現状再現性は既存の固定需要モデルと同等なレベルが確認され，論理性を保持しながらも実用性の高いモデルが構築された．また，このモデルは，大規模な多手段の交通ネットワークを

対象に、鉄道の混雑現象を考慮しつつ、発生レベルまでを統合した点で、先進的なモデルといえる。

第4章では、誘発交通を考慮した混雑地域における道路整備の利用者便益推定を行った。セカンドベストの経済となる現実の都市圏での便益評価における留意点を踏まえた理論的検討、誘発交通量の試算とその便益評価に与える影響を詳細に考察した。推定の結果、誘発交通の量は、都市圏全体ではわずかであるが、対象道路の交通状況、利用者便益に大きな影響を与えることが示された。さらに、最適料金制度の下での便益計測に関して、本モデルから、既存の交通経済学の知見を一般化した結果が得られることも示された。

これら誘発交通の存在とも関連して、道路混雑対策としての道路容量の拡大は、最適な対策ではなく、混雑課金こそが最適な政策であると経済学者により主張されてきた。しかしながら、特に経済系の研究における混雑課金理論は、前述したようにきわめて単純なフレームに基づいており、現実都市圏にそのまま適用できるものではない。第5章では、これらの問題意識から、最適混雑課金理論の拡張と、実都市圏でのその料金レベル試算を行った。具体的には、利用者の交通行動が複数の交通手段を含むネットワーク上で Nested Logit 型の多次元選択行動に従う場合の最適混雑課金を考察した。この場合、ネットワーク上の全リンクへの限界費用課金がモデルと整合的な社会的余剰の最大化をもたらす最適課金であることを簡明に証明、解説した。この証明をもとに、現状の料金制度下と、最適混雑課金が実行できた場合と、現実にも構想されている都心部への課金政策を実施した場合の、それぞれの社会的余剰を試算し、それらの値を比較し考察を加えた。本章の内容は、現実都市圏の大規模な複数の交通手段を含むネットワーク上での利用者の行動を対象としており、記述性に優れながら、最適課金の算出などの規範的な分析も行えるという、既存のモデルでは実現できない政策評価の枠組みの一例を示したものである。

第6章では、混雑課金施策の社会厚生的な問題点を、利用者を所得階層に区分したマルチクラス型のネットワーク均衡モデルを用いて考察した。まず、課金によって所得逆進性の問題が生じることを単純なネットワークで確認し、課金収入を鉄道料金、駐車料金値下げに利用することで政策の所得逆進性が緩和されることを示した。また、課金が計画されている東京都心部にもモデルを適用し、政策の逆進性、地域間の影響差の計算例を提示し、混雑課金政策の所得間公平性の問題点について定量的に検討可能となるフレームが現実都市でも構築可能であることを示した。

第7章では、現状の職住の分布は変化させずに、職住の組み合わせのみを変化させるといふ職住最適配置問題を考えている。既存の職住配置問題は、自動車の混雑現象、現実の交通ネットワークの情報が十分に考慮されているとは言

いがたいものであった。本章では、職住最適配置の議論を、ネットワーク均衡モデルを応用して、理論的な厳密性を保ちつつ、各リンクでの混雑現象を考慮した形で展開し、東京都市圏を対象にその実証研究を行った。その結果、通勤交通の最適配置により、自動車総走行台キロ、台時、CO₂総排出量、鉄道混雑を大幅に削減可能であることを実証的・定量的に明らかにした。

第8章では、本研究の成果をまとめ、今後の課題と展望を述べている。

ネットワーク均衡モデルの既存研究の多くは理論研究にとどまっており、それを実務で利用していくために検討が必要な事項の整理が十分とはいえなかった。この問題意識のもと、本研究では、広範なレビューをもとに、ネットワーク均衡モデルの実都市圏への適用時に有用となるモデル拡張の考え方、検討が必要な事項を整理した。そして、現実の交通計画に用いる需要予測モデルの論理性、客観性を高めるためには、解の一意性が保証されたモデルの利用が望ましいとの立場に立ち、その考えに基づきながら現状再現性を高める改良を行った。結果として構築したモデルは、現実の都市圏の交通需要予測・便益評価にも十分適用可能な、従来の四段階推定法に代替しうる有用性、実用性を兼ね備えたものであることを明らかにした。また、具体的に誘発交通を考慮した道路整備効果の推定、混雑課金政策の評価など、緊急な回答が必要とされている政策課題について、試算の域ではあるが、具体的な数値を示した社会的意義は少なくないものと考えられる。

謝辞

本論文の執筆に際しては、数多くの方からご指導、ご支援をいただきました。ここに感謝の意を表します。

東京大学大学院新領域創成科学研究科環境学専攻教授 原田昇先生には、学位論文の主査として、また学部生時代からの指導教官として、終始暖かいご指導、ご助言をいただきました。本論文執筆に際しては、特に交通計画における交通需要予測のあり方、分析手法の考え方について、数多くの有益なご意見をいただきました。原田先生のご指導なしにはこの学位論文が完成を見ることはなかったと思います。深く感謝の意を表します。

東洋大学国際地域学部教授、東京大学名誉教授 太田勝敏先生には、学部生時代から、先生が東大をご退官されるまでの時期に渡って、本論文の多くの部分の内容についてご指導をいただきました。特に、論文の第3、4、5、6章は、先生と連名で発表いたしました学術論文に基づいています。これらの論文に対しては、ご多忙ながら、幅広いご見識からの数多くのご指摘、ご意見を賜りました。

本論文の副査は4人の先生方にご快諾いただきました。東京大学空間情報科学研究センター教授 浅見泰司先生には、論文の発展方向性について示唆に富んだご意見をいただきました。東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻教授 家田仁先生に交通計画分野の研究のあり方を含めて、刺激的なご意見をいただけたことは貴重な経験であり、また論文の意義をご理解いただけたことは、この上ない喜びです。東京大学国際・産学共同研究センター教授 桑原雅夫先生には、モデルの動学化を含めた今後の研究の方向性について、ご教示いただきました。東京大学大学院経済学研究科教授 田淵隆俊先生には、都市地域経済学の立場から、計画における公平性の考え方など貴重なコメントを数多くいただきました。本論文の審査員を以上の各専門分野の第一線でご活躍されている先生方にお引き受けいただき、またご意見をいただけたことは私の大きな喜びとするところです。

東京工業大学大学院総合理工学研究科研究科助教授 室町泰徳先生には、学部生時代に、本論文の基礎となるネットワークモデルの考え方をご指導いただき、また、それ以降も若手研究者・教育者のあり方についてご指導をいただいています。

東京大学大学院工学系研究科都市工学専攻講師 大森宣暁先生には、現在の私の職務の先輩として、多くのご助言をいただきました。未熟な私が本論文を執

筆しながら助手の職務を続けることができましたのも大森先生のご助言に負うところが少なくありません。

本論文の内容を国内外の学会，研究会で発表した際には，数多くの先生方から貴重なご助言，コメントを賜っています。また，学術論文の査読時における匿名の審査員の方からのご指摘により，論文の内容が大幅に改善されたことは，少なくありません。また，数多くの委員会，研究会に参加させていただいた際の議論は，筆者にとって大変有意義なものでありました。このほか，本来名前を挙げて感謝を申し上げるべき人々は，数え切れません。この紙面をもって重ねて深く感謝を申し上げます。

なお，本論文に含みうる誤りの責は，筆者のみにあることを明記し，謝辞といたします。

円山 琢也

目次

論文の内容の要旨	i
謝辞	v
目次	vii
図表目次	xiv
記号表	xvii
本学位請求論文に関連する著者の刊行論文リスト	xviii
第1章 序論	- 1 -
1.1 研究の背景	- 1 -
1.1.1 政策評価のための理論分析と現実との乖離	- 1 -
1.1.2 工学的に実用的なモデルによる評価の不備	- 2 -
1.1.3 都市交通政策の多様化	- 3 -
1.2 研究の目的	- 4 -
1.3 研究の基本方針	- 5 -
1.4 研究の構成	- 8 -
第2章 既存研究の動向の整理	- 11 -
2.1 交通需要予測・便益評価手法の概説	- 11 -
2.1.1 需要予測の意義	- 11 -
2.1.2 便益評価の現状と課題	- 12 -
2.1.3 四段階推定法の対比としての非集計行動モデルの発展	- 12 -
2.1.4 ミクロ行動ネットワーク交通流シミュレーション	- 13 -
2.1.5 工学的に実用的なモデルの問題点	- 14 -
2.2 ネットワーク均衡モデル概説	- 16 -
2.3 固定需要型利用者均衡モデル	- 16 -
2.3.1 基本仮説と基本モデル	- 16 -
2.3.2 所要時間以外の経路選択基準の導入	- 20 -
2.3.2.1 ランプ間料金の表現	- 20 -
2.3.2.2 非加算型経路費用モデル	- 21 -
2.3.3 多基準ネットワーク均衡モデル	- 22 -
2.3.4 マルチクラスモデル	- 22 -
2.3.4.1 車種の異質性	- 23 -
2.3.4.2 利用者属性の異質性	- 24 -
2.4 確率的利用者均衡モデル	- 26 -

2.4.1	確率的利用者均衡モデルの理論拡張	- 27 -
2.4.2	確率的利用者均衡モデルの問題点とその解決策	- 27 -
2.4.2.1	経路選択枝集合の決定法	- 28 -
2.4.2.2	経路選択枝の類似性の表現法	- 29 -
2.4.2.3	均衡解への収束が保証されたアルゴリズムの開発	- 30 -
2.4.2.4	目的関数における経路エントロピー項の効率的計算法	- 31 -
2.4.2.5	需要モデルと統合的な利用者便益指標の効率的計算法	- 32 -
2.5	需要変動型利用者均衡モデル	- 34 -
2.5.1	Beckmann モデル	- 35 -
2.5.2	需要変動モデルの分類	- 36 -
2.5.3	Mixed Mode ネットワーク均衡モデル	- 36 -
2.5.4	分布モデルの構造の扱い方	- 37 -
2.5.5	平均乗車人員と時間価値の異質性の扱い方	- 39 -
2.6	アルゴリズムの拡張	- 40 -
2.7	パラメータの推定	- 41 -
2.7.1	道路のリンクコスト関数	- 41 -
2.7.2	鉄道の混雑不効用関数	- 42 -
2.7.3	経路選択モデルのパラメータ	- 42 -
2.7.4	統合需要モデルのパラメータ	- 43 -
2.8	ネットワーク分析の応用技術	- 44 -
2.8.1	モデル化要素の拡大	- 44 -
2.8.2	トランジット配分モデル	- 44 -
2.8.3	情報提供の評価モデル	- 44 -
2.8.4	容量制約型利用者均衡配分モデル	- 45 -
2.8.5	時間帯別配分モデル	- 46 -
2.8.6	非線形感度分析	- 46 -
2.8.7	MPEC アプローチ	- 47 -
2.9	ロードプライシング	- 49 -
2.9.1	最適課金	- 49 -
2.9.1.1	ネットワークを考慮した最適課金	- 50 -
2.9.1.2	最適課金の徴収法	- 51 -
2.9.2	セカンドベスト課金	- 51 -
2.9.2.1	単純なネットワーク対象	- 51 -
2.9.2.2	一般のネットワーク対象	- 52 -
2.9.3	動的分析	- 52 -
2.9.4	利用者の異質性	- 53 -

2.9.4.1	時間価値の異質性	- 53 -
2.9.4.2	時間単位の計測	- 55 -
2.9.4.3	製品差別化	- 56 -
2.9.4.4	異質性を考慮したモデルの展開例	- 56 -
2.9.5	ロードプライシングの政策評価例	- 56 -
2.9.5.1	行動モデルを用いた分析	- 56 -
2.9.5.2	実都市圏でのシミュレーション分析	- 57 -
2.9.5.3	適用の展開例	- 57 -
2.9.6	ロードプライシングの適用上の問題点の分析	- 57 -
2.9.6.1	需要関数の推定	- 57 -
2.9.6.2	パレート改善混雑課金	- 58 -
2.9.6.3	分配インパクト	- 58 -
2.9.6.4	地域経済へのインパクト	- 58 -
2.9.6.5	受容性の心理構造分析	- 59 -
2.10	道路投資による誘発交通の分析	- 60 -
2.10.1	誘発交通概論	- 60 -
2.10.2	研究の分類	- 63 -
2.10.2.1	特定の施設についての事例研究	- 63 -
2.10.2.2	代理変数に基づく地域事例研究	- 64 -
2.10.2.3	一部の指標に基づく地域事例研究	- 64 -
2.10.2.4	非集計モデル	- 65 -
2.10.2.5	モデル予測とシミュレーション	- 65 -
2.10.3	弾力性分析の整理	- 65 -
2.10.3.1	シミュレーション分析	- 67 -
2.10.4	空間経済システム・モデルの適用状況	- 67 -
2.10.4.1	土地利用・交通モデル	- 67 -
2.10.4.2	そのほかの地域計量モデル	- 69 -
2.10.5	本研究の対象とする誘発交通	- 69 -
2.11	既存研究の総括	- 71 -
2.11.1	ネットワーク均衡モデルの実都市圏への 適用に向けての課題の整理	- 71 -
2.11.2	ロードプライシング研究の動向	- 72 -
2.11.3	道路交通による誘発交通の分析	- 72 -
第3章	大規模都市圏における交通需要統合型 ネットワーク均衡モデルの構築	- 73 -

3.1	はじめに	- 73 -
3.1.1	研究の背景と目的	- 73 -
3.1.2	ネットワーク均衡モデルの実都市への適用研究のレビュー	- 73 -
3.2	トリップ目的別発生・分布・分担・配分統合型 確率的交通ネットワーク均衡モデル	- 78 -
3.2.1	モデルの定式化	- 78 -
3.2.1.1	経路選択行動	- 78 -
3.2.1.2	目的地選択行動	- 79 -
3.2.1.3	手段選択行動	- 79 -
3.2.1.4	トリップ発生選択行動	- 80 -
3.2.2	等価な最適化問題	- 80 -
3.2.3	計算アルゴリズム	- 82 -
3.3	入力データ・設定条件	- 84 -
3.3.1	ODデータ・ネットワーク・各種設定条件	- 84 -
3.3.2	トリップ目的区分と発生モデルの扱い	- 86 -
3.4	パラメータの推定	- 88 -
3.4.1	パラメータの推定方法	- 88 -
3.4.2	パラメータ推定結果	- 88 -
3.4.2.1	経路選択モデル	- 89 -
3.4.2.2	選択枝集合の確率的形成を考慮した 目的地選択モデルの推定	- 89 -
3.4.2.3	手段選択モデル	- 92 -
3.4.2.4	トリップ発生選択モデル	- 92 -
3.5	均衡計算結果	- 92 -
3.5.1	計算アルゴリズムの比較	- 92 -
3.5.2	現状再現性	- 95 -
3.6	本章の成果と結論	- 97 -
第3章	付録A 1 等価性の証明	- 99 -
第3章	付録A 2 ゾーンシステム・ネットワーク	- 103 -

第4章 誘発交通を考慮した混雑地域における道路整備

	の利用者便益推定	- 109 -
4.1	はじめに	- 109 -
4.2	誘発交通関連のレビューと本章の方針	- 110 -
4.2.1	誘発交通問題のモデル化に必要な要件	- 110 -
4.2.2	既存モデルのレビュー	- 111 -

4.2.2.1	マクロ計量モデル	- 111 -
4.2.2.2	四段階推定法とその改良法	- 112 -
4.2.2.3	非集計行動モデルの応用	- 112 -
4.2.2.4	ネットワーク統合モデル	- 113 -
4.2.3	本章の方針	- 113 -
4.3	マルチクラス Nested Logit 型ネットワーク 統合均衡モデルの定式化	- 114 -
4.3.1	代表的個人の行動	- 115 -
4.3.2	行動モデルと整合的な便益指標と均衡解の算出法	- 117 -
4.3.3	パラメータの条件について	- 119 -
4.4	供給者の行動と料金形成原理を含めた ネットワーク上での便益計測モデル	- 120 -
4.4.1	モデルの定式化	- 120 -
4.4.1.1	仮定	- 120 -
4.4.1.2	社会的余剰	- 121 -
4.4.1.3	市場均衡条件	- 121 -
4.4.2	社会的純便益の基本定義	- 122 -
4.4.3	料金形成原理に応じた整備便益の考察	- 123 -
4.4.4	現実の都市における計測	- 123 -
4.5	現実都市への適用と推定事例	- 124 -
4.5.1	前提	- 125 -
4.5.2	対象都市圏における設定	- 125 -
4.5.3	誘発交通による便益の歪みの計測法	- 129 -
4.5.4	誘発交通の推定例	- 129 -
4.5.5	フィードバックによる近似解法の有効性	- 134 -
4.5.6	政策への知見のまとめと議論	- 135 -
4.6	本章の結論	- 137 -
第 4 章 付録 A 1	Oppenheim による便益評価指標について	- 138 -
第 4 章 付録 A 2	直接効用関数が凹関数となる条件	- 139 -
第 4 章 付録 A 3	社会的純便益の導出	- 139 -
第 5 章	ネットワーク均衡条件下での最適混雑料金： 一般化と実都市圏における試算	- 141 -
5.1	はじめに	- 141 -
5.2	既存研究のレビューと本研究の方針	- 142 -
5.3	モデル	- 143 -

5.3.1	定式化	- 143 -
5.3.2	目的関数の経済学的意味と最適課金	- 145 -
5.3.3	システム最適配分	- 146 -
5.3.4	課金解の一意性の政策含意	- 147 -
5.3.5	モデルの一般化	- 147 -
5.4	現実都市圏での試算例	- 148 -
5.5	環境負荷制約の考慮への展開	- 153 -
5.5.1	ピグー税	- 153 -
5.5.2	ボーモル・オーツ税	- 154 -
5.6	本章の結論	- 155 -
第6章	ロードプライシングの所得逆進性とその緩和策	- 157 -
6.1	はじめに	- 157 -
6.1.1	研究の背景と目的	- 157 -
6.1.2	既存研究のレビュー	- 157 -
6.2	モデルの定式化	- 158 -
6.3	時間価値分布の仮定	- 160 -
6.4	単純なネットワークにおける考察	- 161 -
6.4.1	設定条件	- 161 -
6.4.2	初期均衡状態	- 162 -
6.4.3	課金下の均衡状態	- 164 -
6.4.4	課金収入の利用策に応じた均衡状態	- 165 -
6.5	現実都市への適用事例	- 168 -
6.6	本章の結論	- 170 -
第7章	ネットワーク上での混雑を考慮した 最適職住配置手法の構築とその実証研究	- 171 -
7.1	はじめに	- 171 -
7.2	混雑を考えた最適職住配置問題の定式化と解法	- 172 -
7.2.1	既存の最適職住配置問題のレビューとその問題点	- 172 -
7.2.2	混雑を組み込みために考慮すべき点	- 173 -
7.2.3	OD表と経路交通量の両方の最適制御	- 173 -
7.2.4	OD表のみの最適制御	- 174 -
7.2.5	職住配置の対象外の交通の影響	- 176 -
7.2.6	解法と解の一意性	- 176 -
7.3	東京都市圏における実証分析	- 176 -

7.3.1	データ・設定条件,.....	- 176 -
7.3.2	自動車交通利用者の最適割当	- 178 -
7.3.3	鉄道利用者の最適割当	- 180 -
7.3.4	混雑を考えることによる解の変化	- 180 -
7.3.5	一部の通勤者のみを割当変更する場合	- 181 -
7.4	本章の結論	- 183 -
	第7章付録A1 最適割当モデルの解法	- 184 -
第8章	結論	- 185 -
8.1	本研究の成果	- 185 -
8.1.1	ネットワーク均衡モデルの実都市への 適用時に有用となる概念の整理	- 186 -
8.1.2	大規模都市圏における統合需要型 ネットワーク均衡モデルの実用化	- 187 -
8.1.3	都市交通政策の今日的課題に対応した各種政策分析	- 187 -
8.1.4	複数手段ネットワーク上で利用者の 多次元選択行動を明示した理論展開	- 188 -
8.2	今後の研究課題	- 189 -
8.2.1	道路整備による誘発交通のモデル出力値と現実の値の比較	- 189 -
8.2.2	計算アルゴリズム・パラメータ推定法の改良	- 190 -
8.2.3	実務での実用化にむけた検討	- 191 -
8.3	今後の展望	- 192 -
8.3.1	利用者の行動モデルの一般化	- 192 -
8.3.1.1	行動モデルの選択次元の一般化	- 192 -
8.3.1.2	GEV型モデルへの展開	- 193 -
8.3.2	空間経済システム・モデルへの拡張	- 193 -
8.3.3	MPECアプローチへの展開	- 194 -
8.3.4	モデルの動学化	- 194 -
8.3.4.1	理論の動学化	- 194 -
8.3.4.2	政策評価の動学化	- 195 -
	参考文献	- 196 -

図表目次

図-1.1	グラフを用いた理論分析の例	- 2 -
図-1.2	交通計画の工具箱	- 4 -
図-1.3	論文の構成	- 10 -
図-2.1	誘発交通の有無と利用者便益	- 62 -
図-3.1	Nested Logit 型の選択構造	- 78 -
図-3.2	モデルの入出力変数の関係	- 87 -
図-3.3	統合需要型ネットワーク均衡モデルの構造	- 87 -
図-3.4	目的関数の収束状況の比較	- 94 -
図-3.5	トリップ距離帯別にみた手段別分布交通量 の再現状況 (通勤トリップ 全日)	- 95 -
図-3.6	手段別リンク交通量 OD 所要時間の再現性	- 96 -
図-3.7	ゾーンシステム	- 104 -
図-3.8	対象道路ネットワーク	- 105 -
図-3.9	対象鉄道ネットワーク(広域縮尺)	- 106 -
図-3.10	対象鉄道ネットワーク(都心拡大)	- 107 -
図-3.11	都心部多手段ネットワークの重ね合わせ表示	- 108 -
図-4.1	誘発交通の有無と利用者便益	- 113 -
図-4.2	Nested Logit 型の選択構造	- 115 -
図-4.3	新規建設道路の時間帯別交通量・平均速度	- 131 -
図-4.4	均衡解の算出法による便益推定値の違い	- 134 -
図-5.1	各種課金額の設定値と社会的余剰	- 152 -
図-6.1	仮定された時間価値の分布	- 161 -
図-6.2	ネットワーク	- 162 -
図-6.3	時間価値ごとの手段別一般化費用と分担率	- 163 -
図-6.4	課金時(500 円)における手段利用率	- 163 -
図-6.5	課金後の効用水準の変化	- 165 -
図-6.6	課金収入で鉄道料金・駐車料金を 値下げした場合の 効用水準変化	- 167 -
図-6.7	課金と同時に道路容量を増加させた場合の変化	- 167 -
図-6.8	OD パターン別効用水準の変化	- 169 -
図-6.9	課金収入で鉄道の料金を値下げした場合の変化	- 169 -
図-7.1	混雑による所要時間の変化の影響	- 175 -
図-7.2	目的関数の収束状況(最適割当 SO モデル)	- 178 -

図-7.3	自動車交通の最適割当結果.....	179 -
図-7.4	割当対象率を変化させた場合(自動車).....	182 -
図-7.5	総走行台時の削減量の帰着構成.....	182 -
表-1.1	政策分析の章の相互関係.....	10 -
表-2.1	利用者側の行動仮説の緩和を意図したモデルの相互関係.....	26 -
表-2.2	各種確率的利用者均衡モデルの特徴と問題点.....	34 -
表-2.3	分布配分統合モデルの分類と特徴.....	38 -
表-2.4	ネットワーク統合モデルの最適化問題への 変換可能性の整理.....	39 -
表-2.5	さまざまな分析により報告された交通需要の弾力性の範囲....	66 -
表-3.1	ネットワーク統合モデルの適用事例の比較 その1.....	76 -
表-3.2	ネットワーク統合モデルの適用事例の比較 その2.....	77 -
表-3.3	ネットワーク要素数.....	85 -
表-3.4	リンクコスト関数の関数形と主要パラメータ.....	85 -
表-3.5	通勤 通学 手段・目的地・経路選択モデル推定結果.....	90 -
表-3.6	業務 私事 トリップ発生・手段・目的地・経路選択 モデル推定結果.....	91 -
表-3.7	アルゴリズムの比較.....	94 -
表-3.8	現状再現性指標.....	96 -
表-4.1	誘発交通の代表的要因.....	111 -
表-4.2	Nested Logit モデルの主要パラメータ.....	127 -
表-4.3	リンクコスト関数の関数形と主要パラメータ.....	127 -
表-4.4	誘発交通の区分と本研究のモデルの対象.....	128 -
表-4.5	現状再現性指標.....	129 -
表-4.6	交通環境状況の変化率(日合計値).....	130 -
表-4.7	交通状況の変化(都市圏全域, 日合計値).....	130 -
表-4.8	道路整備による利用者便益推定値の比較結果.....	132 -
表-5.1	リンクコスト関数の関数形と主要パラメータ.....	149 -
表-5.2	自動車分担率の現状と最適値.....	151 -
表-5.3	各種課金政策時における社会的余剰.....	151 -
表-6.1	サービスレベルの仮定.....	162 -
表-6.2	課金収入分配後における均衡状態.....	164 -
表-7.1	リンクコスト関数の関数形とパラメータ.....	177 -

表-7.2	自動車交通の最適割当による交通状況変化.....	- 179 -
表-7.3	自動車交通の最適割当による交通環境の変化	- 179 -
表-7.4	鉄道利用交通の最適割当	- 180 -

記号表

本論文において頻繁に利用される基本的な記号を以下にまとめる．その他の記号は，その度に定義される．

- i : 利用者クラスを区別する記号.
- r : 起点ノードを区別する記号.
- s : 終点ノードを区別する記号.
- m : 交通手段を区別する記号.
- k : 経路を区別する記号.
- a : リンクを区別する記号.
- x_a : リンク a の交通量. 手段 m , クラス i で区別する場合は x_a^{im} .
- t_a : リンク a の所要時間. 手段 m で区別する場合は t_a^m .
- p_a : リンク a の料金. 手段 m で区別し, クラス i 別に異なる場合は p_a^{im} .
- f_k^{rs} : OD ペア rs 間の経路 k の交通量. 手段 m , クラス i で区別する場合は $f_{m,k}^{i,rs}$.
- q_{rs} : OD ペア rs 間の OD 交通量. 手段 m , クラス i で区別する場合は q_{rs}^{im} .
- O_r : 起点 r からの発生交通量. 手段 m , クラス i で区別する場合は O_r^{im} .
- D_s : 起点 s への集中交通量.
- $\delta_{a,k}^{rs}$: リンク経路接続行列. 手段 m で区別する場合は $\delta_{a,k}^{m,rs}$.
- τ^i : 利用者クラス i の時間評価値.
- θ : 行動モデルのパラメータ.
- c_k^{rs} : OD ペア rs 間の経路 k の経路費用.
- S_{rs} : OD ペア rs 間の期待最小費用.

本学位請求論文に関連する著者の刊行論文リスト

審査付き学術雑誌

- [1] 円山琢也, 原田昇, 太田勝敏: 誘発交通を考慮した混雑地域における道路整備の利用者便益推定, 土木学会論文集, No. 744/IV-61, pp. 123-137, 2003.10.
- [2] 円山琢也, 原田昇: ネットワーク上での混雑を考慮した最適職住配置手法の構築とその実証研究, 都市計画論文集, No. 38-3, pp. 517-522, 2003.10.
- [3] 円山琢也, 原田昇, 太田勝敏: Nested Logit 型確率的利用者均衡条件下での最適混雑料金, 土木計画学研究・論文集, Vol. 20, no. 3, pp.555-562, 2003.9.
- [4] 円山琢也, 原田昇, 太田勝敏: ロードプライシングの所得逆進性とその緩和策に関する研究, 都市計画論文集, No. 37, pp. 253-258, 2002.10.
- [5] 円山琢也, 原田昇, 太田勝敏: 大規模都市圏への交通需要統合型ネットワーク均衡モデルの適用, 土木計画学研究・論文集, Vol. 19, no. 3, pp. 551-560, 2002. 9.

審査つき国際会議 Proceedings

- [6] Maruyama, T., Harata, N., and Ohta, K.: Estimation of user benefits of road investment considering induced traffic with combined network equilibrium model in Tokyo area, Proceedings of European Transport Conference 2002, CD-ROM, 2002.9.
- [7] Maruyama, T., Harata, N., and Ohta, K.: An evaluation of road pricing policy considering both road and railway network congestion, Proceedings of International Symposium on Urban Planning 2002, 2002.8.
- [8] Maruyama, T., Harata, N., and Ohta, K.: An application of combined stochastic user equilibrium model to the Tokyo area: combined trip distribution, modal split and assignment model with explicitly distinct trip purposes, in Wang, K.C.P. et al. (eds.) Traffic and Transportation Studies, Proceedings of ICTTS 2002, Vol. 1, pp 746-753, 2002. 7.
- [9] Maruyama, T., Muromachi, Y., Harata, N., and Ohta, K.: The combined modal split/assignment model in the Tokyo metropolitan area, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 4, No. 2, pp. 293-304, 2001. 10.

本学位請求論文の第3章は, [8],[9]を発展させた[5]の内容を加筆修正したものである。また, 第4章は [1],[6]の内容を, 第5章は [7]を発展させた[3]の内容を, 第6章は [4], 第7章は [2]の内容を, それぞれ加筆修正して取りまとめたものである。なお, 第2章は本論文でオリジナルに執筆した内容である。

第1章 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 政策評価のための理論分析と現実との乖離

都市における交通問題は、数多くの人々に関わる身近な問題であり、その解決のための計画や政策について、さまざまな意見が存在する。しかしながら、その議論の中には、観念的・情緒的なレベルのものも少なくない。例えば、混雑地域において道路混雑を緩和するために新たな道路を建設するという計画については、道路容量の増加は、新たな交通量の増加を招くだけで、結局混雑は緩和されず、道路投資は無駄である、という主張が存在する。また、道路利用に対する混雑課金政策の導入についても、課金は低所得者に対して相対的に大きな影響を与え、所得間公平性の問題が生じるため望ましくないという反対意見がある。しかしながら、財源制約下で多数の主体に関わる都市・地域の計画や政策においては、独善性、恣意性の混入を極力排除した科学的、客観的な手法を用いた政策判断が求められる。

この判断においては、社会経済構造を単純化・抽象化した理論モデルを用いた考察から得られる知見は少なくない。上述の道路建設による誘発交通の問題についての最も単純化した議論は、空間、時間を捨象した、横軸に交通量、縦軸に交通費用をとったグラフにおける需要曲線とトリップ費用曲線を用いたものである(図-1.1)。誘発交通が存在しない場合は、垂直な需要曲線が想定され、誘発交通が存在する場合は、需要曲線が傾いているときに相当する。これらを用いて、誘発交通が存在することによる道路投資の便益のゆがみなどを、定性的に議論することが可能となる。

これらの理論的考察は、経済学を中心に行われてきた。そこでは、さらに、道路混雑に対するファーストベストな対策として、混雑課金が古くから提案され、その課金額の最適設定法や前述した政策の所得間公平性の議論についても同様に単純なグラフを用いた議論がなされてきた。

これら理論的議論は、定性的なものでありながら、一般性・規範性に優れている。しかしながら、現実の政策判断に必要な定量的な評価値を得るためには、グラフで想定されている需要曲線、トリップ費用曲線をどう推定するのか、ネットワークから構成される現実の都市施設をどのように考えればよいのかという問題があり、これらの議論は現実の政策評価に直接利用できるものではなかった。すなわち、単一のリンク、あるいは極端に単純化されたネットワークを

用いて導かれる理論が、現実の複雑なネットワーク上で当てはまるのか、また、経路選択、手段選択、時刻選択などさまざまな利用者の行動は、単純な需要曲線で表現できるのか、あるいは、それをどのように推定するのかという問いに対して答えるのは容易ではなかった。

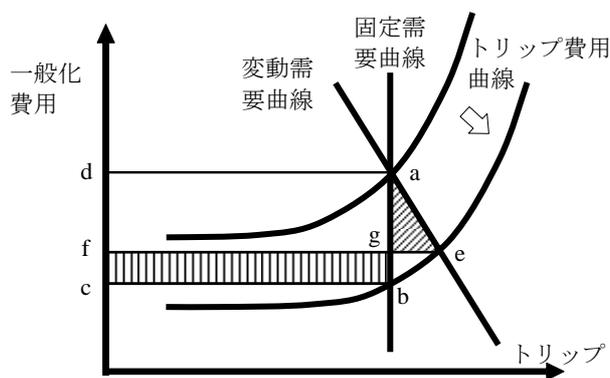


図-1.1 グラフを用いた理論分析の例

注) このグラフによる分析については、
第2章、第4章でも詳述する。

1.1.2 工学的に実用的なモデルによる評価の不備

一方、実際の都市圏において現実の評価を行うために、工学的に実用的なモデルが数多く開発され、実務の現場で幅広く用いられてきた。四段階推定法に基づく都市圏レベルの交通需要予測、交通政策分析はその典型といえよう。しかし、四段階推定法は、工学的な実用性の一方で、行動理論との整合性、モデル内部の整合性に問題があることが古くから指摘され、この欠点により、前述した誘発交通などの扱いが不十分となっており、それらの分析に有益な情報を提供しうるものではなかった。

工学的な実用性を重視したモデルを用いた予測、分析が一般的となったのは、現実都市の複雑なネットワークや、利用者の多種多様な行動の集積である需要曲線を想定した場合、理論の厳密性、一般性を維持した展開は困難と考えられていたためと思われる。

1.1.3 都市交通政策の多様化

都市の交通に関わる問題は、自動車の交通混雑、大気汚染といった局所的なものから、運輸部門起因の CO₂ 排出による温暖化問題など全地球レベルまで、依然深刻であり、これらへの対策は、先進国、途上国に共通する都市交通計画の重要な政策課題である。

これらの問題に対処する従来の方法論は、交通混雑の原因となる道路の容量不足を解消すべく、将来想定される交通需要にみあうように道路容量を拡大するというものであった。しかしながら、既存市街地での新規道路の建設は、用地取得や財源の制約から厳しいという実行上の問題点があるほかに、現実に建設されたとしても、前述したように道路のサービスレベルが上昇することにより誘発交通が発生し、道路の整備効果は、当初予期していたものにならないという指摘もなされている。

これらのことから、近年、交通計画において、将来交通需要を予測して、供給と需要を調整し、交通混雑を防止するというアプローチの重要性が主張されている。英国におけるフレーズを借りれば、「予測して供給する(Predict and Provide)」から「予測して予防する(Predict and Prevent)」への交通政策のパラダイムシフトである。

このパラダイムシフトは都市交通計画、都市交通政策の多様化を意味する。交通計画の対象の変遷は、図-1.2の「交通計画の工具箱」としてまとめられている。1960年代の交通計画の主役は、図-1.2の右下の長期的な容量拡大を目指す供給サイドのものであった。それから、右上の交通施設の運用管理が追加され、1990年代からは左上の需要サイドの調整も交通計画の範囲とされた。さらに、最近では左下の長期的な交通需要管理と位置づけられる、交通負荷を軽減するような土地利用計画に取り組む先進事例も見られる。

これら多様な交通計画、交通政策を評価しうる分析手法が望まれている。

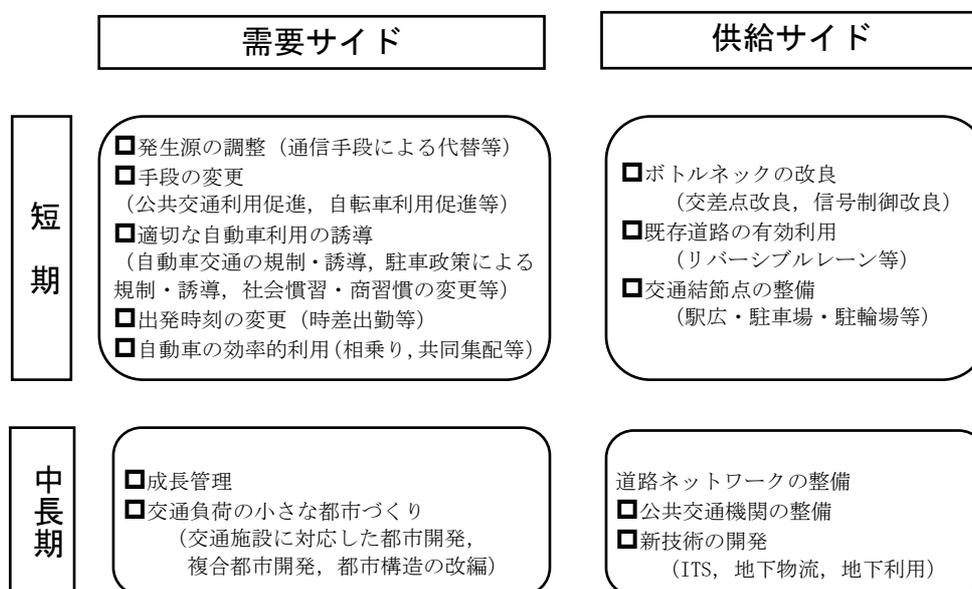


図-1.2 交通計画の道具箱

出典) 原田 (2002)¹⁾ p.5 一部加筆修正

1.2 研究の目的

本研究では、現実都市の複雑なネットワークや、利用者の多種多様な行動を想定しながらも、

- ・ モデル内部の整合性(特に、混雑現象によって変化するサービスレベル変数の整合性)
- ・ ミクロ経済理論に基づく行動理論との整合性

以上 2 つの整合性を堅持した、論理性に優れた政策分析フレームの構築が、ネットワーク均衡モデルを応用することで可能となることを明らかにし、その特徴を生かした、現実の都市圏レベルの交通政策分析を行うことを目的とする。

研究の背景で述べたように、以上のような整合性と論理性に優れた政策分析フレームの実都市圏での構築は、従来非常に困難と思われていたものである。

なお、ネットワーク均衡モデルの概念自体は、目新しいものではなく、最近では、実都市圏への適用事例も少なからず存在する。しかしながら、残念なことに、既存研究では、これらのモデルは四段階推定法の代替案としての工学的

需要予測ツールとしてしか利用されていなかった。すなわち、モデルの内部整合性に優れた政策評価モデルとしてしか利用されてこなかった。モデルが行動理論と整合性があることを利用した分析例は意外なほど少なかった。本研究では、この点に着目し、単純なグラフを用いて展開されていた理論考察のいくつかは、複数交通手段を考慮した現実の大規模なネットワーク上で、利用者の異質性を考慮しながら利用者の多次元選択行動を明示した場合にも展開可能であることを示し、その知見を生かした現実都市圏での分析を行う。

また、ネットワーク均衡モデルの既存研究の多くは理論の構築、モデルの数理特性の把握、解法の構築にとどまっており、それを交通計画の実務で利用していくために検討が必要な事項の整理が十分とはいえなかった。しかし、モデルは、実際の評価に適用されて初めて土木計画、交通計画に有用なツールと言えるだろう。この問題意識のもと、本研究では、最新の研究を含む広範なレビューをもとに、ネットワーク均衡モデルの実都市圏への適用時に有用となるモデル拡張の考え方、検討が必要な事項を整理する。また、それらを踏まえ、開発するモデルを現実の都市圏の交通需要予測・便益評価にも適用可能な、従来の四段階推定法に代替しうる実用性を兼ね備えたものとする。また、それらを踏まえ、開発するモデルを現実の都市圏の交通需要予測・便益評価にも適用可能な、従来の四段階推定法に代替しうる実用性を兼ね備えたものとする。

需要予測モデルとしての実用性を高めるためには、モデルが高い現況再現性を示すことが求められ、これは、実務での適用で特に重要視される点である。現況再現性の向上のためには、一般にモデルの改良が必要となる。ただし、ネットワーク均衡モデルの改良については、いくつかの方向性があり、どの方向に向かうかについて注意深い取り扱いが必要と考える。そこで、次節では、現実の交通計画の需要予測で用いるモデルの要件を踏まえて、本研究で採用するモデル構築の基本的考え方を明示しておく。

1.3 研究の基本方針

ここでは、本研究で用いるネットワーク均衡モデルの発展形についての議論をいくつか紹介し、本研究のモデルを構築するにあたっての、基本的な設計思想ともいべき考えをまとめておく。

第2章でも詳述するが、ネットワーク均衡モデルには、

- ・ モデルと等価な最適化問題が構成可能な場合
- ・ 等価な最適化問題が構成できず、変分不等式・不動点問題を用いた解析が必要な場合

の2種類がある。等価な最適化問題が構成可能な場合については、モデルの解

の一意性，アルゴリズムの収束性が容易に確認される利点がある一方，モデル内部の利用者の行動，混雑現象の表現法等の仮定は，比較的単純なものに限られる．一方，変分不等式・不動点問題を用いたモデルでは，緩やかな仮定を採用できる一方で，解の一意性，アルゴリズムの収束性は不明な場合も少なくない．

Wu and Lam (2003)²⁾は，このことについて，

統合モデルの開発においては，現実描写が詳細であること(behavioral richness)と計算上の扱いやすさ(computational tractability)のバランスへの努力が必要であるという合意がある．

(p. 57)

と表現している．

Bar-Gera and Boyce (2003)³⁾は，最適化問題としてネットワーク均衡モデルを構築することによる限界への対応に関して次のように述べている．

2次方程式のような単純な数学の問題は，複数の解を持ちうる．ある局面においては，どのような解を用いても十分であろうが，交通のモデリングにおいては，そうではない． A と B の2つのシナリオを考えよう．そして，各シナリオに応じて，モデルは複数の解 $A_i; i=1, \dots, n; B_j; j=1, \dots, m$ を持つとしよう．これらすべての解を見つけることは可能であろうか．また，各シナリオでひとつの解を利用する場合，それらの解の差がシナリオの差によるものかといえるのだろうか．それは，たまたま選択された A_i, B_j に特有なものではないかもしれない．われわれは，多くの場合，モデルとアルゴリズムが不適切な挙動(ill behaved)をするリスクを避けるために，凸型の最適化問題で交通システムを表現することによる限界を受け入れたほうが望ましいと信じる．(p. 409)

本研究は，このBar-Gera and Boyce (2003)³⁾の主張に同意し，その考えに沿ってモデルを構築し分析をすすめることにする．

本研究のモデルを構築するにあたっての，基本的な設計思想ともいえるべき考えを，次のようにまとめる．

交通計画における需要予測では、そのモデルの論理性、科学性、客観性を重視すべきである。また、需要予測が目的とするのは各種政策代替案の比較であり、その比較の論理性、客観性を保つためには、解の一意性が保証されたモデルが有効である。そのモデルの現状再現性、現象記述性を高めるために改良を加える際にも、モデルの特徴である解の一意性と、モデル内部の整合性が保持される方法を用いることが望ましい。また、アドホックな設定、ヒューリスティックな解法の使用は、その論理性、客観性に問題があるため、その使用は極力排除されるべきである。

Lee (1994)⁴⁾は、計画における科学の要件として、

- (1) 透明性(Transparency): ブラックボックスでないもの
- (2) 再製可能性(Replicability): コンピュータコードの存在有無に関わらず結果が再現可能であること
- (3) 実地的な評価(Pragmatic Evaluation): 実際に計画作業の改善に役に立つことを示す

を挙げている。

一意性の保証されたモデルは、同じ条件下であれば、誰が計算しても同じ結果が得られるもので、これら(1) 透明性、(2) 再製可能性 の面で明らかに有用といえる。また、本研究は、実際の都市への適用も精力的に行い、(3) 実地的な評価を行うことを目的としている。

本研究で採用するネットワーク均衡モデルは、すべて等価最適化問題が構成可能であり、解の一意性が確保されたものである。本研究のモデルについても変分不等式などの概念を用いることで、より高度なモデルの定式化は、十分可能である。しかしながら、特に本研究が意図している大規模なネットワークでの適用を考えた場合、まず一意性の確保されたモデルを構築し、そのモデルの基本的な挙動を確認することが重要であると考えられる。

一意性の確保されないモデルの利用は、即座に否定されるべきものではないことは、言うまでもない。特に、複数均衡解が存在するモデルでも、その解が例えば劣位解、優位解と解釈しうるのであれば、そのモデルは、政策判断に有用な知見を提供しうる。しかしながら、本研究の対象とするネットワーク均衡モデルにおける複数解とは、不定解ともいえるべきものが多く、それらの解の違いが意味することの判断は困難となり、Bar-Gera and Boyce (2003)³⁾の言う不適切な挙動(ill behaved)のリスクが生じるのである。

モデルの解の一意性が確保されるようにモデルを定式化し、アドホックな設定やヒューリスティックな解法の利用を排除することで論理性を高めることは、上述のように交通計画に用いる需要予測モデルとして、大きな利点となることを強調しておきたい。

1.4 研究の構成

本研究の章構成は、図-1.3のようにまとめられる。本論文は、全8章から構成され、第2章では、本研究に関連する既存研究の動向を整理している。第3章では、本研究の政策分析の基礎となるモデルの構築を行い、第4章から第7章は、このモデルを用いた政策分析を行っている。第4章は、既存の工学的実用性を重視したモデルと本研究のモデルによる政策評価の違いが端的に示される章である。理論の厳密性、一般性を維持した展開及び整合性を活かした分析例は、第5、7章および第4章の一部に含まれる。また、第5、6、7章は、都市交通政策の多様化に応じた内容ともなっている(表-1.1)。

各章の概要を以下に述べる。

第2章では、本研究の対象とするネットワーク均衡モデル、ロードプライシング、誘発交通問題に関する近年の研究を整理しまとめている。ネットワーク均衡モデルについては、最新の理論展開について整理すると同時に、本研究独自に、確率的利用者均衡モデルの実用化の際の問題点の整理、統合需要型モデルにおける平均乗車人員・手段別の時間価値の設定法が等価最適化問題の構成可能性に与える影響をまとめている。ロードプライシングに関しては、ネットワークを考慮した最適課金、セカンドベスト課金を中心に膨大な既存研究を整理している。誘発交通に関しては、既存の誘発交通の実証研究について、考え方の整理を行い、既存研究における道路交通需要の弾力性の推定値をまとめるとともに、既存の土地利用・交通モデルの適用状況を概観し、本研究で交通市場のみに分析対象を限定する意義を述べる。

第3章では、実際の東京都市圏を対象に、本研究の政策評価・政策分析の基礎となるモデルの定式化、解法の構築、現状再現性の確認を行っている。このモデルは、大規模な多手段の交通ネットワークを対象に、鉄道の混雑現象を考慮しつつ、発生レベルまでを統合している点で、先進的といえる。

第4章では、第3章で構築したモデルの有用性が端的に表現される政策評価の例として、誘発交通を考慮した混雑地域における道路整備の利用者便益推定を行う。需要予測と統合的な便益評価、セカンドベストの経済となる現実の都市圏での便益評価における留意点を踏まえた検討、誘発交通量の試算と、その

便益評価に与える影響を詳細に検討する内容である。また、図-1.2の交通計画の工具箱の中では、右下に区分される伝統的な交通計画に対応した政策分析である。

道路混雑に対する政策としての道路容量の拡大は、古くから知られた供給側のアプローチであるが、その政策は第4章で述べる誘発交通の存在とも関連して、ファーストベストな混雑対策ではないということが、特に経済学者を中心に主張されてきた。経済学者は、混雑に対する混雑課金こそがファーストベストな政策であると主張する。しかしながら、特に経済系の研究における混雑課金理論は、利用者の行動記述という観点でも、空間的表現の観点でもきわめて単純なフレームに基づいていた。

第5章では、これらの問題意識から、最適混雑課金理論の拡張とその料金レベルの実都市圏での試算を行う。具体的には、利用者の交通行動が複数の交通手段を含むネットワーク上でランダム効用理論に基づく **Nested Logit** 型の多次元選択行動として記述される場合の最適混雑課金を考察する。その結果、限界費用課金がモデルと整合的な社会的余剰の最大化をもたらす最適課金となることを簡明に証明、解説する。この証明をもとに、現状の料金制度下と、最適混雑課金が実行できた場合と、現実に構想されている都心部への課金政策を実施した場合の、それぞれの社会的余剰を試算し、それらの値を比較し考察を加える。

第6章では、混雑課金施策の社会厚生的な問題点を、同じくネットワーク均衡モデルを用いて考察している。特に所得逆進性の問題に着目し、その問題が生じることを単純なネットワークで確認し、課金収入でのそれらの解決策を探り、現実の都市圏を対象としても考察を進める。第5章、第6章は、図-1.2の交通計画の工具箱の中では、左上に区分される交通需要管理の一例である混雑課金についての政策分析である。

第7章では、中長期的な交通政策との関連が深い都市構造と交通現象の関係について分析している。具体的には現状の職住の分布は変化させずに、職住の組み合わせのみを変化させるという職住最適配置問題を考える。既存の職住配置問題は、自動車の混雑現象、現実の交通ネットワークの情報が十分に考慮されているとは言いがたい。本章では、ネットワーク均衡モデルを利用して、職住最適配置の議論を、理論的な厳密性を保ちつつ、ネットワーク上での各リンクでの混雑現象を考慮した形で展開し、東京都市圏を対象にその実証研究を行う。これらの分析は、図-1.2の交通計画の工具箱の中では左下に位置しうる長期的な **TDM** 施策の一案として、職住再配置政策を考える場合の、基礎的な情報提供としての意義を持つ。

第8章では、本研究の成果をまとめ、今後の課題と展望を述べる。

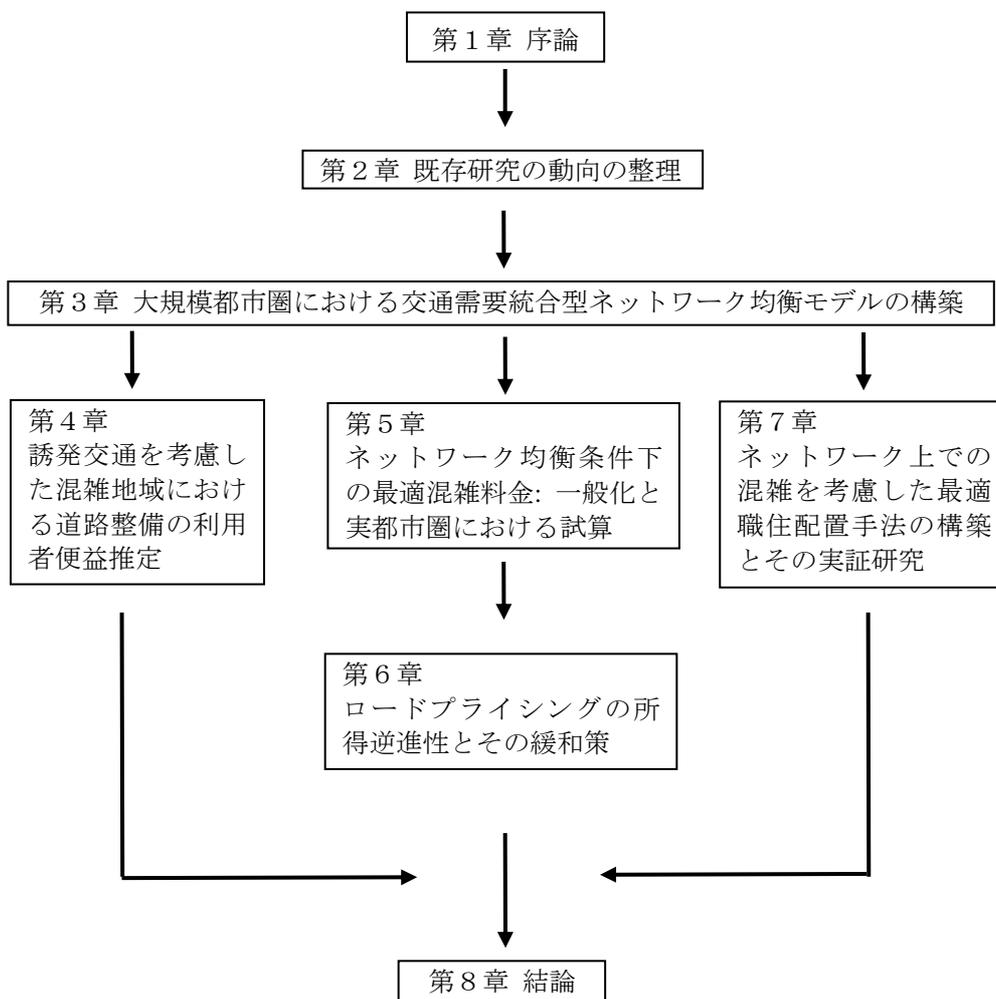


図-1.3 論文の構成

表-1.1 政策分析の章の相互関係

章	政策	理論の展開	整合性を活かした政策分析	都市交通政策の多様化に応じた分析	利用するモデル
第4章	道路整備	○	○	-	発生・分布・分担・配分統合モデル
第5章	混雑課金	◎	◎	◎	分担・配分統合モデル
第6章	混雑課金	-	○	◎	分担・配分統合モデル
第7章	職住再配置	◎	○	○	分布・配分統合モデルの応用

第2章 既存研究の動向の整理

本章では、本研究で頻繁に利用する分析手法であるネットワーク均衡モデルとロードプライシング・誘発交通の分析手法を中心に既存研究の最新の動向を紹介し、それらの整理を行う。特にネットワーク均衡モデルについて、既存研究では十分な整理がされていなかった、実都市圏への適用時に有用となるモデルの拡張の考え方、検討すべき課題について取りまとめることを主な目的としている。

章の構成は、2.1 で交通需要予測手法・便益評価手法を概観したのち、2.2-2.8 にかけて、ネットワーク均衡分析の基礎的な概念、最新の研究動向を紹介し、2.9 でロードプライシング、2.10 で道路投資による誘発交通の関連研究をレビューしたのち、これらを2.11 でまとめるものである。

2.1 交通需要予測・便益評価手法の概説

2.1.1 需要予測の意義

都市交通計画や土木計画といった計画学問分野に対して交通需要予測という分析手法が果たしてきた役割は極めて大きい。交通需要予測によって、ある政策や計画を実施した場合に、施設の利用者数がどれだけ変化し、その計画がどのような主体にどのようなインパクトを与えるのかを、具体的に算出することが可能になる。このプロセスは、利用可能な客観的なデータと、そのデータによって同定される将来にわたって安定的と想定される因果関係に基づくものである。

この客観性は、多主体が関わる社会経済システムの将来意思決定問題を学問として扱う場合に不可欠となる科学性を担保し、もし需要予測に用いられるデータやモデルの中身が公開されるならば、透明性も高まることになる。

山内、竹内 (2002)⁵⁾は、

交通の需要予測は (中略)、他の分野の需要予測と比べて理論上また実務上きわめて進んだ分野である。(中略)需要予測手法を理論に基づいてシステムティックに、かつ実務的なレベルまで浸透させたという点において、交通需要予測に匹敵するものはないと考える。(pp. 101-102)

と述べている。

2.1.2 便益評価の現状と課題

交通計画や土木計画において需要予測と対になって重要な役割を果たしてきたのが、費用便益分析を代表とするプロジェクト評価法である。プロジェクト評価については、森杉 (2003)⁶⁾によってまとめられており、最近では、実務での適用にむけたガイドライン、マニュアルが数多く整備されている。交通事業の費用便益分析の現状と課題については、加藤 (2004)⁷⁾がまとめており、本来、一体的に行われるべき需要推計と便益評価が、現状では分離してしまっている問題点などを指摘している。需要予測と便益評価を分離作業としてとらえると、意図せずとも、評価にバイアスが混入し政策判断の科学性、客観性が保証されないことになる。

最近、城所(2003)⁸⁾は、交通プロジェクトの便益評価について、理論モデルを用いた体系化を試みている。ただし、その論文では、上述した、交通需要予測との整合性という視点が欠けているように見受けられる。それに対し、Bates (2003)⁹⁾は、交通モデルを用いた経済評価について、理論と実務の幅広い観点から議論を試みている。

ミクロ経済理論と統合した需要予測、便益評価手法として、上田ら (2000)¹⁰⁾は、Morisugi and Lee (1994)¹¹⁾、Morisugi, *et al.* (1995)¹²⁾によって構築された古典的消費者行動理論に基づいた交通需要予測モデルを地域間交通に適用し、便益計測を行っている。しかしながら、それらのモデルでは混雑現象は扱われていない。

経済理論に立脚し、ネットワーク上での混雑も整合的に考慮した需要予測、便益評価は、赤松(1997)¹³⁾が紹介しているように、ネットワーク統合均衡モデルの枠組みで実現できるのであるが、このことは、一般にあまり知られていない。また、後述するようにネットワーク統合均衡モデルの実証研究は十分ではなく、その点も、このモデルの実務への普及のネックとなっていた。

2.1.3 四段階推定法の対比としての非集計行動モデルの発展

従来から都市圏交通計画の評価に用いられてきた需要予測手法としての、四段階推定法は、長年の適用実績を元に、経験的なノウハウが蓄積されて実用的な手法として確立している。四段階推定法の意義は、1950年代における統計的手法、情報処理技術、計算機の性能とコストの制約下で、交通需要の全体傾向を捕らえる実用的な手法として機能してきた点にある。

しかしながら、この四段階推定法に対しては、古くから、(1) モデルの基礎と

なる因果関係が不明確であること、(2) モデルの同定に多くの判断が入り推定手法も統計的検定を許すものとなっていないこと、(3) 四段階相互の変数間の整合性が取れていないこと、(4) 交通サービス特性の影響が、トリップ発生や分布の段階に十分に取り入れられていないこと、といった問題点が指摘されてきた(太田, 1988)¹⁴⁾。

また、第1章で述べた多様な交通政策に対する評価に対応し切れていない。例えば、道路容量の拡大にともなう誘発交通の扱いは、きわめて不十分である。また混雑料金の導入による手段の変更、目的地の変更行動などは考慮不十分である。これらは、上述したモデルの技術的問題点のうち(3),(4)に原因がある。

1970年代から開発されてきた非集計行動モデルは、これらの問題点のいくつかを解消してきた。すなわち、ランダム効用理論に基づいた一貫性のあるモデルが構築され、交通行動のさまざまな場面に適用されてきた。しかしながら、このようなモデルの適用は、交通行動の一部に限られ、都市圏交通計画全体を評価可能なものではなかった。特に、道路交通政策の評価では必須となる混雑現象を扱うものではなかった。また、基本的にトリップベースのモデル化が行われ、派生需要である交通の根源であるアクティビティについての扱いも不十分であった。

近年、Bowman and Ben-Akiva (2001)¹⁵⁾は、活動のスケジューリングに基づいた交通需要モデルの一例を示している。また、Jovicic and Hansen (2003)¹⁶⁾は、コペンハーゲンを対象とした発生レベルまでをNested Logit型で統合したモデルを提示している。彼らのモデルはツアーを組み込んでいる点が優れている。ただし、混雑現象の上位モデルへの影響についてはフィードバックが考慮されているのみで完全な整合性が保たれているわけではない。

2.1.4 ミクロ行動ネットワーク交通流シミュレーション

既存の需要分析手法における時間軸の欠如、トリップベースであること、アクティビティを考慮していないといった問題点を根本的に解決することを意図して、1990年代の後半からは、時間軸を考慮した一日の生活・交通行動を個人単位で再現しようとするミクロ活動・交通行動シミュレーションが開発されてきた。このシミュレーションは、計算機的能力向上もあいまって、動的な交通流シミュレータとの組み合わせにより都市圏レベルでの適用計算もなされている。ただし、このシステムは、現状では計算可能であることが示されているが、モデル内部の変数の不整合性の問題、あるいは、中長期的な将来需要予測モデルに用いる場合に、モデルで想定した多数の因果関係が将来も保持しうるかと

いった点の検討が十分とはいえない。

赤松(2002)¹⁷⁾は、

少なくとも、長期・広域の交通計画のための分析が、詳細かつ大規模な BNS[マイクロ行動ネットワーク交通流シミュレーション]によってなされるという未来は考え難い。さらに比較的短期の交通管理・計画においても、広域ネットワークを対象とすると、(個人行動を単位とする)大規模 BNS の有効性には、筆者は懐疑的である。(p. 30, [カッコ]内は筆者が追記)

と、このモデルの有効性に否定的な見解を示している。その理由として、1)モデル推定に必要なデータ入手の困難性、2) 将来予測時の入力変数の設定可能性の問題、3) システムの不安定化の可能性、を挙げている。

2.1.5 工学的に実用的なモデルの問題点

工学的実用性を重視したモデルでは、アドホックな設定・ヒューリスティックな解法が用いられることが多い。言い換えるならば、

- ・ アドホック(ad hoc): 都合のいい、その場しのぎ的な設定
- ・ ヒューリスティック(heuristic): 発見的な、経験則的な、根拠のない解法である。

交通配分モデルにおけるアドホックな設定としては、モデルの現状再現性が高まるように、リンク QV(交通量-速度関係)式のパラメータや容量を変更する例が挙げられる。このように設定された QV 式を用いた配分結果における OD 間所要時間などの出力値の信頼性は低いものとなる。

ヒューリスティックな設定としては、利用者均衡モデルの近似解法としての分割配分法の利用が代表例である。この場合、分割回数に応じて結果が変化するなどの問題点が挙げられる。

また、四段階推定法の段階間の不整合性を解消するためのフィードバック計算も一種のヒューリスティックである。このフィードバックモデルの問題点として、古くから指摘されていたことは、

- ・ フィードバックを繰り返しても収束する保証がない

という点である。また

- ・ 繰り返し回数によって結果が異なる可能性がある

という言い方もされる。これは、分割配分の分割の回数に応じて結果が変化するのと同様である。

ただ、収束の有無だけが問題であるならば、フィードバックを MSA(逐次平均

法)でおこなえばよいだけのことである。この場合に残る本質的な問題は、フィードバックが収束したとして、その収束値が意味する点である。すなわち、

- ・ 収束値が求めるべき均衡値であるのかどうか判然としない

また、フィードバックを前提としたモデル構築では

- ・ モデル内部の理論的整合性がない

という問題が生じやすい。これは、わかりやすい端的な例で説明すれば、手段選択レベルと経路選択レベルで用いる時間価値が一致していない場合である。

四段階推定法の簡易な改良モデルとして、各段階のモデルから得られるログサム変数をアクセシビリティの指標にして、フィードバックをかけるというアプローチは近年良く見かけるが、その場合にも、上記のように段階間で時間価値が一致していないことが多い。しかし、この考え方は、工学的実用性を重視した段階選択モデルの思想から脱却しているといえない。これは、みかけ上、Nested Logit モデルの考え方にしがっているように見えるが、Pure な Nested Logit とはいえるものではない。この場合には、便益評価において、手段選択レベルでの評価と、経路選択レベルでの評価とで違う結果が得られるという問題点が生じる。少なくとも手段選択と経路選択が意思決定の同じ時間スパンで行われていると考える場合は、手段選択と経路選択が同時に決定されると表現したモデル¹⁾が利用されるべきで、この場合、モデル内部に含まれる時間価値は、利用者クラス別に一意となる。

厳密な理論整合性を保った場合、どの選択レベルで便益評価をおこなっても等しい結果が得られることが、第4章で示される。また、工学的実用的なモデルでは、規範的な分析を行うことが困難であるという問題がある。

Boyce (2002)¹⁹⁾は、段階的推計法にもとづく予測手法の改良は、各段階の部分的な改良のみを注視しがちで、そのフィードバックについても考え方が不明確(ill-defined)で、非生産的(counterproductive)であると述べた上で、手法全体の革命的(revolutionary)な改良が必要であるとしている。そして、四段階推定法の普及以前に理論の構築がなされ、並行的な歴史を歩んできた統合型のモデルが、それらの革命的手法の基礎となると述べている。この統合型モデルこそが、本研究が採用するアプローチである。

¹⁾ なお、手段・経路選択 Nested Logit モデルは、同時選択モデルである。Nested Logit モデルを段階選択モデルと解釈するのは、第3章、第4章でも詳述するが典型的な誤解である(北村, 森川, 2002, p. 130)¹⁸⁾。

2.2 ネットワーク均衡モデル概説

ネットワーク均衡モデルは、四段階推定法における配分段階における有用な需要予測手法として、あるいは応用数学の興味深い問題として、数多くの研究者の興味を引き、Wardrop (1952)²⁰⁾, Beckmann, *et al.* (1956)²¹⁾以来、半世紀で急速な発展を遂げた。四段階推定法と統合モデルの歴史的経緯などは、Boyce (2002)¹⁹⁾がまとめている。

この分野の研究の発展経緯のレビューは数多い。日本語の文献としては、宮城, 加藤(1984)²²⁾, 宮城 (1985)²³⁾などを挙げるができる。海外では、Gartner (1980)^{24),25)}, Friesz (1985)²⁶⁾, Boyce, *et al.* (1988)²⁷⁾, Boyce (1998, 2002,2004)^{28),19),29)}, Boyce and Daskin (1997)³⁰⁾ などにも見られる。テキストとして Sheffi (1985)³¹⁾, Oppenheim (1995)³²⁾, Bell and Iida (1997)³³⁾, Ortuzar and Willumsen (2001)³⁴⁾, Cascetta (2001)³⁵⁾, 土木学会(1998, 2003)^{36),37)}が挙げられる。

最近の例では、羽藤 (2002)³⁸⁾, Prashker and Bekhor (2004)³⁹⁾が、経路選択行動を扱う固定需要型のネットワークモデルの近年の発展動向をレビューしている。また、Boyce and Bar-Gera(2004)⁴⁰⁾は、マルチクラス型の統合需要型ネットワークモデルについてまとめている。さらに、Boyce, Mahmassani and Nagurney (2004)⁴¹⁾は、Beckmann, *et al.* (1956)²¹⁾が与えたインパクトと影響を回顧している。

ネットワーク均衡モデルは、数多くの他の学問分野と同様に、まずきわめて限定的な仮定に基づく単純なモデルが構築され、その仮定が緩和されていくという発展経緯をたどっている。この経緯によって、体系的な研究分野としての確立が行われ、モデル間の比較が容易となっている。

本章では、最近の研究事例について、どの仮定の緩和を意図したものなのかという視点で分類・整理しながら紹介することを試みる。特に、既存のレビューでは、あまり触れられてない点を中心に触れていく。

なお、ネットワーク均衡分析における重要な研究課題である OD 推定法、動的ネットワーク配分問題は、レビューの対象外であることを明記しておく。

2.3 固定需要型利用者均衡モデル

2.3.1 基本仮説と基本モデル

利用者行動の仮説として、以下の仮定をおこう。

- [1] すべての利用者は、ネットワーク上の各リンクの所要時間に関する完全な情報を得ている (完全情報).
- [2] すべての利用者は、常に、最短所要時間の経路を選択する(合理的利用者).

[1], [2]の仮定より,

- [3] すべての利用者は同質である.
- [4] 利用者の経路選択基準は所要時間のみである.

という暗黙の仮定も存在することになる. また

- [5] すべての利用者は、経路の選択行動のみを行う(固定需要).

という仮定も考えよう.

パフォーマンス型の条件として,

- [6] 交通ネットワークは、グラフで表現される.
- [7] 対象地域は、均質なゾーンに分割される.
- [8] 利用者の移動は、発ゾーンのセントロイドから発し、着ゾーンのセントロイドへ向かうと表現する.
- [9] リンク上の所要時間は、そのリンクの交通量のみの関数で表現される単調増加関数である(分離型リンクコスト関数).
- [10] システムは定常状態にある

とする. 以上に従うと、以下の暗黙の仮定も存在することになる.

- [11] 利用者の経路選択基準は、リンク単位の交通費用の線形和である(加算型経路費用).

これらの利用者の行動とパフォーマンス条件の結果として、次のような利用者均衡状態が実現する.

どの利用者も、自分だけが経路を変更しても、自分の所要時間を短縮できない状態

すなわち,

Wardrop (1952)²⁰⁾の第一原則(等時間原理)

(各 OD ペアについて)利用されている経路の所要時間は皆等しく、利用されない経路の所要時間は、それより大きいか、せいぜい等しい。

という状態である。

ここで、注意すべきなのは、Wardrop の第一原則を導くのに、[1]-[11]のきわめて限定的な仮定を設けたが、これらは、Wardrop 原則の十分条件であって必要条件ではないということである。これは、利用者の完全情報仮説や合理的選択行動仮説を緩和した場合でも、Wardrop 原則や、それにきわめて近い状態が存在しうることを意味する。例えば、後に説明する確率的利用者均衡のフローパターンは、混雑が激しい場合、利用者均衡フローと類似した結果となることが知られている (Sheffi and Powell, 1981)⁴²⁾。

以上の条件を数理的に記述していこう。

交通ネットワークは、ノード集合 N および有向リンク集合 A からなるネットワークのグラフ表現 $G(N,A)$ として表現されるものとする。

ノード集合 N は、起点ノード集合 R 、終点ノード集合 S と、それ以外の交差点などを示すノード集合から構成される。

このうち起点/終点ノードを特にセントロイドと呼ぶ。交通ネットワーク分析は、通常、分析対象地域をゾーンに分割して行われ、セントロイドは、そのゾーンの中心を表す。

リンク集合は、実際の道路区間、鉄道区間、及びセントロイドから実際に存在するリンクへの移動を表現するコネクタと呼ばれる仮想リンクから構成される。リンク集合 A の要素である各リンクは、 a で区別する。

このモデルにおいてトリップは、発ゾーンのセントロイドからコネクタを経由して、実際のネットワークに入り、ネットワーク上のリンクを移動し、最終的にコネクタを経由して着ゾーンのセントロイドに到着するという表現がなされる。

人間の移動は発ゾーンから着ゾーンに向かうものを集計化して表現する。起点セントロイド r が表現するゾーンから、終点セントロイド s が表現するゾーンへ向かう OD トリップを q_{rs} とする。 q_{rs} の行列表示が OD 表である。

リンク a を通過するのに要する費用は、そのリンクの交通量 x_a の関数であり、 $t_a(x_a)$ と表記する。 $t_a(x_a)$ は単調増加関数と仮定する。

OD ペア rs 間の k 番目経路の経路交通量を f_k^{rs} とする。 $\delta_{a,k}^{rs}$ はリンク・経路接続行列であり、リンク a が OD ペア rs の経路 k 上であれば 1、そうでなければ 0

をとるものとする。

Wardrop 均衡条件を数学的に記せば,

$$c_k^{rs} - u_{rs} \geq 0, \quad \forall r, s, k \quad (2.1)$$

$$f_k^{rs} (c_k^{rs} - u_{rs}) = 0, \quad \forall r, s, k \quad (2.2)$$

として表現される。ここで c_k^{rs} は、OD ペア rs 間の経路 k の経路費用、 u_{rs} は、OD ペア rs 間の最小経路費用とする。さらにフローの保存条件として

$$x_a = \sum_{r,s,k} \delta_{a,k}^{rs} f_k^{rs}, \quad \forall a \quad (2.3)$$

$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs}, \quad \forall r, s \quad (2.4)$$

が成立し、フローの非負条件として

$$f_k^{rs} \geq 0, \quad \forall r, s, k \quad (2.5)$$

$$x_a \geq 0, \quad \forall a \quad (2.6)$$

パフォーマンス側の条件として,

$$c_k^{rs} = \sum_a t_a \delta_{a,k}^{rs}, \quad \forall r, s, k \quad (2.7)$$

$$t_a = t_a(x_a), \quad \forall a \quad (2.8)$$

が成り立つ。

以上の式(2.1)-(2.8)で表現される連立方程式・不等式系は以下の最適化問題と等価であることがわかっている(丁寧な解説書として土木学会(2003)³⁷⁾を参照)。

$$\min .Z(\mathbf{x}(\mathbf{f})) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \quad (2.9)$$

subject to

$$x_a = \sum_{r,s,k} \delta_{a,k}^{rs} f_k^{rs}, \quad \forall a \quad (2.10)$$

$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs}, \quad \forall r, s \quad (2.11)$$

$$f_k^{rs} \geq 0, \quad \forall r, s, k \quad (2.12)$$

$$x_a \geq 0, \quad \forall a \quad (2.13)$$

この最適化問題は、本研究のモデルの最も基本となる問題である。モデルの発展に伴い、この最適化問題に含まれる変数、目的関数や制約条件が変更、追加されていくことになる。

また、上記の問題の性質から、利用者均衡モデルは、リンク交通量の解は一意であるが、経路交通量については、必ずしも一意ではないことがわかっている (e.g. Sheffi, 1985; 土木学会, 1998, 2003)^{31),36),37)}。

2.3.2 所要時間以外の経路選択基準の導入

さて、仮定を緩和してモデルを拡張していくことを考えよう。いくつかの拡張方向があるが、利用者の経路選択基準が所要時間だけではない場合を考えよう(仮定[4]の緩和)。

例えば、対象道路網に有料道路が含まれる場合である。そして、経路選択基準が所要時間と料金の2つである場合を考えよう。この場合、料金を時間評価値により所要時間単位に変換し、一般化所要時間単位で考えればよい。ここで、まず利用者は同質であるという仮定[3]は保持し、時間評価値は一定であるとしよう。この場合、料金をリンク単位で表現できる場合、上記の最適化問題をそのまま利用できる。いままでの議論の中での「所要時間」を「一般化所要時間」と置き換えればよい。

2.3.2.1 ランプ間料金の表現

料金単位をリンク単位で表現できるというのは、経路料金がリンク単位の料金の線形和で表現できる場合(リンク加算(link-addictive)型)である。日本の高速自動車道路のように、料金がターミナルチャージ+対距離料金部分となる場合や、定額料金制度の場合は、これに該当する。

しかしながら、一般に料金制度は、高速道路の場合ランプ間別に、鉄道の場合は駅間別に定められることもある。このようなリンク非加算(non-addictive)型の金銭費用についても、Yang, Zhang and Meng (2004)⁴³⁾は、ランプ別の料金制度を考えたモデルが、以下の最適化問題として定式化できることを示している。

$$\min . Z(\mathbf{x}(\mathbf{f})) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \frac{1}{\tau} \sum_{i,j} p_{ij} X_{ij} \quad (2.14)$$

$$\text{subject to} \quad X_{ij} = \sum_{r,s,k} \delta_{ij,k}^{rs} f_k^{rs}, \quad \forall ij \quad (2.15)$$

and (2.10) - (2.13)

ここで、時間評価値を τ ，ランプペア ij 間の料金を p_{ij} ，交通量を X_{ij} とする。 $\delta_{ij,k}^{rs}$ は、OD ペア rs 間の経路 k がランプペア ij を通過するとき 1，それ以外するとき 0 をとる。この問題のリンク単位の交通量の解は一意であるが、ランプ間の交通量の解は、必ずしも一意ではないこと、ただし総料金収入 $\sum p_{ij} X_{ij}$ は一意となることが示されている。そして経路列挙の必要のないアルゴリズムが提案されている。

2.3.2.2 非加算型経路費用モデル

前項のランプ間料金の表現モデルは、加算型経路費用の仮定[11]を緩和するものである。これをさらに一般的に緩和したものを以下で紹介しよう。非加算型の経路費用のモデルについて、Larsson, *et al.* (2002)⁴⁴⁾は、経路費用が、次のような時間単位で表現できる場合、

$$c_k^{rs} = \sum_a t_a \delta_{a,k}^{rs} + v_k^{rs}(p_k^{rs}) \quad (2.16)$$

モデルと等価な以下の最適化問題が存在することを示した。

$$\min.Z(\mathbf{x}(\mathbf{f})) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_{r,s,k} f_k^{rs} v_k^{rs}(p_k^{rs}) \quad (2.17)$$

subject to (2.10) - (2.13)

ここで、 p_k^{rs} は、OD ペア rs 間の経路 k の金銭費用、 $v_k^{rs}(\cdot)$ は、OD ペア rs 間の経路 k の金銭費用を所要時間単位に変換する関数である。この関数は、時間評価値が非線形の場合にも適用できる。これらは、森川ら(2002)⁴⁵⁾によって、実証的に示された、所要時間の増加に対して時間価値は増加することを表現した時間評価値関数の利用の可能性を意味する。このモデルは、高速道路を含むネットワーク上での配分精度を向上させるのに有用な可能性がある。ただし、このモデルの解法には、一般に経路の列挙が必要となる。

なお、このモデルは、経路費用を式(2.16)で時間単位に設定した点がひとつのポイントである。経路費用を金銭単位で設定した場合、モデルと等価な最適化問題は一般に構成できない。Gabriel and Bernstein (1997)⁴⁶⁾、Lo and Chen (2000)⁴⁷⁾は、この条件下のモデルを考察している。

2.3.3 多基準ネットワーク均衡モデル

ネットワーク上の経路の選択行動において、利用者は、たいてい所要時間と金銭費用の2つの基準を元に選択行動を行う。通常、この所要時間と金銭費用のトレードオフは、時間評価値という指標で表現し、すべての利用者が一意の時間評価値を持つという仮定のもとでの構築されるモデルが一般的である。しかしながら、この時間評価値には、利用者間で異質性が存在すると仮定するのが自然である。また、所要時間、金銭費用のほかにも経路の景観、混雑の激しさなど数多くの基準を元に利用者は選択行動をとり、それらの基準間重みは利用者間で異なると考えられよう。

多基準ネットワーク均衡モデル(multi-criteria network equilibrium model)は、これらを明示的に考慮したネットワーク均衡モデルであり、仮定[4]を一般化したものである。

Dial(1996, 1997, 2000)^{48), 49), 50)}は、2基準の交通配分モデルについて、Leurent(1994, 1996, 1998)^{51), 52), 53), 54)}は、特に時間評価値の連続分布を考慮した時間と交通費用の2基準の交通配分モデルについての考察を進めている。時間評価値の異質性を考慮したモデルは、Cantarella and Binetti (1998)⁵⁵⁾などにも見られる。

Nagurney and Dong (2002)⁵⁶⁾は、これら多基準ネットワーク均衡モデルについての研究を分類・整理している。分類基準は、モデルが扱う時間と費用を代表とする対象とする基準(criteria)数、それらの基準がフローに応じて変化するかどうか(flow-dependent or not)、需要が固定型か変動型か、定式化が最適化問題アプローチか、有限次元あるいは無限次元変分不等式(VI)か、アルゴリズムの構築の有無、モデルの数理特性の精査の有無などである。その上で、より一般化したモデルを構築し、数理特性、計算法を示している。具体的には、各基準の重みが、利用者クラスによって変化するのみならず、リンクごとに変化する状況、さらに非分離型の関数を含む一般的な需要関数を想定したモデルについて、有限次元変分不等式を用いた解析を行っている。

時間評価値の異質性を考慮したモデルは、ロードプライシングの分析に有効であり、これらは2.9.4でも詳述する。

2.3.4 マルチクラスモデル

利用者は同質であるとの仮定[3]を緩和したモデルについてまとめる。利用者の特性は、所得、トリップ目的、車種などで異なることは明白である。これらを明示的に考慮した発展モデルがマルチクラスモデルである。

マルチクラスモデルは、2つに大別される。

a) 車両の違いを考慮するもの (車種別配分).

b) 車両は同一であるが行動基準が異なるもの.

この違いによりモデルの複雑性は大きく異なる。

2.3.4.1 車種の異質性

同じ道路を走行する車両でも、小型自動車、大型貨物車などの車種の違いがある。これらの違いを表現するモデルとして、Dafermos (1972)⁵⁷⁾ は、車種別のリンクコスト関数を設定し、リンクを車種の数に相当する単車種リンクに分解し、同一リンクにおける車種間の相互干渉を単車種のリンク間の相互干渉に置きかえ、リンク間に相互干渉のある均衡モデルとして定式化している。これは、仮定[9]を緩和したものとなる。このような場合、一般に貨物車と自動車の場合など、相互干渉が非対称となるため、等価な最適化問題は構成できず、解の一意性、解法の収束性などは不明になる。ただ、緩和法による計算事例は多く、(Mahmassani and Mouskos, 1988; 河上ら, 1991; 金子, 2001)^{58), 59), 60)}いずれも収束解が得られたと報告されている。

ただ、モデルの一意性が保証されないことには変わりなく、政策感度などが不安定になる恐れがある。これら、リンク間に相互干渉が非対称となる利用者均衡モデルの定式化、解法などは土木学会(1998)³⁶⁾に詳しいので、ここでは詳細は省略する。

車種間の相互干渉が対称とならない理由は、乗用車換算係数(PCU: Passenger Car Unit)が車種別に異なるためである。ここで、乗用車換算係数は、一般にリンクの属性(勾配、沿道状況など)によって変化するものであるが、対象都市圏全域で、車種ごとに一定であると仮定できるとする。すると、OD表のレベルで、台数ベースからPCUベースへの換算が可能となる。このPCUベースで配分すれば、車種間の相互干渉は、対称となるため、モデルと等価な最適化問題が以下のように構成できる。

$$\min .Z(\mathbf{x}(\mathbf{f})) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \quad (2.18)$$

subject to

$$x_a = \sum_i x_a^i, \forall a \quad (2.19a)$$

$$x_a^i = \sum_{r,s,k} \delta_{a,k}^{i,rs} f_k^{i,rs}, \forall i, a \quad (2.19b)$$

$$\sum_k f_k^{i,rs} = q_{rs}^i, \quad \forall i, r, s \quad (2.19c)$$

$$f_k^{i,rs} \geq 0, \quad \forall i, r, s, k \quad (2.19d)$$

$$x_a \geq 0, x_a^i \geq 0, \quad \forall i, a \quad (2.19e)$$

ここで、リンク a の車種(利用者クラス) i の PCU 単位の交通量を x_a^i 、車種合計の PCU 単位交通量を x_a 、車種別 OD 交通量を q_{rs}^i 、車種別経路交通量を $f_k^{i,rs}$ 、車種別リンク経路接続行列 $\delta_{a,k}^{i,rs}$ とする。この場合の問題点は、リンク交通量の合計値については、解の一意性が保証されるものの、車種別のリンク交通量の一意性が保証されないことにある。この問題点に対しては、経路選択を確率化し、経路交通量の一意性が保証されるようにモデルを変換するアプローチと、利用者均衡解のうち最も尤もらしい交通量を探し出すアプローチがある。前者については、吉田、原田(2002)⁶¹⁾の研究があるが、後述する確率的利用者均衡モデル(SUE)における経路選択肢集合の設定法という、SUE の解法上の問題により政策感度に問題が生じることがあることも報告されている。後者は、Larsson, *et al.* (2001)⁶²⁾などの研究例がある。

2.3.4.2 利用者属性の異質性

時間価値の異質性に代表される利用者の行動選択に関する異質性を考えることは、前項よりは、簡単である。時間価値の異質性を考えるモデルとして時間価値の分布を考慮した分析手法が数多く提案されている。それらのアプローチは次の2つに大別される。

- ・ 離散型アプローチ
- ・ 連続分布アプローチ

前者の離散型アプローチは、時間価値の異なる複数の利用者クラスの存在を想定し、各クラスにおいては、同一の時間価値を仮定する場合である。ネットワーク分析に限らず、高所得者、低所得者層といったセグメントを分けた分析事例は数多くある。現実には連続分布をしている層を離散化することで、一つの近似手法となるが、各利用者クラスの影響をモデル出力結果で明示的に扱えるという利点がある。このアプローチによる研究例は数多い。後者の連続分布アプローチは、時間価値の連続分布をそのまま扱うモデルであり。Dial (1996, 1997, 2000)^{48),49),50)}、Leurent(1994, 1996, 1998)^{51),52),53),54)}が挙げられる。このアプローチは、2.3.3 のモデルに区分されることもある。

前者の離散型アプローチのモデルにおいて、以下の等価な最適化問題が存在

することを示したのは、おそらく van Vliet, et al. (1986)⁶³が初めてと思われる。

$$\min Z(\mathbf{x}(\mathbf{f})) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \sum_{i,m,a} p_a x_a^i / \tau_i \quad (2.20)$$

subject to (2.19)

ここで、利用者クラス i のリンク a の交通量を x_a^i 、利用者クラス i の時間価値を τ_i とする。

一般化費用を時間単位に「正規化」することで、マルチクラス、多基準ネットワーク均衡モデルを最適化問題として表現できることなる。これは、費用関数が対称系になっているためである。具体的には、リンク a のクラス i の一般化費用を c_a^i とおくと、下記のように確認できる。

$$c_a^i = t_a(x_a) + p_a / \tau_i \quad (2.21)$$

$$\frac{\partial c_a^i}{\partial x_a^j} = \frac{\partial t_a(x_a)}{\partial x_a^j} = \frac{\partial t_a(x_a)}{\partial x_a} \frac{\partial x_a}{\partial x_a^j} = \frac{\partial t_a(x_a)}{\partial x_a} \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial c_a^i}{\partial x_a^j} = \frac{\partial c_a^j}{\partial x_a^i}, \quad \forall i, j \quad (2.23)$$

この正規化は、所要時間と金銭という2つの基準の時のみならず、距離など3つ以上の基準の場合についても、所要時間以外の基準がフローに依存しなければ実行可能である。

このモデルにおいても、式(2.18), (2.19)のモデルと同様にクラス別の交通量は一意ではない。

なお、このモデルと、2.3.2 で紹介したランプ間料金、非加算型経路費用モデルは容易に統合できる。

また、利用者の行動規範の異質性を表現するモデルとしては、ランダム効用理論を用いて、[1]利用者の完全情報、[2]合理的選択行動に関する仮定を緩和した、次節で詳述する確率均衡配分モデルがある。このモデルは、[3], [4]の仮定を緩和しているとも解釈しうるものである。

以上で紹介してきたモデルは、利用者均衡モデルにおける行動仮説についての仮定を緩和するものであり、それらの相互関係は表-2.1のようにまとめられる。

確率的利用者均衡モデル、マルチクラス、多基準モデル、非加算型経路費用モデルそれぞれを組み合わせたモデルも考えることができる。これらのモデルは、通常の利用者均衡モデルよりも豊富な政策評価指標を出力しうるものである。また、大規模ネットワークでも計算可能なモデルも多いため、実都市圏での適用における現状再現性向上にも有用であると考えられる。

表-2.1 利用者側の行動仮説の緩和を意図したモデルの相互関係

	仮定	確率的利用者 均衡モデル	マルチクラス モデル	多基準モデル	非加算型経路 費用モデル
[1]	完全情報	○	-	-	-
[2]	合理的利用者	○	-	-	-
[3]	利用者の同質性	△	○	△	-
[4]	経路選択要因の限定(注)	△	□	○	□
[11]	加算型経路費用	-	-	-	○

○: 主にその仮定の緩和を目的としているモデル

△: その仮定を改良していると解釈できるモデル

□: その仮定の緩和の際に、その利用が有効となるモデル

注) 経路選択基準が所要時間のみ、または単一の変換パラメータ(e.g.時間価値)を用いた一般化費用に限定されること

2.4 確率的利用者均衡モデル

確率的利用者均衡モデルのサブモデルとしての経路選択モデルの仮定は、利用者が認識している各経路の旅行時間は正確なひとつの値ではなく、確率的に変動する誤差を含んでいるというものである。

この経路選択モデルを、利用者均衡モデルの最短経路選択仮説[2]に代替させると、以下の確率的利用者均衡状態が定義できる。

どの利用者也経路を変更することで自分の旅行時間を短縮することはできないと信じている状態

この利用者が信じている状態をどのように表現するかで、さまざまなモデル化が可能となる。

この確率的利用者均衡の概念は、Daganzo and Sheffi(1977)⁶⁴によって、構築され、Fisk(1980)⁶⁵らによる Logit 型確率的利用者均衡モデルの定式化を経た。これらは、土木学会(1998)³⁶に詳しいが、本研究のモデルの比較のために有用であるため、以下に Logit 型確率的利用者均衡モデルと等価な最適化問題を記す。

$$\min . Z(\mathbf{x}(\mathbf{f})) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega + \frac{1}{\theta} \sum_{r,s,k} f_k^{rs} \ln f_k^{rs} / q_{rs} \quad (2.24)$$

subject to (2.10) - (2.13)

ここで、 θ は、経路選択に関する分散パラメータである。通常の利用者均衡モデルの目的関数(式(2.9))に経路交通量に関するエントロピー項が追加された形式になる。確率的利用者均衡モデルの利点の一つは、経路交通量についても一意の解を得られることにある(土木学会, 1998)³⁶⁾。

2.4.1 確率的利用者均衡モデルの理論拡張

確率的利用者均衡モデルの理論の拡張事例を紹介しよう。

一般に利用者均衡配分モデルなどの交通需要予測法は、将来の交通状態の「平均的状态」を記述する。最も単純な記述法は、システムを確定的に捕らえる方法である。確定的利用者均衡モデルはこの分類に属する。この記述法について、確定的ではなく、安定的な確率分布を仮定して確率的なシステム状態を記述するというのは自然な発展である。

このアプローチの先駆けは、おそらく、Mirchandani and Soroush (1987)⁶⁶⁾による研究である。中山ら(2002)⁶⁷⁾は、利用者の確率的な行動によって生じる交通量の確率分布を明示的に扱ったモデルを提案している。Watling(2002)^{68), 69), 70)}は、交通量と所要時間の確率分布の2次のモーメントまでを考慮したモデルを提示している。この他にも、所要時間の変動を考えた配分モデルについては信頼性の評価モデルを含めて膨大な既存研究(e.g. Yin and Ieda, 2001, 2002; Bell and Cassier, 2000; Bell and Iida, 2003)^{71), 72), 73), 74)}が存在する。なお、上述の確率的利用者均衡モデルは、利用者の認知の確率的記述を行っているが、リンク交通量、リンク所要時間などシステム全体までを確率的に記述するものではない。通常、確率的利用者均衡モデルの出力値は、確率分布の期待値であることが、土木学会(1998, p. 74)³⁶⁾、Sheffi(1985, pp. 280-282)³¹⁾に詳述されている。

また、Bell and Cassir (2002)⁷⁵⁾は、混合戦略ナッシュ均衡を用いたリスク回避型の利用者均衡モデルを提示している。

2.4.2 確率的利用者均衡モデルの問題点とその解決策

ここでは、理論的には完成されたとされる確率的利用者均衡モデルについて、そのモデルを実都市に適用する際の問題点とその解決を意図した研究を整理し、そのモデルの実用性を考察する。

なお、確率的利用者均衡モデルのサブモデルと位置づけられるネットワーク上の経路選択行動モデルについては、朝倉, 羽藤(2000)⁷⁶⁾、羽藤(2002)³⁸⁾、Prashker

and Bekhor (2004)³⁹⁾が詳しい。以下は、本研究のテーマである均衡分析との統合と大規模都市圏ネットワークでの適用という問題意識を特に考慮に入れた再整理を試みるものである。

確率的利用者均衡モデルは、理論的に優れたモデルで、実用上も経路交通量が一意に算出できるというメリットがあるにも関わらず、実務ではあまり多く用いられていない。実務での適用上の問題点は、van Vuren (1994)⁷⁷⁾なども報告している。この問題は、以下のように整理できる。

- a) 経路選択肢集合の決定法
- b) 経路選択肢間の類似性の表現法
- c) 均衡解への収束が保証されたアルゴリズムの開発
- d) 目的関数における経路エントロピー項の効率的計算法
- e) 需要モデルと統合的な利用者便益指標の効率的計算法
- f) 経路選択モデルのパラメータ推定法

a), b)は確率的配分にもちいるローディング(交通量負荷)アルゴリズム(言い換えると確率的利用者均衡モデルのサブモデルとしての経路選択モデル)の問題、c), d)は、それを均衡モデルに導入する際の問題点である。

これらは、区別して考えなければいけない。これらの問題点に対しては個別に解決法が提示されているが、これらすべてを解決できるような一般性/汎用性と実用性を兼ね備えた枠組みは提示されていない。a)-e)について、関連文献を紹介しながら以下に詳しく述べていく。

なお、f)は、モデル構築とは、異質の問題であるので、詳しくは 2.7.3 で述べることにする。

2.4.2.1 経路選択肢集合の決定法

a) の選択肢集合の決定問題は、古くからの研究課題である。ランダム効用理論に基づく行動モデルでは、一般に利用者は、すべての選択肢から「利用可能な選択肢集合(Choice Set)」を選別し、その中から「最も望ましい選択肢」を選択すると仮定される。ネットワーク上の経路選択肢は膨大であり、それらから何の基準で、どのような選択肢集合を決定すべきかは、難しい問題である。

この問題に対して、Dial (1971)⁷⁸⁾は、経路を列挙せずに交通量を負荷するアルゴリズムを開発した。のちに、そのアルゴリズムは、van Vliet (1981)⁷⁹⁾によって Logit モデルと等価であることが示された。このアルゴリズムは、経路選択肢

を明示的に考慮せずとも(implicit に), 経路選択原則を満たすように交通量を配分することができることが最大のメリットである. ただし以下のような欠点がある.

- i) 経路選択枝集合を有効経路(Efficient Pass)に限定することによって不自然・非現実的なフローパターンを生成する可能性がある.
- ii) ネットワークのコーディングによって配分結果が異なる.
- iii) 経路選択枝集合の設定基準が, 選択モデルの効用項(一般に経路の所要時間)と等しいものに限定される.

i), ii)は, 実務上大きな問題である. 特に ii)は, 新規リンクの追加の政策を評価する場合に, 政策感度の点で問題を生じうる.

iii)は, 確率的ローディング・アルゴリズムとして, 利用する場合には大きな問題ではないが, 確率均衡に用いる場合に大きな問題となり, 後述する.

この問題点に対するひとつの回答は, サイクリックな経路を含むすべての経路選択枝集合を扱うというもので, そのモデルは Bell (1995)⁸⁰⁾, Akamatsu (1996)⁸¹⁾によって示されている. しかしながら, このモデルは, 過大なサイクリック経路フローの生成の可能性, (後述する)IIA 問題の増幅の可能性が指摘されている. このサイクリックな経路を除去するような研究も行われている(Huang and Bell, 1998; 赤松, 牧野, 1996)^{82), 83)}が, 実務的な有効性は限定的であろう. また, Wong (1999)⁸⁴⁾は, Bell(1995)⁸⁰⁾のアルゴリズムが収束する条件を整理している.

2.4.2.2 経路選択枝の類似性の表現法

Dial のアルゴリズムの前述した i)-iii)の問題については, 経路選択枝集合を明示的に列挙すれば, 解決できる問題も少なくない. 計算機の能力向上に伴って, このアプローチも非現実的ではなくなりつつある. しかしながら, その場合も b)経路選択枝の類似性の問題への対処が必要となる.

最も容易な Logit 型の経路選択モデルを用いた場合, ロジットモデルの IIA 特性に起因して重複経路へ交通量を過大に負荷する問題は, 古くから指摘されてきた(Sheffi, 1985; 羽藤, 2002 ほか)^{31), 38)}. この問題に対する古くから提唱されてきた解決策のひとつは, Probit 型のモデルの利用である. 選択枝集合の誤差項がリンク毎に独立な正規分布に従うとし, 経路効用がリンク効用の線形和となる場合の負荷モデルは, Monte Carlo 法によって比較的容易に計算できる.

この場合の問題点は、計算量が膨大になることと、統合モデルへの展開を考えた場合に、通常、GEV型のモデルの利用が多い目的地、手段などの選択モデルと経路選択モデルの整合性を取りにくい点にある。

なお、Maher and Hughes (1997)⁸⁵⁾は、Probit型確率均衡配分の効率解法のひとつを提案している。ただ、そのモデルはClark近似に基づくものであり、その近似の精度が問題となりえよう。

LogitモデルのIIA特性を緩和するモデルの研究は数多いが、GEV型経路選択モデルでは、Vovsha and Bekhor (1998)⁸⁶⁾によるCross-Nested (Link-Nested) Logitモデルの適用、Prashker and Bekhor (1998)⁸⁷⁾、Bekhor and Prashker (1999)⁸⁸⁾、Prashker and Bekhor (1999)⁸⁹⁾、Prashker and Bekhor (2000)⁹⁰⁾によるPCL,CNLモデルの研究と確率均衡モデルへの発展、およびBekhor and Prashker (2001)⁹¹⁾によるGNL形確率的利用者均衡モデルの定式化などがある。これらのモデル間の関連は、羽藤(2002)³⁸⁾に詳しい。

これらのうち、特に、ネットワーク上の特性を生かしたLink-Nested型のモデルは、実務への応用が期待されるが、経路の列挙が必要になり大規模ネットワーク上でのフィージビリティは検討の余地がある。

また、最近では、Russo and Vitetta (2003)⁹²⁾は、Cascetta, *et al.* (1996)⁹³⁾によるC-Logitモデルをベースとし、経路列挙を回避した配分モデルを提示している。

2.4.2.3 均衡解への収束が保証されたアルゴリズムの開発

確率的利用者均衡配分のアルゴリズムとしては、MSA(逐次平均法)が古くから知られており、この解法は、経路選択枝集合を固定すれば、厳密解に収束することが証明されている(Powell and Sheffi, 1982)⁹⁴⁾。ただし、収束は極めて緩慢であることも知られている。

経路選択枝集合を固定しない場合、厳密解への収束は保証されない。特にDialのアルゴリズムを用いた場合、経路選択枝集合の決定基準である経路所要時間が変化することで、選択枝集合が計算途中で変化し、厳密解へ収束するとは限らない。特に単純なネットワークでは振動をすることが報告されている。大規模ネットワークで計算した場合、見かけ上、収束したように思える結果もあるが、この収束値が厳密解である保証はなく、政策感度などに影響を与えることが少なくない。

このDialのアルゴリズムの問題点に対して、Leurent (1995, 1997)^{95), 96)}は、経路選択枝集合の生成基準をリンク距離などのflow-independentな指標を用いて(stable set of efficient paths)、かつ経路を列挙しないでローディングが可能なアル

ゴリズムを開発している。このアルゴリズムを前提にした場合、確率的利用者均衡モデルが、MSAによって効率的に収束することを報告している。ただ、この場合でも、本来流れるべき経路に流れないなどの不自然な結果となりうる。これらに対しては、いったん、利用者均衡配分を実行し、その均衡リンクコストをもとに、経路選択枝集合を固定するという、アドホックな計算法もありうるが、最終的な均衡解と経路選択枝集合の決定基準との間の不整合が生じえるため(Maher, 1998)⁹⁷⁾、妥当な政策感度が得られるかどうかは定かではない。

経路選択枝集合を固定すれば、厳密解に収束することは、MSAに限らない。例えば、経路の列挙を前提とした場合でも、適切なアルゴリズムを用いれば、それは、その前提に一致した解に収束する。経路を列挙したアルゴリズム(Simplicial Decomposition 法)については、土木学会(1998, pp. 187-190)³⁶⁾、Damberg, et al. (1996)⁹⁸⁾に詳しいので、ここでは詳細は省略する。この解法の問題点についてのみふれると、経路列挙が前提となることで大規模ネットワーク上での実行が困難になることと、近似解であるという点である。

Maher (1998)⁹⁷⁾ は、Logit 型確率均衡モデルの Sheffi and Powell (1982)⁹⁹⁾によるモデルの目的関数について、期待最小費用項がローディグアルゴリズム上で、簡単に計算できること(2.4.2.5 参照)と、降下方向探索時に2次あるいは3次の内挿法による近似を用いた効率解法を提示している。マルチクラス型プロビット確率均衡モデルについて、Rosa and Maher (2002)¹⁰⁰⁾は前提条件付共役勾配探索法(preconditioned conjugate gradient search)を用いたアルゴリズムを検討している。これらについては、近似解法であることの影響の精査が必要となろう。

2.4.2.4 目的関数における経路エントロピー一項の効率的計算法

Fisk(1980)⁶⁵⁾型の確率的利用者均衡問題の目的関数、式(2.24)には、経路エントロピー一項が含まれ、大規模ネットワークを前提とした場合、その計算は困難であった。

この問題に対し、赤松ら(1991,1990)^{101), 102)}、Akamatsu (1997)¹⁰³⁾は、Logit 型配分モデルについての以下のような経路エントロピーの分解定理を示し、この項が起点別リンク交通量で表現できることを示した。

$$\sum_{r,s,k} f_k^{rs} \ln f_k^{rs} / q_{rs} = \sum_r \sum_{ij} x_{ij}^r \ln x_{ij}^r - \sum_r \sum_j \left(\sum_i x_{ij}^r \right) \ln \left(\sum_i x_{ij}^r \right) \quad (2.25)$$

ここで、 x_{ij}^r は、起点 r から発したリンク($i \rightarrow j$)間のリンク交通量である。なお、この定理は終点別のリンク交通量を用いても表現できる。

ただし、この定理が成立するのは、経路選択モデルで Markov 性が成立する場合のみである。この定理が成立するのは、MCA(Markov Chain Assignment)や Dial

配分などに限られる。

この分解定理は、効率的な均衡解の算出に有用となる。特に MSA では、目的関数の評価を行わないが、この定理を用いて、リンク別交通量を用いた部分線形化法も可能である(土木学会, 1998)³⁶⁾。MCA を前提とするアルゴリズムを用いた場合、MCA 自体に解が求まる条件が満たされれば (行列 W の収束条件が満たされるネットワーク構造, パラメータ; 詳しくは 土木学会, 1998; Wong, 1999)^{36),84)}, この分解定理を用いたアルゴリズムは、厳密解に収束する。

ここで、注意すべきは、Dial 配分を前提とした場合である。Dial 配分は、分解定理の前提となる Markov 性を満たすため、定理は成立するが、2.4.2.3 で述べたように、アルゴリズム途中での経路選択枝集合が固定されないという別の問題がある。したがって、残念ながら厳密解には収束しない。筆者の経験では、Dial 配分を用いた部分線形化法は、きわめて早く収束してしまう。しかしながら、この収束解は、厳密解である保証はまったく無く、政策感度に問題を生じさせることが少なくない。この問題は、この計算法の開発当初から認識されていた問題であるが、その当時想定されていた程度のトリビアルな問題ではないといえる。

2.4.2.5 需要モデルと統合的な利用者便益指標の効率的計算法

ロジットモデルを用いた場合、以下のログサム変数が需要モデルと統合的な利用者便益指標であることが知られている(Williams, 1977)¹⁰⁴⁾。

$$S_{rs} = -\frac{1}{\theta} \ln \sum_k \exp(-\theta c_k^{rs}), \forall r, s \quad (2.26)$$

S_{rs} は OD ペア rs 間の期待最小費用と呼ばれる。この式は、経路の列挙を前提としたもので、大規模ネットワークで計算するのは容易ではない。

Akamatsu (1997)¹⁰³⁾の貢献は、ロジットモデルを用いた場合の統合的な利用者便益指標であるログサム変数が大規模ネットワーク上でも計算可能であることを示したことにある。

具体的には、Dial のアルゴリズムを用いた場合は以下のように計算できることを示した。

$$S_{rs} = -\frac{1}{\theta} \ln \sum_k \exp(-\theta c_k^{rs}) = c_{\min}^{rs} - \frac{1}{\theta} \ln \sum_{j \in J} W[j \rightarrow s], \forall r, s \quad (2.27)$$

ここで、 c_{\min}^{rs} は、OD ペア rs 間の最小交通費用で、 J は、着ノードに接続するノード集合、 W は Dial のアルゴリズムで計算されるリンクウェイトである。

また、MCA(Markov Chain Assignment)の場合は、以下のように計算できる。

$$\mathbf{S} = \{S_{rs}; S_{rs} = -\frac{1}{\theta} \ln \sum_k \exp(-\theta c_k^{rs})\} = -\frac{1}{\theta} \ln[\mathbf{I} - \mathbf{W}]^{-1} \quad (2.28)$$

ここで、 \mathbf{I} は単位行列、 \mathbf{W} は、MCAの計算過程で計算される重み行列(土木学会, 1998)³⁶⁾、 $\ln(\mathbf{z})$ はベクトル \mathbf{z} の要素毎に対数をとったベクトルを与える演算子とする。

Leurent (1997)⁹⁶⁾は、彼の開発した Logit 型ローディング解法(STOCH3)の場合は、次のように計算できることを示した。

$$S_{rs} = -\frac{1}{\theta} \ln \sum_k \exp(-\theta c_k^{rs}) = -\frac{1}{\theta} \ln(W_N(s)) \quad (2.29)$$

$W_N(s)$ は、STOCH3の過程で計算される、ノードウェイトである。

これらの式は、いずれも経路の列挙を必要としないものである。この指標は、政策評価における利用者便益指標が容易に計算できるという価値のほかにも、需要変動型モデルにおいて効率的な解法の構築に有用となるものである。

なお、Maher (1998)も以下の式を示している。

$$S_{rs} = -\frac{1}{\theta} \ln \sum_k \exp(-\theta c_k^{rs}) = -\frac{1}{\theta} \ln(W_{rs}) \quad (2.30)$$

ここで、起点ノード r からのノードウェイトは、以下である。

$$W_{rj} = \sum_{i \in B(j)} W_{ri} \exp(-\theta c_{ij}) \quad (2.31)$$

また、 $B(j)$ は、ノード j の直前のノード集合、 c_{ij} はリンク (i, j) のリンクコストである。

以上のように、Logitモデルを前提とした一部のアルゴリズムについては、需要モデルと整合的な利用者便益指標の効率的計算法が存在する。しかしながら、これらのアルゴリズムには、前述したように別個の問題が発生する。それらの問題点により、上記の便益指標では、妥当な政策感度が得られないことが報告されている(吉田, 原田, 2003)¹⁰⁵⁾。

一方、プロビット確率配分や、GEV型のモデルを対象とした場合、モデルと整合的な利用者便益指標の効率的計算法は、筆者が知る限り存在せず、特に現実都市圏レベルでの評価は容易ではないと予想される。

以上のように、確率的利用者均衡モデルは、理論的には古くから完成し、良く知られたモデルであるが、いくつかの問題点が残されており、それらを同時に解決できる枠組みは提示されていない。これらは、表-2.2のようにまとめられ

る。これらの問題より、確率的利用者均衡モデルは、現実の大規模都市圏での適用においては、現状では、いまだ実用的とはいえないと判断される。ただし、このモデルの将来的な発展性を否定しているわけではない。

表-2.2 各種確率的利用者均衡モデルの特徴と問題点

モデル	STOCH Logit SUE	MCA ^[1] Logit SUE	STOCH3 Logit SUE	SD ^[2] -base Logit SUE	Probit SUE	GNL ^[3] -SUE
貢献者	Dial (1971) ⁷⁸⁾ , Akamatsu (1997) ¹⁰³⁾	Bell (1995) ⁸⁰⁾ , Akamatsu (1996) ⁸¹⁾	Leurent (1995, 1997) ^{95),96)}	Damberg, <i>et al.</i> (1996) ⁹⁸⁾ ほか	Daganzo and Sheffi (1977) ⁶⁴⁾	Prashker and Bekhor (1999, 2001) ^{89),91)} ほか
a) 経路選択枝集合の決定法	implicit 非 cycle	implicit 含 cycle	implicit 任意の基準	explicit	implicit	explicit
b) 経路選択枝間の類似性の表現法	×	×	×	△	○	○
c) 均衡解への収束が保証されたアルゴリズムの開発	×	○	○	×	○	○
d) 目的関数における経路エントロピー項の効率的計算法	○	○	○	△	×	×
e) 需要モデルと整合的な利用者便益指標の効率的計算法	○	○	○	△	×	×
その他の問題点など	不自然な経路抽出の可能性あり	過大なサイクリック経路の発生の可能性あり	不自然な経路抽出の可能性あり	計算負荷中, 必要とする計算容量が大	計算負荷が大きい	計算負荷中, 必要とする計算容量が大

注) [1]: Markov Chain Assignment
 [2]: SD: Simplicial Decomposition
 [3]: Generalized Nested Logit; この他, PCL, CNL モデルを含む

2.5 需要変動型利用者均衡モデル

利用者均衡モデルの仮定のうち

[5] すべての利用者は、経路の選択行動のみを行う(固定需要).

を緩和するモデルが需要変動型利用者均衡モデルである。なお、このモデルは、統合需要型モデルなどとも呼ばれる。

2.5.1 Beckmann モデル

変動需要型のモデルの基本モデルは, Beckmann, *et al.* (1956)¹⁰⁶⁾によるモデルである. それは以下の最適化問題と等しい(土木学会, 1998; Sheffi, 1985)^{36),31)}.

$$\min .Z(\mathbf{x}(\mathbf{f}), \mathbf{q}) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega - \sum_{r,s} \int_0^{q_{rs}} D_{rs}^{-1}(\omega) d\omega \quad (2.32)$$

subject to (2.10) - (2.13)

$D_{rs}^{-1}()$ は, OD ペア rs 間の逆需要関数である. この需要関数 $D_{rs}(c_{rs})$ は, OD ペアごとに, その OD ペアの最小費用 c_{rs} のみの連続な非負の関数であり, c_{rs} の増加に対して単調に減少すると仮定されている.

OD 需要関数が, その OD ペアのみ依存するという仮定は, きついものである. それを緩和するモデルの流れは, Fernandez and Friesz (1983)¹⁰⁷⁾がまとめている.

分離不可能な変動需要関数と分離不可能なリンクコスト関数モデルを含む一般的な需要変動型利用者均衡条件は, 以下の変分不等式条件と等価であることが, Dafermos (1982)¹⁰⁸⁾によって示された.

$$\mathbf{t}(\mathbf{x}^*) \cdot (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) - \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{q}) \cdot (\mathbf{q} - \mathbf{q}^*) \geq 0, \quad \forall \mathbf{x}, \mathbf{q} \in \Omega \quad (2.33)$$

ここで, Ω は, 式(2.10) - (2.13)で表現される許容領域であり, “*”は, 均衡解を意味する記号である. この解が一意となる条件は, リンクコスト関数と需要関数の負値が強い単調性を持つことである. もしくは, リンクコスト関数と需要関数の負値のヤコビ行列が正値定符号行列となることである. なお, このモデルの需要固定の場合が, Smith (1979)¹⁰⁹⁾によるモデルである. これら変分不等式アプローチによる均衡モデルについては, 土木学会(1998)³⁶⁾, Nagurney (1999)¹¹⁰⁾に詳しい.

また, 需要関数とリンクコスト関数のヤコビ行列が対称形の場合は, 等価な最適化問題が構成可能で, 目的関数は, 次のような線積分を用いたものとなる (Fernandez and Friesz, 1983; 宮城, 1985)^{107),23)}.

$$\min .Z = \oint_{0 \rightarrow \mathbf{x}} \mathbf{t}(\boldsymbol{\omega}) \cdot d\boldsymbol{\omega} - \oint_{0 \rightarrow \mathbf{q}} \mathbf{D}^{-1}(\boldsymbol{\omega}) \cdot d\boldsymbol{\omega} \quad (2.34)$$

2.5.2 需要変動モデルの分類

需要変動型の利用者均衡モデルの分類軸はいくつか存在する。

- a) 対象とする交通行動の範囲(トリップ発生の有無, 目的地, 手段, 経路)
- b) 経路選択行動を確率的に扱うか, 確定的に扱うか
- c) 利用者のクラス数
- d) 等価な最適化問題の存在有無

a)の対象に応じて, 目的地選択と経路選択を組み合わせた分布・配分統合モデル, 手段選択と経路選択を組み合わせた分担・配分統合モデルというようになる。c)のクラス数がひとつの場合のモデルについては, 土木学会(1998)³⁶⁾に詳細に記述されているので, ここでは詳細な説明は割愛する。そのなかでも, Evans(1976)¹¹¹⁾の二重制約型エントロピーモデルを用いた分布配分統合モデルは有名であり, 彼女が示した部分線形化アルゴリズムは, 統合モデルの解法として最もよく利用されるものとなっている。

土木学会(1998)³⁶⁾に触れられていない理論的な発展モデルとして, Oppenheim(1993)¹¹²⁾は, 目的地での混雑を考慮した分布配分統合モデルを提案している。最近の理論の発展では, Cantarella(1997)¹¹³⁾は, 不動点問題を用いた複数交通手段, 複数利用者クラスを考慮した変動需要型モデルを示している。また, 以下で, 経路の途中での手段の変更を考慮した Mixed mode モデルの発展について詳述しよう。

2.5.3 Mixed Mode ネットワーク均衡モデル

手段と経路の選択を内生化した分担配分統合モデルの展開例をまとめておこう。経路の途中で手段の変更がある場合の複合モード選択を考慮したモデルの原型は, Fernandez, et al.(1994)¹¹⁴⁾である。このモデルのアクセス手段選択を考慮したモデルが宮城, 水口(1995)¹¹⁵⁾によって展開され, さらに, 溝上, 河内(2000)¹¹⁶⁾によって経路選択を確率化した Nested Logit 型のモデルにより一般化された。Wu and Lam(2003)¹¹⁷⁾は, ノンモータライズド交通も含めた交通手段と経路選択のネットワーク統合モデルを変分不等式を用いて構築している。

なお, P&R 型のモデルのような場合は, Nest Logit モデルをより一般化した GEV 型のモデルも有効な場面もある(溝上, 2003)¹¹⁸⁾。研究例は見当たらないが,

2.4.2.2で紹介した経路選択モデルのGEV型の発展型のモデルを用いたMixedモードGEV型ネットワーク均衡モデルへの展開も定式化は容易と思われる。

わが国においては、高速道路転換率内生型モデルについての研究進展も進んでいる。松井, 藤田 (2000)¹¹⁹⁾, 松井, 藤田 (2000)¹²⁰⁾, 藤田ら(2001)¹²¹⁾は、高速道路と一般道の選択を分担配分統合モデルの一種として定式化し、実証的な成果を挙げている。

高速道路転換率モデルは、わが国で古くから時間比配分モデルの適合度が高いことが知られていた。時間比配分モデルは、ランダム効用理論において、対数線形型の効用関数を仮定したモデルに相当する。この対数線形型のモデルでは、ネットワーク均衡モデルを構築する際に等価な最適化問題が構築しにくいという問題があった。松井, 藤田らのモデルは、通常の線形型効用関数によるロジットモデルのパラメータをOD間距離の変数とすることで、時間比配分型のモデルにおいても、等価な最適化問題が構成可能であることを示し、実証的にその有効性を確認したところに大きな貢献がある。これらのモデルは、時間価値の異質性を考慮したものとも解釈できる。

高速道路を含むネットワークを含むモデルとしては、単純に料金を時間評価値により一般化所要時間に変換する料金抵抗法(一例として, 河上, 杉野, 1998)¹²²⁾と上記転換率内生型モデルの2つのアプローチがある。河上, 金森 (2002)¹²³⁾は、料金抵抗法と高速転換率法を比較している。

転換率式を組み込む意義は、モデルの操作性の向上による現状再現性の確保のしやすさのほかに、高速道路の料金などの政策に対する多様な感度を表現可能なモデルとなるという2つの側面がある。

また、都市高速道路を含むネットワークのモデル化には、2.3.2.1で紹介したYang, Zhang and Meng (2004)⁴³⁾によるランプ間別料金を考慮したモデルも有効であろう。また、秋山ら(2004)¹²⁴⁾による乗り継ぎ制を考慮したモデルも考慮に入れる価値がある。

統合モデルの現実都市圏への適用を考えた場合、整理が必要な点がいくつかある。以下では、そのうち分布モデルのモデル形(片側制約型か両側制約型か)、平均乗車人員の設定法、最適化問題の構成可能性、について整理しておこう。

2.5.4 分布モデルの構造の扱い方

分布・配分統合モデルには、発生集中交通量のいずれかのみを所与とする片

側制約型のモデルと両者ともに与えられている両側制約(二重制約)型のモデルに分けることができる。この両者の比較について、Sheffi (1985, p. 188)³¹⁾が述べている考えを要約しておこう。

両側制約型モデルが前提とする両側制約エントロピーモデルは、個々の利用者の行動集積ではなく、物理学の重力モデルのアナロジーから導出されたもので、利用者の行動集積としてネットワークフローを考える、行動分析の研究者の中には、両側制約型のモデルは受け入れがたく思う人もいる。

発生制約型の片側制約モデルは、非勤務(non-work)目的のモデルに相当と考えられる。これは、発生地の選択は長期の行動変化によって決定されると考えられるためである。一方、勤務目的のトリップは、発生地も到着地も長期の行動変化に基づくものであるため、両側制約が望ましいと考える研究者もいる。

また、モデルが評価しようとする交通政策によって、発生量、集中量の両方が変化しないと考える場合には両側制約が、どちらかが変化すると考える場合には片側制約が望ましいという考え方もある。(p.188, 筆者による要約)

両側制約エントロピーモデルは、空間相互作用モデル(最近のレビューとして Roy and Thill, 2004¹²⁵⁾を参照)の一種であるが、利用者の行動モデルとの対応が必ずしも明確ではないという問題が指摘できる。一方、片側制約型のエントロピーモデルは、Logit 型の目的地選択モデルに他ならない。我が国の都市圏交通計画の予測モデルには、古くから重力モデルが利用されてきたが、最近では、この目的地選択モデル型の分布モデルの利用も見られる。

両側制約型のモデルの場合は、利用者の行動理論に基づいたトリップ発生選択レベルとの統合が容易ではないという問題がある。ただ、キャリブレーションが容易なのは、両側制約型のモデルという関係にある。

以上のような関係は、表-2.3 のようにまとめられる。

表-2.3 分布配分統合モデルの分類と特徴

	両側制約型	片側制約型
行動論的根拠	解釈は困難	目的地選択モデル
パラメータの推定	容易	ゾーン数によっては困難
既存の適用例が多いトリップ目的	勤務-帰宅トリップ	非業務目的トリップ
モデル構造	安定的	場合によっては不安定
発生選択モデルとの統合	困難	容易

なお、片側制約を基本として、Yang and Meng (1998)¹²⁶⁾のモデルのように、発生制約と集中制約のクラスを分けてモデル化するというアプローチも存在する。

本研究では、後述するようにトリップ発生選択とも統合したモデルを構築するために、片側制約型のモデルを採用する。

2.5.5 平均乗車人員と時間価値の異質性の扱い方

実都市圏への適用を考えた場合、特に分担・配分を統合したモデルにおいては、平均乗車人員の設定法は重要である。この設定によっては、モデルと等価な最適化問題の構築可能性に影響を与える。また、手段ごとに時間価値が異なることがありうる。これらの設定と等価な最適化問題への変換可能性の関係は表-2.4のようにまとめられる。

表-2.4 ネットワーク統合モデルの最適化問題への変換可能性の整理

		自動車ネットワークのみ混雑		手段別に分離した混雑 (e.g. 自動車と鉄道)	
		手段毎 同一の VOT	手段別 VOT	手段毎同一の VOT	手段別 VOT
単一利用 者クラス	VOC=1	可能	可能	可能 本論文第3章 円山ら(2002)	可能
	VOC≠1	可能 Abrahamsson and Lundqvist (1999) ¹²⁷⁾	可能	可能	可能
マルチ クラス	クラス別 VOT	可能 van Vliet, <i>et</i> <i>al</i> (1986) ⁶³⁾	可能	可能 本論文第4章 円山ら(2003)	不可能
	クラス別 VOC	可能	可能	不可能	不可能
	クラス別 VOT,VOC	可能	可能 Boyce and Bar-Gera (2003) ¹²⁸⁾	不可能	不可能

注) VOT: Value of Time, 時間価値

VOC: Vehicle Occupancy, 平均乗車人員

「不可能」とは一般のネットワークでの変換可能性であり、変換可能性を完全に排除するものことを意味しない。特殊な事例では、変換可能なこともありえる。

単一クラスのモデルの場合、費用単位を金銭単位と置くことで、通常の下では、最適化問題への変換可能性は問題ない。

Abrahamsson and Lundqvist (1999)¹²⁷⁾のモデルでは、都市圏全域で、乗車人員を均一に与えている。この場合は、最適化問題をわずかに変更することで対応できる。一般に、都市圏全域で均一に与える場合は、手段間に相互干渉がないモデルであれば、手段別に平均乗車人員を設定することは問題ない。

Boyce and Bar-Gera (2003)¹²⁸⁾は、利用者のクラス別、手段別に平均乗車人員、時間価値が変化した場合の最適化問題を示している。このモデルでは、公共交通に混雑が発生しない設定になっているのがポイントである。一般に、混雑が生じるのが1手段のみの場合は、クラス別の平均乗車人員の設定は可能であるが、2手段以上に混雑が発生すると、最適化問題の構成は困難になるという関係にある。

なお、平均乗車人員は、利用者の相乗り行動で変化するものである。だが、この行動をネットワーク均衡モデルの枠内で整合的にモデル化した研究は、筆者の知る限りでは見当たらない。

2.6 アルゴリズムの拡張

ネットワーク均衡モデルのアルゴリズムは、Patriksson (1994)¹²⁹⁾、土木学会(1998)³⁶⁾にまとめられている。最近の開発動向は、Patriksson (2004)¹³⁰⁾が詳しい。

固定需要型のネットワーク均衡モデルでは、Frank-Wolfe法が、統合需要型のモデルでは、Evans型の部分線形化法がもっとも良く用いられる解法である。両方のアルゴリズムとも、計算の初期段階においては、比較的効率的であるが、厳密な最適解への収束性は非常に緩慢であることが知られている。この問題点の改良のために、打ち切り二次計画法、Simplicial Decomposition法などがあり、土木学会(1998)³⁶⁾にまとめられている。Frank-Wolfe法の改良方法については、Lee and Nie (2001)¹³¹⁾、Chen (2001)¹³²⁾が考察を進めている。

これ以降の重要な発展として、Bar-Gera (2002)¹³³⁾、Bar-Gera and Boyce (2002)¹³⁴⁾による起点別の準ニュートン型のアルゴリズムが挙げられる。彼らは、現実の大規模なネットワークにおいても厳密解を求めることができることを報告している。Boyce, Ralevic-Dekic and Bar-Gera (2003)¹³⁵⁾は、このアルゴリズムを用いて、実務において厳密解を求めることの必要性を考察している。Bar-Gera and

Boyce (2003)¹³⁶⁾は、このアルゴリズムを統合型モデルに応用している。

リンク間の相互干渉が非対称となるモデルは、一般に解の安定性、一意性が保証されない。これらの問題に対しては、緩和法による解法がしばし利用されている。内田ら (2002)¹³⁷⁾は、この種のモデルのもつ解の信頼性を検証している。

2.7 パラメータの推定

以上は、ネットワーク均衡モデルの理論、数理特性、計算法についてまとめたものである。現実の都市圏に適用する際には、モデルに含まれるパラメータの設定法が重要となる。以下、それらパラメータの推定法についてレビューし、考え方をまとめる。

2.7.1 道路のリンクコスト関数

道路のリンクコスト関数は、一般に以下の BPR 型が用いられることが多い。

$$t_a^{car} = t_a^0 [1 + \alpha (x_a^{car} / Q_a^{car})^\beta] \quad (2.35)$$

ここで、 t_a^0 :自由走行時間, Q_a^{car} :交通容量である。

わが国における道路の交通量配分に用いるリンクコスト関数の推定事例として、代表的なものは溝上ら (1989)¹³⁸⁾、松井、山田 (1998)¹³⁹⁾、八木、溝上 (2000)¹⁴⁰⁾、吉田、原田 (2002)¹⁴¹⁾が挙げられる。最近の推定事例は、道路交通センサスのデータを用いたものが多い。

西谷、朝倉、柏谷 (1991)¹⁴²⁾は、BPR 関数のパラメータ α, β が均衡配分結果に及ぼす影響について、分散分析を用いて検討している。この結果、交通量や所要時間といった評価指標に対して、 α, β は、それぞれ異なった影響を与えることを明らかにしている。

リンクコスト関数の推定に関しては、自由走行時間に関する信号交差点密度、沿道状況の影響を表現するパラメータと、容量制約を表現する α, β は、性質、配分モデルにおける役割が異なるものであり、それらを考慮した推定法の開発が今後望まれると筆者は考える。パラメータによって実測データから推定可能なもの、そもそもできないもの、推定することが望ましくないものがあると思われる。さまざまなデータソースを適切に使い分けた推定が望ましいと考える。また、パラメータ推定時と配分時については、交通容量の設定法の整合性を取る必要がある。

朝倉 (1994)¹⁴³⁾ は、リンクコスト関数の設定とアウトプットの精度評価についての留意点をまとめている。Boyce, *et al.* (1981)¹⁴⁴⁾ は、リンクコスト関数の違いの配分結果への影響を精査している。

2.7.2 鉄道の混雑不効用関数

鉄道の混雑不効用関数は、鉄道車内の混雑による乗客の不効用を表現する。現時点での我が国におけるこの関数の公式なものは、マニュアル¹⁴⁵⁾に掲載されている、折れ線型の式であるが、その式の元になっているのは、いわゆる家田式として知られた、志田ら (1989)¹⁴⁶⁾の論文の値である。この論文では、利用者均衡モデルの逆推定の考え方で、パラメータを求めている。そのほかにも、美谷ら(1987)¹⁴⁷⁾では、乗車位置選択行動から、パラメータの推定もされている。以上は、土木系の研究事例であるが、経済系の研究事例では、山鹿、八田 (2000, 2003)^{148), 149)}が家賃関数から推定するアプローチを示している。

このほかには、Lam, *et al.* (1999)¹⁵⁰⁾は、香港における LRT の混雑パフォーマンスを表現するモデルを提示している。岩倉ら(2000)¹⁵¹⁾は、運行本数と駅乗降者数によって変動する各列車の表定速度を表現可能な鉄道のリンクコスト関数を推定している。岩倉らの関数は、鉄道サービスの供給レベルを規定する関数で、サービスのパフォーマンスを規定する他の関数とは異なることに注意が必要である。

2.7.3 経路選択モデルのパラメータ

非集計行動モデルを用いた経路選択モデルの研究は、膨大であり、ここでは、レビューの対象としない。朝倉、羽藤(2000)⁷⁶⁾、羽藤(2002)³⁸⁾、Ben-akiva and Bierlaire (2003)¹⁵²⁾などを参照されたい。

非 IIA 型の経路選択モデルのパラメータ推定については、鉄道経路選択に関する Yai, *et al.* (1998)¹⁵³⁾による構造化プロビットモデルが、理論的にも優れており、東京都市圏鉄道ネットワークの評価についての実務での利用の実績を持っている。

道路ネットワークに対しての Logit 型確率的利用者均衡配分のパラメータ θ の推定については、溝上、松井 (1993)¹⁵⁴⁾の研究がある。

Yang, Meng and Bell (2001)¹⁵⁵⁾ は、OD 表と θ の同時推定法を示している。彼ら

は、SQP (Successive Quadratic-Programming)法 を用いた推定法を利用した。ただし、観測値、推定値についての統計的性質については示していない。この問題に対して、Lo and Chan (2003)¹⁵⁶⁾は、観測値の統計的分布に基づく尤度関数を設定した手法を提案している。彼らは、OD 交通量、リンク交通量の確率分布を規定する分散共分散行列は、外生的に与えて、それを用いた最尤推定法を提案している。

一方、中山、高山 (2003)¹⁵⁷⁾は、システム全体を確率的に記述するモデルを構築し、そのモデルから得られる分散共分散行列を用いたパラメータ推定法を提案している。

2.7.4 統合需要モデルのパラメータ

統合型のモデルは、一般に需要固定型のモデルよりも多くのパラメータが含まれ、それをどのように推定するかという問題がある。

Boyce and Zhang (1997)¹⁵⁸⁾は、ネットワーク統合均衡モデルのパラメータのキャリブレーション法を、次のようにまとめている。

1. 他の事例の値を転用する
2. 関連制約条件式の制約乗数として求める。
3. 統計的推定

2.の例としては、Boyce, *et al.* (1983)¹⁵⁹⁾ の Dispersion-constrained モデル、Wilson (1967)¹⁶⁰⁾、Anas (1988)¹⁶¹⁾の Entropy-maximizing モデルがあり、統合モデルの等価最適化問題に付加した制約条件の双対変数としてパラメータを推定するものである。これらは、Oppenheim (1995)³²⁾にも詳しい。

最近の研究は、3.のアプローチをとるものが多い(Boyce and Zhang, 1998; Abrahamsson and Lundqvist, 1999; Boyce and Bar-Gera, 2003)^{162), 127), 128)}。この場合は、収束の保証されたアルゴリズムの開発が課題となる。

溝上、竹隈 (2003)¹⁶³⁾は、上位問題を観測交通量とモデル推定値の残差平方和最小化、下位問題を各種ネットワーク均衡モデルとおいた MPEC を、非線形感度分析を用いて逆問題的に解く方法を示している。

2.8 ネットワーク分析の応用技術

ネットワーク均衡モデルを拡張したモデル，分析手法を整理する．

2.8.1 モデル化要素の拡大

ネットワーク均衡モデルにおけるモデル化要素を拡大する研究は，数多い．Lam and Yin (2001)¹⁶⁴，Lam and Huang (2002)¹⁶⁵，Lam and Huang (2003)¹⁶⁶は，ネットワーク配分モデルと活動選択との統合を試みている．Nagurney and Dong (2002)¹⁶⁷は，手段選択に情報通信の代替案を導入したネットワーク均衡モデルを提案している．溝上，亀山 (1998)¹⁶⁸は，分布・配分統合型ネットワーク均衡モデルを用いた観光地の容量推定法を提案している．Oppenheim (1993)¹⁶⁹は，人流と物流を統合したネットワーク均衡モデルの一例を提示している．

2.8.2 トランジット配分モデル

バス，LRT や鉄道など運行軌道が定められているトランジット(Transit)の配分モデルについての研究も進められている．これらの発展経緯などは de Cea and Fernandez (2000)¹⁷⁰に詳しい．

トランジットにおける Wardrop 均衡モデルの構築は，de Cea and Fernandez (1993)¹⁷¹，Wu, *et al.* (1994)¹⁷²による．Lam, *et al.* (1999)¹⁷³は，トランジット配分を確率的利用者均衡モデルとして拡張している．Lam, *et al.* (2002)¹⁷⁴は，容量制約型のトランジット配分モデルにおいて，運行頻度を内生化している．Lo, *et al.* (2003)¹⁷⁵は，多手段交通機関における乗換えと非線形の運賃制度のモデル化を提示している．トランジットモデリングの最近の専門書としては，Lam and Bell (2002)¹⁷⁶が挙げられる．この他，時刻表を組み込んだモデルなど，モデルをより詳細化しようとする研究も数多く見られる．

2.8.3 情報提供の評価モデル

ネットワーク均衡分析を用いた ITS(Intelligent Transport Systems)，ATIS(Advanced Traveler Information System)，VICS(Vehicle Information and Communication System) などの情報提供の評価モデルに関する研究も数多い．

Yang (1998)¹⁷⁷は，ATIS の普及率と情報利用に関する多種流ネットワーク均衡

モデルのパラメトリック数理最適化法による均衡計算モデルを示した。Yang and Meng (2001)¹⁷⁸⁾は、このモデルを普及率の増加を考慮するように拡張している。また、Yin and Yang (2003)¹⁷⁹⁾は、このモデルを、情報に従うかどうか(compliance)も含めた拡張モデルを提示している。

溝上, 本田 (2002)¹⁸⁰⁾は、Yang (1998)¹⁷⁷⁾のモデルを、VICS 利用の選択行動も内生化した拡張モデルを提示している。溝上, 竹隈 (2003)¹⁸¹⁾は、このモデルを用いた情報提供効果の便益計測を実都市圏で試算している。

Yang (1999)¹⁸²⁾は、情報提供と最適課金の組み合わせで総所要時間が最小化されるシステム最適状態が実現することを利用した分析を示している。

Yang and Zhang (2002)¹⁸³⁾は、交通情報利用の有無を区別した乗用車と公共交通の選択行動を時間価値の異質性を考慮しながら考察している。Huang, Lam and Chan (2003)¹⁸⁴⁾は、情報利用の有無で利用者を区別したマルチクラス活動、目的地、経路選択ネットワーク均衡モデルを示している。

これらのモデルは、いずれも静的なネットワーク均衡を前提としたものであり、情報提供効果に関する動学的な要素は捨象されておりその点で限界はあろう。ただし、day-to-day に提供情報を参照することで得られる効用に関する一種のベンチマーク的な評価値を与えており、また現実都市圏への計算可能性も高いという特徴があり、それらを生かした適用が望まれる。

2.8.4 容量制約型利用者均衡配分モデル

通常 of 静的利用者均衡問題に対する式(2.9)の等価最適化問題の制約条件に容量制約を追加し、その制約条件に対応するラグランジュ乗数が待ち行列時間に等しくなるとする分析も数多い。古くは、井上(1986)¹⁸⁵⁾、Patriksson(1994)¹⁸⁶⁾、Ferrari(1995)¹⁸⁷⁾、Bell (1995)¹⁸⁸⁾、Yang and Bell(1997)¹⁸⁹⁾、Yang and Huang(1998)¹⁹⁰⁾などに見受けられる。Cheng, Iida and Uno (2002)¹⁹¹⁾は、容量制約型利用者均衡モデルへの準ニュートン法の適用を検討している。容量制約型利用者均衡モデルについての最近の研究例は、Nie, Zhang and Lee (2004)¹⁹²⁾がある。

しかしながら、これらの手法は、渋滞の遅延時間が交通流との特性とは無関係に決定されており、実際の渋滞現象との対応が不明確であるという問題点が指摘されている。交通渋滞は、需要交通量が交通容量を上回る時に発生するが、このモデルでは、リンク内交通量がボトルネック容量と等しくかつ一定である場合にも渋滞が発生することになる。また 1 時間帯での静的モデルであるため

に、渋滞の時間的進展メカニズムを内生できていない。

2.8.5 時間帯別配分モデル

時間帯別配分モデルは、時間帯内では静的配分と同様に定常状態を仮定し、時間帯間では、動的配分と同様に状態変化を仮定する。

時間帯間の状態変化は、時間帯内に終点到着できなかった残留交通量によって表現される。よって、時間帯別配分モデルでは、時間帯の終端時刻におけるこの残留交通量の扱いが重要な部分となる。OD 修正法 (藤田, 松井, 溝上, 1988)¹⁹³⁾は、経路上の各リンクにおける残留交通を平均化し、OD 表のレベルで修正を行う方法である。OD 交通量レベルの修正では、各リンクでの渋滞を表現できないという限界があるが、実用的な方法といえよう。OD 修正法による時間帯別配分モデルは宮城, 牧村 (1991)¹⁹⁴⁾の研究もある。

リンク修正法¹⁹³⁾は、リンク交通量レベルでの修正を行っているが、修正後の等時間原則を満たすことが難しくなっている。均衡リンク法(藤田, 山本, 松井, 1989)¹⁹⁵⁾は、修正後も等時間原則が満たされるように変分不等式によりリンク修正法を改良したものである。藤田ら(1989)¹⁹⁵⁾は、渋滞を考慮したリンクコスト関数を設定し、均衡リンク修正法によりリンクでの渋滞表現を試みている。しかし、待ち行列台数が明示的な内生変数とされていないコスト関数の設定には疑問が残るとされる¹⁹⁶⁾。赤松ら(1998)¹⁹⁶⁾は、この問題を解消するコスト関数を用いて、リンクでの渋滞と時間帯別の弾性需要を内生化したモデルを提案し、変分不等式問題として定式化している。このモデルは、固定需要問題の場合、Frank-Wolfe 法を用いた通常の利用者均衡問題におけるコスト関数を多少修正するだけで実行可能である。赤松ら(1998)¹⁹⁶⁾と同様に、残留待ち行列を考慮した時間帯別モデルの試みとしては、Lam, *et al.* (1999)¹⁹⁷⁾, Lam and Zhang (2000)¹⁹⁸⁾が挙げられる。

2.8.6 非線形感度分析

非線形感度分析(Sensitivity Analysis)とは、モデルに含まれるパラメータや入力変数の変化等に対して、モデルの解がどのように変化するかを、計算しなすことなしに解析する手法である。このような解析は、シミュレーション・モデルでは不可能であり、数理モデルの持つ利点の一つである。

ネットワーク均衡モデルに対する非線形感度分析(Sensitivity Analysis)は、需要固定型利用者均衡モデルに対する Tobin and Friesz (1988)¹⁹⁹⁾, 需要変動型に対し

での Yang (1997)²⁰⁰の貢献がある。最近では、ロジット型確率的均衡モデル(Ying and Miyagi, 2001)²⁰¹、プロビット型確率的利用者均衡での解析例(Clark and Watling, 2000, 2002)^{202, 203}がみられる。Leurent (1998)²⁰⁴は、2 基準ネットワーク均衡モデルに対する非線形感度分析と誤差分析法を示している。さらに、最近の研究としては、Patriksson and Rockafellar (2003)²⁰⁵、Patriksson(2004)²⁰⁶がある。

2.8.7 MPEC アプローチ

ネットワーク均衡分析を、広く都市交通政策の評価に利用していくことを目的とした研究も数多い。上位問題を交通政策モデル、下位問題をネットワーク均衡モデルとした均衡制約つき最適化構造となる問題で、一般に MPEC (Mathematical Programming with Equilibrium Constraints)として知られている。

MPEC の一種と位置づけられるネットワークデザイン(network design)問題のレビューとしては、古くは朝倉 (1988)²⁰⁷があり、最近のものでは Yang and Bell (1998)²⁰⁸がある。Luo, *et al.* (1996)²⁰⁹、MPEC 研究会 (2003)²¹⁰は、この問題の専門書である。なお、ネットワークデザイン問題のうち、料金設定、課金位置を定める問題については、2.9 でも触れる。

Tam and Lam (2000)²¹¹は、道路容量と駐車場空間の制約下での最大乗用車保有を求める問題について、下位問題を分布配分統合モデル、上位問題を乗用車保有の最大化とおいた 2 段階最適化モデルとして解析している。Patriksson and Rockafellar (2002)²¹²は、2 段階最適化問題による交通管理計画を論じている。Meng and Yang (2002)²¹³は、ネットワークデザイン問題において、便益の分布と公平性についての制約を付加した場合について解析している。

Yang and Meng (1998)²¹⁴は、待ち行列を考慮した出発時刻、経路選択と混雑料金の関係を考察している。Ferrari (1995)²¹⁵や Yang and Bell (1997)²¹⁶は、交通量を制約する手段として課金政策を用いる場合の交通の制約とプライシングとネットワーク均衡の関係を考察している。Ferrari (1996)²¹⁷は、これらのモデルについて、自動車と公共交通の 2 手段ネットワークの場合について解析、評価をしている。

赤松, 宮脇 (1995)²¹⁸は、利用者均衡条件下のネットワーク最大容量問題を論じている。Yang, Bell and Meng (2000)²¹⁹は、分布配分統合モデルを用いた赤松, 宮脇(1995)²¹⁸の発展モデルを示している。赤松, 半田 (1997)²²⁰は、赤松, 半田 (1996)²²¹の交通・住居立地統合均衡モデルを用いた許容オフィス容量問題を解析している。

ネットワーク均衡問題を下位問題とした MPEC の解法として、2.8.6 で紹介した非線形感度分析が有効とされ、これを利用した政策分析例は数多い。Yang and Yagar (1994)²²²⁾ は、高速道路の交通量制御問題、Yang(1995)²²³⁾ は、OD 交通量推定問題に利用している。また、Yang (1997)²²⁴⁾ は道路ネットワーク設計問題や最適料金設定問題など、下位問題の解である交通需要が変化した時、上位問題の消費者余剰や総走行費用の変化を予測するのに、Miyagi and Suzuki (1996)²²⁵⁾、鈴木(2002)²²⁶⁾は、上位問題をラムゼイ価格基準による社会的厚生を最大化、下位問題を機関分担・配分統合モデルとした問題の計算手法に非線形感度分析を適用している。適用例は、このほか、Yin and Ieda (2002)⁷²⁾にも見られる。

Yang and Meng (2000)²²⁷⁾は、BOT 型の民間企業による有料道路事業における課金額と容量の選択について、利益最大化解と社会的余剰最大化解などの比較の数値実験を示している。Yang and Meng (2002)²²⁸⁾は、このモデルを用いて、一般ネットワークでも Morhring の定理が成立することを示している。Morhring の定理(Mohring and Harwitz, 1962)²²⁹⁾とは、道路料金と道路容量の関係についての定理で、以下の条件下において最適混雑税の課徴により最適な道路整備水準を実現できることを示すものである(解説書として例えば、Small, 1992)²³⁰⁾。

- (1) 容量は連続的に変化可能
- (2) 建設費は、規模に関して一次同時(constant return to scale)
- (3) トリップ費用関数が、交通量/容量に対してゼロ次同次

これに従えば、最適混雑料金収入が固定費(道路の償却費+支払い利子)を上回る場合、道路規模を拡充し、下回る場合は道路規模を縮小するという政策判断基準が導ける。

Yang and Bell (2001)²³¹⁾は、*Transportation Research Part B* の2段階最適化問題の特集号で、今後の課題として、(1) 実ネットワークでの適用との比較、(2) 問題の非凸性や局所最適解の存在の影響の精査、(3) 大局的な最適解を効率的に求める解法の開発、を挙げている。

一般的な MPEC は、大域的な解を求めることが困難であり、モデルの対象が大規模になるほどフレームが極めて複雑になる。その結果、現時点では、扱われているネットワークが極めて単純であることも少なくない。また、分析結果も数値計算にとどまることも多く、現実の大規模都市圏での政策分析に利用可能な、一般的で有用な政策知見が得られているとは限らないように思われる。

2.9 ロードプライシング

ここでは、第5章、第6章の政策分析対象となるロードプライシングに関して、広範囲な視点からのレビューを行っておく

ロードプライシングは、近年都市交通政策の現実的な代替案となりつつある。ノルウェーのトールリング、ロンドン中心部でのエリアプライシング、フランスの一部の高速道路でのピーク時課金、カリフォルニア SR-91 での Value Pricing、トロント近郊高速道路での適用、シンガポール中心部での実施、日本での環境ロードプライシング、首都高の夜間割引実験など、定義によっては、すべてロードプライシングに含まれるものである。太田(2003)²³²⁾などを参考にされたい。

ロードプライシングに関する研究は、経済学、交通計画、交通工学、地域科学、OR、土木計画学など多分野にわたる。学術雑誌の特集だけでも、Button (1986)²³³⁾、Small (1992)²³⁴⁾、Paulley (2002)²³⁵⁾、山田(2004)²³⁶⁾が挙げられる。専門書として Johansson and Mattsson (1995)²³⁷⁾、Button and Verhoef (1998)²³⁸⁾がある。交通混雑と混雑課金のまとまったレビューとしては、Lindsey and Verhoef (2001)²³⁹⁾が挙げられる。和書では、山田(2001)²⁴⁰⁾がある。本節では、山田 (2001)²⁴⁰⁾に詳述されている点は割愛しながら、最近の研究動向を中心にレビューする。

ロードプライシングに関する研究は、いくつかの分類軸がある。Huang, Li and Kaku (2003)²⁴¹⁾は、ファーストベストとセカンドベスト(最適課金と次善課金)、静的と動的(static vs. dynamic)、利用者のクラスが単一か複数かで分類しながらレビューしている。このほかにも、

- ・ 対象とする空間の広がり: 単一リンク, 2リンク, 平行(parallel)ネットワーク, 一般ネットワーク
- ・ 理論的モデルと実証的モデル
- ・ 利用者の行動分析に主眼をおいたものと規範的な分析に主眼をおくもの
- ・ ロードプライシングの目的: 混雑緩和, 道路投資

などでも分類されよう。

本節では、最適課金(2.9.1)、セカンドベスト課金(2.9.2)、動的分析(2.9.3) 利用者の異質性(2.9.4)、政策評価例(2.9.5)、適用上の問題点(2.9.6)の流れでレビューする。

2.9.1 最適課金

Pigue (1920)²⁴²⁾、Walters (1961)²⁴³⁾以来の限界費用原理に基づく最適課金理論は、

ネットワーク分析にも応用され、成果が挙げられてきた。

2.9.1.1 ネットワークを考慮した最適課金

Beckmann (1965)²⁴⁴⁾, Dafermos and Sparrow (1971)²⁴⁵⁾によって、固定需要型分離型リンクコスト関数を用いた利用者均衡配分で、各リンクに限界費用課金を課すことで、総所要時間が最小になるシステム最適配分が達成されることが示された。この理論は、Dafermos (1973)²⁴⁶⁾により複数利用者クラスの場合に拡張され、Smith (1979)²⁴⁷⁾は、非分離型リンクコスト関数・需要関数の場合でも、一定の条件下で、その理論が適用できることを示した。Beckmann 型の需要変動型利用者均衡モデルの場合においても、全リンクへの限界費用課金が Gartner (1980)²⁴⁸⁾, Yang and Huang (1998)²⁴⁹⁾らによって社会的余剰を最大にする課金であることが示されている。

以上は、経路選択が確定的なモデルであるが、確率均衡配分モデルの元での最適混雑料金については、赤松, 桑原(1988)²⁵⁰⁾, Akamatsu and Kuwahara(1989)²⁵¹⁾による研究がある。彼らのモデルの目的関数は総走行時間の最小化を基本としたものであり、その場合に適用できる限界費用原理の拡張式を示した。Smith, *et al.* (1994)²⁵²⁾も、同様な考察を行っている。

これらの研究に対して、Yang (1999)²⁵³⁾は、利用者の確率的選択モデルと、総所要時間の指標の不整合性を指摘し、Fisk (1980)⁶⁵⁾型のロジット確率均衡モデルにおいても、モデルと整合的な純経済便益の最大化を目的関数とした場合、通常の限界費用原理が最適混雑料金となることを示した。

以上のモデルは、単一の手段を対象としてものであったが、最近、Bellei, *et al.* (2002)²⁵⁴⁾は、以上の議論をさらに一般化して、利用者の行動モデルが複数の利用者クラスで構成されたランダム効用理論に従う任意のモデルで、リンクコスト関数が相互干渉を表現する場合も含めた最適課金について、不動点問題を用いた議論を展開している。そして、最適化の目的関数を、行動モデルと整合的な利用者余剰と料金収入の和とおいた場合、限界費用原理が最適課金解の必要条件を満たす解の一つであることを証明している。円山ら(2003)²⁵⁵⁾は、特に上記のモデルのうち、複数交通手段を考慮した Nested Logit 型の確率的利用者均衡モデルについて限界費用課金が最適課金であることを平易に証明している。このモデルは、第5章で詳述されるⁱⁱ⁾。また、Yang, Meng and Hau (2004)²⁵⁶⁾は、同様なモデルの最適課金について、代表的個人の直接効用関数を用いた分析を示し

ⁱⁱ⁾ 円山ら(2003)²⁵⁵⁾のモデルは、Bellei, *et al.* (2002)²⁵⁴⁾の特殊例に過ぎないともいえるが、著者らは、Bellei, *et al.* (2002)²⁵⁴⁾の研究の存在を知らずに、この論文の草稿(円山ら, 2002)を投稿していたことを付記しておきたい。

ている。

2.9.1.2 最適課金の徴収法

前節で、ネットワークで考えた場合においても全リンクへの限界費用課金がモデルと整合的な社会的余剰を最大化する最適課金であることが示された。しかしながら、全リンクへの限界費用課金は、社会的余剰を最大化する課金の十分条件であるが、必要条件とは限らない。すなわち、全リンクへの限界費用課金以外の課金策でも社会的余剰を最大化する課金方式もありうる。

この観点から Hearn and Ramana (1998)²⁵⁷⁾, Hearn and Yildirim (2002)²⁵⁸⁾や Dial (1999, 2000)^{259), 260)}らは、社会的余剰の最大化を満たした課金解集合から課金収入が最小化されるもの、課金位置数を最小化するものなど、別の基準をも同時に満たす解の算出法について分析している。

2.9.2 セカンドベスト課金

以上の最適課金は、ネットワーク上での全リンクでの料金徴収を前提としたもので、実行は、現実的ではない。そこで、ネットワーク上での一部のリンクのみでの徴収を前提としたセカンドベスト課金についての研究も盛んに行われている。

2.9.2.1 単純なネットワーク対象

課金リンクと非課金リンクの存在を仮定した 2 リンクネットワークを対象にした議論では、動的なモデルでの Braid (1996)²⁶¹⁾, 静的モデルでの Verhoef, Nijkamp and Rietveld (1996)²⁶²⁾, Liu and McDonald (1998)²⁶³⁾ Liu and McDonald (1999)²⁶⁴⁾ が挙げられる。

線上市場におけるロードプライシング政策と Park & Ride 政策を議論している研究としては、竹隈, 溝上 (2002)²⁶⁵⁾, Wang, Yang and Lindsey (2004)²⁶⁶⁾が挙げられる。

2.9.2.2 一般のネットワーク対象

Verhoef (2002)^{267),268)}は、一般的なネットワークを対象にしたセカンドベスト課金の計算法について考察している。このモデルを用いて、May, *et al.* (2002)^{269),270)}は、仮想的なネットワークにおけるコードン課金のパフォーマンスを比較している。

Santos (2002)²⁷¹⁾は、通常のコードン課金と二重コードンの効果を比較している。Mun, *et al.* (2003)²⁷²⁾は、単一中心都市モデルを用いて最適コードン課金を議論している。Yang, Zhang and Huang (2002)²⁷³⁾, Zhang and Yang (2004)²⁷⁴⁾は、コードン課金の位置と課金額を決定する2段階最適モデルの定式化と解法を示している。

このほか、May and Milne (2000)²⁷⁵⁾は、コードン方式、距離方式、所要時間方式、混雑応答式などのさまざまなセカンドベスト課金の結果を比較している。野杵, 秋山(2001)²⁷⁶⁾, Akiyama and Noiri (2003)²⁷⁷⁾, 秋山, 奥嶋 (2003)²⁷⁸⁾は、遺伝的アルゴリズムを用いたゾーン別料金設定について考察している。

ネットワークデザイン問題において、計画変数を課金額とするネットワーク料金設定問題(network toll design problem)の研究も多い。Yang and Lam (1996)²⁷⁹⁾, Yang and Bell (1997)²¹⁶⁾は、2.8.6 で述べた非線形感度分析を用いた分析を進めている。Yang and Zhang (2002)²⁸⁰⁾は、次善のネットワーク料金設定問題(network toll design problem)に、さまざまな公平性の制約を導入した。

2.9.3 動的分析

渋滞現象は、静的なモデルで表現するのは本来適切とはいえない。この問題に対しては、Vickrey (1969)²⁸¹⁾以来のボトルネックモデルを用いたモデルが有効である。

静的な分析の問題点と限界は、桑原(2003)²⁸²⁾によって明快に整理されている。特に、桑原(2002)²⁸³⁾は「ボトルネック容量がいっぱいに使われている状態では、時刻 t の動的限界費用は、自由旅行時間と時刻 t 以降の渋滞継続時間の和に等しくなる」ことを示した。

動的な分析は、最近、経済学者によっても行われているが(Verhoef, 2001; Small and Chu, 2003; Verhoef, 2003)^{284),285),286)} 桑原(2002)²⁸³⁾ほど明快な結論を導いている研究はないように思われる。

日本における最近の研究では、赤松ら (1999)²⁸⁷⁾は、始業時刻選択に関する動的な均衡条件を基に通勤不効用を最小にする始業時刻分布を導いている。吉村,

奥村ら(2002, 2003)^{288), 289), 290)}は, 始業時刻変更による業務活動の効率低下の影響を考慮した通勤・始業分布, および手段の分担を考慮できるモデルを用いた分析を行っている. Huang (2000, 2001)^{291), 292)}は, ボトルネックモデルにおける競合公共交通機関を考慮した Tabuchi (1993)²⁹³⁾のモデルを発展させた分析を行っている.

ただ, これらのモデルは, いずれも単一リンク, あるいは極端に単純なネットワークを対象としており, 本研究の対象とする都市圏レベルの分析には不向きである.

なお, 秋山ら (1999)²⁹⁴⁾は, 渋滞シミュレーションを用いた混雑料金の設定法を考察している.

2.9.4 利用者の異質性

2.9.4.1 時間価値の異質性

利用者均衡配分モデルにおいて各リンクに限界費用原理を適用することで, 総走行時間を最小化するシステム最適配分が達成できることは, 2.9.1.1 でも示したように, よく知られている. 利用者の時間価値に異質性が存在している場合この関係はどのように変化するのだろうか.

Yang and Huang (2004)²⁹⁵⁾, Yin and Yang (2004)²⁹⁶⁾は, 時間価値の異質性を離散的に扱う場合について興味深い議論を示している. これについて多少詳しく紹介しよう.

まず, システム最適配分の目的関数を, 金銭単位の総所要時間の最小化とおいた場合を考える.

$$\min. \sum_{a \in A} \sum_i \beta_i t_a(x_a) x_a^i \quad (2.36)$$

subject to (2.19)

ここで,

β_i : 利用者クラス i の平均時間価値

x_a : リンク a の利用者クラス合計の交通量

x_a^i : リンク a の利用者クラス i の交通量 $\left(\sum_{i=1} x_a^i = x_a \right)$

$t_a(x_a)$: リンク a のリンクコスト関数 (リンク a の交通量総量のみ依存) である.

この場合の、最適課金解の一つは、

$$\tau_a^{SO} = \left(\sum_i \frac{x_a^i}{x_a} \beta_i \right) \left(x_a \frac{dt_a(x_a)}{dx_a} \right), \quad a \in A \quad (2.37)$$

であり、この課金額はクラスによらず一定であることが示されている。 $\sum_{i=1} \frac{x_a^i}{x_a} \beta_i$

とは、リンク a の利用者の時間価値の期待値であり、通常限界費用課金を自然に拡張したものとなっている。文(1993)²⁹⁷⁾は、同様な考察を OD ペア、 n リンクから構成される平行ネットワークを対象に行っていたが、その考察を一般ネットワークに拡張したものである。

以上は、時間価値の分布を離散的に扱った場合であったが、連続分布で扱った場合にも同様な議論が展開される。Dial (1999)^{298),299)}は、この連続分布型の時間価値モデルを用いた場合の最適混雑課金を議論している。総知覚時間費用の最小化を目的関数とする。

$$\min. \sum_{a \in A} u_a t_a(x_a) \quad (2.38)$$

$$u_a = \int_B \beta x_a(\beta) d\beta \quad (2.39)$$

ここで、

u_a : リンク a における時間価値 β の一次モーメント

$x_a(\beta)$: リンク a の時間価値 β である利用者数。

x_a : リンク a の総利用者数。 $\left(x_a = \int_B x_a(\beta) d\beta \right)$

$t_a(x_a)$: リンク a のリンクコスト関数 (リンク a の交通量総量のみ依存) である。

このときの最適課金解の一つが、

$$\tau_a^{SO} = u_a \frac{dt_a(x_a)}{dx_a}, \quad a \in A \quad (2.40)$$

であることが示されている。すなわち限界費用の社会的要素の期待値が最適課金となる。この課金も利用者間で同一なものである。この Dial (1999)^{298),299)}のモデルは、OD ペアごとに異なる時間価値分布をしていても良い。

以上のモデルからは、利用者に異質性が存在しても、利用者によらない課金制度、言い換えると無名性を満たす料金制度で最適課金が可能であることが示されている。これに関連して、Arnott and Kraus(1998)³⁰⁰⁾は、一般的な混雑の動学モデルを用いて、課金額が時間変動可能で、金銭単位の目的関数を用いる場合、利用者に異質性が存在しても、無名性を満たす最適課金が可能であることを証明している。

また、井料，桑原(2001)³⁰¹⁾は，単一ボトルネックを対象とした出発時刻選択問題において時間価値の個人差を考慮した議論を展開している．Yang, Kong and Meng(2001)³⁰²⁾は，バスサービスの競争市場モデルにおける利用者の時間価値の分布を考慮した場合の分析を，Yang, *et al.* (2002)³⁰³⁾は，Yang and Meng (2000, 2001)^{227),228)}の BOT 評価モデルについて，利用者の時間価値の異質性を考えた場合の結果の変化を考察している．Kawamura (2000, 2003)^{304),305)}は，トラック運転手の時間評価値の分布を推定し，その分布を用いて混雑課金のもたらす便益について分析している．

2.9.4.2 時間単位の計測

さて，前項の金銭単位の総所要時間の最小化とは，言い換えれば，金銭単位社会的余剰の最大化であり，利用者の所得の限界効用がすべて等しいことを暗黙に仮定している．これは，高時間価値利用者層における時間節約を低時間価値利用者層の時間節約よりも高く評価することを意味する．これは，公平性の観点から問題が生じることが指摘されている．この点について，時間単位の社会的余剰の最大化の最適課金を考えてみよう．この場合利用者の時間の限界効用がすべて等しいことを仮定することになる．時間節約の社会的価値を全利用者で等しく評価することを意味する．

Mayet and Hansen (2000)³⁰⁶⁾は，2リンクを対象とした議論で，時間価値が分布している場合，混雑料金政策の目的関数である社会的厚生関数が時間単位で計測されるか，金銭単位で計測されるか，料金収入を便益に含めるか否かで様々な料金設定となることを明らかにしている．

さらにネットワークを明示した議論を行っている Yang and Huang(2004)²⁹⁵⁾を引き続き紹介しよう．前節では，金銭単位の総所要時間の最小化を考えたが，時間単位の総費用時間の最小化を考える．

$$\min. \sum_{a \in A} \sum_i x_a^i t_a(x_a) \left\{ = \sum_{a \in A} x_a t_a(x_a) \right\} \quad (2.41)$$

subject to (2.19)

この場合の，最適課金解の一つは，

$$\tau_{a,i}^{SO} = \beta_i x_a \frac{dt_a(x_a)}{dx_a}, \quad a \in A \quad (2.42)$$

であり，この場合は，クラス別に時間価値に比例して課金額が変化することになる．もちろん，このような料金制度は現実には不可能である．この問題に対し，Yang and Huang(2004)²⁹⁵⁾は，無名性を満たす料金制度を探す線形計画問題を

定式化し、単純なネットワークでの数値計算例を示している。

2.9.4.3 製品差別化

経済学の視点からは、利用者の異質性に伴う製品差別化(Product Differentiation, 例えば、ヴァリアン, 2000; p.390)³⁰⁷⁾に着目した研究も少なくない。Small and Yan (2001)³⁰⁸⁾, Verhoef and Small (2004)³⁰⁹⁾は、道路管理者の収入最大化料金と社会厚生最大化料金の差を、利用者の異質性を考慮した製品差別化によって緩和できることを示している。

2.9.4.4 異質性を考慮したモデルの展開例

Teubel (2000)³¹⁰⁾は、利用者の異質性を考えた Small (1983)³¹¹⁾のモデルを基に混雑課金政策の厚生分析を実証的に進めている。

Chen and Bernstein (2004)³¹²⁾ネットワーク課金設定問題について複数ユーザクラスの場合の拡張を示すとともに、いくつかの仮定を設けることで、この2段階の問題が、1段階の非線形最適化問題に置き換えることができることを示した。

2.9.5 ロードプライシングの政策評価例

2.9.5.1 行動モデルを用いた分析

ロードプライシング実施時の行動分析についての研究も膨大に存在する。2000年以降の代表的な論文を中心に以下に挙げていこう。

Brownstone, *et al.* (2003)³¹³⁾は、San Diego の I-15 混雑課金プロジェクト際の RP データを用いて旅行時間節約に対する支払い意思を分析している。Bhat and Castelar (2002)³¹⁴⁾は、Mixed Logit モデルによる RP-SP 統合型モデルを San Francisco Bay Bridge の料金変化などの政策分析に利用している。Lam and Small (2001)³¹⁵⁾は、Orange County, California の SR91 (State Route 91)における課金プロジェクトのデータから、時間評価値と信頼性評価値を計測している。同じプロジェクトを対象に Yan, Small and Sullivan (2002)³¹⁶⁾は、経路、時刻、相乗りの選択行動を分析している。また、Lam (2004)³¹⁷⁾は、Lam (2000)³¹⁸⁾ のスケジューリングと経路選択を考慮したモデルを用いて、一部のレーンのみが課金される

Value-pricing プロジェクトは、スケジューリングの便益も発生させることを明らかにした。Value-pricing プロジェクトの経済効率性を計測するため、Liu and McDonald (1998)²⁶³、Small and Yan (2001)³⁰⁸、Verhoef and Small (2004)³⁰⁹ は、単純な需要関数を用いたシミュレーション分析を行っている。

章ら(2000)³¹⁹は、鎌倉 TDM 実験におけるアンケート調査に基づきロードプライシング導入時の手段選択を Nested Logit モデルを用いて分析している。Yamamoto, *et al.* (2000)³²⁰は、SP データを用いて時間配分、時刻、経路の選択行動を分析している。

2.9.5.2 実都市圏でのシミュレーション分析

都市圏レベルで、ロードプライシングの政策分析をシナリオ分析的に行った研究は数多い。最近の例では、松村ら (2001)³²¹、東京都(2001)³²²、円山(2001)³²³、Maruyama, *et al.* (2002)³²⁴、Santos (2000)³²⁵、金子(2001)³²⁶などが挙げられる。これらについては、シナリオ分析であるために、結果に必ずしも一般性が無い点が指摘できよう。

2.9.5.3 適用の展開例

Huang, Yang and Bell (2000)³²⁷、Yang and Huang (1999)³²⁸ カーパーリングとHOV レーンの経済分析を進めている。

また、Shepherd (2002)³²⁹は、Edinburgh 都市圏において最適な限界費用課金と他の課金制度を比較している。

2.9.6 ロードプライシングの適用上の問題点の分析

2.9.6.1 需要関数の推定

混雑課金の設定において、Walters (1961)²⁴³は、その当時から需要関数の推定の重要性を指摘していたが、その推定は困難とされる。この問題について Li (1999, 2002)^{330, 331}は、速度-交通量関係と一般化費用(時間価値)の情報さえあれば、需要関数の正確な値は必ずしも必要ないことを主張し、その主張を踏まえ、Yang, Meng and Lee (2004)³³²は、需要関数が不明な場合にも、最適課金を試

行錯誤的に求める MSA(逐次平均法)による収束解法を提示している。

2.9.6.2 パレート改善混雑課金

混雑料金の導入は、利用者の一般化交通費用(移動時間と料金を含む時間的・金銭的費用の和)を増大させる。このことが混雑料金の受容性を低める一因となっている。この問題については、課金収入の還元で対応するという考えが一般的であった。しかし、還元を前提とせずともすべての利用者の一般化交通費用を減少させることができる課金方式(パレート改善混雑課金)についての研究も進んでいる。

Daganzo (1995)³³³, Daganzo and Gracia (2000)³³⁴は、課金と割当(rationing)制の組み合わせによるパレート改善混雑課金について単一ボトルネックを対象に分析している。早崎, 赤松(2003)³³⁵は、Daganzo モデルの一般のネットワーク上での経路選択行動を対象にした分析フレームを提示している。Nakamura and Kockelman (2002)³³⁶は、San Francisco Bay Bridge を対象に Daganzo(1995)³³³モデルの実証研究を試みている。

Verhoef, Nijkamp and Rietveld (1997)³³⁷は、交易可能な許可証 (tradable permit; see e.g. Raux, 2004)³³⁸を用いた方法を考察している。

2.9.6.3 分配インパクト

Santos and Rojey (2004)³³⁹は、ロードプライシングの分配インパクトについて、Santos, *et al.* (2001)³⁴⁰ のモデルを利用して、逆進的にも、累進的にもなりうることを示している。ロードプライシングの潜在的な逆進性については、Small (1983)³¹¹などを数多くの研究があるが、それらは、Santos and Rojey (2004)³³⁹の参考文献、及び第6章におけるレビューを参考にされたい。

2.9.6.4 地域経済へのインパクト

ロードプライシングへの反対意見として、課金の効果の疑問視と経済インパクトへの不安は頻繁に挙げられるものである。効果は、課金システム、課金額に大きく依存し、また、地域経済へのインパクトは、事前に予測することは非常に難しいためである。

具体的に、混雑課金が搬送コストと最終価格の増加をもたらし、買物トリップの費用を引き上げ、可処分所得を引き下げ、業務が停滞することが危惧される。ただ、Whitehead (2002)³⁴¹⁾ は、課金収入の担保契約(hypothecation)に基づく課金は、都心部の業務パフォーマンスを改善しうることを示している。また、ロンドンのエリアプライシングでは、経済インパクト、政策の逆進性などへのモニタリングが周到に準備されている。

関連して、Boyce and Mattsson (1999)³⁴²⁾は、都市道路ネットワーク上での最適課金について居住地選択と関連付けて考察している。また、Eliasson and Mattsson (2001)³⁴³⁾は、ロードプライシングの土地利用、世帯立地への影響を分析している。結果として、それらへの影響は、交通量、手段の変更、トリップ長への影響と比較すると小さいことが示されている。

2.9.6.5 受容性の心理構造分析

ロードプライシングの受容性についても膨大な研究が存在する (Schade and Schlag, 2003; Goodwin, 1989; Jones, 1991; Marcucci, 2001; Verhoef, Nijkamp and Rietveld, 1997; Schade and Schlag, 2003; Oberholzer-Gee and Weck-Hannemann 2002; Lave, 1994)^{344), 345), 346), 347), 348), 349), 350), 351)}。

課金の受容意識の心理構造についての分析については、国内では、新田ら (1995)³⁵²⁾, 新田ら (1996)³⁵³⁾, 藤井, Garling and Jakobsson (2001)³⁵⁴⁾が挙げられる。最近では、Fujii, *et al.* (2004)³⁵⁵⁾が受容意識について、日本、台湾、スウェーデンの国際比較を報告している。

2.10 道路投資による誘発交通の分析

ここでは、本研究の第4章で詳細に検討する道路投資による誘発交通に関する論点について、広範囲な視点から既存研究のレビューを行っておく。まず、2.10.1で誘発交通をめぐるさまざまな言説を紹介しながら、基本的な事項をまとめる。2.10.2では、既存の研究を分類しながらレビューし、その中でも特に誘発交通の分析において重要な観点となる交通需要の弾力性について、その考え方、推定事例を2.10.3で整理する。2.10.4では、交通市場以外の市場変化に伴う誘発交通を考慮することを試みる土地利用・交通モデルなどの関連分野の研究動向をレビューする。

2.10.1 誘発交通概論

道路投資に関わる誘発交通の問題について、Goodwin (2003)³⁵⁶⁾は、「交通政策の意図しない効果(Unintended effects of policies)」の一例として次のようにまとめている。

交通流の速度向上と環境改善による便益の発生を意図した、特にバイパスなどの道路建設が、政策の意図しない効果として、今まで存在しなかった交通を呼び起こし、ほとんど、あるいは全く速度は改善せず、環境負荷も増大してしまう問題。(p. 604)

そして、この問題に対して、誘発交通は存在するという証拠としては落ちておいており、広く受け入れられているが、完全に受け入れられているわけではない、とも述べている。

以下、Goodwin (2003)³⁵⁶⁾に従って、述べていこう。誘発交通の問題については、膨大な実証研究があるが、その始まりは、英国政府の幹線道路評価常設諮問委員会による検討(SACTRA, 1994)³⁵⁷⁾である。この要点は、*Transportation* (1996)の特集号にまとめられている。欧州における実証研究は、欧州交通大臣会議(ECMT, 1998)³⁵⁸⁾でまとめられ、米国の研究は、Noland and Lem (2002)³⁵⁹⁾がまとめている。これらから利用可能な証拠は、折衷的な(eclectic)ところがあり、ひとつの手法が支配的でもないが、それらの多くは、集計時系列データに基づくか、事前・事後(before-and-after)調査によるものである。

一般に、コードンラインによって定義される道路網において、交通量を台キ

ロ単位で計測すれば、SACTRA は、10%の速度の増加が、結局 5%から 10%の交通量の増加につながる、としている。また、建設から 1 年後の改善された区間における交通量は、予測値よりも 10%以上増加し、迂回経路の交通量は予測値よりも 16%増加していると述べている。もちろん予測誤差は誘発交通の影響のみではないことに留意すべきである。

誘発交通は短期よりも長期において増加するとされ、イギリスでは、経験的に短期では 10%、長期では 20%が誘発交通となると言われている。ただし、この数値は変動しうるもので、対象となる政策に依存する。また、この値は、経済評価に影響を与えるに十分な値と言われている。

Goodwin (2003)³⁶⁰⁾は、「交通行動を変化させるのはどの程度容易か?」という文脈でも誘発交通の議論を展開している。Mogridge (1997)³⁶¹⁾は、道路を整備すると手段の転換にともなう公共交通の需要減少によって、公共交通の運行頻度などのサービスレベルが低下し、公共交通、道路の両方のサービスが低下するという Downs-Thomson のパラドックスの文脈で、誘発交通に関する研究を中心にレビューしている。

このテーマはきわめて論争を呼ぶものである。最近でも、Prakash, *et al.* (2001)³⁶²⁾が、英国のデータの統計的分析により誘発交通の存在に疑義を呈したのに対して、Goodwin and Noland (2003)³⁶³⁾は、彼らのモデルが、誘発交通をモデル化するにふさわしい政策変数とはいえない道路支出をデータとして用いている点で、モデルの定式化に誤りがあるとして、彼らの主張を批判している。

誘発交通とは、道路容量が変化しない場合には発生しないが、容量を拡大したときに生じうるすべての交通である。ただ、この交通とは数多くの選択行動の結果として生じるもので、特に直接的な消費ではなく派生的な需要として生じるものとなる。したがって、誘発交通の増加とは、以下のような選択行動が合成されて生じることになる。すなわち、トリップ頻度の増加、より遠くの経路の選択、交通手段の変更、職場・買い物場所の変更によるトリップ長の増加、未開発の土地がより便利になることによる変化、雇用の変化、これらの選択行動によって生じうる土地利用の変化などの間接効果を含むものである。

これら、誘発交通の具体的な行動変化の中身については、Hills (1996)³⁶⁴⁾、Litman (2001)³⁶⁵⁾によって明快に整理されている。和文の平易な解説としては、桐越、野坂、永尾(2002, 2003)^{366), 367)}も参照されたい。Cairns, *et al.* (1998)³⁶⁸⁾ は、行動調査と交通日誌調査よりこの範囲を拡大し、SACTRA (1999)³⁵⁸⁾は、さらに生産性や、労働などのほかの市場、経済成長の間接効果にも言及している。

なお、トレンドで将来交通を推計する際には、誘発交通も考慮されていると

いう見解が示されることがある。ここで注意すべきは、トレンドによる予測モデルには、通常政策変数が入らないため、道路整備有無の政策シナリオの比較はできず、また便益評価もおこなうことができない点である。

また、走行台キロを誘発交通の評価指標として用いる場合は、道路整備により迂回交通が減少することで、台キロが減少するという場合には、適当な指標ではないことにも注意が必要である。

人口増加、所得増加、その他人口統計学的要因も交通量の増加につながるが、誘発交通とは、交通費用の減少に伴う交通量の増加である。多くの実証研究は、交通費用減にともなう誘発交通をその他外的要因と区別することを目的としている。

誘発交通の存在が道路投資の利用者便益に与える影響は、単純な図を用いた説明が数多くなされる。

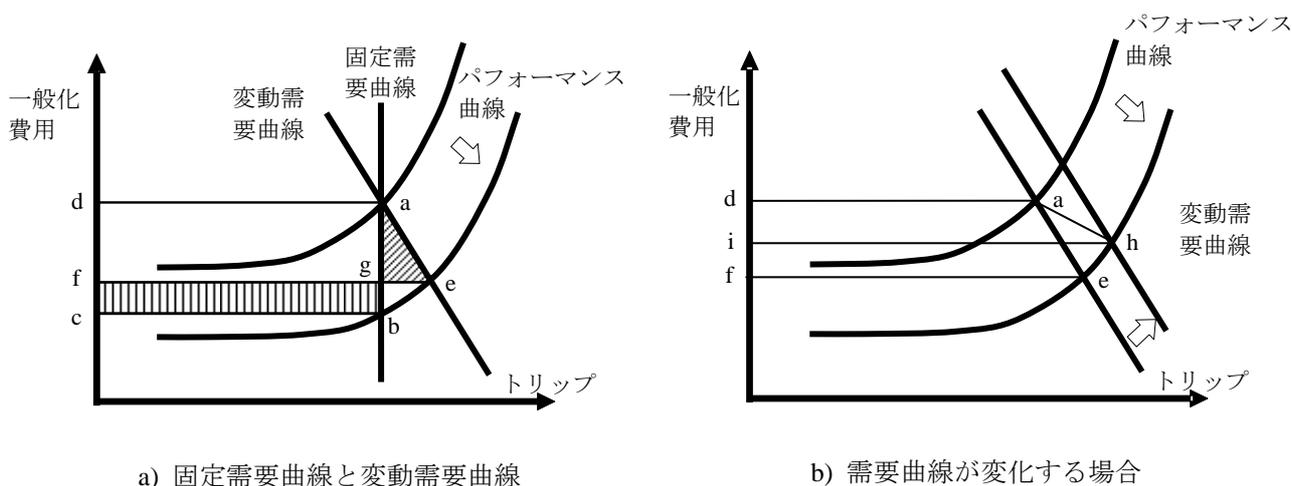


図-2.1 誘発交通の有無と利用者便益

図-2.1a)において、道路投資は、パフォーマンス関数の右下への移動として表現され、誘発交通を無視した固定需要曲線を想定する場合、均衡点は $a \rightarrow b$ への移動、誘発交通を考慮する変動需要曲線では、 $a \rightarrow e$ への移動で表現される。消費者余剰の考え方による利用者便益はそれぞれ長方形 $abcd$ と台形 $aefd$ の面積で与えられる。これらの面積の差(図の線がけ部の面積の差分)が、誘発交通を考慮しないことによる便益推定値のバイアスとなる。したがって、需要曲線が弾力的な場合、また投資後の均衡点がパフォーマンス曲線が急激に立ち上がる容量付近にある場合、誘発交通を無視すると利用者便益は、過大推計される傾向にあるといえる。さらに、図-2.1b)のように、土地利用の変化などで需要曲線自

体が変化する場合、均衡点は a→h への移動と表現され、直線 ah を一般均衡需要曲線とみなして、利用者便益は台形 ahid の面積で与えられることになる。

Lee, Klein and Camus (1999)³⁶⁹⁾は、短期需要曲線上の変化を誘発交通(induced traffic)、長期需要曲線上の変化を誘発需要(induced demand)と呼び区別している。

これらのように誘発交通の概念自体は、図-2.1 で示されるように説明は容易であるが、計測、計量化は容易ではない。

2.10.2 研究の分類

誘発交通に関する研究は数多いが、それぞれ分析の目的・視点、対象地域、対象期間などが異なるため、それらを区別することが重要となる。

Cervero (2002)³⁷⁰⁾は、誘発需要研究は、実証研究とシミュレーションに大別されると述べ、さらに実証研究を以下の 5 種類に分類し、レビューしている。

- ・ 事例研究(facility specific)
- ・ モデル予測
- ・ 仮の弾性値を用いた地域研究
- ・ 偏弾性値を用いた地域研究(area studies using partial elasticities)
- ・ 非集計分析

これらの分類に従いながら、既存研究をレビューしていこう。

2.10.2.1 特定の施設についての事例研究

道路の車線数増加などの改良区間について、そのプロジェクトが実施されなかった場合の交通量の推定値と実現値を比較するものである。実現しなかった場合の交通量は、傾向外挿法や需要予測などが用いられる。結果は、弾力性ではなく、交通量の増加分のうち誘発交通が占める率として出力される。この表現法は、一般人にもわかりやすいという特徴がある。ただ、経路の転換交通と、新規誘発交通が区別しにくいなど問題もおおい。また、新規道路の建設事例では適用が困難といえる。3 種類の手法がある。

一つ目は、過去の交通量の傾向をもとにした成長比較法(growth comparisons)である。SACTRA (1994)³⁵⁷⁾では、新規道路の交通量の観測値は、10-20%程度、予測値よりも過大であり、この分の誘発交通の存在が示唆されるとした。ただ、

この固定需要モデルを用いた推定値と観測値の差は、誘発交通の存在のみならずモデルそのものの誤差の二つがあり、それらの区別は難しいであろう。平行街路についても調べることで、経路の転換交通を区別することを試みるものもある。

二つ目は、準実験計画法により制御(Control)したアプローチである。改良区間の交通量の増加を、改良道路と対にした道路の交通量の増加と比較する。最近の例では、Mokhtarian, *et al.* (2002)³⁷¹⁾ がある。

三つ目として重回帰分析もなされるが、データの制約上、施設レベルではあまり多くない。

2.10.2.2 代理変数に基づく地域事例研究

VMT(走行台キロ)を被説明変数、レーン・マイルを旅行時間削減の代理変数とする分析は数多い。時系列データとクロスセクションデータをプールしたデータを用いた Hansen and Huang (1997)³⁷²⁾, Noland (2001)³⁷³⁾, Noland and Cowart (2000)³⁷⁴⁾, Fulton, *et al.*(2000)³⁷⁵⁾などの研究が挙げられる。

Noland and Cowart (2000)³⁷⁴⁾は、既存研究における同時性バイアス(simultaneity bias)の問題に対し、操作変数(instrumental variable)を用いた2段階最小二乗法をもちいている。Cervero and Hansen (2002)³⁷⁶⁾は、操作変数を用いた2段階最小二乗法を用いている。Hansen and Huang (1997)³⁷²⁾, Noland (2001)³⁷³⁾の値よりも最近の研究の弾力値は、小さくなっており、これら初期の研究のバイアスが示唆される。

経済学でよく利用される以上の集計分析について、交通計画者は、個人の行動変化が反映されていないとして批判し、非集計分析を提唱する。ただ、集計分析の意義は、容量拡大の全体的なインパクトに関する有用な情報を政策決定者に集計レベルで提供することを意図しているものである(Noland and Lem, 2002)³⁵⁹⁾。

2.10.2.3 一部の指標に基づく地域事例研究

時間節約に対する交通量の増加を実測した研究も少なからず存在する。SACTRA(1994)³⁵⁷⁾の報告書をまとめた Goodwin (1996)³⁷⁷⁾は、最も広範囲のレビューの一つで、所要時間に対する弾力性-0.1 から-1.0 まで変動があることを報告

している。所要時間は、ピーク、オフピークの時間変動が激しいため、その影響が考えられる。

2.10.2.4 非集計モデル

個人の行動単位で計測するものである。米国全国 PT 調査(National Personal Transportation Survey)の非集計データを利用して、Barr (2000)³⁷⁸⁾は、所要時間の弾力性について -0.35 から-0.58、平均が-0.44 という推定値を示している。ただし、所要時間の削減が道路拡張によるものかどうかなどの区別はされていない。

2.10.2.5 モデル予測とシミュレーション

誘発交通を考慮できるモデルを使用し、モデルが完全であるという前提のもとでの分析例もある。

Rodier, *et al.* (2001)³⁷⁹⁾は、「誘発交通の解剖学」とする論文で、土地利用・交通モデル MEPLAN を用いた分析を行っている。Rodier, *et al.* (2001)³⁷⁹⁾の貢献の一つは、非集計型土地利用・交通地域モデルから得られる値は、既存の集計分析の値と同様であることを示したことである。二つ目は、交通需要モデルの改良のみで、土地利用を含めた誘発交通効果の 50%程度を説明できるということを示したことにある。

2.10.3 弾力性分析の整理

ENO (2002)³⁸⁰⁾は、誘発交通分析のための弾力性推定値の既存研究結果を表-2.5のように明快にまとめている。

表-2.5 さまざまな分析により報告された交通需要の弾力性の範囲

弾力性の分析タイプ	地域/プログラムレベル		施設/プロジェクト レベル ^{a)}	
	短期	長期	短期	長期
価格 (一般化費用)	-0.4 から-1.0	-0.8 から-2.0	-0.3 から-1.0 (経路転換交通を除くと-0.2 から-0.5)	-0.6 から-2.0 (経路転換交通を除くと-0.5 から-1.0)
旅行時間	-0.2 から-0.5	-0.4 から-1.0	-0.2 から-0.5 (経路転換交通を除くと-0.1 から-0.3)	-0.3 から-1.0
容量	0.2 から 0.6	0.4 から 0.9	0.2 から 0.8 (経路転換交通を除くと0.1 から 0.3)	0.4 から 1.0 (経路転換交通を除くと0.3 から 0.6)

a) 施設は、6マイル(約 10 km)の都市高速道路と仮定した施設のトリップに対する弾力性

b) 容量弾力性は、ピーク時にすでに混雑しており、需要の増加が予測されている施設の拡張を対象

出典) ENO (2002)³⁸⁰⁾

容量の変化に対する弾力性は、論理的に次の2つの要素に分解できる。交通需要の交通速度に対する弾力性と、交通速度の交通容量に対する弾力性である。

誘発交通の推定量が研究で変動が大きいのは、車線の増強が交通速度の与える影響が、混雑の量によって大きく変化するためと考えられる。

これらの弾力性は以下のような利用価値がある。

- ・ モデルに導入する
- ・ モデルの結果のもっともらしさ(plausibility)をチェックする
- ・ モデルのキャリブレーション時に利用する

また、一般的な傾向として、

- ・ 長期の弾力性は短期の弾力性の約2倍である
- ・ 旅行時間の弾力性は、価格の弾力性の半分程度である。これは、旅行時間は、通常の私的交通費用の半分程度を占めるためである。これは、状況や、時間評価値に依存する。
- ・ 地域レベルの弾力性と施設レベルの弾力性は2つの点で異なる。経路の転換交通は、施設レベルの弾力性でのみ捕らえられる。ある施設の走行は、全トリップの一部であり、したがって、トリップの全体価格の一部となる。前者は、施設弾力性を高くし、後者は、反対の効果を持つ。

としている。

地域レベルの弾力性は、経路や時刻の変更による誘発交通を考えていないこと、弾力性は、ゼロでもないし、無限大でもないことに注意が必要である。

2.10.3.1 シミュレーション分析

弾力性推定値と交通流シミュレーションを有効に組み合わせた興味深い研究を紹介する。

Stathopoulos and Noland (2003)³⁸¹は、交通流マイクロシミュレーション VISSIM を用いて、誘発交通と環境負荷排出量との関係を考察している。彼らは単純なネットワークを対象に、ボトルネック改良や信号制御など交通流円滑化策を行った時の効果を分析している。一般に、交通量が変化しないと仮定した場合は、改善は大きいですが、誘発交通が存在する場合にはこの効果は打ち消される可能性がある。この問題についての示唆をえるため、彼らは、環境負荷排出量が増加しないレベルまで交通需要を人工的に増加させることで、環境負荷を変化させない弾力性(Breakeven travel time elasticity)を算出し、それを既存研究の弾力性と比較し考察を行っている。この環境負荷の変化なし弾力性は、既存研究で示されている-0.5 から-1.0 の台マイルの弾力値の範囲にあることから、長期の環境負荷削減が達成されない可能性を述べている。彼らの研究は、コールドスタートなども表現できる動的シミュレーションを用いて興味深い結果を導いている。ただ、具体的な政策評価を行うためには、弾力性を具体的に設定する必要がある。その設定法は触れられていない。また、シミュレーションを用いることによる結果の頑強性(robustness)の検討についても今後の課題として挙げられている。

2.10.4 空間経済システム・モデルの適用状況

ここでは、交通市場以外の市場変化に伴う誘発交通を考慮することを試みる土地利用・交通モデルなどの関連分野の研究動向をレビューする。

2.10.4.1 土地利用・交通モデル

土地利用・交通モデルの最近のレビューとしては、Wilson (1998)³⁸²、Waddell

(2001)³⁸³, Timmermans (2003)³⁸⁴などに詳しい。海外の適用事例については、これらの論文に詳しいので、以下では日本国内におけるモデル開発、適用事例を整理しよう。

国土交通省国土交通政策研究所(2002)³⁸⁵に従うと、最近の土地利用・交通モデルの研究は、以下のように大きく2つに分類できる。

(1) 統合フレーム

立地モデルと交通モデルが矛盾なく結合され、主に便益評価を目的とする。

(2) 相互作用フレーム

前期の交通条件が、次期の土地利用モデルに入力される形式の擬似的な動学モデルで、主に都市構造変化の分析を目的としている。

まず、最近の(2)のモデルとしては、尹、青山、中川、松中 (2000, 2002)^{386,387}が挙げられる。彼らは、相互作用フレームに基づいて、実用的な土地利用・交通相互作用モデルを構築し、土地利用の変化による誘発交通を考慮した道路整備効果を推定し、既存の交通モデルが、13.3%便益を過大に推計していることを明らかにした。ただ、彼らのモデルでは、手段の変更は考慮されていない。また、交通行動と立地行動とが完全に整合しておらず厳密な意味での便益評価が困難といえる。

(1)の研究では、交通モデルに重点を当てた宮城ら (1995)³⁸⁸のモデルがあり、上田、堤(1999)³⁸⁹により、既存研究の体系化がなされている。

武藤ら (2000)³⁹⁰は、統合フレームの考えに基づいて、応用都市経済モデルを用いた立地変化を考慮した便益評価を示している。この研究のケーススタディとしては、新交通システムの整備が取り上げられている。武藤ら (2001)³⁹¹、田口ら (2001)³⁹²、Muto, *et al.* (2003)³⁹³は、同様なモデルを用いて都市環状道路の整備効果を推定している。上田ら(2003)³⁹⁴は、このモデルの東京都市圏への適用を試みている。

これらのモデルでは、経済原理に基づき交通均衡と立地均衡が表現され、便益計測が可能となっており、現段階での土地利用・交通モデルの一つの到達点といえる優れたモデルである。しかしながら、厳密に議論すると、a) 交通均衡と立地均衡間の整合性確保にヒューリスティックな繰り返し計算が用いられている、b) システム全体の解の性質(一意性)が検討されていない、などの点が課題として挙げられる。また、パラメータの推定方法や、モデルの現状再現性に

ついて詳細は触れられていない。

Ewing and Lichtenstein (2002)³⁹⁵⁾は、誘発交通に比較して誘発開発(induced development)についての研究は少ないことを指摘し、誘発開発のモデル化は、大規模土地利用モデルで理論的には可能であるが、その出力結果は疑問があるものが少なくないことを指摘し、誘発開発のモデル化には、実用的ではないと結論づけている。

2.10.4.2 そのほかの地域計量モデル

吉野, 上田, 佐藤 (2002)³⁹⁶⁾は、首都高速中央環状線の整備が首都圏の総生産、所得、雇用、税金などに及ぼす影響を計測可能な地域計量経済モデルを構築し、交通市場以外の財市場における間接効果を推定している。ただ、この地域計量経済モデルの結果としての立地条件の変化、観光交通の誘発、企業の潜在生産力の変化に伴う、交通サービスレベルへのフィードバックは、考慮されていない。この意味で、別のバイアスを生んでいる可能性がある。

佐藤, 小池, 上田 (2002)³⁹⁷⁾は、Kanemoto and Mera (1985)³⁹⁸⁾によって示された、市場が完全競争的である場合、帰着ベースの便益は、発生ベースの便益に一致することをもちいて、発生ベースで計測された便益を、帰着ベースの便益を簡易に計測する方法を示している。

溝上ら(2000, 2002)^{399), 400)}は、地域間観光流動モデルと観光地域内周遊需要モデルから構成される需要予測システムと産業連関分析などを用いた高規格幹線道路整備の観光経済インパクトの評価システムを提案している。

2.10.5 本研究の対象とする誘発交通

本研究では、交通市場のみに着目し、その内部で完全に整合性の取れた交通需要予測モデルを構築することが重要と考え、その考えに基づいた分析を第4章で行うことにする。土地市場や他の都市経済活動との相互作用を盛り込むことは考慮しない。

このようにモデルの対象を絞る根拠として、次のような事項がある。

(1) 交通プロジェクトの便益評価において、完全競争の条件下では、交通市場以

外の財市場における間接効果の便益は、キャンセルアウトされ、交通市場のみで便益を計測すれば十分であることがわかっている(ショートカット理論; 森杉, 1997; 金本, 1997)^{401), 402)}.

- (2) 将来的に土地市場や都市経済活動との連携を考えたモデルのサブモデルになり, そのサブモデルの精緻化, 考察は, 将来的なモデルにおいても役立つ.

もちろん現実の経済は完全競争にはないため, 実際には(1)のショートカット理論は成立しないことになる. それらを見捨てることの近似の誤差の影響は少ない可能性もあるが, 一方で, これらを考慮するためにモデルを大規模化にすることで別の誤差が生じうると考える. 将来的には, これらのトレードオフの関係を考慮した研究発展が望まれよう.

2.11 既存研究の総括

2.11.1 ネットワーク均衡モデルの実都市圏への適用に向けての課題の整理

本章では、ネットワーク均衡モデルの最近の研究動向を紹介するとともに、実都市圏に向けて適用にあたり、既存研究では十分な整理がされておらず検討が必要な点を整理した。

まず、固定需要型確定的利用者均衡モデルの発展形としてのマルチクラスモデル、多基準モデル、非加算型経路費用モデル、確率的利用者均衡モデルの最近の研究動向を紹介した。そして、それらが、利用者均衡モデルにおけるどの行動仮説の緩和に対応するのかという相互関係を整理した。

これらのモデルは、極めて限定的な仮定が課せられた利用者均衡モデルよりも豊富な政策評価指標を出力しうるものである。また、大規模ネットワークでも計算可能なモデルも多いため、実都市圏での適用における現状再現性向上にも有用であると考えられる。

また、確率的利用者均衡モデルは、理論的には古くから完成し、良く知られたモデルであるが、いくつかの問題点があり、それらは、

- a) 経路選択枝集合の決定法
- b) 経路選択枝間の類似性の表現法
- c) 均衡解への収束が保証されたアルゴリズムの開発
- d) 目的関数における経路エントロピー項の効率的計算法
- e) 需要モデルと整合的な利用者便益指標の効率的計算法
- f) 経路選択モデルのパラメータ推定法

と分類されることを明らかにした。また、それらを同時に解決できる枠組みは提示されていないことを示した。これらの問題より、確率的利用者均衡モデルは、現実の大規模都市圏での適用においては、いまだ実用的とはいえないと判断した。

また、分担・配分統合モデルにおいて、平均乗車人員や手段別時間価値の設定法について、それが、モデルの等価最適化問題の構成可能性に与える影響を整理した。そして、自動車ネットワークのみにおいて混雑が発生しているという場合においては、クラス別の平均乗車人員や手段別クラス別の時間価値を設定しても、等価な最適化問題が構成可能であることを示した。

現実都市への適用においてモデルに含まれる数多くのパラメータの設定法は、極めて重要になる。そこで、ネットワーク均衡モデルに含まれるパラメータ推

定事例、およびその推定の考え方について整理した。道路のリンクコスト関数及び鉄道の混雑不効用関数の推定事例について整理した。統合モデルのパラメータ推定法についても、数多くの考え方があることを示した。

また、ネットワーク分析の応用技術として、情報提供の評価モデル、トランジット配分モデルなどの最近の研究事例を整理した。

また、ネットワーク分析を最も一般的に拡張する手法として、MPEC(Mathematical Programming with Equilibrium Constraints)に関する研究が盛んに行われていることを紹介し、非線形感度分析の手法とあわせて既存研究を整理した。しかしながら、一般には、実都市圏を対象とした場合、厳密解が計算可能な方法が開発されていないことを指摘した。

2.11.2 ロードプライシング研究の動向

ネットワーク上のロードプライシングについて、最適課金、セカンドベスト課金の考え方に大きな進歩が見られ、動的課金の理論的展開、パレート改善混雑課金、政策の受容性などの研究が盛んに行われていることを紹介した。

2.11.3 道路交通による誘発交通の分析

道路投資に伴う誘発交通の分析が数多く行われており、弾力性の推定事例などを含めて、既存研究を整理した。また、既存の土地利用交通モデルは数多く、実都市への適用が試みられていることを紹介した。その中には、モデル内部の整合性への配慮が見受けられるものもあるが、完全な整合性を維持したモデルは少ないことを指摘した。

また、交通プロジェクトの便益評価において、一定の条件下では、交通市場のみで便益を計測すれば十分であるというショートカット理論が存在することからも、誘発交通の分析では、まず交通市場を対象を絞り、その市場内で完全にモデル内部の整合性、解の一意性に注意した基本的なモデルを構築することが重要と考えられることを述べた。

第3章 大規模都市圏における交通需要統合型ネットワーク均衡モデルの構築

3.1 はじめに

3.1.1 研究の背景と目的

施設拡充型から需要調整型へといった交通計画の変化の必要性が指摘されるなか、需要予測ツールとしての旧来の四段階推定法の問題点が繰り返し指摘されている。その問題点の主なものは、段階推計であることにより、段階間でOD所要時間などの変数の不整合性が生じていること、行動論的基盤の欠如、時間軸の欠如、トリップベースであることである。

一方、配分段階を主な対象としていたネットワーク均衡分析の分野では、発生・分布・分担・配分段階を同時的かつ整合的に扱うことのできる統合均衡モデルの理論が構築されるに至っている^{403),404)}。このモデルは、対象地域に代表的個人の存在を仮定し、その行動にランダム効用理論に基づくNested Logitモデルを適用し、一貫した行動記述を行うものである。このモデルに従えば、先にあげた四段階推定法の問題点のうち、段階推定であることによる不整合性と行動論的基盤の欠如に関しては解決できる。

一方、交通は派生的需要であり、トリップ発生の源である活動の種類によって行動は大きく変化するため、それらを的確に記述することが必要とされる。旧来の四段階推定法においても発生集中・分布・分担段階においては、交通目的別のモデルを作成することで、それらは近似的に表現されてきた。しかしながら、通常、統合均衡モデルは利用者の属性を均一に扱っており、交通目的別のモデルを作成することは少ない。また、実際都市への適用事例も限られている。

本章では、以上の背景のもと、発生・分布・分担・配分統合型確率均衡モデルをトリップ目的別のモデルへ拡張し、東京都市圏を対象として、モデルの有効性を実証的に検討することを目的とする。また、東京都心部における鉄道の混雑を適切に表現するために、鉄道ネットワークにおいても確率的利用者均衡状態を仮定し、時間帯別のモデル化を行う。

3.1.2 ネットワーク均衡モデルの実都市への適用研究のレビュー

交通需要統合型ネットワーク均衡モデルの理論の発展経緯、過去の適用事例(加藤, 宮城, 吉田, 1982⁴⁰⁵⁾; 桑原, 1988⁴⁰⁶⁾など)はテキスト⁴⁰³⁾および松井, 藤田(2000)⁴⁰⁷⁾にまとめられているので、ここでは、比較的最近の統合モデルの実都市

への適用事例についてレビューする。

河上らは、名古屋市への分担配分統合モデル^{408),409),410)}および分布・分担・配分統合モデル⁴¹¹⁾の適用を行っている。Abrahamsson and Lundqvist⁴¹²⁾は、ストックホルムにおいて分布・分担・配分統合モデルについて、分布と分担の上下構造を変化させた場合の比較検討を行っている。Safwat らは、4段階を統合したモデル(Safwat and Magnanti, 1988)⁴¹³⁾の実証検討^{414),415),416),417)}を行っている。Kaneko, et al.(2001)⁴¹⁸⁾は、マルチクラス型の分担・配分統合モデルをバンコク都市圏に適用している。円山ら^{419),420)}は東京都市圏へ分担・配分統合モデルを適用した。

近年の適用事例では、マルチクラス型モデルの利用も見られる。マルチクラス型統合需要モデルについては、最近 Boyce and Bar-Gera(2004)⁴²¹⁾がまとめているが、本研究で多用するモデルでもあり、以下に詳述する。

配分レベルのみならず分布レベルも含めたマルチクラスモデルを、初めて提示したのは、Lam and Huang (1992)⁴²²⁾である。ただし、彼らのモデルは、手段によってクラスが分かれており、手段選択は内生化されていない。このモデルの長所は、2.3.4.2で紹介した van Vliet (1986)による一般化費用の正規化表現を用いて、モデルと等価な最適化問題を導いていることにある。

de Cea and Fernandez (2001)⁴²³⁾, de Cea, et al. (2003)⁴²⁴⁾は、現時点で構築されている最も詳細なモデル構造のマルチクラス統合モデルである。変分不等式に基づき、公共交通の容量制約、自動車、タクシー、バスの相互干渉も考慮され、13の利用者クラス、3トリップ目的、7つの純粋なトランジット手段、4つの複合手段を考えたものである。モデルの解の一意性が保証されないことによるシステムの不安定性などの問題が危惧されるが、その問題は現時点では、報告されていないようである。なお、Florian, et al. (2002)⁴²⁵⁾も同じ都市圏を対象としたモデルを報告している。

Boyce and Bar-Gera (2001, 2003)^{426),427)}のモデルは、構造は比較的単純であるものの、対象ゾーン数(1790)、道路ネットワークサイズ(39,018 リンク)は、最も大規模なものである。

金子(2001)⁴²⁸⁾は、乗用車と公共交通の交通費用に関して非対称な相互干渉が生じる分担配分統合モデルおよび車種間に非対称な相互干渉がある車種別均衡モデルについて、緩和法を用いた解法を適用している。これらの均衡問題は、一般に解の一意性が保証されないものであるが、いずれも収束した解が得られたと報告されている。この研究では、統合需要モデルで利用している行動モデルのパラメータ値の根拠が明確でない点が課題のひとつと言える。

最近では、Wong, et al. (2004)⁴²⁹⁾が、マルチクラス分布分担配分統合モデルを最適化問題で定式化し、香港を対象に適用し、計算性能を確認している。

このほかにも統合モデルによる政策評価例を示した Tatineni, et al. (1994)⁴³⁰⁾,

都市圏レベルのモデルを比較した Boyce, Lohse and Nöth (2002)⁴³¹⁾などが挙げられる。また古くは, Boyce, *et al.* (1983)⁴³²⁾, Boyce and Lundqvist (1987)⁴³³⁾や, MSA と Evans アルゴリズムを比較した Walker, *et al.* (1998)⁴³⁴⁾などが挙げられる。また, Boyce, *et al.* (1994)⁴³⁵⁾は, 四段階推定法に対するフィードバック型の解法と均衡モデルを比較している。Marin (2003)⁴³⁶⁾はパリ都市圏を対象とした幹線道路の自動走行化の評価モデルにおいて, 発生, 分布レベルの誘発交通を扱ったと述べている。ただし, モデルの詳細は不明である。Loudon, Parameswaran and Gardner (1997)⁴³⁷⁾は, 四段階推定法にフィードバックをかける方法の検討結果を報告している。直接法では, 収束しないことがあることなどを示している。

表-3.1, 表-3.2 には, 1990 年代以降の統合型ネットワーク均衡モデルの実都市圏への主な適用事例をまとめた。

既存研究をまとめると, 統合モデルは, 確立した理論が構築されたものの, 都市圏レベルへの実証分析は十分ではないといえる。特に, 統合モデルでも 4 段階をすべて統合したモデルの適用事例は少ない。唯一の例である Safwat らのモデルに対しては, 利用者の行動論的根拠が無いという批判ができる。また, 利用者の属性を均一に扱っている場合が多く, 配分段階には確定的均衡モデルを仮定している場合がほとんどである。時間帯別のモデル化の事例も少ない。

本章で詳述するモデルは, 他のモデルと比較して, 発生レベルまで統合し, 鉄道の混雑も考えて, 経路選択も確率的に表現している点で優れている。また, 大規模なモデルでありながら, 解の一意性が保証されるようにモデル化において注意を払っている点も特徴である。また, 発生・分布・分担レベルは, 利用者のトリップ目的を区別し, 経路選択には Logit 型確率的均衡配分を利用し, 鉄道のネットワークにおいても混雑現象を考慮した上で, 時間帯別の適用を行うものである。このモデルは, 既存研究のほとんどを, その特殊形として内包する一般的なモデルとなる。この一般的なフレームにもとづいたモデルを本研究のような大規模な都市圏に適用した事例は, 筆者の知る限り存在しない。

表-3.1 ネットワーク統合モデルの適用事例の比較 その1

著者	河上, 石(1993, 1995)	Lam and Huang (1994)	Marshall and Boyce (RSG, 1997)	Abrahamsson and Lundqvist (1999)	杉野, 河上 (2000)
モデル名	分担配分統合モデル	分布配分統合モデル	環境法と政策センターモデル	分布・分担・配分統合モデル	分布分担配分統合モデル
対象地域	名古屋市	Kowloon, 香港	シカゴ, USA	Stockholm	名古屋市
基準年次	1981	1986	1996	1986	1991
予測年次			2020	2020	
クラス数	単一	自家用車, 占有バス (franchised buses), トラック	勤務-自宅, その他-自宅, その他, トラック	単一	単一
交通手段	鉄道, バス, 自動車	クラス別により表現	自動車, トランジット	自動車, トランジット	鉄道, バス, 自動車
ネットワーク	自動車とバスの相互干渉あり	道路, 手段間の限定的な相互干渉あり	道路とトランジットの分離ネットワーク	道路と公共交通の分離型ネットワーク	道路と公共交通の分離型ネットワーク
定式化	最適化問題に基づくヒューリスティック解法	制約条件つき最適化問題	最適化問題に基づくヒューリスティック解法	制約条件つき最適化問題	制約条件つき最適化問題
OD	固定	二重制約型, 負の指数関数形	二重制約型, 負の指数関数形, 乗数関数	二重制約型, 負の指数関数形	二重制約型, 修正重力モデル
手段	Logit	なし	Nested Logit	Logit	Logit
出発時刻	なし	なし	ピーク, その他	なし	なし
経路	最小経路	乗用車: 最小経路, バス経路固定	乗用車: 最小経路, トラック: 最小経路	最小経路	Logit
トリップの有無	なし	なし		なし	なし
ゾーン	16	60	1,790	46	221
ノード	2162	324	13,000		
道路リンク数	441	880	40,000	964	
鉄道リンク数					
解法	緩和法	Evans(1976)	MSA にもとづく Evans(1976)	Evans(1976)	部分線形化法 Evans(1976)
データ	PT 調査	MicroTRIPS と合成	世帯交通調査		PT 調査
推定法	2段階最適化問題に基づく残差最小化	不明	回帰分析	最尤推定法	2段階最適化問題に基づく残差最小化
検証	あり	コードン/スクリーンラインデータ	世帯交通調査	あり	あり

注) Boyce and Bar-Gera (2004)⁴²¹⁾の Table 1 をもとに, 大幅に文献, 内容を追加

表-3.2 ネットワーク統合モデルの適用事例の比較 その2

著者	Hasan and Safwat (2000)	Kaneko, et al. (2001), 金子(2001)	de Cea and Fernandez (2001), de Cea, et al (2003)	Boyce and Bar-Gera (2001, 2003)	円山ら (2002), 本論文第3章
モデル名	発生・分布・分担・配分同時均衡 (STEM)	マルチクラス分担配分統合モデル	ESTRAUS	マルチクラス・マルチモード統合モデル	マルチクラス Nested Logit 型統合モデル
対象地域	Tyler, Texas	バンコク都市圏	チリ, サンチアゴ	シカゴ, USA	東京都市圏
基準年次		1997	1991	1990	1998
予測年次	2000		1995 & 2010		
クラス数		高所得者, 低所得者	13クラス; 3トリップ目的	自宅-勤務, 自宅発その他, トラック	通勤, 通学, 業務, 私事, 帰宅, 貨物
交通手段		自動車, バス	11の複合手段	自動車, トランジット	自動車, 鉄道
ネットワーク		自動車とバスの相互干渉あり	道路: 自動車, タクシー, バス; 公共交通: 地下鉄, 専用レーン走行バス	道路とトランジットの分離ネットワーク	道路と鉄道の分離ネットワーク, 鉄道の混雑あり
定式化	制約条件つき最適化問題	変分不等式問題	変分不等式問題	制約条件つき最適化問題	制約条件つき最適化問題
OD	二重制約型, 負の指数関数形	なし	二重制約型, 負の指数関数形	二重制約型, 負の指数関数形	Logit (片側制約)
手段	Logit	Logit	Nested Logit	Nested Logit	Logit
出発時刻	なし	なし	3肢選択	なし	なし
経路	最小経路	最小経路	乗用車: 最小経路, トランジット: 最小経路, 徒歩	乗用車: 最小経路, トラック: 最小経路	乗用車: Logit; 鉄道 Logit
トリップの有無	回帰式	なし		なし	Logit
ゾーン	252	57	450	1,790	149
ノード	998	1,583	2,500	12,982	10,692
道路リンク数	3078	2,122	8,000	39,018	22,911
鉄道リンク数					4,620
解法		緩和法	Evans(1976)をベースにした緩和法	Evans(1976)	Evans(1976)
データ		PT調査	世帯交通調査	世帯交通調査	PT調査
推定法		外生的に設定	不明	最尤推定法	最尤推定法, 回帰分析
検証		あり	不明	勤務交通調査 (Travel to work census)	道路交通センサス, 大都市交通センサス

注) Boyce and Bar-Gera (2004)⁴²¹⁾の Table 1 をもとに, 大幅に文献, 内容を追加

3.2 トリップ目的別発生・分布・分担・配分統合型確率的交通ネットワーク均衡モデル

3.2.1 モデルの定式化

ゾーン r に滞在する代表的個人が、ある時間帯 t においてトリップを行うか否か、トリップを行う場合の、利用交通手段、目的地、目的地までの経路の選択行動を考える。交通手段 m を利用して目的地ゾーン s へネットワーク上の経路 k を利用して移動する行動を図-3.1 のような **Nested Logit** 型のツリー構造で記述できると仮定する。伝統的な交通モデルでは、目的地の選択が手段の選択よりも上位の場合が多い。本章では、後述する実際都市への適用事例のパラメータの推計結果から、手段選択を上位とする構造を採択している。

なお、当然のことながら、選択構造の上位下位とは、利用者の行動仮説における選択の順序を意味しているわけではない。今回の場合、利用者は、最初に手段を選択して、目的地を選ぶという仮定がなされているわけではなく、モデルの行動仮説は、あくまで、手段と目的地(さらには、トリップの有無、経路)を同時に決定しているというものである。**Nested Logit** モデルの選択構造とは、効用の誤差項の分散スケールによって、すなわち実データによるパラメータの推定結果によって決定されるものであることに注意したい。

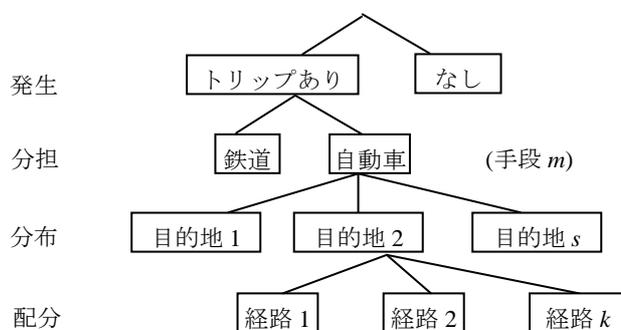


図-3.1 Nested Logit 型の選択構造

以下、この選択構造の下位のレベルからモデルを具体的に述べる。手段選択を下位とする場合も、モデルの若干の変更で対応可能となる。

3.2.1.1 経路選択行動

トリップ目的 i で OD ペア rs 間で手段 m を選ぶ条件のもと、経路 k を選択する確率は、以下で与えられるとする。

$$\Pr(k | i, r, s, m) = \frac{\exp[-\theta_1^m c_{k,m}^{rs}(t)]}{\sum_k \exp[-\theta_1^m c_{k,m}^{rs}(t)]} \quad (3.1)$$

ここで、 $c_{k,m}^{rs}(t)$ は、時間帯 t における OD ペア rs 間で手段 m における k 番目経路の交通一般化費用であり、ネットワークの混雑水準により変化する。 θ_1^m は、手段 m の経路選択に関する分散パラメータである。一般に、交通目的 i 別に経路選択モデルを構築することも考えられるが、単純化のため、本章では経路選択に関して目的別の区別は行わず同一のモデルを仮定する。

3.2.1.2 目的地選択行動

次に、トリップ目的 i で発ゾーン r 、手段 m を選択するという条件のもと、目的地に着ゾーン s を選択する確率は、以下で与えられるとする。

$$\Pr(s | i, r, m) = \frac{\exp[-\theta_2^{im} \{V_s^{im} + S_{rs}^m(t)\}]}{\sum_s \exp[-\theta_2^{im} \{V_s^{im} + S_{rs}^m(t)\}]} \quad (3.2)$$

$$S_{rs}^m(t) = -\frac{1}{\theta_1^m} \ln \sum_k \exp[-\theta_1^m c_{k,m}^{rs}(t)] \quad (3.3)$$

ここで、 $S_{rs}^m(t)$ は手段別の経路選択に関する期待最小費用である。 V_s^{im} は、目的地選択要因のうちゾーン間費用以外の目的地の固有の要因で、目的 i に応じて適切な説明変数の利用が望まれる。例えば、通勤目的では従業者数、買物目的ではサービス従業者数などである。 θ_2^{im} は、トリップ目的 i の目的地選択に関する分散パラメータであり、目的地選択については、トリップ目的別にモデルを作成する。

3.2.1.3 手段選択行動

次に、トリップ目的 i で発ゾーン r という条件のもと、手段 m を選択する確率は、以下で与えられるとする。

$$\Pr(m | i, r) = \frac{\exp[-\theta_3^i \{V_m^{ir} + S_m^{ir}(t)\}]}{\sum_m \exp[-\theta_3^i \{V_m^{ir} + S_m^{ir}(t)\}]} \quad (3.4)$$

$$S_m^{ir}(t) = -\frac{1}{\theta_2^{im}} \ln \sum_s \exp[-\theta_2^{im} \{V_s^{im} + S_{rs}^m(t)\}] \quad (3.5)$$

ここで、 $S_m^{ir}(t)$ は、目的地選択に関する期待最小費用である。 V_m^{ir} は、手段選択要因のうちゾーン間費用以外のものであり、発ゾーンの駐車場料金、自動車保有率などから目的 i に応じて適切な説明変数の導入が望まれる。 θ_3^i は、トリップ

目的 i の手段選択に関する分散パラメータであり、手段選択についても、目的別にモデルを作成する。

3.2.1.4 トリップ発生選択行動

最後に、ゾーン r に滞在する利用者が、対象時間帯に、トリップ目的 i を行うために、トリップを発生させる確率が以下で与えられるとする。

$$\Pr(i, r) = \frac{\exp[-\theta_4^i \{V_i^r + V_i(t) + S_r^i(t)\}]}{1 + \exp[-\theta_4^i \{V_i^r + V_i(t) + S_r^i(t)\}]} \quad (3.6)$$

$$S_r^i(t) = -\frac{1}{\theta_3^i} \ln \sum_m \exp[-\theta_3^i \{V_m^{ir} + S_m^{ir}(t)\}] \quad (3.7)$$

ここで、 $S_r^i(t)$ は目的別の手段選択に関する期待最小費用であり、ゾーン r におけるアクセシビリティ指標に相当する。 V_i^r は、ゾーン r から目的 i のトリップを行うことによる固有の非効用で、ゾーン r の社会経済属性からトリップ発生に影響を与えると考えられる変数の導入が考えられる。 $V_i(t)$ は、時間帯 t に目的 i のトリップを行うことによる固有の非効用である。これは、トリップの本源的な需要である活動を対象時間帯に行うことによる非効用でもある。例えば、買い物行動では、店舗の営業時間などが関連する。本研究の枠組みでは、時間帯別のダミー変数でこれらを近似的に表現することになる。 θ_4^i は、トリップ目的 i のトリップ発生選択に関する分散パラメータであり、トリップ発生選択についても、目的別にモデルを作成する。なお、式(3.6)は、トリップを行うあるいは行わない選択行動が2項ロジットモデルで記述できるとして、トリップを行わない効用をゼロに基準化したものである。また、このモデルでは、対象時間帯における一人あたりの最大トリップ数を1トリップに限定することになるため、適切な時間帯区分が必要となる。

3.2.2 等価な最適化問題

式(3.1)~(3.7)の選択確率を用いると、手段別の経路交通量 $f_{m,k}^{rs}$ 、手段別目的計 OD 交通量 q_m^{rs} 、手段別目的別 OD 交通量 $q_m^{i,rs}$ 、手段計目的別発生交通量 O_r^{im} 、目的別発生交通量 O_r^i は、それぞれ次のように表される。

$$f_{m,k}^{rs} = q_m^{rs} \Pr(k | i, r, s, m) \quad (3.8)$$

$$q_m^{rs} = \sum_i q_m^{i,rs} \quad (3.9)$$

$$q_m^{i,rs} = O_r^{im} \Pr(s | i, r, m) \quad (3.10)$$

$$O_r^{im} = O_r^i \Pr(m | i, r) \quad (3.11)$$

$$O_r^i = N_r^i \Pr(i, r) \quad (3.12)$$

$$O_r^i + O_{r_0}^i = N_r^i \quad (3.13)$$

ここで、 N_r^i は、トリップ目的*i*の生成要因の人口指標で、 $O_{r_0}^i$ は、そのうち対象時間帯にトリップを行わない利用者数である。

ネットワーク上の混雑状況は、対象時間帯内で手段別に独立に静的均衡による定常状態として記述できると仮定しよう。この仮定の下で、これら需要-パフォーマンスについての各状態をすべて整合的に記述するためには、利用者の行動に関する非線形連立方程式系 式(3.1)~(3.13)とネットワーク上のフロー均衡条件を同時に解く事が必要とされる。これは、以下の等価な最適化問題を定式化し、その問題を解くことで、比較的容易に行える。

$$\begin{aligned} \min. \quad & Z(\mathbf{x}(\mathbf{f}), \mathbf{q}, \mathbf{O}) \\ & = \sum_{m,a} \int_0^{x_a^m} t_a^m(\omega) d\omega + \sum_{r,s,m,k} \frac{1}{\theta_1^m} f_{m,k}^{rs} \ln(f_{m,k}^{rs} / q_m^{rs}) \\ & + \sum_{i,r,s,m} \frac{1}{\theta_2^{im}} q_m^{i,rs} \ln(q_m^{i,rs} / O_r^{im}) + \sum_{i,r,m} \frac{1}{\theta_3^i} O_r^{im} \ln(O_r^{im} / O_r^i) \\ & + \sum_{i,r} \frac{1}{\theta_4^i} [O_r^i \ln(O_r^i / N_r^i) + O_{r_0}^i \ln(O_{r_0}^i / N_r^i)] \\ & + \sum_{i,r,s,m} q_m^{i,rs} V_s^{im} + \sum_{i,r,m} O_r^{im} V_m^{ir} + \sum_{i,r} O_r^i [V_i^r + V_i(t)] \end{aligned} \quad (3.14a)$$

$$\text{subject to} \quad O_r^i + O_{r_0}^i = N_r^i, \quad \forall i, r \quad (3.14b)$$

$$\sum_m O_r^{im} = O_r^i, \quad \forall i, r \quad (3.14c)$$

$$\sum_s q_m^{i,rs} = O_r^{im}, \quad \forall i, r, m \quad (3.14d)$$

$$\sum_i q_m^{i,rs} = q_m^{rs}, \quad \forall r, s, m \quad (3.14e)$$

$$\sum_k f_{m,k}^{rs} = q_m^{rs}, \quad \forall r, s, m \quad (3.14f)$$

$$x_a^m = \sum_{r,s,k} \delta_{a,k}^{m,rs} f_{m,k}^{rs}, \quad \forall m, a \quad (3.14g)$$

$$\begin{aligned} x_a^m \geq 0, f_{m,k}^{rs} \geq 0, q_m^{i,rs} \geq 0, q_m^{rs} \geq 0, \\ O_r^{im} \geq 0, O_r^i \geq 0, O_{r0}^i \geq 0, \forall i, r, s, m, k, a \end{aligned} \quad (3.14h)$$

ここで、交通手段 m のリンク a におけるリンクフローを x_a^m 、リンクコスト関数を $t_a^m(\cdot)$ 、 $\delta_{a,k}^{m,rs}$ はリンク経路接続行列とする。この問題は、

$$t_a^m(x_a^m) > 0, \frac{\partial t_a^m(x_a^m)}{\partial x_a^m} > 0, \forall m, a \text{ and } \theta_1^m > \theta_2^{im} > \theta_3^i > \theta_4^i > 0, \forall i, m \quad (3.15)$$

という条件下ⁱⁱⁱ⁾で、目的関数が狭義凸関数となることと、制約条件が凸領域であることから解の一意性が保証される。また、この問題の最適解が満たすべき Kuhn-Tucker 条件を求めると、前述の Nested Logit 型の方程式系 式(3.1)~(3.13)が導出できることから等価性も証明される(詳細は、第3章付録A 1)。

旧来の四段階推定法と比較すると、このモデルはランダム効用理論に基づく Nested Logit モデルによる目的別の一貫した行動記述を行いつつ、発生・分布・分担の各レベルに相当するモデルにはログサム変数の形式で配分レベルのゾーン間所要費用の影響が反映されている点で優れたモデルといえる。

本章では、時間帯別に上記モデルが独立に均衡状態にあると仮定し、時間帯別の計算を行うこととする。時間帯間の残留交通量の影響考慮などは今後の課題としたい。

3.2.3 計算アルゴリズム

今回の式(3.14)のモデルを部分線形化法により解く場合、アルゴリズムは、以下のようなになる。

- Step 0: 初期許容解 $\mathbf{X}^{(1)} = \{\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{q}^{(1)}, \mathbf{O}^{(1)}\}$ を与える。繰り返し回数 $n=1$ 。
- Step 1: 元の問題を部分線形近似した補助問題を解き、その解を $\mathbf{Y} = \{\mathbf{x}^{sub}, \mathbf{q}^{sub}, \mathbf{O}^{sub}\}$ とする。
- Step 2: 以下の1次元探索を行い、ステップサイズ α を求める。

$$\min. Z(\mathbf{X}^{(n)} + \alpha(\mathbf{Y} - \mathbf{X}^{(n)})), \text{ s.t. } 0 \leq \alpha \leq 1$$
- Step 3: 解の更新。 $\mathbf{X}^{(n+1)} = \mathbf{X}^{(n)} + \alpha(\mathbf{Y} - \mathbf{X}^{(n)})$
- Step 4: 収束していれば終了。そうでなければ、 $n=n+1$ として Step1 へ。

Logit 型確率配分の解法として、Dial のアルゴリズムを用いる場合、Step 1 の

ⁱⁱⁱ⁾ この条件の意味については、第4章でより詳しく検討される。

補助問題の具体的な解法は、以下のようになる。

Step 1.1: リンクコストの更新. $t_a^m = t_a^m(x_a^{m,(n)})$, $\forall m, a$

Step 1.2: 手段別ネットワークについて, Dial のアルゴリズムの前進処理(forward pass)を行い, リンクウェイト $\{W\}$ を求める。

Step 1.3: 手段別の OD 間の経路選択に関する期待最小費用を求める。

$$S_{rs}^m(t) = c_{\min}^{rs,m} - \frac{1}{\theta_1^m} \ln \sum_{j \in J} W[j \rightarrow s], \forall m, r, s$$

ここで, $c_{\min}^{rs,m}$ は, OD ペア間の最短交通費用で,

J は, 着ノードに接続するノード集合である。

Step 1.4: 式(3.1)~(3.13)に従い, 目的地選択および手段選択に関する期待最小費用を求め, 発生交通量, OD 交通量に関する補助変数 \mathbf{O}^{sub} , \mathbf{q}^{sub} を得る。

Step 1.5: 求めた手段別 OD 交通量を, Dial のアルゴリズムの後退処理(backward pass)により各手段のネットワークに配分し, リンク交通量の補助変数 \mathbf{x}^{sub} を求める。

Step 1.3 の経路選択に関する期待最小費用の算出では, 式(3.3)の定義式ではなく, 経路列挙を行わずに求めている⁴³⁸⁾ため, 今回, 対象とする大規模ネットワークでも計算が可能となる。また, Step 2 で必要な目的関数の評価においても, 経路変数を用いずに, 起点別リンク交通量を用いた方法が可能である^{403),438)}。もしくは, 逐次平均法(MSA)⁴⁰³⁾によって, Step 2 の次元探索を行わずに, $\alpha = 1/n$ と定める方法がある。後者の手法は, 計算機の容量を節約でき, アルゴリズムが単純になるという利点がある。今回は, これら起点別リンク交通量を用いた部分線形化法と, 逐次平均法の両方のアルゴリズムを試行したが, その比較結果は後述する。

また, 確率配分の計算に Dial のアルゴリズムを用いる場合, 第2章で詳述したように, 経路選択枝集合が逐次計算のたびに変化することより, 必ずしも収束は保証されない。厳密解を求めるために, この問題の解決を試みるのであれば, アルゴリズムの改良(Akamatsu, 1996; Leurent, 1997)^{439),440)}が必要である。Logit 型確率配分の解法として, これら Dial 法以外のアルゴリズム(MCA など)を用いる場合も, 第2章で紹介したように経路選択に関する期待最小費用は容易に計算できる場合が多い。

ただ, 本章の適用においては, Dial のアルゴリズムをそのまま利用しており,

この収束性の問題についても後に触れる。

3.3 入力データ・設定条件

東京都市圏を対象として、モデルの適用検討を行う。以下、利用したデータ、設定条件を詳述する。

3.3.1 OD データ・ネットワーク・各種設定条件

ゾーン数はPT調査の中ゾーン144, および東京都市圏以外周辺5県の合計149ゾーンとし、貨物車のOD表はH06年度道路交通センサス, それ以外のPT目的別OD表は, H10年度東京PT調査のデータを利用する。ゾーン内々トリップは分析から除外した。PT中ゾーンは, およそ市区町村境界に対応する比較的大きなゾーンであるが, このゾーンを用いているのは, 目的地選択モデルの推定の際に必要なゾーン毎の地域データの入手可能性と, パラメータの安定的な推定を行うために必要なOD表のサンプル数の確保を勘案してのことである。これらの条件のもとでは, PTで代表交通手段が鉄道または自動車のトリップが全体の89.5%を占めており, このスケールでの分析では, 利用可能な交通手段を自動車と鉄道の2手段に限定しても大きな問題はないと判断できる。また, これらのODデータは, モデルの直接的な外生変数ではなく, Nested Logitモデルのパラメータを推定する際に用いることになる。発生モデル, 目的地選択モデルの説明変数となるゾーン別の常住人口, 産業分類別従業者数などの地域データは, H07年度国勢調査を用いる。

自動車および鉄道のネットワークは既存研究^{419),420),441)}で構築されたものを利用する。ネットワーク要素数を表-3.3に示す。自動車のネットワークにおけるリンクコスト関数などのサービス条件, 時間価値等も, 既存研究^{419),420),441)}と同等とする(表-3.4)。ネットワーク, ゾーンシステムについては, 第3章付録A2に具体的に示す。

表-3.3 ネットワーク要素数

	ノード数	リンク数	ダミーリンク数
自動車	10,692	22,911	1,324
鉄道	2,177	4,620	3,426

表-3.4 リンクコスト関数の関数形と主要パラメータ

	関数形	主要パラメータ
自動車リンク	<p>BPR 関数 [松井式]¹³⁹⁾</p> $t_a^{car} = t_a^0 [1 + \alpha (x_a^{car} / Q_a^{car})^\beta]$ <p>t_a^0: 自由走行時間, Q_a^{car}: 時間交通容量</p>	<p>$\alpha = 0.4 \sim 0.54$ $\beta = 2.2 \sim 3.3$ (道路種別毎に設定)</p>
鉄道駅間リンク	<p>[家田式]¹⁴⁶⁾</p> $t_a^{rail} = t_a^0 [1 + \alpha (x_a^{rail} / Q_a^{rail})^\beta]$ <p>t_a^0: 乗車時間, Q_a^{rail}: 乗車定員</p>	<p>$\alpha = 0.019$ $\beta = 4.52$ (路線毎一律)</p>

既存研究では、鉄道の混雑を考慮していないため、今回、鉄道配分モデルの均衡モデルへの改良を行った。鉄道の路線容量は、時刻表から得られる時間帯ごとの路線運行本数と資料⁴⁴²⁾から時間帯別に推定した。利用者の混雑不効用関数は、既存研究⁴⁴³⁾の値を参考に設定した。この鉄道確率的利用者均衡配分システムについては、鉄道 OD を所与とした固定需要型配分の場合において、混雑を考慮した均衡配分が All or Nothing 配分よりも再現性が高く、経路選択の確率性を考慮できる確率均衡配分モデルの再現性がさらに高くなることを確認している。

時間帯の幅は 1 時間とし、発時刻毎に集計したデータを利用する。これは、鉄道の混雑現象を現実味のある形で表現するのに必要な時間幅と判断したためであるが、今回の広域な対象地域では、この時間幅では時間帯内に目的地に到着できない残留交通の影響が大きいものとなっており、モデルの改良を含めて今後の課題としておきたい。

モデル適用の基準年次は、PT 調査の実施された H10(1998)年を想定するが、入手の都合上、リンク交通量の照合などの各種データとは若干の年次の違いが生じていることに、注意が必要である。

3.3.2 トリップ目的区分と発生モデルの扱い

PTは、通勤、通学、業務、私事、帰宅の5分類の目的区分を行い、これにセンサスの貨物車を加えた合計6分類の利用者層のモデルを作成する。また、貨物車は、鉄道への転換は無いものとする。

式(3.6)のトリップ発生モデルには、対象ゾーンの交通サービス水準を示す $S_r^i(t)$ が導入されており、交通施設整備によるアクセシビリティ改善による狭義の誘発交通の存在を考慮したモデルが構築できる。一方、発生モデルに、このアクセシビリティ指標を導入しない場合、発生モデルと、それ以外の分布・分担・配分レベルを独立に計算しても、同時に計算しても同じ結果が得られる。実際に誘発交通が起こりうる具体的なトリップ目的は業務・私事目的と言え、これらの目的では式(3.6)型の発生モデルを推計することとする。他方、業務・私事目的以外では、発生モデルは扱わず、発生交通量を外生的に与えることとした。本章では、同時均衡モデルの構築と適用に主眼があるためである。今回、トリップ生成要因人口指標 N_r^i は、業務目的では従業人口、私事目的では昼間人口(従業人口+非就業就学人口)を用いるが、この値を発生モデルから計算されるトリップ発生確率に乗じることで時間帯別の発生交通量が算出されることになる。従来のモデルと比較すると、本モデルは、原単位法の発生モデルの原単位をロジット型の確率モデルで表現している形式といえる。今回、外生的に与えた私事・業務目的以外の発生交通量は、将来予測の際には、時間帯別の発生交通量モデル⁴⁴⁾等で別途推定する必要がある。また、本来ならば、帰宅目的の交通量も、業務・私事目的の誘発交通に付随して変動することになるが、今回はモデルの構造上、それらは考慮しないものとする。

結局、今回の適用でのモデルの全体構成は図-3.2のようになる。目的別手段別のOD交通量がモデルの内生変数として取り扱われ、OD間所要時間などの変数がモデル内部で一致した値となっている点が特徴である。また、本章のネットワーク均衡モデルの概念図は、図-3.3のように示される。

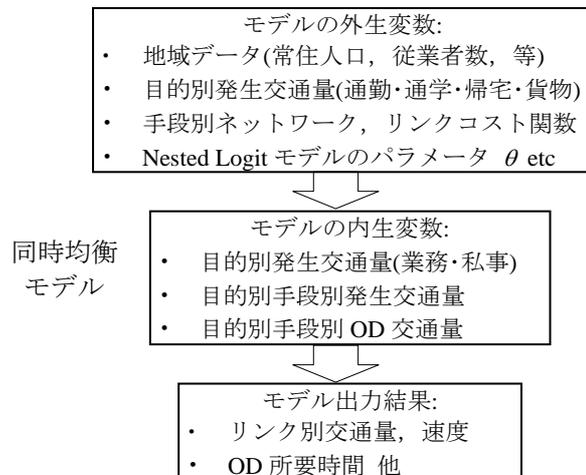


図-3.2 モデルの入出力変数の関係

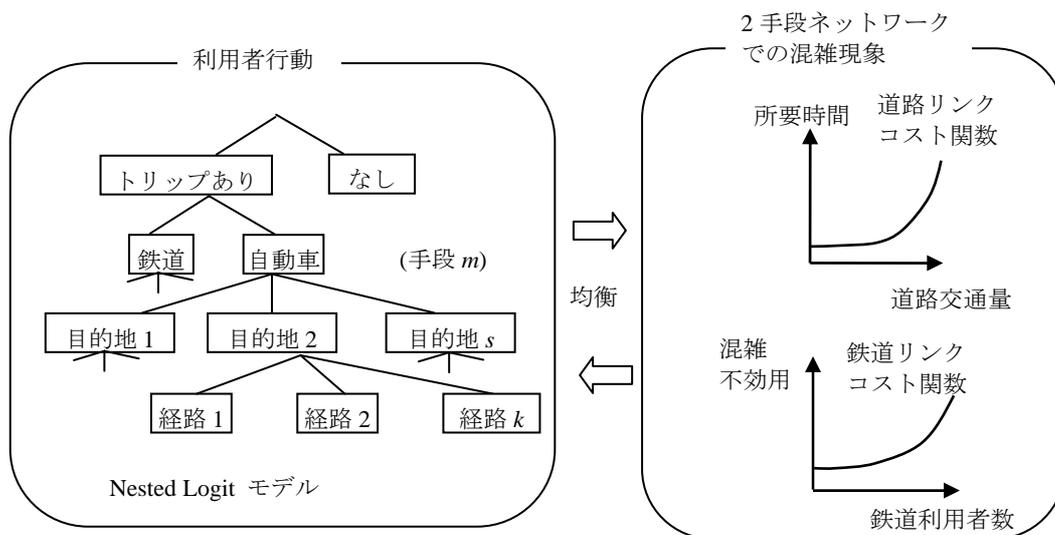


図-3.3 統合需要型ネットワーク均衡モデルの構造

3.4 パラメータの推定

3.4.1 パラメータの推定方法

統合均衡モデルのパラメータの推定法に関して、多くの手法があるが^{404),412),445),446),447)}、本研究では、次のような段階推定法を用いる。基本的な考えとして、現状の交通状況が、前述の Nested Logit 型の確率的利用者均衡状態にあると仮定する。その上で、図-3.1 の下位から順に、段階推定を行う。あるレベルで推定されたパラメータを元に、そのレベルにおける期待最小費用を計算し、その上位のレベルの推定に用いることを繰り返す。推定は基本的に最尤推定で行うが、選択肢数が膨大となる目的地選択に関しては、後述のように最小二乗法も併用する。

3.4.2 パラメータ推定結果

推定結果の一部を表-3.5、表-3.6 に示す。全体として推定されたパラメータの符号条件、統計的有意性の問題は生じていない。また、推定されたパラメータは、目的別に、

$$\theta_1 > \theta_2 > \theta_3 > \theta_4$$

の条件を満たしているため、図-3.1 の構造の Nested Logit モデルは、ランダム効用理論と整合的なモデルとなっていることが確認できる。なお、データ入手の都合上、拡大後の PTOD 表を基本的な対象サンプルとしているため、 t 値は全体的に高めの値を示している^{iv)}。以下に推定法、外生的に設定したパラメータなどを詳しく述べる。

^{iv)} 今回、PT 調査の個票データが入手できなかったため、拡大後のサンプルを真のサンプルと仮定しての推定作業を行っている。一般に、同一のサンプルセットを n 倍して推定を行うと、 t 値は、 \sqrt{n} 倍になることが知られている。今回の場合で概算すると、PT 調査の抽出率を 1%(拡大率 100)と仮定すると、 t 値は、 $10(=\sqrt{100})$ 倍程度過大になっている可能性がある。ただし、仮にこれらの補正を行っても大多数の変数において統計的有意性の問題は生じない。

3.4.2.1 経路選択モデル

経路選択の実データは、現状では観測が困難であるため、経路選択パラメータは、手段別 OD を所与とした固定需要型配分におけるキャリブレーションにより求めることとした^{v)}。この結果、自動車は $\theta_1^{car}=0.5$ (/min)、鉄道は、 $\theta_1^{rail}=0.05$ (/min)と定められた。鉄道のパラメータが小さな値となっているのは、料金抵抗、乗換抵抗の個人差、ゾーンの空間集計誤差の影響を表現しているためと考えられ、単純に利用者の経路選択の認知誤差が自動車よりも鉄道が大きいと想定しているわけでは無いことに注意が必要である。これらの θ_1 のもとで、現状の手段別OD表を各手段のネットワークに確率均衡配分して得られるOD間手段別期待最小費用の値を利用して、以降の推定は行っている。

3.4.2.2 選択肢集合の確率的形成を考慮した目的地選択モデルの推定

吉田、原田⁴⁴⁸⁾は、集計型の目的地選択モデルについて、PT データのゼロトリップ OD の存在を利用し、選択肢の選別過程を考慮した 2 つのモデルを提案している。本研究では、それらのモデルのうち、簡便で利用しやすい「選択肢自己サンプリングのモデル(SSA)」を利用し、目的地選択のパラメータを推定した。推定法の詳細は省略するが、まず PT 調査のある OD ペアに、トリップが存在するか否かのデータから、目的地選別の 2 項選択モデルを推定する。その後、ゼロトリップを除く OD サンプルを対象に、最小二乗法による目的地選択モデルの推定を行う。これらの選別-選択型のモデルは、ある一定の仮定⁴⁴⁸⁾が成立する条件下で、式(3.2)と同形式になるため、本研究のフレームにも適用可能となる。また、任意のゾーニングに対して選択確率の加法性が成立するような、効用関数形を設定している。

紙面の都合上、選別モデルの推定結果は省略し、選択モデルの推定結果のみを示している。どの目的においても、着ゾーンの関連する人口指標を変数に含むことができている。鉄道利用の目的地選択モデルの精度は比較的高いが、自動車利用のモデルの精度は、十分ではなく、改善の余地がある。また、通常の本 MNL モデル型の目的地選択モデルも推定したが、選択肢の選別を考慮する上記モデルが、より高い現状再現性を有することを確認している。

^{v)} 具体的には、 θ_1 の値を少しずつ変化させて固定需要型配分を多数回実施し、リンク交通量の再現性が最も高くなる値に定めた。ただし、最終的に設定した θ_1 の近傍での再現性の違いは明確なものではない。

表-3.5 通勤 通学 手段・目的地・経路選択モデル推定結果

	トリップ目的		通勤		通学	
			推定値	(<i>t</i> 値)	推定値	(<i>t</i> 値)
手段	期待最小費用	$-\theta_3$	-0.017	(-808.9)	-0.012	(-164.)
	定数項		-4.44	(-687.9)	-2.65	(-81.2)
	尤度比指数	ρ^2	0.16		0.69	
目的地 自動車	ln(ゾーン面積)		1.00	(-)	1.00	(-)
	期待最小費用	$-\theta_2^{car}$	-0.041	(-156.8)	-0.047	(-74.2)
	ln(就業者数密度)		-0.06	(-5.5)		
	ln(従業者数密度)		0.56	(150.1)		
	ln(従学者数密度)				0.30	(21.9)
	サンプル数	<i>N</i>	6,328		876	
	相関係数	<i>R</i>	0.80		0.62	
経路 自動車	一般化費用	$-\theta_1^{car}$	-0.50	(-)	-0.50	(-)
目的地 鉄道	ln(ゾーン面積)		1.00	(-)	1.00	(-)
	期待最小費用	$-\theta_2^{rail}$	-0.022	(-131.5)	-0.019	(-97.9)
	ln(就業者数密度)		-0.31	(-33.8)		
	ln(従学者数密度)				1.002	(256.8)
	ln(2次従業者数密度)		0.17	(6.4)		
	ln(3次従業者数密度)		1.03	(44.1)		
	サンプル数	<i>N</i>	8,028		5,770	
相関係数	<i>R</i>	0.87		0.81		
経路 鉄道	一般化費用	$-\theta_1^{rail}$	-0.05	(-)	-0.05	(-)

注) *t* 値を(-)としたものは、キャリブレーションにより求めたもの、もしくは、対象パラメータを固定して推定しているもの。

表-3.6 業務 私事 トリップ発生・手段・目的地・経路選択モデル推定結果

	トリップ目的	業務		私事	
		推定値	(<i>t</i> 値)	推定値	(<i>t</i> 値)
発生	時間帯	09-18 時台		10-16 時台	
	期待最小費用 $-\theta_4$	-0.006	(-218.1)	-0.003	(-192.)
	3次従業人口比率 無職人口比率 ^{注)}	1.122	(128.1)	1.458	(240.)
	時間帯別の ダミー	9 時台	0.995 (252.5)	10 時台	0.186 (77.4)
		11 時台	1.231 (321.9)	11 時台	0.009 (3.8)
		12 時台	1.215 (317.5)	12 時台	-0.193 (-73.8)
		13 時台	0.793 (196.7)	13 時台	-0.005 (-2.)
		14 時台	1.329 (351.3)	14 時台	-0.132 (-51.1)
		15 時台	1.211 (316.4)	15 時台	-0.122 (-47.4)
		16 時台	1.217 (318.)	16 時台	-0.122 (-47.4)
		17 時台	1.055 (270.4)	17 時台	-0.122 (-47.4)
		定数項	0.826 (203.4)	定数項	-6.247 (-752.)
		相関係数 R	0.978	相関係数 R	0.827
	回帰係数 a	0.95	回帰係数 a	0.81	
手段	期待最小費用 $-\theta_3$	-0.016	(-248.5)	-0.018	(-409.)
	山手線ダミー	1.210	(306.5)	0.810	(205.7)
	23区ダミー			0.347	(93.6)
	定数項	-11.26	(-297.7)	-6.09	(-436.)
	尤度比指数 ρ^2	0.28		0.14	
目的地 自動車	ln(ゾーン面積)	1.00	(-)	1.00	(-)
	期待最小費用 $-\theta_2^{car}$	-0.033	(-143.5)	-0.036	(-127.)
	ln(2次従業者数密度)	0.15	(4.5)		
	ln(3次従業者数密度)	0.38	(13.0)	0.36	(76.8)
	サンプル数 N	7,389		5,042	
	相関係数 R	0.81		0.69	
	回帰係数 a	0.50		0.34	
経路 自動車	一般化費用 $-\theta_1^{car}$	-0.50	(-)	-0.50	(-)
目的地 鉄道	ln(ゾーン面積)	1.00	(-)	1.00	(-)
	期待最小費用 $-\theta_2^{rail}$	-0.018	(-78.6)	-0.021	(-108.)
	ln(3次従業者数密度)	1.10	(212.2)	0.86	(214.6)
	サンプル数 N	3,131		5,976	
	相関係数 R	0.97		0.78	
	回帰係数 a	0.88		0.66	
経路 鉄道	一般化費用 $-\theta_1^{rail}$	-0.05	(-)	-0.05	(-)

注) 無職人口比率=非就業非従学人口/昼間人口,
昼間人口=非就業非就学人口+従業人口

3.4.2.3 手段選択モデル

業務・私事目的の手段選択モデルには、発ゾーンが、山手線内、山手線外~23区区内に対応して、山手線ダミー、23区ダミーの地域ダミーを導入している。これらは、東京都心部へ鉄道で通勤する利用者が、勤め先からの業務私事目的での移動において、利用手段が鉄道に限定されることを表現していると解釈される。なお、定数項を含めて、これらのダミー変数は、鉄道の効用項に導入しているため、この推定値が高いほど鉄道の選択率が高い状況になる。また、トリップ目的別に定数項の値は大きく異なっており、トリップ目的別のモデル化の有効性がうかがえる。

3.4.2.4 トリップ発生選択モデル

発生モデルの説明変数には、発ゾーンのアクセシビリティを示す期待最小費用と時間帯ダミー、および発ゾーンの人口指標を利用している。発ゾーンの人口指標は、例えば業務目的では、従業者数のうち3次産業従業者の割合が多いゾーンのトリップ発生確率が高いという状況を表現している。

なお、本モデルは、経路選択モデルのレベルにおいて、外生的に与えた時間価値で通行料金等を一般化費用に変換して推定を行っている。したがって、パラメータの推計結果には料金等の政策変数は明示的には表れていないが、本モデルは料金や時間で表現される一般的な政策を評価可能である。将来的には時間価値も内生的に推定することが課題となる。

3.5 均衡計算結果

3.5.1 計算アルゴリズムの比較

推定されたパラメータを元に、時間帯ごとに統合均衡配分計算を行った。アルゴリズムとしては、前述したように、起点別リンク交通量を利用した部分線形化法(PL)と、逐次平均法(MSA)の2種類がある。これらのパフォーマンスの比較を、代表的な時間帯について表-3.7にまとめる。まず、今回対象とした大規模ネットワークにおいても、短時間で収束解が得られていることが分かる。繰り返し

返し計算 1 回あたりの計算時間は、MSA が PL よりも少ない。これは、PL は、繰り返し計算毎に目的関数の 1 次元探索を行うが、今回の大規模ネットワークでは、この 1 次元探索のコストが無視できない量になっていることを意味する。ただし、PL は、この 1 次元探索で目的関数の情報を利用しつつステップサイズを決めているため、収束までの繰り返し計算の回数は、MSA よりも少なく済む。

図-3.4 には、09 時台について、横軸に計算経過時間、縦軸にその経過時間における各計算法による目的関数値を描いた比較図を示す。ここで、2つの計算法の差が明確になるように、収束した計算時間付近での拡大図を示している。まず、どちらの計算法においても、目的関数は単調に減少していることが確認できる。計算時間の初期においては、MSA が PL よりも目的関数値は小さいが、計算時間が進むにつれ、MSA は目的関数の降下が極めて緩慢になり、途中からは PL による目的関数値が小さくなっている。目的関数値が小さいほうが、今回求めるべき均衡解に近い解となることから判断すると、MSA では、未だ均衡解と離れた状況で収束しているといえる。また、同様な図を 01 時台についても描いたところ、MSA では、計算時間の後期において目的関数が漸増する現象が観察された。これらは、MSA では、3.2.3 で述べた Dial のアルゴリズムの問題点が顕在化したためと考えられる。この MSA の収束解と均衡解との乖離度を具体的に計測するため、PL を多数回繰り返して得た真の均衡解と MSA の収束解のリンク交通量相互の RMSE を求めた。この値は、09 時台の自動車リンク交通量で 73.5(台/時)、鉄道リンク交通量で 50.0(人/時)となり、集計的なフローパターンにも若干の差が生じていることが分かった。

従って、MSA は均衡解を簡便に求めるためには有効な計算法であるが、得られた収束解が必ずしも求めるべき均衡解と一致しないことに十分な注意が必要であるといえる。表-3.7 において、09 時台で、収束までの総計算時間は、MSA が PL よりも短い結果となっているが、MSA でのこの時間は、求めるべき解とは異なった点までの計算時間に過ぎない。最終的に求めるべき均衡解を与えるのは PL であり、以降では PL による計算結果を提示する。

表-3.7 アルゴリズムの比較

時間帯	アルゴリズム	繰り返し1回あたりのCPU時間		
		収束までの繰り返し回数	収束までのCPU時間	収束までのCPU時間
01 時台	MSA	8.4 (s)	36	305 (s)
	PL	26.2 (s)	5	131 (s)
09 時台	MSA	8.1 (s)	45	363 (s)
	PL	25.8 (s)	31	801 (s)

注) CPU 2GHz の計算機による。また、収束基準は、以下のリンク交通量の最大変化率 $\varepsilon < 0.1$ を用いた。

$$\varepsilon = \max_{m,a} \left\{ \left| \frac{x_a^{m,(n+1)} - x_a^{m,(n)}}{x_a^{m,(n)}} \right| \right\}$$

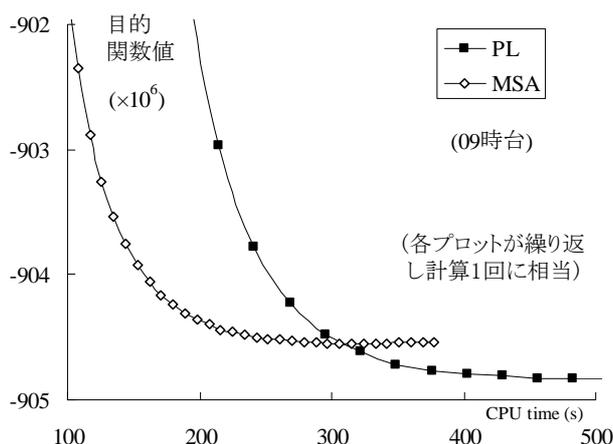


図-3.4 目的関数の収束状況の比較

なお、今回の適用計算において表-3.7のように計算時間が比較的短時間となった理由は次のようにまとめられる。

- ・ 効率的なアルゴリズムを利用している。
- ・ ネットワークに比して少ないゾーン数を設定した。
- ・ 道路網に階層構造のネットワークを設定した(第3章付録A2)^{441),419)}。
- ・ 配分レベルにおいては、単一の利用者区分を設定した。

これらのうち後の3点については、それらの改良を加えた場合、計算時間は増加することになるが、今後の計算機能力の向上で十分対応可能と考えられ、計算費用という観点では、統合型均衡モデルの適用上の問題は少ないといえる。

3.5.2 現状再現性

ここでは、モデルの最終出力結果について、現状再現性の比較を行う。本モデルは手段別 OD 表を変動需要としている点が特徴の一つであり、まずその再現性をみる。図-3.5 に、通勤目的トリップの距離帯別の手段別 OD 交通量の適合度を示す。若干の系統的バイアスが見受けられるものの、全体的には手段分担を含めて良好な再現性があることが確認できる。なお、この図の解釈においては、本研究のモデルは、PT 中ゾーンという比較的大きなゾーンで、ゾーン内々交通量を分析から除外していることに注意が必要である。

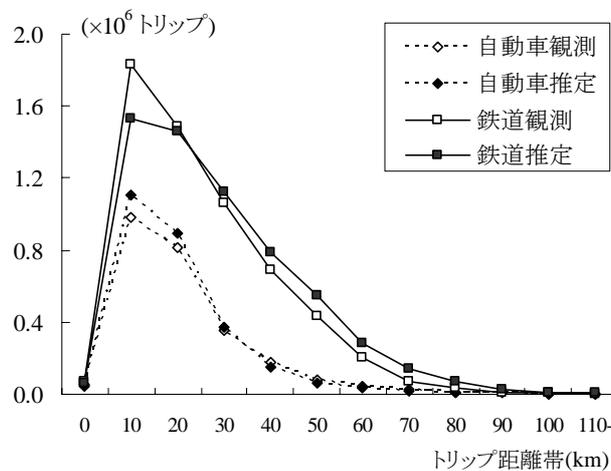


図-3.5 トリップ距離帯別にみた手段別分布交通量の再現状況（通勤トリップ 全日）

さらに、モデルの最終出力結果を集計した指標として、自動車昼間 12 時間リンク交通量、鉄道全日リンク交通量、自動車 OD 所要時間、目的計手段別 OD 表についての現況再現性を表-3.8, 図-3.6 にまとめる。また、比較のため、通常的时间帯別手段別 OD を所与とした固定需要型のモデルの値も示す。

表-3.8 現状再現性指標

指標	モデル	相関係数	回帰係数	RMSE
自動車 リンク交通量	固定 (a)	0.72	0.73	11,740 (台)
	統合 (b)	0.75	0.90	14,313 (台)
鉄道 リンク交通量	固定 (c)	0.95	0.82	122,615(人)
	統合 (d)	0.94	1.16	139,263(人)
自動車 OD 所要時間	固定 (e)	0.51	0.91	31.56 (分)
	統合 (f)	0.65	0.84	20.50 (分)
自動車 OD 表	統合	0.86	0.56	1,498 (台)
鉄道 OD 表	統合	0.88	0.84	1,326 (人)

注) 自動車リンク交通量は、都市圏内 1,498 箇所昼間 12 時間上下合計交通量(H09 年度道路交通センサス)、鉄道リンク交通量は、1,050 箇所駅間通過人員日単位上下合計値(H07 年度大都市交通センサス)、OD 所要時間は時間帯別平均値(H06 年度道路交通センサス・マスターから異常値を除いた値)、手段別 OD 表は、149 ゾーン間日合計値との比較値。
記号(a)-(f)は図-3.6 と対応している。

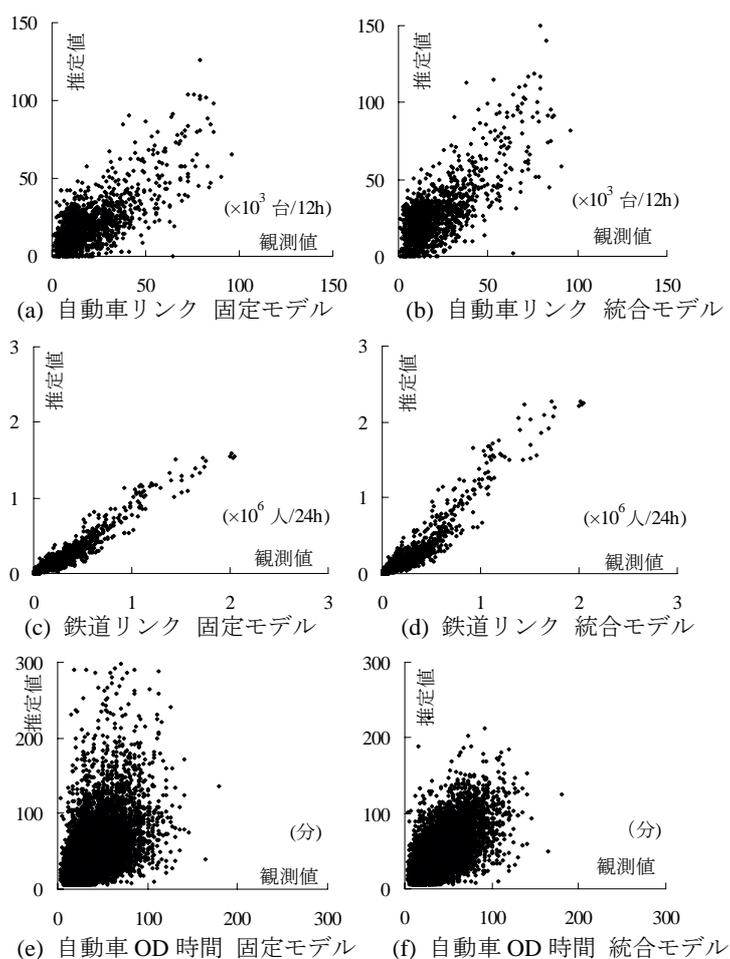


図-3.6 手段別リンク交通量 OD 所要時間の再現性

図-3.6 (a)-(d)からは、鉄道リンクの適合度が道路の適合度よりも高いようにみえるが、そもそもの経路選択の自由度が異なるためこれらは一概に比較できるものではない。道路リンクの再現性は必ずしも十分ではないが、これは統合モデルに限らず固定需要モデルにおいても共通の課題であり、リンクコスト関数の設定法の改善(e.g. 吉田, 原田, 2002)⁴⁴⁹⁾などにより改良が期待されるものである。

図-3.6 (e),(f)の自動車 OD 所要時間で見た場合、固定需要モデルで過大推計であった箇所が統合モデルでは改善されていることが読み取れる。これは、固定需要モデルは、OD 表の観測誤差の影響を受けやすいのに対して、統合型モデルでは、そのような OD 表の偏りを弾力的に吸収しているためと考えられる。

全体的に、統合モデルの再現精度は、固定需要モデルと優劣ない結果となっており、今回、構築した統合モデルは、政策評価を行うのに必要な精度を有していると判断される。なお、Nested Logit モデルの推定の際に、時間帯別の推定や、多数の地域別ダミーの導入などを行えば、現状再現性は更に向上すると考えられるが、地域別ダミーが θ の推定値に与えるバイアスの問題、推定値の将来予測時の安定性の問題が生じる。本研究では、モデルに含まれるパラメータ数を必要最低限に絞り推計していることを付記しておきたい。

3.6 本章の成果と結論

本章では、トリップ目的別の枠組みで発生・分布・分担・配分統合型確率的交通ネットワーク均衡モデルを構築し、東京都市圏を対象として適用検討を行った。理論的には完成されている統合モデルを実務に適用していくためには、人間の行動分析で得られている多くの知見や、分析手法を積極的にモデルに取り入れていく必要があると考えられる。本章で示したトリップ目的別のモデリングや、選択肢集合の確率的形成を考慮した目的地選択モデルの推定はその一例である。本章ではこれらの改良により、モデルの論理性、解の一意性、モデル内部の整合性を堅持しつつ、モデルの現状再現性が高められ、今回対象とした大規模な都市圏においても統合モデルの有効性が確認できたといえる。

今後の課題としては、時間帯間の相互干渉の考慮、出発時刻選択の内生化が挙げられる。現在のモデルでは、時間帯間の残留交通を考慮していないことに起因すると考えられるピーク時の過大推計が生じている。また、通勤目的については、着地制約型の分布モデルを適用するなど目的ごとにモデル構造を変化させる発展も望ましいであろう。パラメータの推定に関しては、Nested Logit モデルの各レベルの同時推定、さらには均衡フローとの同時推定の必要がある。

後者に関しては、収束の保証された推定アルゴリズムの開発が必要である。

統合モデルの各レベルをより精緻化する発展も望ましい。道路交通のモデルについて高速道路転換率モデル(松井, 藤田, 2000)^{450,451)}の組み込み, 鉄道のモデルについては, アクセス・イグレス手段選択モデル(吉田, 原田, 1996)⁴⁵²⁾の導入, 経路の途中での手段の変更の考慮(溝上, 河内, 2000)⁴⁵³⁾, などが挙げられる。これらは, すべて本研究の **Nested Logit** モデルのフレームと理論的な整合性・一貫性を保った形での展開が可能である。また, **Nested Logit** モデルの誤差項の仮定を一般化した **GEV** モデル系のモデル(**GNL** モデルなど)への発展もありうる(e.g. **Bekhor and Prashker, 2001**)⁴⁵⁴⁾。Closed form 形のモデルであれば, 等価な最適化問題が構築しやすいため均衡問題と整合的な展開が期待できる。

第3章 付録A 1 等価性の証明

式(3.14)の制約条件つき最適化問題が、式(3.1)~(3.13)の統合需要型ネットワーク均衡モデルと等価であることを証明しておこう。なお、土木学会(1998)⁴⁰³⁾には、本章のモデルを単純化したモデルについての証明がされているため、あわせて参照すると、理解が容易になると思われる。

まず、式(3.14a)の目的関数には、リンク交通量ベクトル \mathbf{x} が含まれているが、リンク交通量ベクトル \mathbf{x} は、式(3.14a)を用いて経路交通量ベクトル \mathbf{f} の関数として表現することができるので、目的関数も経路変数ベクトルで表現することしよう。そして次式のようにラグランジュ関数を設定する。

$$\begin{aligned}
 L(\mathbf{f}, \mathbf{q}, \mathbf{O}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\gamma}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\psi}) &= Z(\mathbf{f}, \mathbf{q}, \mathbf{O}) \\
 &+ \sum_{i,r} \lambda_r^i [N_r^i - (O_r^i + O_{r0}^i)] + \sum_{i,r} \mu_r^i \left(O_r^i - \sum_m O_r^{im} \right) + \sum_{i,r,m} \gamma_r^{im} \left(\sum_s O_r^{im} - q_m^{i,rs} \right) \\
 &+ \sum_{r,s,m} \eta_m^{rs} \left(q_m^{rs} - \sum_i q_m^{i,rs} \right) + \sum_{r,s,m} \psi_m^{rs} \left(q_m^{rs} - \sum_k f_{m,k}^{rs} \right)
 \end{aligned} \quad (3.16)$$

where

$$\begin{aligned}
 Z(\mathbf{f}, \mathbf{q}, \mathbf{O}) &= \sum_{m,a} \int_0^{x_a^m} t_a^m(\omega) d\omega + \sum_{r,s,m,k} \frac{1}{\theta_1^m} f_{m,k}^{rs} \ln(f_{m,k}^{rs} / q_m^{rs}) \\
 &+ \sum_{i,r,s,m} \frac{1}{\theta_2^{im}} q_m^{i,rs} \ln(q_m^{i,rs} / O_r^{im}) + \sum_{i,r,m} \frac{1}{\theta_3^i} O_r^{im} \ln(O_r^{im} / O_r^i) \\
 &+ \sum_{i,r} \frac{1}{\theta_4^i} [O_r^i \ln(O_r^i / N_r^i) + O_{r0}^i \ln(O_{r0}^i / N_r^i)] \\
 &+ \sum_{i,r,s,m} q_m^{i,rs} V_s^{im} + \sum_{i,r,m} O_r^{im} V_m^{ir} + \sum_{i,r} O_r^i [V_i^r + V_i(t)]
 \end{aligned} \quad (3.17)$$

Kuhn-Tucker 条件より以下が得られる。

$$f_{m,k}^{rs} \frac{\partial L}{\partial f_{m,k}^{rs}} = 0 \text{ and } \frac{\partial L}{\partial f_{m,k}^{rs}} \geq 0, \quad \forall r, s, m, k \quad (3.18)$$

$$q_m^{rs} \frac{\partial L}{\partial q_m^{rs}} = 0 \text{ and } \frac{\partial L}{\partial q_m^{rs}} \geq 0, \quad \forall r, s, m \quad (3.19)$$

$$q_m^{i,rs} \frac{\partial L}{\partial q_m^{i,rs}} = 0 \text{ and } \frac{\partial L}{\partial q_m^{i,rs}} \geq 0, \quad \forall i, r, s, m \quad (3.20)$$

$$O_r^{im} \frac{\partial L}{\partial O_r^{im}} = 0 \text{ and } \frac{\partial L}{\partial O_r^{im}} \geq 0, \quad \forall i, r, m \quad (3.21)$$

$$O_r^i \frac{\partial L}{\partial O_r^i} = 0 \text{ and } \frac{\partial L}{\partial O_r^i} \geq 0, \quad \forall i, r \quad (3.22)$$

$$O_{r0}^i \frac{\partial L}{\partial O_{r0}^i} = 0 \text{ and } \frac{\partial L}{\partial O_{r0}^i} \geq 0, \quad \forall i, r \quad (3.23)$$

and (3.14b)-(3.14f)

ここで,

$$\frac{\partial}{\partial f_{m,k}^{rs}} \sum_{m,a} \int_0^{x_a^m} t(\omega) d\omega = \frac{\partial}{\partial x_a^m} \left(\sum_{m,a} \int_0^{x_a^m} t(\omega) d\omega \right) \frac{\partial x_a^m}{\partial f_{m,k}^{rs}} = \sum_a t_a^m(x_a^m) \delta_{a,k}^{m,rs} = c_{k,m}^{rs} \quad (3.24)$$

が成立するため,

$$\frac{\partial L}{\partial f_{m,k}^{rs}} = c_{k,m}^{rs} + \frac{1}{\theta_1^m} (1 + \ln f_{m,k}^{rs} / q_m^{rs}) - \psi_m^{rs}, \quad \forall r, s, m, k \quad (3.25)$$

が得られる。また,

$$\frac{\partial L}{\partial q_m^{rs}} = -\frac{1}{\theta_1^m} + \eta_m^{rs} + \psi_m^{rs}, \quad \forall r, s, m \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_m^{i,rs}} = \frac{1}{\theta_2^m} (1 + \ln q_m^{i,rs} / O_r^{im}) + V_s^{im} - \gamma_r^{im} - \eta_m^{rs}, \quad \forall i, r, s, m \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial L}{\partial O_r^{im}} = -\frac{1}{\theta_2^{im}} + \frac{1}{\theta_3^i} (1 + \ln O_r^{im} / O_r^i) + V_m^{ir} - \mu_r^i + \gamma_r^{im}, \quad \forall i, r, m \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial L}{\partial O_r^i} = -\frac{1}{\theta_3^i} + \frac{1}{\theta_4^i} (1 + \ln O_r^i / N_r^i) + [V_i^r + V_i(t)] - \lambda_r^i + \mu_r^i, \quad \forall i, r \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial L}{\partial O_{r0}^i} = \frac{1}{\theta_4^i} (1 + \ln O_{r0}^i / N_r^i) - \lambda_r^i, \quad \forall i, r \quad (3.30)$$

となる。ここで, $f_{m,k}^{rs} = 0$ と仮定すると, 式(3.18)は, $\frac{\partial L}{\partial f_{m,k}^{rs}} \geq 0$ を意味するが,

$f_{m,k}^{rs} \rightarrow 0$ なら $\ln f_{m,k}^{rs} \rightarrow -\infty$ であるため, 式(3.25)より $\frac{\partial L}{\partial f_{m,k}^{rs}} < 0$ となり, 矛盾が生じ

る。したがって, $f_{m,k}^{rs} \neq 0$ である。同様に, $q_m^{rs}, q_m^{i,rs}, O_r^{im}, O_r^i, O_{r0}^i \neq 0$ が導ける。

したがって, (3.18)-(3.23)は,

$$\frac{\partial L}{\partial f_{m,k}^{rs}} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial q_m^{rs}} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial q_m^{i,rs}} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial O_r^{im}} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial O_r^i} = 0, \quad \frac{\partial L}{\partial O_{r0}^i} = 0 \quad (3.31)$$

となる。

以上を踏まえると、式(3.25), (3.31)より

$$c_{m,k}^{rs} + \frac{1}{\theta_1^m} (1 + \ln f_{m,k}^{rs} / q_m^{rs}) - \psi_m^{rs} = 0, \quad \forall r, s, m, k \quad (3.32)$$

が得られる。変形して,

$$f_{m,k}^{rs} = q_m^{rs} \exp(-\theta_1^m c_{k,m}^{rs}) \exp(\theta_1^m \psi_m^{rs} - 1), \quad \forall r, s, m, k \quad (3.33)$$

式(3.33), (3.14f)から

$$f_{m,k}^{rs} = q_m^{rs} \frac{\exp[-\theta_1^m c_{k,m}^{rs}]}{\sum_k \exp[-\theta_1^m c_{k,m}^{rs}]} \quad (3.34)$$

が得られる。式(3.34)を式(3.32)に代入すると,

$$c_{m,k}^{rs} + \frac{1}{\theta_1^m} \left(1 + \ln \frac{\exp[-\theta_1^m c_{k,m}^{rs}]}{\sum_k \exp[-\theta_1^m c_{k,m}^{rs}]} \right) - \psi_m^{rs} = 0 \quad (3.35)$$

$$\frac{1}{\theta_1^m} - \frac{1}{\theta_1^m} \ln \sum_k \exp[-\theta_1^m c_{k,m}^{rs}] - \psi_m^{rs} = 0 \quad (3.36)$$

ここで,

$$S_{rs}^m = -\frac{1}{\theta_1^m} \ln \sum_k \exp[-\theta_1^m c_{k,m}^{rs}] \quad (3.37)$$

とおくと,

$$\psi_m^{rs} = S_{rs}^m + \frac{1}{\theta_1^m} \quad (3.38)$$

となる。式(3.38), (3.26), (3.31)より

$$\eta_m^{rs} = -S_{rs}^m \quad (3.39)$$

が得られる。式(3.27), (3.31), (3.39)より

$$\frac{1}{\theta_2^{im}} (1 + \ln q_m^{i,rs} / O_r^{im}) + V_s^{im} - \gamma_r^{im} + S_{rs}^m = 0, \quad \forall i, r, s, m \quad (3.40)$$

が得られ, 今までと同様に式(3.14d)を用いると,

$$q_m^{i,rs} = O_r^{im} \frac{\exp[-\theta_2^{im} (V_s^{im} + S_{rs}^m)]}{\sum_s \exp[-\theta_2^{im} (V_s^{im} + S_{rs}^m)]} \quad (3.41)$$

が得られ, 式(3.41)を(3.27)に代入すると,

$$\frac{1}{\theta_2^{im}} \left(1 + \ln \frac{\exp[-\theta_2^{im} (V_s^{im} + S_{rs}^m)]}{\sum_s \exp[-\theta_2^{im} (V_s^{im} + S_{rs}^m)]} \right) + V_s^{im} + S_{rs}^m - \gamma_r^{im} = 0 \quad (3.42)$$

$$\gamma_r^{im} = \frac{1}{\theta_2^{im}} \left(1 - \ln \sum_s \exp[-\theta_2^{im} (V_s^{im} + S_{rs}^m)] \right) \quad (3.43)$$

が得られる。ここで、

$$S_m^{ir} = -\frac{1}{\theta_2^{im}} \ln \sum_s \exp[-\theta_2^{im} (V_s^{im} + S_{rs}^m)] \quad (3.44)$$

とおけば、

$$\gamma_r^{im} = \frac{1}{\theta_2^{im}} + S_m^{ir} \quad (3.45)$$

が導ける。式(3.45)を式(3.28), (3.31)に代入すると、

$$\frac{1}{\theta_3^i} (1 + \ln O_r^{im} / O_r^i) + V_m^{ir} - \mu_r^i + S_m^{ir} = 0, \quad \forall i, r, m \quad (3.46)$$

であり、今までと同様に式(3.14c)を用いると、

$$O_r^{im} = O_r^i \frac{\exp[-\theta_3^i (V_m^{ir} + S_m^{ir})]}{\sum_m \exp[-\theta_3^i (V_m^{ir} + S_m^{ir})]} \quad (3.47)$$

が得られ、式(3.47)を式(3.28), (3.31)に代入することで、

$$\frac{1}{\theta_3^i} \left(1 + \ln \frac{\exp[-\theta_3^i (V_m^{ir} + S_m^{ir})]}{\sum_m \exp[-\theta_3^i (V_m^{ir} + S_m^{ir})]} \right) + V_m^{ir} - \mu_r^i + S_m^{ir} = 0 \quad (3.48)$$

となり、

$$S_r^i = -\frac{1}{\theta_3^i} \ln \sum_m \exp[-\theta_3^i (V_m^{ir} + S_m^{ir})] \quad (3.49)$$

とおけば、

$$\mu_r^i = S_r^i + \frac{1}{\theta_3^i} \quad (3.50)$$

が導ける。式(3.50)を式(3.29), (3.31)に代入すると、

$$\frac{1}{\theta_4^i} (1 + \ln O_r^i / N_r^i) + [V_i^r + V_i(t)] - \lambda_r^i + S_r^i = 0, \quad \forall i, r \quad (3.51)$$

$$O_r^i = N_r^i \exp[-\theta_4^i (V_i^r + V_i + S_r^i)] \exp(-\theta_4^i \lambda_r^i - 1) \quad (3.52)$$

が得られる。一方、式(3.30)より

$$O_{r0}^i = N_r^i \exp(-\theta_4^i \lambda_r^i - 1) \quad (3.53)$$

が得られる。式(3.14b)より $O_r^i + O_{r0}^i = N_r^i$, $\forall i, r$ であるから、式(3.52), (3.53)の両辺

の和を取ると、

$$1 = (\exp[-\theta_4^i(V_i^r + V_i + S_r^i)] + 1) \exp(-\theta_4^i \lambda_r^i - 1) \quad (3.54)$$

が得られ、

$$O_r^i = N_r^i \frac{\exp[-\theta_4^i \{V_i^r + V_i(t) + S_r^i(t)\}]}{1 + \exp[-\theta_4^i \{V_i^r + V_i(t) + S_r^i(t)\}]} \quad (3.55)$$

が導ける。

以上で、式(3.14)の制約条件つき最適化問題が、式(3.1)~(3.13)の統合需要型ネットワーク均衡モデルと等価であることを証明された。本章以降で示されるモデルは、本章のモデルの簡単な改良モデルか、変数の一部を定数とにおいて得られるものであるため、以上と同様にして等価性が証明できる。

第3章 付録A2 ゾーンシステム・ネットワーク

本章および本研究全般のモデルで利用する東京都市圏を対象とした交通ネットワーク、ゾーン図を以下に示しておく。

なお、ここに示したのは適用年次時点でのネットワークである。その年次以降に開業した鉄道新線、新規高速道路などは含まれてはいない。ただし、別途それら新規路線を表現したネットワークも作成しているため、それらの開業効果などを計測することは可能となっている。

これらの空間情報はすべて緯度経度情報をベースとして構築されているため、任意のGISソフトウェアで表示、加工することは容易である。

図-3.7は、今回利用したゾーンシステムである平成10年度東京都市圏パーソントリップ調査中ゾーンを示している。

図-3.8は、道路ネットワークである。都心から40km以降の地域についてはネットワークの簡略化をおこなっており、演算時間の短縮化を図っている。

図-3.9は、鉄道ネットワークであり、都心の詳細部については、図-3.10に示す。今回の適用においては、各駅停車、急行など列車種別は区別していない。

図-3.11は、都心部について、道路と鉄道のネットワークを重ねて表示したものである。

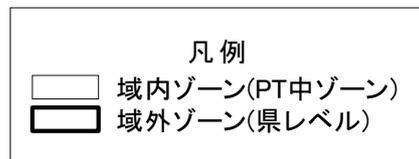
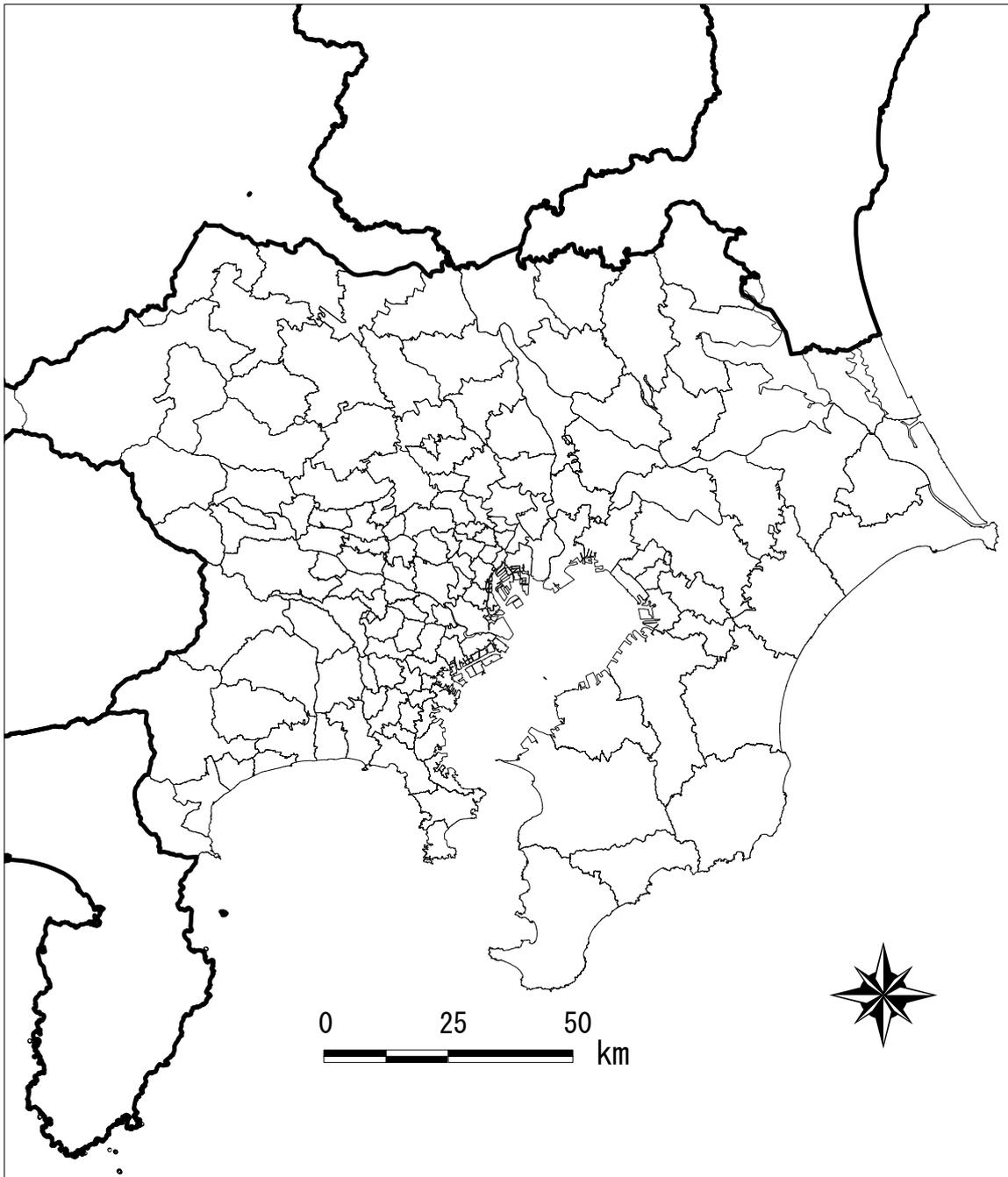


図-3.7 ゾーンシステム

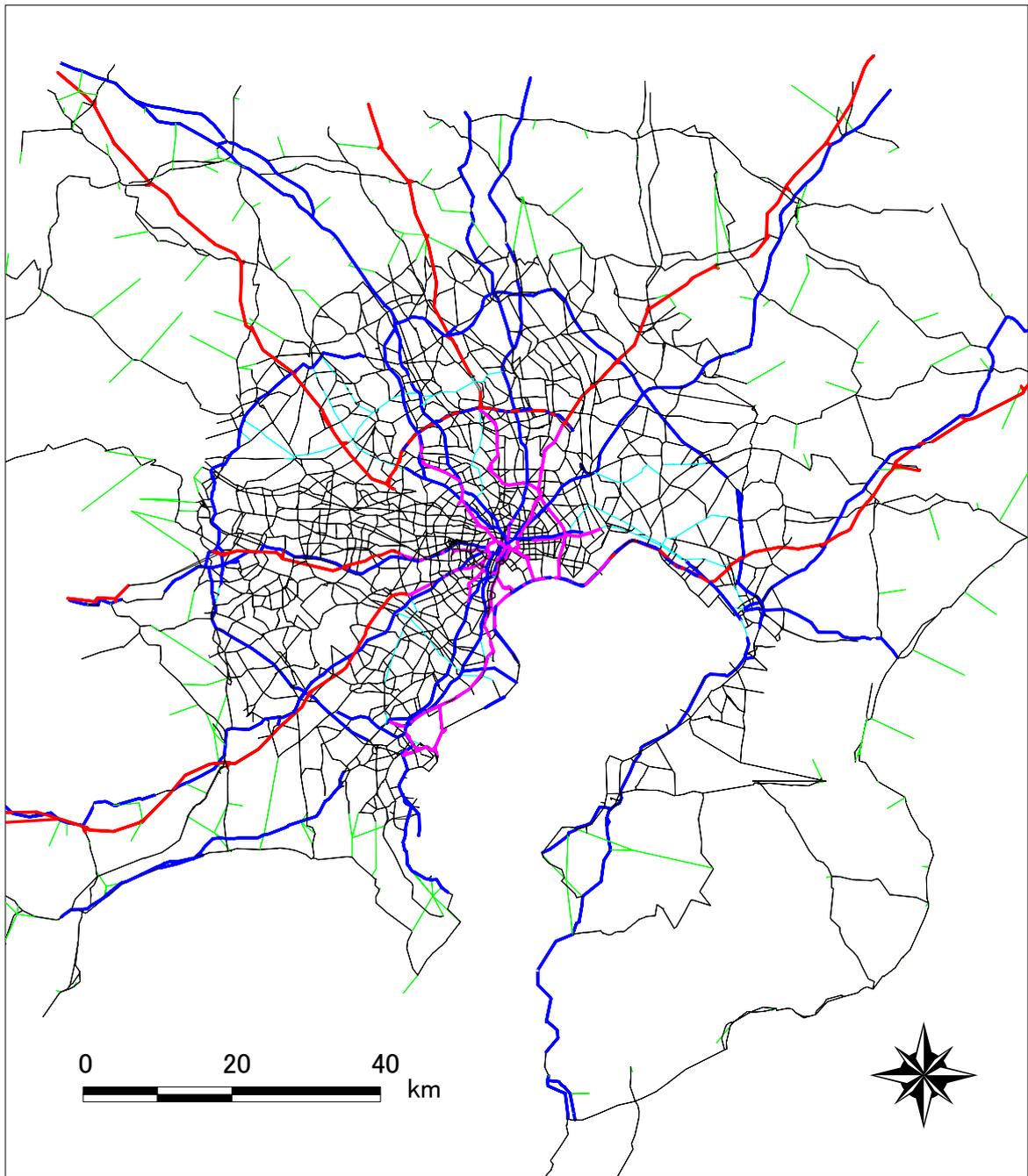
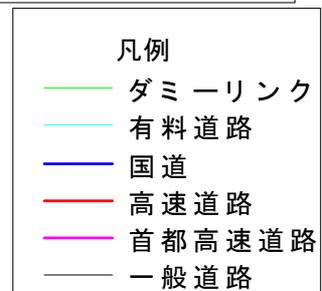


図-3.8 対象道路ネットワーク



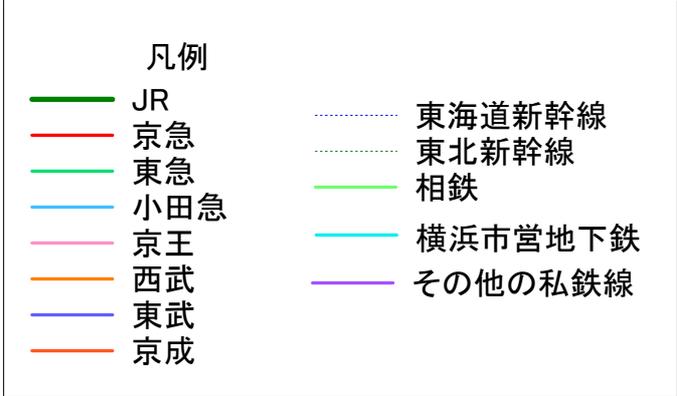
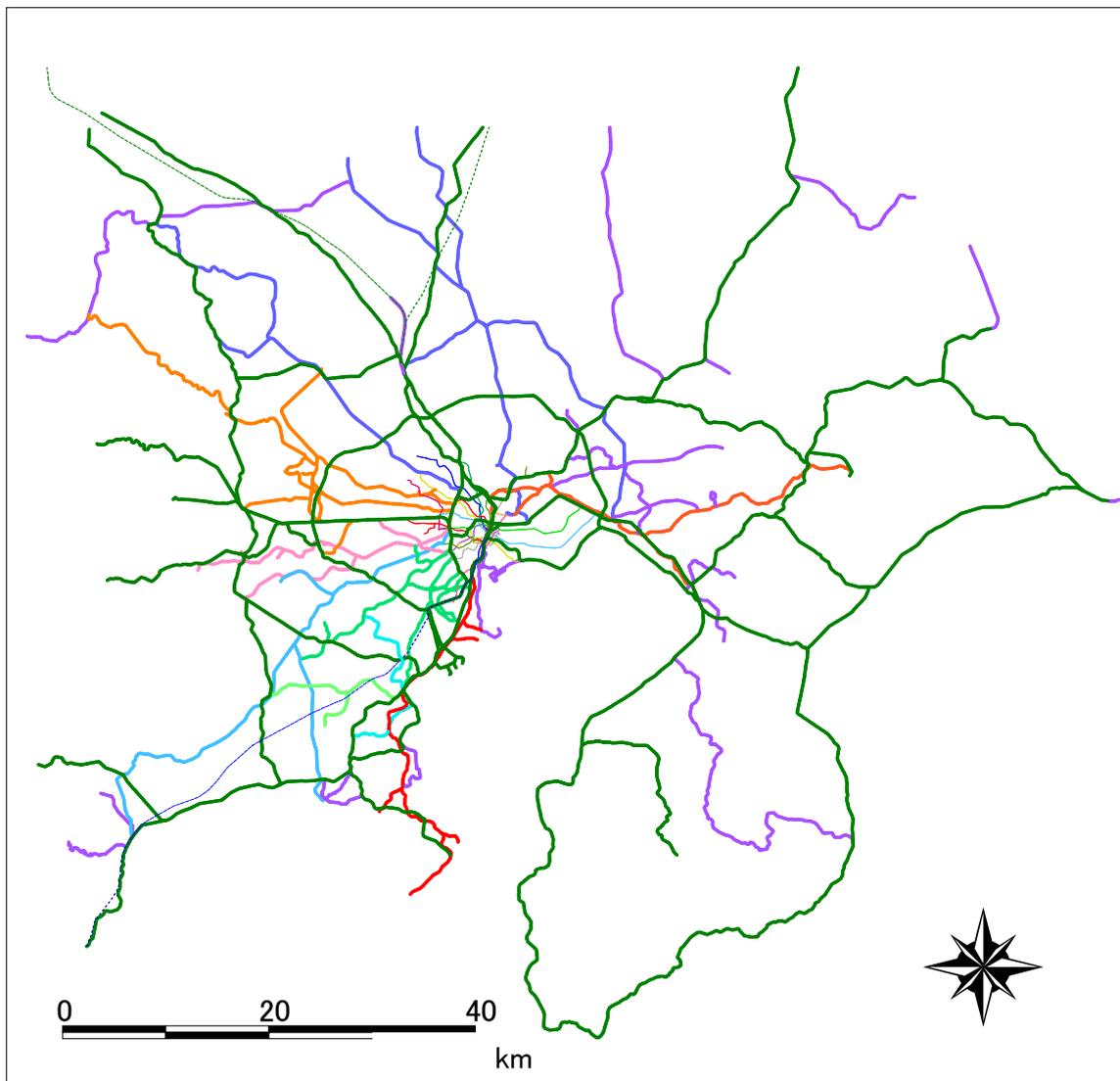


図-3.9 対象鉄道ネットワーク(広域縮尺)

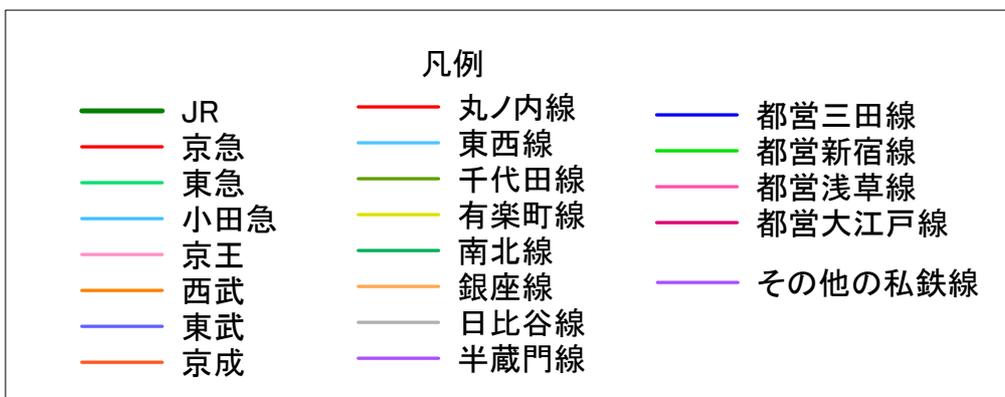
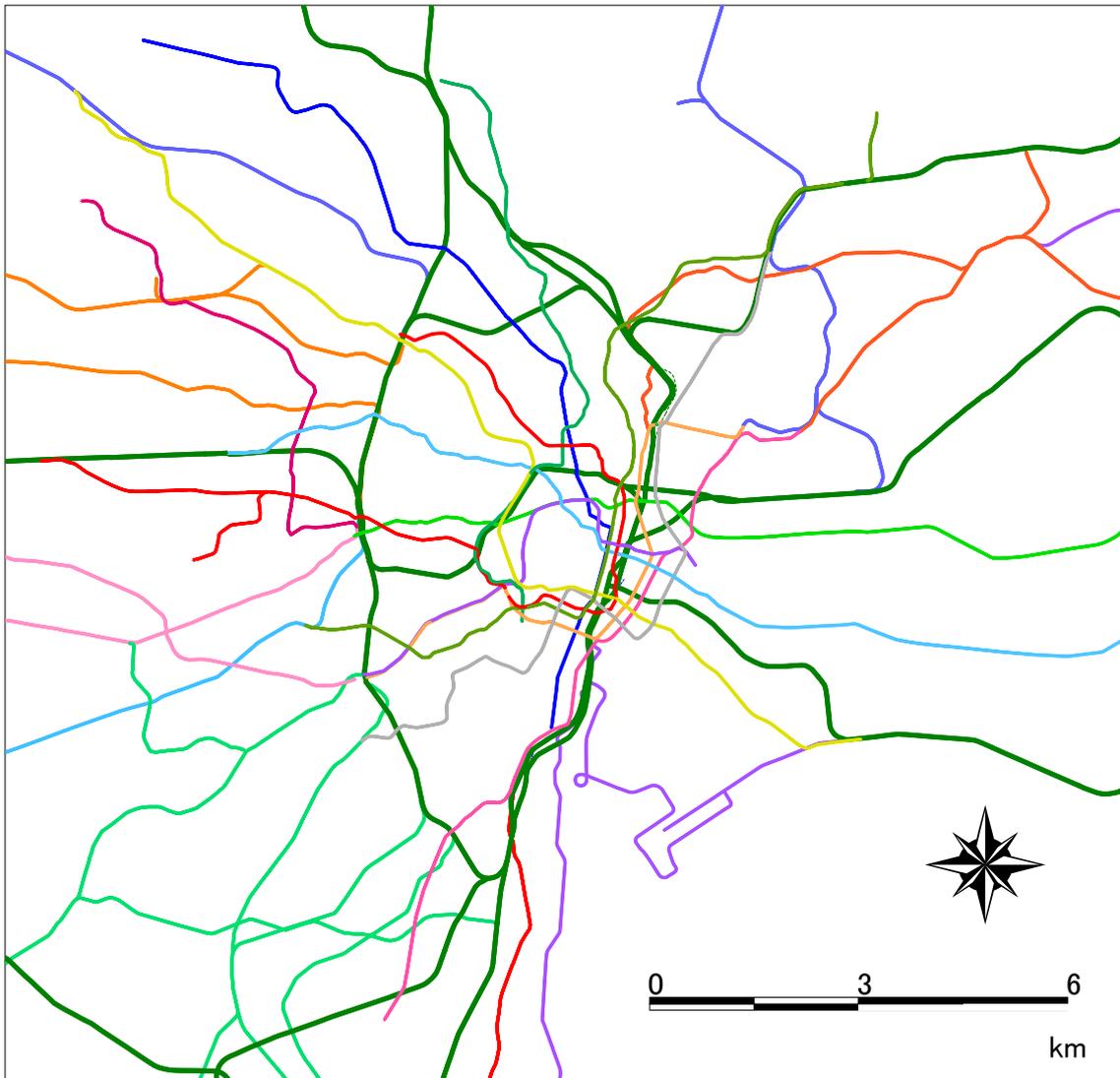


図-3.10 対象鉄道ネットワーク(都心拡大)



図-3.11 都心部多手段ネットワークの重ね合わせ表示

第4章 誘発交通を考慮した混雑地域における道路整備の利用者便益推定

4.1 はじめに

混雑した地域における道路投資の有効性と関連して、「誘発交通問題」として知られる問題点が古くから指摘され、議論がなされてきた。すなわち、混雑緩和を目的として道路などの交通施設整備を行うと、新たな交通需要を誘発し、結局混雑緩和にはつながらないという議論である。これらの議論の土台となるべき論理性をもった科学的分析手法、すなわち誘発交通を考慮した交通需要予測・便益評価手法の開発は、急務の課題といえる。

道路整備により自動車利用のアクセシビリティが増加すると、利用者は、鉄道から自動車利用へ手段の変更、目的地の変更、トリップ頻度の増加といった行動変化をとる可能性がある。道路交通における誘発交通の分析手法には、以上のような利用者の行動変化を記述しつつ、道路混雑も的確に表現するモデルが必要とされる。

我が国の実務においては、四段階推定法が需要予測手法として広く用いられてきた。この手法は道路整備によるサービスレベル向上の影響が、発生・分布・分担段階に及ばない形式となっており、実務における誘発交通の取り扱いは極めて不十分なものである。

一方、学術研究分野では、非集計モデルを代表とした個人の交通行動に関する研究が盛んに行われ、誘発交通の具体的な中身となる利用者の個々の行動変化については、詳細なモデルが数多く構築され、交通行動に関する知見の蓄積がなされている。しかしながら、これらのモデルは、道路交通における誘発交通の議論では必須となる道路混雑現象との整合性への配慮が不十分である。

以上の背景を踏まえ本章の主な目的は、次のようになる。

(1) 混雑地域における誘発交通を考慮した需要予測モデルの要件をまとめた上で、既存のモデルをレビューし、その中でネットワーク統合モデルは誘発交通の評価モデルとして適切な性質を持つことを示す。

(2) 経済理論に基づいたネットワーク統合モデルの定式化を行い、モデルと整合的な便益評価指標を示す。

(3) 利用する便益指標は、セカンド・ベストの経済となる現実都市の便益評価における留意点を踏まえた経済学的に問題のない指標であることを、モデルに供給者の行動と料金形成原理を含めた枠組みを用いて確認する。

(4) ネットワーク統合モデルを用いた現実の都市圏における誘発交通を考慮した道路投資の便益評価の実例を示し、誘発交通を無視することによる便益評

価のバイアスの存在とその性質を実証的に明らかにする。

本章では、具体的には、マルチクラス Nested Logit 型ネットワーク統合均衡モデルを用いて、東京都市圏において現実に計画されている環状道路の新規整備による交通状況の変化予測、利用者便益の推定例を示す。従来用いられてきた固定需要型のモデルでは、誘発交通の一部が無視されているため、利用者便益の推定値に歪みが生じることが一般に知られている(太田, 1997; Williams and Moore, 1990; Coombe, 1996)^{455), 456), 457)}。本研究は、これらを実証的に検証することを試みるものであり、研究の社会的意義は大きい。

以下、4.2 においては、既存モデルのレビューを、4.3 では、本章で用いるモデルの定式化を行う。4.4 では、4.3 のモデルに供給者の行動等を含めた枠組みにおける議論から、本章のモデルから求まる便益計測指標がセカンド・ベスト下の便益評価における留意点を踏まえた経済学的にも問題のない指標であることを示す。4.5 では、東京都市圏を対象としてモデルの適用を行い、誘発交通を考慮する場合の便益計測の実例、誘発交通を無視した場合の便益評価のバイアスとその性質を実証的に明らかにする。最後に4.6 で本章の成果を取りまとめる。

4.2 誘発交通関連のレビューと本章の方針

本章では、混雑地域における誘発交通を考慮した需要予測モデルの要件を整理し、その観点から既存のモデルをレビューする。英国における誘発交通関連の文献は室町ら(1997)^{458), 459)}により、米国における文献は北村(1996)⁴⁶⁰⁾、兵藤(1998)⁴⁶¹⁾により紹介されている。我が国においても誘発交通を考慮した需要推計手法の検討が始められた段階にある(国土交通省, 2002)⁴⁶²⁾。本章では、より最新の研究事例の紹介を含めた整理を試みる。

4.2.1 誘発交通問題のモデル化に必要な要件

混雑地域における「誘発交通問題」とは、道路整備により自動車の利便性が向上し、新たな需要が創出され、道路整備効果が打ち消されるとされる問題である。この問題に関連しては誘発交通そもそもの定義、測定単位といった基本的な事項に関してもさまざまな議論がある(Abelson and Hensher, 2001)⁴⁶³⁾。

表-4.1 は、誘発交通の要因として一般に知られる代表的な行動変化例をまとめている(Hills, 1996; DeCorla-Souza, 2000)^{464), 465)}。これら各要因に起因した誘発交通は、計測単位に応じて(例えば台キロ, トリップ数), 定量的に把握可能なもの、

不可能なものに分類される⁴⁶²⁾。また、短期的な変化、長期的な変化という分類も可能である(Lee, *et al.*, 1999)⁴⁶⁶⁾。なお、経路、手段の変更などに起因する交通量変化は転換交通と呼ばれる場合もあるが、本研究における誘発交通とはそれらを含めた広義のものとする。

表-4.1 誘発交通の代表的要因

要因	具体的な行動変化例
経路の変更	改良された道路を利用するように変更
手段の変更	鉄道・バスなどから自動車利用へ
目的地の変更	遠距離の商業施設への買い物トリップ
トリップ発生	移動頻度増, 新規移動の発生
出発時刻変更	混雑が緩和された時間帯に出発時刻を変更
乗車人員削減	相乗りの取りやめ
開発交通	社会経済活動の変化による立地変更

さて、混雑地域における誘発交通を評価するためのモデルの要件について議論しよう。表-4.1に挙げた要因は道路のサービスレベルの変化に対する利用者の行動変化であるとまとめられ、このモデル化を行うことが必要となる。道路のサービスレベルは、混雑現象、すなわち利用者の行動変化の集積によって変化するため、これらの相互干渉を記述することも必要になる。まとめると、混雑地域における誘発交通を明示した需要予測モデルに必要なものは、

- ・ 利用者の行動記述
- ・ 混雑現象の記述
- ・ 上記2つの整合性(均衡状態の算出)

以上、3点に集約される。そして、これらのバランスの取れたモデルが必要となる。この3つの要件の観点で、既存のモデルをレビューしよう。

4.2.2 既存モデルのレビュー

4.2.2.1 マクロ計量モデル

誘発交通の存在を統計的に検証することを主な目的として、第2章でも紹介したように都市圏の乗用車走行台キロを道路延長、道路容量で説明する種類の集計モデルの研究が数多く行われている(Barr, 2000; Noland and Lem, 2002; Mokhtarian, *et al.* 2002; Cervero and Hansen, 2002; Cervero; 2003)^{467),468),469),470),471)}。

これらのモデルは、道路建設がシステム全体へ与える集計的效果を把握するには有益であるが、モデルに利用者の行動が反映されていないなど、先の3つの要件は満たされず、需要予測・便益評価に直接利用可能なものではない。

4.2.2.2 四段階推定法とその改良法

旧来の四段階推定法は、利用者の行動原理が不明確であり、配分段階において混雑を考慮したモデルが用いられる場合も、通常その結果が発生・分布・分担段階へフィードバックされていない。表-4.1の分類では、経路の変更による誘発交通のみを考慮可能なものであり、それ以外の要因による誘発交通は全く無視されている。言い換えると、四段階推定法を一つのモデルとしてとらえた場合、分布、分担段階におけるOD所要時間と配分結果のOD所要時間が一致しておらずモデル内部の不整合性が生じている。配分結果がフィードバックされる改良法についても、その収束性の問題、行動原理の不明さの問題は残される。つまり、先の3つの要件のうち、行動記述、整合性の2点で問題がある。

4.2.2.3 非集計行動モデルの応用

利用者の行動記述の観点では、個人の行動を直接モデル化する作業が有効である。この個人の行動モデル研究は膨大な量になるが、特に、本章の誘発交通推定の関連では、室町ら(1997)⁴⁵⁸⁾、上田ら(2000)⁴⁷²⁾のモデルが参考になる。ただし、それらのモデルにおいて、混雑現象は扱われていない。また、藤井ら(1997)⁴⁷³⁾による構造方程式モデルも提案されているが、同様な問題点が残される。

この問題に対し、個人行動モデルに立脚し、混雑との相互干渉を考慮する目的で、個人行動のマクロシミュレーションと動的なフローモデルを組み合わせたシステムが提案されている(北村, 森川, 2002)⁴⁷⁴⁾。このシステムでは、生活・交通行動を詳細に表現したモデルと、動的な交通流シミュレータとの繰り返し計算により近似的な整合性を保つことが試みられている。派生需要である交通行動の根源の生活行動を含めたモデリングが可能であることで、このシステムは、一見誘発交通を議論するのに最も有望と思える。しかしながら、既存のモデルが誘発交通を扱っていない一番の根源は、利用者の行動と混雑現象の記述の不整合性にあり、この解決法をヒューリスティックな繰り返し近似計算に依存している点では、問題が残される。すなわち、これらのモデルは、先の3つの要件のうち行動記述には優れるが、整合性の問題は依然存在している。

4.2.2.4 ネットワーク統合モデル

モデル内部の整合性に最も注意を傾けてきた研究分野の一つは、ネットワーク均衡分析(土木学会, 1998)⁴⁷⁵⁾である。そこでは、モデルの解の一意性の検討、収束の保証された効率的なアルゴリズムの開発も盛んに行われてきた。主に、配分分析のみを対象としていたモデルを拡張して、行動理論に立脚して、四段階推定法の各段階の不整合性を解消するモデルも理論的に完成されている(宮城、加藤; 1984)⁴⁷⁶⁾。また、便益評価との整合性の面でも優れている。ただし、モデル内部の整合性を堅持するために、利用者の行動モデルは、合理的行動を基本とした単純なものに限られるという限界がある。しかし、この限界は利用者の属性でクラス分けしたモデル化(Florian, *et al.*, 2002; Boyce and Bar-Gera, 2001, 2003)^{477),478),479)}などの改良で対応可能である。したがって、このモデルは先の3つの要件をバランスよく満たしているといえる。

4.2.3 本章の方針

本研究では、これらのレビューを踏まえ、4.2.2.4で述べたネットワーク統合モデルを利用することとする。このモデルは、誘発交通を考慮するのに必要なモデルの要件を満たし、さらに既存の固定OD表を所与としたモデルを特殊例として含むため、既存のモデルとの比較も容易であるという特徴がある。本研究では、この統合モデルと既存のモデルを用いて、誘発交通を考慮することによる交通状況の変化、便益推定値の変化について考察する。

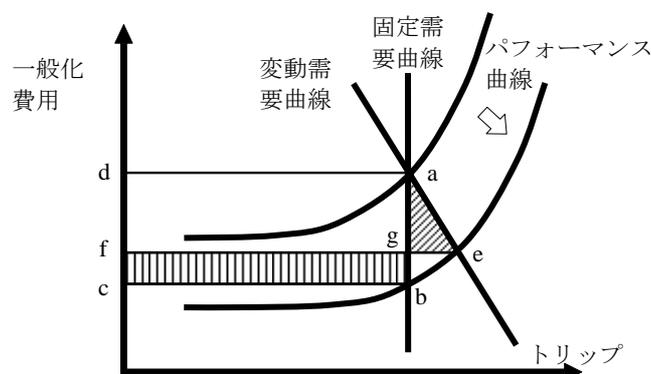


図-4.1 誘発交通の有無と利用者便益

ところで、誘発交通を無視することによる便益評価の歪みについては、

Williams らによる単一リンクを対象とした研究(Williams and Moore, 1990; Williams and Lam, 1991; Williams and Yamashita, 1992)^{456), 480), 481)}が明快な考察を加えている。この考察は、広く知られたもので第2章でも紹介したが、本章での分析結果との比較の際に特に有用であるので、ここで多少詳しく述べておく。図-4.1において、道路投資は、パフォーマンス関数の右下への移動として表現され、誘発交通を無視した固定需要曲線を想定する場合、均衡点は $a \rightarrow b$ への移動、誘発交通を考慮する変動需要曲線では、 $a \rightarrow e$ への移動で表現される^{vi)}。消費者余剰の考え方による利用者便益はそれぞれ長方形 $abcd$ と台形 $aefd$ の面積で与えられる。これらの面積の差(図の線がけ部の面積の差分)が、誘発交通を考慮しないことによる便益推定値のバイアスとなる。したがって、需要曲線が弾力的な場合、また投資後の均衡点がパフォーマンス曲線が急激に立ち上がる容量付近にある場合、誘発交通を無視すると利用者便益は、過大推計される傾向にあるといえる(太田, 1997; DeCorla-Souza and Cohen, 1999)^{455), 482)}。また、均衡点が混雑が発生していないパフォーマンス曲線が水平になるところにある場合、便益は過小推計されることになる。この分析は単一手段・単一リンクを対象としたモデルであるが、このモデルをネットワークを対象に拡張したモデルがネットワーク統合モデルといえる。

最も単純なネットワーク統合モデルは、Beckmann 型の OD ペアごとに需要関数を設定するモデルであり、このモデルを用いた誘発交通の議論もされている(Williams, *et al.*, 2001)^{483), 484)}。ただし、この場合、需要関数の弾力性パラメータは、表-4.1 にまとめた、さまざまな行動変化を合成して表現していると解釈される値となり、その値を行動原理に基づいたモデルから設定することが難しい。本研究では、表-4.1 の行動変化のいくつかを明示的に表現したネットワーク統合モデルを用いる。この種類のネットワーク統合モデルを利用し、大規模な現実の都市圏における道路整備による誘発交通推定と便益評価を実際に行った研究例は、見あたらない。

4.3 マルチクラス Nested Logit 型ネットワーク統合均衡モデルの定式化

ここでは、本研究で用いるマルチクラス Nested Logit 型ネットワーク統合モデルについて述べる。以下、このモデルを単に統合モデルと呼び、四段階推定法における固定 OD 表を所与とした旧来の配分モデルを固定需要モデルと呼称す

^{vi)} この図において、簡単のため道路投資による需要曲線自体のシフトは考えていない。考える場合は第2章を参照。

ることにしよう．固定需要モデルにおいては，誘発交通は，表-4.1 の分類では経路の変更起因するもののみが扱われていたが，この統合モデルでは，経路/手段/目的地の変更とトリップ新規発生に起因する誘発交通も考慮可能である．

4.3.1 代表的個人の行動

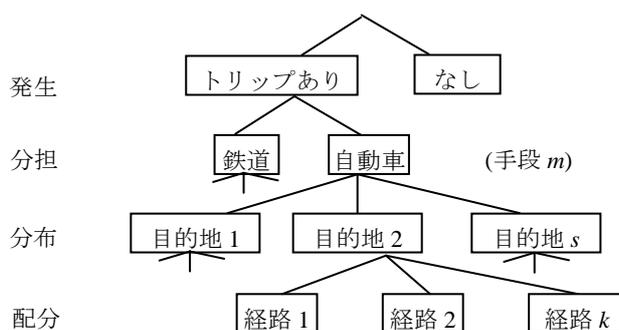


図-4.2 Nested Logit 型の選択構造

統合モデルの定式化の詳細，解法は，第3章⁴⁸⁵⁾と同様であるので，本章では，概略を述べるにとどめる．なお，第3章では，配分レベルにおいては単一の利用者属性を仮定したモデルを提示したが，本章では，配分レベルにも複数の利用者属性を想定したより一般的なモデルを提示しておく．また，便益評価との関連を明確にするために代表的個人の効用最大化行動からモデルを導くことにする．

代表的個人の行動に図-4.2のようなNested Logit型の確率的な選択行動を仮定する．この際に，よく知られているように適切な定式化を行うことで需要予測と便益評価および経済理論との整合性を取ることができる．また，本章ではトリップ目的別のモデルを意図して代表的個人をクラス分けしてモデル化する．利用者クラス*i*の代表的個人の直接効用関数 U_i を次のように定める．

$$U_i = - \sum_{r,s,m,k} \tau^i f_{m,k}^{i,rs} t_{m,k}^{rs*} + u_i(\mathbf{f}, \mathbf{q}, \mathbf{O}) + z_i \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned}
 u_i(\mathbf{f}, \mathbf{q}, \mathbf{O}) = & - \sum_{r,s,m,k} \frac{1}{\theta_1^{im}} f_{m,k}^{i,rs} \ln(f_{m,k}^{i,rs} / q_m^{i,rs}) \\
 & - \sum_{r,s,m} \frac{1}{\theta_2^{im}} q_m^{i,rs} \ln(q_m^{i,rs} / O_r^{im}) - \sum_{r,m} \frac{1}{\theta_3^i} O_r^{im} \ln(O_r^{im} / O_r^i) \\
 & - \sum_r \frac{1}{\theta_4^i} [O_r^i \ln(O_r^i / N_r^i) + O_{r0}^i \ln(O_{r0}^i / N_r^i)] \\
 & - \sum_{r,s,m} q_m^{i,rs} C_s^{im} - \sum_{r,m} O_r^{im} C_m^{ir} - \sum_r O_r^i C_r^i
 \end{aligned} \tag{4.2}$$

予算制約式は,

$$\sum_{r,s,m,k} p_{m,k}^{rs} f_{m,k}^{i,rs} + z_i = y_i \tag{4.3}$$

であり、交通量の保存式は以下のようなになる。

$$\begin{aligned}
 O_r^i + O_{r0}^i &= N_r^i, \quad \sum_m O_r^{im} = O_r^i, \quad \sum_s q_m^{i,rs} = O_r^{im}, \\
 \sum_k f_{m,k}^{i,rs} &= q_m^{i,rs}, \quad x_a^m = \sum_{r,s,k} \delta_{a,k}^{m,rs} f_{m,k}^{i,rs}, \quad x_a^m = \sum_i x_a^{im}, \\
 x_a^m &\geq 0, x_a^{im} \geq 0, f_{m,k}^{i,rs} \geq 0, q_m^{i,rs} \geq 0, O_r^{im} \geq 0, O_r^i \geq 0, O_{r0}^i \geq 0
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

ここで、ODペア rs の手段 m の経路 k の均衡時における所要時間を $t_{m,k}^{rs*}$ 、価格(料金)を $p_{m,k}^{rs}$ とする。 z_i は、代表的個人の交通以外の財の消費を表現する合成財(価格を1に基準化)、 y_i は代表的個人の所得、 τ^i は、利用者クラス i の時間価値である。また、手段 m リンク a におけるクラス別リンク交通量 x_a^{im} 、クラス合計のリンク交通量 x_a^m 、リンクコスト関数 $t_a^m(\cdot)$ 、料金 p_a^m 、リンク経路接続行列 $\delta_{a,k}^{m,rs}$ 、手段別経路交通量 $f_{m,k}^{i,rs}$ 、手段別 OD 交通量 $q_m^{i,rs}$ 、手段別発生交通量 O_r^{im} 、発生交通量 O_r^i 、利用者クラス i のトリップ発生要因の人口指標 N_r^i 、対象時間帯にトリップを行わない利用者数 O_{r0}^i とする。 $\theta_1^m, \theta_2^{im}, \theta_3^i, \theta_4^i$ はパラメータ、 $C_s^{im}, C_m^{ir}, C_r^i$ は、各選択レベルに対応する固有の非効用項である。

代表的個人の交通行動は、次の効用最大化問題として定式化される。

$$V_i = \max. U_i \tag{4.5}$$

subject to (4.3), (4.4)

ここで、 V_i は利用者クラス i の間接効用関数である。この最適化問題を解くと、図-4.2 の構造の以下の Nested Logit モデルが導出される^{vii)}。

$$f_{m,k}^{i,rs} = \frac{\exp[-\theta_1^{im} (\tau^i t_{k,m}^{rs*} + p_{k,m}^{rs})]}{\sum_k \exp[-\theta_1^{im} (\tau^i t_{k,m}^{rs*} + p_{k,m}^{rs})]} q_m^{i,rs} \tag{4.6a}$$

vii) 具体的には、第3章付録A 1 とほぼ同様にして導出できる。

$$q_m^{i,rs} = \frac{\exp[-\theta_2^{im}(C_s^{im} + S_{rs}^{im})]}{\sum_s \exp[-\theta_2^{im}(C_s^{im} + S_{rs}^{im})]} O_r^{im} \quad (4.6b)$$

$$O_r^{im} = \frac{\exp[-\theta_3^i(C_m^{ir} + S_m^{ir})]}{\sum_m \exp[-\theta_3^i(C_m^{ir} + S_m^{ir})]} O_r^i \quad (4.6c)$$

$$O_r^i = \frac{\exp[-\theta_4^i(C_r^i + S_r^i)]}{1 + \exp[-\theta_4^i(C_r^i + S_r^i)]} N_r^i \quad (4.6d)$$

ここで、各レベルの期待最小費用は以下のようになる。

$$S_{rs}^{im} = -\frac{1}{\theta_1^{im}} \ln \sum_k \exp[-\theta_1^{im}(\tau^i t_{k,m}^{rs*} + p_{k,m}^{rs})] \quad (4.7a)$$

$$S_m^{ir} = -\frac{1}{\theta_2^{im}} \ln \sum_s \exp[-\theta_2^{im}(C_s^{im} + S_{rs}^{im})] \quad (4.7b)$$

$$S_r^i = -\frac{1}{\theta_3^i} \ln \sum_m \exp[-\theta_3^i(C_m^{ir} + S_m^{ir})] \quad (4.7c)$$

以上のように、Nest 型のモデルを数理最適化問題から導く方法については、Brice (1989)⁴⁸⁶⁾、宮城(1995)⁴⁸⁷⁾、Verboven (1996)⁴⁸⁸⁾、Oppenheim (1995)⁴⁸⁹⁾などにも見られる。本章の意義は、その数理最適化問題と経済モデルにおける効用最大化問題との関係を明確化したことにある。なお、Oppenheim (1995)⁴⁸⁹⁾のモデルの持つ問題点については後述する。

4.3.2 行動モデルと整合的な便益指標と均衡解の算出法

式(4.6)、(4.7)を式(4.1)の直接効用関数に代入すると、以下の準線形型の間接効用関数 V_i が得られる。

$$V_i = y_i + \sum_r \frac{1}{\theta_4^i} \left[N_r^i \ln \{1 + \exp[-\theta_4^i(C_r^i + S_r^i)]\} \right] \quad (4.8)$$

ここで、発ゾーン、クラスごとの期待最大効用

$$\tilde{S}_r^i = \frac{1}{\theta_4^i} \ln \{1 + \exp[-\theta_4^i(C_r^i + S_r^i)]\} \quad (4.9)$$

と置けば次式が得られる。

$$V_i = y_i + \sum_r N_r^i \tilde{S}_r^i \quad (4.10)$$

交通投資の前後で、この効用値を比較することで、投資の利用者便益 UB (消費者余剰の変化 MD 、今回は EV, CV と同値) を次のように求めることができる。

$$UB = \sum_{i,r} N_r^i (\tilde{S}_r^{i,with} - \tilde{S}_r^{i,without}) \quad (4.11)$$

ここで、*with* を投資後、*without* を投資前を示す添字とする。なお、Oppenheim のテキスト⁴⁸⁹⁾においては、上式と若干異なる便益指標が示されているが、経済理論と整合的なモデルを用いている点で、上式の利用が望ましいといえる(第4章付録A1参照)。なお、式(4.7a)の値は、Akamatsu(1997)⁴⁹⁰⁾によって示された方法を用いれば、経路列挙を行わずに算出が可能である。結局、大規模なネットワークにおいても \tilde{S}_r^i の値を算出するのは容易である。

また、式(4.11)では、利用者便益が起点ゾーン別に集計されて算出されるが、より細かい分析単位、すなわち OD 別、手段別に求めるという要求もあろう。この場合の利用者便益 UB は、次式を用いればよい。

$$\begin{aligned} UB &= \int_{\tilde{S}_r^{i,without}}^{\tilde{S}_r^{i,with}} \sum_{i,r} N_r^i d\tilde{S}_r^i = - \int_{S_{rs}^{im,without}}^{S_{rs}^{im,with}} \sum_{irms} q_m^{i,rs} (S_{rs}^{im}) dS_{rs}^{im} \\ &\cong \frac{1}{2} \sum_{irms} (q_m^{i,rs,with} + q_m^{i,rs,without}) (S_{rs}^{im,without} - S_{rs}^{im,with}) \end{aligned} \quad (4.12)$$

ここで、積分経路を直線で近似している。この近似の精度は、後に実証的に検討するが、結論として近似誤差は極めて小さいものであることが確認されている。ここで、経路選択が確定的すなわち $\theta_1^m \rightarrow \infty$ とすると、 S_{rs}^{im} は、OD間最小一般化費用となり、式(4.12)は、いわゆる台形公式そのものになる。台形公式を利用すると、手段別の発生便益を計算できる利点もある^{viii)}。

以上は、利用者の行動の記述であるが、さらに、この行動の集積である混雑現象の記述と、それらの間の整合性を取る必要がある。本章のように複数の利用者クラスが混在する場合は、マルチクラス型ネットワーク均衡モデル^{477), 478)}によってそれらは実現できる。ネットワーク上の混雑状況は、各リンクにおいてクラス合計のリンク交通量 x_a^m のみに依存する分離型のリンクコスト関数 $t_a^m(x_a^m)$ で、対象時間帯内で独立かつ静的に記述できると仮定すると、均衡解の算出は、以下の最適化問題を解くことで効率的かつ厳密に行える。

$$\min. Z(\mathbf{x}(\mathbf{f}), \mathbf{q}, \mathbf{O}) = \sum_{m,a} \int_0^{x_a^m} t_a^m(\omega) d\omega + \sum_{i,m,a} x_a^{im} p_a^m / \tau^i + \sum_i \{-u_i(\mathbf{f}, \mathbf{q}, \mathbf{O}) / \tau^i\} \quad (4.13)$$

subject to (4.4)

viii) なお、式(4.12)は、 $UB = - \int_{S_{rs}^{i,without}}^{S_{rs}^{i,with}} \sum_{i,r} O_r^i (S_r^i) dS_r^i = - \int_{S_{rs}^{im,without}}^{S_{rs}^{im,with}} \sum_{i,r,m} O_r^{im} (S_r^{im}) dS_r^{im}$ とも変

形できる。これは、本章の理論整合的に設計されたモデルでは、便益評価の際に、どの選択レベルの変数を用いても、そのレベルに対応した指標を用いれば、最終的な推定値は一致することを意味する。またこの値は、リンクレベルでの評価とも一致することが、第4章付録A3式(4.36)から確認できる。

以上のように、経済理論と統合的な需要予測・便益評価モデルが構成された。具体的には、上記、最適化問題を部分線形化法⁴⁸⁵⁾などで解いて、整備前後の均衡リンク所要時間を求めた後、式(4.11)あるいは(4.12)を用いて、利用者便益は計算される。

4.3.3 パラメータの条件について

以上のモデルに含まれるパラメータが満たすべき条件、パラメータの解釈上の注意点について述べておこう。まず、式(4.1)の代表的個人の直接効用関数が、効用関数が満たすべき一般的な条件である凹関数となるには、第4章付録A2より、

$$\theta_1^{im} > \theta_2^{im} > \theta_3^i > \theta_4^i > 0, \quad \forall i, m \quad (4.14)$$

が条件となる。また、一般に知られるように式(4.6), (4.7)のNested Logitモデルがランダム効用理論との整合性を保つためには(e.g. Carrasco and Ortúzar, 2002)⁴⁹¹⁾,

$$\theta_1^{im} \geq \theta_2^{im} \geq \theta_3^i \geq \theta_4^i, \quad \forall i, m \quad (4.15)$$

が条件となる。さらに、ネットワーク均衡モデルの解が一意となるためには、式(4.13)の目的関数が凸関数となることが必要であり、

$$t_a^m(x_a^m) > 0, \frac{\partial t_a^m(x_a^m)}{\partial x_a^m} > 0, \quad \forall m, a \text{ and } (4.14) \quad (4.16)$$

が条件となる。以上のように、

- ・ 代表的個人の直接効用関数が凹関数となる条件
- ・ NLモデルのランダム効用理論との整合性条件
- ・ ネットワーク均衡モデルの解の一意性条件

は密接な関係があることに注意すべきである。以上の条件が満たされないパラメータが推定された場合は、モデル構造を変化させる必要がある。また、以上の条件はランダム効用理論の文脈では、効用の誤差項の確率分布に関連するものである。この誤差項は、利用者の選択行動の構造によってのみ特定化されるものではなく、分析者が利用者の効用を確定的に観測することができないため生じる項でもある。したがって、分析者が想定したフレームに応じてパラメータが変化する、さらにはモデル構造が変化する可能性があることに注意が必要である。例えば、ゾーンの大きさ、ネットワークに含む道路リンクの詳細さによる空間集計誤差による影響が生じうる。

さて、今回の便益計測は、道路混雑が発生しており、料金が限界費用課金とは限らない現実の都市を対象としており、セカンド・ベストの経済での便益評価といえるものである。この場合、金本(1996)⁴⁹²、城所(2002)⁴⁹³、上田ら(1997, 2002)^{494, 495}、Kidokoro(2004)⁴⁹⁶によって議論されているように、供給者便益を含めた注意深い取り扱いが必要となる。したがって、次章では、ネットワーク上での利用者のみならず、供給者の行動、料金形成原理も考慮したモデルを提示しておく。そして、そのモデルを利用した議論から、式(4.11)あるいは(4.12)を用いた利用者便益の計測は経済学的にも問題のない指標であることを確認する。

4.4 供給者の行動と料金形成原理を含めたネットワーク上での便益計測モデル

本節では、4.3のモデルに供給者の行動を含め、料金形成原理を内生化した形式で議論を行い、4.3で求めた利用者便益の指標の妥当性を確認する。具体的には、上田ら^{494, 495}の2施設対象のモデルを参考に、4.3のモデルに供給者の行動と料金形成原理を簡略化して組み込む。得られるモデルは、上田らのモデルをネットワーク上において、確率的な利用者の多次元選択行動を明示した拡張形式となる。なお、関連して、城所もネットワークを考慮したモデル^{493, 496}、一般モデル(城所, 2003)⁴⁹⁷と呼ぶモデルを提示して、便益評価に関する注意事項を述べている。城所^{493, 496, 497}が指摘した点が、本章の確率的な利用者の多次元選択行動を明示したモデルにおいても成立していることも確認する。

4.4.1 モデルの定式化

ここでは、記号表記をなるべく単純化するため交通手段を表現する添え字 m を省略し、利用者のクラス i の区別も行わないこととする。区別した場合も同様である。

4.4.1.1 仮定

以下の仮定をおく。代表的利用者が存在し、その行動は4.3のNested Logit型の確率的多次元選択モデルに従う。ネットワーク上のリンクサービスを供給する代表的供給者がリンク別に存在する。リンク a の所要時間 t_a は、リンク交通量 x_a と、施設の性能(容量) Q_a の関数 $t_a = t_a(x_a, Q_a)$ で表す。リンク a の料金 p_a は、

ある種の料金形成原理に基づいて課せられるとし、一般的に $p_a = p_a(x_a, t_a)$ と関数で表す。供給者の供給費用は、関数 $c_a = c_a(x_a, Q_a)$ で表す。供給者の利潤 π_a は、利用者へ所得として一括配当されるとする。負の利潤、すなわち、赤字の場合は、逆に利用者は一括税を支払い、それを補填すると解釈する。一括税は、その存在自体は、社会的厚生に影響を与えない種類の税であるため、本章ではモデルの単純化のために、この制度を採用する。これを利用者からの供給者への所得移転 T_a として表す。交通施設の整備は、ネットワーク上のある一本のリンク b の性能 (容量) Q_b が向上することとして表現する。すなわち、 $Q_b^{without} \rightarrow Q_b^{with}$ とする。一般に、改善が複数リンクにわたる場合、料金を変化させた場合の効果も同様に考察できる。施設整備が新規リンクの追加として表現される場合については、後述する。

4.4.1.2 社会的余剰

まず、4.3 の Nested Logit 型の利用者の行動モデルにおいて、所得 y を所得移転を考慮して次のように書き改める。

$$y = \Omega - \sum_a T_a \quad (4.17)$$

ここで、 Ω は、所得移転前の総所得である。したがって、利用者の間接効用関数(利用者余剰の指標)は、式(4.10)より以下のように与えられる。

$$V = \Omega - \sum_a T_a + \sum_r N_r \tilde{S}_r \quad (4.18)$$

また、前述の仮定から、供給者の利潤(供給者余剰)は、次のように与えられる。

$$\pi_a = p_a(x_a, t_a)x_a - c_a(x_a, Q_a) + T_a, \quad \forall a \quad (4.19)$$

利用者余剰と供給者余剰の和として社会的総余剰は次のように表される。

$$\begin{aligned} W &= V + \sum_a \pi_a \\ &= (\Omega - \sum_a T_a + \sum_r N_r \tilde{S}_r) + \sum_a (p_a x_a - c_a + T_a) \\ &= \Omega + \sum_r N_r \tilde{S}_r + \sum_a (p_a x_a - c_a) \end{aligned} \quad (4.20)$$

4.4.1.3 市場均衡条件

料金が、ある種の形成原理に従って内生化されており、所要時間も混雑を反

映して内生化されているため、均衡料金は、次の不動点問題の解関数として定義される^{ix)}。

$$p_a = p_a(x_a(\mathbf{p}), t_a[x_a(\mathbf{p}), Q_a]) \quad (4.21)$$

この解が存在すると仮定して、それを p_a^* とおく。この均衡解の計算は、一般的なネットワークでは容易でないと予想される。ただし、特殊な例として料金が外生的に与えられる現実の都市の場合、上記均衡問題は通常交通ネットワーク均衡問題に帰着する。以降では、一般的な場合として、料金が内生化されている場合について、便益計測の議論を続ける。章末では、料金が外生的に定められている現実都市圏における便益計測法を示す。

4.4.2 社会的純便益の基本定義

社会的純便益は、社会的余剰の変化分として次のように定義される。この式の導出法は、第4章付録A3に示す。

$$\begin{aligned} \Delta W &= \int_{Q_b^{without}}^{Q_b^{with}} \left(\frac{\partial W}{\partial Q_b} \right) dQ_b \\ &= \int_{Q_b^{without}}^{Q_b^{with}} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{a \in A} \left(p_a - x_a \tau \frac{\partial t_a}{\partial x_a} - \frac{\partial c_a}{\partial x_a} \right) Y_a \\ - \left(x_b \tau \frac{\partial t_b}{\partial Q_b} + \frac{\partial c_b}{\partial Q_b} \right) \end{array} \right\} dQ_b \end{aligned} \quad (4.22)$$

ここで、 A は、リンク全体の集合で、

$$Y_a = \sum_{c \in A} \left(\frac{\partial x_a}{\partial p_c} \frac{\partial p_c^*}{\partial Q_b} + \frac{\partial x_a}{\partial t_c^*} \frac{\partial t_c^*}{\partial Q_b} \right) \quad (4.23)$$

とする。式(4.22)の積分内の $x_b \tau \frac{\partial t_b}{\partial Q_b}$, $\frac{\partial c_b}{\partial Q_b}$ は、それぞれ、改良されたリンク b の所要時間の直接的な変化に伴う限界的な利用者余剰の増加、及び供給者の限界的な費用節約である。また、 $\left(p_a - x_a \tau \frac{\partial t_a}{\partial x_a} - \frac{\partial c_a}{\partial x_a} \right) Y_a$ は、リンク b の改良によって

生じる、ネットワーク上の各リンクにおいて発生していた死重損失の変化分といえる。これは、上田ら^{494), 495)}の2施設対象のモデルをネットワークに拡張し

^{ix)} この不動点問題は他の変数を用いた表現も可能である。

た結果であり、城所^{493), 496), 497)}による考察とも本質的に同等な結果といえる。セカンド・ベスト経済における便益計測に関して、既存の研究と統合的な結果が得られており、式(4.22)は便益計測の基本式と呼べるものである。

4. 4. 3 料金形成原理に応じた整備便益の考察

ここで、料金形成原理を特定化した場合の整備便益を上田ら^{494), 495)}と同様に考察してみよう。紙面の都合上、各リンクにおいて料金が混雑の外部不経済と供給費用の両方の限界費用料金として設定されている、ファーストベストの状況のみを考える。つまり、この場合の料金は、

$$p_a = x_a \tau \frac{\partial t_a}{\partial x_a} + \frac{\partial c_a}{\partial x_a}, \quad \forall a \quad (4.24)$$

となる。この場合の社会的便益は、式(4.22)に代入して、

$$\Delta W = \int_{Q_b^{\text{without}}}^{Q_b^{\text{with}}} \left(-x_b \tau \frac{\partial t_b}{\partial Q_b} - \frac{\partial c_b}{\partial Q_b} \right) dQ_b \quad (4.25)$$

となり、整備されたリンクのみの利用者余剰の増分と供給者費用の節約分のみを計測すればよいことがわかる。これは、Mohring 以来の経済学者による指摘^{492), 493)}と統合的な結果である。本節の議論は、利用者の行動モデルとして確率的な多次元選択 Nested Logit モデルを適用し、ネットワーク上での移動を明示的に考慮した場合にもこの指摘が成立することを確認した意義がある^{x)}。

4. 4. 4 現実の都市における計測

現実の都市における便益計測においては、料金が最善に設定されているとは限らないため、式(4.22)を用いた計測が必要となる。ただし、式(4.22)は、リンク

^{x)} なお、式(4.25)で、 $\frac{\partial t_b}{\partial Q_b} < 0$ であるため、必ず $\Delta W > 0$ となる。これは、全リンク

クに最適課金が負荷されている場合、リンクの容量増加は、モデルと統合的な社会的余剰を必ず増加させることを意味する。これは、固定需要型利用者均衡モデルにおいて、全リンクに限界費用課金が負荷されている場合、容量増加パラドックス(Braessのパラドックス: リンクの容量増加がネットワーク全体の総所要時間を増加させる)が生じないという関係を一般化したものである。

ベースの計測法であるため、新規リンクの便益を評価する場合には、新規リンクに対して禁止的価格の設定の必要があり、一般にその計測は困難となる。この場合は、上田ら⁴⁹⁴⁾によって指摘されているように、グループに対する代表価格による計測が望まれる。今回の場合、最も望ましい代表価格は、起点ゾーン別の期待最大効用となる。また、現実都市においては、料金は外生的に設定されており、交通サービス供給費用の変動も十分小さいと仮定しよう。これらの仮定のもとでは、社会的純便益は、次のようになる。

$$\begin{aligned} \Delta W &= \int_{\tilde{S}_r^{without}}^{\tilde{S}_r^{with}} \sum_r N_r d\tilde{S}_r + \int_{x_a^{without}}^{x_a^{with}} \sum_a p_a dx_a - c_b \\ &= \sum_r N_r (\tilde{S}_r^{with} - \tilde{S}_r^{without}) + \sum_a p_a (x_a^{with} - x_a^{without}) - c_b \end{aligned} \quad (4.26)$$

上式の右辺第一項は利用者余剰の増分、第二項は供給者の料金収入の変化、第三項は、新規リンクの供給費用である。期待最大効用 \tilde{S}_r は、具体的には、式(4.9),(4.7)で定義されるネスト型のログサム変数である。つまり、第一項の値は、4.3で示した利用者便益の指標と同一である。したがって、4.3のモデルで利用者便益を計測した後、第二項、第三項に相当する供給者便益を加えれば、式(4.22)と同じ問題のない計測が行えることが明らかにされた。

本節では、ネットワーク上での供給者の行動と料金形成原理を考慮した便益評価法を示した。ネットワーク上の各リンクに最適料金が負荷されている場合、改良されたリンクのみの利用者余剰の増分と供給費用の変化を考えればよいという既存の経済学的知見が、利用者の多次元選択行動を明示した場合にも成立することを確認した。

一般に、4.3のモデルの式(4.11)のネスト形式のログサム変数の利用者便益指標は、セカンド・ベストの経済となる現実都市での便益計測に用いて問題ない。本節の議論で示されたように、その値に供給者便益を加えれば、最終的な社会的便益は式(4.22)の基本式と同じ値になる。なお、式(4.11)の理論的な指標を分解することで、式(4.12)の手段別の便益計測式が導かれる。この式を用いた場合、代替手段の混雑緩和便益も明示的に追加されることになるが、この作業も問題のないものといえる。

4.5 現実都市への適用と推定事例

本節では、4.3のモデルを用いた、現実の都市圏における誘発交通を考慮した道路投資効果の便益評価の実例を示し、誘発交通を無視することによる便益評

価値のバイアスの存在とその性質を実証的に明らかにする。

4.5.1 前提

一般に、投資効果の推定には、道路供用後に生み出される各期の社会的便益を現在価値に割り引いた値を、評価の対象期間について合算した経済的純現在価値を用いる必要がある。ただし、本章では、誘発交通が便益評価に与える歪みを計測することに主眼があるため、対象道路がモデル適用年次に瞬時に完成したと仮定し、その単年次の利用者便益の推定のみを行うこととする。4.4の分析から明らかのように、この利用者便益に供給者便益を加えることで、問題のない便益評価が行える。

4.5.2 対象都市圏における設定

東京都市圏において現実に計画されている新規環状道路(約 16km)の建設効果の計測を試みる。この新規建設区間以外の道路ネットワークは、変化しないものとする。この都市圏を対象として、4.3の形式の鉄道と自動車の混雑を考慮した Nested Logit 型ネットワーク均衡モデルは、第3章で既に構築済みであり⁴⁸⁵⁾、そのモデルを用いる。PTは、通勤、通学、業務、私事、帰宅の5分類の目的区分を行い、これにセンサスの貨物車を加えた合計6分類の利用者クラスモデルである。パラメータの推定法は、第3章と同様であるが、本章では、確定的な経路選択行動を仮定し^{xi)}、貨物車のOD表をH11年度道路交通センサスのデータに更新している。確定的な経路選択の仮定は、形式的には $\theta_i^m \rightarrow \infty$ を意味し、Nested Logit モデル全体のパラメータを再推定している。また、今回は配分レベルに関しては、目的別の区別は行わず、時間価値 τ^i も一律50円/分として外生的に与えた。再推定されたパラメータ値は、第3章⁴⁸⁵⁾の値とほぼ同等である。誘

^{xi)} 第3章⁴⁸⁵⁾では、Dialのアルゴリズムを用いたロジット型の確率的経路選択行動の記述を行った。この場合、経路選択肢集合が逐次計算のたびに变化してしまうというアルゴリズム上の問題により厳密な均衡解への収束は必ずしも保証されないことが知られている。本研究では、厳密な均衡解が得られることを前提として、誘発交通を考慮した政策評価、モデルの政策感度を議論したいため、このアルゴリズムの利用は適切ではない。この問題の解決法には、経路選択のアルゴリズムの改良などの方法もあるが、本章では、経路選択を確定的に扱うことで最も単純にこの問題に対処している。

発交通の議論においては、特に Nested Logit モデルのスケールパラメータ θ の推定値、およびリンクコスト関数の α, β の設定値が重要である。結果に影響を与えると考えられるこれらのパラメータ値について表-4.2, 表-4.3 にまとめておく。また、これらの推定・設定値は、式(4.14)~(4.16)の条件を満たすため、モデルはランダム効用理論と整合的であり、かつ一意の解を持つことが確認できる。

表-4.2 Nested Logit モデルの主要パラメータ

	トリップ目的	通勤	業務	私事
発生	発生要因人口指標 N_r^i		従業人口	昼間人口
	期待最小費用 $-\theta_4$		-0.004	-0.003
	3次従業人口比率		1.11	
	無職人口比率			1.54
	時間帯別のダミー		(略)	(略)
手段	期待最小費用 $-\theta_3$	-0.019	-0.018	-0.019
	山手線ダミー		1.35	0.94
	23区ダミー		0.21	0.56
	定数項	-0.85	-5.14	-2.13
目的地 自動車	ln(ゾーン面積)	1.00	1.00	1.00
	期待最小費用 $-\theta_2^{car}$	-0.029	-0.024	-0.027
	ln(就業者数密度)	-0.03		
	ln(従業者数密度)	0.60		
	ln(2次従業者数密度)		0.32	
	ln(3次従業者数密度)		0.28	0.41
目的地 鉄道	ln(ゾーン面積)	1.00	1.00	1.00
	期待最小費用 $-\theta_2^{rail}$	-0.024	-0.020	-0.023
	ln(就業者数密度)	-0.30		
	ln(2次従業者数密度)	0.17		
	ln(3次従業者数密度)	1.08	1.16	0.90
経路	一般化費用 $-\theta_1^m$		$-\infty$	
	時間価値 τ^i		50 (円/分)	

注) 推定パラメータはすべて5%有意。θの単位は、(1/分)。

無職人口比率=非就業非従学人口/昼間人口，昼間人口=非就業非就学人口+従業人口。
山手線ダミー，23区ダミーは，発ゾーンがそれぞれ山手線内，23区内の場合1，それ以外0。

トリップ発生レベルにおける時間帯別ダミーの具体的な値は第3章⁴⁸⁵⁾と同等なため，紙面の都合上省略。

表-4.3 リンクコスト関数の関数形と主要パラメータ

	関数形	主要パラメータ
自動車リンク	BPR 関数 [松井式] ⁴⁹⁸⁾	$\alpha = 0.4 \sim 0.54$
	$t_a^{car} = t_a^0 [1 + \alpha (x_a^{car} / Q_a^{car})^\beta]$ t_a^0 : 自由走行時間, Q_a^{car} : 時間交通容量	$\beta = 2.2 \sim 3.3$ (道路種別毎に設定)
鉄道 駅間 リンク	[家田式] ⁴⁹⁹⁾	$\alpha = 0.019$
	$t_a^{rail} = t_a^0 [1 + \alpha (x_a^{rail} / Q_a^{rail})^\beta]$ t_a^0 : 乗車時間, Q_a^{rail} : 乗車定員	$\beta = 4.52$ (路線每一律)

既存のモデルでは、貨物交通に関しても目的地の変更がある形式となっていたが、今回はこの形式ではなく、貨物交通の OD 表は変化しない形式にした。この理由の一つは、貨物交通の目的地選択モデルの精度が低いことであるが、貨物交通を的確に再現できるモデルを構築した段階で、貨物車の誘発交通の議論を進めるべきと考えている。また、帰宅目的のトリップも OD 表は固定とした。本来であれば、他目的のトリップの変化に応じて帰宅目的のトリップの出発地、手段は変更しうるが、それらは無視する。結局、本モデルで扱う誘発交通は表-4.4 のようにまとめられる。本来は、表-4.4 のほかにも、表-4.1 にまとめたとように、誘発交通は発生しうる点に注意が必要である。

表-4.4 誘発交通の区分と本研究のモデルの対象

	通勤・通学	業務・私事	帰宅	貨物
経路の変更	○	○	○	○
手段の変更	○	○	●	-
目的地の変更	○	○	-	●
トリップ発生	-	○	-	●

注) ○: 現実に生じうる変化で本モデルで考慮しているもの

●: 現実には生じうるが本モデルで無視しているもの

-: 現実に生じる可能性が低く、モデルで無視しているもの

モデルの現況再現性を表-4.5 に示す。今回のモデルは、経路選択を確定的に仮定することで、鉄道の配分結果の現状再現性は確率的な経路選択を仮定した既存研究⁴⁸⁵⁾のモデルよりもわずかに劣る。ただし、自動車の配分結果は、既存研究との差は小さい。これは、混雑の激しい対象地域においては、確定的均衡モデルも確率的均衡モデルもほぼ同様なフローパターンになることが知られており⁵⁰⁰⁾、その影響と考えられる。

表-4.5 現状再現性指標

指標	相関係数	回帰係数	RMSE
自動車リンク交通量	0.73	0.98	15,363 (台)
鉄道リンク交通量	0.92	0.93	144,423 (人)
自動車 OD 所要時間	0.63	0.92	23.91 (分)
自動車 OD 表	0.96	0.79	853 (台)
鉄道 OD 表	0.97	0.97	710 (人)

注) 回帰係数とは、回帰直線 $y = ax + b$ における傾き a .

観測値として H6, 9, 11 年度道路交通センサス, H7 年度大都市交通センサスを利用. 詳細は, 第3章⁴⁸⁵⁾と同様.

4.5.3 誘発交通による便益の歪みの計測法

誘発交通を考慮することによる便益推定値の違いを求めるには、従来の固定需要モデルと今回の統合モデルをそれぞれ用いて需要予測・便益計測を行い、その差を計測すればよい。ただし、この場合、統合モデルは、OD 表がモデルにより内生的に決定されるため、現状を完全に再現するモデルを推定しない限り、現況とは異なるフローパターンの初期状態になる。言い換えると、モデルの現況再現精度に依存して、初期均衡状態が固定需要モデルと統合モデルで異なることが想定される。図-4.1 の議論からは、初期均衡状態の違いが計測の差に影響を与えることが想定される。したがって、モデルの初期均衡状態の違いによる歪みと誘発交通による便益の歪みが区別されなくなる恐れがある。この問題に対処するには2つの方法がある。一つは、モデルを Incremental 型^{501), 480), 502)}に変更し、統合モデルを完全に現状手段別 OD を再現するように設定する方法である。もう一つは、統合モデルの初期均衡 OD 交通量を固定需要モデルの手段別 OD 表の入力値に用いる方法である。本章では、単純な後者の方法を用いる。この場合、固定需要モデルの入力 OD 表が、観測 OD 表とは異なる値になるが、表-4.5 に示した最終的なリンク交通量、OD 表の適合度を見ても、大きな問題とはならないと判断できる。

4.5.4 誘発交通の推定例

表-4.6 には、対象道路の整備による交通環境状況の変化の集計値を示す。統合モデルから得られる変化予測値は、固定需要型のモデルから得られる数値よりも小さいものとなっている。また、どのモデルでも、総走行台キロは、道路整

備により減少している。これは、今回の場合、新規道路により、短距離での移動が可能になったトリップが多数存在しているためと考えられる。統合モデルの場合は、この減少率が新規誘発交通により小さくなっている。

表-4.6 交通環境状況の変化率（日合計値）

集計地域 モデル	23 区内		全域	
	固定需要	統合	固定需要	統合
総走行台時	-7.6%	-4.4%	-2.3%	-0.7%
総走行台 [※]	-4.1%	-2.6%	-1.1%	-0.3%
平均走行速度	3.8%	1.9%	1.3%	0.4%
NO _x 総排出量	-5.6%	-3.3%	-1.7%	-0.5%
CO ₂ 総排出量	-6.0%	-3.6%	-1.8%	-0.5%

注) NO_x, CO₂ 排出量の算出には速度別平均排出係数⁵⁰³⁾を利用

具体的な誘発交通の値は、表-4.7のように算出される。統合モデルでは、新規発生トリップ、手段の転換による自動車トリップの増加により、それぞれ総トリップ数、自動車トリップ数に、変化が生じているが、変化率で見るとわずかな値となっている。これは、表-4.2のパラメータで、 θ_3 、 θ_4 の推定値が小さいため、それぞれのレベルに対応した需要弾力性も小さい値であるためである。ただし、変化率がごく小さく見えるのは都市圏全体の交通量で見た場合である。

固定需要モデルの統合モデルの違いは、このわずかな需要の変化を考慮するか否かである。しかし、この違いにより、表-4.6にあるように総走行台時などの交通環境指標の出力結果は大きく異なっている。このことに起因し便益評価に大きな違いが生じること、また対象道路の交通状況にも違いが生じることを以下で具体的に示していこう。

表-4.7 交通状況の変化(都市圏全域、日合計値)

モデル 指標	固定需要モデル		統合モデル	
	変化量	変化率	変化量	変化率
総トリップ数	0	0	+11,145	+0.03%
自動車トリップ数	0	0	+40,132	+0.3% ^{注1)}
自動車平均トリップ長 ^{注2)}	0	0	+120 (m)	+0.50%
総走行台キロ	-2,791,700	-1.1%	-835,603	-0.31%

注1) 都市圏全域の自動車分担率で見ると+0.10%の変化量である

注2) OD間距離の自動車トリップ数による重み付け平均値

まず、図-4.3には、今回対象の新規道路の交通量・平均速度の予測値を時間帯別、利用したモデル別に示す。これによると、誘発交通を無視した固定需要モデルでは、誘発交通を考慮する統合モデルと比較して、昼間では、道路交通量を1000(台/時間・片方向)程度過小に推計し、平均速度も約10(km/h)過大に推計することが分かる。もとより、本モデルは静的モデルであり、リンクコスト関数の設定によりこれらの値は変化しうるものであるが、既存の固定需要モデルが、新規施設に対する需要を過小評価し、施設の実現サービスレベルを過大に評価することが定量的に示されている。

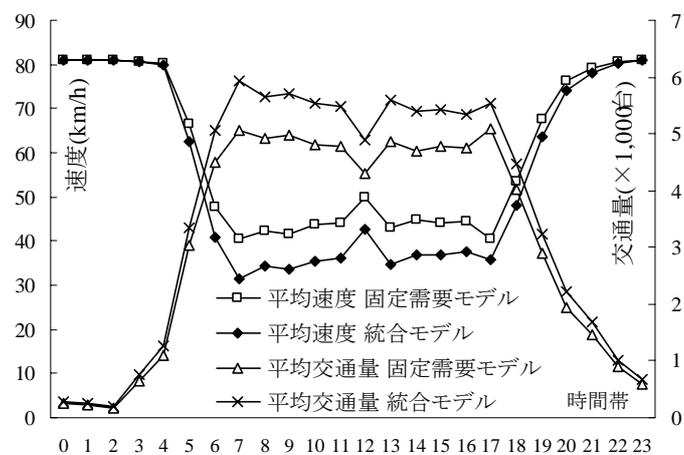


図-4.3 新規建設道路の時間帯別交通量・平均速度
注) 片方向交通量・速度の平均値

表-4.8 道路整備による利用者便益推定値の比較結果

単位: 10³円

時間帯	固定需要モデル	統合モデル					固定需要モデルと統合モデル間の推定値の差 (A-D)/D	[参考] 整備後の自動車総トリップ数 (6時=100で基準化)
	自動車混雑緩和便益 A	台形公式[式(4.12)]			ログサム式 [式(4.11)] D	台形式とログサム式の差 [(B+C)-D]/D		
		自動車混雑緩和便益 B	鉄道混雑緩和便益 C	合計 B+C				
0	308	328	0	328	327	0.34%	-6%	6
1	240	261	0	261	260	0.46%	-8%	5
2	225	246	0	246	244	0.42%	-8%	4
3	948	1,003	0	1,003	999	0.40%	-6%	7
4	1,464	1,535	0	1,535	1,526	0.54%	-5%	9
5	6,694	5,014	13	5,027	5,005	0.44%	33%	27
6	33,965	13,797	571	14,368	14,251	0.82%	136%	100
7	64,259	19,926	3,282	23,208	22,766	1.94%	177%	179
8	52,546	18,853	1,864	20,717	20,425	1.43%	154%	134
9	53,296	21,220	213	21,433	21,221	1.00%	149%	123
10	47,935	19,935	34	19,969	19,795	0.88%	140%	119
11	46,314	20,872	12	20,884	20,734	0.72%	122%	117
12	28,911	14,636	2	14,638	14,554	0.58%	98%	85
13	51,694	22,735	13	22,748	22,569	0.79%	127%	121
14	45,376	20,127	8	20,135	19,988	0.74%	125%	116
15	47,455	22,104	33	22,138	21,985	0.69%	114%	121
16	47,058	22,779	44	22,823	22,681	0.63%	106%	125
17	56,859	28,306	260	28,566	28,405	0.57%	99%	152
18	36,062	20,467	229	20,696	20,568	0.62%	74%	135
19	11,115	8,252	256	8,508	8,478	0.36%	31%	77
20	5,810	5,313	27	5,339	5,319	0.38%	9%	55
21	3,148	3,059	12	3,071	3,058	0.41%	2%	38
22	1,352	1,408	0	1,408	1,403	0.39%	-4%	24
23	742	781	0	780	778	0.36%	-5%	15
日合計	643,776	292,955	6,872	299,828	297,339	0.84%	115%	-

表-4.8には道路整備による利用者便益推定結果を示す。固定需要モデル、統合モデルを用いた場合の値をそれぞれ時間帯別に示している。本章のモデルから、算出される利用者便益とは、表-4.3のリンクコスト関数の設定から明らかなように、自動車交通に関しては、旅行時間節約便益、鉄道交通においては、混雑不効用関数で表現された鉄道車内における混雑緩和便益のみを対象としている。本章のモデルでは、時間帯間の残留交通量を見捨てており、出発時刻選択、トリップチェーンも考慮していないため、時間帯別の値そのものの信頼性は高くはなく、数値の慎重な解釈が必要である。しかし、さまざまな需要量のパターンでの誘発交通による便益評価バイアスの性質を確認するためには有用な情報となる。

まず、本章のモデルでは鉄道の混雑現象が表現されているため、統合モデルを用いた場合、道路整備による手段の変更による鉄道の混雑緩和の便益が追加される。式(4.12)の台形公式を用いてこれらの手段別の便益を計算し合算した値も、式(4.11)のログサム変数で便益を求めた場合もほぼ等しい値となっていることが確認できる。

全体的に、固定需要モデルによる便益は、統合モデルによる便益よりも高い値となる傾向にある。さらに、時間帯別に見ると、ピーク時のほうが、オフピークよりも、この過大評価の傾向は強い。これは、誘発交通をめぐる議論において、誘発交通は、道路ネットワークが交通容量に近い状況で使われている場合に、大きな問題となることが指摘されていたことを、実際の都市圏において実証的・定量的に確認した意義をもつ。一方、オフピークについては、誘発交通を見捨てた固定モデルのほうが、便益がわずかに過小評価される時間帯も見られている。これらは、図-4.1を用いた考察と整合的である。参考までに、時間帯別の道路整備後の自動車総トリップ数の指標も示しているが、この指標と、便益推定値のバイアスが密接な関係にあり、総トリップ数の多い時間ほど過大推計の傾向にあることが読み取れる。ただし、時間帯により需要の空間的分布、目的別のトリップ数の割合が異なるため、総トリップ数とバイアスの関係に、多少の変動は生じている。また、統合モデルにおける17時台の便益が他の時間帯よりも高くなっているのは、17時の帰宅トリップが多数発生するが、この帰宅トリップを本研究では固定で与えているため、固定需要モデルと似通った状況になっているためである。現実には、この帰宅トリップも変化しうるため、17時台に便益のピークがあるという現象が起こるとは限らないことに注意が必要である。

4.5.5 フィードバックによる近似解法の有効性

以上の便益推定値は、需要予測モデルにおいて厳密な均衡解を求めて得られた値である。一方、実務における需要予測では、このような厳密な均衡解を求めることは少ない。しばしば用いられる手法は、四段階推定法を用いた場合、配分結果の OD 所要時間を発生・分布・分担段階にフィードバックさせ、それを繰り返すというヒューリスティックな手法で均衡解の近似解を求めるものである。また、マイクロ個人行動ネットワークシミュレーションにおいては、このフィードバック法が現状では唯一の解法となっている。この近似解法で、十分な精度の便益推定が行えるのかどうかを以下で実証的に検討する。

今回のフィードバック法における行動モデル、ネットワークモデルは、厳密解を求めたモデルと同等に設定する。最も単純なフィードバックは、固定需要配分の結果を上位のモデルの入力にそのまま導入する直接法である。ただし、この直接法では、収束しない場合があるため、本章では、逐次平均法(MSA)^{462), 480)}を用いて収束を強化した手法も試行した。具体的には、固定需要型の均衡配分の配分結果の OD 所要時間を Nested Logit モデルのログサム変数に反映させ、OD 表を更新することを繰り返した。この交通量の更新の際に、直接法は、得られた新規解をそのまま利用するが、MSA では、平均化操作を行って更新する。これら均衡解の算出法による便益計測結果の比較を図-4.4 に示す。

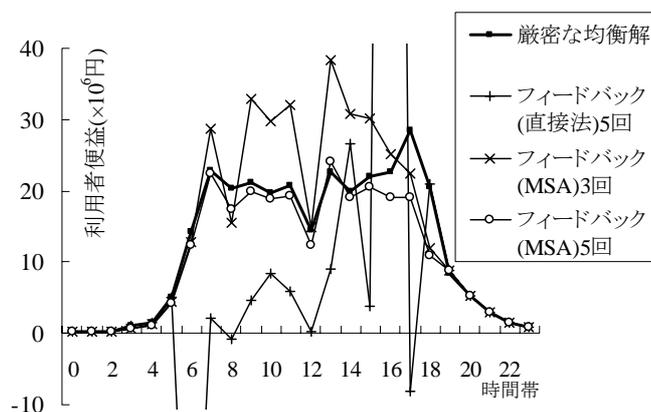


図-4.4 均衡解の算出法による便益推定値の違い

厳密な均衡解を求めた場合、利用者便益は、どの時間帯においても正の値であり、少なくとも政策感度の符号条件においては、妥当な結果が得られている。一方、直接法のフィードバックモデルの場合では、時間帯により、便益が負になる場合があり、符号条件すら満たされない結果が得られる。MSA を用いたフ

フィードバックでは、厳密解との差は小さくなるが、時間帯間のバラつきが大きく安定的な結果が得られていない。また、図-4.4 には示されていないが、MSAでも、鉄道の混雑緩和便益は負になる時間帯が存在している。ただし、オフピーク時には、フィードバック法による推定値も、厳密解による推定値も変化は少ない。この結果となった理由は、混雑時には、フィードバック手法による均衡解の近似の誤差がプロジェクト実施の影響以上の大きさとなっているためと考えられる。図-4.1のような単純な例で考えてみると、結果の参照点として厳密な均衡点(需要曲線とパフォーマンス曲線の交点)を想定した場合、一般に便益が負になることはありえない。結果の参照点としてフィードバックモデルによる交点の近似点を与えた場合、近似の精度によっては、便益が負になってしまう。言い換えると、フィードバックの初期解、および繰り返し回数によって結果が変化する。この問題が、今回対象とした大規模ネットワークにおいて、多手段の混雑現象を考慮した場合顕在化している。以上のことから、フィードバック法は、混雑のあまり激しくない都市圏、時間帯において、最も簡便な手法として有効な場合もあるが、混雑が激しい場合は、フィードバックの不完全性による誤差が、政策感度にも影響を与えてしまうことが明らかになった。厳密な均衡解の算出は、妥当な政策感度を得るという観点から強く要請されるものと言える。また、フィードバックによる総計算時間は、部分線形化法を用いた厳密解の計算時間の2倍以上を要しており、計算時間の観点からも厳密解の求解の優位性は変わらない。

4.5.6 政策への知見のまとめと議論

本章での分析より、今回の対象地域では、従来から用いられている固定需要型のモデルを用いた場合、表-4.8の日合計値から判断して道路整備の利用者便益をおよそ2倍過大評価しているという結果が得られた。また、表-4.6の値からは、道路整備の環境負荷削減便益も過大評価している可能性が示唆される。無論、これらの数値は、さまざまな仮定の下で算出された値であるが、混雑地域における道路整備効果の議論において、一つの目安として捕らえておくべき値といえる。誘発交通そのものの量は小さい場合でも、混雑地域においては、そのわずかな交通量が与える影響を便益評価において無視すると、推定値に大きなバイアスを生じうる。

本章の分析結果に関して、いくつか注意点をまとめておこう。まず、本章の分析からは、誘発交通を考慮することにより、道路整備の利用者便益は既存の推定値のおよそ半分になりうるということが示されたが、便益が負になるわけではな

い。つまり、混雑地域における道路整備の効果は、誘発交通により完全に打ち消されるわけではない。便益がゼロになるのは、図-4.1における需要曲線が水平になる(完全弾力的な)場合であり、このような需要曲線が現実のデータから推定されることは、少なくとも短期需要曲線を想定したと考えられる分析においては、ありえないであろう。混雑地域における道路整備の便益は、そもそもの絶対量が膨大な値であり、その値が半分になろうとも、多くの場合、費用便益基準は満たされ、道路整備を進めるという最終的な意思決定は変わらないと考えられる。ただし、この点に関しては、本章の対象外である道路整備の費用の推定等による精査が必要である。

また、需要予測モデルで誘発交通を無視していることで便益は常に過大推計されるとは限らないことにも注意が必要である。今回の計算事例においても需要の少ない夜間においては、誘発交通を考慮したモデルのほうが便益は増大している。この結果からは、東京の夜間と同等程度の混雑しか発生していない地方部の道路整備評価においては、既存の固定需要モデルは、便益を過小評価しているとも解釈できる。社会資本事業により需要が誘発されることは、その事業により新たな社会経済活動が生み出されていることを意味し、一般には歓迎されるべきものである。しかし、混雑地域における誘発交通は、その存在を無視すると新規施設のサービスレベルを過大に評価する可能性が存在し、モデル化に細心の注意が必要となることを本章の分析結果は示唆している。

混雑地域における道路整備の必要性の判断は、誘発交通を考慮した需要予測・便益推定法を用いて、議論の客観的な土台となる費用便益指標を算出し、それを参考に行うというのが基本的な原則であろう。ただし、需要予測モデルの構築の際に、誘発交通をモデル化することのみに執着し、利用者の行動記述を詳細に行うのみでは不十分である。本章では、フィードバックを用いた近似解法では政策感度が妥当とならない場合を示した。この知見は、大規模ネットワークで鉄道においても混雑が生じている今回の対象地域に特有の可能性もあるが、モデル全体の整合性をまず確保し、政策評価を行う際の参照点を明確に記述することが重要である。モデル内部の整合性が保たれていない場合は、政策感度の違いが、誘発交通を考慮したことによる差であるのか、それともそれ以前の計算誤差に過ぎないのか判然としない恐れがある。

一方で、モデル全体の整合性を確保しつつ、モデルの細部の精緻化を進めることは望ましい。今回、モデルのパラメータの推定値は、一時点のクロスセクションの集計データを用いているが、複数時点のデータを用いた推定、あるいは、行動変化の結果を得られるパネルデータなどを用いた推定が誘発交通のモデル化に望ましいのは言うまでも無い。また、表-4.1にまとめた行動変化のうち、本章のモデルで無視した要因の組み込みも求められる。今後の課題としたい。

推定された誘発交通の大小に関しては十分な注意が必要である。誘発交通の大きさは、需要関数すなわち利用者の行動モデルの構造、パラメータ及びリンクコスト関数の設定に依存する。クロスセクションデータで推計された弾力性は、現実の値よりも低いという指摘もある⁴⁵⁷⁾。また、両側制約型の分布モデルを仮定した場合など、モデル構造を変化させた場合の影響分析、代表的個人の妥当性に依存するパラメータ推定値の信頼性についての検証、パラメータの一般的な感度分析も必要である。さらに、今回の混雑都市圏においては、リンクコスト関数の設定も大きな影響を及ぼす。これら数多くの課題は、存在しているものの、本章の意義は、今後の展開の基礎となるべき基本モデルを用いて、混雑地域における誘発交通の議論において、モデル内部の整合性・一貫性を意識したフレームが重要となることを確認したことにもある。

4.6 本章の結論

本章の成果・結論は次のようにまとめられる。

(1) 混雑地域における誘発交通を考慮した需要予測モデルの要件を整理し、その観点から既存のモデルをレビューした。

(2) 経済理論に基づいたマルチクラス Nested Logit 型ネットワーク統合均衡モデルの定式化を行い、モデルと整合的な便益評価指標を示した。

(3) モデルに供給者の行動を含めた枠組みにおける議論から、求めた便益計測指標がセカンド・ベスト下の便益評価における留意点を踏まえた経済学的にも問題のない指標であることを確認した。また、最適料金制度の下での便益計測に関して、本モデルから、既存の知見を一般化した結果が得られることを示した。

(4) 混雑の激しい大規模な都市圏にネットワーク統合モデルを適用し、道路整備による誘発交通を試算し、誘発交通の量は、都市圏全体ではわずかであるが、対象道路の交通状況に大きな影響を与えうることを示した。

(5) 誘発交通を考慮するモデルとしないモデルの比較から、誘発交通を無視することによる便益評価のバイアスを実証的に示した。また、この数値を時間帯別に示し、このバイアスが需要のレベルに大きく影響を受けるという既存の知見を実証的に確認した。

(6) 理論と整合的な厳密な指標を用いた便益評価値と、その近似として知られる台形公式を用いた便益評価値の差は、極めて小さいことを実証的に確認した。

(7) フィードバック型の推定法と、厳密な均衡解を求めるモデルとで便益推定値の違いを示し、厳密な均衡解の求解は妥当な政策感度という観点から要求さ

れることを示した。

今後の課題として、4.5の最後で述べたモデル細部の精緻化のほか、主に次のような点が挙げられる。

本章のモデルは、形式上、合成財の変数を含んだ定式化であるが、効用関数が準線形型となっていることから明らかなように、他財の価格、質の変化が交通行動に与える影響や所得効果はモデル化されていない。大規模交通プロジェクトでは、これらをも表現したモデル化が必要である。

また、混雑地域における道路整備については、本章の誘発交通問題の議論とは別に経済学的観点から次のような批判がある。混雑による外部不経済は、混雑税が課せられておらず、交通の価格が低すぎることによって生じている。混雑している道路に対する投資は低すぎる価格を更に低くすることになり、外部不経済の増加を招いている⁴⁹²⁾というものである。このような視点から Williams, et al.(2001)⁵⁰⁴⁾は、最適混雑料金が課せられた状況も含めた道路投資効果の議論を行っている。本章のモデルに対応する最適混雑料金を算出することは、第5章で示されるように容易であり⁵⁰⁵⁾、Williams, et al.と同様な分析を行うことが可能である。

第4章 付録A 1 Oppenheimによる便益評価指標について

Oppenheimのテキスト⁴⁸⁹⁾では、利用者の直接効用関数を、式(4.1)ではなく、

$$U = -\tau \sum_{m,a} \int_0^{x_a^m} t_a^m(\omega) d\omega + u + z \quad (4.27)$$

とおいた形式のモデルが示されている。すなわち、第一項を、総所要時間ではなく、リンクコスト関数積分形としている。そして、便益評価指標として、式(4.11)に各リンクで発生している外部不経済効果の変化を加えた指標を提示している。しかしながら、直接効用関数を式(4.27)とおいた定式化は、一般的な経済理論と整合せず、それをを用いた便益評価は誤りといえる。

この理由は、一般に経済モデルでは、個々の利用者は、価格を所与のもの-コントロールできないもの-として行動すると仮定される必要があるためである。直接効用関数を式(4.27)とした場合、代表的個人は、リンク交通量を変更することで、均衡リンク所要時間(すなわち市場価格)を変更することが可能になり、上述の仮定に反する。それに対して、直接効用関数を式(4.1)とおくことは、均衡価格を所与としており、経済モデルの前提に合致する。すなわち、式(4.1)および式(4.11)を用いた需要予測・便益評価を用いるべきである。

第4章 付録A2 直接効用関数が凹関数となる条件

式(4.2)を書き換えると,

$$\begin{aligned}
 u_i = & - \sum_{r,s,m,k} \frac{1}{\theta_1^{im}} f_{m,k}^{i,rs} \ln f_{m,k}^{i,rs} + \sum_{r,s,m} \left(\frac{1}{\theta_1^{im}} - \frac{1}{\theta_2^{im}} \right) q_m^{i,rs} \ln q_m^{i,rs} \\
 & + \sum_{r,m} \left(\frac{1}{\theta_2^{im}} - \frac{1}{\theta_3^i} \right) O_r^{im} \ln O_r^{im} + \sum_r \left(\frac{1}{\theta_3^i} - \frac{1}{\theta_4^i} \right) O_r^i \ln O_r^i \\
 & - \sum_r \frac{1}{\theta_4^i} O_{r0}^i \ln O_{r0}^i + \sum_r \frac{1}{\theta_4^i} N_r^i \ln N_r^i \\
 & - \sum_{r,s,m} q_m^{i,rs} c_s^{im} - \sum_{r,m} O_r^{im} c_m^{ir} - \sum_r O_r^i c_r^i
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

となる. したがって, 利用者クラス i の直接効用関数,

$$U_i(\mathbf{f}, \mathbf{q}, \mathbf{O}) = - \sum_{r,s,m,k} \tau^i f_{m,k}^{i,rs} t_{m,k}^{rs*} + u_i + z_i \tag{4.29}$$

が, 凹関数となる条件は, 整理すると, 次式となる.

$$\theta_1^{im} > \theta_2^{im} > \theta_3^i > \theta_4^i > 0, \quad \forall m \tag{4.30}$$

第4章 付録A3 社会的純便益の導出

社会的総余剰の式(4.20)

$$W = \Omega + \sum_{i,r} N_r^i \tilde{S}_r^i + \sum_{m,a} (p_a^m x_a^m - c_a^m) \tag{4.31}$$

を全微分する. なお, 付録では, 手段 m , クラス i も区別し式展開しておく.

$$\begin{aligned}
 dW = & \sum_{i,r} N_r^i \frac{\partial \tilde{S}_r^i}{\partial S_r^i} \sum_m \frac{\partial S_r^i}{\partial S_m^{ir}} \sum_s \frac{\partial S_m^{ir}}{\partial S_{rs}^{im}} \sum_k \frac{\partial S_{rs}^{im}}{\partial g_{km}^{irs}} d g_{km}^{irs} \\
 & + \sum_{m,a} (x_a^m d p_a^m + p_a^m d x_a^m - d c_a^m)
 \end{aligned} \tag{4.32}$$

ここで, クラス別一般化経路費用 $g_{km}^{irs} = \tau^i t_{k,m}^{rs*} + p_{k,m}^{rs}$ と定義している. 期待最小費用関数(ログサム変数)の性質から次式が成立する.

$$\frac{\partial \tilde{S}_r^i}{\partial S_r^i} = - \frac{O_r^i}{N_r^i}, \quad \frac{\partial S_r^i}{\partial S_m^{ir}} = \frac{O_r^{im}}{O_r^i}, \quad \frac{\partial S_m^{ir}}{\partial S_{rs}^{im}} = \frac{q_m^{i,rs}}{O_r^{im}}, \quad \frac{\partial S_{rs}^{im}}{\partial g_{km}^{irs}} = \frac{f_{m,k}^{i,rs}}{q_m^{i,rs}} \tag{4.33}$$

また、経路費用は、次のように分解できる。

$$g_{km}^{irs} = \tau^i t_{k,m}^{rs*} + p_{k,m}^{rs} = \sum_a (\tau^i t_a^m + p_a^m) \delta_{a,k}^{m,rs} \quad (4.34)$$

式(4.33), (4.34)を式(4.32)に代入すると、式(4.32)第一項は、

$$\begin{aligned} & - \sum_{i,r,s,m,k} f_{m,k}^{i,rs} d g_{km}^{irs} = - \sum_{i,r,s,m,k} f_{m,k}^{i,rs} \sum_a \delta_{a,k}^{m,rs} (\tau^i d t_a^m + d p_a^m) \\ & = - \sum_{i,m,a} x_a^{im} (\tau^i d t_a^m + d p_a^m) = - \sum_{i,m,a} x_a^{im} \tau^i d t_a^m - \sum_{m,a} x_a^m d p_a^m \end{aligned} \quad (4.35)$$

と変形される。結局、

$$dW = - \sum_{i,m,a} x_a^{im} \tau^i d t_a^m + \sum_{m,a} (p_a^m d x_a^m - d c_a^m) \quad (4.36)$$

となり、

$$\begin{aligned} \Delta W &= \int_{Q_b^{n,without}}^{Q_b^{n,with}} \left(\frac{\partial W}{\partial Q_b^n} \right) dQ_b^n \\ &= \int_{Q_b^{n,without}}^{Q_b^{n,with}} \left\{ \begin{aligned} & \sum_{m,a} \left(p_a^m - x_a^m \hat{\tau}_a^m \frac{\partial t_a^m}{\partial x_a^m} - \frac{\partial c_a^m}{\partial x_a^m} \right) Y_a^m \\ & - \left(x_b^n \hat{\tau}_b^n \frac{\partial t_b^n}{\partial Q_b^n} + \frac{\partial c_b^n}{\partial Q_b^n} \right) \end{aligned} \right\} dQ_b^n \end{aligned} \quad (4.37)$$

$$Y_a^m = \sum_{c \in A} \left(\frac{\partial x_a^m}{\partial p_c^m} \frac{\partial p_c^m}{\partial Q_b^n} + \frac{\partial x_a^m}{\partial t_c^m} \frac{\partial t_c^m}{\partial Q_b^n} \right), \hat{\tau}_a^m = \sum_i \frac{x_a^{im}}{x_a^m} \tau^i \quad (4.38)$$

となる。ここで、改良リンクを、手段 n リンク b としている。クラス i , 手段 m の区別を省略したものが本文中の式(4.22), (4.23)である。

第5章 ネットワーク均衡条件下での最適混雑料金：一般化と実都市圏における試算

5.1 はじめに

交通渋滞の緩和と大気汚染問題等への対応を目的としたロードプライシングは、2003年2月よりロンドン都心部での実施が始まり、東京都心部への導入も検討されるなど、現実味のある都市交通政策の代替案の一つになりつつある。本章の目的は、このロードプライシングの最適な料金設定に関して、利用者の行動を明示的に扱いつつ現実都市圏の道路網にも適用可能な形式を提示することにある。

道路利用の私的限界費用と社会的限界費用の乖離に等しい額を混雑料金として課せば社会的に最適な状態が実現するという限界費用原理は、経済学における単純な1本のリンクを対象とした議論から導き出されたものである。この理論は、

- [1] 空間表現が過度に単純化されている。
- [2] 渋滞現象の表現の不備すなわち時間軸の欠如。
- [3] 利用者の交通行動の表現が不十分。

という問題があり、現実都市圏の混雑料金の設定問題に直接適用できるものではない。

これら3つの問題点のうち、[1]の空間表現の問題に関しては、交通ネットワーク均衡分析のモデルの枠組みにおいて、各リンクにおいて限界費用原理を適用すればよいという拡張がされている。しかし、従来モデルの利用者の経路選択行動の記述、需要関数の設定法などは、いまだ現実を簡略化したものであり、[3]の問題は依然残される。一方、[2]の時間軸の欠如の問題に対しては、主に単一ボトルネックを対象とした議論が進められ、成果が挙げられているが(桑原, 2002)⁵⁰⁶⁾、一般ネットワークへの理論の拡張は困難と思われる。

本章では以上の背景を踏まえ、既存の混雑料金理論の上述した[1]、[3]の問題点を同時に解決する分析フレームを提示する。すなわち、利用者の交通行動が複数の交通手段を含むネットワーク上でランダム効用理論に基づくNested Logit型の多次元選択行動として記述される場合における最適混雑料金について議論する。提示するフレームは、静的モデルであるという限界は依然残されるものの、現実の大規模なネットワーク上においても最適混雑料金の算出が可能である点が大きな利点となる。

また、現実のロードプライシングは、道路混雑緩和のみを目的とするわけで

はなく、大気汚染等の環境基準の達成を目的とする場合が多い。したがって、環境負荷排出量にも配慮した料金設定法についても言及する。

5.2 既存研究のレビューと本研究の方針

混雑課金についてのレビューは、第2章でもまとめているが、ここでも、本章の目的に沿った関連既存研究の流れを詳述しておく。

交通ネットワーク均衡分析における混雑料金政策の議論としては、固定需要型の利用者均衡配分モデルにおいて各リンクに限界費用原理を適用することで、総所要時間を最小化するシステム最適配分が達成できることがよく知られている。この料金システムは、需要変動型の場合においても、Gartner (1980)⁵⁰⁷、Yang and Huang (1998)⁵⁰⁸らによって議論されているように、次のような目的関数で示される社会的余剰を最大化する。

$$\max. \sum_{rs} \int_0^{q_{rs}} D_{rs}^{-1}(\omega) d\omega - \sum_a t_a(x_a) x_a \quad (5.1)$$

ここで、 $D_{rs}^{-1}(\cdot)$ は、ODペア rs 間の逆需要関数、 q_{rs} は、ODペア rs 間の交通量、 $t_a(\cdot)$ は、リンク a のリンクコスト関数、 x_a は、リンク a の交通量とする。しかしながら、これらの研究で仮定されている需要関数は、独立型の需要関数であり、一般的なロジットモデルなどの競合型の需要関数の場合には、直接的には適用できない。また、この需要関数は、利用者の交通行動と結びついたものではなく、需要関数の価格弾力性を設定する必要があるが、その設定値によって混雑料金は大きく異なることになる(例えば、野杵, 秋山, 2001)⁵⁰⁹。さらに、利用者の経路選択行動も確定的なものが仮定されている。また、単一の交通手段が想定されており、代替交通手段への影響を評価できない。これらの仮定を緩和し、フレームを一般化することは、混雑料金政策を論じるうえで重要な研究課題となる。

この一般化を意図した既存研究としては、利用者の経路選択行動が確率的である、すなわち確率均衡配分モデルの元での最適混雑料金についての、赤松, 桑原 (1988, 1989)^{510,511}による研究がある。彼らのモデルの目的関数は総走行時間の最小化を基本としたものであり、その場合に適用できる限界費用原理の拡張式を示した。これに対して、Yang (1999)⁵¹²は、ロジット型確率的均衡配分モデルと整合的な純経済便益を定義し、その最大化を目的関数とした場合、通常限界費用原理が最適混雑料金となることを示した。

本章では、利用者の経路選択も確率的とし、さらに、手段選択、目的地選択など他の次元の選択行動を含めて、ランダム効用理論に基づく Nested Logit モデ

ルで記述した場合の最適混雑料金について議論する。本章では、最適化の目的関数に Yang⁵¹²⁾と同様な考えに基づく社会的純便益を設定する。これらは、利用者の総期待最大効用と供給者余剰の和の最適化の問題であり、経済効率性の最適化をもたらす混雑料金といえる。しかしながら、経済性の効率だけではなく、環境負荷とのバランスという視点も重要であろう。したがって、以上の最適化問題に、環境負荷の制約を課したモデルも提示し、それらを実現するための料金設定について議論する。環境負荷も考慮した料金設定法は、Nagurney (2000)⁵¹³⁾によっても示されているが、そこで用いられているのは、利用者の確定的な選択のみを仮定したものであり、それらを拡張したモデルを提示する。

5.3 モデル

5.3.1 定式化

Nested Logit モデルと統合的なネットワーク均衡配分モデルは、数多くの種類があり、大規模な都市圏に適用可能なアルゴリズムも開発されている。これらの各モデルに対応した最適混雑料金政策を考えることが可能であるが、ここでは、まず手段選択と経路選択を Nested Logit モデルで記述する場合の最適混雑料金を議論する。また、各モードにおいて混雑が発生するが、そのリンクコスト関数は、モード間で独立であり、相互干渉は無いものとしよう。

まず、利用者の行動は、ランダム効用理論に基づいて、手段選択を上位、経路選択を下位の階層とする以下の Nested Logit モデルで記述できると仮定する。

$$\Pr(k | rs, m) = \frac{\exp(-\theta_1^m c_{k,m}^{rs})}{\sum_k \exp(-\theta_1^m c_{k,m}^{rs})}, \quad \forall r, s, m, k \quad (5.2)$$

$$\Pr(m | rs) = \frac{\exp[-\theta_2 (S_m^{rs} + C_m^{rs})]}{\sum_m \exp[-\theta_2 (S_m^{rs} + C_m^{rs})]}, \quad \forall r, s, m \quad (5.3)$$

$$S_m^{rs} = -\frac{1}{\theta_1^m} \ln \sum_k \exp(-\theta_1^m c_{k,m}^{rs}), \quad \forall r, s, m \quad (5.4)$$

ここで、 $\Pr(k|rs,m)$ は、OD ペア rs 、手段 m の条件のもと経路 k を選択する確率、 $\Pr(m|rs)$ は、OD ペア rs の条件で手段 m を選択する確率である。 $c_{k,m}^{rs}$ は、OD ペア rs 間、手段 m の経路 k の金銭単位交通費用、 S_m^{rs} は、OD ペア rs 間、手段 m の経路選択に関する金銭単位の期待最小費用、 θ_1^m, θ_2 は、それぞれ経路選択、手段選択に関するパラメータ、 C_m^{rs} は、手段 m に固有の非効用とする。

ネットワーク上のフローの均衡条件と, 上記 Nested Logit モデルを同時に満足する解は, 周知のように次の等価最適化問題の解として求められる.

$$\min Z_1(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = \sum_{m,a} \int_0^{x_a^m} t_a^m(\omega) d\omega - \sum_{r,s,m} q_m^{rs} H_m^{rs} - \sum_{r,s} q_{rs} H_{rs} + \sum_{r,s,m} q_m^{rs} C_m^{rs} \quad (5.5a)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_m q_m^{rs} = q_{rs}, \quad \forall r, s \quad (5.5b)$$

$$\sum_k f_{k,m}^{rs} = q_m^{rs}, \quad \forall m, r, s \quad (5.5c)$$

$$x_a^m = \sum_{r,s,k} f_{k,m}^{rs} \delta_{a,k}^{m,rs}, \quad \forall m, a \quad (5.5d)$$

$$q_{rs}^m \geq 0, f_{k,m}^{rs} \geq 0, x_a^m \geq 0, \quad \forall m, r, s, k, a \quad (5.5e)$$

ここで,

$$\begin{aligned} H_m^{rs} &= -\frac{1}{\theta_1^m} \sum_k \Pr(k | rs, m) \ln \Pr(k | rs, m) \\ &= -\frac{1}{\theta_1^m} \sum_k \frac{f_{k,m}^{rs}}{q_m^{rs}} \ln \frac{f_{k,m}^{rs}}{q_m^{rs}}, \quad \forall r, s, m \end{aligned} \quad (5.6a)$$

$$\begin{aligned} H_{rs} &= -\frac{1}{\theta_2} \sum_m \Pr(m | rs) \ln \Pr(m | rs) \\ &= -\frac{1}{\theta_2} \sum_m \frac{q_m^{rs}}{q_{rs}} \ln \frac{q_m^{rs}}{q_{rs}}, \quad \forall r, s \end{aligned} \quad (5.6b)$$

q_{rs} : OD ペア rs 間 OD 交通量

q_m^{rs} : 手段 m の OD ペア rs 間 OD 交通量

$f_{k,m}^{rs}$: 手段 m の OD ペア rs 間経路 k の交通量

x_a^m : 手段 m リンク a の交通量

$t_a^m(x_a^m)$: 手段 m リンク a のリンクコスト関数(金銭単位)

$\delta_{a,k}^{m,rs}$: リンク経路接続行列

この最適化問題の解の一意性の十分条件を求めておこう. 式(5.5a)の第一項が狭義凸関数となる条件より,

$$\frac{\partial t_a^m(x_a^m)}{\partial x_a^m} > 0, \quad \forall m, a \quad (5.7)$$

が得られ, それ以外の項が狭義凸関数となる条件より,

$$\theta_1^m > \theta_2 > 0, \quad \forall m \quad (5.8)$$

が得られる．一般的なリンクコスト関数は，式(5.7)を満たし，ランダム効用理論と整合的な Nested Logit モデルは，通常，式(5.8)を満たすため，本モデルの解 (\mathbf{x}, \mathbf{q}) は一意に定まる．

5.3.2 目的関数の経済学的意味と最適課金

さて，式(5.5a)の目的関数は，一般に経済学的意味づけを全く持たないものである．しかし，各リンクに限界費用原理に従う料金が課せられている場合，この値は経済学的意味を持つことになる．これを以下で示そう．まず，次のような良く知られた関係式を確認しておく．双対理論によれば，ある経路費用 \mathbf{c} についてロジットモデルによる経路選択確率が定まる場合，次式が成立する⁵¹⁴．

$$S_m^{rs} + H_m^{rs} = \sum_k \Pr(k | rs, m) c_{k,m}^{rs}, \forall r, s, m \quad (5.9)$$

$$\therefore \sum_{r,s,m} q_m^{rs} S_m^{rs} + \sum_{r,s,m} q_m^{rs} H_m^{rs} = \sum_{r,s,m,k} f_{k,m}^{rs} c_{k,m}^{rs} \quad (5.10)$$

同様にして，手段選択に関して次式が成立する．

$$S_{rs} + H_{rs} = \sum_m \Pr(m | rs) (S_m^{rs} + C_m^{rs}), \forall r, s \quad (5.11)$$

$$\therefore \sum_{r,s} q_{rs} S_{rs} + \sum_{r,s} q_{rs} H_{rs} = \sum_{r,s,m} q_m^{rs} (S_m^{rs} + C_m^{rs}) \quad (5.12)$$

ここで， S_{rs} は，手段選択に関する金銭単位期待最小費用，

$$S_{rs} = -\frac{1}{\theta_2} \ln \sum_m \exp[-\theta_2 (S_m^{rs} + C_m^{rs})], \forall r, s \quad (5.13)$$

である．ここで，式(5.10),(5.12)の両辺を足し合わせると，

$$\begin{aligned} & \sum_{r,s} q_{rs} S_{rs} + \sum_{r,s,m} q_m^{rs} H_m^{rs} + \sum_{r,s} q_{rs} H_{rs} - \sum_{r,s,m} q_m^{rs} C_m^{rs} \\ &= \sum_{r,s,m,k} f_{k,m}^{rs} c_{k,m}^{rs} = \sum_{m,a} x_a^m t_a^m(x_a^m) \end{aligned} \quad (5.14)$$

が成立することになる．

ここで，リンクコスト関数を具体的に，リンク所要時間の金銭換算値 $\hat{t}_a^m(x_a^m)$ とリンク料金 $p_a^m(x_a^m)$ の和とおこう．

$$t_a^m(x_a^m) = \hat{t}_a^m(x_a^m) + p_a^m(x_a^m) \quad (5.15)$$

そして，リンク料金が限界費用原理で定められるとする．

$$p_a^m(x_a^m) = x_a^m \frac{\partial \hat{t}_a^m(x_a^m)}{\partial x_a^m} \quad (5.16)$$

このとき、式(5.5a)の目的関数は、式(5.14)、(5.15)、(5.16)を用いると、

$$\begin{aligned} Z_1(\mathbf{x}, \mathbf{q}) &= \sum_{m,a} \int_0^{x_a^m} [\hat{t}_a^m(\omega) + \omega \frac{\partial \hat{t}_a^m(\omega)}{\partial \omega}] d\omega + \sum_{rs} q_{rs} S_{rs} \\ &\quad - \sum_{m,a} x_a^m [t_a^m(x_a^m) + p_a^m(x_a^m)] \\ &= \sum_{rs} q_{rs} S_{rs} - \sum_{m,a} x_a^m p_a^m(x_a^m) \end{aligned} \quad (5.17)$$

となり、結局、式(5.5)の最適化問題は、

$$\max Z_2(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = - \sum_{rs} q_{rs} S_{rs} + \sum_{ma} x_a^m p_a^m(x_a^m) \quad (5.18)$$

subject to (5.5b) ~ (5.5d)

となる。ここで、 $Z_2(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = -Z_1(\mathbf{x}, \mathbf{q})$ とおいている。この目的関数、右辺第一項は、利用者の行動モデルと整合的な利用者余剰であり、第二項は、料金収入すなわち供給者余剰となる。つまり、最適化問題は、社会的余剰 Z_2 の最大化に等しくなる。すなわち、限界費用原理は、社会的余剰の最大化をもたらすことが簡単に証明される。結局、固定需要配分の場合、および独立型の需要関数を用いた弾性需要配分の場合と全く同様に、各リンクに限界料金を課すことにより、各自の効用最大化行動が、社会的余剰の最大化につながる事が分かる。注意すべきは、利用者余剰を、行動モデルと整合的な値で定めている点である。

5.3.3 システム最適配分

社会的余剰の最大化である式(5.18)は、一般に、限界費用課金が課されていないくとも、式(5.14)、(5.15)を用いて、次のようにも書き直せる。

$$\min Z_3(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = \sum_{m,a} x_a^m \hat{t}_a^m(x_a^m) - \sum_{r,s,m} q_m^{rs} H_m^{rs} - \sum_{r,s} q_{rs} H_{rs} + \sum_{r,s,m} q_m^{rs} C_m^{rs} \quad (5.19)$$

subject to (5.5b) ~ (5.5d)

上記最適化問題は、一般に Nested Logit 型システム最適配分モデルと呼べるものである。この式と式(5.5)と比較すると、その違いは、第一項のみであることが分かる。この差は、固定需要型あるいは需要変動型の利用者均衡配分とシステム最適配分の比較において生じていた差と同様であることが確認できる。

この社会的余剰が最大となる解 $(\mathbf{x}^{so}, \mathbf{q}^{so})$ は、既存の Nested Logit 型確率的利用者均衡モデルのアルゴリズムにおいて、リンクコスト関数を、式(5.15)、(5.16)

で置き換えれば容易に求めることができる。すなわち、大規模なネットワークにおいても効率的なアルゴリズムが利用できる。また、この解からリンク交通量、限界所要時間の値を計算しておけば、最適なリンク混雑料金パターン $\{p_a^{m*}\}$ を決定することができる。また、手段別 OD パターン $\{q^{so}\}$ は、最適手段分担を実現する解と解釈できる。

5.3.4 課金解の一意性の政策含意

さて、社会的余剰が最大となる解 $(\mathbf{x}^{so}, \mathbf{q}^{so})$ が一意となる十分条件を求めてみよう。式(5.19)の第一項が狭義凸関数となる条件より、

$$2 \frac{\partial \hat{t}_a^m(x_a^m)}{\partial x_a^m} + x_a^m \frac{\partial^2 \hat{t}_a^m(x_a^m)}{\partial x_a^m{}^2} > 0, \quad \forall m, a \quad (5.20)$$

が得られ、それ以外の項の条件からは、式(5.8)が得られる。式(5.20)は、一般的なリンクコスト関数の場合に成立し、前述したように式(5.8)も満たされる。したがって、社会的余剰が最大となる交通量パターン $(\mathbf{x}^{so}, \mathbf{q}^{so})$ は、一意に定まる。

しかしながら、社会的余剰が最大となる料金パターン $\{\mathbf{p}^*\}$ は、一意ではない。式(5.16)で示される限界費用料金は、解の一つに過ぎない。このことは、単純な 1OD2 リンクの場合(リンク番号を 1,2 で区別)について考えてみれば容易に確認できる。限界費用料金は、2 リンク共に、各リンクの限界費用に等しい料金 p_1^* , p_2^* を課すことである。しかし、利用者の行動モデルにおいては、通常 2 リンク間の費用差のみが区別されるため、 $p_1 - p_2 = p_1^* - p_2^*$ (=定数)を満たす任意の料金パターン (p_1, p_2) によって全く同一の交通量パターン (x_1^{so}, x_2^{so}) が実現しうる。また、これらのパターンに対して社会的余剰は常に最大になっている。

最適リンク料金パターンが一意ではないということは、すべてのリンクにおける課金が不可能でも、何らかの課金政策の組み合わせで、社会的に最適な状態が実現する可能性が示唆され、現実の政策立案に重要な視点を提供しうる。この観点から Hearn and Ramana(1998)⁵¹⁵⁾, Hearn and Yildirim (2002)⁵¹⁶⁾や Dial(1999)⁵¹⁷⁾らは、社会的余剰の最大化を満たした課金解集合から課金収入が最小化されるもの、課金位置数を最小化するものなど、別の基準をも同時に満たす解の算出法について述べている。ただし、彼らの研究は、確定的なモデルを対象としたものである。

5.3.5 モデルの一般化

以上と全く同様な議論は, *Nest* の上位レベルに手段選択以外を想定する場合, 選択レベルを増やした場合にも当然成立する. *Nest* の上位を時刻選択モデルとおいた場合にも, フローモデルとして時間帯間の相互干渉を無視したものを利用するならば, 同様な議論が展開できる. この場合, 以上のモデルにおいて手段 m の添え字を時間帯 m と読み替えればよい. また, 目的地選択との統合を行い, さらに, 例えば赤松, 半田(1996)⁵¹⁸⁾のモデルのように住宅立地均衡モデルとも統合した場合にも, 限界費用課金は, 利用者と家主の行動モデルと整合的な社会的余剰の最大化をもたらすことが示せる. この場合の, 最適 OD パターン $\{q^{so}\}$ は, 最適立地配置などの議論における重要な参照点を与えることになる.

最近, Bellei, *et al.*(2002)⁵¹⁹⁾は, 以上の議論をさらに一般化して, 利用者の行動モデルが複数の利用者クラスで構成されたランダム効用理論に従う任意のモデル^{xii)}で, リンクコスト関数が相互干渉を表現する場合も含めた最適課金について, 不動点問題を用いた議論を展開している. そして, 最適化の目的関数を, 本章と同様に行動モデルと整合的な利用者余剰と料金収入の和とおいた場合, 限界費用原理が最適課金解の必要条件を満たす解の一つであることを証明している. また, 最適交通量パターンが一意であれば, 限界費用原理は最適課金解の十分条件をも満たした解の一つであることも示した. 複数の利用者クラスの考慮とは, 具体的には, 自動車キャプティブ層の存在をも許容するものであり, 任意のランダム効用理論に従うモデルとは, **Cross-Nested Logit** などの相当多くの行動モデルが含まれており, 限界費用原理が現実的な緩い仮定の下でも成立することが示されたといえる.

本章の議論は, Bellei, *et al.*(2002)⁵¹⁹⁾によって一般に証明されることになった事項の特殊例に分類される. ただし, 本章は, モデルの等価最適化問題が構成できる場合について, 直感的に理解のしやすい, 分かりやすい証明を行った点に意義があると考えられる.

5.4 現実都市圏での試算例

前節の知見を生かした政策評価の例として, 東京都心部におけるロードプライシングの導入評価を, 効率性という最も単純な一つの軸上のみで評価した例を以下に示す. この政策の既存の評価事例としては, 課金システム, 課金額を仮に設定した場合の評価が行われているのみ(例えば, 円山ら, 2001, 2002; 東京

^{xii)} 厳密には, 所得の限界効用が一定で, 経路費用に対して線形型の効用関数を想定する必要がある.

都, 2001)^{520), 521), 522)}で, 最適な課金額の設定法, さらには, 設定した政策の最適解との乖離という観点からの評価は, 行われていない. また, 最近, Boyce, *et al.*(2002)⁵²³⁾は, シカゴ都市圏を対象に構築した分布・分担・配分統合モデルを用いて, 本章と同様に現実の大規模都市圏で限界費用課金を実行した場合の議論を展開している. ただし, 彼らは, 限界費用課金を賦課した場合に, システムがどのような状況になるのかの考察が不十分で^{xiii)}, 単に様々な指標での比較を行うにとどまっている.

以下では, 第3章で東京都市圏を対象に構築した Nested Logit 型確率的利用者均衡モデル⁵²⁴⁾の一部を用いて, 現状の料金制度(高速道路, 鉄道)の下での社会的余剰と, 最適ロードプライシングが実行できた場合の社会的余剰を計算する. その後, 現実には構想されている課金政策³²²⁾を実施した場合の社会的余剰を計算し, それらの値を比較する. 朝のピーク時の3時間帯(7~10時)を対象に, 自動車と鉄道の混雑を明示した分担配分統合モデルを用いる. ゾーン数は H10 東京 PT 調査中ゾーン 144, ネットワークは, 道路約 23,000 リンク, 鉄道約 5,000 リンクからなる. 利用したリンクコスト関数を表-5.1 にまとめる. 自動車のリンクコスト関数は混雑による所要時間の増加を表現する通常の間数であるが, 鉄道のリンクコスト関数は, 既存研究⁵²⁶⁾で推定された鉄道車内の混雑による乗客の不効用を表現するものである. また, Nested Logit モデルのパラメータは $\theta_1^m = \infty$ ^{xiv)}, $\theta_2 = 0.0004$ (/円)を用いている. これらの条件下で, 現状再現性は, 道路のリンク交通量について $R=0.71$, 鉄道のリンク交通量について $R=0.92$ が得られており一定の精度を確認している.

表-5.1 リンクコスト関数の関数形と主要パラメータ

	関数形	主要パラメータ
自動車リンク	BPR 関数 [松井式] ⁵²⁵⁾ $t_a^{car} = t_a^0 [1 + \alpha (x_a^{car} / Q_a^{car})^\beta]$ t_a^0 : 自由走行時間, Q_a^{car} : 時間交通容量	$\alpha = 0.4 \sim 0.54$ $\beta = 2.2 \sim 3.3$ (道路種別毎に設定)
鉄道 駅間 リンク	[家田式] ⁵²⁶⁾ $t_a^{rail} = t_a^0 [1 + \alpha (x_a^{rail} / Q_a^{rail})^\beta]$ t_a^0 : 乗車時間, Q_a^{rail} : 乗車定員	$\alpha = 0.019$ $\beta = 4.52$ (路線毎一律)

注) 上記の所要時間単位の間数を時間価値 50 (円/分)により金銭単位に変換して利用している.

xiii) 本章と同様な議論を展開すれば, 限界費用課金が彼らのモデルと整合的な社会的余剰を最大化することが明らかになるものと予想される.

xiv) 確定的な経路選択を仮定している. これは, 確率的な経路選択を仮定する際に生じる計算アルゴリズム上の問題点(選択肢集合の設定法など)を回避するためである.

5.3 の議論から、限界費用課金を賦課した場合、都市圏全体の社会的余剰が最大になるという意味で最適な手段分担が達成され、その際の最適な手段分担率は、一意に定まることが分かっている。そこで、まずモデルから算出された自動車分担率の現状値と最適分担率を表-5.2 に示す。この表から、都心 23 区方向に向かう OD ペアでは、現状と最適分担率の差は大きくはないが、都心外を目的地とする OD ペアでは、現状よりも自動車分担率を下げ、鉄道への転換を図るべきことが分かる。この結果は、東京のピーク時においても、都心と逆方向に向かう鉄道の車内は空いており、それを効率的に利用すべきという観点から直感的にも理解されよう。

表-5.2 自動車分担率の現状と最適値

	現状	最適値	差
全体	38.2%	33.0%	5.2%
23 区外→23 区内 OD	10.6%	8.1%	2.5%
23 区内→23 区内 OD	22.5%	20.0%	2.5%
23 区内→23 区外 OD	50.0%	41.8%	8.3%
23 区外→23 区外 OD	59.3%	51.7%	7.6%

表-5.3 各種課金政策時における社会的余剰

シナリオ	社会的余剰 ($\times 10^6$ 円)	基準化値 ^{*)}
現状	10,473	0.0
最適課金	12,943	100.0
コードン課金 500 円	10,485	0.48
エリア課金 500 円	10,492	0.76
コードン課金 1000 円	10,496	0.90
エリア課金 1000 円	10,512	1.58
エリア課金 500 円+全域 3000 円	11,207	29.71
エリア課金 1000 円 +全域 3000 円	11,188	28.96
鉄道限界費用課金	11,798	53.65
鉄道限界費用課金 +エリア課金 1000 円	11,816	54.37
鉄道限界費用課金 +全域 1500 円	12,290	73.56

^{*)}現状を 0, 最適課金時を 100 と基準化した社会的余剰
コードン/エリア課金はいずれも環七・荒川地域を対象

表-5.3 には、対象時間帯における各種課金政策下における社会的余剰を示す。現状の高速料金制度、鉄道運賃制度下と比較すると、最適課金下では 25(億円/3h)程度の余剰が発生することが分かる。この最適課金下の社会的余剰の値は、いかなる政策を行っても、これ以上の余剰は見込めないという、政策立案上、重要な参照点となっている。

一方、現在構想されている環七・荒川地域を対象としたコードン課金、さらにエリア課金^{xv)}などを行った場合の社会的余剰の変化はわずかであり、最適課金

^{xv)} モデル内部では、コードン課金は、コードンラインを外部から横断するリン

によって達成される状態には程遠い。無論、これらの政策は、対象地域全体の社会的効率性のみを政策目標とするものではないため、この数値がこれら政策の有効性を否定するものではない。しかし、地域全体の効率性の観点では、課金対象地域を限定した場合の限界が伺える。

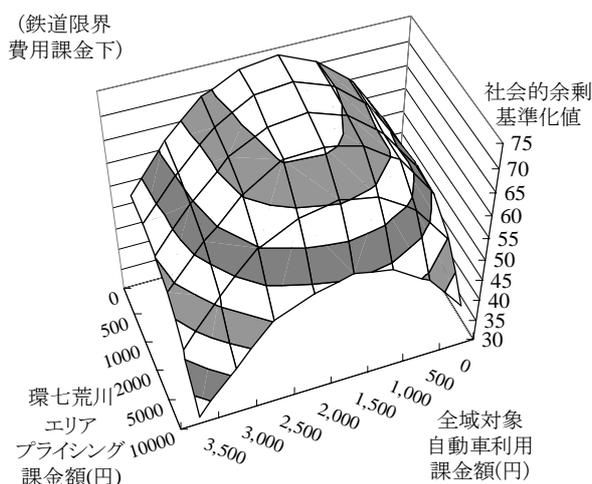


図-5.1 各種課金額の設定値と社会的余剰

そこで、以下では、政策の組み合わせで、最適課金時の社会的余剰を達成することを試みる。最適課金時の配分出力結果を精査すると、各自動車 OD トリップには 1000~5000 円程度の混雑課金が賦課されていることが分かった。そこで、全域で、OD 単位で自動車利用の度に課金することを考える。これらは、燃料税、車両税、駐車料金などを増加させた場合に想定する。

表-5.3 からは、これらとコドン、エリア課金の組み合わせで、社会的余剰の最適値と現状値の差の 30%程度を埋めることが出来ることが分かる。さらに、駅間の料金設定が可能な鉄道においては限界費用課金も自動車よりは実行が容易と考え、その実行を行った場合、さらに、以上の政策の組み合わせの結果も示す。これらの政策の組み合わせを試行錯誤した結果、鉄道限界費用課金+全域 1500 円の場合に、社会的余剰の最適値と現状値の差の 74%までの埋め合わせが可能となることが分かった^{xvi)}。図-5.1 には、鉄道限界課金下におけるエリア課金

クへの料金抵抗の付加、エリア課金は、それに加えてエリア内部のゾーン発コネクターにも料金抵抗を付加することで表現している。

^{xvi)} 自動車の課金額を OD ペアごとに変化させれば、より最適値に近づけることも可能であろう。ここで示した一律課金は政策の実行の容易性を勘案したものである。

額と全域対象課金額の 2 変数に対しての社会的余剰の変化を示す。この図からは、都市圏全体の社会的余剰の最大化のためには、エリア課金は必ずしも必要でないという解釈も得られるが、これは、鉄道の混雑の激しいピーク時を対象としたことと、利用者の手段と経路の変更のみを許すモデル構造になっていることが一因である。同様な分析を分担・配分統合モデルのみならず、分布・分担・配分統合モデル、あるいは出発時刻選択との統合モデルで行えば、また異なった知見が得られよう。

なお、本論文では、供給者の行動を無視しているため、最適課金とは、混雑に関する外部不経済についての限界費用であり、供給費用に関しての限界費用は考慮に入っていない点にも注意が必要である。また、繰り返すが、現実の政策は、効率性という一つの軸上のみで評価されるような単純なものではないことは言うまでもない。社会的余剰を最適化する料金制度では、利用者と料金徴収主体との間、利用者 OD 間、利用者階層間の公平性の問題が生じている。これらは基本的に、課金収入の配分方略で解決可能な問題とされるが、本章の対象外であるこれらの点についての考察も深める必要があり、これは、第 6 章⁵²⁾で行われる。

また、特に、現実には本章の分析では無視している局所的な大気汚染、騒音等の問題解決をも目的として課金額の設定を行う場合が多い。次章では、この場合にも適用できる展開を示しておく。

5.5 環境負荷制約の考慮への展開

社会的余剰の最大化の際に環境負荷を考慮した場合を考えておこう。ネットワーク、利用者の行動仮説は 5.3 と同等とする。この場合、二つの考え方がある。

一つの考え方は、環境汚染による外部費用を計測し、その限界費用を課するというピグー税である。もう一つは、環境基準を設定しそれを達成するように料金を設定するというボーモル・オーツ税の考え方である。後者は、次善の料金設定となる。しかし、環境外部費用の計測には、未だ不確実性が大きい部分があり、現実には、ボーモル・オーツ税の考え方による課金政策が実行しやすいと考えられる。

5.5.1 ピグー税

各リンクにおける環境負荷の排出量の外部費用の金銭換算値が $u_a^m(x_a^m)$ として

計測できているとしよう。環境負荷排出量はそのリンクの交通量の単調増加関数となるという仮定は妥当であろう。

$$\frac{\partial u_a^m(x_a^m)}{\partial x_a^m} > 0, \quad \forall m, a \quad (5.21)$$

ここで、各リンクに、次の料金を課す。

$$p_a^m(x_a^m) = x_a^m \frac{\partial \hat{t}_a^m(x_a^m)}{\partial x_a^m} + \frac{\partial u_a^m(x_a^m)}{\partial x_a^m} \quad (5.22)$$

すると、5.3.2 と全く同様にして、式(5.5a)の目的関数は、

$$\max Z_4(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = -\sum_{rs} q_{rs} S_{rs} + \sum_{ma} x_a^m p_a^m(x_a^m) - \sum_{ma} x_a^m u_a^m(x_a^m) \quad (5.23)$$

と変形される。この目的関数第三項は、各リンクからの環境負荷の排出総量の外部費用である。すなわち、環境負荷も考慮に入れた社会的余剰が最大化されることになる。なお、この場合も、5.3 と同様に、交通量パターンは一意であるが、料金パターンは必ずしも一意ではない。

5.5.2 ポーモル・オーツ税

最も単純な状況として、各リンクにおける環境負荷の排出原単位が e_a^m で一定であると仮定しよう。リンクから排出される負荷量は、 $x_a^m e_a^m$ で与えられる。ネットワーク全体から発生するある種の環境負荷がある一定の基準を満たしつつ、社会的余剰が最大化されるような料金設定法を考える。以上のような状態は、数学的に書けば、

$$\max Z_2(\mathbf{x}, \mathbf{q}) = -\sum_{rs} q_{rs} S_{rs} + \sum_{ma} x_a^m p_a^m(x_a^m) \quad (5.24)$$

subject to (5.5b) ~ (5.5d) and

$$\sum_{m,a} e_a^m x_a^m \leq E \quad (5.25)$$

となる。ここで、 E は外生的に与える排出規制量総量である。例えば、CO₂ 排出総量の1990年比較の6%減といった値である。目的関数 Z_2 を Z_3 に置き換えてから、最適条件を求めて整理すると、次式が得られる。

$$f_{k,m}^{rs} = q_m^{rs} \frac{\exp(-\theta_1^m \tilde{c}_{k,m}^{rs})}{\sum_k \exp(-\theta_1^m \tilde{c}_{k,m}^{rs})}, \quad \forall r, s, m, k \quad (5.26)$$

$$q_m^{rs} = q_{rs} \frac{\exp[-\theta_2(\tilde{S}_m^{rs} + C_m^{rs})]}{\sum_k \exp[-\theta_2(\tilde{S}_m^{rs} + C_m^{rs})]}, \quad \forall r, s, m \quad (5.27)$$

$$\tilde{S}_m^{rs} = -\frac{1}{\theta_1^m} \ln \sum_k \exp(-\theta_1^m \tilde{c}_{k,m}^{rs}), \forall r, s, m \quad (5.28)$$

$$\tilde{c}_{k,m}^{rs} = \sum_{m,a} [t_a^m(x_a^m) + x_a^m \frac{\partial t_a^m(x_a^m)}{\partial x_a^m} + \lambda e_a^m] \delta_{a,k}^{m,rs}, \forall r, s, m, k \quad (5.29)$$

ここで、 λ は、環境制約条件(5.25)に対応したラグランジュ乗数である。したがって、各利用者の効用最大化行動の結果が環境負荷制約を満たしながら社会的余剰の最大化を達成するためには、各リンクに、

$$\tilde{p}_a^m = x_a^m \frac{\partial t_a^m(x_a^m)}{\partial x_a^m} + \lambda e_a^m \quad (5.30)$$

に等しい額の、料金を課せばよいことになる。この式の第一項は伝統的な混雑料金であり、第二項が環境負荷制約を達成するためのボーモル・オーツ税と解釈できる。直感的に説明すれば、環境制約が厳しければ厳しいほど、 λ は大きな値をとり、各リンクの排出税は増加する。排出税は、各リンクの排出原単位に比例するべきこともわかる。また、あまりにも厳しい基準では、その基準を達成する料金政策が存在し得ないことも理解できよう。

以上のモデルは、付加的な制約条件付きネットワーク均衡モデル(e.g. Larsson and Patriksson, 1998, 1999; Ferrari, 1995, 1999, 2002)^{528),529),530),531),532)}に他ならない。このモデルでは、 λ を効率的に求める手法が課題となる。

これら環境負荷も考えた料金政策を具体的に議論するためには、環境負荷の外部費用の計測、大規模ネットワークにも利用できる計算法の開発が必要である。したがって、現実都市におけるこれらの試算は今後の課題とし、本章では、定式化を示すにとどめておく。

5.6 本章の結論

本章では、Nested Logit 型ネットワーク均衡条件下の最適混雑料金の設定法を示した。最適化の目的関数を、行動モデルと整合的な社会的余剰の最大化と置くことで、既存の限界費用原理がそのまま当てはまることが示された。固定需要モデル、独立型需要関数を用いた変動需要型モデルにおいて示されていたことを、本章では、Nested Logit 型統合モデルにおいても、あてはまることを確認した意義がある。独立型需要関数を用いた変動需要型モデルでは需要関数をアドホックに設定する必要があったが、Nested Logit 型統合モデルの場合は、利用者の行動を明示的に扱ったモデル推定が可能であり、現実都市への適合度が増す利点がある。本章では、東京都市圏の現実の大規模ネットワークを対象にモデルを適用し、最適混雑料金の試算結果も示した。現実計画されている東京

都心部へのロードプライシング政策によって得られる社会的余剰の増加は、最適混雑課金のそれと比較すると、ごくわずかなものであることが示された。しかしながら、この最適課金政策と現実政策の差は、燃料税、車両税、駐車料金などの関連政策の組み合わせで縮めうることを示唆される分析結果も示した。

現実都市における混雑料金政策評価においては、仮に課金額を設定した場合に、交通状態がどのように変化するかを記述的に示すモデルが数多く存在している。本章で示した **Nested Logit** 型確率的利用者均衡モデルに基づく政策評価法は、複数の交通手段を含むネットワーク上での利用者の行動を対象としており記述性に優れながらも、社会的余剰を最大化するフローパターン・混雑料金を算出可能であり、規範的な分析との関連が明確になっている特徴がある。既存のモデルには実現できない政策評価の枠組みを例示したといえる。

なお、本章の趣旨からずれるので詳しくは説明しないが、独立型需要関数を用いた変動需要型ネットワーク均衡モデルで **Mohring** の定理 (**Mohring and Harwitz, 1962**)^{533,xvii} が成立することを証明した **Yang and Meng (2002)**⁵³⁴ と同様なアプローチで、本章のモデルでもその定理が成立することを証明できる。

今後は、システマティックに次善解を算出する方法 (e.g. **Yang, et al. 2002; Verhoef, 2002**, ほか第2章で紹介)^{535,536} への展開、また動的な限界費用理論 (桑原, 2002)⁵⁰⁶ との統合が課題として挙げられる。

^{xvii}) 詳しくは、第2章で説明している。

第6章 ロードプライシングの所得逆進性とその緩和策

6.1 はじめに

6.1.1 研究の背景と目的

交通渋滞の緩和と大気汚染問題への対応を目的として、各種の TDM 施策が検討されている。ロードプライシングは、一連の TDM 施策のなかでも特に注目される経済的誘導施策であり、東京都心部への導入も検討されている段階にある^{537),538)}。本研究では、このロードプライシング政策が、低所得者に対して相対的に大きな影響を与えること、すなわち所得逆進的な問題をもつとされていることに着目し、その緩和策を探ることを目的とする。

まず、この所得間公平性を定量的に評価できる分析手法として、利用者の手段と経路の選択行動とネットワークでの混雑を統合的に考慮しつつ、個人間の異質性をも考慮しうるモデルを提示する。このモデルを用いて、単純なネットワークにおいて、ロードプライシング政策が所得逆進性を持つことを確認し、その問題の解決策について議論する。最後に、東京都市圏の自動車・鉄道ネットワークに対してモデルを適用し、現実の政策に関連した逆進性の数値を具体的に提示し、その緩和策の有効性、留意すべき点を議論する。

6.1.2 既存研究のレビュー

ロードプライシングは逆進的な政策であり、所得配分上望ましくないという意見は古くから述べられており(太田, 1990; 山田, 2001)^{539),540)}、関連して数多くの研究がなされている。例えば、個人間の異質性を考慮したボトルネックモデルによる理論研究(Cohen, 1987; Arnott, *et al.* 1994)^{541),542)}、仮想状況を想定した数値実験(柳ら, 1999)⁵⁴³⁾、現実都市での試算事例(Anderson and Mohring, 1997; 室町, 2001; Kaneko, *et al.* 2001)^{544),545),546)}、課金収入の用途を論じたもの(Small, 1992)⁵⁴⁷⁾が挙げられる。しかしながら既存研究は、対象としているネットワークが単純である場合や、利用者の分類が高所得者と低所得者の2区分にとどまっている場合が多い。また、Teubel(2000)⁵⁴⁸⁾のように混雑現象との整合性への配慮が不十分なモデルを用いた分析例も少なくない。

最近、Yang, *et al.*(2002)⁵⁴⁹⁾は、利用者の異質性を考慮したマルチクラス型のネットワーク均衡モデルにより BOT 型民活方式による有料道路整備の評価法を示

している．本研究は，Yang, *et al.* (2002)⁵⁴⁹⁾のモデルを手段選択も含めた形式に拡張し，実際のネットワークにおいても議論を進めるものである．

6.2 モデルの定式化

ロードプライシングによる利用者の行動変化のうち本研究では，手段と経路の変更に焦点を絞る．ランダム効用理論に従って，利用者の手段と経路の選択行動を記述する．利用者は所得階層ごとにクラスに分けられており，クラス i の利用者は，次の効用関数 $U_{m,k}^i$ を最大化する手段 m 経路 k を選択すると仮定する．

$$U_{m,k}^i = V_m^i + V_{m,k}^i + \varepsilon_m^i + \varepsilon_{m,k}^i, \quad \forall i, m, k \quad (6.1)$$

ここで， V_m^i は，経路によらず交通手段 m について一定である確定効用項， $V_{m,k}^i$ は，手段と経路の組み合わせによって変化する確定効用項， ε_m^i ， $\varepsilon_{m,k}^i$ は，それぞれ i.i.d.ガンベル分布に従う手段選択と経路選択に関する誤差項とする．これらの条件の下で，手段と経路の同時選択確率は，一般に Nested Logit モデルで記述される．本章では，確定効用項を次のように時間単位の一般化費用の形式で特定化する．

$$V_{m,k}^i = -(t_{m,k}^i + p_{m,k}^i / \tau_i), \quad V_m^i = -C_m^i, \quad \forall i, m, k \quad (6.2)$$

ここで， $t_{m,k}^i$ ， $p_{m,k}^i$ は，それぞれ利用者クラス i の手段 m 経路 k の所要時間と料金， τ_i は利用者クラス i の時間価値， C_m^i は手段に固有の非効用とする．さらに，モデルの単純化のため，経路選択は確定的，すなわち $\varepsilon_{m,k}^i = 0$ とおき，手段選択について， ε_m^i はクラス i 間で同一と仮定する．すると利用者クラス i の手段選択確率は，

$$\Pr(m, i) = \frac{\exp[-\theta(t_m^i + p_m^i / \tau_i + C_m^i)]}{\sum_m \exp[-\theta(t_m^i + p_m^i / \tau_i + C_m^i)]}, \quad \forall i, m \quad (6.3)$$

で与えられる．ここで， t_m^i ， p_m^i は，それぞれ利用者クラス i の手段 m の最小一般化費用経路の所要時間と料金で， θ はスケールパラメータである．さらに，一般に所要時間は，ネットワーク上の混雑状況に応じて変化するため，以上のような利用者の選択行動と，その結果として生じる混雑現象の相互作用を記述することが必要となる．これらは，マルチクラス型のネットワーク均衡モデルとして定式化できる．このモデルは，以下に示すように，等価な最適化問題が構成可能で，解の一意性が証明でき，現実の大規模なネットワークにおいても，効率的に均衡解を求めることができる．

モデルの枠組みは、基本的に Yang, *et al.*⁵⁴⁹⁾のモデルと同等であるが、彼らのモデルにおける需要関数に交通手段分担モデルを導入し、複数の交通手段を含むネットワークでの均衡状態を考える。手段別のネットワークが独立に、利用者均衡状態にあると仮定すると、今回のモデルは、以下の最適化問題として定式化される。

$$\min_{\mathbf{x}, \mathbf{q}} \sum_{m,a} \int_0^{x_a^m} t_a^m(\omega) d\omega + \sum_{i,m,a} p_a^m x_{a,i}^m / \tau_i + \frac{1}{\theta} \sum_{i,m,r,s} q_{rs}^{m,i} \ln q_{rs}^{m,i} / q_{rs}^i + \sum_{i,m,r,s} q_{rs}^{m,i} C_{rs}^{m,i} \quad (6.4a)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_m q_{rs}^{m,i} = q_{rs}^i, \quad \forall i, r, s \quad (6.4b)$$

$$\sum_k f_{rs,k}^{m,i} = q_{rs}^{m,i}, \quad \forall i, m, r, s \quad (6.4c)$$

$$x_{a,i}^m = \sum_{r,s,k} f_{rs,k}^{m,i} \delta_{a,k}^{i,m,rs}, \quad \forall i, m, a \quad (6.4d)$$

$$x_a^m = \sum_i x_{a,i}^m, \quad \forall m, a \quad (6.4e)$$

$$q_{rs}^{m,i} \geq 0, f_{rs,k}^{m,i} \geq 0, x_{a,i}^m \geq 0, \quad \forall i, m, r, s, k, a \quad (6.4f)$$

ここで、

- q_{rs}^i :利用者クラス i の OD ペア rs 間 OD 交通量
- $q_{rs}^{m,i}$:利用者クラス i の手段 m の OD ペア rs 間 OD 交通量
- $f_{rs,k}^{m,i}$:利用者クラス i の手段 m OD ペア rs 間経路 k の交通量
- $x_{a,i}^m$:利用者クラス i の手段 m リンク a の交通量
- x_a^m :手段 m リンク a の交通量
- $t_a^m(x_a^m)$:手段 m リンク a の所要時間リンクコスト関数
- p_a^m :手段 m リンク a の料金
- τ_i :利用者クラス i の時間価値
- $\delta_{a,k}^{i,m,rs}$:リンク経路接続行列

この問題は、凸最小化問題となり、一意な最適解をもつ。その最適解が満たすべき条件より、手段別ネットワークにおける利用者均衡条件と OD ペア毎の手段分担を表現するロジットモデル式(6.3)が導かれ、等価性も証明される。なお、この目的関数は $x_{a,i}^m$ について凸であるが、厳密には凸でないため、この利用者クラス i の手段 m リンク a の交通量 x_a^m についての解は、必ずしも一意ではない。したがって、モデルの出力結果の解釈の際には注意が必要である。この値についても一意の解を得る方法の一例として、今回確定的に扱った経路選択を確率的に扱う確率的利用者均衡モデルへの展開がある。

さて、以上のモデルにおいて、任意 OD 間のクラス i の利用者が経路と手段の選択行動によって得る最大効用 $\max U_{m,k}^i$ の期待値は、

$$E[\max U_{m,k}^i] = \frac{1}{\theta} \ln \sum_m \exp[-\theta(t_m^i + p_m^i/\tau_i + C_m^i)] \quad (6.5)$$

で与えられる。この期待最大効用の値は、利用者クラス i の平均的な効用水準を時間単位で表現している。この値は、一意の解をとるため分析に用いることに問題はない。なぜなら、ネットワーク上の各リンクの所要時間 $t_a^m(x_a^m)$ は、 x_a^m が一意であるため、一意の値をとり、またその集積である経路所要時間 t_m^i も一意となるためである。

本研究では、ある政策の実施によるこの効用値の変化が、低所得者クラスが高所得者クラスより不利な状況になる場合、その政策を所得逆進的であると定義して議論を進めることとする。なお、本章の分析は、交通市場のみに着目した部分均衡分析であり、他財への支出の変化も考慮した所得効果の議論は、分析の対象外となる。

6.3 時間価値分布の仮定

ここでは、前章で定式化されたモデルに組み込む所得階層の分布とその階層ごとの時間価値を求める。本研究では、最も単純に我が国における現実味のあるパラメータを得ることを目的として、所得接近法に従って時間価値を求めることとする。

まず、家計調査⁵⁵⁰⁾から得られる所得分布(平均値 710 (万円/年)、標準偏差 410 (万円/年))が対数正規分布に従っていると仮定する。労働時間が等しく法定労働時間 2,000(時間/年)であると仮定すれば、所得を労働時間で除して得られる時間価値 τ (円/分)も以下の対数正規分布に従うことになる。

$$f(\tau) = \frac{1}{\sigma\tau\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln \tau - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (6.6)$$

この分布のパラメータは、 $\mu=3.94$ 、 $\sigma=0.54$ と推定された。求められた時間価値の分布の概形および統計量を図-6.1 に示す。分布の平均値は、59.2(円/分)となり通常用いられている時間価値と同等な値になっている。この連続分布を前項の利用者クラス別のモデルに組み込むため、Yang, et al.⁵⁴⁹⁾と同様な方法で、分布を離散化する。本章では、利用者を時間価値により 20 のクラスに分ける。すなわち、利用者は各自の時間価値が 0~10, 10~20, ..., 190~200 (円/分)にしたがって区分され、各クラスでは、時間価値の区間平均値 5,10,...,195(円/分)を持つと仮

定する．時間価値が 0~200(円/分)の利用者は，図-6.1 の分布より，全人口の 99.4% を占めており，残りは無視できる．所得接近法に従う本研究の枠組みでは，高所得者クラスは，時間価値の高い利用者層，低所得者クラスは，時間価値の低い利用者層として表現される．

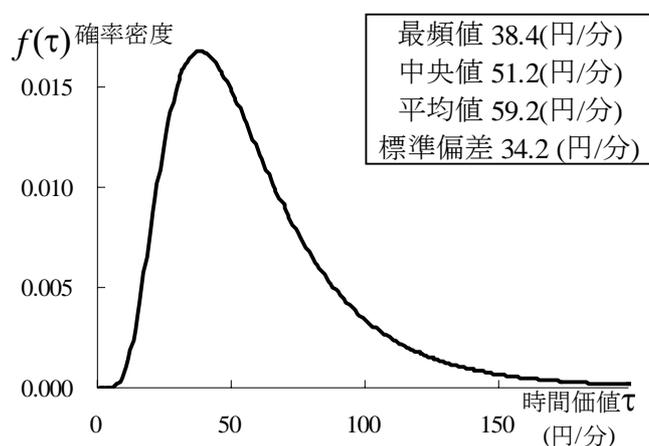


図-6.1 仮定された時間価値の分布

6.4 単純なネットワークにおける考察

ここでは，単純なネットワークにおけるモデルの挙動を調べることで，ロードプライシングの所得逆進性の確認とその緩和策に関する基礎的な考察を行う

6.4.1 設定条件

都心部への通勤交通を想定して，郊外部から都心部への OD ペア間に，図-6.2 のような鉄道路線 1 本と道路 2 本が存在すると仮定する．各施設のサービスレベルは，表-6.1 のように与える．道路においては，混雑が発生するが，鉄道車内において混雑は発生しないものと仮定する．また，自動車の乗車人員は 1.0(人/台)とする．

対象時間当たり郊外部から都心部に向けて 10,000 人の需要が発生し，それらの利用者は，6.3.で述べたような時間価値の分布をもつクラスに分類されており，6.2.で定式化した選択行動をとると仮定する．ロジットモデルのパラメータ $\theta=0.01$ ，非効用項 $C_m^i = 0$ とおく．

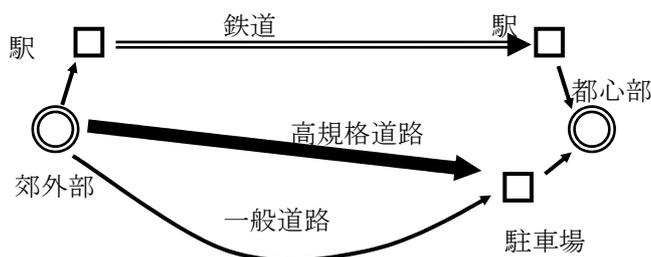


図-6.2 ネットワーク

表-6.1 サービスレベルの仮定

施設	自由走行時間 t_0	容量 C	料金	駐車料金
鉄道	30分 (一定)		200円	0円
高規格道路	10分 (BPR式)	2,000台	0円	1,000円
一般道路	20分 (BPR式)	4,000台	0円	1,000円

注) 各道路の所要時間は BPR 式 $t = t_0 \{1 + 0.15(x/C)^4\}$ にしたがって変動. x は, 各道路の対象時間における交通量. この他, 燃料費等の自動車の走行費用は無視する.

6.4.2 初期均衡状態

道路に課金がされていない表-6.1 の状況における初期均衡状態を求めると表-6.2-(1)のような均衡状態になる. 道路ネットワークにおいては, 利用者の最短経路選択行動の結果, 高規格道路に利用者が集中し, 高規格道路の所要時間は, 一般道と等しいレベルにまで下がった状態で, 利用者均衡状態となる. 料金を含めた利用者の負担する一般化費用は, 図-6.3 (左軸)に示すようになる. 時間価値の差により, 料金の効用に与える影響が異なるため, 低所得者層では, 鉄道の一般化費用が小さな値となり, 高所得者層では, 自動車の一般化費用が小さな値となる. 手段選択率は, これらの値を式(6.3)のロジットモデルに代入した値であり, 図-6.3 (右軸)のように, 高所得者ほど自動車分担率が高いという結果になる. 以上に述べた状況がすべてモデル内部で統合的に表現されているのが, 本章で利用しているマルチクラスネットワーク均衡モデルである. また, 高所得者ほど自動車分担率が高いという状況は, 一般的な現実の都市における状態を反映していると考えられる^{xviii)}.

^{xviii)} これらの結果は, 古典的な手段分担モデルである犠牲量モデルと類似した

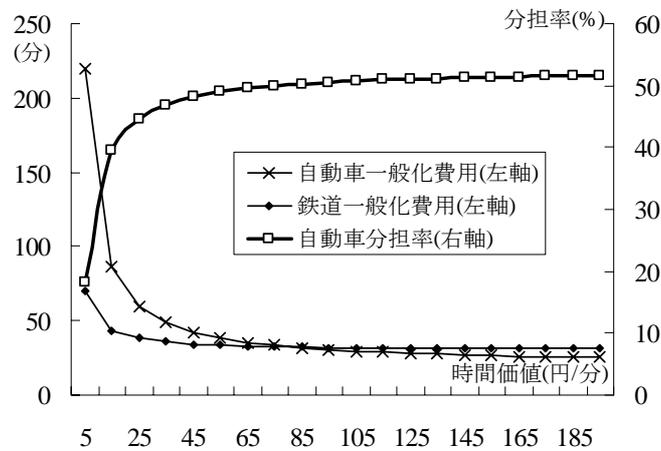


図-6.3 時間価値ごとの手段別一般化費用と分担率

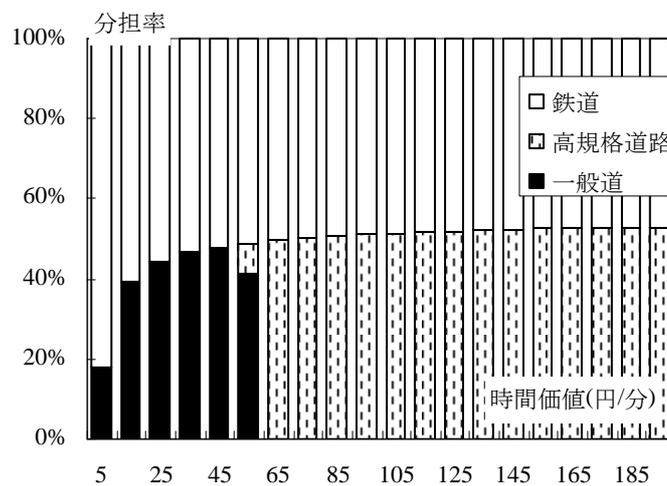


図-6.4 課金時(500円)における手段利用率

分析結果になっているが、本章のモデルは、確率的な手段選択と経路選択およびそれらの均衡状態をも同時に考慮しており、より一般的なモデルといえる。

6.4.3 課金下の均衡状態

高規格道路に500(円/台)課金することを考える。この状況では、均衡状態は表-6.2-(2)および図-6.4のように変化する。高規格道路の利用が課金により制限され、サービスレベルが維持される結果、自動車総所要時間は、初期状態よりも大幅に削減されている。ただし、利用者のクラス別の状況は図-6.4に示されるように、課金された高規格道路の利用者は高所得者が占め、低所得者は一般道路と鉄道に排除されている。この状況がマルチクラス均衡状態であることは次のように確認できる。時間価値が45円/分より低いクラスでは、高規格道路利用の一般化費用が一般道利用の一般化費用を上回るため、すべて一般道を利用する。時間価値が65円/分よりも高いクラスではその逆になる。時間価値が55円/分のクラスでは、高規格道路利用の一般化費用が $11.6(\text{分})+500(\text{円})/55(\text{円/分})=20.69(\text{分})$ となり、一般道路の所要時間と等しくなっているため、両方の道路が利用される。

なお、本筋からそれた細かい話になるが、この55円/分のクラスについては、この場合は、一般道の利用者数と高規格道路の利用者数の解の一意性はない。「道路利用者数(=一般道の利用者数+高規格道路の利用者数)」の解は一意であるが、その条件を満たす無数の一般道の利用者数と高規格道路の利用者数の組み合わせが存在する。図-6.4に示されているのは、55円/分のクラスについては、解の一例に過ぎないことになる。

表-6.2 課金収入分配後における均衡状態

	鉄道利用者数(人)	高規格道路利用者数(人)	一般道利用者数(人)	高規格道路所要時間(分)	一般道所要時間(分)	自動車総所要時間(台分)	課金収入(円)	料金の値下げに必要な金額(円)
(1) 現状; 初期均衡状態	5,182	3,219	1,599	20.07	20.07	96,715	0	-
(2) 高規格道路に¥500 課金	5,194	2,033	2,773	11.60	20.69	80,965	1,016,610	-
(3) 課金+鉄道料金¥100 値下げ	5,250	2,020	2,730	11.56	20.65	79,741	1,009,950	525,000
(4) 課金+駐車料金¥50 値下げ	5,166	2,040	2,794	11.62	20.71	81,579	1,019,885	241,700
(5) 課金+駐車料金¥100 値下げ	5,139	2,047	2,814	11.64	20.74	82,194	1,023,290	486,100
(6) 課金+高規格道容量4000に増加	5,171	2,605	2,224	10.27	20.29	71,862	1,302,285	-
(7) 課金+一般道容量8000に増加	5,181	1,934	2,885	11.31	20.05	79,719	967,145	-

さて、式(6.5)の期待最大効用の変化を利用者クラスごとに課金前後により比較することで、所得階層ごとの課金政策による効用水準の変化を求めた結果を図-6.5に示す。この図より、時間価値が55円/分より低い利用者層では、課金により効用水準は低下するが、時間価値が65円/分よりも高い利用者層では、効用水準は上昇することが分かる。時間価値が高いほど、効用水準はより増加する傾向にある。図-6.5は、効用を時間単位で計測しているが、貨幣単位で計測した場合でも傾向に変化はない。この現象の原因は、ロードプライシングによって、時間価値の低い低所得者層が課金される高規格道を避けることによって、高規格道が空き、その空いた道路を時間価値の高い高所得者層が走行することによる。低所得者は、課金されていないが、一般道の混雑の増加により費用が増加する。高所得者は、高規格道の所要時間が短縮することにより便益を受けるが、その評価値は、時間価値が高いほど上昇する。つまり低所得者の犠牲のもと、高所得者が高いサービスレベルを享受する状況になる。つまり、この単純なネットワークにおいても、ロードプライシングの所得逆進性が表現されていることが確認できる。

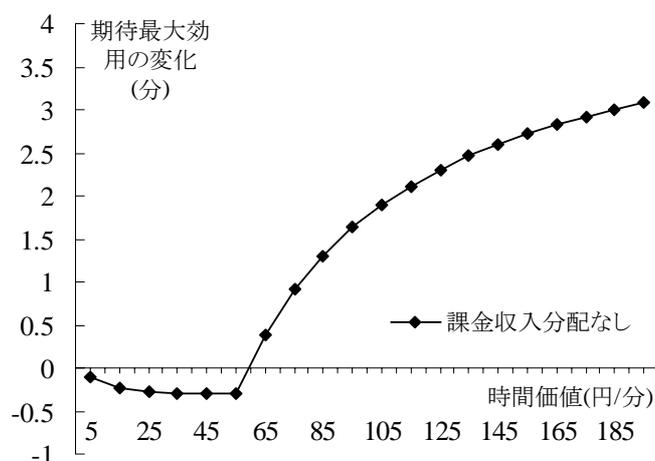


図-6.5 課金後の効用水準の変化

6.4.4 課金収入の利用策に応じた均衡状態

この所得逆進性を緩和する政策を考えよう。表-6.2-(2)に示されるように今回の課金下では、対象時間当たり約100万円の収入が得られている。これらを的確に分配すれば、低所得者の効用水準の低下を補償し、課金の所得逆進性を緩和する可能性がある。もし、課金によって被害を受ける利用者を持定化できるのであれば、その利用者の一般税を減額するなどにより直接的に逆進性は緩和

されうる。しかしながらそのようなシステムの実施は一般に困難である。したがって、課金収入を次のような交通施設の改良に用いることによって逆進性を緩和できるかどうかを検討する。

- a) 鉄道料金値下げ
- b) 駐車料金値下げ
- c) 道路容量増加

まず、鉄道料金を200円から100円に値下げする政策と、駐車料金を100円あるいは50円値下げする政策を考える。料金体系が変化することで、均衡状態が変化するため、改めて均衡状態を求めた結果を表-6.2-(3)~(5)と図-6.6に示す。まず、表-6.2から均衡状態において、料金の値下げに必要な金額は、課金収入を下回っており、この値下げ金額の設定は供給者側から見ても妥当なものである。料金の値下げに必要な金額が課金収入を下回るという条件は、料金値下げにより失われる鉄道事業者、駐車場事業者の収入を道路課金収入で補填が可能という意味で、料金体系が満たすべき最低限の制約条件といえる。本章のモデルは、輸送サービス供給者の行動分析を無視したものであり、その点で限界があるが、この制約条件を満たすことで分析の最低限の妥当性が担保される。なお、本章の趣旨から外れるので深くは議論しないが、課金政策に起因する利用者数変化により各事業者の収入はそもそも変化しており、その収入変化も考慮に入れながらの補填という政策も考えられる。

図-6.6と図-6.5を比較すると、課金収入の分配を行う場合、高所得者層の効用水準の変化は、課金収入の分配前と大差ないが、低所得者層の効用水準が急激に上昇していることが読み取れる。この結果、課金前と比較して、低所得者と高所得者、中位所得者の順に効用水準の向上が大きい値となる。これは、高所得者ほど課金による所要時間低下を高く評価する一方で、低所得者ほど、鉄道/駐車料金値下げを高く評価するという要因が複合しているためである。つまり、今回の想定ネットワークにおいては、課金収入を鉄道料金値下げもしくは駐車料金の値下げに用いることが、ロードプライシング政策の所得間公平性の面から見て望ましい政策と言える。特に、これらの分配策をとった場合、利用者の全員の効用水準が向上している点は注目に値する。

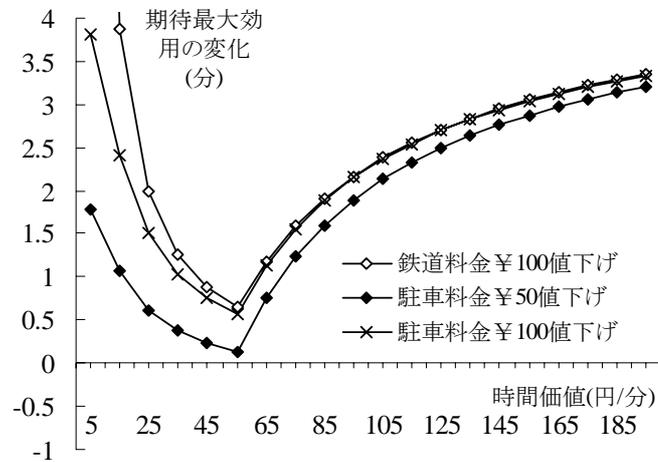


図-6.6 課金収入で鉄道料金・駐車料金を値下げした場合の効用水準変化

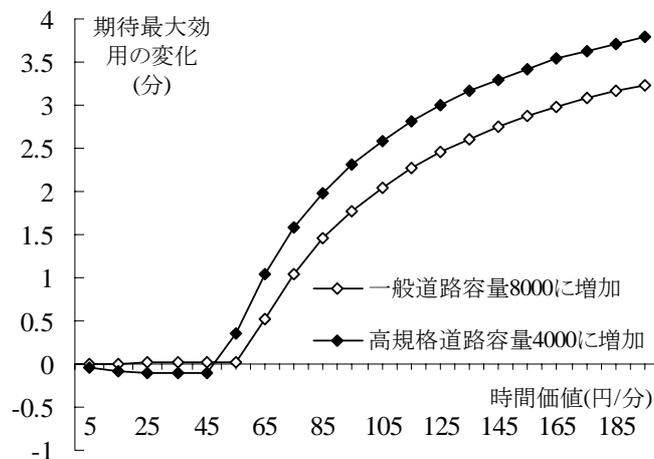


図-6.7 課金と同時に道路容量を増加させた場合の変化

次に、課金の長期的な収入を用いて道路の容量を増加させる政策を考える。道路の容量増加に必要な料金収入が得られるかどうかには不確実性が存在するが、本章の目的である所得逆進性の緩和効果を概観するために、高規格道路、もしくは、一般道路の容量をそれぞれ仮に2倍に増加した場合の均衡状態を表-6.2-(6),(7)と図-6.7に示す。高規格道路を改良した場合は、改良前の図-6.5と比較して所得逆進性は若干進行する傾向にある。これは、高所得者層のみが利用

する高規格道路の改良は、高所得者層のみに効果をもたらしているためである。高規格道路の容量増加により、一般道の混雑が緩和することになるが、その効果は小さく、低所得者層の効用水準が低下する傾向に変わりはない。一方、一般道の容量を拡大した場合、低所得者層も効用水準がわずかながら向上しており、利用者すべての効用水準が向上する状態が実現する。この場合でも高所得者層がより高い利益をえる状況に変わらないが、所得層間の効用変化の差は小さくなる傾向にある。これらから、ロードプライシングの収入を、課金対象道路そのものの改良に向けた場合、政策の所得逆進性は進行するが、課金対象道路の代替道路の改良に向けた場合、逆進性を若干緩和する可能性が示唆される。

6.5 現実都市への適用事例

以上の分析からは、現実の政策に対するいくつかの知見が得られたものの、単純化したネットワークにおける事例であるという限界がある。そこで、本章で示したモデルの利点の一つである大規模なネットワークにおいても計算可能であることを生かして、東京都心部において実際に計画されているロードプライシングに対して同様な分析を行うことを以下に試みる。日本における都市圏交通行動調査は一般に所得と関連づけては行われておらず、データの制約上、以下の分析は数多くの仮定のもととならざるを得ない。しかしながら、現実の都市圏のネットワークに対する本モデルの適用可能性を示し、一つの試算結果を提示することの意義は大きいといえる。

東京都市圏における道路および鉄道のネットワークのデータ、モデルのパラメータなどの条件は、第3章、第5章と同様に設定した。PT調査から得られるOD表が都市圏内で等しく図-6.1のような時間価値分布に従うものと仮定し、前章と同様に20クラスに分類した。貨物車については一律の時間価値95円/分を仮定し、鉄道への転換が無い設定を行い、所得クラス別20クラスと合計21クラスのモデルを朝のピーク時の3時間帯(7~10時)を対象に構築している。ゾーン数はH10東京PT調査中ゾーン144、ネットワークは、道路約23,000リンク、鉄道約5,000リンクからなる。現状再現性は、道路のリンク交通量について $R=0.72$ 、鉄道のリンク交通量について $R=0.91$ が得られており一定の精度を確認している。

このモデルにより現実に構想されている課金政策⁵³⁸⁾の評価を行った。紙面の都合もあり、環状7号・荒川区域を対象とした1,000円/台のコードンプライシングを行った場合(図-6.8)、および課金収入でコードンエリア外発・エリア内着の鉄道の料金を一律50円値下げした場合(図-6.9)の結果のみを示す。この想定に

において 6.4.の分析と同様に、鉄道料金値下げに必要な道路課金収入が生じているという条件は満たしている。発着ゾーンがコードンエリア内外かの区別により集計した平均値を示している。

図-6.8から現実都市では単純なネットワークと異なりODパターンごとに課金の影響が大きく異なることが読み取れる。外内ODは、直接的に課金の影響を受け、外外ODもエリアの迂回もしくは課金支払いが必要となる都心部の通過トリップが含まれるので課金の影響を受ける。これら、外内、外外ODは、単純なネットワークの場合と同様に課金政策の所得逆進的な傾向が示されている。一方、課金されていない内外ODは、コードン内部の速度上昇により効用は増加しており、同じく課金されない内々ODの効用変化は小さい。

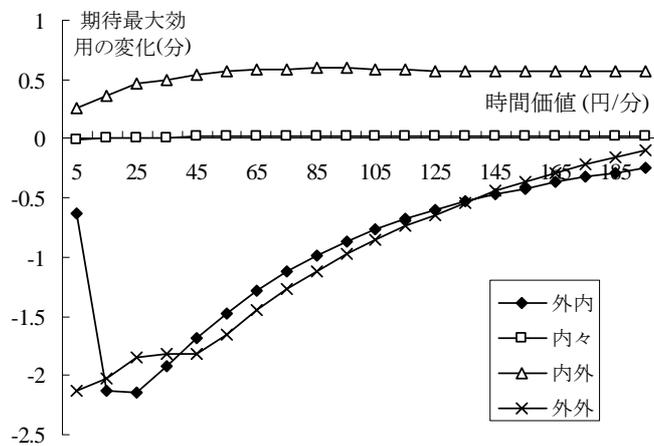


図-6.8 ODパターン別効用水準の変化

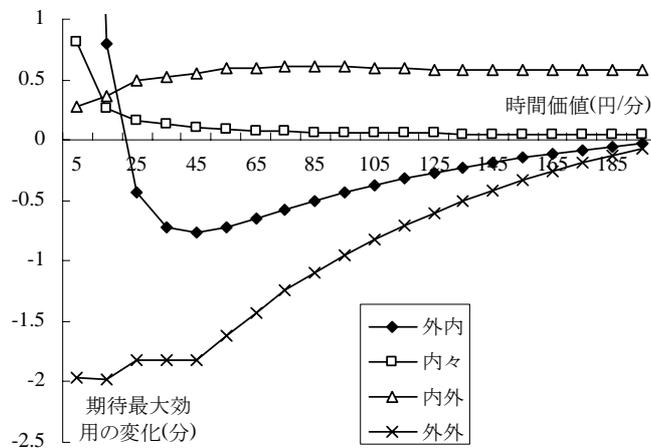


図-6.9 課金収入で鉄道の料金を値下げした場合の変化

課金収入で外内 OD の鉄道料金を値下げした場合(図-6.9)，外内トリップの効用変化については，図-6.6 と同様に，低所得者が鉄道料金値下げを高く評価すると同時に，高所得者が所要時間低下を評価する要素が複合した変化形状となる。例外，内々，内外トリップは，鉄道料金値下げの影響は少なく，ほとんど変化はしない。

以上のことから，現実都市でのロードプライシングにおいても，その政策は一般に所得逆進的な効果を持つが，その傾向は，OD パターンごとに大きく異なっており，課金収入の分配により逆進性の緩和を目指す場合にも，単純なネットワークとは違い，地域間の影響差に配慮した分配策が必要となることが示唆されたといえる。

6.6 本章の結論

本章では，個人の所得格差を時間価値の分布に反映させたモデルを用いて，ロードプライシングの所得逆進性とその緩和策について議論した。単純なネットワークにおける適用計算では，課金収入を鉄道料金，駐車料金値下げに利用することで政策の所得逆進性が緩和されることを示した。また，現実に課金が計画されている東京都心部にもモデルを適用し，政策の逆進性，地域間の影響差を提示した。

一般に公平性に関わる議論は，価値判断と独立でありえないため，規範的なモデルを作ることの意味は薄い。本章で示した結果は，数値実験に過ぎないところもあるが，政策判断において公平性の視点を組み込む際に，有用な情報を提供しうる，実都市圏にも適用可能な一貫性を保った分析フレームを提示したことの意義は少なくないと考えている。

なお，本章で仮定した所得階層ごとの時間価値の設定法，所得逆進性の定義には議論の余地があり，利用手段のキャプティブ層の考慮，課金前後で手段を転換した利用者を区別した分析手法などを含めて今後の課題としたい。

第7章 ネットワーク上での混雑を考慮した最適職住配置手法の構築とその実証研究

7.1 はじめに

交通部門のエネルギー消費の削減および混雑現象を代表とする大都市圏の交通・環境問題の根本的な解決策として、都市構造を中長期的に交通・環境負荷の小さいものへと改変する必要性が議論されている。長期的施策としての土地利用コントロールは、交通計画における広義の TDM(交通需要マネジメント)施策の一部とも位置付けられる。

これに関連して、都市のコンパクト化や高密度化の影響について、実都市における居住人口分布、従業人口分布を変化させた場合のシナリオ分析(藤原, 岡村, 2002)⁵⁵¹⁾、事業所誘導政策の効果分析(村岡ら, 2002)⁵⁵²⁾など既存研究は数多い。しかしながら、単に都市構造を高密度化すれば、必ず交通エネルギー消費や交通・環境負荷を削減できるというわけでないことも知られている。例えば、通勤交通のみに着目しても、職場の立地を政策的に誘導しても、住居が近接していなければ、通勤距離、通勤時間が増加するという大いに起こりうる。同一の職住分布に対応して、職場と住宅の組み合わせ、すなわち OD パターンは複数考えられるためである。これは、逆に考えれば、職住分布を全く変化させなくとも OD パターンを入れ替えることのみで、交通・環境負荷を低減させることができるという発想につなげることができる。

この点に関して、都市解析の分野では、職住最適配置の議論がなされている。これは、都市構造を変えずとも職住配置の入れ替えのみで、通勤時間の削減がどの程度可能であるかを示す分析手法である。各地域の都市活動量が現状のままという制約の元で、派生需要である交通の削減可能な限界値を示すものともいえる。しかし、既存の職住最適配置の研究においては、自動車の混雑現象、現実の交通ネットワークの情報が十分に考慮されているとは言いがたい。また、既存研究では、最適割当と現実の割当による通勤距離(時間)の乖離で定義される「過剰通勤」の計測が主眼の場合が多く、職住再配置を現実の政策代替案と捉えて評価を行った研究は少ない。

本研究は、混雑現象を統合的に表現する交通分析手法の一つであるネットワーク均衡モデルを利用して、職住最適配置の議論を、モデル内部の整合性を厳密に保ちつつ、ネットワーク上の各リンクでの混雑現象を考慮した形で展開することを目的としている。そして、ネットワーク上での混雑を考えた場合の職

住最適配置に対応した分析フレームをいくつか提示し、東京都市圏を対象にその実証研究を行う。

混雑現象を考えた場合、職住再配置政策は、入れ替えを行わない人にも混雑緩和という便益をもたらすことになる。本研究は、これらを定量的に示す分析手法の開発を行い、職住再配置政策を長期的な TDM 施策の現実的な代替案として検討する際の基礎的な情報を提供するものである。

本章の構成は、以下のとおりである。7.2 で、既存の最適職住配置問題の混雑を明示した拡張モデルを定式化し、その解法を示す。そのモデルを 7.3 で東京都市圏に適用し実証的な分析を行い、7.4 で本章の結論をまとめる。

7.2 混雑を考えた最適職住配置問題の定式化と解法

7.2.1 既存の最適職住配置問題のレビューとその問題点

まず、最適職住配置問題の基本モデルを提示しておこう。このモデルは、Hamilton(1982)⁵⁵³⁾による過剰通勤の問題提起をうけて、White(1988)⁵⁵⁴⁾によって定式化されたものである。

[基本モデル]

$$\min Z_1(\mathbf{q}) = \sum_r \sum_s c_{rs} q_{rs} \quad (7.1a)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_s q_{rs} = O_r, \quad \forall r \quad (7.1b)$$

$$\sum_r q_{rs} = D_s, \quad \forall s \quad (7.1c)$$

$$q_{rs} \geq 0 \quad \forall r, s \quad (7.1d)$$

where

q_{rs} : OD ペア rs 間 通勤目的 OD 交通量

c_{rs} : OD ペア rs 間の交通抵抗(所要時間など)

O_r : ゾーン r からの発生交通量(就業者数, 所与)

D_s : ゾーン s への集中交通量(従業者数, 所与)

この問題は、Operations Research の分野でよく知られた Hitchcock 型の輸送問題である。このモデルに関しては、鈴木(1992)⁵⁵⁵⁾, Merriman, *et al.* (1995)⁵⁵⁶⁾による実証研究がある。鈴木は、東京都市圏における適用結果から、最適割当により、平均通勤時間を現状より約 7 分減少させることができることを明らかにしてい

る.

さて、このモデルにおいて OD 間交通抵抗 c_{rs} は、外生的に与えられた一定値であると仮定されている。この仮定は、交通抵抗値として OD 間距離や鉄道の通勤時間を想定する場合は妥当であるが、自動車の通勤時間を想定する場合は適切ではない。なぜなら、OD を入れ替えたことにより道路混雑が変化し、所要時間も変化するためである。

最近の研究例では、英国での計算例(Frost, *et al.*, 1998)⁵⁵⁷⁾、札幌市での実証研究(梶谷ら, 2001)⁵⁵⁸⁾、共働き世帯の考慮(Kim, 1995)⁵⁵⁹⁾のほか、移動可能性についてセグメントを分けたモデル化、(Buliung and Kanaroglou, 2002; Furutani, *et al.*, 2002)⁵⁶⁰⁾、⁵⁶¹⁾が、おこなわれているが、いずれもネットワーク上の混雑を考慮しているものではない。

7.2.2 混雑を組み込みために考慮すべき点

Hitchcock 型の輸送問題として定式化された最適職住配置問題において交通抵抗が混雑により変化する点を考慮するためには、次のような点に留意する必要がある。

- ・ OD 間のネットワークを考慮すること
- ・ ネットワーク上のリンク単位の混雑現象を表現すること
- ・ ネットワーク上の経路選択行動も考えること
- ・ 入れ替え対象外の交通も混雑に影響することを表現すること。

これらを統合的に表現するためには、交通ネットワーク均衡モデルが有効である。すなわち、本研究は、最適職住配置問題と交通ネットワーク均衡モデルを組み合わせた分析フレームを構築することになる。

混雑を考えていない場合は、OD 間のネットワーク上の最短経路時間のみを考えればよいため、これらの点は考慮する必要がなかった。混雑を考慮するためには、これらを考える必要があり、特に経路選択の扱い方により、モデルの異なった拡張が生じることを以下で示そう。

7.2.3 OD 表と経路交通量の両方の最適制御

まず、次のような問題を考えてみよう。このモデルを[最適割当 SO]と呼ぶことにする。

$$\min .Z_2(\mathbf{x}(\mathbf{f}), \mathbf{q}) = \sum_a x_a t_a(x_a) \quad (7.2a)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_s q_{rs} = O_r, \quad \forall r \quad (7.2b)$$

$$\sum_r q_{rs} = D_s, \quad \forall s \quad (7.2c)$$

$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs}, \quad \forall r, s \quad (7.2d)$$

$$x_a = \sum_{r,s,k} \delta_{a,k}^{rs} f_k^{rs}, \quad \forall a \quad (7.2e)$$

$$x_a \geq 0, f_k^{rs} \geq 0, q_{rs} \geq 0 \quad (7.2f)$$

where

f_k^{rs} : OD ペア rs 間経路 k の経路交通量

x_a : リンク a の交通量

$t_a(x_a)$: リンク a のリンクコスト関数(混雑考慮)

$\delta_{a,k}^{rs}$: リンク経路接続行列(OD ペア rs 間経路 k がリンク a を通過するとき 1, しないとき 0 をとる変数)

このモデルは、式(7.1)の基本モデルと比較すると、目的関数が、リンク単位の総交通費用の最小化になっている点と、ネットワーク上の交通量の保存条件が制約条件に追加された点が異なっている。

このモデルは、OD パターン \mathbf{q} のみならず経路交通量 \mathbf{f} 、リンク交通量 \mathbf{x} も、システム管理者が制御することが可能であることを想定した規範的なモデルである。最適職住配置問題の本来の意味を考えれば、OD パターンを制御することは自然であるが、OD パターンが決定されたあとの経路選択行動までも制御するという仮定は現実的ではない。

7.2.4 OD 表のみの最適制御

最適職住配置政策が意味することは、システム管理者が OD パターンは制御するが、制御された後の OD 表をもとに利用者は各自の自由な行動をとるという仮定であろう。そして基本的な最短経路選択行動仮説に基づくならば配分交通量は利用者均衡モデルの解として求められるべきである。この場合、利用者均衡モデルの解である OD 所要時間に応じて、最適職住配置問題の出力結果である OD 表が変化し、一方で、OD 表の変化によって利用者均衡モデルの解が変

化するという関係になる(図-7.1)。これらの整合性を取るために、次のような問題も考えてみよう。このモデルを[最適割当 UE]と呼ぶことにする。

$$\min . Z_3(\mathbf{x}(\mathbf{f}), \mathbf{q}) = \sum_a \int_0^{x_a} t_a(\omega) d\omega \quad (7.3a)$$

subject to (7.2b)~(7.2f)

この問題の一階条件を求めると、経路交通量について利用者均衡条件が導かれ、OD 交通量に関しては、利用者均衡の解としての OD 間最小交通時間を基にした Hitchcock 問題の条件が得られる。従って、この問題は、利用者が最小交通費用経路を選択するという条件下で総交通費用を最小化するように職住を入れ替えるという問題となる^{xix)}。この最適割当 UE モデルは、図-7.1 の関係を整合的に記述するものである。



図-7.1 混雑による所要時間の変化の影響

このモデルは、交通ネットワーク均衡モデルの一つである両側制約型分布配分統合モデル⁵⁶²⁾において、交通抵抗パラメータを $+\infty$ においた場合に相当する。

また、各リンクに最適混雑料金が賦課されている場合、すなわち、リンクコスト関数が、

$$\hat{t}_a(x_a) = t_a(x_a) + x_a \frac{\partial t_a(x_a)}{\partial x_a} \quad (7.4)$$

という限界費用課金形式の場合、最適割当 SO と最適割当 UE は一致することになる。この関係は、OD 表所与とした固定需要型配分モデルにおける利用者均衡配分とシステム最適配分の関係⁵⁶²⁾と同様である。ネットワーク上の混雑を考えて職住最適配置を考える場合、利用者の経路選択行動も規範的に扱うのか記述的に扱うのかで、最適割当 SO/UE と展開が 2 通りありうる。

^{xix)} より厳密には、本問題は均衡制約付き数理最適化問題(MPEC)として定式化する方法が望ましい。ただ、本研究で示した手法でも得られる結果は同一のものとなる。

7.2.5 職住配置の対象外の交通の影響

職住再配置の対象外であるが、対象時間帯にトリップを行う利用者也混雑現象に影響する。これを考慮するためには、制約条件式(7.2d)を次のように変更すればよい。

$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs} + \bar{q}_{rs} \quad (7.2d)'$$

ここで、

\bar{q}_{rs} ：割当変更の対象とならないOD交通量である。さらに、職住再配置を行った利用者の通勤目的以外のトリップパターンも変化し混雑に影響が生じる可能性はある。この点の考慮は今後の課題とする。

7.2.6 解法と解の一意性

これらのモデルについては両側制約型分布配分統合モデルと同様な解法が第7章付録A1に示すように適用できる。

なお、最適割当のODパターンは、目的関数が、 \mathbf{q} に関して、狭義凸関数でないため、必ずしも一意であるわけではない。ただし、 $t_a(x_a)$ が一般的な凸型のリンクコスト関数の条件下で、目的関数は \mathbf{x} に関して、狭義凸関数となるため、最適割当の結果としてのリンク交通量 \mathbf{x} は一意に定まる。また、最適割当における総交通費用も一意に定まる。以下では、モデルの出力結果のうち、一意性の保証されている要素を用いて分析を進めることとする。

7.3 東京都市圏における実証分析

以上の分析フレームを東京都市圏に適用し、考察を加える。

7.3.1 データ・設定条件

対象地域の自動車、鉄道のデータは、既存研究⁵⁶⁵⁾のネットワーク、リンクコスト関数と同等とした。自動車では、混雑による所要時間の増加を表現する通常のリンクコスト関数、鉄道では、混雑による車内混雑悪化による不効用を表

現する混雑不効用関数を用いている。設定したリンクコスト関数のパラメータ値について表-7.1 にまとめておく。これらの設定のもとで、モデルの良好な現況再現性が得られることは第3章、既存研究⁵⁶⁵⁾で確認されている。ゾーン数はH10 東京 PT 調査中ゾーン 144、ネットワークは、道路約 23,000 リンク、鉄道約 5,000 リンクから構成される。PT 中ゾーンは、都市圏中心部では市区町村境界に相当し、都市圏周辺部では、市区町村境界をいくつか束ねたゾーニングである。現状交通移動データ(発生、集中、OD 表)は、H10 東京 PT 調査および H11 道路交通センサスのデータを用いた。なお、ゾーン内々交通、域外交通は分析から除外している。ゾーン内々の通勤交通は、職住近接という観点で見れば、既に最適であるとみなせ、再配置の対象外とする仮定は妥当である。

表-7.1 リンクコスト関数の関数形とパラメータ^{563),564)}

	関数形	パラメータ
自動車 リンク	$t_a^{car} = t_a^0 [1 + \alpha (x_a^{car} / Q_a^{car})^\beta]$ $t_a^0: \text{自由走行時間}, Q_a^{car}: \text{交通容量}$	$\alpha = 0.4 \sim 0.54$ $\beta = 2.2 \sim 3.3$ (道路種別毎に設定)
鉄道 駅間 リンク	$t_a^{rail} = t_a^0 [1 + \alpha (x_a^{rail} / Q_a^{rail})^\beta]$ $t_a^0: \text{乗車時間}, Q_a^{rail}: \text{乗車定員}$	$\alpha = 0.019$ $\beta = 4.52$ (路線毎一律)

注) 今回、分析対象が3時間であるため交通容量、乗車定員はそれぞれ、1時間単位の値を3倍したものをを用いている。

さらに、本研究では、発時刻ベースで集計して午前6時~9時に出発したトリップのみを対象とする。これは、日単位の分析では、混雑現象を適切に表現できないためである。日合計の通勤トリップのうち、この時間帯に含まれるトリップは、自動車交通で78.8%、鉄道利用交通で86.1%になる。

また、この時間帯のトリップのうち、通勤目的のトリップが占める割合は、自動車交通で64.1%、鉄道利用交通で74.9%である。この割合のトリップが、手毎にそれぞれODの入れ替えを行うことになる。

本来、職住の入れ替えにより、通勤目的以外の交通も変化することになるが、ここでは、通勤目的以外のトリップODは現状のままと仮定している。

職住入れ替えの結果の評価指標としては、所要時間に関連した集計指標のほか、リンク別に速度別平均排出係数⁵⁶⁶⁾を用いて計算したCO₂排出総量を用いる。

まず、アルゴリズムの挙動の確認として、図-7.2に自動車ネットワーク対象の最適職住割当SOモデルにおける目的関数の収束状況を示す。目的関数は単調に減少していることが確認できる。100回の繰り返し計算結果を行って十分な収束

解を求めた場合でも計算時間は、5分程度(2.0 GHz PC)であり、今回対象の大規模ネットワークにおいても本モデルの計算費用上の問題は少ない。

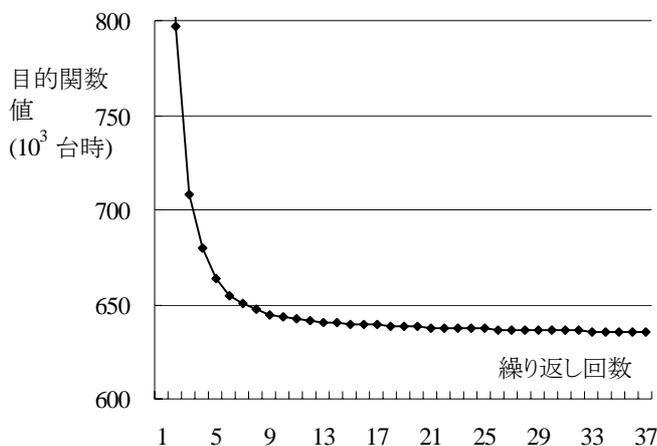


図-7.2 目的関数の収束状況(最適割当 SO モデル)

7.3.2 自動車交通利用者の最適割当

自動車交通についての計算結果を表-7.2, 表-7.3, 図-7.3 に示す。まず現状は利用者均衡状態にあると仮定する(現状 UE)。比較のため、職住入れ替えを行わずに、経路選択についてのみの最適化を行った場合の結果も検討する(OD 固定 SO)。これは、OD 表は変化させずに、システム最適配分を行う場合、もしくは、全リンクに限界費用課金が賦課されているリンクコスト関数を用いて UE を実行した場合に相当する。この場合、所要時間最短経路以外にも配分されることで、総走行台キロは、わずかに増加している。しかし、総走行台時は減少し、平均速度も向上している。速度の向上により CO₂ 総排出量も減少している。

一方、最適職住割当を行った場合、総走行台キロ、台時、CO₂ 排出量共に、30~40%の削減がされている。都市構造を変化させずとも、職住配置を変化させるだけで、このレベルまでの削減が可能であることが明らかになっている。OD 表固定の場合と同様に、最適割当と経路選択の最適化を併用した場合は、総走行台時の削減量はより大きい。総走行台キロの削減量は、経路選択の最適化を併用しない場合よりもわずかに小さくなっている。

また、総走行台時を総 OD 交通量で除して計算した平均所要時間の指標で見ても、最適割当により約 10 分程度の短縮がなされている。

表-7.2 自動車交通の最適割当による交通状況変化

	総走行台キロ (10 ³ 台キロ) [変化率]	総走行台時 (10 ³ 台時) [変化率]
現状 UE	33,009 -	1,108 -
OD 固定 SO	33,880 +3%	1,010 -9%
最適割当 UE	22,117 -33%	721 -35%
最適割当 SO	23,221 -30%	631 -43%

表-7.3 自動車交通の最適割当による交通環境の変化

	平均所要 時間(分)	平均速度 (km/h)	CO ₂ 総 排出量(t) [変化率]
現状 UE	41.24	29.8	1,804 -
OD 固定 SO	39.35	33.5	1,752 -3%
最適割当 UE	31.65	30.7	1,192 -34%
最適割当 SO	30.17	36.8	1,154 -36%

午前 6-9 時，都市圏全域の集計値

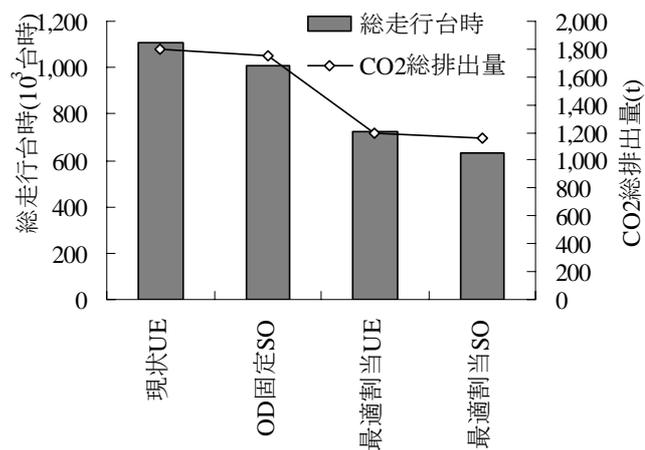


図-7.3 自動車交通の最適割当結果

7.3.3 鉄道利用者の最適割当

鉄道の車内混雑の増加による不効用が表-7.1 のコスト関数で表現されていると考え、そして、この不効用を利用者全体で合計した総不効用が最小になるような割当を同様に計算した。結果を表-7.4 に示す。

平均所要時間は、自動車と同様に約 10 分程度減少する。さらに、混雑率も大幅に低下することにより、総不効用も大きく減少している。経路選択の最適化を併用した場合に効果がより大きくなる傾向も自動車の場合と同様である。既存研究⁵⁵⁾は、最適割当による鉄道通勤時間の短縮効果が中心に示されていた。本研究は、混雑を考える拡張を行うことで、通勤時間の短縮のみならず、混雑緩和による不効用の軽減の試算結果も示したことに意義がある。

表-7.4 鉄道利用交通の最適割当

	鉄道混雑率(%) 両方向平均値		平均所要時間 (分)	総不効用 (10 ³ 人・分)
	全域	山手線内		
現状&UE	43.9	83.2	50.68	14555.2
SO	41.6	70.2	48.28	8114.8
最適割当 UE	26.7	35.4	41.26	12153.1
最適割当 SO	24.0	25.3	38.28	6325.0

午前 6-9 時，都市圏全域の集計値

7.3.4 混雑を考えることによる解の変化

本研究の特徴である混雑を考慮したことによる影響をみるため、自動車交通について従来型の混雑を考えないモデルによる解との違いを比べてみる。ここでの混雑不考慮型のモデルとは、式(7.1)の基本モデルにおいて c_{rs} を現状固定 OD を用いた UE から得られる OD 間所要時間に固定して計算したものである。この場合、最適割當時の平均所要時間は、33.03 (分)となり、この値よりも表-7.2 に示した混雑を考慮した最適割当 UE の 31.65 (分)の値のほうがわずかながら短い。これは、職住再配置によって混雑が緩和し OD 所要時間が減少することをモデルで表現できているか否かの差である。このことを「過剰通勤」の計測の文脈で解釈すると、既存の混雑を無視したモデルは、「過剰通勤」の値を過小評価していると言える。

なお、どのような OD パターンの入れ替えが生じるのかについては、7.2.6 で述べたように最適 OD パターンの解は、そもそも一意性が無いものであるため、

詳細な検討をする意義はあまり無い。ただ、今回の計算事例では、混雑を考える/考えない場合のどちらも、同様な OD パターンの解が得られており、その点への影響は少ないという結果となっている。

7.3.5 一部の通勤者のみを割当変更する場合

さて、上記結果から、職住再配置により大幅な混雑緩和、交通環境改善が可能であることが明らかになった。ただし、日本の住宅市場では住み替えは容易ではなく、職場の変更も一般的ではないため、通勤者全員の職住再配置政策は現実的で無い。また、上記分析フレームでは、通勤先の業種、家族構成などの違いが全く無視されており、その意味においても通勤者全員を対象とした政策は現実性を欠く。

しかしながら、混雑現象を考えた場合、職住再配置政策は、再配置を行っていない利用者にも混雑緩和という便益をもたらすため、一部の通勤者のみでも再配置を行うことが社会的には望ましいということがありうる。社会的に望ましいことが明らかになれば、再配置を奨励するような助成政策も正当化されよう。そこで、以下では、通勤者のうち再配置を行う割合を変化させた場合のシナリオ分析を行う。

すなわち、再配置の対象となる発生交通量 O_r 、集中交通量 D_s 、再配置対象外の OD 交通量 \bar{q}_{rs} を以下で与える。

$$O_r = \sum_s \gamma q_{rs}^{commuter}, D_s = \sum_r \gamma q_{rs}^{commuter} \quad (7.5a)$$

$$\bar{q}_{rs} = (1-\gamma) q_{rs}^{commuter} + q_{rs}^{non_commuter} \quad (7.5b)$$

ここで、 $q_{rs}^{commuter}$ は、現状の通勤 OD トリップ、 $q_{rs}^{non_commuter}$ は、通勤以外の OD トリップである。つまり通勤トリップのうち $100\gamma\%$ の再配置を行う場合 ($0 \leq \gamma \leq 1$) を想定する。ここでの最適配置モデルは、自動車対象の最適割当 UE モデルを用いる。

図-7.4 に結果を示す。当然ながら、割当の対象率を増やすほど、総走行台キロ、台時、CO₂ 総量のいずれの削減率も増加している。ただし、特に走行台時については、わずかながら下に凸の非線形な変化形状になっていることは興味深い。この原因の精査のために、総走行台時を利用者便益と同様に考えて、その便益の帰着先を調べてみる。まず、割当を変更しない OD トリップと、割当前後の OD 時間から、割当を変更しない固定利用者分に帰着する走行台時削減量が計算できる。一方、割当変更者に帰着する削減量は、全体の総走行台時の削減量か

ら、固定利用者分の台時の削減量を差し引いたものであり、この値も一意に求めることができる。このようにして求めた結果を図-7.5 に示す。この図からは、割当変更対象率が10~30%の場合、割当によって生じた総走行台時の便益の約3割程度は、割当の対象となっていない固定利用者に、帰着していることが読み取れる。

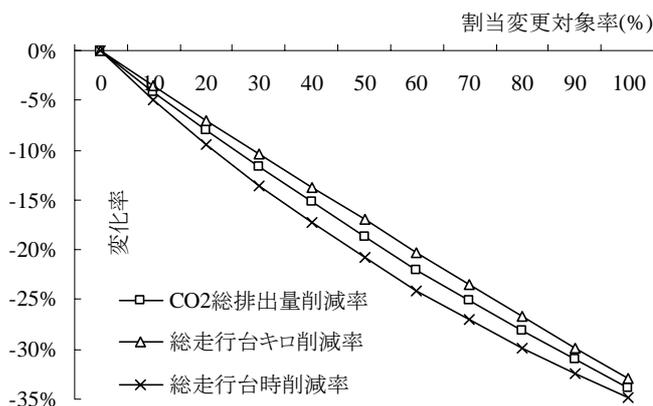


図-7.4 割当対象率を変化させた場合(自動車)

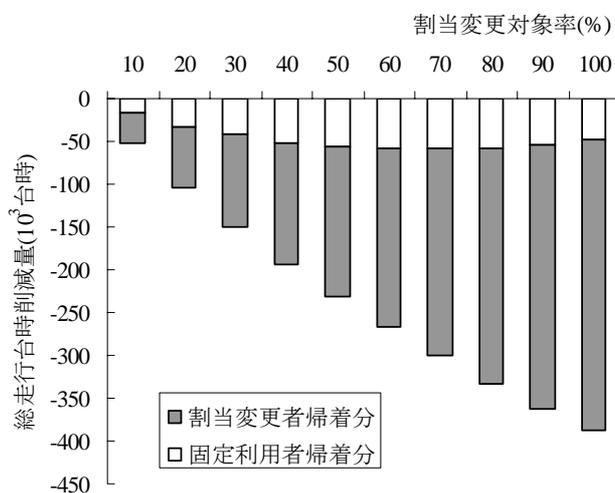


図-7.5 総走行台時の削減量の帰着構成

図-7.4 のグラフが下に凸になっているのは、割当対象者の割合が少ない場合でも、混雑緩和を通じて、割当対象以外の利用者にも職住再配置政策の便益が生じており、割当対象者が増えると、この固定利用者への便益が相対的に低下す

ることによって生じている。この知見は、混雑現象を表現したことによってはじめて得られるものであり、この点で、本研究の意義を強調したい。

さらに最適職住配置を交通政策の一つとして位置づけ、他の代替案と比較を試みよう。一例として、混雑現象に対する経済学的な最適施策である、全リンクへの最適混雑課金を取り上げる。表-7.2における OD 固定 SO の結果は、この政策の評価値ともいえる。この場合の総走行台時の削減率 9%を、職住再配置政策で実現しようとするならば、通勤者の 20%弱の入れ替え策で達成できることも図-7.4 から読み取れる。このように、本モデルを用いれば、職住再配置政策を長期的な交通施策の代替案として比較検討することが出来る。もちろん、居住地、勤務地の入れ替えの困難性を考慮に入れる必要があるが、客観的な一つの指標として提示する価値は高いといえよう。

7.4 本章の結論

本章では、

- ・ 最適職住配置問題について、ネットワーク上での混雑を考慮した拡張を行い、モデルの定式化、解法の構築を行い、
- 東京都市圏を対象にその分析フレームを適用した結果、
- ・ 通勤交通の最適配置により、自動車総走行台キロ、台時、CO₂ 総排出量をそれぞれ 30~40%削減可能であること、鉄道混雑も大幅に緩和されること、一部の通勤者のみの割当変更しか行えない場合についても、自動車交通の場合、
- ・ 10~30%の変更率のもとでは、割当によって生じた総走行台時の削減便益の約 3 割程度は、割当の対象となっていない固定利用者にも波及していること、
- ・ 20%弱の自動車通勤者の割当変更でも最適混雑課金と同等程度の効果が得られること、

などを実証的に明らかにした。

以上のことから、本章では、職住再配置政策を長期的な TDM 施策の現実的な代替案として検討する際に有用となる論理整合的な分析フレームを構築し、それを用いて、いくつかの基礎的な情報を提供しえたと考える。過剰通勤を計測するという文脈で最適職住配置問題を用いる場合には、混雑の有無の違いは大きなものではないことも明らかにされたが、混雑現象を考えた場合、職住再配置政策は、再配置を行っていない利用者にも混雑緩和という便益をもたらすことが確認された意義は少なくないであろう。

なお、本章では、職住の入れ替えによる手段の変更は考慮に入れていない。

手段の変更も考慮に入れるように分析フレームを拡張するのは容易である。ただし、出発地、目的地の駐車場の必要性を考慮に入れれば、手段の変更を考えない本章の基礎的な分析の有用性は高い。

今後の課題としては、割当可能な世帯のセグメント化、環境負荷最小化を目的関数とする展開、他の都市圏での適用比較などが挙げられる。

第7章付録A 1 最適割当モデルの解法

最適割当 UE モデルの解法は以下のようになる。

Step 0: 初期許容解 $\mathbf{X}^{(1)} = \{\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{q}^{(1)}\}$ を与える。繰り返し回数 $n=1$ 。

Step 1: 元の問題を線形近似した補助問題を解き、その解を

$$\mathbf{Y} = \{\mathbf{x}^{sub}, \mathbf{q}^{sub}\} \text{ とする。}$$

Step 2: 以下の1次元探索を行い、ステップサイズ α を求める。

$$\min. Z(\mathbf{X}^{(n)} + \alpha(\mathbf{Y} - \mathbf{X}^{(n)})), \text{ s.t. } 0 \leq \alpha \leq 1$$

Step 3: 解の更新。 $\mathbf{X}^{(n+1)} = \mathbf{X}^{(n)} + \alpha(\mathbf{Y} - \mathbf{X}^{(n)})$

Step 4: 収束していれば終了。そうでなければ、 $n=n+1$ として Step1 へ。

Step1 の補助問題の具体的な解法は、以下のようになる。

Step 1.1: リンクコストの更新。 $t_a = t_a(x_a^{(n)}), \forall a$

Step 1.2: OD 間最短経路探索により最小コスト $c_{rs}^{(n)}$ を求める。

Step 1.3: $c_{rs}^{(n)}$ を単位輸送費用とする Hitchcock の輸送問題を解いて、OD 交通量 \mathbf{q}^{sub} を求める。

Step 1.4: OD 交通量 \mathbf{q}^{sub} を Step1.2 で求めた、最短経路に流し、リンク交通量 \mathbf{x}^{sub} を求める。

最適割当 SO モデルの場合も、リンクコスト関数を式(7.4)に置き換えれば、以上の解法をそのまま適用できる。再配置を行わない交通の影響を考える場合は、Step 1.4 で、配分する OD 交通量を $q_{sub} + \bar{q}$ とおけば良い。

第8章 結論

本章では、本研究で得られた成果と今後の課題をまとめるとともに、今後の展望を述べる。

8.1 本研究の成果

本研究では、従来から都市圏レベルの交通需要予測、交通政策分析に広く用いられてきた工学的実用性を重視した四段階推定法がもつ、行動理論との不整合性、モデル内部の不整合性による問題点を解消可能なネットワーク均衡モデルを応用した交通政策分析フレームを構築した。この分析フレームは、現実の大規模ネットワーク、利用者の多次元選択行動を対象にしながら、実用性と同時に行動理論との整合性、モデル内部の整合性を厳密に保持したもので、この点を生かした政策分析を提示した。

また、既存の学術研究では、非集計ロジットモデルを代表とする交通行動分析系の研究成果が実務で用いられている状況に比較して、交通ネットワーク分析系については、高度な研究成果の実務への反映が極めて不十分である、言い換えると理論的展開の実用化への努力が軽視されている、との問題意識に立ち、現実の都市圏への適用を精力的に行った。この際に、既存のネットワーク均衡分析の研究が、注意を最大限に払ってきたモデルの解の一意性を担保しつつ、実務で要求される現状再現性の向上を意図した拡張をおこない、モデルの特徴が生かした政策分析を行っている。大規模なネットワーク、複雑な利用者行動を対象としながら、論文を通じてアドホックな設定やヒューリスティックな解法の使用を一切排除している。これらの分析の過程で開発したモデルは、現実の都市圏の交通需要予測・便益評価にも十分適用可能な、従来の四段階推定法に代替しうる有用性、実用性を兼ね備えたものであることを明らかにした。具体的に誘発交通を考慮した道路整備効果の推定、ロードプライシングの政策評価など、緊急な回答が必要とされている政策課題について、試算の域ではあるが、具体的な数値結果を示せた社会的意義は少なくないものと考えられる。

以下、成果の内容を具体的にまとめて詳述する。

8.1.1 ネットワーク均衡モデルの実都市への適用時に有用となる概念の整理

ネットワーク均衡モデルの概念自体は、古くから提唱され、そのモデルが四段階推定法に変わる需要予測手法としての望ましい性質を持つことは、一部の研究者の間では良く知られた事実であった。しかしながら、それらの高度な研究成果を実際の都市圏で適用するための研究努力は、十分とは言いがたいものであった。本研究では、最新の研究を含む広範なレビューをもとに、既存研究では十分な整理がされていなかった、実都市圏への適用時に有用となるモデルの拡張の考え方、検討すべき課題について整理した。

まず、固定需要型確率的利用者均衡モデルの発展形としてのマルチクラスモデル、多基準モデル、非加算型経路費用モデル、確率的利用者均衡モデルの最近の研究動向を紹介した。そして、それらが利用者均衡モデルにおけるどの行動仮説の緩和に対応するのかという相互関係を整理した。これらのモデルは、極めて限定的な仮定が課せられた利用者均衡モデルよりも豊富な政策評価指標を出力しうるものである。また、大規模ネットワークでも計算可能なモデルも多いため、実都市圏での適用における現状再現性向上にも有用であると考えられる。

また、確率的利用者均衡モデルは、理論的には古くから完成し、良く知られたモデルであるが、いくつかの問題点があり、それらは、a) 経路選択枝集合の決定法、b) 経路選択枝間の類似性の表現法、c) 均衡解への収束が保証されたアルゴリズムの開発、d) 目的関数における経路エントロピー項の効率的計算法、e) 需要モデルと整合的な利用者便益指標の効率的計算法、f) 経路選択モデルのパラメータ推定法、と分類されることを明らかにした。また、それらを同時に解決できる枠組みは提示されていないことを示した。これらの問題より、確率的利用者均衡モデルは、現実の大規模都市圏での政策分析においては、いまだ実用的とはいえないと判断された。

また、分担・配分統合モデルにおいて、平均乗車人員や手段別時間価値の設定法について、それが、モデルの等価最適化問題の構成可能性に与える影響を整理した。特に、自動車ネットワークのみにおいて混雑が発生しているという場合においては、クラス別の平均乗車人員や手段別クラス別の時間価値を設定しても、等価な最適化問題が構成可能であることを示した。

また、ネットワーク均衡モデルに含まれる、道路のリンクコスト関数及び鉄道の混雑不効用関数、行動モデルのパラメータについての推定事例、およびその推定の考え方について整理した。

8.1.2 大規模都市圏における統合需要型ネットワーク均衡モデルの実用化

ネットワーク均衡モデルの適用においては、モデルの特徴である解の一意性と論理性を保持しながら、現状再現性を高める改良を行う、というモデル構築の考え方が現実の交通計画の評価では有用となるという立場にたち、その考えに基づいたモデルを構築した。具体的には、東京都市圏を対象として、自動車と鉄道の大規模な GIS データを活用し、利用者のトリップ目的による異質性を考慮しつつ利用者がトリップを行うか否か/またトリップを行う場合に、どこの目的地に/どの手段で/どの経路を用いて移動するのかを 4 レベル Nested Logit モデルにより表現しつつ、自動車と鉄道の混雑現象も整合的に記述するモデルを構築している。このモデルは、解の一意性、論理性、モデル内部の整合性を堅持しながら、既存モデルと同等程度の良い現実再現精度が得られていることが確認された。また、大規模な多手段の交通ネットワークを対象に、鉄道の混雑現象を考慮しつつ、発生レベルまでを統合した点で先進的なモデルとなっている。

8.1.3 都市交通政策の今日的課題に対応した各種政策分析

このモデルを用いて、旧来の四段階推定法では評価が困難であった、道路整備による誘発交通を考慮した道路投資効果の推定を行った。従来用いられてきた固定需要型のモデルとの推定結果の比較より、誘発交通を考慮することで生じる交通量の変化は都市圏全体ではわずかであるが、対象道路の交通状況の変化は大きいこと、利用者便益の推定値に多大な影響を与えうること、今回の適用地域では、既存のモデルは便益を過大推定することなどを実証的に明らかにした。この評価事例は、都市交通政策の有効性に関連して「混雑緩和を目的として道路などの交通施設整備を行うと、新たな交通需要を誘発し、結局混雑緩和にはつながらない」として古くから観念的に議論されてきた「誘発交通問題」に対して、ひとつの合理的な理論フレームに基づいた科学的な分析結果を示したものである。

また、現実の大規模都市圏におけるロードプライシング政策と最適課金策の比較、ロードプライシングの所得逆進性の問題とその緩和策の分析、最適職住配置問題のネットワーク上の混雑を考慮した拡張など、都市交通政策の立案に有用な情報を提供しうる政策分析を行った。これらは既存のモデルでは実現が困難であったものである。

現実には計画されている東京都心部へのロードプライシング政策によって得ら

れる社会的余剰の増加は、最適混雑課金のそれと比較すると、ごくわずかなものであることが示された。しかしながら、この最適課金政策と現実政策の差は、燃料税、車両税、駐車料金などの関連政策の組み合わせで縮めうることが示唆される分析結果も示した。

また、混雑課金政策が所得逆進性的な性質を持ち、その問題は課金収入で緩和できるという、既存研究で概念的には指摘されていた事項について、混雑現象も整合的に考慮できるモデルを用いて、単純なネットワーク、および現実の東京都心部への課金政策を対象に確認した。特に、現実の都市における評価では、所得間公平性のみならず、地域間の影響差が生じることが示された。本研究で構築した整合性に優れたモデルから出力される定量的な情報は、これら公平性に関わる事項を政策決定時に検討する際に有用となると考える。

次に最適職住配置問題のネットワーク上での混雑を考慮した拡張モデルを構築し、それを東京都市圏を対象に適用した。その結果、自動車総走行台キロ、台時、CO₂総排出量をそれぞれ30~40%削減可能であること、鉄道混雑も大幅に緩和されることを示した。また、過剰通勤を計測するという文脈で最適職住配置問題を用いる場合には、混雑の有無の違いは大きなものではないことも示されたが、混雑現象を考えた場合、職住再配置政策は、再配置を行っていない利用者にも混雑緩和という便益をもたらすことも確認された。これらの分析より職住再配置政策を長期的なTDM施策の現実的な代替案として検討する際の基礎的な情報を提供しえたと考える。

8.1.4 複数手段ネットワーク上で利用者の多次元選択行動を明示した理論展開

繰り返しになるが、ネットワーク均衡モデルの概念自体は、特に土木計画学の学問分野においては、目新しいものではなく、本研究では、マルチクラス型への改良などを行っているものの、このモデル自体に論文としてのオリジナリティを主張するものではない。

本研究の学問的意義のひとつは、このモデルの特徴を応用して、一般的な条件下で限界費用課金が最適課金であること、ピグー税、ポーモル・オーツ税などの環境負荷を考慮した混雑課金理論、道路建設に関するMohringの定理、容量パラドックスの生起条件など、通常、単純なネットワークで議論されていた事項のいくつかは、現実の大規模なネットワーク上で利用者の多次元選択行動を明示した場合にも成立することを証明した点にある。これらの点は、直感的に納得できるものであるのに関わらず、ネットワーク均衡モデルに関する既存研究では、十分に明らかにされていなかった点である。

もちろん、既存の時間空間を捨象した単純な理論モデルの意義を、本研究は否定するものではない。既存の理論モデルから得られていたエレガントな知見が現実都市のネットワーク、複雑な利用者行動を明示した枠組みでも成立することを確認し、その知見を生かした政策分析を行ったことが本研究の特徴といえる。

8.2 今後の研究課題

本研究に関する今後の課題をまとめる。

8.2.1 道路整備による誘発交通のモデル出力値と現実の値の比較

論争の多い混雑地域における道路整備の効果について、本研究では、論理一貫した分析フレームのもと、誘発交通を考慮した評価の試算を行った。

評価の前提として、数多くの仮定が必要となるが、現時点で、考えうるもっともらしい仮定をもうけ、さらにそれらの仮定のもとシステム全体を論理一貫性を保ちながら記述した分析フレームを構築し、それらに基づいて現実の評価を行った点は、実際の計画立案に対して大きな貢献を果たしたものと考えている。

ただし、これらの評価値は、出力値の前提となる仮定とワンセットで解釈されるべきことは言うまでもない。そして、それらの値の現実性についての検討が是非とも必要である。

しかしながら、Bonsall (1996)⁵⁶⁷⁾が述べるように、誘発交通を、通常交通調査で分離することは、容易ではないため、これらの検討は、実は容易ではない。米国、英国で数多くの検証がある道路容量に対する地域の交通走行台キロの弾力性の推定値も、直接には比較の対象としにくい。この検証のためには、第2章でまとめたように、既存の弾力性の推定値について、それがどの地域レベルの(施設レベル、地域レベル)、どの混雑レベル(ピーク時、オフピーク時)での、何に対する弾力値(交通費用なのか、所要時間なのか、あるいは道路容量なのか)を明確に区別した整理のもとでの比較が必要となると考えている。

これらの検証は、8.3.2で述べるモデルのフレームの理論的な拡張(土地利用・交通モデル、経済均衡モデルとの統合など)を行う以上に、早急な対応が必要と考えている。

8.2.2 計算アルゴリズム・パラメータ推定法の改良

利用者の行動とパフォーマンスモデルの均衡点を求める計算法については、本研究は、Evans (1976)⁵⁶⁸⁾の部分線形化法を利用しているが、最近、発表されたBar-Gera and Boyce (2003)⁵⁶⁹⁾による起点別リンク交通量を用いた準ニュートン型のアルゴリズムの適用も検討の余地がある。この解法を用いて厳密解を求める意義を政策感度との関連で明らかにすることは、実務的に有用な情報となろう。

また、今回、行動モデルのパラメータ推定は、もっとも単純な方法を用いている。この点の改良が必要である。

この改良の方向性については、均衡モデルであるため混雑現象と整合性のとれたパラメータ推定法の利用が主張されることが多い。

ただ、筆者の考えでは、混雑現象と整合性をとることよりも、むしろ非集計行動モデルにおける洗練化された推定法、例えば、SP-RP 統合モデル、パネルデータの利用などの方面へ、改良を進めることのほうが重要と考える。また、特に、8.2.1 でも述べたが、モデルの出力値と現実の政策感度との比較を重視すべきである。この結果、通常モデルでは、すべて選択層と仮定している利用者クラスを、固定層と選択層に区別するなどの改良を目指すことのほうが、現実の政策評価に用いるモデルとして適切な感度をもちえるため望ましいと考える。

混雑現象と整合性のとれた推定法というのは、数学的には、MPEC の上位問題をモデル推定値と観測値の差の最小化とおけばよい。ただ、このように定式化した数学的問題としての面白さ以上に、現実政策の感度の妥当性を担保するような改良を重視すべきと考える。

利用者の行動モデルに含まれるパラメータは、そもそも需要関数の一部とも解釈できるものであり、混雑現象とは独立に推定可能なものも多いであろう。平均的個人の行動モデルに含まれる個別のパラメータの持つ意味、解釈を吟味した改良が望まれよう。

本研究で用いた道路のリンクコスト関数、鉄道の混雑不効用関数は、いずれも既存研究の推定値をそのまま用いている。これらを今回の適用地域、適用年次に合わせて、改良、再推定することで、モデルの再現性の向上がみこめる。これらパフォーマンスモデルのパラメータについても、利用者の行動モデルと同様に均衡モデルと整合的な枠組みでの推定を試みる研究もある。ただ、筆者

の考えでは、道路のリンクコスト関数については、そのパラメータが意味すること、性質を考慮した推定法が必要であろう。特に、鉄道の混雑不効用関数は、利用者の混雑を回避する経路選択行動、SPデータの利用、家賃関数を用いた手法など、推定のアプローチは数多いと考えられ、それらのアプローチを組み合わせた手法なども検討する必要がある。

8.2.3 実務での実用化にむけた検討

モデルとは、どんなに理論的に優れていようとも実際の評価に適用されて初めて、土木計画、交通計画に有用なツールと言えるだろう。学術研究と実務との乖離を埋める努力も、大学研究者の重要な使命と考える。この方向性に関して検討が必要な点をまとめる。

まず、本研究で開発したモデルを国内外の他の都市圏でも適用し、課題を抽出するなど実証分析の積み重ねが求められる。

また、今回の対象都市圏では、公共交通と自動車のネットワークが完全に分離しており、分担配分統合モデルとしては、扱いやすい都市圏であった。一般にバスの走行速度が自動車に影響を与えることを考えるべき都市圏、あるいは地域を対象にする場合は、手段間の非対称な相互干渉の存在により、モデルと等価な数理最適化問題を構成することは一般に不可能となる。

この場合、モデルは、形式的には変分不等式問題として定式化される。このモデルに対しての解の存在は証明できるが、解の一意性は必ずしも保証されない。

この問題に対する解法としては、緩和法(対角化法)が幅広く利用されている。この解法が収束する条件は、必ずしも明確なものではなく、理論的な厳密性は十分ではない。ただし、もしこの解法が収束すれば、その解は、もとの変分不等式問題の解の一つであることが証明できる。ただし、得られた解は、必ずしも一意とは限らないため、解法の初期条件などを変更した試行を繰り返すことなどにより複数解が存在しているかどうかを確認することが必要となり、実用的な方法とは言いがたい。また、解の一意性を前提としない予測モデルの使い方について考えておくことも実務的には必要であろう。

また、車種別交通量配分手法の実用的な方法の開発が望まれる。アプローチとしては、確率的利用者均衡モデルの改良と、利用者均衡モデルの最尤経路推

定の2つがある。ただ、どちらも、どのように経路を特定し、類似性を考慮するかといった点に難点があり、現時点では実用的な手法は提案されておらず、今後の研究課題となる。

8.3 今後の展望

本研究の対象外ではあるが、本研究の発展形として今後重要となる研究展望を述べる。

8.3.1 利用者の行動モデルの一般化

8.3.1.1 行動モデルの選択次元の一般化

本研究で扱った利用者の選択行動は、最大で経路選択、手段選択、目的地選択、トリップ有無の選択、の4次元である。これらのほかに、時刻の選択、自動車の同乗有無の選択、アクセス・イグレス手段の選択、高速道路利用有無の選択、トリップチェーンの選択、居住地の選択、などを組み込む発展が考えられる。

アクセス・イグレス手段の選択と高速道路利用有無の選択モデルについては、第2章で紹介したMixed mode型モデル、あるいは高速転換率内生型モデルと整合的に組み合わせることは容易である。時刻の選択については時間帯別モデルを前提にすれば、モデル構築は容易であるが、パラメータの推定法などに検討が必要な点が多い。自動車の同乗有無の選択の内生化は、手段選択と捕らえることで拡張は容易に思えるが、等価最適化問題が構成しにくく、実用的なモデルの構築は困難のようである。居住地の選択については、長期的な均衡を前提とした上で8.3.2で述べる立地均衡モデルの枠組みでの統合が有用となろう。

トリップチェーンの選択については、ピストン型のトリップチェーンを前提とした場合の改良モデルを開発中である(円山, 2004)⁵⁷⁰。

以上の行動変化は、すべて人の動き(パーソントリップ)に着目したものである。しかしながら実際の都市圏における車両のうち貨物車が占める割合は少ない。これら物資流動に関係した行動変化のモデル化は重要な発展課題となる。

このほか、第2章で紹介した非加算型経路費用モデル、多基準ネットワーク均衡への拡張なども興味深い。

8.3.1.2 GEV型モデルへの展開

本研究では利用者の行動モデルは、Nested Logit 型の選択構造を仮定したモデルを利用している。このモデルは、単純な Logit 型の選択構造を仮定したモデルが持つ IIA 特性による問題を緩和しつつ、実用性を兼ね備えたバランスの取れたモデルである。ただ、最近では、非集計行動モデルの文脈で、Nested Logit 型の選択構造をより一般化したモデルが多数開発されている。これらを利用した選択構造の一般化も一考の余地がある。例えば、経路選択レベルの Cross Nested Logit 型への変更、手段と目的地の選択レベルについて GNL モデルの適用などが考えられる。Closed form 型の GEV モデルであれば、第 2 章で紹介したように、モデルと等価な最適化問題が構成しやすいため、本研究のような均衡モデルとも整合的な展開が可能である。

ただし、本研究のモデルは、基本的に集計モデルであるため、それらの改良が政策感度に与える変化はきわめて小さいことも予想される。この点についてのトレードオフを考慮した展開が必要であろう。第 2 章でも述べたが、P&R を導入したネットワーク均衡モデルへの GEV モデルの導入は、有用性が発揮される例かもしれない。

8.3.2 空間経済システム・モデルへの拡張

本研究のモデルは、通常の世界経済モデルからみれば、交通市場のみを取り扱った部分均衡モデルと位置づけられる。交通政策が、交通市場以外にもたらす影響は考えられていない。しかしながら、交通計画・政策が、土地利用、地域経済に与える影響も少なくないとして、それらをモデル化する研究も第 2 章でレビューしたように数多い。一般均衡の枠組みでこれらのフレームを拡大すること(立地(土地利用)均衡モデル、応用一般均衡モデルなどとの統合)は重要な発展課題であろう。

ただし、この拡張の際には、地域・都市に関するどのような政策も評価できるスーパーモデルを作ることを目指すことは有効ではないと考える。利用可能なデータの精度、均衡が意味する時間スパン(短期、長期)を十分に検討したうえで適切なモデルの選択をすることが望まれると考える。言い換えると政策評価に応じた使い分けの整理が必要と考える。

使い分けの分類軸としては、

計画レベル: 戦略的, 戦術的, 実施計画

計画スパン: 短期, 中期, 長期,

がありうる。

さもないと Lee (1973, 1994)^{571),572)}が「大規模モデルのレクイエム」で述べているモデルの目的過多，過度の複雑性によるブラックボックス化などの問題に再度突き当たることを筆者は危惧する。

8.3.3 MPECアプローチへの展開

応用数学の問題として，ネットワーク均衡モデルなどを下位の条件として，上位に政策目標を置いた MPEC (Mathematical Programming with Equilibrium Constraints; 均衡制約つき数理最適化問題)も第2章で紹介したように盛んに研究されている。この問題は，その対象の汎用性とうらはらに，数学的には，大域的な最適解を求めることがきわめて難しい問題であり，また大規模ネットワークを対象にした場合の適用は多くなく，今後の研究展開が必要とされる。

特に，同じく第2章で紹介した非線形感度分析を用いて，MPEC のフレームで，例えば，セカンドベスト課金の一種といえる，現実に構想されている東京都心部のコードンプライシングの課金額の検討なども行うことは有用となろう。

8.3.4 モデルの動学化

本研究の対象としたような混雑の激しい都市圏において，静的な交通均衡概念に基づくモデルを適用することの意義について疑問が呈されることは少なくない。本研究は，静的な均衡に基づきながらも，時間帯別のモデル化を行うことで，この問題に対して近似的な対応をとっているが，本来渋滞現象は，時間軸を明示したボトルネックとして表現するのが最も素直なアプローチである。この点への拡張は必須といえるが，その際にどのような分析を目的とするかで区別することが望まれよう。

以下，分析の目的を，理論の展開と，実際の政策評価への適用に2分して述べていく。

8.3.4.1 理論の動学化

動的均衡配分理論は，実際の政策評価に利用するというモデルではなく，ベンチマークとしての役割を持っている。

動的な限界費用理論と本研究で扱った複数交通手段のネットワーク上での利

用者の多次元選択行動を統合することも重要な研究課題と思われる。おそらく、単一リンクを対象として得られている，“動的限界費用は、渋滞継続時間に等しい”という理論(桑原, 2002)⁵⁷³⁾は、対象時間帯内での利用者の行動モデルと整合的な社会的余剰の合計値を最大化するという意味でネットワーク上での多次元選択行動を明示した場合でも拡張可能と思われる。

静的な固定需要型利用者均衡配分において、全リンクへ限界費用課金を課すことが総所要時間の最小化というシステム最適配分になるという関係は、動学的な意味においても、(弾性需要型)動的利用者均衡配分に全リンクへの限界費用課金を課すことで、モデルと整合的な社会的余剰が最大化される動的システム最適配分が実現されるという関係にあると考えられる。これらの理論面での厳密な証明を行うことの学術的な価値は極めて高いであろう。

8.3.4.2 政策評価の動学化

現実の政策評価において動的な渋滞現象を明示的に扱うには、シミュレーションに頼らざるを得ない。動的な交通流シミュレーションも、現在では本研究の対象としたような大規模なネットワークでも計算可能となっている。ただ、この計算可能ということは、そのまま、そのモデルが政策評価に利用可能であることを意味しない。

シミュレーションに必要とされる、入力データ(時間 OD 表, 容量)の精度の要求は高いと想定され、それに応じるデータの確保(現時点と将来時点)、モデルの再現性を確保するためのキャリブレーション技術、そのキャリブレーション値の妥当性の検証なども必要となろう。

また、結果の一意性が保証される本研究のような数理モデルと異なり、シミュレーションでは、初期値、用いる乱数列などにより結果が異なることになる。これらは、分析者が意図せずとも、結果に恣意性が混入する可能性も否定できない。シミュレーションによる政策評価システムは、モデル全体の整合性、解の一意性を重視する本研究の設計思想とは全く異なるものになると考えられるが、現実に忠実なモデル化が可能で、豊富な情報を提供するという利点があり、その利点、欠点を考慮した政策評価における使い方の検討が必要と考える。

参考文献

第1章

- 1) 原田昇(編著): 都市交通計画(交通工学ハンドブック 2001 第11章), in 交通工学研究会編 都市交通(都市交通計画・都市物流計画), 交通工学ハンドブック・シリーズ, 丸善, 2002.
- 2) Wu, Z.X. and Lam, W.H.K.: Combined modal split and stochastic assignment model for congested networks with motorized and nonmotorized transport modes, *Transportation Research Record*, 1831, pp. 57-64, 2003.
- 3) Bar-Gera, H. and Boyce, D.: Origin-based algorithms for combined travel forecasting models, *Transportation Research Part B*, Vol. 37, No. 5, pp. 405-422, 2003.
- 4) Lee, D.: Retrospective on large scale urban models, *Journal of the American Planning Association*, Vol. 60, No. 1, pp. 35-40, 1994.

第2章

- 5) 山内弘隆, 竹内健蔵: 交通経済学, 有斐閣アルマ, 2002.
- 6) 森杉壽芳(主査): プロジェクト評価, 池田駿介ほか(編), 新領域土木工学ハンドブック, 第25章, 2003.
- 7) 加藤浩徳: 交通事業の費用便益分析の現状と課題, 運輸と交通, 第64巻, 第1号, pp. 27-35, 2004.
- 8) 城所幸弘: 交通プロジェクトの便益評価-体系と課題-, 運輸政策研究, Vol. 6, No. 2, pp. 14-27, 2003.
- 9) Bates, J.: Economic evaluation using transport models: Theory and practice, paper presented at the 10th International Conference on Travel Behaviour Research, Lucerne, August 2003, 80 pages, 2003.
- 10) 上田孝行, 小森俊文, 森杉壽芳: 古典的消費者行動モデルによる便益計測手法の比較研究, 土木計画学研究・論文集, No. 17, pp. 187-194, 2000.
- 11) Morisugi, H. and Le, D. H.: Logit model and gravity model in the context of consumer behavior theory, *Journal of Infrastructure Planning and Management*, No. 488/IV-23, pp. 111-119, 1994.
- 12) Morisugi, H., Ueda, T. and Le, D. H.: GEV and nested logit models in the context of classical consumer theory, *Journal of Infrastructure Planning and Management*, No. 506/IV-26, pp. 129-136, 1995.

- 13) 赤松隆: 交通ネットワーク・フロー理論の概要, 交通工学, Vol. 32, No. 5, pp. 11-23, 1997.
- 14) 太田勝敏: 交通システム計画, 交通工学実務双書, 技術書院, 1988.
- 15) Bowman, J. L. and Ben-Akiva, M. E.: Activity-based disaggregate travel demand model system with activity schedules, *Transportation Research Part A*, Vol. 35, No. 1, pp.1-28, 2001.
- 16) Jovicic, G. and Hansen, C.O.: A passenger travel demand model for Copenhagen, *Transportation Research Part A*, Vol. 37, No. 4, pp. 333-349, 2003.
- 17) 赤松隆: 交通ネットワーク・フロー・モデル分析とデータ革命, 交通工学, Vol. 37, No. 5, pp. 22-32, 2002.
- 18) 北村隆一, 森川高行(編著): 交通行動の分析とモデリング-理論/モデル/調査/応用-, 技報堂出版, 2002.
- 19) Boyce, D.: Is the sequential travel forecasting paradigm counterproductive?, *Journal of Urban Planning and Development*, Vol. 128, No. 4, pp. 169-183, 2002.
- 20) Wardrop, J. G.: Some theoretical aspects of road traffic research, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, part II 1(36), pp. 325-378, 1952.
- 21) Beckmann, M., McGuire, C. B. and Winsten, C. B.: *Studies in the Economics of Transportation*, Cowles Commission Monograph, Yale University Press, New Haven, CN, 1956.
- 22) 宮城俊彦, 加藤晃: ランダム効用理論を基礎とした交通統合モデル, 土木計画学研究・論文集, No. 1, pp. 99-106, 1984.
- 23) 宮城俊彦: 交通均衡モデル: 理論と計算法, 土木計画学研究・論文集, No. 2, pp. 13-28, 1985.
- 24) Gartner, N. H.: Optimal traffic assignment with elastic demands: A review part I. Analysis framework, *Transportation Science*, Vol. 14, No. 2, pp. 174-191, 1980.
- 25) Gartner, N. H.: Optimal traffic assignment with elastic demands: A review part II. Algorithmic approaches, *Transportation Science*, Vol. 14, No. 2, pp. 192-208, 1980.
- 26) Friesz, T. L.: Transportation network equilibrium, design and aggregation: key developments and research opportunities, *Transportation Research Part A*, Vol. 19, No. 5/6, pp. 413-427, 1985.
- 27) Boyce, D. E., LeBlanc, L. J., and Chon, K. S.: Network equilibrium models of urban location and travel choices: A retrospective survey, *Journal of Regional Science*, Vol. 28, No. 1, pp. 159- 183, 1988.
- 28) Boyce, D.: Long-term advances in the state of the art of travel forecasting methods, In Marcotte, P. and Nguyen, S. (Eds.), *Equilibrium and Advanced Transportation Modeling*, Kluwer Academic Publishers, 1998.

- 29) Boyce, D.: Forecasting travel on congested urban transportation networks: Review and prospects for network equilibrium models, presented at *The Fifth Triennial Symposium on Transportation Analysis*, 2004.
- 30) Boyce, D.E. and Daskin, M.S.: Urban transportation, *Design and Operation of Civil and Environmental Engineering Systems*, C. ReVelle, and A. McGarity, Eds., Wiley, N.Y., Chapter. 7, pp. 277- 341, 1997.
- 31) Sheffi, Y.: *Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 1985.
- 32) Oppenheim, N.: *Urban Travel Demand Modeling: From Individual Choices to General Equilibrium*, John Wiley & Sons, N. Y., 1995.
- 33) Bell, M. G. H. and Iida, Y.: *Transportation Network Analysis*, John Wiley & Sons, Chichester, U. K., 1997.
- 34) Ortuzar, J. D. and Willumsen, L. G.: *Modelling Transport*, 3rd Edition, John Wiley & Sons, 2001.
- 35) Cascetta, E.: *Transportation Systems Engineering: Theory and Methods*, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- 36) 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と解法-, 丸善, 1998.
- 37) 土木学会: 道路交通需要予測の理論と適用 第I編 利用者均衡配分の適用に向けて, 丸善, 2003.
- 38) 羽藤英二: ネットワーク上の交通行動, 土木計画学研究・論文集, Vol. 19, no. 1, pp. 13-27, 2002.
- 39) Prashker, J.N. and Bekhor, S.: Route choice models used in the stochastic user equilibrium problem: A review, *Transport Reviews*, Vol. 24, No. 4, pp. 437-463, 2004.
- 40) Boyce, D. and Bar-Gera, H.: Multiclass combined models for urban travel forecasting, *Networks and Spatial Economics*, Vol. 4, No. 1, pp. 115-124, 2004.
- 41) Boyce, D. E., Mahmassani, H. S. and Nagurney, A.: A Retrospective on Beckmann, McGuire and Winsten's Studies in the Economics of Transportation, 2004.
<http://supernet.som.umass.edu/articles/jrs.pdf>
- 42) Sheffi, Y. and Powell, W.B.: A comparison of stochastic and deterministic traffic assignment over congested networks, *Transportation Research Part B*, Vol. 15, No. 1, pp. 53-64, 1981.
- 43) Yang, H., Zhang, X. and Meng, Q.: Modeling private highways in networks with entry-exit based toll charges, *Transportation Research Part B*, Vol. 38, No.3, pp. 191-213, 2004.

- 44) Larsson, T., Lindberg, P. O., Patriksson, M. and Rydergren, C.: On traffic equilibrium models with a nonlinear time/money relation, in Patriksson, M. and Labbé, M. (eds.), *Transportation Planning-State of the Art*, Chapter 2, pp. 19-31, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- 45) 森川高行, 姜美蘭, 祖父江誠二, 倉内慎也: 旅行時間と個人属性の関数として表された交通時間価値に関する実証的研究, *土木計画学研究・論文集*, Vol. 19, no. 3, pp. 513-520, 2002.
- 46) Gabriel, S.A. and Bernstein, D.: The traffic equilibrium problem with non-additive path costs, *Transportation Science*, Vol. 31, 337-348, 1997.
- 47) Lo, H. K. and Chen, A.: Traffic equilibrium problem with route-specific costs: formulation and algorithms, *Transportation Research Part B*, Vol. 34, No. 6, pp. 493-513, 2000.
- 48) Dial, R.B.: Bicriterion traffic assignment: basic theory and elementary algorithms, *Transportation Science*, Vol. 30, No. 2, pp. 93-111, 1996.
- 49) Dial, R.B.: Bicriterion traffic assignment: efficient algorithm plus examples, *Transportation Research Part B*, Vol. 31, No. 5, pp.357-379, 1997.
- 50) Dial, R. B.: Bicriterion traffic equilibrium - T2 model, algorithm, and software overview, *Transportation Research Record*, 1725, pp. 54-62, 2000.
- 51) Leurent, F: Cost versus time equilibrium over a network, *Transportation Research Record*, 1443, pp. 84-91, 1994.
- 52) Leurent, F. M.: The theory and practice of a dual criteria assignment model with a continuously distributed value of time, in (Lesort, J.-B. eds.) *Transportation and Traffic Theory, Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, pp. 455-477, Lyon, 1996.
- 53) Leurent, F.M.: Multicriteria assignment modeling: making explicit the determinants of mode or path choice, in Marcotte, P. and Nguyen, S. (Eds.), *Equilibrium and Advanced Transportation Modeling*, chapter 8, pp. 153-174, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- 54) Leurent, F.: Sensitivity and error analysis of the dual criteria traffic assignment model, *Transportation Research Part B*, Vol. 32, No. 3, pp. 189-204, 1998.
- 55) Cantarella, G.E. and Binetti, M.: Stochastic equilibrium traffic assignment with value-of-time distributed among users, *International Transactions in Operational Research*, Vol. 5, No. 6, pp. 541-553, 1998.
- 56) Nagurney, A. and Dong, J.: A multiclass, multicriteria traffic network equilibrium model with elastic demand, *Transportation Research Part B*, Vol. 36, No. 5, pp.

- 445-469, 2002.
- 57) Dafermos, S.C.: The traffic assignment problem for multiclass-user transportation networks, *Transportation Science*, Vol. 6, No. 1, pp. 73-87, 1972.
- 58) Mahmassani, H. S. and Mouskos, K. C.: Some numerical results on the diagonalization algorithm for network assignment with asymmetric interactions between cars and trucks, *Transportation Research Part B*, Vol. 22, No. 4, pp. 275-290, 1988.
- 59) 河上省吾, 徐志敏, 広嶋康弘: 車種別均衡配分モデルに関する実証的な研究, 土木学会論文集, No. 431/IV-15, pp. 57-66, 1991.
- 60) 金子雄一郎, 福田敦: バンコク首都圏における広域物流拠点整備による環境改善効果の推計, 交通工学, Vol. 36, No. 1, pp. 39, 2001.
- 61) 吉田禎雄, 原田昇: 多種流確率的均衡配分モデルによる準動的配分, 土木計画学研究・論文集, Vol. 19, no. 3, pp. 541-549, 2002.
- 62) Larsson, T., Lundgren, J.T., Patriksson, M. and Rydergren, C.: Most likely traffic equilibrium route flows- Analysis and computation, in *Equilibrium Problems: Nonsmooth Optimization and Variational Inequality Models*, F. Giannessi, A. Maugeri, and P.M. Pardalos (eds.), Kluwer Academic Publishers, pp. 129-159, 2001.
- 63) van Vliet, D., Bergman, T. and Scheltes, W.H.: Equilibrium traffic assignment with multiple user classes, In *Proceedings of Seminar M, PTRC 14th Summer Annual Meeting*. PTRC Education and Research Services Ltd, London, P 282, pp. 111-121, 1986.
- 64) Daganzo, C. and Sheffi, Y.: On the stochastic models of traffic assignment, *Transportation Science*, Vol. 11, No. 3, pp. 253-274, 1977.
- 65) Fisk, C.: Some developments in equilibrium traffic assignment, *Transportation Research Part B*, Vol. 14, No. 3, pp. 243-255, 1980.
- 66) Mirchandani, P. and Soroush, H.: Generalized traffic equilibrium with probabilistic travel times and perceptions, *Transportation Science*, Vol. 21, No. 3, pp. 133-152, 1987.
- 67) 中山晶一郎, 高山純一, 笠島崇弘: 旅行時間の不確実性を考慮した交通ネットワーク均衡: 二項分布とポアソン分布を用いた確率ネットワーク均衡モデル, 土木計画学研究・講演集, Vol. 26, CD-ROM (71), 2002.
- 68) Watling, D.: A second order stochastic network equilibrium model, I: Theoretical foundation, *Transportation Science*, Vol. 36, No. 2, pp. 149-166, 2002.
- 69) Watling, D.: A second order stochastic network equilibrium model, II: Solution method and numerical experiments, *Transportation Science*, Vol. 36, No. 2, pp.

- 167-183, 2002.
- 70) Watling, D.: Stochastic network equilibrium under stochastic demand, in Patriksson, M. and Labbé, M. (eds.), *Transportation Planning-State of the Art*, Chapter 3, pp. 33-51, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- 71) Yin, Y. and Ieda, H.: Assessing performance reliability of road networks under nonrecurrent congestion, *Transportation Research Record*, 1771, pp.148-155, 2001.
- 72) Yin, Y. and Ieda, H.: Optimal improvement scheme for network reliability, *Transportation Research Record*, 1783, pp. 1-6, 2002.
- 73) Bell, M.G.H. and Cassir, C.: *Reliability of Transport Networks*, Research Studies Press Ltd., 2000.
- 74) Bell, M. G. H. and Iida, Y.: *The Network Reliability of Transport*, Elsevier Science Ltd, 2003.
- 75) Bell, M.G.H. and Cassir, C.: Risk-averse user equilibrium traffic assignment: An application of game theory, *Transportation Research Part B*, Vol. 36, No. 8, pp. 671-681, 2002.
- 76) 朝倉康夫, 羽藤英二: 交通ネットワーク上の経路選択行動: 観測と理論, 土木学会論文集, No. 660/IV-49, pp. 3-13, 2000.
- 77) van Vuren, T.: The trouble with SUE stochastic assignment options in practice, The 22nd European Transport Forum, Proceedings of the PTRC Summer Annual Meeting, *Transportation Planning Methods: Vol. II*, P380, pp. 41-52, 1994.
- 78) Dial, R.B.: A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration, *Transportation Research*, Vol. 5, No. 2, pp. 83-111, 1971.
- 79) van Vliet, D.: Selected node-pair analysis in Dial's assignment algorithm, *Transportation Research Part B*, Vol. 15, No. 1, pp. 65-68, 1981.
- 80) Bell, M. G. H.: Alternatives to Dial's logit assignment algorithm, *Transportation Research Part B*, Vol. 29, No. 2, pp. 125-137, 1995.
- 81) Akamatsu, T.: Cyclic flows, markov process and transportation stochastic assignment, *Transportation Research Part B*, Vol. 30, No. 5, pp. 369-386, 1996.
- 82) Huang, H.J. and Bell, M.G.H.: A study on logit assignment which excludes all cyclic flows, *Transportation Research Part B*, Vol. 32, No. 6, pp. 401-412, 1998.
- 83) 赤松隆, 牧野幸雄: 複素数空間で経路の幾何学要因を考慮した確率的交通配分, 土木計画学研究・講演集, No. 19(1), pp. 553-556, 1996.
- 84) Wong, S. C.: On the convergence of Bell's logit assignment formulation, *Transportation Research Part B*, Vol. 33, No. 8, pp. 609-616, 1999.
- 85) Maher, M. J. and Hughes, P. C.: A probit-based stochastic user equilibrium

- assignment model, *Transportation Research Part B*, Vol. 31, No. 4, pp. 341-355,1997.
- 86) Vovsha, P. and Bekhor, S.: Link-nested logit model of route choice -Overcoming route overlapping problem, *Transportation Research Record*, 1645, pp. 133-142, 1998.
- 87) Prashker, J.N. and Bekhor, S.: Investigation of stochastic network loading procedures, *Transportation Research Record*, 1645, pp. 94-102, 1998.
- 88) Bekhor, S. and Prashker, J.N.: Formulations of extended logit stochastic user equilibrium assignments, In *Proceedings of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory* (Ceder, A. ed.), Jerusalem, Israel, pp.351-372, 1999.
- 89) Prashker, J.N. and Bekhor, S.: Stochastic user-equilibrium formulations for extended-logit assignment models, *Transportation Research Record*, 1676, pp. 145-152, 1999.
- 90) Prashker, J. N. and Bekhor, S.: Congestion, stochastic, and similarity effects in stochastic user-equilibrium models, *Transportation Research Record*, 1733, pp. 80-87, 2000.
- 91) Bekhor, S. and Prashker, J. N.: Stochastic user equilibrium formulation for Generalized Nested Logit model, *Transportation Research Record*, 1752, pp. 84-90, 2001.
- 92) Russo, F. and Vitetta, A.: An assignment model with modified Logit, which obviates enumeration and overlapping problems, *Transportation*, Vol. 30, No. 2, pp. 177-201, 2003.
- 93) Cascetta, E., Nuzzolo, A, Russo, F. and Vitetta, A.: A modified logit route choice model overcoming path overlapping problems: Specification and some calibration results for interurban networks, In *Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory* (Lesort, J. B. ed.), Lyon, France, pp.697-711, 1996.
- 94) Powell, W.B. and Sheffi, Y.: The convergence of equilibrium algorithm with predetermined step sizes, *Transportation Science*, Vol. 16, No.1, pp. 45-55, 1982.
- 95) Leurent, F. M.: Contribution to logit assignment model, *Transportation Research Record*, 1493, pp. 207-212, 1995.
- 96) Leurent, F.M.: Curbing the computational difficulty of the logit equilibrium assignment model, *Transportation Research Part B*, Vol. 31, No. 4, pp. 315-326, 1997.

- 97) Maher, M.: Algorithms for logit-based stochastic user equilibrium assignment, *Transportation Research Part B*, Vol. 32, No. 8, pp. 539-549, 1998.
- 98) Damberg, O., Lundgren, J. T. and Patriksson, M.: An algorithm for the stochastic user equilibrium problem, *Transportation Research Part B*, Vol.30, No. 2, pp. 115-131, 1996.
- 99) Sheffi, Y. and Powell, W.B.: An algorithm for the equilibrium assignment problem with random link times, *Networks*, Vol. 12, No. 2, pp. 191-207, 1982.
- 100) Rosa, A. and Maher, M.J.: Algorithms for solving the probit path-based stochastic user equilibrium traffic assignment problem with one or more user classes, *Proceedings of 15th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Pergamon, pp. 371-392, 2002.
- 101) 赤松隆, 土屋裕二, 川上喜博: 確率的均衡配分の効率的解法の開発, *交通工学*, Vol. 26, No. 1, pp. 51-58, 1991.
- 102) 赤松隆, 土屋裕二, 川上喜博: 確率均衡配分のいくつかの計算プログラムとその比較, *土木計画学研究・論文集*, No. 7, pp. 89-96, 1990.
- 103) Akamatsu, T.: Decomposition of path choice entropy in general transport networks, *Transportation Science*, Vol. 31, No. 4, pp. 349-362, 1997.
- 104) Williams, H. C. W. L.: On the formulation of travel demand models and economic evaluation measures of user benefit, *Environment and Planning A*, 9, 285-344, 1977.
- 105) 吉田禎雄, 原田昇: 確率的利用者均衡配分を用いた整備効果の計測に関する実証研究, *土木計画学研究・講演集*, Vol. 27, paper-no. 35, 2003.
- 106) Beckmann, M., McGuire, C. B. and Winsten, C. B.: *Studies in the Economics of Transportation*, Cowles Commission Monograph, Yale University Press, New Haven, CN, 1956.
- 107) Fernandez, J. E. L. and Friesz, T. L.: Equilibrium predictions in transportation markets: The state of the art, *Transportation Research Part B*, Vol. 17, No. 2, pp. 155-172, 1983.
- 108) Dafermos, S.C.: The general multimodal network equilibrium problem with elastic demand, *Networks*, Vol. 12, pp. 57-72, 1982.
- 109) Smith, M. J.: The existence, uniqueness and stability of traffic equilibria, *Transportation Research Part B*, Vol. 13, No. 4, pp. 295-304, 1979.
- 110) Nagurney, A.: *Network Economics: A Variational Inequality Approach*, second and revised ed. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1999.
- 111) Evans, S. P.: Derivation and analysis of some models for combining trip distribution and assignment, *Transportation Research*, Vol. 10, No. 1, pp. 37-57,

- 1976.
- 112) Oppenheim, N.: Equilibrium trip distribution/assignment with variable destination costs, *Transportation Research Part B*, Vol. 27, No. 3, pp. 207-217, 1993.
- 113) Cantarella, G.E.: A general fixed-point approach to multimodal multi-user equilibrium assignment with elastic demand, *Transportation Science*, Vol. 31, No. 2, pp. 107-128, 1997.
- 114) Fernandez, E., Joaquin D.C., Florian, M. and Cabrera, E.: Network equilibrium models with combined modes, *Transportation Science*, Vol. 28, No. 3, pp. 182-192, 1994.
- 115) 宮城俊彦, 水口晴男: 複合交通手段選択を考慮した交通ネットワーク均衡モデルに関する研究, 土木学会論文集, No.512/IV-27, pp. 25-33, 1995.
- 116) 溝上章志, 河内誠: Mixed Mode ネットワーク均衡モデルによる P&R システムの需要予測, 土木計画学研究・論文集, No. 17, pp. 613-622, 2000.
- 117) Wu, Z.X. and Lam, W.H.K.: Combined modal split and stochastic assignment model for congested networks with motorized and nonmotorized transport modes, *Transportation Research Record*, 1831, pp. 57-64, 2003.
- 118) 溝上章志: P&R 需要予測への GEV 型手段選択モデルの適用可能性, 都市計画論文集, No. 38-1, pp. 40-45, 2003.
- 119) 松井寛, 藤田素弘: 高速道路を含む都市圏道路網における利用者均衡配分モデルの実用化に関する研究, 土木学会論文集, No. 653/IV-48, pp. 85-94, 2000.
- 120) 松井寛, 藤田素弘: 大都市圏道路網を対象とした拡張型利用者均衡配分モデルの開発とその実用化, 土木計画学研究・論文集, No. 17, pp. 15-28, 2000.
- 121) 藤田素弘, 雲林院康宏, 松井寛: 高速道路を考慮した時間帯別均衡配分モデルの拡張に関する研究, 土木計画学研究・論文集, Vol. 18, no. 3, pp. 563-572, 2001.
- 122) 河上省吾, 杉野 学: 都市高速道路を含む道路網における車種別時間帯別交通量配分に関する研究, 地域学研究, Vol. 29, No. 1, pp. 101-114, 1998.
- 123) 河上省吾, 金森亮: 高速道路を含む道路網におけるピーク時間帯配分交通量予測法の比較-料金抵抗法と高速転換率法の比較-, 地域学研究, Vol. 32, No.1, pp. 75-83, 2002.
- 124) 秋山孝正, 安田幸司, 奥嶋政嗣, 椎谷拓也: 都市高速道路乗り継ぎ制における最適設定法についての研究, 土木学会論文集, No. 751/IV-62, pp. 13-25, 2004.
- 125) Roy, J.R. and Thill, J.C.: Spatial interaction modelling, *Papers in Regional Science*, Vol. 83, No. 1, pp. 339-361, 2004.

- 126) Yang, H. and Meng, Q.: An integrated network equilibrium model of urban location and travel choices, *Journal of Regional Science*, Vol. 38, No. 4, pp. 575-598, 1998.
- 127) Abrahamsson, T. and Lundqvist, L.: Formulation and estimation of combined network equilibrium models with application to Stockholm, *Transportation Science*, Vol. 33, No. 1, pp. 80-100, 1999.
- 128) Boyce, D. and Bar-Gera, H.: Validation of multiclass urban travel forecasting models combining origin-destination, mode, and route choices, *Journal of Regional Science*, Vol. 43, No. 3, pp. 517-540, 2003.
- 129) Patriksson, M.: *The Traffic Assignment Problem: Models and Methods*, VSP, The Netherlands, 1994.
- 130) Patriksson, M.: Algorithms for computing traffic equilibria, *Networks and Spatial Economics*, Vol. 4, No. 1, pp. 23-38, 2004.
- 131) Lee, D.-H. and Nie, Y.: Accelerating strategies and computational studies of the Frank-Wolfe algorithm for the traffic assignment problem, *Transportation Research Record*, 1771, pp. 97-105, 2001.
- 132) Chen, A.: Effects of flow update strategies on implementation of the Frank-Wolfe algorithm for the traffic assignment problem, *Transportation Research Record*, 1771, pp. 132-139, 2001.
- 133) Bar-Gera, H.: Origin-based algorithm for the traffic assignment problem, *Transportation Science*, Vol. 36, No.4, pp. 398-417, 2002.
- 134) Bar-Gera, H. and Boyce, D.: Origin-based network assignment, in Patriksson, M. and Labbé, M. (eds.), *Transportation Planning-State of the Art*, Chapter 1, pp. 1-17, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- 135) Boyce, D., Ralevic-Dekic, B., and Bar-Gera, H.: Convergence of traffic assignments: How much is enough?, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 130, No.1, pp. 49-55, 2004.
- 136) Bar-Gera, H. and Boyce, D.: Origin-based algorithms for combined travel forecasting models, *Transportation Research Part B*, Vol. 37, No. 5, pp. 405-422, 2003.
- 137) 内田賢悦, 加賀屋誠一, 萩原亨: スプリット制御を導入した利用者均衡配分モデルにおける解の信頼性に関する研究, *土木計画学研究・論文集*, Vol. 19, no. 3, pp. 399-408, 2002.
- 138) 溝上章志, 松井寛, 可知隆: 日交通量配分に用いるリンクコスト関数の開発, *土木学会論文集*, No. 401/ IV-10, pp. 99-107, 1989.
- 139) 松井寛, 山田周治: 道路交通センサデータに基づく BPR 関数の設定, 交

- 通工学, Vol. 33, No. 6, pp. 9-16, 1998.
- 140) 八木勇司, 溝上章志: 時間帯別交通量配分に用いるリンクコスト関数の推定, 土木学会第 55 回年次学術講演会第 IV 部, IV-364, 2000.
- 141) 吉田禎雄, 原田昇: 均衡配分用 BPR 式パラメータの推計, 土木学会論文集, No. 695/IV-54, pp. 91-102, 2002.
- 142) 西谷仁志, 朝倉康夫, 柏谷増男: 交通量配分に用いる走行時間関数のパラメータ推定と影響分析, 土木計画学研究・講演集, No. 14(1), pp. 315-322, 1991.
- 143) 朝倉康夫: リンクコスト関数(Q-V 式)の設定とアウトプットの精度評価: 交通ネットワークの分析手法-実務と理論研究の接点, 土木計画学ワンディセミナー4, pp. 51-74, 1994.
- 144) Boyce, D.E., Janson, B.N., and Eash, R.W.: The effect of equilibrium trip assignment of different link congestion functions, *Transportation Research Part A*, Vol. 15, No. 3, pp. 223-232, 1981.
- 145) 運輸政策研究機構: 鉄道プロジェクトの費用対効果分析マニュアル'99, 運輸省鉄道局, 運輸政策研究機構発行, 1999.
- 146) 志田州弘, 古川敦, 赤松隆, 家田仁: 通勤鉄道利用者の不効用関数のパラメータの移転性に関する研究, 土木計画学研究・講演集, No. 12, pp. 519-525, 1989.
- 147) 美谷邦章, 家田仁, 畠中秀人: 乗車位置選択行動モデルを用いた混雑費用の定量的評価法, 土木計画学研究・論文集, No. 5, pp. 139-146, 1987.
- 148) 山鹿久木, 八田達夫: 通勤の疲労コストと最適混雑料金の測定, 日本経済研究, No.41, pp. 110-131, 2000.
- 149) 山鹿久木: ヘドニック・アプローチによる通勤混雑疲労の測定-東京都の通勤鉄道における実証的研究-, 交通学研究/2001 年研究年報(通巻 45 号), pp. 157-166, 2002.
- 150) Lam, W.H.K., Chueng, C.Y. and Lam, C.F.: A study of crowding effects at Hong Kong Light Rail Transit stations, *Transportation Research Part A*, Vol. 33, No. 5, pp. 401-415, 1999.
- 151) 岩倉成志, 渡辺将一郎, 土居厚司: 都市鉄道の時刻別需要予測のためのリンクコスト関数の開発-小田急小田原線を対象に-, 土木計画学研究・論文集, No.17, pp.709-714, 2000.
- 152) Ben-akiva, M. and Bierlaire, M.: Discrete choice models and their application to short term travel decisions, in Hall, W. (eds.) *Handbook of Transportation Science*, Second Edition, Chapter 2, pp. 7-37, Kluwer Academic Publishers, 2003.
- 153) Yai, T., Iwakura, S. and Morichi, S.: Multinomial probit with structured covariance

- for route choice behavior, *Transportation Research Part B*, Vol. 31, No. 4, pp. 195-207, 1997.
- 154) 溝上章志, 松井寛: Fisk 型確率均衡配分モデルの未知パラメータ θ の推定に関する一手法, *交通工学*, Vol. 28, No. 2, pp. 21-29, 1993.
- 155) Yang, H., Meng, Q., Bell, M. G. H.: Simultaneous estimation of the origin-destination matrices and travel-cost coefficient for congested networks in a stochastic user equilibrium, *Transportation Science*, Vol. 35, No. 2, pp. 107-123, 2001.
- 156) Lo, H.-P. and Chan, C.-P.: Simultaneous estimation of an origin-destination matrix and link choice proportions using traffic counts, *Transportation Research Part A*, Vol. 37, No. 9, pp. 771-788, 2003.
- 157) 中山晶一朗, 高山純一: リンク交通量間の相関を考慮した交通ネットワーク分析におけるパラメータ推定法: ポアソン確率ネットワーク均衡を用いて, *土木計画学研究・講演集*, Vol. 28, CD-ROM, 2003.
- 158) Boyce, D. E. and Zhang, Y. F.: Calibrating combined model of trip distribution, modal split, and traffic assignment, *Transportation Research Record*, 1607, pp. 1-5, 1997.
- 159) Boyce, D.E., Chon, K.S., Lee, Y.J., Lin, K.T. and LeBlanc, L.J.: Implementation and computational issues for combined models of location, destination, mode, and route choice, *Environment and Planning A*, Vol. 15, No. 9, pp. 1219-1230, 1983.
- 160) Wilson, A.G.: The use of entropy maximizing models in the theory of trip distribution, mode split and route split, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 3, No. 1, pp.108-126, 1969.
- 161) Anas, A.: Statistical properties of mathematical programming model of stochastic network equilibrium, *Journal of Regional Science*, Vol.28, pp.511-530, 1988.
- 162) Boyce, D. E. and Zhang, Y. F.: Parameter estimation for combined travel choice models, in Lundqvist, L. *et al.* (eds.), *Network Infrastructure and the Urban Environment*, Springer, pp. 177- 193, 1998.
- 163) 溝上章志, 竹隈史明: ネットワーク均衡モデルに含まれる構成モデルの観測交通量による逆解析, *土木計画学研究・講演集*, Vol. 28, CD-ROM, 2003.
- 164) Lam, W. H. K. and Yin, Y.: An activity-based time-dependent traffic assignment model, *Transportation Research Part B*, Vol. 35, No. 6, pp. 549-574, 2001.
- 165) Lam, W. H. K. and Huang, H. -J.: A combined activity/travel choice model for congested road networks with queues, *Transportation*, Vol. 29, No. 1, pp. 5-29, 2002.
- 166) Lam, W. H. K. and Huang, H.-J.: Combined activity/travel choice models:

- Time-dependent and dynamic versions, *Networks and Spatial Economics*, Vol. 3, No. 3, pp. 323-347, 2003.
- 167) Nagurney A, Dong J: Urban location and transportation in the Information Age: a multiclass, multicriteria network equilibrium perspective, *Environment and Planning B*, Vol. 29, No. 1, pp. 53-74, 2002.
- 168) 溝上章志, 亀山正博: ネットワーク均衡理論による観光地域の観光容量推定法の開発と適用, *土木計画学研究・論文集*, No. 15, pp. 385-392, 1998.
- 169) Oppenheim, N.: A combined, equilibrium model of urban personal travel and goods movements, *Transportation Science*, Vol. 27, No. 2, pp. 161-173, 1993.
- 170) de Cea, J. and Fernandez, E.: Transit-assignment models, in Hensher, D.A. and Button, K.J. (eds.) *Handbook of Transport Modelling*, Chapter 30, pp. 497-508, Elsevier Science, 2000. (訳: 財団法人道路経済研究所(太田勝敏主査): 道経研シリーズ A-95, 交通モデリングハンドブック, 2002.)
- 171) De Cea, J. and Fernandez, J. E.: Transit assignment for congested public transport systems: An equilibrium model, *Transportation Science*, Vol. 27, No. 3, pp. 133-147, 1993.
- 172) Wu, J. H., Florian, M. and Marcotte, P.: Transit equilibrium assignment: A model and solution algorithms, *Transportation Science*, Vol. 28, No.3, pp. 193-203, 1994.
- 173) Lam, W.H.K., Gao, Z.Y., Chan, K.S., and Yang, H.: A stochastic user equilibrium assignment model for congested transit networks, *Transportation Research Part B*, Vol. 33, No. 5, pp. 351-368, 1999.
- 174) Lam, W. H. K., Zhou, J. and Sheng, Z.: A capacity restraint transit assignment with elastic line frequency, *Transportation Research Part B*, Vol. 36, No. 10, pp. 919-938, 2002.
- 175) Lo, H. K., Yip, C. W. and Wan, K. H.: Modeling transfer and non-linear fare structure in multi-modal network, *Transportation Research Part B*, Vol. 37, No. 2, pp. 149-170, 2003.
- 176) Lam, W.H.K. and Bell, M.G.H.: *Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning*, Elsevier Science, 2002.
- 177) Yang, H.: Multiple equilibrium behaviors and advanced traveler information systems with endogenous market penetration, *Transportation Research Part B*, Vol. 32, No. 3, pp.205-218, 1998.
- 178) Yang, H. and Meng, Q.: Modeling user adoption of advanced traveler information systems: dynamic evolution and stationary equilibrium, *Transportation Research Part A*, Vol. 35, No. 10, pp. 895-912, 2001.

- 179) Yin, Y. and Yang, H.: Simultaneous determination of the equilibrium market penetration and compliance rate of advanced traveler information systems, *Transportation Research Part A*, Vol. 37, No. 2, pp. 165-181, 2003.
- 180) 溝上章志, 本田秀太: 多種流確率均衡配分理論を用いた VICS 情報の利用率予測と効果計測の方法, 土木学会論文集, No. 709/IV-56, pp. 105-115,
- 181) 溝上章志, 竹隈史明: 交通ネットワーク分析を用いた道路交通情報提供システム導入効果の評価, 土木計画学研究・論文集, Vol. 20, no. 4, pp. 931-938, 2003.
- 182) Yang, H.: Evaluating the benefits of a combined route guidance and road pricing system in a traffic network with recurrent congestion, *Transportation*, Vol. 26, No. 3, pp. 299-322, 1999.
- 183) Yang, H. and Zhang, X.: Modeling competitive transit and road traffic information services with heterogeneous endogenous demand, *Transportation Research Record*, 1783, pp. 7-16, 2002.
- 184) Huang, Lam and Chan: Modelling commuter behaviour in networks with ATIS for combined activity/destination/route choice problem, paper presented at the 10th International Conference on Travel Behaviour Research, Lucerne, August 2003.
- 185) 井上博司: 混雑した道路網における交通均衡およびその数値解法, 土木学会論文集, No. 365/IV- 4, pp. 125-133, 1986.
- 186) Patricksson, M.: *The Traffic Assignment Problem: Models and Methods*, VSP, The Netherlands, 1994.
- 187) Ferrari, P.: Road pricing and network equilibrium, *Transportation Research Part B*, Vol. 29, No. 5, pp. 357-372, 1995.
- 188) Bell, M. G. H.: Stochastic user equilibrium assignment in networks with queues, *Transportation Research Part B*, Vol. 29, No. 2, pp. 125-137, 1995.
- 189) Yang, H. and Bell, M. G. H.: Traffic restraint, road pricing and network equilibrium, *Transportation Research Part B*, Vol. 31, No.1 pp. 303-314, 1997.
- 190) Yang, H. and Huang, H.: Principle of marginal-cost pricing: How does it work in a general road network? , *Transportation Research Part A*, Vol. 32, No.1 pp. 45-54, 1998.
- 191) Cheng, L., Iida, Y., and Uno, N.: Application Quasi-Newton methods to capacitated UE Assignment, *Infrastructure Planning Review*, Vol. 19, no. 3, pp. 521-532, 2002.
- 192) Nie, Y., Zhang, H. M. and Lee, D.-H.: Models and algorithms for the traffic assignment problem with link capacity constraints, *Transportation Research Part B*,

- Vol. 38, No. 4, pp. 285-312, 2004.
- 193) 藤田素弘, 松井寛, 溝上章志: 時間帯別交通量配分モデルの開発と実用化に関する研究, 土木学会論文集, No. 389/ IV-8, pp. 111-119, 1988.
- 194) 宮城俊彦, 牧村和彦: 時間帯別交通配分手法に関する研究, 交通工学, Vol. 26, No. 2, pp. 17-28, 1991.
- 195) 藤田素弘, 山本幸司, 松井寛: 渋滞を考慮した時間帯別交通量配分モデルの開発, 土木学会論文集, No. 407/ IV-11, pp. 129-138, 1989.
- 196) 赤松隆, 牧野幸雄, 高橋栄行: 時間帯別 OD 需要とリンクでの渋滞を内生化した準動的交通配分, 土木計画学研究・論文集, No.15, pp. 535-545, 1998.
- 197) Lam, W. H. K., Zhang, Y. and Yin, Y.: Time-dependent model for departure time and route choices in networks with queues, *Transportation Research Record* 1667, pp. 33-41, 1999.
- 198) Lam, W. H. K. and Zhang, Y.: Capacity-constrained traffic assignment in networks with residual queues, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 2, pp. 121-128, 2000.
- 199) Tobin, R. L. and Friesz, T. L.: Sensitivity analysis for equilibrium network flow, *Transportation Science*, Vol. 22, No. 4, pp. 242-250, 1988.
- 200) Yang, H.: Sensitivity analysis for the elastic-demand network equilibrium problems with applications, *Transportation Research Part B*, Vol. 31, No. 1. pp. 51-70, 1997.
- 201) Ying, J.Q. and Miyagi, T.: Sensitivity analysis for stochastic user equilibrium network flows- A dual approach, *Transportation Science*, Vol. 35, No. 2, pp. 124-133, 2001.
- 202) Clark, S. D. and Watling, D. P.: Probit-based sensitivity analysis for general traffic networks, *Transportation Research Record*, 1733, pp. 88-95, 2000.
- 203) Clark, S. D. and Watling, D. P.: Sensitivity analysis of the probit-based stochastic user equilibrium assignment model, *Transportation Research Part B*, Vol. 36, No. 7, pp. 617-635, 2002.
- 204) Leurent, F.: Sensitivity and error analysis of the dual criteria traffic assignment model, *Transportation Research Part B*, Vol. 32, No. 3, pp. 189-204, 1998.
- 205) Patriksson, M. and Rockafellar, R. T.: Sensitivity analysis of aggregated variational inequality problems, with application to traffic equilibria, *Transportation Science*, Vol. 37, No. 1, pp. 56-68, 2003.
- 206) Patriksson, M.: Sensitivity analysis of traffic equilibria, *Transportation Science*, Vol 38, No. 3, pp. 258-281, 2004.

- 207) 朝倉康夫: 利用者均衡を制約とする交通ネットワークの最適計画モデル, 土木計画学研究・論文集, No. 6, pp. 1-19, 1988.
- 208) Yang, H. and Bell, M.G.H.: Models and algorithms for road network design: a review and some developments, *Transport Reviews*, Vol. 18, No. 3, pp. 257-278, 1998.
- 209) Luo, Z., Pang, J. and Ralph, D. *Mathematical Programs with Equilibrium Constraints*, Cambridge University Press, 1996.
- 210) MPEC 研究会 編: MPEC にもとづく交通・地域政策分析, 中京大学経済学部 附属経済研究所研究叢書, 第9輯, 2003.
- 211) Tam, M. L. and Lam, W. H. K.: Maximum car ownership under constraints of road capacity and parking space, *Transportation Research Part A*, Vol. 34, No. 3, pp. 145-170, 2000.
- 212) Patriksson, M. and Rockafellar, R.T.: A bilevel optimization model and descent algorithm for traffic management, *Transportation Science*, Vol. 36, No. 3, pp. 271-291, 2002.
- 213) Meng, Q. and Yang, H.: Benefit distribution and equity in road network design, *Transportation Research Part B*, Vol. 36, No. 1, pp. 19-35, 2002.
- 214) Yang, H. and Meng, Q.: Departure time, route choice and congestion tolls in a queuing network with elastic-demand, *Transportation Research Part B*, Vol. 32, No. 4, pp. 247-260, 1998.
- 215) Ferrari, P.: Road pricing and network equilibrium, *Transportation Research Part B*, Vol. 29, No. 5, pp. 357-372, 1995.
- 216) Yang, H. and Bell, M. G. H.: Traffic restraint, road pricing and network equilibrium, *Transportation Research Part B*, Vol. 31, No.1 pp. 303-314, 1997.
- 217) Ferrari, P.: Congestion pricing for urban bimodal transportation networks, in (Lesort, J.-B. eds.) *Transportation and Traffic Theory, Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, pp. 409-430, Lyon, 1996.
- 218) 赤松隆, 宮脇治: 利用者均衡条件下での交通ネットワーク最大容量問題, 土木計画学研究・論文集, Vol. 12, pp. 719-730, 1995.
- 219) Yang, H., Bell, M.G.H. and Meng, Q.: Modeling the capacity and level of service of urban transportation networks, *Transportation Research Part B*, Vol. 34, No. 4, pp. 255-275, 2000.
- 220) 赤松隆, 半田正樹: 交通ネットワーク・居住立地の同時均衡条件下での許容オフィス立地量, 土木計画学研究・論文集, Vol. 14, pp. 253-257, 1997.

- 221) 赤松隆, 半田正樹: Nested LOGIT 型交通・住居立地統合均衡モデルとその効率的解法, 土木計画学研究・論文集, No. 13, pp. 279-287, 1996.
- 222) Yang, H. and Yagar, S.: Traffic assignment and traffic control in general freeway-arterial corridor systems, *Transportation Research Part B*, Vol. 28, No.6, pp. 463-486, 1994.
- 223) Yang, H.: Heuristic algorithms for the bilevel origin-destination matrix estimation problem, *Transportation Research Part B*, Vol. 29, No.4, pp.231-242, 1995.
- 224) Yang, H.: Sensitivity analysis for the elastic-demand network equilibrium problems with applications, *Transportation Research Part B*, Vol. 31, No. 1. pp. 51-70, 1997.
- 225) Miyagi, T. and Suzuki, T.: A ramsey price equilibrium model for urban transit systems: a bilevel programming approach with transportation network equilibrium constraints, in Hensher, D., King, J. and Oum, T.H. (eds.) *World Transport Research*, Proceedings of 7th World Conference on Transport Research, Vol. 2, pp. 65-78, 1996.
- 226) 鈴木崇児: 都市鉄道の次善料金形成-自動車交通と競合下での理論-, 中京大学経済学研究叢書第 10 輯, 2002.
- 227) Yang, H. and Meng, Q.: Highway pricing and capacity choice in a road network under a build-operate-transfer scheme, *Transportation Research Part A*, Vol. 34, No. 3, pp.207-222, 2000.
- 228) Yang, H. and Meng, Q.: A note on "highway pricing and capacity choice in a road network under a build-operate-transfer scheme", *Transportation Research Part A*, Vol. 36, No. 7, pp. 659-663, 2002.
- 229) Mohring, H. and Harwitz, M.: *Highway Benefits -An Analytical Framework*, Northwestern University Press, Chicago, 1962.
- 230) Small, K. A. : *Urban Transportation Economics*, Harwood Academic Publishers, 1992. (邦訳: 金沢哲雄, 三友仁志, 監訳:都市交通の経済分析, 劉草書房, 1999.)
- 231) Yang, H. and Bell, M.G.H. (eds.): Transport bilevel programming problems: recent methodological advances, *Transportation Research Part B*, Vol. 35, No. 1, pp. 1-4, 2001.
- 232) 太田勝敏: ロードプライシングの展開-ロンドンでの導入を中心として, 運輸と経済, 第 63 卷, 第 7 号, pp. 14-20, 2003.
- 233) Button, K.J. (Ed.): Road Pricing, *Transportation Research Part A* Vol. 20, No.2 (special issue), 1986.
- 234) Small, K.A. (Ed.): Congestion Pricing, *Transportation*, Vol. 19, No.4 (special

- issue), 1992.
- 235) Paulley, N.(eds.): Recent studies on key issues in road pricing, *Transport Policy*, Vol. 9, No. 3, 2002.
- 236) 山田浩之: ロードプライシングの現実性, 高速道路と自動車, 第47巻, 第2号, pp.7-10, 2004.
- 237) Johansson, B. and Mattsson L.G. (eds.), *Road Pricing: Theory, Empirical Assessment and Policy*, Kluwer Academic Publishers, 1994.
- 238) Button, K.J. and Verhoef, E. T. (eds.) *Road Pricing, Traffic Congestion and the Environment*, Edward Elgar
- 239) Lindsey, R. and Verhoef, E.: Traffic congestion and congestion pricing, in Button, K.J. and Hensher, D.A. (eds.) *Handbook of Transport Systems and Traffic Control*, Chapter 7, pp. 77-105, Elsevier Science, 2001.
- 240) 山田浩之(編): 交通混雑の経済分析, 勁草書房, 2001.
- 241) Huang, H.-J., Li, Z.-C. and Kaku, I.: Recent developments in congested-road use pricing, Proceedings of Knowledge and Economics in Japan, 2003.
- 242) Pigou, A. C.: *The Economics of Welfare*, London, Macmillan, 1920.
- 243) Walters, A. A.: The theory and measurement of private and social cost of highway congestion, *Econometrica*, Vol. 29, pp. 676-699, 1961.
- 244) Beckmann, M.J.: On optimal tolls for highways, tunnels and bridges. In: *Vehicular Traffic Science*. American Elsevier, New York, pp. 331-341, 1965.
- 245) Dafermos, S. C. and Sparrow F. T.: Optimal resource allocation and toll patterns in user-optimized transport networks, *Journal of Transport Economic Policy*, Vol. 5, No. 2, pp. 184-200, 1971.
- 246) Dafermos, S. C.: Toll patterns for multiclass-user transportation networks, *Transportation Science*, Vol. 7, pp. 211-223, 1973.
- 247) Smith, M.J.: The marginal cost taxation of a transportation network, *Transportation Research Part B*, Vol. 13, No. 3, pp. 237-242, 1979.
- 248) Gartner, N. H.: Optimal traffic assignment with elastic demands: A review part I. Analysis framework, *Transportation Science*, Vol. 14, No. 2, pp. 174-191, 1980.
- 249) Yang, H. and Huang, H.: Principle of marginal-cost pricing: How does it work in a general road network?, *Transportation Research Part A*, Vol. 32, No.1 pp. 45-54, 1998.
- 250) 赤松隆, 桑原雅夫: 確率的利用者均衡条件下での最適混雑料金, 土木学会論文集, No. 389/IV-8, pp. 121-129, 1988.
- 251) Akamatsu, T. and Kuwahara, M.: Optimal toll pattern on a road network under

- stochastic user equilibrium with elastic demand, *Selected Proceedings of the 5th World Conference on Transport Research*, Vol. 1, pp. 259-273, 1989.
- 252) Smith, T.E., Eriksson, E.A., and Lindberg, P.O.: Existence of optimal tolls under condition of stochastic user-equilibria, in Johansson, B. and Mattsson L.G. (eds.), *Road Pricing: Theory, Empirical Assessment and Policy*, Kluwer Academic Publishers, pp. 65-87, 1994.
- 253) Yang, H.: System optimum, stochastic user equilibrium and optimal link tolls, *Transportation Science*, Vol. 33, No. 4, pp. 354-360, 1999.
- 254) Bellei, G., Gentile, G. and Papola, N.: Network pricing optimization in multi-user and multimodal context with elastic demand, *Transportation Research Part B*, Vol. 36, No. 9, pp. 779-798, 2002.
- 255) 円山琢也, 原田昇, 太田勝敏: Nested Logit 型確率的利用者均衡条件下での最適混雑料金, 土木計画学研究・論文集, Vol. 20, Vol. 20, no. 3, pp.555-562, 2003.
- 256) Yang, H., Meng, Q. and Hay, T.D.: Optimal integrated pricing in a bi-modal transportation network, in Lee, D.-H. (ed) *Urban and Regional Transportation Modeling: Essays in Honor of David Boyce*, Chapter 8, pp. 134-156, Edward Elgar Publishing, 2004.
- 257) Hearn, D.W. and Ramana, M.V.: Solving congestion toll pricing models, in Marcotte, P. and Nguyen, S. (Eds.), *Equilibrium and Advanced Transportation Modeling*, Chapter 6, pp. 109-124, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- 258) Hearn, D.W. and Yildirim, M.B.: A toll pricing framework for traffic assignment problems with elastic demand, in Gendreau, M. and Marcotte, P. (eds.) *Transportation and Network Analysis: Current Trends*, Chapter 9, pp. 135-145, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- 259) Dial, R.B. Minimal-revenue congestion pricing Part I: a fast algorithm for the single origin case, *Transportation Research Part B*, Vol. 33, No.3, pp. 189-202, 1999.
- 260) Dial, R.B. Minimal-revenue congestion pricing Part II: an efficient algorithm for the general case, *Transportation Research Part B*, Vol. 34, No. 8, pp. 645-665, 2000.
- 261) Braid, R. M.: Peak-load pricing of a transportation route with an unpriced substitute, *Journal of Urban Economics*, Vol. 40, No. 2, pp. 179-197, 1996.
- 262) Verhoef, E., Nijkamp, P. and Rietveld, P.: Second-best congestion pricing: the case of an untolled alternative, *Journal of Urban Economics*, Vol. 40, No. 3, pp. 279-302, 1996.
- 263) Liu, L. N. and McDonald, J. F.: Efficient congestion tolls in the presence of

- unpriced congestion: A peak and off-peak simulation model, *Journal of Urban Economics*, Vol. 44, No. 3, pp. 352-366, 1998.
- 264) Liu, L.N. and McDonald, J.F.: Economic efficiency of second-best congestion pricing schemes in urban highway systems, *Transportation Research Part B*, Vol. 33, No. 3, pp. 157-188, 1999.
- 265) 竹隈史明, 溝上章志: パーク・アンド・ライドとロードプライシングによるTDMパッケージ施策の評価手法, 都市計画論文集, No. 37, pp.247-252, 2002.
- 266) Wang, J. Y. T., Yang, H. and Lindsey, R.: Locating and pricing park-and-ride facilities in a linear monocentric city with deterministic mode choice, *Transportation Research Part B*, Vol. 38, No. 8, pp. 709-731, 2004.
- 267) Verhoef, E. T.: Second-best congestion pricing in general static transportation networks with elastic demands, *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 32, No. 3, pp. 281-310, 2002.
- 268) Verhoef, E. T.: Second-best congestion pricing in general networks. Heuristic algorithms for finding second-best optimal toll levels and toll points, *Transportation Research Part B*, Vol. 36, No. 8, pp.707-729, 2002.
- 269) May, A.D., Milne, D.S., Shepherd, S.P., and Sumalee, A.: Specification of optimal cordon pricing locations and charges, *Transportation Research Record*, 1812, pp. 60-68, 2002.
- 270) May, A. D., Liu, R., Shepherd, S. P. and Sumalee, A.: The impact of cordon design on the performance of road pricing schemes, *Transport Policy*, Vol. 9, No. 3, pp. 209-220, 2002.
- 271) Santos, G.: Double cordon tolls in urban areas to increase social welfare, *Transportation Research Record*, 1812, pp. 53-59, 2002.
- 272) Mun, S., Konishi, K. and Yoshikawa, K.: Optimal cordon pricing, *Journal of Urban Economics*, Vol. 54, No. 1, pp. 21-38, 2003.
- 273) Yang, H. Zhang, X. and Huang, H.J.: Determinations of optimal toll levels and locations of alternative congestion pricing schemes, in Taylor, M.A.P. (eds.) *Transportation and Traffic Theory in the 21st Century*, Proceedings of the 15th international symposium on transportation and traffic theory, pp. 519-540, Adelaide, Australia, 2002.
- 274) Zhang, X. and Yang, H.: The optimal cordon-based network congestion pricing problem, *Transportation Research Part B*, Vol. 38, No. 6, pp. 517-537, 2004.
- 275) May, A. D. and Milne, D. S.: Effects of alternative road pricing systems on network performance, *Transportation Research Part A*, Vol. 34, No. 6, pp. 407-436,

- 2000.
- 276) 野杵貴博, 秋山孝正: 遺伝的アルゴリズムによる都市道路網ゾーン別混雑料金の設定, 土木計画学研究・論文集, Vol. 18, no. 3, pp. 455-462, 2001.
- 277) Akiyama, T. and Noiri, T.: The analysis of zonal congestion pricing on urban network, *Selected Proceedings of the 9th World Conference on Transport Research*, 2003.
- 278) 秋山孝正, 奥嶋政嗣: 都市交通政策としてのゾーン別混雑料金設定-遺伝的アルゴリズムを用いた分析-, 交通学研究/2002年研究年報(通巻46号), pp. 201-210, 2003.
- 279) Yang, H. and Lam, W.H.K.: Optimal road tolls under conditions of queuing and congestion, *Transportation Research Part A*, Vol. 30, No. 5, pp. 319-332, 1996.
- 280) Yang, H. and Zhang, X.: Multiclass network toll design problem with social and spatial equity constraints, *ASCE Journal of Transportation Engineering*, Vol. 128, No. 5, pp. 420-428, 2002.
- 281) Vickrey, W.S.: Congestion theory and transport investment, *American Economic Review*, Vol. 59, No. 2, Papers and Proceedings of the Eighty-first Annual Meeting of the American Economic Association, pp. 251-260, 1969.
- 282) 桑原雅夫: 渋滞現象と需要解析, 土木計画学研究・講演集, Vol. 28, 招待論文, 2003.
- 283) 桑原雅夫: 動的な限界費用に関する理論的分析, 土木学会論文集, No. 709/IV-56, pp. 127-138, 2002.
- 284) Verhoef, E.T.: An integrated dynamic model of road traffic congestion based on simple car-following theory: exploring hypercongestion, *Journal of Urban Economics*, Vol. 49, No. 3, pp. 505-542, 2001.
- 285) Small, K.A. and Chu, X.: Hypercongestion, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 37, No. 3, pp. 319-352, 2003.
- 286) Verhoef, E. T.: Inside the queue: hypercongestion and road pricing in a continuous time-continuous place model of traffic congestion, *Journal of Urban Economics*, Vol. 54, No. 3, pp. 531-565, 2003.
- 287) 赤松隆, 早崎俊和, 前田祐希: 道路交通における通勤混雑緩和のための最適通勤開始時刻分布, 土木計画学研究・論文集, Vol.16, pp.979-989, 1999.
- 288) 吉村充功, 奥村誠, 松本寛史: フレックスタイム制度下における最適ピークロードプライシング, 土木計画学研究・論文集, Vol.19, no.4, pp.823-830, 2002.
- 289) 吉村充功, 奥村誠: 自動車・鉄道間の混雑料金賦課・還元スキームの影響分

- 析, 都市計画論文集, No.37, pp. 175-180, 2003.
- 290) 吉村充功, 奥村誠: 自動車・鉄道の分担を考慮したフレックスタイム制度下の最適通勤・始業時刻分布の分析, 土木計画学研究・論文集, Vol. 20, no. 4, pp. 903-912, 2003.
- 291) Huang, H.-J.: Fares and tolls in a competitive system with transit and highway: the case with two groups of commuters, *Transportation Research Part E*, Vol. 36, No. 4, pp. 267-284, 2000.
- 292) Huang, H.J.: Pricing and logit-based mode choice models of a transit and highway system with elastic demand, *European Journal of Operational Research*, Vol. 140, No.3, pp. 562-570, 2002.
- 293) Tabuchi, T.: Bottleneck congestion and modal split, *Journal of Urban Economics*, Vol. 34, No.3, pp.414-431, 1993.
- 294) 秋山孝正, 五井直輝, 小川圭一: 渋滞シミュレーションを用いた混雑料金に関する実証的分析, 土木計画学研究・論文集, No. 16, pp. 1009-1016, 1999.
- 295) Yang, H. and Huang, H.-J.: The multi-class, multi-criteria traffic network equilibrium and systems optimum problem, *Transportation Research Part B*, Vol. 38, No. 1, pp. 1-15, 2004.
- 296) Yin, Y. and Yang, H.: Optimal tolls with a multiclass, bicriteria traffic network equilibrium, paper presented at *Transportation Research Board Annual Meeting 2004*. TRB2004 -002074
- 297) 文世一: 混雑料金と交通量配分, 土木計画学研究・論文集, No. 11, pp. 113-120, 1993.
- 298) Dial, R. B.: Network-optimized road pricing: Part I: A parable and a model, *Operations Research*, Vol. 47, No. 1, pp. 54-64, 1999.
- 299) Dial, R. B.: Network-optimized road pricing: Part II: algorithms and examples, *Operations Research*, Vol. 47, No. 2, pp. 327-336, 1999.
- 300) Arnott, R. and Kraus, M.: When are anonymous congestion charges consistent with marginal cost pricing?, *Journal of Public Economics*, Vol. 67, No. 1, pp. 45-64, 1998.
- 301) 井料隆雅, 桑原雅夫: 時間価値の個人差を考慮した道路混雑料金の理論的考察, 交通工学, Vol. 36, No. 2, pp. 43-52, 2001.
- 302) Yang, H., Kong, H. Y. and Meng, Q.: Value-of-time distributions and competitive bus services, *Transportation Research Part E*, Vol. 37, No. 6, pp. 411-424, 2001.
- 303) Yang, H., Tang, W. H., Cheung, W. M. and Meng, Q.: Profitability and welfare gain of private toll roads in a network with heterogeneous users, *Transportation Research Part A*, Vol. 36, No. 2, pp. 537-554, 2002.

- 304) Kawamura, K.: Perceived value of time for truck operators, *Transportation Research Record*, 1725, pp. 31-36, 2000.
- 305) Kawamura, K.: Perceived benefits of congestion pricing for trucks, *Transportation Research Record*, 1833, pp. 59-65, 2003.
- 306) Mayet, J. and Hansen, M.: Congestion pricing with continuously distributed values of time, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 34, No. 3, pp. 359-370, 2000.
- 307) ヴァリアン, H.R.: 入門ミクロ経済学, 第5版, 勁草書房, 2000.
- 308) Small, K.A. and Yan, J.: The value of “Value Pricing” of roads: second-best pricing and product differentiation, *Journal of Urban Economics*, Vol. 49, No. 2, pp. 310-336, 2001.
- 309) Verhoef, E.T. and Small, K.A.: Product differentiation on roads – constrained congestion pricing with heterogeneous users, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 38, No. 1, pp. 127-156, 2004.
- 310) Teubel, U.: The welfare effects and distributional impacts of road user charges on commuters- an empirical analysis of Dresden, *International Journal of Transport Economics*, Vol. 27, No. 2, pp. 231-255, 2000.
- 311) Small, K.: The incidence of congestion tolls on urban highways, *Journal of Urban Economics*, Vol. 13, No. 2, pp. 90-111, 1983.
- 312) Chen, M. and Bernstein, D. H.: Solving the toll design problem with multiple user groups, *Transportation Research Part B*, Vol. 38, No. 1, pp. 61-79, 2004.
- 313) Brownstone, D., Ghosh, A., Golob, T. F., Kazimi, C. and Van Amelsfort, D.: Drivers' willingness-to-pay to reduce travel time: evidence from the San Diego I-15 congestion pricing project, *Transportation Research Part A*, Vol. 37, No. 4, pp. 373-387, 2003.
- 314) Bhat, C. R. and Castelar, S.: A unified mixed logit framework for modeling revealed and stated preferences: formulation and application to congestion pricing analysis in the San Francisco Bay area, *Transportation Research Part B*, Vol. 36, No. 7, pp. 593-616, 2002.
- 315) Lam, T. C. and Small, K. A.: The value of time and reliability: measurement from a value pricing experiment, *Transportation Research Part E*, Vol. 37, No. 2&3, pp. 231-251, 2001.
- 316) Yan, J., Small, K.A., and Sullivan, E.C.: Choice models of route, occupancy, and time of day with value-priced tolls, *Transportation Research Record*, 1812, pp. 69-77, 2002.

- 317) Lam, T.: Evaluating value-pricing projects with both scheduling and route choices, *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 34, No. 2, pp. 225-240, 2004.
- 318) Lam, T.C.: Route and scheduling choice under travel time uncertainty, *Transportation Research Record*, 1725, pp. 71– 78, 2000.
- 319) 章翔, 兵藤哲朗, 高橋洋二, 久保田尚: 交通行動分析に基づく TDM 施策導入可能性の考察, 都市計画, 227, Vol. 49/ No. 4, 2000.
- 320) Yamamoto, T., Fujii, S., Kitamura, R. and Yoshida, H.: Analysis of time allocation, departure time, and route choice behaviour under congestion pricing, *Transportation Research Record*, 1725, pp.95-101, 2000.
- 321) 松村暢彦, 新田保次, 高井宗央, 森康男: 大都市圏におけるロードプライシングの大気環境改善効果, 交通科学, Vol. 31, No. 1&2, pp. 16-25, 2001.
- 322) 東京都環境局: 東京都ロードプライシング検討委員会報告書, 2001.
- 323) 円山琢也, 室町泰徳, 原田昇, 太田勝敏: 分担配分統合モデルを用いた東京圏における混雑料金政策評価, 第 21 回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 93-96, 2001.
- 324) Maruyama, T., Harata, N. and Ohta, K.: An evaluation of road pricing policy considering both road and railway network congestion, *Proceedings of International Symposium on Urban Planning 2002*, A4-1-1, 2002.
- 325) Santos, G.: Road pricing on the basis of congestion costs; Consistent results from two historic U.K. towns, *Transportation Research Record*, 1732, pp. 80-87, 2000.
- 326) 金子雄一郎: 都市交通政策評価のための均衡分析手法の構築と適用に関する研究-バンコク首都圏を対象として-, 学位論文, 2001.
- 327) Huang, H.-J., Yang, H. and Bell, M.G.H.: The models and economics of carpools, *The Annals of Regional Science*, Vol.34, No.1, pp.55-68, 2000.
- 328) Yang, H. and Huang, H.-J.: Carpooling and congestion pricing in a multilane highway with high-occupancy-vehicle lanes, *Transportation Research Part A*, Vol. 33, No. 2, pp. 139-155, 1999.
- 329) Shepherd, S. P.: Towards marginal cost pricing: A comparison of alternative pricing systems, *Transportation*, Vol. 30, No. 4, pp. 411-433, 2002.
- 330) Li, M.Z.F.: Estimating congestion toll by using traffic count data—Singapore's area licensing scheme, *Transportation Research Part E*, Vol. 35, No. 1, pp.1–10, 1999.
- 331) Li, M.Z.F.: The role of speed-flow relationship in congestion pricing implementation with an application to Singapore, *Transportation Research Part B*, Vol. 36, No. 8, pp. 731-754, 2002.

- 332) Yang, H., Meng, Q. and Lee, D.-H.: Trial-and-error implementation of marginal-cost pricing on networks in the absence of demand functions, *Transportation Research Part B*, Vol. 38, No. 6, pp. 477-493, 2004.
- 333) Daganzo, C. F.: A pareto optimum congestion reduction scheme, *Transportation Research Part B*, Vol. 29, No. 2, pp. 139-154, 1995.
- 334) Daganzo, C.F. and Gracia, R.C.: A pareto improving strategy for the time-dependent morning commuter problem, *Transportation Science*, Vol. 34, No.3, pp. 303-310, 2000.
- 335) 早崎俊和, 赤松隆: 混雑料金と割り当て制の合成スキームによるパレート改善, MPEC 研究会 編: MPEC にもとづく交通・地域政策分析, 中京大学経済学部附属経済研究所研究叢書, 第9輯, 第3章, pp. 37-59, 2003.
- 336) Nakamura, K. and Kockelman, K. M.: Congestion pricing and roadspace rationing: an application to the San Francisco Bay Bridge corridor, *Transportation Research Part A*, Vol. 36, No. 5, pp. 403-417, 2002.
- 337) Verhoef, E.T., P. Nijkamp and P. Rietveld.: Tradeable permits: their potential in the regulation of road transport externalities, *Environment and Planning B*, Vol. 24, No. 527-548, 1997b.
- 338) Raux, C.: The use of transferable permits in transport policy, *Transportation Research Part D*, Vol. 9, No. 3, pp. 185-197, 2004.
- 339) Santos, G. and Rojey, L.: Distributional impacts of road pricing: The truth behind the myth, *Transportation*, Vol. 31, No. 1, pp. 21-42, 2004.
- 340) Santos, G., Newbery, D. and Rojey, L.: Static versus demand-sensitive models and estimation of second-best cordon tolls: An exercise for eight English towns, *Transportation Research Record*, 1747, pp. 44-50, 2001.
- 341) Whitehead, T.: Road user charging and business performance: identifying the processes of economic change, *Transport Policy*, Vol. 9, No. 3, pp. 221-240, 2002.
- 342) Boyce, D. and Mattsson, L.-G.: Modeling residential location choice in relation to housing location and road tolls on congested urban highway networks, *Transportation Research Part B*, Vol. 33, No. 8, pp. 581-591, 1999.
- 343) Eliasson, J. and Mattsson, L.-G: Transport and location effects of road pricing: A simulation approach, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 35, Part 3, pp. 417-456, 2001.
- 344) Schade, J. and Schlag, B. (eds.) *Acceptability of Transport Pricing Strategies*, Elsevier, Oxford, 2003.
- 345) Goodwin, P.B.: 'The rule of three': A possible solution to the political problems of

- competing objectives to road pricing, *Traffic Engineering and Control*, Vol. 30, No. 10, pp. 495-497, 1989.
- 346) Jones, P.: Gaining public support for road pricing through a package approach *Traffic Engineering and Control*, Vol. 32, No. 4, pp. 194-196, 1991.
- 347) Marcucci, M.: Road pricing: old beliefs, present awareness and future research paths, *International Journal of Transport Economics*, Vol. 28, No. 1, 2001.
- 348) Verhoef, E. T., Nijkamp, P. and Rietveld, P.: The social feasibility of road pricing – a case study for the Randstad Area, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 31, No. 3, pp. 255-276, 1997.
- 349) Schade, J. and Schlag, B.: Acceptability of urban transport pricing strategies, *Transportation Research Part F*, Vol. 6, No. 1, pp.45-61, 2003.
- 350) Oberholzer-Gee, F. and Weck-Hannemann, H.: Pricing road use: politico-economic and fairness considerations, *Transportation Research Part D*, Vol. 7, No. 5, pp. 357-371, 2002.
- 351) Lave, C.: The demand curve under road pricing and the problems of political feasibility, *Transportation Research Part A*, Vol. 28, No. 2, pp. 83-91, 1994.
- 352) 新田保次, 松村暢彦, 森康男: ロードプライシングの賛否を中心とした交通と環境の意識に関する住民の意識構造分析, *土木計画学研究・論文集*, No. 12, pp. 747-755, 1995.
- 353) 新田保次, 松村暢彦, 森康男: パッケージアプローチによるロードプライシングの賛否意識の変化特性と効果分析, *土木学会論文集*, No.536/IV-31, pp. 23-35, 1996.
- 354) 藤井聡, Garling, T., and Jakobsson, C.: ロードプライシングの社会的受容と環境意識: 社会的ジレンマにおける心理的方略の可能性, *土木計画学研究・論文集*, Vol. 18, no. 4, pp. 773-778, 2001.
- 355) Fujii, S., Gärling, T., Jakobsson, C. and Jou, R.-C.: A cross-country study of fairness and infringement on freedom as determinants of car owners' acceptance of road pricing, *Transportation*, Vol. 31, No. 3, pp. 285 – 295, 2004.
- 356) Goodwin, P: Unintended effects of policies: in Hensher, D.A. and Button, K.J. (eds.) *Handbook of Transport and the Environment*, Chapter 33, pp. 603-613, Elsevier Ltd, 2003.
- 357) Standing Advisory Committee on Trunk Road Assessment: *Trunk Roads and the Generation of Traffic*, Department of Transport, Standing Advisory Committee on Trunk Road Assessment, London, 1994.
- 358) European Conference of Ministry of Transport: *Infrastructre-induced Mobility*,

- Round Table 105, Paris, ECMT, 1998.
- 359) Noland, R.B. and Lem, L.L.: A review of the evidence for induced travel and changes in transportation and environmental policy in the US and the UK, *Transportation Research Part D*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-26, 2002.
- 360) Goodwin, P.: How easy is it to change behaviour, *Fifty Years of Transport Policy – Successes, Failures and New Challenges*, ECMT, 2003.
- 361) Mogridge, M.J.H.: The self-defeating nature of urban road capacity policy: A review of theories, disputes and available evidence, *Transport Policy*, Vol. 4, No.1, pp.5-23, 1997.
- 362) Prakash, A.B., Oliver, E.H. D'A and Balcombe, K.: Does building new roads really create extra traffic? Some new evidence, *Applied Economics*, Vol. 33, No. 12, pp. 1579-1585, 2001.
- 363) Goodwin, P.B. and Noland, R.B.: Building new roads really does create extra traffic: A response to Prakash et al., *Applied Economics*, Vol. 35, No. 13, pp. 1451-1457, 2003.
- 364) Hills, P. J.: What is induced traffic, *Transportation*, Vol. 23, No. 1, pp. 5–16, 1996.
- 365) Litman, T.: Generated traffic: Implications for transport planning, *ITE Journal*, Vol. 71, No.4, pp. 38-47, 2001.
- 366) 桐越信, 野坂周子, 永尾慎一郎: 誘発交通を考慮した将来交通量の推計方法について(その 1)—誘発交通の定義及び推計の基本的要件—, *交通工学*, Vol. 37, No. 6, pp.69-79, 技術資料, 2002.
- 367) 桐越信, 野坂周子, 永尾慎一郎: 誘発交通を考慮した将来交通量の推計方法について(その 2)—旅客交通を対象とした誘発交通の考え方と推計手法—, *交通工学*, Vol. 38, No. 1, pp. 96-107, 技術資料, 2003.
- 368) Cairns, S., Hass-Klau, C. and Goodwin, P.: *Traffic Impact of Highway Capacity Reductions: Assessment of the Evidence*, Landor Publishing: London, 1998.
- 369) Lee, D. B. Jr., Klein, L. A. and Camus, G.: Induced traffic and induced demand, *Transportation Research Record*, 1659, pp. 68-75, 1999.
- 370) Cervero, R.: Induced travel demand: Research design, empirical evidence, and normative policies, *Journal of Planning Literature*, Vol. 17, No. 1, pp. 4-19, 2002.
- 371) Mokhtarian, P. L., Samaniego, F. J., Shumway, R. H. and Willits, N. H.: Revisiting the notion of induced traffic through a matched-pairs study, *Transportation*, Vol. 29, No. 2, pp. 193-220, 2002.
- 372) Hansen, M. and Huang, Y.: Road supply and traffic in California urban areas, *Transportation Research Part A*, Vol. 31, No. 3, 205-218, 1997.

- 373) Noland, R. B.: Relationships between highway capacity and induced vehicle travel, *Transportation Research Part A*, Vol. 35, No. 1, pp. 47-72, 2001.
- 374) Noland, R.B. and Cowart, W.A.: Analysis of metropolitan highway capacity and the growth in vehicle miles of travel, *Transportation*, Vol. 27, No. 4, pp. 363-390, 2000.
- 375) Fulton, L. M., Noland, R.B., Meszler, D.J. and Thomas, J.V.: A Statistical analysis of induced travel effects in the US mid-Atlantic region, *Journal of Transportation and Statistics*, Vol. 3, No. 1, pp. 1-14, 2000.
- 376) Cervero, R. and Hansen, M.: Induced travel demand and induced road investment: A simultaneous equation analysis, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 36, No. 3, pp. 469- 490, 2002.
- 377) Goodwin, P. B.: Empirical evidence on induced traffic, *Transportation*, Vol. 23, No. 1, pp. 35-54, 1996.
- 378) Barr, L. C.: Testing for the significance of induced highway travel demand in metropolitan areas, *Transportation Research Record*, 1706, pp. 1-8, 2000.
- 379) Rodier, C.J., Abraham, J.E. and Johnston, R.A.: Anatomy of induced travel: using an integrated land use and transportation model, Paper no. 01-2582. Presented at the *80th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, 2001.
- 380) ENO Transportation Foundation: *Working Together to Address Induced Demand*, 2002.
- 381) Stathopoulos, F.G. and Noland, R.B.: Induced travel and emissions from traffic flow improvement project, *Transportation Research Record*, 1842, pp. 57-63, 2003.
- 382) Wilson, A.G.: Land-use/transport interaction models, past and future, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 32, No. 1, pp. 3-26, 1998.
- 383) Waddel, P.: Towards a behavioural integration of land use and transportation modelling, *Travel Behaviour Research: The leading edge* (eds. Hensher, D.), Pergamon, pp. 65-95, 2001.
- 384) Timmermans, H.: The saga of integrated land use-transport modelling, paper presented at the 10th International Conference on Travel Behaviour Research, Lucerne, August 2003.
- 385) 国土交通省国土交通政策研究所: 環境負荷の少ない都市・国土構造に関する研究, 国土交通政策研究, 第 14 号, 2002.
- 386) 尹鍾進, 青山吉隆, 中川大, 松中亮治: 立地変動を考慮した実用的な土地利用・交通モデルの構築, 土木計画学研究・論文集, No. 17, pp. 247-256, 2000.
- 387) 尹鍾進, 青山吉隆, 中川大, 松中亮治: 環境を考慮した土地利用・交通相互

- 作用モデルの必要性と TDM 政策の有効性, 地域学研究, Vol. 32. No.1, pp.85-100, 2002.
- 388) 宮城俊彦, 奥田豊, 加藤人士: 数理最適化手法を基礎とした土地利用・交通統合モデルに関する研究, 土木学会論文集, No. 518/IV-28, pp. 95-105, 1995.
- 389) 上田 孝行, 堤 盛人: わが国における近年の土地利用モデルに関する統合フレームについて, 土木学会論文集, No. 625/IV-44, pp. 65-78, 1999.
- 390) 武藤慎一, 上田孝行, 高木朗義, 富田貴弘: 応用都市経済モデルによる立地変化を考慮した便益評価に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No. 17, pp. 257-266, 2000.
- 391) 武藤慎一, 秋山孝正, 高木朗義: 空間的構造変化を考慮した都市環状道路整備の便益評価, 交通学研究/2000年研究年報(通巻44号), pp.205-214, 2001.
- 392) 田口博司, 武藤慎一, 秋山孝正, 高松諭: 経済均衡を前提とした都市環状道路整備による交通現象変化の分析, 第21回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 49-52, 2001.
- 393) Muto, S., Ueda, T. and Takagi, A.: The benefit evaluation of transport network improvement with computable urban economic model, *Selected Proceedings of the 9th World Conference on Transport Research*, 2003.
- 394) 上田孝行, 武藤慎一, 山口勝弘, 山崎清: 応用都市経済モデルによる東京都市圏を対象とした交通環境政策の実証的評価, 第17回応用地域学会研究発表大会, 配布資料, 2003.
- 395) Ewing, R. and Lichtenstein, A.: Induced traffic and induced development -A literature review, 2002. <http://www.chesco.org/planning/pdf/InTrInDv.pdf>
- 396) 吉野直行, 上田孝行, 佐藤徹治: 地域計量経済モデルによる首都高速中央環状線の事業効果計測, 新都市, Vol. 56, No. 2, 2002.
- 397) 佐藤徹治, 小池淳司, 上田孝行: 道路整備による地域別帰着便益の簡易計測法の開発, 高速道路と自動車, 第45巻, 第10号, pp. 27-36, 2002.
- 398) Kanemoto, Y. and Mera, K.: General equilibrium analysis of the benefits of large transportation improvements, *Regional Science and Urban Economics*, Vol. 15, No. 3, pp. 343-363, 1985.
- 399) 溝上章志, 朝倉康夫, 古市英士, 亀山正博: 観光地魅力度と周遊行動を考慮した観光交通需要の予測システム, 土木学会論文集, No. 639/IV-46, pp. 65-75, 2000.
- 400) 溝上章志, 柿本竜治, 朝倉康夫, 古市英士: 高規格幹線道路整備による環境経済インパクトの評価法とその試算例, 土木学会論文集, No. 695/IV-54, pp. 103-114, 2002.

- 401) 森杉壽芳(編) 社会資本整備の便益評価: 一般均衡理論によるアプローチ, 勁草書房, 1997.
- 402) 金本良嗣, 長尾重信: 便益計測の基本的考え方, 中村英夫(編)「道路投資の社会経済評価」, 第5章, pp. 75-99, 東洋経済新聞社, 1997.

第3章

- 403) 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と解法-, 丸善, 1998.
- 404) Oppenheim, N.: *Urban Travel Demand Modeling: from Individual Choices to General Equilibrium*, John Wiley & Sons, N. Y., 1995.
- 405) 加藤晃, 宮城俊彦, 吉田俊和: 交通分布・配分統合モデルとその実用性に関する研究, 交通工学, Vol. 17, No. 6, pp. 3-11, 1982.
- 406) 桑原雅夫: 交通量配分手法の実証的検討, 交通工学, Vol.23, No.2, pp. 17-25, 1988.
- 407) 松井寛, 藤田素弘: 大都市圏道路網を対象とした拡張型利用者均衡配分モデルの開発とその実用化, 土木計画学研究・論文集, No. 17, pp. 15-28, 2000.
- 408) 河上省吾, 石京: 多手段交通均衡モデルを用いた都市バス輸送計画の策定法に関する研究, 交通工学, Vol. 28, No. 5, pp.29-39, 1993.
- 409) 河上省吾, 石京: 公共交通システム解析のための分担・配分統合モデルの定式化とその実用性に関する研究, 土木学会論文集, No. 512/IV-27, pp.35-45, 1995.
- 410) 河上省吾, 石京, 藤田仁: 分担・配分統合モデルの改良と名古屋市鉄道計画の評価に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No. 12, pp. 657-664, 1995.
- 411) 杉野学, 河上省吾: 交通需要の統合型確率的利用者均衡モデルに関する実証的研究, 土木学会第55回年次学術講演会第IV部, IV-337, 2000.
- 412) Abrahamsson, T. and Lundqvist, L.: Formulation and estimation of combined network equilibrium models with application to Stockholm, *Transportation Science*, Vol. 33, No. 1, pp. 80-100, 1999.
- 413) Safwat, K.N.A. and Magnanti, T.L.: A combined trip generation, trip distribution, modal split, and trip assignment model, *Transportation Science*, Vol. 18, No. 1, pp. 14-30, 1988.
- 414) Safwat, K.N.A.: Application of a simultaneous transportation equilibrium model to intercity passenger travel in Egypt, *Transportation Research Record*, 1120, pp. 52-59, 1987.
- 415) Safwat, K.N.A. and Walton, C.M.: Computational experience with and application of a simultaneous transportation equilibrium model to urban travel in Austin, Texas,

- Transportation Research Part B*, Vol. 22, No. 6, pp. 457-467, 1988.
- 416) Hasan, M.K. and Al-Gadhi, S.A.H.: Application of simultaneous and sequential transportation network equilibrium models to Riyadh, Saudi Arabia, *Transportation Research Record*, 1645, pp. 127-132, 1998.
- 417) Hasan, M.K. and Safwat, K.N.A.: Comparison of two transportation network equilibrium modeling approaches, *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 1, pp. 35-40, 2000.
- 418) Kaneko, Y., Fukuda, A., Srisurapanon, V., and Oda, T.: Estimation of the impact of area license scheme with multi-class user equilibrium model, *Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 4, No. 2, pp. 277-291, 2001.
- 419) Maruyama, T., Muromachi, Y., Harata, N., and Ohta, K.: The combined modal split/assignment model in the Tokyo metropolitan area, *Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 4, No. 2, pp. 293-304, 2001.
- 420) 円山琢也, 室町泰徳, 原田昇, 太田勝敏: 分担配分統合モデルを用いた東京圏における混雑料金政策評価, 第 21 回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 93-96, 2001.
- 421) Boyce, D. and Bar-Gera, H.: Multiclass combined models for urban travel forecasting, *Networks and Spatial Economics*, Vol. 4, No. 1, pp. 115-124, 2004.
- 422) Lam, W. H. K. and Huang, H. J.: A combined trip distribution and assignment model for multiple user classes, *Transportation Research Part B*, Vol. 26, No. 4, pp. 275-287, 1992.
- 423) de Cea, J. and Fernandez, J.E. ESTRAUS: A simultaneous equilibrium model to analyze and evaluate multimodal urban transportation systems with multiple user classes, preprint paper, No 4307, *9th World Conference on Transportation Research*, Seoul, 2001.
- 424) de Cea, C.J., Fernández L.J.E., Dekock, C.V., Soto O. A. and Friesz, T.L.: ESTRAUS: A computer package for solving supply-demand equilibrium problems on multimodal urban transportation networks with multiple user classes, presented at *Transportation Research Board Annual Meeting 2003*, CD-ROM- 002004, 2003.
- 425) Florian, M., Wu, J. H. and He, S.: A Multi-class multi-mode variable demand network equilibrium model with hierarchical logit structures, in Gendreau, M. and Marcotte, P. (eds.) *Transportation and Network Analysis: Current Trends*, Chapter 8, pp. 119-133, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- 426) Boyce, D., Bar-Gera, H.: Network equilibrium models of travel choices with multiple classes, in Lahr, M.L. and Miller, R.E. (Eds.), *Regional Science in*

- Economic Analysis*. Elsevier Science, pp. 85–98, Chapter 6. 2001.
- 427) Boyce, D. and Bar-Gera, H.: Validation of multiclass urban travel forecasting models combining origin-destination, mode, and route choices, *Journal of Regional Science*, Vol. 43, No. 3, pp. 517-540, 2003.
- 428) 金子雄一郎: 都市交通政策評価のための均衡分析手法の構築と適用に関する研究-バンコク首都圏を対象として-, 学位論文, 2001.
- 429) Wong, K.I., Wong, S.C., Wu, J.H., Yang, H. and Lam, W.H.K.: A combined distribution, hierarchical mode choice, and assignment network model with multiple user and mode classes, in Lee, D.-H. (ed) *Urban and Regional Transportation Modeling: Essays in Honor of David Boyce*, Chapter 2, pp. 25-42, Edward Elgar Publishing, 2004.
- 430) Tatineni, M. R., Lupa, M. R., Englund, D. B. and Boyce, D. E.: Transportation policy analysis using a combined model of travel choice, *Transportation Research Record*, 1452, pp. 10-17, 1994.
- 431) Boyce, D., Lohse, D. and Nöth, F.: Comparison of two combined models of urban travel choices: Chicago and Dresden; Presented at 42 Congress of the European Regional Science Association at the University of Dortmund, Dortmund Germany, August 2002.(available at <http://www.raumplanung.uni-dortmund.de/rwp/ersa2002/cd-rom/papers/413.pdf>)
- 432) Boyce, D.E., Chon, K.S., Lee, Y.J., Lin, K.T., and LeBlanc, L.J.: Implementation and computational issues for combined models of location, destination, mode, and route choice, *Environment and Planning A*, Vol. 15, No. 9, pp. 1219-1230, 1983.
- 433) Boyce, D.E. and Lundqvist, L.: Network equilibrium models of urban location and travel choices: alternative formulations for the Stockholm region, *Papers of Regional Science Association*, Vol. 61, pp. 93-104, 1987.
- 434) Walker, W. T., Rossi, T. F., and Islam, N.: Method of successive averages versus Evans algorithm - Iterating a regional travel simulation model to the user equilibrium solution, *Transportation Research Record*, 1645, pp. 32-40, 1998.
- 435) Boyce, D. E., Lupa, M. R., and Zhang, Y. F.: Introducing feedback into four-step travel forecasting procedure versus equilibrium solution of combined model, *Transportation Research Record*, 1443, pp. 65-74, 1994.
- 436) Marin, E.: Demand forecast, congestion charge and economic benefit of an automated highway network for the Paris agglomeration, *Transport Policy*, Vol. 10, No. 2, pp. 107-120, 2003.
- 437) Loudon, W. R., Parameswaran, J., and Gardner, B.: Incorporating feedback in

- travel forecasting, *Transportation Research Record*, 1607, pp. 185-195, 1997.
- 438) Akamatsu, T.: Decomposition of path choice entropy in general transport networks, *Transportation Science*, Vol. 31, No. 4, pp. 349-362, 1997.
- 439) Akamatsu, T.: Cyclic flows, markov process and transportation stochastic assignment, *Transportation Research Part B*, Vol. 30, No. 5, pp. 369-386, 1996.
- 440) Leurent, F.M.: Curbing the computational difficulty of the logit equilibrium assignment model, *Transportation Research Part B*, Vol. 31, No. 4, pp. 315-326, 1997.
- 441) 奥平剛次, 室町泰徳, 原田昇, 太田勝敏: 東京圏の自動車交通による排出ガス削減施策の効果分析, 第20回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 221-224, 2000.
- 442) 運輸省運輸政策局監修: 平成11年版都市交通年報, 2000.
- 443) 志田州弘, 古川敦, 赤松隆, 家田仁: 通勤鉄道利用者の不効用関数のパラメータの移転性に関する研究, 土木計画学研究・講演集, No. 12, pp. 519-525, 1989.
- 444) 松井寛, 藤田素弘, 神谷英次: 時間帯別発生集中および分布交通量の予測手法に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No. 9, pp. 77-84, 1991.
- 445) 河上省吾, 溝上章志: 分担・配分結合モデルを用いた手段選択関数と均衡交通量の同時推定法, 土木学会論文集, No. 371/IV-5, pp. 79-87, 1986.
- 446) Hicks, J. E. and Abdel-aal, M. M.: Maximum likelihood estimation for combined travel choice model parameters, *Transportation Research Record*, 1645, pp. 160-169, 1998.
- 447) Boyce, D. E. and Zhang, Y. F.: Parameter estimation for combined travel choice models, in Lundqvist, L. et al. (eds.), *Network Infrastructure and the Urban Environment*, Springer, pp. 177-193, 1998.
- 448) 吉田朗, 原田昇: 選択肢集合の確率的形成を考慮した集計型目的地選択モデルの研究, 土木学会論文集, No.618/IV-43, pp. 1-13, 1999.
- 449) 吉田禎雄, 原田昇: 均衡配分用BPR式パラメータの推計, 土木学会論文集, No. 695/IV-54, pp. 91-102, 2002.
- 450) 松井寛, 藤田素弘: 高速道路を含む都市圏道路網における利用者均衡配分モデルの実用化に関する研究, 土木学会論文集, No. 653/IV-48, pp. 85-94, 2000.
- 451) 松井寛, 藤田素弘: 大都市圏道路網を対象とした拡張型利用者均衡配分モデルの開発とその実用化, 土木計画学研究・論文集, No. 17, pp. 15-28, 2000.
- 452) 吉田朗, 原田昇: 鉄道の路線・駅・結節交通手段選択を含む総合的な交通手段選択モデルの研究, 土木学会論文集, No.542/IV-32, pp. 19-31, 1996.

- 453) 溝上章志, 河内誠: Mixed Mode ネットワーク均衡モデルによる P&R システムの需要予測, 土木計画学研究・論文集, No. 17, pp. 613-622, 2000.
- 454) Bekhor, S. and Prashker, J. N.: Stochastic user equilibrium formulation for Generalized Nested Logit model, *Transportation Research Record*, 1752, pp. 84-90, 2001.

第 4 章

- 455) 太田勝敏: 利用者便益の推定, 中村英夫(編)「道路投資の社会経済評価」, 第 6 章, pp. 101-121, 東洋経済新聞社, 1997.
- 456) Williams, H.C.W.L. and Moore, L.A.R.: The appraisal of highway investments under fixed and variable demand, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 24, No. 1 pp. 61-81, 1990.
- 457) Coombe, D.: Induced traffic: What do transportation models tell us?, *Transportation*, Vol. 23, No. 1, pp. 83-101, 1996.
- 458) 室町泰徳, 原田昇, 太田勝敏: 誘発交通量の算定に関する基礎的研究, 土木計画学研究・論文集, No. 14, pp. 519-526, 1997.
- 459) UK DOT: *Induced Traffic Appraisal* (in *Design Manual for Road and Bridges*, 1997) 抄訳: 交通需要予測モデルと時間的空間的予測フレームに関する研究 (主査: 太田勝敏, 所収), 道経研シリーズ A-70, 1999.
- 460) 北村隆一: 交通需要予測の課題: 次世代手法の構築に向けて, 土木学会論文集, No.530/IV-30, pp. 17-30, 1996.
- 461) 兵藤哲朗: 米国交通需要予測手法のターニングポイント-サンフランシスコ訴訟がのこしたもの, 運輸政策研究, Vol. 1, No. 1, pp. 77-80, 1998.
- 462) 国土交通省 道路局: 平成 13 年度道路整備による誘発交通量推計手法に関する調査業務 報告書, 2002.
- 463) Abelson, P.W. and Hensher, D.A.: Induced travel and user benefits: clarifying definitions and measurement for urban road infrastructure, in Button, K.J. and Hensher, D.A. (eds.) *Handbook of Transport Systems and Traffic Control*, Chapter 9, pp. 125-141, Elsevier, 2001.
- 464) Hills, P. J.: What is induced traffic, *Transportation*, Vol. 23, No. 1, pp. 5-16, 1996.
- 465) DeCorla-Souza, P.: Induced highway travel: transportation policy implications for congested metropolitan areas, *Transportation Quarterly*, Vol. 54, No. 2, pp. 13-30, 2000.
- 466) Lee, D. B. Jr., Klein, L. A. and Camus, G.: Induced traffic and induced demand, *Transportation Research Record*, 1659, pp. 68-75, 1999.

- 467) Barr, L. C.: Testing for the significance of induced highway travel demand in metropolitan areas, *Transportation Research Record*, 1706, pp. 1-8, 2000.
- 468) Noland, R.B. and Lem, L.L.: A review of the evidence for induced travel and changes in transportation and environmental policy in the US and the UK, *Transportation Research Part D*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-26, 2002.
- 469) Mokhtarian, P.L., Samaniego, F.J., Shumway, R.H. and Willits, N.H.: Revisiting the notion of induced traffic through a matched-pairs study, *Transportation*, Vol. 29, No. 2, pp. 193-220, 2002.
- 470) Certero, R. and Hansen, M.: Induced travel demand and induced road investment: A simultaneous equation analysis, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 36, No. 3, pp. 469- 490, 2002.
- 471) Certero, R.: Road expansion, urban growth, and induced travel -A path analysis, *Journal of the American Planning Association*, Vol. 69, No. 2, pp. 145-163, 2003.
- 472) 上田孝行, 小森俊文, 森杉壽芳: 古典的消費者行動モデルによる便益計測手法の比較研究, 土木計画学研究・論文集, No. 17, pp. 187-194, 2000.
- 473) 藤井聡, 北村隆一, 門間俊幸: 誘発交通需要分析を目指した就業者の活動パターンに関する研究, 土木学会論文集, No. 562/IV-35, pp. 109-119, 1997.
- 474) 北村隆一, 森川高行(編著): 交通行動の分析とモデリング-理論/モデル/調査/応用-, 第 16 章, 技報堂出版, 2002.
- 475) 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と解法-, 丸善, 1998.
- 476) 宮城俊彦, 加藤晃: ランダム効用理論を基礎とした交通統合モデル, 土木計画学研究・論文集, No. 1, pp. 99-106, 1984.
- 477) Florian, M., Wu, J. H. and He, S.: A Multi-class multi-mode variable demand network equilibrium model with hierarchical logit structures, in Gendreau, M. and Marcotte, P. (eds.) *Transportation and Network Analysis: Current Trends*, Chapter 8, pp. 119-133, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- 478) Boyce, D. and Bar-Gera, H.: Network equilibrium models of travel choices with multiple classes, in Lahr, M.L. and Miller, R.E. (eds.), *Regional Science in Economic Analysis*, Chapter 6, pp. 85-98, Elsevier Science, 2001.
- 479) Boyce, D. and Bar-Gera, H.: Validation of multiclass urban travel forecasting models combining origin-destination, mode, and route choices, *Journal of Regional Science*, Vol. 43, No. 3, pp. 517-540, 2003.
- 480) Williams, H.C.W.L. and Lam, W.M.: Transport policy appraisal with equilibrium models I: Generated traffic and highway investment benefits, *Transportation Research Part B*, Vol. 25, No. 5, pp. 253-279, 1991.

- 481) Williams, H.C.W.L. and Yamashita, Y.: Travel demand forecasts and the evaluation of highway schemes under congested conditions, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 26, No. 3, pp. 261–282, 1992.
- 482) DeCorla-Souza, P. and Cohen, H.: Estimating induced travel for evaluation of metropolitan highway expansion, *Transportation*, Vol. 26, No. 3, pp. 249-262, 1999.
- 483) Williams, H.C.W.L., van Vliet, D. and Kim, K.S.: The contribution of suppressed and induced traffic in highway appraisal, part 1: reference states, *Environment and Planning A*, Vol. 33, No. 6, pp. 1057-1082, 2001.
- 484) Williams, H.C.W.L., van Vliet, D. and Kim, K.S.: The contribution of suppressed and induced traffic in highway appraisal, part 2: policy tests, *Environment and Planning A*, Vol. 33, No. 7, pp. 1243-1264, 2001.
- 485) 円山琢也, 原田昇, 太田勝敏: 大規模都市圏への交通需要統合型ネットワーク均衡モデルの適用, *土木計画学研究・論文集*, Vol. 19, no. 3, pp. 551-560, 2002.
- 486) Brice, S.: Derivation of nested transport models within a mathematical programming framework, *Transportation Research Part B*, Vol. 23, No. 1, pp. 19-28, 1989.
- 487) 宮城俊彦: ネスティド・エントロピーモデルとその応用, *土木計画学研究・講演集*, No. 18(2), pp. 163-166, 1995.
- 488) Verboven, F.: The nested logit model and representative consumer theory, *Economics Letters*, Vol. 50, No. 1, pp. 57-63, 1996.
- 489) Oppenheim, N.: *Urban Travel Demand Modeling: from Individual Choices to General Equilibrium*, John Wiley & Sons, N. Y., 1995.
- 490) Akamatsu, T.: Decomposition of path choice entropy in general transport networks, *Transportation Science*, Vol. 31, No. 4, pp. 349-362, 1997.
- 491) Carrasco, J.A. and Ortúzar, J. de D.: Review and assessment of the nested logit model, *Transport Reviews*, Vol. 22, No. 2, pp. 197 – 218, 2002.
- 492) 金本良嗣: 交通投資の便益評価・消費者余剰アプローチ, *日交研シリーズ A-201*, 1996.
- 493) 城所幸弘: ネットワークに対する費用便益分析-理論と実務への応用-, *運輸政策研究*, Vol.4, No.4, pp. 2-10, 2002.
- 494) 上田孝行, 森杉壽芳, 林山泰久: 交通整備事業の便益計測に関するいくつかの留意事項-城所論文を踏まえた再検討-, *運輸政策研究*, Vol. 5, No.2, pp. 52-53, 2002.
- 495) 上田孝行, 森杉壽芳: **Second Best** 下での社会資本整備便益の計測について,

- 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集, 第 IV 部, pp. 380-381, 1997.
- 496) Kidokoro, Y.: Cost-benefit analysis for transport networks: Theory and application, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 38, No. 2, pp. 275 – 307, 2004.
- 497) 城所幸弘: 交通プロジェクトの便益評価-体系と課題-, 運輸政策研究, Vol. 6, No. 2, pp. 14-27, 2003.
- 498) 松井寛, 山田周治: 道路交通センサデータに基づく BPR 関数の設定, 交通工学, Vol. 33, No. 6, pp. 9-16, 1998.
- 499) 志田州弘, 古川敦, 赤松隆, 家田仁: 通勤鉄道利用者の不効用関数のパラメーターの移転性に関する研究, 土木計画学研究・講演集, No. 12, pp. 519-525, 1989.
- 500) Sheffi, Y. and Powell, W.B.: A comparison of stochastic and deterministic traffic assignment over congested networks, *Transportation Research Part B*, Vol. 15, No. 1, pp. 53-64, 1981.
- 501) Bates, J.J., Ashley, D.J. and Hyman, G.: The nested incremental logit model: theory and application to modal choice, in *Proceedings of the 15th PTRC Summer Annual Meeting*, vol. P290, pp. 75-98, 1987.
- 502) Williams, H.C.W.L. and Lai, H.S.: Transport policy appraisal with equilibrium models II: Model dependence of highway investments benefits, *Transportation Research Part B*, Vol. 25, No. 5, pp. 281-292, 1991.
- 503) 東京都環境保全局: 平成 6 年度都内自動車走行量及び自動車排出ガス量算出調査報告書, 1994.
- 504) Williams, H. C. W. L., van Vliet, D., Parathira, C. and Kim, K. S.: Highway investment benefits under alternative pricing regimes, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 35, No. 2, pp. 257-284, 2001.
- 505) 円山琢也, 原田昇, 太田勝敏: Nested Logit 型確率的利用者均衡条件下での最適混雑料金, 土木計画学研究・論文集, Vol. 20, no. 3, pp.555-562, 2003.

第 5 章

- 506) 桑原雅夫: 動的な限界費用に関する理論的分析, 土木学会論文集, No. 709/IV-56, pp. 127-138, 2002.
- 507) Gartner, N. H.: Optimal traffic assignment with elastic demands: A review part I. Analysis framework, *Transportation Science*, Vol. 14, No. 2, pp. 174-191, 1980.
- 508) Yang, H. and Huang, H.: Principle of marginal-cost pricing: How does it work in a general road network?, *Transportation Research Part A*, Vol. 32, No.1 pp. 45-54,

- 1998.
- 509) 野杵貴博, 秋山孝正: 遺伝的アルゴリズムによる都市道路網ゾーン別混雑料金の設定, 土木計画学研究・論文集, Vol. 18, no. 3, pp. 455-462, 2001.
- 510) 赤松隆, 桑原雅夫: 確率的利用者均衡条件下での最適混雑料金, 土木学会論文集, No. 389/IV-8, pp. 121-129, 1988.
- 511) Akamatsu, T. and Kuwahara, M.: Optimal toll pattern on a road network under stochastic user equilibrium with elastic demand, *Selected Proceedings of the 5th World Conference on Transport Research*, Vol. 1, pp. 259-273, 1989.
- 512) Yang, H.: System optimum, stochastic user equilibrium and optimal link tolls, *Transportation Science*, Vol. 33, No. 4, pp. 354-360, 1999.
- 513) Nagurney, A.: *Sustainable Transportation Networks*, Edward Elgar, 2000.
- 514) Miyagi, T.: On the formulation of a stochastic user equilibrium model consistent with the random utility theory- a conjugate dual approach-, *Proceedings of the 4th World Conference on Transportation Research*, Vol. 2, pp.1619-1635, 1986.
- 515) Hearn, D.W., Ramana, M.V.: Solving congestion toll pricing models, in Marcotte, P. and Nguyen, S. (Eds.), *Equilibrium and Advanced Transportation Modeling*, Chapter 6, pp. 109-124, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- 516) Hearn, D.W. and Yildirim, M.B.: A toll pricing framework for traffic assignment problems with elastic demand, in Gendreau, M. and Marcotte, P. (eds.) *Transportation and Network Analysis: Current Trends*, Chapter 9, pp. 135-145, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- 517) Dial, R.B. Minimal-revenue congestion pricing Part I: a fast algorithm for the single origin case, *Transportation Research Part B*, Vol. 33, No.3, pp. 189-202, 1999.
- 518) 赤松隆, 半田正樹: Nested LOGIT 型交通・住居立地統合均衡モデルとその効率的解法, 土木計画学研究・論文集, No. 13, pp. 279-287, 1996.
- 519) Bellei, G., Gentile, G. and Papola, N.: Network pricing optimization in multi-user and multimodal context with elastic demand, *Transportation Research Part B*, Vol. 36, No. 9, pp. 779-798, 2002.
- 520) 円山琢也, 室町泰徳, 原田昇, 太田勝敏: 分担配分統合モデルを用いた東京圏における混雑料金政策評価, 第 21 回交通工学研究発表会論文報告集, pp. 93-96, 2001.
- 521) 東京都環境局: 東京都ロードプライシング検討委員会報告書, 2001.
- 522) Maruyama, T., Harata, N., and Ohta, K.: An evaluation of road pricing policy considering both road and railway network congestion, *Proceedings of International Symposium on Urban Planning 2002*, A4-1-1, 2002.

- 523) Boyce, D.E., Balasubramaniam, K., and Tian, X.: Implications of marginal cost road pricing for urban travel choices and user benefits, in Gendreau, M. and Marcotte, P. (eds.) *Transportation and Network Analysis: Current Trends*, Chapter 3, pp. 37-48, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- 524) 円山琢也, 原田昇, 太田勝敏: 大規模都市圏への交通需要統合型ネットワーク均衡モデルの適用, 土木計画学研究・論文集, Vol. 19, no. 3, pp. 551-560, 2002.
- 525) 松井寛, 山田周治: 道路交通センサデータに基づく BPR 関数の設定, 交通工学, Vol. 33, No. 6, pp. 9-16, 1998.
- 526) 志田州弘, 古川敦, 赤松隆, 家田仁: 通勤鉄道利用者の不効用関数のパラメータの移転性に関する研究, 土木計画学研究・講演集, No. 12, pp. 519-525, 1989.
- 527) 円山琢也, 原田昇, 太田勝敏: ロードプライシングの所得逆進性とその緩和策に関する研究, 都市計画論文集, No. 37, pp. 253-258, 2002.
- 528) Larsson, T. and Patriksson, M.: Side constrained traffic equilibrium models-traffic management through link tolls, in Marcotte, P. and Nguyen, S. (Eds.), *Equilibrium and Advanced Transportation Modeling*, Chapter 7, pp. 125-151, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- 529) Larsson, T. and Patriksson, M.: Side constrained traffic equilibrium models-analysis, computation and applications, *Transportation Research Part B*, Vol. 33, No. 4, pp. 233-264, 1999.
- 530) Ferrari, P.: Road network toll pricing and social welfare, *Transportation Research Part B*, Vol. 36, No. 5, pp. 471-483, 2002.
- 531) Ferrari, P.: A model of urban transport management, *Transportation Research Part B*, Vol. 33, No. 1, pp. 43-61, 1999.
- 532) Ferrari, P.: Road pricing and network equilibrium, *Transportation Research Part B*, Vol. 29, No. 5, pp. 357-372, 1995.
- 533) Mohring, H. and Harwitz, M.: *Highway Benefits -An Analytical Framework*, Northwestern University Press, Chicago, 1962.
- 534) Yang, H. and Meng, Q.: A note on "highway pricing and capacity choice in a road network under a build-operate-transfer scheme", *Transportation Research Part A*, Vol. 36, No. 7, pp. 659-663, 2002.
- 535) Yang, H. Zhang, X. and Huang, H.J.: Determinations of optimal toll levels and locations of alternative congestion pricing schemes, in Taylor, M.A.P. (eds.) *Transportation and Traffic Theory in the 21st Century*, Proceedings of the 15th

international symposium on transportation and traffic theory, pp. 519-540, Adelaide, Australia, 2002.

- 536) Verhoef, E. T.: Second-best congestion pricing in general networks. Heuristic algorithms for finding second-best optimal toll levels and toll points, *Transportation Research Part B*, Vol. 36, No. 8, pp.707-729, 2002.

第6章

- 537) 太田勝敏: 東京におけるロードプライシングとその論点, 高速道路と自動車, 第44巻, 第4号, pp. 7-10, 2001.

- 538) 東京都環境局: 東京都ロードプライシング検討委員会報告書, 2001.

- 539) 太田勝敏(編): ロード・プライシングの理論とその適用性, 国際交通安全学会 269 プロジェクト報告書, 1990.

- 540) 山田浩之(編): 交通混雑の経済分析, 勁草書房, 2001.

- 541) Cohen, Y.: Commuter welfare under peak-period congestion tolls: Who gains and who loses?, *International Journal of Transport Economics*, Vol. 14, No. 3, pp. 238-266, 1987.

- 542) Arnott, R., de Palma, A. and Lindsey, R.: The welfare effects of congestion tolls with heterogeneous commuters, *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 28, No. 2, pp. 139-161, 1994.

- 543) 柳時均, 山本俊行, 北村隆一: ロードプライシングの公平性に関する研究, 土木計画学研究・論文集, No. 16, pp. 707-715, 1999.

- 544) Anderson, D and Mohring, H.: Congestion costs and congestion pricing, in Greene, D.L., Jones, D.W., and Delucchi, M.A. (eds.) *The Full Costs and Benefits of Transportation*, pp. 315-336, Springer, 1997.

- 545) 室町泰徳: 都市におけるロードプライシングの公平性に関する基礎的検討, 「効果的な交通需要管理の立案・実施手法に関する研究」(主査: 原田昇), 日交研シリーズ A-295, 2001.

- 546) Kaneko, Y., Fukuda, A., Srisurapanon, V., and Oda, T.: Estimation of the impact of area license scheme with multi-class user equilibrium model, *Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol. 4, No. 2, pp. 277-291, 2001.

- 547) Small, K.A.: Using the revenues from congestion pricing, *Transportation*, Vol. 19, No. 4, pp. 359-381, 1992.

- 548) Teubel, U.: The welfare effects and distributional impacts of road user charges on commuters- an empirical analysis of Dresden, *International Journal of Transport Economics*, Vol. 27, No. 2, pp. 231-255, 2000.

- 549) Yang, H., Tang, W. H., Cheung, W. M. and Meng, Q. Profitability and welfare gain of private toll roads in a network with heterogeneous users, *Transportation Research Part A*, Vol. 36, No. 2, pp. 537-554, 2002.
- 550) 総務省 家計調査年報(平成12年) 第4表 年間収入階級世帯数分布(全世帯).

第7章

- 551) 藤原章正, 岡村敏之: 広島都市圏における都市形態が運輸エネルギー消費量に及ぼす影響, 都市計画論文集, No. 37, pp. 151-156, 2002.
- 552) 村岡洋成, 森本章倫, 浅野光行: 日本型 ABC ポリシーを想定した通勤目的自動車の削減効果に関する研究, 都市計画論文集, No. 37, pp. 271-276, 2002.
- 553) Hamilton, B. W.: Wasteful commuting, *Journal of Political Economy*, Vol. 90, No. 5, pp. 1035-1053, 1982.
- 554) White, M.J.: Urban commuting journeys are not "wasteful", *Journal of Political Economy*, Vol. 96, No. 5, pp. 1097-1110, 1988.
- 555) 鈴木勉: 東京大都市圏における職住割当の最適化に関する実証研究, 都市計画論文集, No. 27, pp. 337-342, 1992.
- 556) Merriman, D., Ohkawara, T. and Suzuki, T.: Excess commuting in the Tokyo metropolitan area: Measurement and policy simulations, *Urban Studies*, Vol. 32, No. 1, pp. 69-85, 1995.
- 557) Frost, M., Linneker, B. and Spence, N.: Excess or wasteful commuting in a selection of British cities, *Transportation Research Part A*, Vol. 32, No. 7, pp. 529-538, 1998.
- 558) 榎谷有三, 下夕村光弘, 田村亨, 斉藤和夫: 最適職住割当問題を基礎とした通勤交通の流動特性分析-札幌市の通勤交通を例として1972-1983-1994-, 都市計画論文集, No. 36, pp. 619-624, 2001.
- 559) Kim S.: Excess Commuting for two-worker households in the Los Angeles Metropolitan Area, *Journal of Urban Economics*, Vol. 38, No. 2, pp. 166-182, 1995.
- 560) Buliung, R. N. and Kanaroglou, P. S.: Commute minimization in the Greater Toronto Area: applying a modified excess commute, *Journal of Transport Geography*, Vol. 10, No. 3, pp. 177-186, 2002.
- 561) Furutani, T., Harata, N. and Ohta, K.: A study on commuting trip energy consumption reduction by job-housing reallocation in Tokyo Metropolitan Area, *Proceedings of International Symposium on Urban Planning*, B1-4-1, 2002.
- 562) 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析-最新の理論と解法-, 丸善, 1998.
- 563) 松井寛, 山田周治: 道路交通センサスデータに基づく BPR 関数の設定, 交

通工学, Vol. 33, No. 6, pp. 9-16, 1998.

- 564) 志田州弘, 古川敦, 赤松隆, 家田仁: 通勤鉄道利用者の不効用関数のパラメーターの移転性に関する研究, 土木計画学研究・講演集, No. 12, pp. 519-525, 1989.
- 565) 円山琢也, 原田昇, 太田勝敏: 大規模都市圏への交通需要統合型ネットワーク均衡モデルの適用, 土木計画学研究・論文集, Vol. 19, no. 3, pp. 551-560, 2002.
- 566) 東京都環境保全局: 平成 6 年度都内自動車走行量及び自動車排出ガス量算出調査報告書, 1994.

第 8 章

- 567) Bonsall, P.: Can induced traffic can be measured by surveys?, *Transportation*, Vol. 23, No. 1, pp. 17-34, 1996.
- 568) Evans, S. P.: Derivation and analysis of some models for combining trip distribution and assignment, *Transportation Research*, Vol. 10, No. 1, pp. 37-57, 1976.
- 569) Bar-Gera, H. and Boyce, D.: Origin-based algorithms for combined travel forecasting models, *Transportation Research Part B*, Vol. 37, No. 5, pp. 405-422, 2003.
- 570) 円山琢也: トリップチェーン選択を内生化したネットワーク均衡モデル, 土木計画学研究・講演集, Vol. 29, CD-ROM, 講演番号-223, 2004.
- 571) Lee, D.B.: Requiem for large-scale models, *Journal of the American Institute of Planners*, Vol. 39, No. 3, pp. 163-178, 1973.
- 572) Lee, D.: Retrospective on large scale urban models, *Journal of the American Planning Association*, Vol. 60, No.1, pp. 35-40, 1994.
- 573) 桑原雅夫: 動的な限界費用に関する理論的分析, 土木学会論文集, No. 709/IV-56, pp. 127-138, 2002.