

博士論文

鉄道における旅客行動の詳細な推定に
基づく輸送利便性の評価と
それに基づく輸送計画設計手法

(公財) 鉄道総合技術研究所

國松 武俊

内容梗概

鉄道の輸送計画は、鉄道事業者の商品であり、利用者の利便性に直結する。輸送計画の作成に際し、担当者は、著しい列車の混雑や遅延が発生しないか等、慎重かつ詳細な検討が求められる。しかし現状では、鉄道の輸送計画は、担当者が経験的に作成、評価しており、ダイヤ改正案等、新たに作成した輸送計画について、利用者の視点から客観的かつ定量的に評価されることは少ない。鉄道が利用者に対し、魅力的な輸送サービスを提供し続けるためには、利用者の需要を適切に把握したうえで、輸送計画実施時の運行状況を再現し、利用者にとって利便性の高い輸送計画であるかどうかを検証し、必要に応じて輸送計画の改良を行う必要がある。そこで本研究では、輸送計画や運転整理実施時の運行状況の再現手法、および利用者の視点による評価手法を提案し、利便性の高い輸送計画、運転整理の作成を促進するとともに、日々の利用者需要にあわせて輸送計画を弾力的に変更するデマンド指向輸送の有効性、効果を検証することを目的とする。

本論文は、利用者デマンドを反映した輸送計画作成手法、マイクロシミュレーションを活用した輸送計画評価手法、マイクロシミュレーションを活用したダイヤ乱れ時の運転整理案評価手法の3つの要素から構成されており、各章の構成は以下の通りである。

第1章は、序論として、鉄道の輸送計画や運転整理に対する、利用者の視点による客観的評価の重要性と、計算機支援実現の必要性について述べ、本論文の目的を明らかにした。

第2章では、大都市圏の鉄道輸送が抱える課題として、日々同じ輸送計画を適用する点、平常運行時におけるラッシュ時間帯の列車の混雑や遅延、ダイヤ乱れ時における複雑な利用者の行動を考慮した運転整理の実施を述べつつ、関連先行研究の成果と問題点をまとめた。そして、利用者の視点からの利便性評価の重要性に言及しつつ、利用者デマンドを反映する輸送計画の考え方を提唱し、本論文の検討方針を示した。

第3章では、利用者デマンドを反映した輸送計画作成手法として、輸送需要に対し、利用者の利便性と事業者コストの双方のバランスを取りながら、輸送計画を自動的に作成するアルゴリズムを提唱した。大都市圏の通勤路線を対象に、輸送計画を自動作成させ、現行の輸送計画と比較することにより、アルゴリズムの有効性を検証した。また、輸送需要が大幅に変化する場合を想定し、輸送計画を自動作成することにより、デマンド指向輸送の可能性、有用性を示した。

第4章では、マイクロシミュレーションを活用した輸送計画評価手法として、ある輸送計画で運行した場合における、利用者1人1人の行動を詳細に推定するシミュレータを構築した。このシミュレータは、利用者の乗車駅から降車駅までの列車乗継経路の推定、列車混雑の推定、列車遅延の推定の3機能を持つ。これらを、始発列車から時系列的に同時に実行することで、列車運行と利用者行動の相互作用が模擬可能である。また、シミュレーション結果を使用して、各利用者の所要時間、待ち時間、乗換回数、混雑度から不効用値を算出し、その積算値を用いて、輸送計画の良否を評価する手法を提案した。さらに、大都市圏の通勤路線でケーススタディを実施し、対象路線の利用者の特性を反映した、輸送計画案の比較評価が可能であることを示した。

第5章では、マイクロシミュレーションを活用したダイヤ乱れ時の運転整理評価手法として、

前章までの平常時の列車運行・旅客行動シミュレータの機能を拡張し向上させ、ダイヤ乱れ時の利用者行動の推定を可能とした。具体的には、利用者の他路線への迂回や、案内の有無による利用者行動の変化に対応させた。また、利用者の視点による運転整理の評価手法として、各利用者の不効用値を算出、集約し評価値とする手法を提案した。そして、大都市圏の通勤路線でケーススタディを実施し、提案手法により運転整理案が比較評価可能なこと、利用者に対する運転整理内容の案内が重要であることなどを明らかにした。

第6章では、結言として、本論文で得られた上記の知見、提案手法の貢献を総括したうえで、今後取り組むべき研究課題として、①提案手法の様々な輸送改善施策の評価への活用、②粒度のより細かいデータの活用、③リアルタイムに取得するデータを活用した運行管理手法の開発、④より適切な評価尺度の構築を挙げ、本論文のまとめとした。

鉄道における旅客行動の詳細な推定に基づく輸送利便性の評価と それに基づく輸送計画設計手法

目次

1. 序論	1
1.1. 本論文の背景.....	1
1.2. 本論文の目的・本論文の構成	1
1章の参考文献	2
2. 大都市圏の鉄道輸送が抱える課題.....	3
2.1. 毎日同じ輸送計画が適用されることに起因する課題.....	3
2.2. 平常運行時における輸送計画の課題	3
2.2.1. ラッシュ時間帯の列車混雑，慢性的な遅延.....	3
2.2.2. 輸送計画の評価尺度に関する課題.....	4
2.3. ダイヤ乱れ時における運行管理上の課題.....	5
2.3.1. ダイヤ乱れ時の運転整理と旅客行動.....	5
2.3.2. 運転整理の評価尺度に関する課題.....	5
2.4. 鉄道輸送の利便性評価に対する考え方と本論文の方針.....	6
2章の参考文献	7
3. 利用者デマンドを反映した輸送計画作成手法.....	9
3.1. はじめに.....	9
3.2. 輸送計画作成の課題と関連研究.....	9
3.2.1. 輸送計画	9
3.2.2. 現状の輸送計画作成業務の問題点.....	10
3.2.3. 輸送計画の自動作成に関する関連研究	10
3.3. 利用者デマンドを反映した輸送計画作成のコンセプト.....	11
3.4. 輸送計画作成アルゴリズム	12
3.4.1. 対象路線	12
3.4.2. アルゴリズムの概要	13
3.4.3. 評価指標	14
3.4.4. 旅客流動シミュレーション	16
3.4.5. 本数設定アルゴリズム.....	16
3.4.6. ダイヤ改良アルゴリズム	17
3.4.7. 利用者，事業者の不満の定義とその解消.....	20
3.5. ケーススタディによる、提案アルゴリズムの出力輸送計画の有用性検証.....	23
3.5.1. 路線の概要.....	23
3.5.2. アルゴリズムの前提条件と対応する変数の設定値	24

3.5.3.	本ケーススタディで使用するメタヒューリスティクス決定のための予備実験...	26
3.5.4.	現行輸送計画との比較実験	27
3.5.5.	利用者デマンドが大きく変化した場合の実験	29
3.5.6.	列車本数, デマンド変動に対する評価値変動の分析.....	31
3.6.	本章のまとめ.....	31
3章の参考文献		32
4.	マイクロシミュレーションを活用した輸送計画評価手法.....	33
4.1.	はじめに.....	33
4.2.	列車運行状況の推定手法とその課題	34
4.2.1.	ラッシュ時間帯の運行状況の再現に必要な事項.....	34
4.2.2.	関連研究	34
4.3.	列車運行・旅客行動シミュレーション手法.....	35
4.3.1.	概要.....	35
4.3.2.	個々の利用者データの生成	36
4.3.3.	利用者の列車乗継経路の推定	37
4.3.4.	利用者の嗜好の反映	38
4.3.5.	乗車位置の推定	39
4.3.6.	列車遅延の推定	40
4.3.7.	案内ダイヤ.....	40
4.3.8.	列車運行と旅客行動の相互作用	41
4.3.9.	シミュレータの出力と画面例.....	41
4.4.	利用者視点による輸送計画評価手法	42
4.4.1.	利用者の体験する輸送サービスに基づく評価	42
4.4.2.	評価尺度	43
4.5.	ケーススタディによる, 提案する輸送計画評価手法の有用性の検証.....	44
4.5.1.	対象路線の概要	44
4.5.2.	前提条件	45
4.5.3.	現行ダイヤ/ダイヤ改正案の比較評価	45
4.5.4.	列車選択基準の変更による評価値の変動幅.....	49
4.5.5.	提案手法の効果	49
4.5.6.	様々な路線, 輸送計画に対する評価の展開と, 輸送計画の設計への反映.....	50
4.6.	本章のまとめ.....	50
4章の参考文献		51
5.	マイクロシミュレーションを活用したダイヤ乱れ時の運転整理評価手法.....	53
5.1.	はじめに.....	53
5.2.	ダイヤ乱れ時の旅客流動推定と課題	53

5.2.1.	ダイヤ乱れ時の旅客行動.....	53
5.2.2.	ダイヤ乱れ時の旅客行動推定に関する関連研究.....	55
5.2.3.	運転整理案評価に求められる要件.....	55
5.3.	ダイヤ乱れ時における列車運行・旅客行動シミュレーション手法.....	56
5.3.1.	列車運行・旅客行動シミュレータを，ダイヤ乱れ時へ適用する際の課題.....	56
5.3.2.	他路線への迂回行動モデル.....	56
5.3.3.	案内情報を反映した利用者行動モデル.....	58
5.3.4.	案内ダイヤによる列車選択行動モデルの実装.....	59
5.3.5.	シミュレータの全体構成.....	59
5.4.	利用者視点による運転整理の評価手法.....	60
5.5.	実在路線への適用、ケーススタディによる提案手法の有効性検証.....	61
5.5.1.	路線，シナリオの概要.....	61
5.5.2.	利用者の行動に関する前提と，対応する変数の設定方法.....	62
5.5.3.	整理案①②の概要，狙い.....	62
5.5.4.	整理案①②に対する適用，評価結果（案内なし）.....	63
5.5.5.	整理案①②に対する適用，評価結果（案内あり）.....	65
5.6.	まとめ.....	67
5章の参考文献	67
6. 結言	69
6.1.	研究成果の要約.....	69
6.2.	今後の課題.....	70
6章の参考文献	71

1. 序論

1.1. 本論文の背景

鉄道において、列車ダイヤ等の輸送計画は、鉄道事業者の商品であり、利用者の利便性に直結する。したがって、輸送計画の作成担当者には、特に大都市圏の通勤路線において、著しい列車の混雑や遅延が発生しないか否か等、慎重かつ詳細な検討が求められる^[1-1]。しかし現状では、鉄道の輸送計画は、担当者が経験的に作成、評価しており、ダイヤ改正案等、新たに作成した輸送計画について、利用者の視点から、客観的かつ定量的に評価されることは少ない。

これらを踏まえ、輸送計画を利用者の視点で評価しながら、利用者の需要に沿った輸送計画を作成する「デマンド指向輸送」という考え方が、過去に提唱されている^[1-2]。しかし、輸送計画の自動作成に関する研究は幾つか存在するものの^[1-3]、利用者の需要を明示的に反映させ、需要に合致した輸送計画を計算機等で自動的に作成する手法は、提案されていない。また、利用者の視点から輸送計画を評価する既存研究として、所要時間や待ち時間を反映した「駅サービス指数」^[1-4]や、所要時間、待ち時間、乗換回数、混雑度などを集約した「利用者の不効用値」^{[1-5][1-6]}が提案されている。しかし、これらの研究では、列車遅延の発生可能性等、実際の運行状況を再現させたうえで輸送計画を評価しているわけではない、という課題がある。

さらに、ダイヤ乱れ時においても、輸送計画の変更である運転整理を検討するにあたっては、運転整理実施時の状況を再現し、利用者の利便性を考慮したうえで、早期の遅延回復を図るべきである。しかし、ダイヤ乱れ時の列車運行状況を詳細に推定し、利用者の視点から運転整理を定量的に評価することは、実務でも、既存研究でも行われていない。

鉄道が利用者に対し、魅力的な輸送サービスを提供し続けるためには、利用者の需要を適切に把握したうえで、輸送計画実施時の運行状況を再現し、利用者にとって利便性の高い輸送計画であるかどうかを検証し、必要に応じて輸送計画の改善を行う必要がある。しかし、そのような輸送計画実施時の運行状況の再現、および利用者の視点による評価を行う手法は、確立されていないのが現状である。

1.2. 本論文の目的・本論文の構成

本論文では、輸送計画の品質の向上を目的に、輸送計画実施時の運行状況の再現手法、および利用者の視点による評価手法を構築する。これにより、鉄道事業者の担当者が、作成した輸送計画の品質を検証し、必要に応じ改良を行い、利用者に対しより便利な輸送が提供できるような、輸送計画担当者への計算機支援の実現を目指す。

まず、2章では、大都市圏における通勤輸送の課題について、平常運行時、ダイヤ乱れ時に分けて概説するとともに、輸送計画、運転整理の評価に関する既存研究について述べる。3章では、デマンド指向輸送の実現を目的に、利用者デマンドを反映した輸送計画を自動作成する手法を構築する。4章では、平常運行時における輸送計画の評価を目的に、

列車の混雑による遅延の発生を加味し、列車運行状況を再現する列車運行・旅客行動シミュレータを構築する。また、平常時の輸送計画に対する定量的な評価手法を構築する。5章では、ダイヤ乱れ時における運転整理の評価を目的に、ダイヤ乱れ時における利用者の行動を加味し、列車運行状況を再現するよう、列車運行・旅客行動シミュレータの機能を向上する。そして、ダイヤ乱れ時の運転整理に対する定量的な評価手法を構築する。6章では、本論文の成果とその意義を要約し、今後の課題について述べる。

1章の参考文献

- [1-1] 富井規雄: “列車ダイヤのひみつ”, 成山堂書店 (2005)
- [1-2] 富井規雄, 小野耕司, 後藤浩一, 福村直登, 土屋隆司: “鉄道におけるデマンド指向スケジューリング実現のための課題”, 情報処理学会第9回高度交通システム研究発表会 (2002)
- [1-3] 浅見雅之, 有澤誠: “評価基準に沿った列車ダイヤ自動作成手法にかんする研究”, 情報処理学会研究報告, ITS-20, No.21 (2005)
- [1-4] 奥村滋樹, 槇岡和彦: “列車ダイヤ評価のための駅サービス指数の算定”, 近鉄技報, Vol.31 (2000)
- [1-5] 国土交通省鉄道局: “鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル 2005”, 運輸政策研究機構 (2005)
- [1-6] 家田仁, 赤松隆, 高木淳, 畠中秀人: “利用者均衡配分法による通勤列車運行計画の利用者便益評価”, 土木計画学研究・論文集, Vol.6, pp.177-184 (1988)

2. 大都市圏の鉄道輸送が抱える課題

2.1. 毎日同じ輸送計画が適用されることに起因する課題

現在の鉄道の輸送計画では、平日・休日ダイヤや臨時列車の運転はあるものの、原則的にはダイヤ改正時に作成された基本ダイヤが毎日繰り返されている。この方式には、計画の作成や伝達に要する労力が最小限で済むこと、日々ほとんど同じダイヤであるため列車時刻が覚えやすいこと等のメリットがある¹²⁻¹。しかし、日々変動する利用者のデマンドに的確に応えた輸送計画ではないため、車両・乗務員等のリソースの効率的な使用、利用者の満足度の向上の両面において問題がある。その結果、普段はすいている列車が、ある日は非常に混雑し乗り切れなくなる、逆に長編成に利用者がまばらであるという問題が発生している。

鉄道が次世代においても魅力あるサービスを提供するためには、限られたリソースを効率的に使用し、日々のデマンドに合致したフレキシブルな輸送サービスの提供を考える必要がある。このような輸送サービスは「デマンド指向輸送」と呼ばれている¹²⁻²。デマンド指向輸送により、利便性向上による利用者の満足度向上、事業者の経費削減が両立できれば望ましい。

しかし一方で、現在の輸送計画の作成は、ベテラン担当者による手作業が主流で、多大な労力と時間が費やされている。そのため、デマンド指向輸送の実現には、輸送計画作成作業のシステムによる自動化、支援が必要である。すなわち、利用者デマンドを明示的に考慮して輸送計画を迅速に作成する手法の確立が必要である。

2.2. 平常運行時における輸送計画の課題

2.2.1. ラッシュ時間帯の列車混雑、慢性的な遅延

大都市圏のラッシュ時間帯における通勤路線では、激しい混雑による利用者の不快感とともに、並行ダイヤによる利用者の旅行時間増加や、混雑に起因する列車遅延の発生および増大も大きな課題となっている。この遅延増大は、以下のメカニズムで発生する。通勤、通学の利用者で混雑する列車が駅に停車すると、乗降に時間を要し、停車時間が延びる。停車時間が延びると、出発に遅延が生じ、先行する列車との間隔が広がる。列車の間隔が広がると、次の駅で、その列車の到着を待つ利用者が増加する。それにより、次の駅でも乗降に要する時間が延び、出発が遅れる。その結果、列車の遅延が拡大すると同時に、列車の混雑も増大する。このような一連の悪循環は「増延」と呼ばれる。

増延のような現象は、輸送計画の作成段階で、是非とも避けたいものである。一方で、利用可能な線路設備が限られており、その制約の中での更なる増発が困難な状況であるため、輸送計画担当者は、輸送計画を工夫し、特定の列車に利用者を集中させず、列車毎の混雑率を平準化することで、遅延の発生、増大の防止を図っている。したがって、利用者にとって望ましい通勤輸送の実現のためには、このようなラッシュ時間帯における輸送計画を、増延等の現象を加味しながら、その実施前に定量的に評価するのが望ましい。

2.2.2. 輸送計画の評価尺度に関する課題

輸送計画の評価指標にはこれまで、列車キロや車両キロなど、輸送サービスを線区全体の観点から評価する指標が用いられてきた^[2-3]。これらの指標は、事業者が運行に必要な車両、乗務員数などをきわめて容易に算出できるというメリットがある一方、あまりにも雑駁で、利用者の満足度を推定したり、輸送計画の改善のための指針を得たりすることは不可能である。同様に、ピーク1時間当たりの運行本数、快速停車駅、ラッシュ時間帯の最大混雑度、遅延等も、単体では評価指標として不十分である。これは、各利用者が実際に体験する輸送サービス（所要時間、待ち時間、混雑度、乗換回数、遅延時間等）を、明白に反映していないからである。そこで、これらを、その輸送計画の実施前（ダイヤ改正前）に把握し、利用者の視点から適切な評価を行うためには、その輸送計画実施時の運行状況（列車運行時刻、混雑度）をなるべく正確に予測し、各利用者の取る行動と、その結果体験する輸送サービスを適切に推定する必要がある。

これまで、輸送計画に対する評価指標を導入し、輸送計画を作成する研究が、幾つか報告されている^{[2-4]~[2-8]}。しかし、これらの研究では評価尺度として、列車単位の利益、遅延を扱っており、各利用者の視点からみた不便度を明白には扱っていない。また、利用者の視点から輸送計画を評価する研究として、所要時間や待ち時間を反映した「駅サービス指数」^[2-9]や、所要時間、待ち時間、乗換回数、混雑度などを集約した「利用者の不効用値」^{[2-10][2-11]}が提案されている。これらの評価値の計算にあたっては、各利用者が出発駅で出現してから目的駅に到着するまで、どの列車に乗り、どこで乗換え、どの程度の混雑を体験したのかという、利用者の行動、体験を詳細に推定する必要がある。しかし、これらの研究では、実際の運行状況を再現させようとして利用者行動を推定しているわけではなく、また乗車位置（号車、扉）による混雑度の差異、早く目的地に着きたい、乗換を回避したいといった、個々の利用者の嗜好が明白に反映されているわけではない。

一方で、列車の乗車人数や利用者行動を推定する手法として、利用者が利用する列車を推定することで利用者にとって最適な接続を持った輸送計画を構成する手法^[2-12]が示されている。また、自動改札機データを利用し、各ODの各時間帯における人数を、列挙した複数の列車乗継経路における不効用値に沿って配分するという手法^[2-13]が提案されている。さらに、駅での旅客乗降数から停車時間を推定する研究として、列車の乗降人数と停車時間との関係について、モックアップ車体を利用した実験を行うことにより、1扉あたりの降車人数、乗車人数、車内滞留人数と必要乗降時間の関係式を導出した研究^[2-14]がある。それに加え、列車運行と利用者行動の相互作用を加味し、列車の乗車人数を推定する研究も提案されている^[2-15]。しかし、利用者1人1人の詳細な列車乗継経路を、列車運行と利用者行動の相互作用を加味し、推定した研究は、これまでには報告されていない。

2.3. ダイヤ乱れ時における運行管理上の課題

2.3.1. ダイヤ乱れ時の運転整理と旅客行動

鉄道において列車の運行に乱れが生じると、運行管理を行う指令室では、運行を正常に戻すために、列車の運休、順序変更等の一連の輸送計画の変更を実施する。これを運転整理という^[2-16]。ダイヤ乱れについては社会的な影響が大きく、適切な運転整理を実施し、ダイヤを早期に回復させ、利用者にかかる迷惑をいかに少なくするかが課題である。

一方、ある列車が一度遅延し出すと、次の駅以降で列車間隔が広がるため、その列車に対する利用者の集中が生じる。利用者が特定の列車に集中すると、駅での乗降にかかる時間が当初より延び、それがさらなる列車遅延を発生させる。このような現象を増延とよぶ。ダイヤ乱れ時には、特に運転再開初列車に利用者が集中し、この現象が起りやすい。混雑の増大、所要時間の増大等で利用者には迷惑がかかるため、整理案作成時には、この増延を如何に防ぐかが重要である。

運転整理実施のための具体的計画である運転整理案を適切に作成するのは、利用者の現在の状況、すなわち旅客流動の正確な把握と予測が困難なこと、車両、乗務員等の多くのリソース制約を守る必要があること、どのような運転整理が良いのか、評価尺度が定まっていないこと、迅速な作成、手配が要求されること等から、極めて困難な作業となっている。このうち、旅客流動の正確な把握、予測は、輸送計画の変更により、どれほどの利用者にとどれだけ迷惑がかかるのかを考慮するためには極めて重要である。

特に、ダイヤ乱れ時の利用者の行動は、他線区へ迂回したり、駅や車内での案内により行動が変化したりと、平常時に比べて予測が困難である。また、運転整理の評価については、実際に迷惑を被る利用者の立場で評価するのが望ましいものの、ダイヤ乱れ時に各利用者が体験する迷惑を集約、定量化することは困難で、指令員の勘と経験に基づく評価がなされているのが現状である。適切に運転整理案を評価し、利用者にとって迷惑の少ない運転整理を実施するためには、これらの課題に対処しなければならない。

2.3.2. 運転整理の評価尺度に関する課題

鉄道事業者では、運転整理案の評価尺度として、列車の総遅延時分、運休列車の本数、正常運行に戻るまでの時間等を目安にしているところが多い。しかし、これらの評価尺度には、ダイヤ乱れが与える迷惑は個々の利用者に対してであるのに、それを運転整理案全体から評価したり、列車単位で集約したりしているという問題点がある。すなわち、ある列車の運休により何人の利用者が迷惑を被ったのか、利用者1人1人の、目的駅に到着するまでの到達時間、待ち時間、乗換回数がどうなのかといった、利用者の視点に立った評価になっているわけではない。

一方、利用者の視点から運転整理案を評価した研究としては、小林らの利用者の不効用からの評価^[2-17]、長崎らの理想的なサービスとの乖離に着目した評価^[2-18]、筆者らの利用者の目的駅までの輸送速度、混雑による評価^[2-19]などがある。しかしこれらはいずれも、各利用者の利用列車の決定にあたり、利用者は運転整理案を完全に把握しているというこ

とを前提としている。実際には、利用者に対してどのような案内がなされるかにより、利用列車が変化するため、より実態に近い評価を行なうためには、利用者への案内も考慮する必要がある。一方、館らは、POINT と呼ぶ指標の導入を進めている^[2-20]。これは、ダイヤ乱れの影響を被った人数と影響時間を地震の震度階級のように表現し、感覚的に理解しやすい評価とすることを意図している。ただし、この指標はダイヤ乱れ全体を把握するものであり、運転整理での個別のダイヤ変更による評価値変化までも追従する考え方とはなっていない。さらに、ヨーロッパにおいても、ダイヤ乱れ時を対象として、旅客流動を推定し利用者の視点から評価する研究は筆者の知る限り行われていない^[2-21]。

2.4. 鉄道輸送の利便性評価に対する考え方と本論文の方針

本論文では、輸送計画や運転整理等、鉄道輸送の利便性に対する評価は、鉄道を利用する各利用者の体験する輸送サービスを定量化し、それを集約した値に基づき評価すべきという立場をとる。各利用者の体験する輸送サービスとは、利用者が乗車駅の改札を入場後、降車駅の改札を出場するまでの間について、所要時間や、列車の待ち時間、乗換回数、乗車した列車、乗車位置における混雑度等であり、値が大きいほど、輸送サービスが不便であることを示す。これらの値をもとに、例えば、所要時間1分と乗換回数1回の不便度の比率等、異なる尺度の評価値を集約し、総合的な利便性を算出する評価尺度を使用し、各利用者に対する利便性評価値を計算する。そして、その利便性評価値を、全利用者について合計することで、全利用者の体験する輸送サービスを集約した値を算出し、輸送計画や運転整理の評価値とする。

本論文では、上記の評価値を適切に算出するため、対象となる鉄道路線における利用者 と列車運行状況を、詳細に再現する。具体的には、利用者データとして、自動改札機等で取得される利用者 OD データを使用し、各列車の乗車人数を推定するのに加え、列車の混雑に起因して、遅延が生ずる現象も再現する。こうすることで、利用者が実際に体験する輸送サービスの、より実態に則した推定が可能となる。

ここで、本論文では、上記のような列車の運行とあわせて利用者1人1人の行動を推定するシミュレーションを「マイクロシミュレーション」と呼ぶことにする。これは、土地利用や交通等の都市計画の分野において、個々の活動主体（個人、世帯、企業等）の選択行動（立地主体の属性変化、移転など）を確率的に表現し、個別の行動の結果を積み上げて都市全体の動きを表現するモデルが「マイクロシミュレーションモデル」と呼ばれることに対応している^[2-22]。本論文では、鉄道利用者の列車乗継経路推定、乗車位置推定に際し、個々の利用者の列車選択行動、乗車位置選択行動を、確率を含む形で表現し、各利用者の行動の結果を積み上げて列車運行全体の状況を表現している。なお、最近では、主に欧州において、列車運行の推定粒度に着目し、列車の駅間での加減速等、運転曲線レベルで推定を行うシミュレーションを”microscopic simulation”と呼び、運転曲線は推定せず、駅の着発時刻のみを推定するシミュレーションを”macroscopic simulation”と呼ぶことが

多い。この分類に従うと、本論文のシミュレーションは、列車の駅間の運転曲線を明示的に推定していないことから、”macroscopic simulation”となる。しかし、利用者1人1人の詳細な列車乗継経路、乗車位置等を推定することから、本論文では、構築するシミュレーション手法を「マイクロシミュレーション」と呼ぶことにする。

3章では、利用者デマンドを反映した輸送計画を自動で作成するために、現在の解となる輸送計画案に対し、利用者ODデータを用いた乗車人数推定と、利便性評価値の計算を行い、その結果に基づき、輸送計画案を改良するアルゴリズムを提案する。4章では、大都市通勤路線のラッシュ時間帯の輸送計画を対象に、遅延の発生可能性を加味して適切に評価する目的で、利用者の列車乗継経路推定、列車の乗車人数推定、列車の遅延推定を逐次行い、ラッシュ時間帯の列車運行状況を再現する、マイクロシミュレーション手法を提案する。5章では、ダイヤ乱れ時の運転整理を対象に、運転再開前後における利用者の他路線への迂回や、利用者への案内を考慮したうえで、運転整理案に対する列車の乗車人数や、遅延の増減を推定し、運転整理案や利用者への案内の有効性を評価する手法を提案する。

2章の参考文献

- [2-1] 富井規雄: “列車ダイヤのひみつ”, 成山堂書店 (2005)
- [2-2] 富井規雄, 小野耕司, 後藤浩一, 福村直登, 土屋隆司: “鉄道におけるデマンド指向スケジューリング実現のための課題”, 情報処理学会第9回高度交通システム研究発表会 (2002)
- [2-3] 電気鉄道ハンドブック編集委員会: “電気鉄道ハンドブック”, コロナ社 (2007)
- [2-4] A. Caprara, L. Kroon, M. Monaci, M. Peeters and P. Toth: “Passenger Railway Optimization, in Cynthia Barnhart and Gilbert Laporte eds”, Transportation (Handbooks in Operations Research and Management Science), North Holland (2006)
- [2-5] L. Ingolotti, F. et al: “A Scheduling order-based method to solve timetabling problems”, Current Topics in Artificial Intelligence, Lecture Notes in Artificial Intelligence 4177, pp. 52-61 (2006)
- [2-6] V. Cacchiani, A. Caprara, P. Toth: “Column Generation Approach to Train Timetabling on a Corridor”, Quarterly Journal of Operations Research, Springer Berlin / Heidelberg, Volume 6 (2008)
- [2-7] Anita Schoebel, Silvia Schwarze: “A Game-Theoretic Approach to Line Planning”, Proc.6th Workshop on Algorithmic Methods and Models for Optimization of Railways – ATMOS (2006)
- [2-8] Leo Kroon et al: “Stochastic Improvement of Cyclic Railway Timetables”, Transportation Research Part B: Methodological, Volume 42, Issue 6, pp. 553-570

(2008)

- [2-9] 奥村滋樹, 槇岡和彦: “列車ダイヤ評価のための駅サービス指数の算定”, 近鉄技報, Vol.31 (2000)
- [2-10] 国土交通省鉄道局: “鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル 2005”, 運輸政策研究機構 (2005)
- [2-11] 家田仁, 赤松隆, 高木淳, 畠中秀人: “利用者均衡配分法による通勤列車運行計画の利用者便益評価”, 土木計画学研究・論文集, Vol.6, pp.177-184 (1988)
- [2-12] Zhonping Yang, Takafumi Koseki, Satoru Sone: “Railway Network Timetabling for Reducing Transfer Time Using Genetic Algorithm”, 電気学会論文誌 D (産業応用部門), Vol. 119-D, No.6 (2000)
- [2-13] 明星秀一: “自動改札機を活用した旅客流動推定”, 第 42 回鉄道サイバネ論文集 (2005)
- [2-14] 青木俊幸: “駅停車時分短縮のための乗降分布予測手法”, J-Rail2001 (2001)
- [2-15] C. Hirai, N. Tomii: “An Algorithm to Estimate Train Congestion Applicable for Evaluation of Train Rescheduling Plans”, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.4, No.1, pp.161-169 (2001)
- [2-16] 電気学会・鉄道における運行計画・運行管理業務高度化に関する調査専門委員会編: “鉄道ダイヤ回復の技術”, オーム社 (2010)
- [2-17] 小林理彩, 家田仁, 柴崎隆一, 寺部慎太郎: “利用者の利便性から見た非常時の運転整理ダイヤの評価”, J-Rail 2000, No.3408, pp.379-382 (2000)
- [2-18] 長崎祐作, 古関隆章, 村木一巳, 舘精作, 駒谷喜代俊: “都市近郊鉄道における運転整理案の作成と評価”, 電気学会 交通・電気鉄道研究会, TER-02-63 (2002)
- [2-19] 國松武俊, 近藤繁樹, 平井力, 富井規雄: “駅サービス指数による運転整理案評価”, 鉄道総研報告, Vol.20, No.2, pp.5-10 (2006)
- [2-20] 舘雅憲, 福山浩史: “輸送安定度指標「POINT」の開発と全社展開”, 第 44 回サイバネ・シンポジウム論文集, No.101 (2007)
- [2-21] T. Schlechte, R. Borndörfer, B. Erol, T. Graffagnino, E. Swarat: “Micro-macro transformation of railway networks”, Journal of Rail Transport Planning & Management, Vol. 1, Issue 1, pp.38-48 (2011)
- [2-22] 杉木直: “マイクロシミュレーションモデルの活用と課題”, 計画交通研究会第 1 回都市モデルを用いた都市・交通政策評価に関する研究会 (2008)
- http://www.keikaku-kotsu.org/kankou/rsw/toshi-S/toshi-S_1-3.pdf

3. 利用者デマンドを反映した輸送計画作成手法

3.1. はじめに

2.1 節で述べたように、鉄道が次世代においても魅力あるサービスを提供するためには、限られたリソースを効率的に使用し、日々のデマンドに合致したフレキシブルな輸送サービスを提供する、デマンド指向輸送の実現を目指す必要がある。デマンド指向輸送により、利便性向上による利用者の満足度向上、事業者の経費削減が両立できれば望ましい。しかし一方で、現在の輸送計画の作成は、ベテラン担当者による手作業が主流で、多大な労力と時間が費やされている¹³⁻¹⁾。そのため、デマンド指向輸送の実現には、輸送計画作成作業のシステムによる自動化、支援が必要である。

本章では、利用者のデマンドに対して、利用者の利便性と事業者のコストの双方を考慮して、輸送計画を自動的に作成するアルゴリズムを導入する。利用者のデマンドとは、各利用者が移動に対する要求として予め持っている、乗車駅、降車駅、出発または到着の希望時刻のことである。

ここで、列車本数、運行形態をも含めて、利用者デマンドおよび事業者の要求に合致したダイヤとするため、時間帯毎の列車本数や運行区間も含めて提案するアルゴリズムを構築する。これにより、ダイヤパターンにとらわれず、利用者が多い時間帯・区間に多くの列車を設定し、デマンドにきめ細かく対応させることができる。また、輸送計画の評価尺度として、利用者が鉄道を利用することにより被る不効用を金額換算したものと、事業者が列車を運行するために必要な経費の和である、社会的損失を用いる。これにより、利用者の利便性と事業者のコストの双方を考慮した、バランスのとれた輸送計画の生成が可能になる。

以下、2 節では、輸送計画作成上の目的、制約、問題点等について述べる。3 節では、本章で目的とする、利用者デマンドを反映した列車ダイヤについて詳しく述べる。4 節では、提案するアルゴリズムの詳細を述べる。5 節では、実際の線区として、大都市圏のある鉄道路線に適用した例を示す。6 節では、まとめと今後の課題を述べる。

3.2. 輸送計画作成の課題と関連研究

3.2.1. 輸送計画

鉄道の輸送計画には、列車計画、車両運用計画、乗務員運用計画、構内作業計画など、多種多様な計画がある。本章ではこのうち、列車の運転区間や各駅の番線、時刻を定めた列車計画、および車両運用計画の一部である駅での折返計画を対象とする。

輸送計画が作成される手順を Figure 3- 1 に示す。輸送計画は実務上、その路線の対象年次における需要予測・需要想定に基づき、まずはそれらを反映した、時間帯別の列車種別、本数、運転区間等の列車計画を行う。その後、列車間の接続や停車時間、車両・乗務員運用といった詳細な計画を行う。輸送計画作成時には、所要時間、混雑度、待ち時間などで表される、利用者の利便性の確保を図る必要がある。一方、事業者には、運用本数、

走行キロ数、乗務員数など、運行コストを少なくしたいという要求がある。これらを考慮しながらも、前後の列車間で安全上必要な間隔が取られること、駅番線数など設備に起因する物理的な条件を守ることなど、様々な制約を満たした実行可能な輸送計画を作成しなければならない。

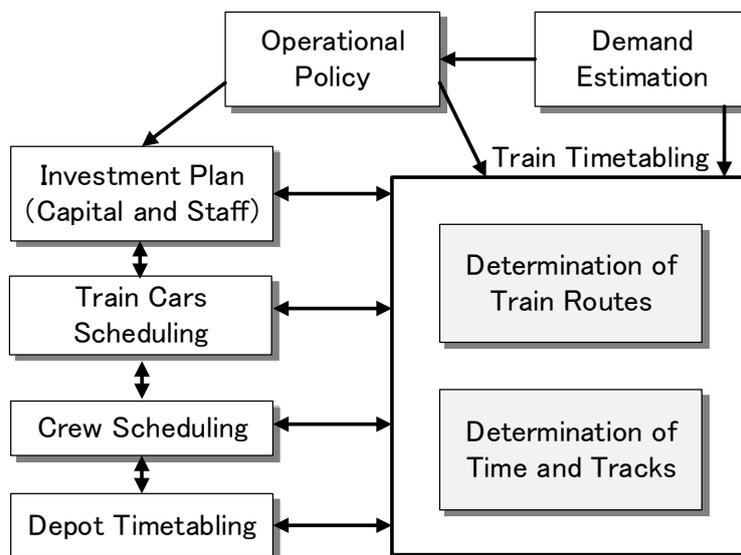


Figure 3- 1 Process of Train Timetabling

3.2.2. 現状の輸送計画作成業務の問題点

近年では、国内外において、輸送計画の作成にコンピュータが使用され、輸送計画作成システム等のソフトウェアも実用化されている^{[3-1]~[3-3]}。しかしこれらの機能は、例えば、作成した輸送計画の列車間隔をチェックする機能や、始発駅時刻を入力し、次駅以降の時刻を自動入力する機能、列車をコピーして、指定時間後に貼り付けする機能等、輸送計画の作成入力支援に留まっており、区間、種別毎の列車本数の決定、始発駅時刻の決定、停車駅の決定等の高度な判断は、担当者に委ねられ、そこに多くの時間と労力がかかっている。このような意思決定段階にまで踏み込んだ輸送計画作成システムは、未だ実用化されていない^[3-4]。

その結果、輸送計画の策定には、担当者による意思決定部分を中心に、多くの時間、労力が費やされる。輸送計画の変更であるダイヤ改正は、例えば年に1回程度となるなど、頻繁に変更することは困難である。これが、日々変動する利用者のデマンドに的確に応え、フレキシブルな輸送計画を提供するデマンド指向輸送が実現しない理由の一つでもある。

3.2.3. 輸送計画の自動作成に関する関連研究

これまでの輸送計画の自動作成に関する研究は、列車本数、運転区間が与えられたときに、目的関数に基づいて列車の順序、停車駅、時刻を調整するものであった。具体的に

は、列車運行事業者により各列車の「希望する始発駅発時刻，終着駅着時刻」が与えられたとき，それとの偏差をなるべく少なくなるよう調整し，実行可能な輸送計画を作成するアルゴリズム^[3-5]，列車の着・発事象をノード，走行・停車をアークとする **multigraph** に対して，アークに付された列車の **profit** を最大にするようなアークを選び出す問題を **MILP**(Mixed Integer Linear Problem: 混合整数線形計画問題) として解くアルゴリズム^[3-6]，列車種別ごとの等間隔で部分的な輸送計画を組み合わせ，探索するダイヤの数を絞ったうえで範囲拘束探索手法を適用する，輸送計画自動作成手法^[3-7]，周期ダイヤを対象に，スケジューリングを行うための数学モデルを提案した研究^[3-8] などがある。しかし，これらの研究はいずれも，全体の輸送計画を作成，調整するのに，利用者のデマンドが明示的に考慮されているわけではない。

一方で，パターンダイヤの1サイクルをなす列車の数だけ基本停車パターンを生成し，それを利用者データに基づき，利用者の総所要時間が最小になるよう，1サイクル内の列車の順序を決定する手法^[3-9]，複数の路線が交差する鉄道ネットワークを対象に，路線間の接続を良くする輸送計画を，遺伝的アルゴリズムを用いて作成する手法^[3-10]，ODデータに基づく総旅行時間を評価値として，優等列車の停車駅と各駅停車を追い越す駅を，遺伝的アルゴリズムを利用して決定する手法^[3-11]なども提案されている。これらは，利用者デマンドに基づいた評価値により輸送計画を作成している。しかし，予め与えられた列車本数，ダイヤパターンのサイクルなどを前提としており，それらが利用者デマンドに合致しているかどうかの検討はされていない。特に，列車本数の設定にあたっては，利用者のデマンドだけでなく，必要以上に列車を設定して運行コストをかけたくない，という事業者の事情も考慮し，両者のバランスをとる必要がある。このような事業者の要求をも考慮した，全体の観点から輸送計画を作成する研究は，これまで報告されていない。さらに，実際の輸送計画は，各車両の運用，駅での折返計画と密接に関係しており，それらが制約として影響するが，この点についても考慮されていない。

3.3. 利用者デマンドを反映した輸送計画作成のコンセプト

輸送計画は，利用者にとっての利便性が高いものが望まれるため，需要予測を実施し，利用者が多いと推定される区間，時間帯に多くの列車を運行するのが望ましい。例えば，**Figure 3-2**のように，C駅周辺でイベントが開催され，C駅に特定の時刻までに到着したいA駅→C駅の利用者が多いときには，全時間帯に等間隔で列車を走らせるよりかは，デマンド量が多い前半の時間帯に多くの列車を走らせるほうが望ましい。もちろん，イベントに向かわない他の利用者のデマンドについても同様に考慮し，それらの利用者が著しく不便にならないよう，配慮することは必要である。

現在の人手による輸送計画作成でも，担当者は，区間，時間帯別利用者数など，利用者を考慮しながら輸送計画を作成している。しかし，若干の追加変更はあるとはいえ，毎日ほぼ固定的な輸送計画によって列車が運行されており，日々のデマンドの変動的に

えた輸送計画が提供されているわけではないのが現状である。

本章では、各利用者のデマンドデータを明示的に考慮し、利用者の多い区間、時間帯には多くの列車を走らせるなど、利用者デマンドを反映した輸送計画を自動作成するアルゴリズムを提案する。ここで、利用者デマンドとして、各利用者の出発駅、到着駅、到着駅に到着したい時刻を与える。すなわち、各利用者が××駅を出発して〇〇駅に△△時までに着きたい、という要望を持つとき、なるべく遅くに出発でき、かつ列車の混雑、待ち時間等、移動に関する不満がなるべく少なくなる輸送計画を作成する。

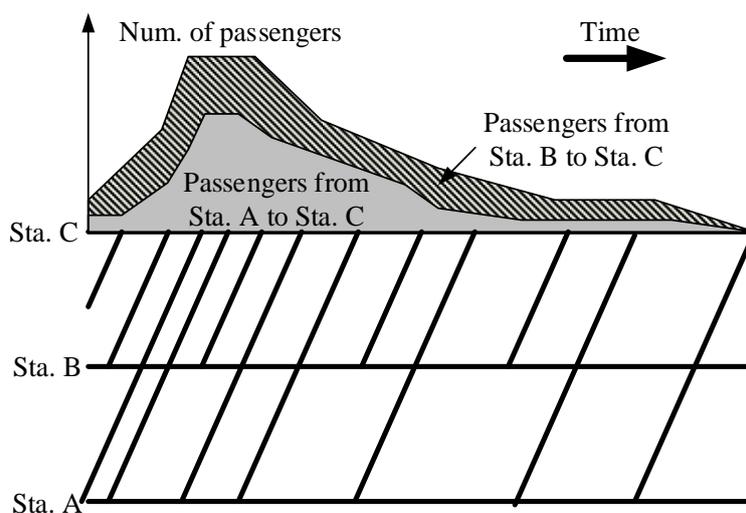


Figure 3-2 An example of train timetabling based on passengers' demand

3.4. 輸送計画作成アルゴリズム

3.4.1. 対象路線

本章で構築する輸送計画作成アルゴリズムは、分岐、合流が無い非環状路線で、路線内に車両の入出区が可能な車両基地が存在する路線を対象としたものとする。また、輸送計画の作成にあたっては、下記の事項を前提とする。

- (1) 作成する輸送計画には、列車の各駅発着時刻、番線、および各車両の折返運用計画を含む。
- (2) 本アルゴリズムでダイヤを設定する可変列車と、ダイヤが予め決まっており変更できない固定列車が存在する。
- (3) 可変列車は各駅停車のみで、編成両数は可変全列車で同一とし、列車の連結や切り離し、すなわち分割併合は考慮しない。
- (4) 輸送計画を作成する時間帯は所与とし、可変列車はこの時間帯中に始発駅を出発し、終着駅に到着する。
- (5) 列車運行の条件として、駅番線の競合や、続行する列車間に必要な最小時間間隔で

ある時隔，同じ分岐器を通過する列車同士に必要な最小時間間隔である交差支障，終着駅で折り返して始発列車として発車するまでに必要な最小時間である最小折返時間を考慮し，実行可能な輸送計画を作成する。

- (6) 路線内に車両基地が存在し，列車が入出区可能とする。なお，車両基地内での入換のダイヤ，制約は考慮しない。
- (7) 車両性能の向上や，性能の異なる車両への変更，運転設備の改良等による，列車の駅間走行時間の短縮は考慮しない。
- (8) 輸送計画による利用者数の増減は，無いものとする。実際には，輸送計画の変更により，増発や所要時間短縮，乗換解消が図られれば，他路線や，他の交通機関から利用者が転移し，利用者数が増加する。逆に不便になれば，他の鉄道路線，交通機関に利用者が転移する。利用者数の増減は，短期的には限定的だが，数年後等，中長期的には影響が出てくる。しかし本章では，日々輸送計画を変更する，デマンド指向輸送を想定するため，短期的な輸送計画の変更であり，利用者数は増減しないという前提とした。なお，輸送計画の変更による利用者数の増減を想定する場合には，輸送計画作成の前に需要予測を行い，その結果予測される利用者数，デマンドデータを利用すれば対応可能である。
- (9) 各利用者は所要時間が最短となる列車の利用を希望するものとする。

3.4.2. アルゴリズムの概要

本アルゴリズムは，Figure 3- 3 に示すように，本数設定アルゴリズムおよびダイヤ改良アルゴリズムの2つからなる。

本数設定アルゴリズムは，利用者デマンドデータから必要な列車本数を概算，それを作成時間帯に等間隔となるよう列車を設定し，時刻，車両運用を決定する。ここで，列車，番線の競合等により実行不可能な箇所がある場合，時刻等を修正し，実行可能な輸送計画を出力する。

一方，ダイヤ改良アルゴリズムは，本数設定アルゴリズムで出力された輸送計画を初期解とし，メタヒューリスティクスを用い，デマンドに合わせた運転区間の変更，時刻調整などにより，輸送計画の改良を行う。具体的には，まず，現在の解と利用者デマンドデータから，後述する旅客流動シミュレーションを実施し，全利用者の列車乗継経路を推定，各列車，区間の乗車人数を推定する。次に，旅客流動シミュレーション結果から，乗車人数が多すぎる列車，区間，列車待ち時間が長い利用者等，利用者が不満を感じると考えられる列車，区間である「不満箇所」を抽出する。また，後述する不満指数に相当する，その輸送計画全体に対する評価値を計算する。そして，抽出した不満箇所を1箇所選択し，当該不満箇所を解消するよう，輸送計画の改良を試行する。その後，改良後の輸送計画に対し，評価値を計算する。最後に，メタヒューリスティクスを適用し，改良前後の評価値に基づき，改良後の輸送計画の解の採否を判断，解を更新する。この作業を繰り返す。

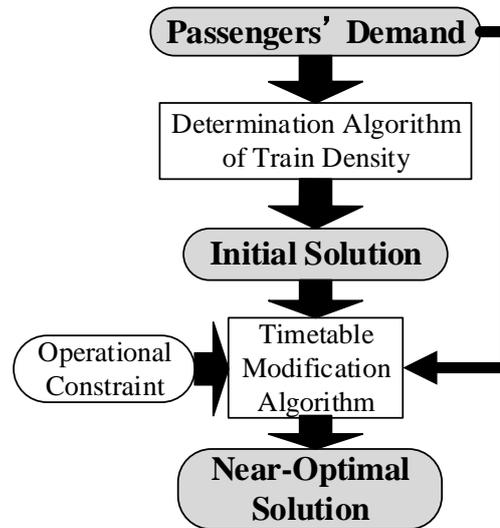


Figure 3-3 The process of timetabling in the system

3.4.3. 評価指標

評価指標として、ある輸送計画が実施された場合の、利用者と事業者からなる社会の社会的損失を考える^[3-12]。本章では、利用者の損失は、各利用者が受ける輸送サービスから計算される不効用値に、所得接近法による時間評価値を乗じたものとする。ここで不効用値とは、式(3-1)により算出される、乗車時間、待ち時間、乗換回数、混雑度などの不便要素を乗車時間に換算したものである。この手法は、鉄道プロジェクトの評価手法として文献^[3-13]に掲載されている。

$$U_p = T_p + \alpha W_p + \beta N_p + \sum_{m \in Q_p} \sum_{xy \in R_{p,m}} [t_{m,xy} (\gamma \text{Conj}_{m,xy} + \delta)] \dots\dots\dots(3-1)$$

U_p	Disutility value	T_p	Riding time
W_p	Waiting time	N_p	Number of transfers
Q_p	Set of selected trains	$R_{p,m}$	Set of train paths using train m
$t_{m,xy}$	Operation time of train m between station x and y	$\text{Conj}_{m,xy}$	Congestion rate of train m between station x and y
$\alpha, \beta, \gamma, \delta$		Parameters	

また、事業者の損失には、人件費、動力費等の運行コストが挙げられる。しかし、1列車が1キロ走行するのにかかる費用を、路線毎に正確に算出するのは、極めて困難である。その理由は、鉄道の運行コストには、列車本数に比例する可変的なコストと、電路保存費など、列車本数に影響されない固定的なコストとがあり、一見後者の費用と思われる

ものでも、ある本数を超えると地上設備を増強する必要がある等、列車本数により離散的に変動しうるからである。そこで本論文では、運行コストの算出を簡略化するため、事業者の財務諸表の鉄道事業営業費を、年間の列車総走行キロで割ったものを、1列車が1キロ走行するのにかかる費用とする。すなわち、この列車走行1キロあたりの鉄道事業営業費に、列車の総走行キロ数を乗じて算出したものを、事業者の損失とする。

なお、利用者が支払う運賃の総和は、事業者にとっては収入であり、利用者と事業者からなる社会の中での金銭の移動であるため、社会にとっての外部損失とはならない。また、利用者数は増減しないという仮定により、運賃の総和は変化せず、事業者の運賃収入総額や、利用者の支払い運賃の総和は変化せず、評価関数に組み込む必要はない。したがって、社会的損失は、上記の利用者、事業者の損失の和で表される。

ここで、列車本数に対する、評価値関数の形状を考える。利用者にとっては、列車の本数は多ければ多いほど望ましいが、本数が多くなるにつれ、1本列車を増やしたときに得られる利用者の追加便益、すなわち限界便益は減少する。一方、事業者にとっては、列車1本あたりの運行経費、すなわち限界費用は、上記の運行コスト算出方法により、全体の列車本数に関わらず一定である。したがって、評価指標の社会的損失を最小化する場合、Figure 3-4のように、列車本数が少なすぎることも多すぎることも好ましくなく、利用者、事業者のバランスが取れる均衡点の列車本数が存在する。本アルゴリズムでは、評価指標のこの性質を利用し、列車本数を外部から与えることなく、輸送計画を作成する。

また、この評価指標には、運行コストの大小、単位時間あたりの旅客損失の大小など、路線に依存する様々な事情を、容易に反映できる。例えば、新型車両の導入により電力消費量が低下すれば、運行コストは下がり、均衡点が Figure 3-4 で右に移動し、最適な列車本数は増加する。本論文では運行コストの算出を、上記の簡略化した方法としたが、1列車1キロあたりの正確なコストを路線毎に見積れば、このようなコストに関する詳細な事情も、評価指標に反映可能である。したがって、パラメータの調整で様々な路線に対応でき、アルゴリズムとしては、路線に依存しない形のものが構築可能である。

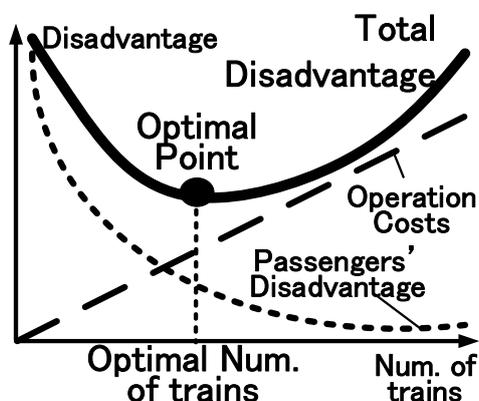


Figure 3-4 Number of trains and total disadvantage

3.4.4. 旅客流動シミュレーション

輸送計画および利用者デマンドデータが与えられると、各利用者が乗車する列車、乗継（以下、列車経路と呼ぶ）が推定可能である。全利用者の列車経路を推定すると、各列車、区間の乗車人数も推定可能である。これら列車経路探索、乗車人数推定のことを、旅客流動シミュレーションと呼ぶ。本章では、輸送計画に対しグラフネットワークを作成し、Dijkstra 法のアルゴリズムを用いることで、旅客流動シミュレーションを行う。

3.4.5. 本数設定アルゴリズム

本数設定アルゴリズムでの輸送計画作成手順を Figure 3-5 に示す。輸送計画作成対象時間帯に設定する列車の本数を、1 本から開始し、2 本、3 本…と 1 本ずつ増加させる。各本数に対し、列車間隔が等間隔となるような輸送計画を作成する。そして、3.4.1 の列車運行条件を考慮し、運行不可能な箇所が存在する場合、時刻や番線を修正し、運行可能な輸送計画とする。

この時刻修正には、グラフ理論を用いる。各列車の各駅着発事象をノードとして表し、各ノード間を、連続する各事象が発生するために必要な時間を重みとするアークで結び、グラフを作成する。このグラフに対し、PERT（Program Evaluation and Review Technique）手法を用いて各列車の着発の最早可能時刻を求め、この時刻に変更することで、ダイヤが運行可能なものとなる^[3-14]。

一方、始発または終着駅において 2 列車がほぼ同時刻に着発するとき、両列車がポイントを通るならば交差支障が生じるが、これは着列車と発列車の使用番線を入れ替えれば回避できる。そこで、このような番線使用方法による影響を考慮するため、同じ本数に対し、終端駅の列車の発車順に①1 番線→2 番線→1 番線…、②2 番線→1 番線→2 番線…と使用する方式の 2 通りの番線使用方法に対する輸送計画を作成する。このような手法により等間隔の輸送計画を作成していくと、ある本数からは、時隔等により 2 通りの番線使用方法とも実行可能な輸送計画を作成できなくなる。この本数に達したところで、アルゴリズムを終了する。

こうして出来た、各本数のほぼ等間隔の輸送計画を、その本数の「代表輸送計画」とする。これらに対し、旅客流動シミュレーションを行い、3.4.3 の評価値を計算する。その結果、評価値が最も小さくなる本数の輸送計画を採用し、これを出力とする。評価値の性質より、このようにして求められた輸送計画の列車本数は、利用者の便益と事業者の運行経費とのバランスが取れた本数である。この輸送計画を初期解とし、次のダイヤ改良アルゴリズムの入力とする。

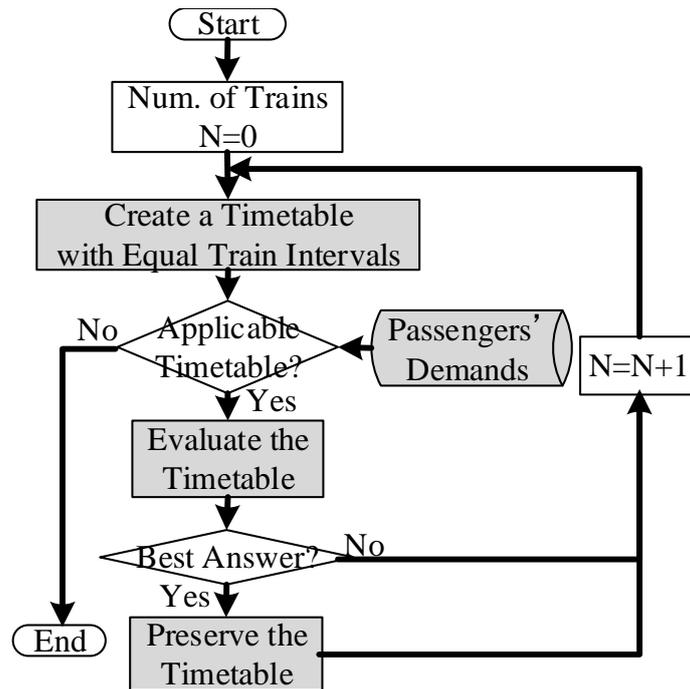


Figure 3- 5 Flowchart of determination algorithm of train density

3.4.6. ダイヤ改良アルゴリズム

Figure 3- 6 に示すように、本数設定アルゴリズムで出力された輸送計画を初期解とし、メタヒューリスティクスを用い、解の改良、評価、採否判断を繰り返す。

(1) アルゴリズムの流れ

ダイヤ改良アルゴリズムの処理の流れを Figure 3- 7 に示す。

(a) STEP1：初期解の旅客流動推定、評価

初期解のダイヤについて旅客流動シミュレーションを行い、この輸送計画が実施された場合の旅客流動を推定する。

(b) STEP2：利用者側の不満箇所の抽出

旅客流動シミュレーション結果に対し、予め用意された利用者の不満定義ファイルを参照し、利用者が不満を感じる箇所を抽出、列挙し、その影響人数をあわせて算出する。なお、利用者の不満定義ファイルは、STEP6 の輸送計画の改良で実施する改良対象事項と対応しており、具体的には、3.4.7(1)に記載の、①乗車人数が閾値より多い列車、区間、②乗車列車の到着駅到着時刻と希望到着時刻との乖離が大きい利用者が多く乗車している列車、区間、③隣接駅間の走行時間が長すぎる列車、駅間の3つである。

(c) STEP3：事業者側の不満箇所の抽出

利用者が少ない列車、区間など、事業者が不満を感じる箇所を、事業者の不満定義ファイルに基づいて抽出する。なお、事業者の不満定義ファイルは、STEP6

の輸送計画の改良で実施する改良対象事項と対応しており、具体的には、3.4.7(2)に記載の、①乗車人数が閾値より少ない列車、区間、②乗車人数が少なく、運転の取りやめが可能な列車同士の2つである。また、不満箇所の抽出は、STEP 2とSTEP3のグループ内において、同一の箇所が異なった不満事項に基づき、重複して抽出されることを妨げない。

(d) STEP4：不満の指数の計算

抽出された利用者、事業者の各不満箇所に対し、不満の指数を計算する。不満の指数の計算方法は、利用者の不満については、各不満内容に関して定義された不満の深刻度に、その影響人数を乗じたものとし、事業者の不満については、定義された不満の深刻度の値そのものとする。

(e) STEP5：不満箇所の確率的選択

これら抽出した各不満箇所の中から1つを確率的に選択する。各箇所の選択確率は、その不満の指数に比例させる。

(f) STEP6：輸送計画の改良

選択された不満を解消するよう輸送計画の改良を行う。不満定義ファイルの内容と改良方法は3.4.7で述べる。

なお、改良後の輸送計画は、そのままでは3.4.1の列車運行条件を満たすとは限らないため、3.4.5と同様、PERT手法を適用し、実行可能性を判定する。実行不可能な場合には、PERTにより他の可変列車の時刻、番線を変更し、実行可能な輸送計画へ修正する。この修正を試みても実行不可能な場合には、STEP7の旅客流動シミュレーションは行わず、STEP8においても改良後の輸送計画は採用しない。改良前の輸送計画を現在解として、STEP9の終了判断を行う。

(g) STEP7：改良後輸送計画の旅客流動推定、評価

改良して得られた輸送計画に対して旅客流動シミュレーションを行い、3.4.3の評価値を計算する。

(h) STEP8：改良後輸送計画の採否判断

改良後の輸送計画を残すか、改良前のダイヤに戻すかの判断を行なう。この判断には、Greedy、シミュレーテッド・アニーリング（以下、SAと表記）、タブーサーチ（以下、TSと表記）などのメタヒューリスティクスを用いる。

(i) STEP9：終了判断

終了判断を行う。輸送計画の改良プロセスにより、評価値の変動が、設定した収束半径以内に収まるか、一定回数以上反復した場合には、ここで終了し、現在までに出た解の中で最も良い解の輸送計画を出力する。反復する場合には、STEP2へ戻る。

(2) 改良候補箇所の絞り込み

STEP6において、ある1箇所の列車、駅に対して、例えば、時刻を早める／遅くす

る、途中駅で打ち切り折り返す等、3.4.7で述べる1つのダイヤ改良を行った場合において、その改良後の輸送計画が運行不可能だと判明した場合、それ以降に、同じ箇所が何度も選択されると、実行不可能な改良を何度も試みることになり、効率が悪い。そこで、計算効率を高めるために、タブーリストと同様の考えで、実行不可能リストを保持する。このリストには、現在の解に対する改良候補箇所で、実行不可能であると判明した箇所を投入する。リスト長は無限大で、現在解が更新されたときにリストをクリアする。また、同様の実行不可能リストを、現在までの最適解に対しても作成し、メタヒューリスティクスで現在までの最適解に戻ったときに、以前実行不可能と判定された箇所が選択されないようにする。こうすることで、実行不可能な改良を繰り返し試みることを防止する。

(3) アルゴリズムの特徴

このアルゴリズムの特徴として、輸送計画の改良すべき箇所の抽出には、利用者および事業者の不満の指数を用いるのに対し、輸送計画全体の評価値の算出には、利用者と事業者の損失の和を用いている点が挙げられる。すなわち、輸送計画の改良プロセスで用いる指標と、評価プロセスで用いる指標が異なっている。これは、改良プロセスでは、「この列車、区間が混雑している」等、列車単位で集約し問題箇所を抽出したほうが効率的な一方、輸送計画全体の評価では、1人1人の利用者がどれほど不便を被ったかという、利用者単位で集約した指標を用いるほうが、利用者の実感に近く望ましいためである。輸送計画改良プロセスで不満の指数を、評価プロセスで社会的損失を用いることにより、アルゴリズムの効率性と、解となる輸送計画の質との両立を可能とした。

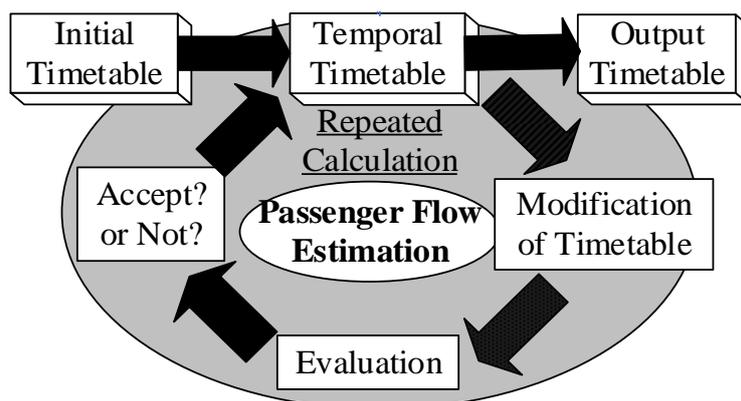


Figure 3-6 Timetable modification algorithm

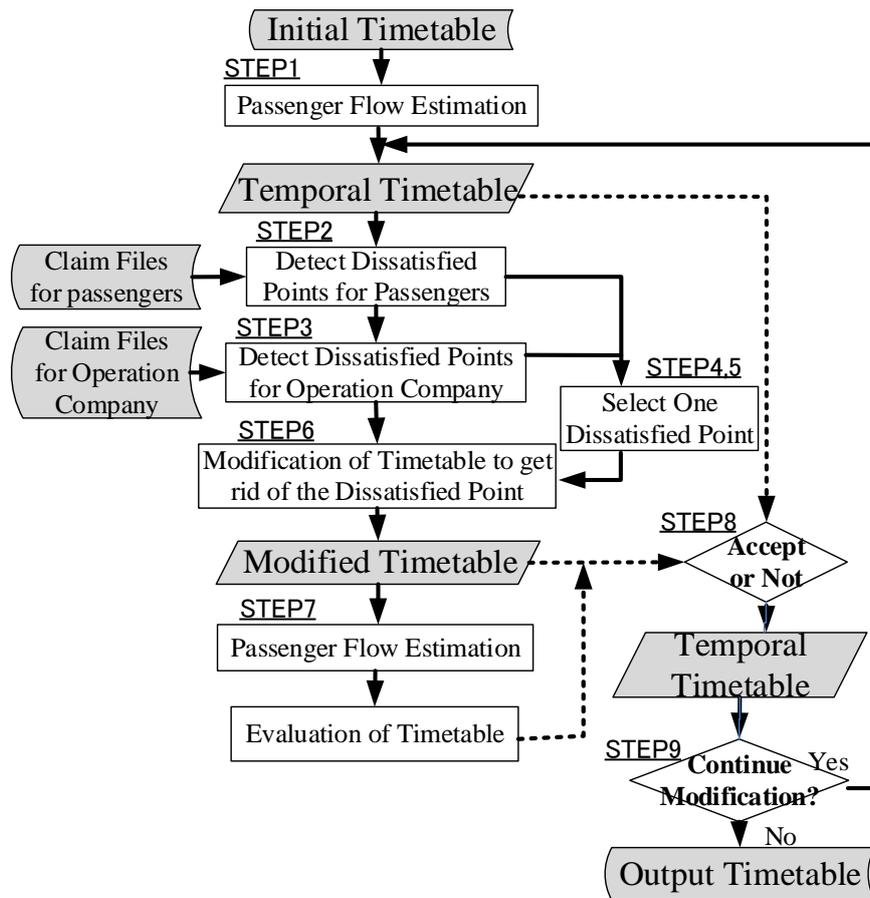


Figure 3- 7 Procedure of timetable modification

3.4.7. 利用者、事業者の不満の定義とその解消

ダイヤ改良アルゴリズムの STEP6 における輸送計画改良方法を以下に示す。なお、列車時刻を早める／遅らせる場合の変動幅は、各ケースとも 0 から一定値の幅の中から等確率で設定する。

(1) 利用者の不満

①乗車人数が閾値より多い列車、区間

Figure 3- 8 のように、乗車人数が閾値より多い列車、区間に対しては、下記のいずれかの改良を等確率で実施する。なお、当該区間の走行時間は変更せずに、出発時刻を繰り上げる、すなわち、ダイヤスジを平行移動させる。

- ・当該列車の当該区間の時刻を遅らせる。
- ・当該列車の次の列車の時刻を早める。

②乗車列車の到着駅到着時刻と希望到着時刻との乖離が大きい利用者が多く乗車している列車、区間

Figure 3- 9 のように、乗車列車の到着駅到着時刻と希望到着時刻との乖離が大きい利用者が多く乗車している列車、区間に対しては、各利用者の改札出場駅にお

いて、利用者が乗車する列車の駅到着時刻と、その利用者の希望到着時刻との乖離時間を算出し、その乖離時間が一定時間以上となる利用者数が多い、列車・区間を抽出する。到着駅に着いてから希望時刻になるまでの、いわゆる「待ち時間」が長い利用者が多い場合である。この場合、下記により、「待ち時間」を短縮する。なお、当該区間の走行時間は変更せずに、出発時刻を繰り上げる、すなわち、ダイヤスジを平行移動させる。

- ・当該列車の時刻を遅らせる。
- ・当該列車の次の列車の時刻を早める。

③隣接駅間の走行時間が長すぎる列車、駅間

Figure 3-10 のように、駅間の走行時間が、車両性能上、可能な走行時間よりも長すぎる列車・駅間である。この現象は、①、②のダイヤ改良後、実行不可能な箇所が発生し、それを解消するために、3.4.6(1) STEP 6においてPERTによる修正を行った結果、駅間走行時間が必要以上に長くなることにより発生する。このような、基準走行時間より一定時間以上長い列車、区間に対して、下記の改良を行なう。

- ・当該区間の列車出発時刻を遅らせることにより、車両性能上、可能な範囲で駅間走行時間を短縮する。なお、到着時刻は変更せずに出発時刻を繰り上げる、すなわち、ダイヤスジを立てる変更を行う。

(2) 事業者の不満

①乗車人数が一定の閾値より少ない列車、区間

(1) ①と逆のパターンであり、下記のいずれかを等確率で実施する。

- ・当該列車の時刻を早める。
- ・当該列車の次の列車の時刻を遅らせる。

②乗車人数が一定の閾値より少なく、運転の取りやめが可能な列車同士

Figure 3-11 のように、乗車人数が一定の閾値より少ない列車が、上下線で同じ時間帯、区間に1本ずつ存在している場合、まず、線路配線上、反対方面へ折返運転が可能な駅を選択する（選択した駅を、駅Pとする）。駅Pからその列車の終着駅（駅Qとする）に向かい、乗車人数が閾値より少ない区間が駅Qまで続く列車、区間を抽出する（これを、列車Aの区間Zとする）。次に、下記に該当する列車、区間が存在するか探索する。

I) 列車Aの駅Qでの折り返し列車（列車Bとする）が存在し、列車Bの区間Z（駅Q→駅P間）の乗車人数が、区間Z全体で閾値より少ない場合。

II) 列車A、Bより早い時刻に走行し、駅Qで折り返す列車C、Dが存在し、列車Dが列車Aの駅P到着時刻以降に駅Pに到着し、かつ列車Aの駅Q到着時刻以前に駅Qを出発する場合において、列車Dの区間Z（駅Q→駅P間）の乗車人数が、区間Z全体で閾値より少ない場合。

I)、II)の場合、列車Aの区間Z、列車BまたはDの区間Zでは、事業者はこの

区間の運行を取りやめたいと考える。そして、運行を取りやめた場合でも、車両運用を、P 駅にて「列車Aのあと列車B」または「列車Aのあと列車D」とすれば、実行可能である。そこで、以下のダイヤ改良を行う。

- ・車両運用を参照し、P 駅での運転打ち切り、折り返しが可能であれば、【1】その区間の運行を取りやめ、【2】車両運用計画を変更する。

この輸送計画の改良により、デマンドが多い区間では多くの本数を設定し、デマンドが少ない区間では少ない本数とするなど、区間毎に適切な本数、輸送計画設定が可能となる。

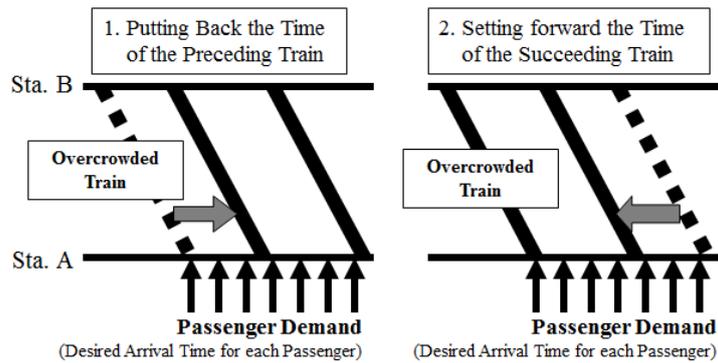


Figure 3- 8 Timetable modification for overcrowded train

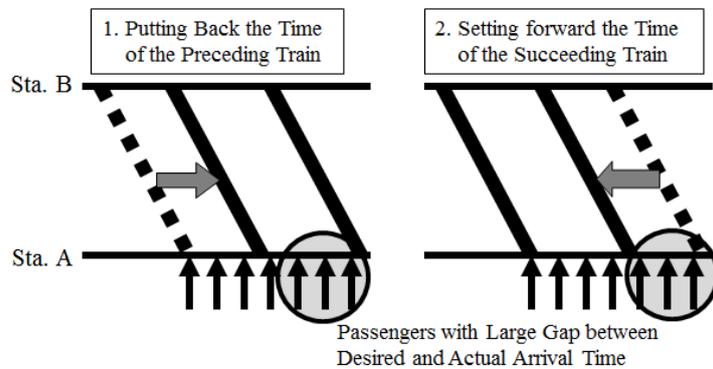


Figure 3- 9 Timetable modification for large gap between desired and actual arrival time

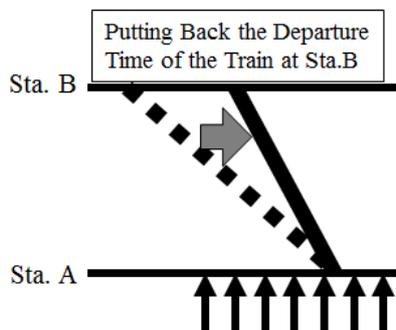


Figure 3- 10 Timetable modification for too long train running time

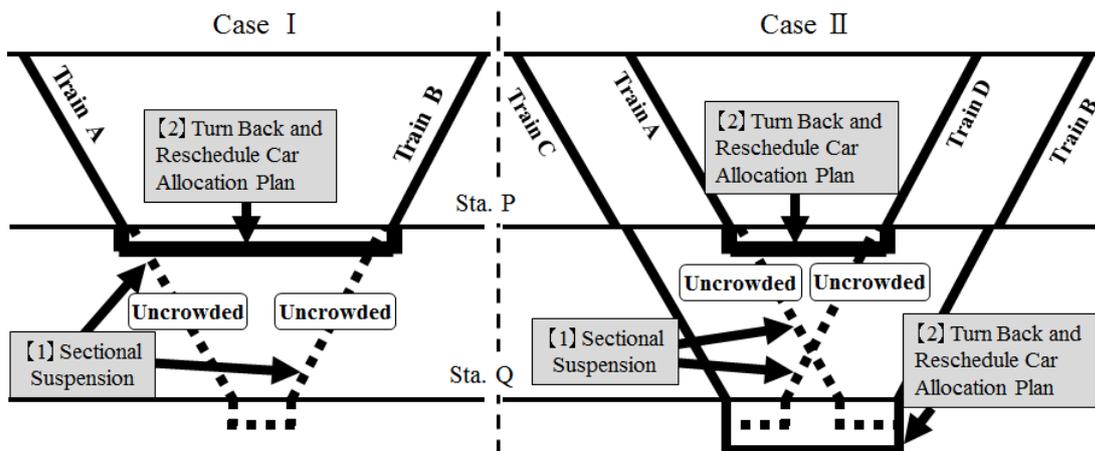


Figure 3-11 Sectional suspension of uncrowded train section

3.5. ケーススタディによる、提案アルゴリズムの出力輸送計画の有用性検証

提案手法の有用性を確認するためには、大都市圏通勤路線の高頻度運転区間において、提案アルゴリズムが、現行ダイヤに近い実用的な輸送計画が出力されることを確認する必要がある。また、本数設定アルゴリズムによる、全体の大まかな列車本数計画と、ダイヤ改良アルゴリズムによる、局所的なダイヤ修正の積み重ねにより、実用的な輸送計画が作成されるかどうか、有用性の観点から確認が必要である。そこで、大都市圏通勤路線を対象とした、以下のケーススタディを実施した。

3.5.1. 路線の概要

配線図が Figure 3-12 で表わされる、大都市圏のある路線をモデルとして、平日ダイヤについて、駅 1、駅 25 の発時刻を基準として、12:00~14:00 の 2 時間分の輸送計画を作成する。12:00 以前と 14:00 以降の各 1 時間にも列車を設定するが、これらは作成対象範囲外の時刻固定列車で、時刻・運転区間は変更せず、車両運用計画のみを作成する。この路線の現行の輸送計画のダイヤ図を Figure 3-13 に示す。なお、駅 1、駅 25 に表示されている 2 列車をつなぐ線は、車両の折返計画である。Figure 3-13 の網掛部のように、この時間帯は、全列車が駅 1~駅 25 間を走行し、12 分間隔である。すなわち、12:00~14:00 の間に 9 本の列車が等間隔で設定されている。また、この路線の両端の駅 1 および駅 25 には車両基地が存在し、輸送計画作成時間帯内では、この車両基地から車両を入出区できる。なお、使用できる列車編成数の上限は考慮しない。

また実行例では、平成 12 年度の大都市交通センサスをもとに作成された 10,484 人分のデータを、利用者デマンドデータとして用いる。なお、交通センサスのデータは、降車駅の時間帯毎に集約されているため、利用者のデマンドはこの時間帯内で一様に分布すると仮定し、データを作成する。例えば「駅 1 乗車→駅 25 降車、降車時刻 10:00~11:00 の間に 60 人」というデータから、「駅 1→駅 25、到着希望時刻 10:00」、「駅 1→駅 25、到着希望時刻 10:01」、「駅 1→駅 25、到着希望時刻 10:02」…といった、利用者 1 人 1

人のデマンドデータを生成する。

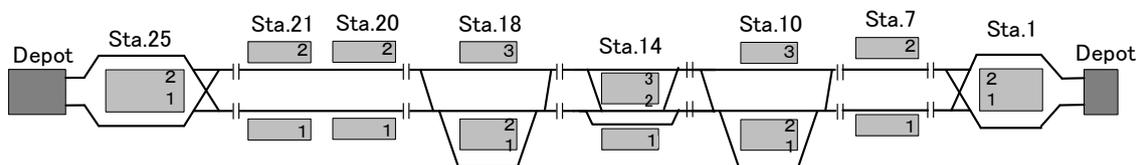


Figure 3- 12 The railroad line

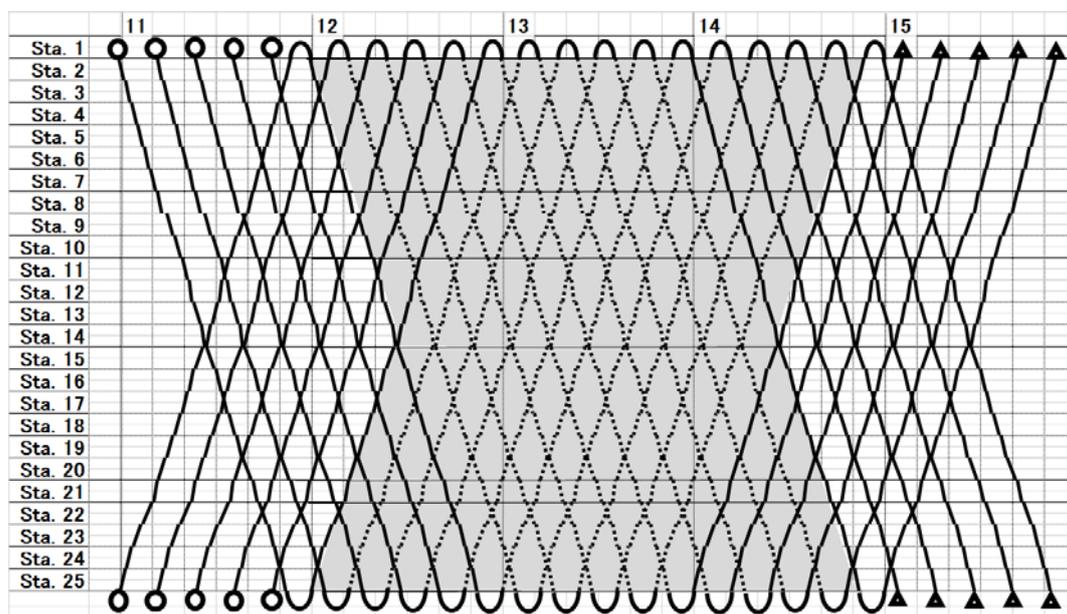


Figure 3- 13 Current timetable

3.5.2. アルゴリズムの前提条件と対応する変数の設定値

実験で使用する各変数の設定値は、次のとおりとする。

(1) 評価値に関する変数の設定値

3.4.3 の評価値計算に用いる変数の設定値は、文献[3-13] に記載のものを用いる。具体的には、ホーム待ち時間 1 分は乗車時間 2 分、乗換 1 回は乗車時間 10 分に相当し、列車混雑は、混雑度に応じ下記の式の倍率を乗じて乗車時間に換算する。(3-1)式の変数との対応は、下記のとおりである。

- ・ $\alpha=2$, $\beta=10$ [分/回]
- ・ 混雑度 ~ 1.0 のとき : $\gamma=0.0270$, $\delta=0$
- ・ 混雑度 $1.0\sim 1.5$ のとき : $\gamma=0.0828$, $\delta=-0.558$
- ・ 混雑度 $1.5\sim 2.0$ のとき : $\gamma=0.1790$, $\delta=-0.2000$
- ・ 混雑度 $2.0\sim 2.5$ のとき : $\gamma=0.6900$, $\delta=-1.2200$
- ・ 混雑度 $2.5\sim$ のとき : $\gamma=1.1500$, $\delta=2.3700$

一方、乗車時間 1 分は、文献[3-13] の所得接近法による貨幣換算手法において、東京平均の値として定められている 48.2 円を用いて貨幣換算する。また、列車走行 1km あたりの事業者の費用は、この鉄道事業者の 2004 年度の財務諸表等を利用し、計上された鉄道事業営業費を、年間の総列車走行キロ数で割ることにより算出し、1km あたり 6,152 円とする。

(2) ダイヤ改良アルゴリズムに関する変数の設定値

ダイヤ改良アルゴリズムで用いる変数の設定値は、次のとおりとする。

(a) 利用者の各不満の深刻度

①乗車人数が閾値より多い列車，区間

閾値を、乗車率 100%に相当する定員の人数とし、それを超える人数に対し、深刻度 1 を乗じる。

②乗車列車の到着駅到着時刻と希望到着時刻との乖離が大きい利用者が多く乗車している列車，区間

閾値を乖離時間 10 分、乖離時間を超える利用者数を 40 人とし、それを超える乖離時間の利用者人数に対し、深刻度 1 を乗じる。

③隣接駅間の走行時間が長すぎる列車，駅間

閾値を基準走行時間+2 分とし、これを超える走行時間の列車，区間に対し、次の深刻度を乗じる。

$$(\text{深刻度}) = (\text{当該駅間の走行時間} - \text{当該駅間の基準走行時間}) / 2 \text{ 分} - 1$$

(b) 事業者の各不満の深刻度

①乗車人数が少なすぎる列車，区間

閾値を、ほぼ全員が着席できる状況である乗車率 35%の人数とし、それに不足する人数を深刻度とする。

②乗車人数が少なく、運転の取りやめが可能な列車同士

当該区間において、運転を取りやめる当該列車とその次の列車の乗車人数の和が、1 列車の乗車率 100%に相当する定員の人数より大きく、かつ当該折り返し駅に折り返し設備が存在し、さらに最小折返時間 (2 分) 以上 30 分以内の折り返し時間となるとき、この不満を抽出する。折り返し時間に上限を設けるのは、列車が折返で停車中でも、列車監視のための乗務員等が必要となり、事業者は必要以上の折り返し時間を避けたいためである。

不満の深刻度 (S) は、1 列車の定員 (P 人) から、運転を取りやめる当該列車とその次の列車の乗車人数の和 (N 人) を引いた値に対し、折り返し駅での折り返し時間の大きさ (T 分) に応じた係数を乗じた値とする。係数は、折り返し時間 15 分のとき 1、30 分のとき 0 となる、以下の 2 次関数の形とする。

$$S = (P - N) \times \frac{(T - 30)^2}{15^2} \dots\dots\dots (3-2)$$

- ・ 輸送計画の改良で時刻を早める／遅らせる場合の変動幅
 輸送計画の改良で列車時刻を早める／遅らせる場合の変動幅は、0 分から時隔の設定値である 2 分の間とし、この間で乱数を用いてランダムに決定する。
- ・ 輸送計画改良の最大反復回数：600 回
- ・ 収束判定半径：評価値の改善度が 0.001 以下の場合

(3) 列車運行条件に関する変数の設定値等

列車運行が可能な輸送計画か否かの判定条件となる、時隔、交差支障、最小折返時間は、いずれも 2 分とする。

3.5.3. 本ケーススタディで使用するメタヒューリスティクス決定のための予備実験

本ケーススタディにおいて、ダイヤ改良アルゴリズムで使用すべき、比較的効率の良いメタヒューリスティクスを決定するため、予備実験として、Greedy、シミュレーテッド・アニーリング（以下 SA）、タブーサーチ（以下 TS）の 3 つの手法を本アルゴリズムに適用し、結果の比較をした。

ここで、Greedy では、最良解が出たときのみ現在解を移行させる。SA では、最良解の評価値 V_d 、改良解の評価値 V_m 、初期温度 T_0 、温度減少率 r 、反復回数 N とするとき、次の遷移確率 p により、改良解を現在解に移行させる。この関数により、改良解が最良の場合を残し、そうでない場合は、反復回数が多くなるにつれ、残す確率は減少する。なお、本実行例でのパラメータ値は、 $T_0=0.07$ 、 $r=0.002$ である。

$$p = \exp\left[(1 - V_d/V_m)/T_0(1 - r)^N\right] \dots\dots\dots (3-3)$$

TS では、解作成の反復時に、現在解よりも悪化する解が出たときに、タブーリストに不満箇所の発生元の列車を追加して作成する。これにより、その後の同一列車の不満箇所の選択による解の悪化を防ぐ。タブーリスト長は、可変列車数が上下 20 本であることから 5 とし、最良解が作成された時にクリアする。

アルゴリズムの比較結果を Table 3-1 に、計算回数と評価値の推移を Figure 3-14 に示す。初期解での設定本数はいずれも 10 本、計算反復回数は 600 回、ネットワークのサイズはノード数 2,156、アーク数 7,341 である。

Table 3-1 より、本予備実験では、SA を用いた場合に、計算時間、解の性能とも、最も良くなった。特に SA では、初期段階で比較的急速に解が改善され、収束が早く、良好な解となることがわかった。一方、TS は、今回の設定では、初期解より改善した解は 1 つも出ず、評価値が悪くなる方向に推移した。これは、TS では、その時点での最良解に戻るケー

スが存在しないためだと考えられる。TS は、同じ解に何度も戻るアルゴリズムで効果を発揮するため、区間運休を戻す改良の無い本手法にはそぐわなかったと考えられる。また、タブーリストの作り方について、列車の代わりに列車・駅の着発事象をリストに入れる方法も試みたが、列車を入れた場合よりもかえって悪化する結果となった。解の改良、タブーリストの作成方法について、より高度な改良を行なえば、性能改善の余地もあるが、それには試行錯誤が必要である。

以上より、本ケーススタディにおいては、TS は改良による性能向上の可能性が残されていると考えられるものの、SA が比較的実装が容易で高い性能をあげられることから、以下の本ケーススタディにおける実験では、SA を用いることとする。

Table 3-1 Comparison of meta-heuristics algorithms

Algorithm	Computation time	Near-optimal solution	Evaluation value
Greedy	35m48s	559th solution	14,816,651
SA	30m27s	568th solution	14,628,077
TS	36m10s	1st solution	14,939,813

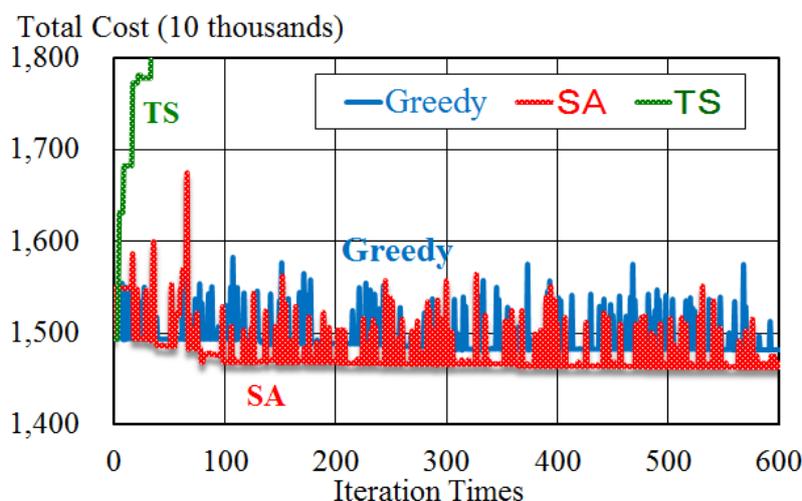


Figure 3-14 Meta-heuristics algorithms and evaluation values

3.5.4. 現行輸送計画との比較実験

本アルゴリズムを用いて輸送計画の作成を行い、現行輸送計画と比較した。

(1) 本数設定アルゴリズムの実験結果

3.4.5 の本数設定アルゴリズムにより、列車本数の設定を行った。設定本数と評価値の関係を Figure 3-15 に示す。最良となるのは、約 10 分間隔の運転に相当する、設定本数 11 本のときで、評価値の値は 14,698,071 となった。現行ダイヤの 9 本と比べ、やや多めの本数である。次に、試しに時間評価値を、東京平均の 48.2 [円/分] から全国平均の

37.4 [円/分] に変更し、同様に本数設定を試みた。その結果、現行ダイヤと同じで、12分間隔の運転に相当する、設定本数9本となった。

(2) ダイヤ改良アルゴリズムの実験結果

(1)の本数設定アルゴリズムで作成された、設定本数11本の輸送計画、および比較のために、設定列車10本として作成した輸送計画を初期解として、それぞれダイヤ改良アルゴリズムを実行した。そして、これら2つの改良後の輸送計画と、12分間隔の運転で設定本数が9本の現行輸送計画の、計3つの輸送計画について評価値を計算した。評価値の比較をTable 3-2に、本アルゴリズムで作成された輸送計画をFigure 3-16に示す。なお、図中の○印は車両基地からの出区を、△印は車両基地への入区を示す。

Figure 3-16に示すように、本アルゴリズムが作成した輸送計画は、駅1～駅18間で上下11本、駅18～駅25間で上下9本であった。現行輸送計画は全区間で9本であるから、需要の多い駅18までは現行より多く、駅18～駅25は現行と同じ本数である。また、駅18止まりの下り列車は、約10分の折返時間で上り列車として折返す。このように、本アルゴリズムでは、区間による需要の違いを反映した列車設定が可能であることが確認できる。

また、Table 3-2のとおり、本数設定アルゴリズムで最良とされた、列車本数11本を初期解として探索した結果、評価値が最良となった。現行ダイヤの9本、および10本を初期解とした場合よりも良く、本アルゴリズムの有効性が確認できる。

以上をまとめると、大都市交通センサスデータをデマンドデータとして使用した実験の結果、アルゴリズムが現行の輸送計画に近い輸送計画を出力したことにより、現在の利用状況を反映した現実的な輸送計画が作成可能で、利用者、事業者のバランスをとる輸送計画を作成する、というアイデアが有用なことが示された。

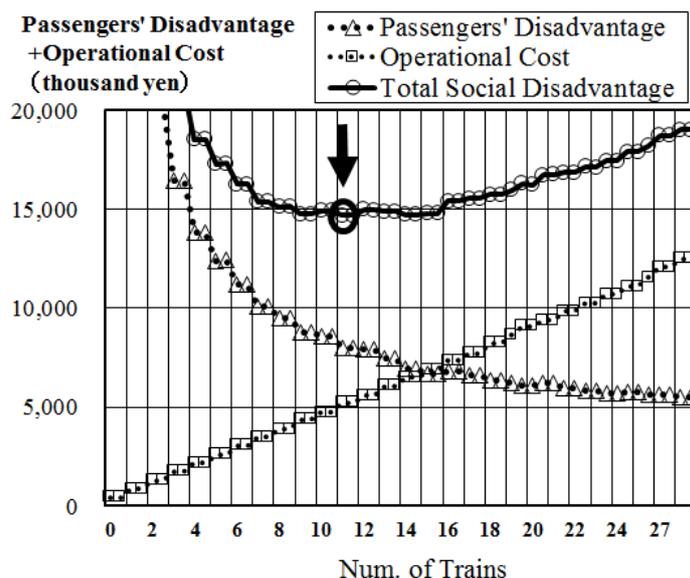


Figure 3-15 Number of trains and evaluation value of timetable

Table 3- 2 Timetables and evaluation values (ordinary passengers)

Timetable	number of trains (train interval)	Evaluation value
Currently applied	9 (every 12 minutes)	14,776,950
Proposed from the initial solution with 10 trains	10 (every 11 minutes)	14,628,077
Proposed from the initial solution with 11 trains	11 (every 10 minutes)	14,626,200

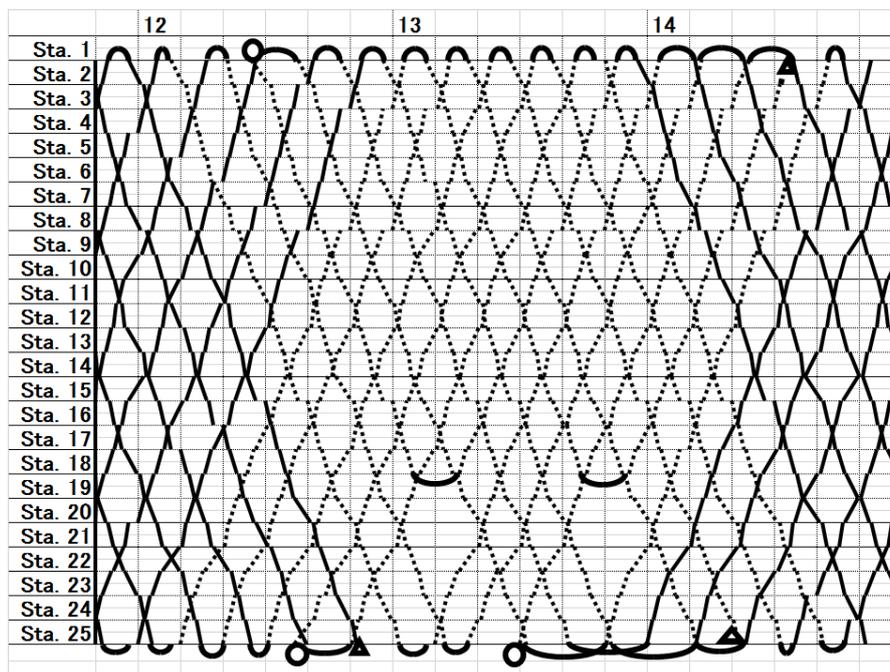


Figure 3- 16 Proposed timetable (■ ■ ■ : timetabled trains)

3.5.5. 利用者デマンドが大きく変化した場合の実験

大規模なイベントがあると、特定の時間帯、駅の利用者が急増する。今、駅 20 近くでの大規模イベントのため、3.5.1 で想定した利用者デマンドに加え、駅 20 に 12:30~13:30 の間に着きたい利用者が、他の各駅から 400 人ずつ、計 9,600 人いるとする。これに対して、本アルゴリズムによってデマンドに合わせて輸送計画を作成した。なお、イベントで追加する利用者の分布は、12:30~13:30 の間で一様分布となるものとする。

まず、本数設定アルゴリズムを実行した結果、18 本の列車が設定される輸送計画が出力された。次に、ダイヤ改良アルゴリズムを、この列車本数が 18 本の輸送計画を初期解として実行した。同時に、本数設定アルゴリズムの設定本数の妥当性を確認するため、本数設定アルゴリズムの解±1 本に相当する、17 本と 19 本を初期解として、ダイヤ改良アルゴリズムを実行した。さらに、比較のため、デマンドの変化にも関わらず現行輸送計画をそのまま適用した場合についても、評価値を計算した。これらの結果を Table 3- 3 に、本アルゴ

リズムで作成された輸送計画を Figure 3- 17 に示す。

Table 3- 3 より，現行の輸送計画のままだと利用者の不効用が増大する。これは，利用者総数が 2 倍近くとなり，列車の混雑が激しくなるためである。それに対し，本アルゴリズムが作成した輸送計画では，列車の増発により不効用の増大をある程度抑えている。本アルゴリズムが作成した輸送計画を Figure 3- 17 に示す。12:30～13:30 の間に駅 20 に到着する列車の本数を増加させている。これは，利用者デマンドが多いこの時間帯に，列車の運行を集中させた結果である。このように，イベントで利用者が一部時間帯に集中するなど，デマンドに偏りがある場合に，本アルゴリズムは特に有効であることがわかった。

Table 3- 3 Timetables and evaluation values (passengers on the event day)

Timetable	number of trains(train interval)	Evaluation value
Currently applied	9(every 12 minutes)	28,221,037
Proposed from the initial solution with 17 trains	17(every 7 minutes)	26,333,088
Proposed from the initial solution with 18 trains	18(every 6 minutes)	26,273,707
Proposed from the initial solution with 19 trains	19(every 6 minutes)	26,474,657

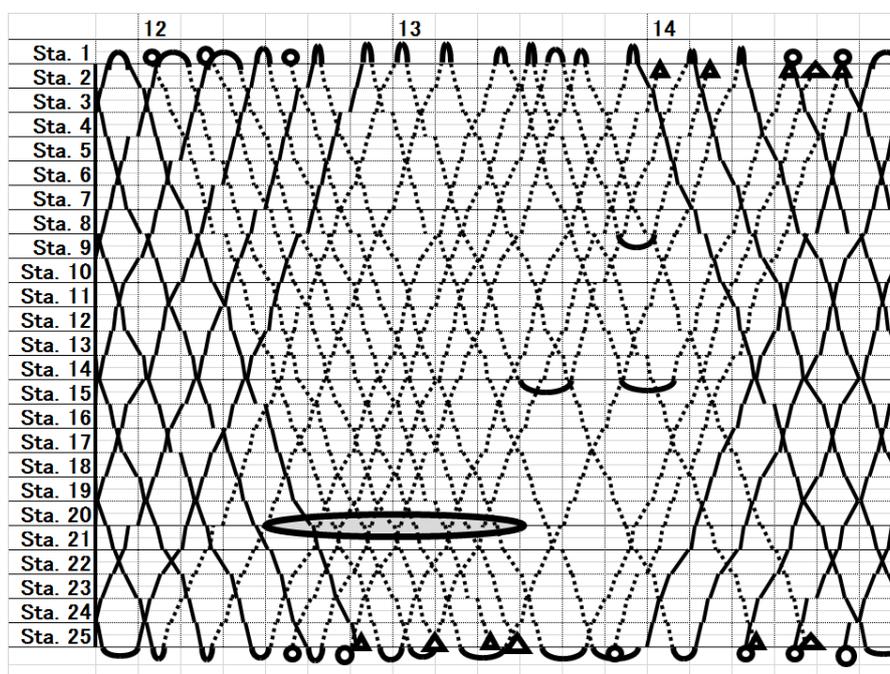


Figure 3- 17 Proposed timetable for the event day

(■ ■ ■ : timetabled trains)

3.5.6. 列車本数, デマンド変動に対する評価値変動の分析

実験結果をもとに, 本論文で利用する評価値と列車本数, 利用者デマンドとの関係について考察する。Figure 3-15 より, 運転間隔がほぼ等間隔のときの列車本数と評価値の関係が考察できる。列車本数が 9~15 本程度の間では, 値に大きな差はなく, 列車 1 本を増発した場合の利用者損失の減少幅と, 事業者コストの増加幅がほぼ釣り合っている。したがって, 今回の評価指標では 11 本が最適であったが, それよりも事業者を重視すれば現行ダイヤの 9 本, 利用者を重視すれば 12~15 本という設定も考えられる。これらは, 時間評価値, 利用者コストのパラメータ調整により, 事業者の経営方針や路線特有の事情を反映させ, 別の均衡点とすることも可能である。

また, 利用者デマンドとの関係では, 3.5.4 の平常時と 3.5.5 のデマンド増加時で, 列車本数が 11 本から 18 本となっている。利用者総数はほぼ倍になるが, 列車本数は約 1.6 倍である。列車本数の増加は, 利用者にとって待ち時間減少, 混雑緩和の効果があるものの, 本数増大とともに待ち時間減少の効果は小さくなり, 運行コストとの釣り合いを考えたとき, 列車本数が 2 倍となる前に均衡点となっている。

以上の実験, 考察により, 評価値の設定に関して, より多くのケースへの適用による深度化の余地はあるものの, 本章の評価尺度の設定が概ね妥当であることが確認された。

3.6. 本章のまとめ

本章では, 全利用者のデマンドが「出発駅, 到着駅, 到着駅に着きたい時刻」の形で明白に与えられるとき, デマンドに合わせた利便性の高い輸送計画を作成するアルゴリズムを構築した。そして, 現実とほぼ同様のデータを用いた実験により, アルゴリズムの有効性, および, このアルゴリズムによりデマンド指向輸送が可能であること, デマンド指向輸送が効果的であることを確認した。輸送計画の設計手法との関連では, 本アルゴリズムで出力する輸送計画案をベースに, 乗務員運用等の制約条件を考慮した調整を加えることで, 実現可能な輸送計画を設計可能である。

一方, 本章の輸送計画の作成においては, 大都市通勤路線において重要な観点の 1 つである, 駅での乗降利用者数が多いことに起因した, 停車時間の増加, 遅延が発生するか否かを考慮していない。また, トラブルによるダイヤ乱れ時には, 事業者は適切な運転整理により, 輸送計画を早期に回復させ, 利用者の利便性低下を留める必要があるが, 本章では, そのようなトラブル時の早期回復の観点による, 輸送計画の妥当性が考慮されていない。したがって, 列車遅延の発生可能性や, ダイヤ乱れ時のことを考慮した輸送計画作成手法とする必要あり, それは次章以降の課題である。具体的には, マイクロシミュレーションにより, 各利用者の列車乗継経路だけでなく, 列車に遅延が発生するか否かを, あわせて推定する手法の検討が必要である。これらについては, 4 章および 5 章で検討する。

また, いずれの実験でも, 600 回の反復計算に 30 分以上かかり, アルゴリズムの高速化が今後の課題である。また, 複数種別の列車が走行し待避があるなど, 複雑な路線への適用

や、乗務員運用計画を含んだダイヤ作成にも、取り組む必要がある。

3章の参考文献

- [3-1] 富井規雄: “列車ダイヤのひみつ”, 成山堂書店 (2005)
- [3-2] A. Radtke, D. Hauptmann: “Automated planning of timetables in large railway networks using a microscopic data basis and railway simulation techniques”, Computers in Railways IX, pp.615-625 (2004)
- [3-3] I. A. Hansen, J. Pachl(eds.): “Railway Timetabling & Operations. Analysis - Modelling - Optimisation - Simulation - Performance Evaluation (2nd edition)”, Eurailpress (2014)
- [3-4] 富井規雄, 小野耕司, 後藤浩一, 福村直登, 土屋隆司: “鉄道におけるデマンド指向スケジューリング実現のための課題”, 情報処理学会第9回高度交通システム研究発表会 (2002)
- [3-5] M. Carey: “A Model and Strategy for Train Pathing With Choice of Lines, Platforms, and Routes”, Transportation Research Part B, Vol. 28B, No.5 (1994)
- [3-6] A. Caprara, M. Fischetti, P. Toth: “Modeling and Solving the Train Timetabling Problem”, Operations Research, Vol. 50, No.5 (2002)
- [3-7] 浅見雅之, 有澤誠: “評価基準に沿った列車ダイヤ自動作成手法にかんする研究”, 情報処理学会研究報告, ITS-20, No.21 (2005)
- [3-8] P. Serafini, W. Ukovich: “A mathematical model for periodic scheduling problems”, SIAM Journal on Discrete Mathematics 2, pp.550-583 (1989)
- [3-9] 大隅英貴, 安部恵介, 阿部健一: “乗客流評価に基づく需要適応型列車ダイヤ作成手法”, 電学論 D, Vol.116-D(4) (1996)
- [3-10] Z. Yang, T. Koseki, S. Sone: “Railway Network Timetabling for Reducing Transfer Time Using Genetic Algorithm”, 電学論 D, Vol.120 (2000)
- [3-11] 香取照臣, 高橋寛, 泉隆: “優等列車の運行による総旅行時間短縮 - 遺伝的アルゴリズムを用いた停車駅の決定 -”, 電学論 D, Vol.125 (2005)
- [3-12] 小林潔司, 奥村誠, 永野光三: “鉄道通勤交通における出発時刻分布に関する研究”, 土木計画学研究・論文集, No. 14 (1997)
- [3-13] 国土交通省鉄道局: “鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル 2005”, 運輸政策研究機構 (2005)
- [3-14] 安部恵介, 荒屋真二: “最長経路法を用いた列車運行シミュレーション”, 情報処理学会論文誌, Vol.27, No.1 (1986)

4. マイクロシミュレーションを活用した輸送計画評価手法

4.1. はじめに

近年、鉄道会社では、高品質の輸送サービスを提供し、自動車や航空機など他の輸送機関との厳しい競争を制するために、列車ダイヤの定量的な評価が求められている。

輸送計画の評価指標にはこれまで、列車キロや車両キロなど、輸送サービスを線区全体の観点から評価する指標が用いられてきた^[4-1]。これらの指標は、事業者が運行に必要な車両、乗務員数などをきわめて容易に算出できるというメリットがある一方、あまりにも雑駁で、利用者の満足度を推定したり、輸送計画の改善のための指針を得たりすることは不可能である。同様に、1時間当たりの運行本数、快速停車駅、ラッシュ時間帯の最大混雑度、遅延等も、単体では評価指標として不十分である。その理由は、各利用者の所要時間、待ち時間、混雑度、乗換回数、遅延時間等、利用者が実際に体験する輸送サービスを、明白に反映していないからである。これらを、ダイヤ改正日等、その輸送計画が適用される日より前に把握し、利用者の視点から適切な評価を行うためには、その輸送計画適用時の列車運行時刻、混雑度等の運行状況をなるべく正確に予測し、各利用者のとる行動と、その結果体験する輸送サービスを適切に推定する必要がある。

本論文では、上記要件を満たす利用者の視点からの評価指標を算出するため、列車の運行とあわせて旅客1人1人の行動を追跡するマイクロシミュレーションシステムを導入する。このシミュレーションシステムでは、列車の運行状況、利用者の行動をできるだけ精緻に再現するために、利用者の利用列車推定機能、列車の混雑推定機能、列車の運行時刻推定機能の3つの機能を併せ持つ。利用列車推定機能では、4.3.3節で詳述する自動改札機等から収集された利用者データをもとに、1人1人の利用者について、出発駅から目的駅までの利用列車、および乗車号車、扉といった乗車位置を推定する。このとき、早く行きたい、乗換を避けたいといった、各利用者の嗜好を反映させて利用列車の推定を行う。列車の混雑推定機能では、推定された各利用者の利用列車情報を集計し、各列車の乗車人数、各駅での乗降人数を算出する。列車の運行時刻推定機能では、推定された駅での乗降人数等から乗降に必要な時間を算出し、乗降時間の増加による列車の遅延を推定する。これら3つの推定を、初列車から時系列的に並行して行うことにより、列車運行と利用者行動との相互作用を加味した、実態に近い詳細なシミュレーションが可能となる。

このシミュレーションにより得られた、各利用者の詳細な行動推定結果により、各利用者の体験する輸送サービスに基づく列車ダイヤ評価が可能となる。具体的には、乗車駅から降車駅までに各利用者が体験した、所要時間、待ち時間、乗換回数、混雑度に基づき、各利用者の不効用値を算出し、全利用者分を集約した値を列車ダイヤの評価値とする。各利用者の視点からの評価を積み上げた形である。

本手法の実路線での適用、評価例として、大都市圏のある通勤路線でこのシミュレータを構築した。また、現行の輸送計画と、それを一部修正した輸送計画の変更案を用意し、それぞれに対するシミュレーション結果から、利用者の不効用値を計算、輸送計画の比較評価

を行った。

4.2. 列車運行状況の推定手法とその課題

4.2.1. ラッシュ時間帯の運行状況の再現に必要な事項

列車は、常に輸送計画で定められた時刻通りに走行できるわけではない。特に、大都市圏のラッシュ時間帯には、列車の遅延が発生しがちである。この遅延は、以下のメカニズムで発生する。通勤、通学の利用者が混雑する列車が駅に停車すると、乗降に時間がかかり、停車時間が延びる。停車時間が延びると、出発に遅延が生じ、先行する列車との間隔が広がる。列車の間隔が広がると、次の駅で、その列車の到着を待つ利用者が増加する。それにより、次の駅でも乗降に要する時間が延び、出発が遅れる。その結果、列車の遅延が拡大すると同時に、列車の混雑も増大する。このような一連の悪循環は「増延」と呼ばれる^[4-2]。

増延のような現象は、ダイヤ設定の段階で、是非とも避けたいものである。したがって、大都市圏のラッシュ時間帯における輸送計画の評価にあたっては、このような実際に列車が走る複雑な状況を想定、模擬することが必要である。

4.2.2. 関連研究

列車の乗車人数や利用者行動を推定する手法として、文献[4-3]では、利用者が利用する列車を推定することで利用者にとって最適な接続を持ったダイヤを構成する手法を示している。また、自動改札機データを利用し、各 OD の各時間帯における人数を、列挙した複数の列車乗継経路における不効用値に沿って配分するという手法^[4-4]が提案されている。さらに、駅での旅客乗降数から停車時間を推定する研究として、列車の乗降人数と停車時間との関係について、モックアップ車体を利用した実験を行うことにより、1扉あたりの降車人数、乗車人数、車内滞留人数と必要乗降時間の関係式を導出した研究^[4-5]がある。海外においても、列車運行シミュレーションを開発したうえで、駅における様々な遅延発生を想定し、輸送計画の信頼性を検証する研究^[4-6]や、ラッシュ時間帯における運行本数の削減が、利便性低下に繋がらないか、検証する研究^[4-7]が報告されている。しかし、列車運行と利用者行動を同時に推定し、相互作用を加味した研究は、これまでには報告されていない。

一方、輸送計画の評価に関しては、過去に、利用者均衡配分法に基づき、利用者の列車選択行動をモデル化したうえで、各列車の利用者数を推定し、不効用値を算出する手法が提案されている^[4-8]。この手法を用いることで、列車の混雑や最大乗車可能人数を考慮したうえで、旅客流動を推定し、輸送計画を、乗換、混雑の要因も含めて評価することが可能である。しかし、列車に混雑による遅延が生ずる可能性を考慮せず、列車運行と利用者行動の相互作用を加味していない点に課題がある。

平井らは、文献[4-9] および[4-10]において、列車運行と利用者行動との相互作用を加味できるシミュレーション方式を提案した。本論文では、この手法をベースにしたなが

らも、列車運行と旅客流動の相互作用をより詳細に加味する必要があること、1人1人の利用者行動をより精緻に追跡する必要があることから、主に下記の4点を特徴とするマイクロシミュレーションシステムを開発した。なお、以下では、利用者がどの列車に乗車し、どこで乗換えて、どのように目的駅に着くのかという、一連の乗継列車の推定のことを、列車乗継経路探索と呼ぶ。

- (1) 列車運行と利用者行動の時系列並行推定
- (2) 利用者の利用列車変更行動を表現するための、列車乗継経路探索のタイミング
- (3) 利用者に対する行動属性の設定
- (4) 利用者の編成内乗車位置（号車、扉）の推定

シミュレーションの処理の概要およびこれらの特徴について、次節で述べる。

4.3. 列車運行・旅客行動シミュレーション手法

4.3.1. 概要

ある輸送計画を実施した場合における運行状況、旅客行動を詳細に模擬し、以下の事項を推定する。

- ① 1人1人の利用者について、改札入場駅から出場駅まで、どの列車に乗車し、どこで乗換え、いつ出場駅に着いたのか、列車の乗継経路
- ② 各列車、区間の乗車人数、乗車率
- ③ 各列車、区間の遅延、推定運行時刻

シミュレーションの処理の流れを Figure 4-1 に示す。内部では時刻を保持し、入力された輸送計画に基づき、初列車の時刻から時系列的に順次、列車運行と旅客行動を並行してシミュレーションする。

入力する利用者 OD データ（その路線の各利用者の「乗車駅、降車駅、乗車駅に現れる時刻」のデータ）を参照し、各利用者は、出現時刻になると出発駅に出現する。出現後、その時点における輸送計画と、列車の推定運行時刻をもとに、各利用者は、列車乗継経路探索を行い、乗継経路を決定する。その結果、利用することとなった列車に乗車する。また、列車側では、その時点での輸送計画に基づき列車を運行させ、駅での利用者乗降を行う。このとき、利用者の乗継経路を参照して、各駅で当該列車に乗車・降車する利用者の人数を取得し、それらの利用者の乗降に必要な時間を算出する。それが当初の輸送計画で設定された停車時間を上回る場合、利用者の乗降により遅れが生じるものとし、超過分の時間分だけ、当該列車に遅延を発生させる。これを輸送計画に反映させ、その列車の次駅以降、終点までの各駅の着発時刻に、同じ時間の遅延を設定する。一方、利用者側では、列車が駅に着発する度に、各利用者の列車乗継経路を再探索する。この列車乗継経路の再探索にあたり、当初の輸送計画に、その時点までに推定された遅延を加味した、列車の推定運行時刻情報を利用する。これにより、列車遅延により、利

利用者の乗継経路情報に変化が生じる現象，すなわち乗車列車が変化する状況が表現可能である。このような，各利用者の列車乗継経路推定，列車の乗車人数推定，列車の運行時刻推定の各処理を，利用者は出場駅にたどり着くまで，各列車は始発から終点まで繰り返す。これを，利用者 OD データに記された利用者全員分と，輸送計画で設定された全列車について，時系列順に行う。

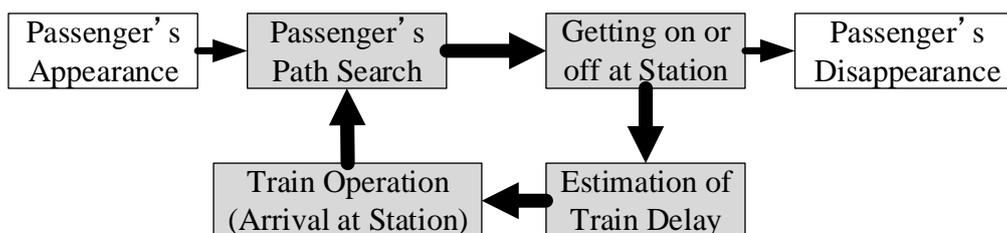


Figure 4- 1 Overall process of simulation

4.3.2. 個々の利用者データの生成

自動改札機では，その駅を出場(降車)する全利用者の乗車券データを記録している。その記録形態は，「乗車駅：A 駅，降車駅：B 駅，降車駅の時間帯：7:00～7:30，人数：60 人」という形で，乗車駅，降車駅，降車駅の時間帯の組合せ毎に人数が集約されている。しかし，これらのデータそのままでは，利用者 1 人 1 人が，乗車駅に何時何分何秒に現れるのかは不明である。そこで，この利用者データに対し，以下の変換処理を施すことで，利用者 1 人 1 人のデータを確率的に作成する。

①降車駅での時間帯を，乗車駅での時間帯に変換

元データでは，降車駅の時間帯として記録されている時間帯情報を，標準所要時間に基づき，乗車駅の時間帯情報に変換する。例えば，上記のデータの例では，A 駅→B 駅の標準所要時間が，平均列車待ち時間，改札からホームへの移動にかかる時間等を含んで 30 分である場合には，「乗車駅：A 駅，降車駅：B 駅，乗車駅の時間帯：6:30～7:00，人数：60 人」に変換する。

②利用者 1 人 1 人の明細データの推定，生成

①の変換後の人数情報に基づき，各利用者の 1 件明細の入場データを推定，生成する。具体的には，ポアソン分布を使用し，元データの乗車駅の時間帯内で，1 人 1 人の利用者を確率的に発生させる。

例えば，上記の例では，A 駅→B 駅の利用者は，A 駅で 6:30～7:00 の間，1 分あたり平均 2 人出現する。この平均出現率を用い，1 秒毎に利用者の出現数を計算する。その結果，「利用者 No.1, A 駅→B 駅, 6:30:00 出現」，「利用者 No.2, A 駅→B 駅, 6:32:10 出現」，「利用者 No.3, A 駅→B 駅, 6:32:40 出現」，「利用者 No.4, A 駅→B 駅, 6:33:30 出現」，・・・といった形で，平均出現頻度が 1 分で 2 人となるよう，確率的に利用者を出現させ，1 件明細の入場データを生成する。

4.3.3. 利用者の列車乗継経路の推定

各利用者に対する列車乗継経路探索は、最短路探索のダイクストラ法を利用する。まず、その時点までの列車運行状況と、輸送計画で定められた所定の運転時刻である計画ダイヤをもとに、今後の列車運行状況を予測する。この予測結果を「案内ダイヤ」と呼ぶ。案内ダイヤの作り方の詳細は、4.3.8節で述べる。次に、Figure 4-2のように、案内ダイヤをもとに、各列車、各駅の列車着発事象、および各駅への利用者の到着事象をノード、各列車の駅間の走行事象、駅での停車事象、および利用者の駅での列車待ち事象をアークとする、グラフネットワークを作成する。ここで、各アークの重みは、2つの事象間の案内ダイヤ上の時刻の差（秒）とする。例えば、列車の駅での停車事象を表すアークであれば、その重みは、案内ダイヤ上での駅停車時間になり、列車の駅間での走行を表すアークであれば、その重みは、駅間の走行時間となる。なお、シミュレーション開始時点である、初列車の発車時においては、列車の遅延は全く予測されないため、案内ダイヤは輸送計画の計画ダイヤと同一である。すなわち、計画ダイヤに従ってグラフネットワークが作成され、アークの重みは、計画ダイヤ上の停車時間、駅間走行時間となる。

案内ダイヤの導入により、例えば、案内ダイヤを複数作成し、利用者により異なる案内ダイヤで経路探索を行うことで、利用者への列車運行情報の与え方による、利用者の列車乗継経路の相違の分析が可能である。これは、既存研究では実現されていなかった機能である。

また、列車に遅延が発生した場合には、利用者は、その遅延を踏まえ、一度決めた利用列車を別の列車に変更することがある。この利用列車変更行動を表現するため、本シミュレータでは、各旅客について列車乗継経路探索を複数回行い、その結果に応じて利用者の列車乗継経路を更新する。これも、既存研究では実現されていなかった機能である。本論文では、列車遅延の発生による利用列車の変更を考慮した、経路探索タイミングとして、以下の3つを設定する。

- (1) 出発駅に出現した利用者：出発駅に出現したとき
- (2) 列車に乗車中の利用者：その列車が駅に到着、または駅から出発するとき
- (3) ホームで列車を待つ利用者：乗車可能列車がその駅に到着、または出発したとき
(その利用者が乗車予定の列車以外も含む)

このように、出現時だけでなく、利用列車を変更できる全てのタイミングで列車乗継経路探索を行うことで、探索された経路が、その利用者にとって常に最適な状態であることが保証される。

さらに、計算時間の短縮のため、列車乗継経路探索は、1人1人の利用者に対して逐次実施するのではなく、「利用者が現在滞在する駅、降車駅、利用者属性（次節で詳述）」の組合せ毎にまとめ、一括して行う。これにより、シミュレーションにかかる時間は、

高々「(利用者属性数) × (列車数) × (駅数) ^3」オーダーとなり、終日で100万人以上の利用者がある線区でも、短時間でのシミュレーションが可能である。

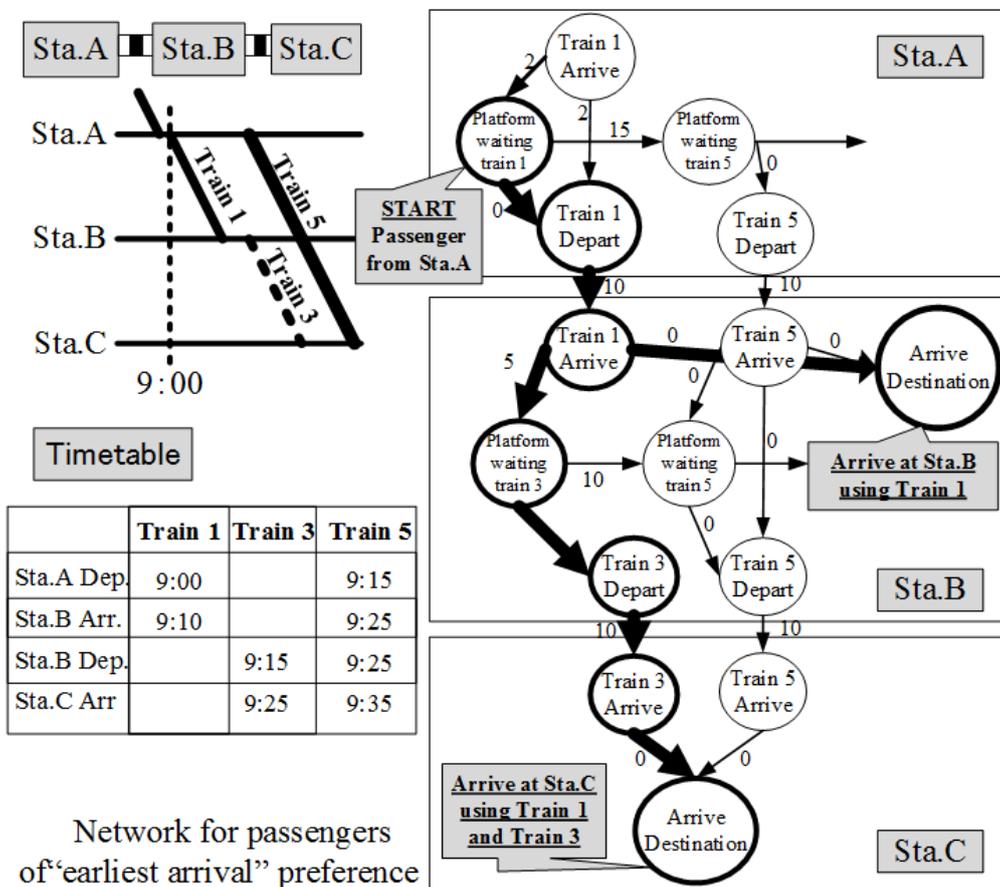


Figure 4-2 An example of network for passenger's path search

4.3.4. 利用者の嗜好の反映

列車乗継経路探索において、利用者はその時々状況に応じ「なるべく早く降車駅に着きたい」「乗換を避けたい」「混雑する列車を避けたい」といった嗜好を持つと考えられる。これらを経路探索結果に反映するため、各利用者に「利用者属性」を設定する。

次に、これらの嗜好を反映するため、例えば、乗換を避ける利用者に対しては、多少到着が遅くなっても、乗換えの少ない列車経路を設定できるようにする。具体的には、4.3.3 節のグラフネットワークの作成において、乗換を表すアークの重みを増大させる。例えば、乗換1回が、10分の所要時間増加に等しい不便を生じさせる場合には、アークの重みを10分とする。一方、混雑を避ける利用者に対しては、過去の列車混雑度情報を参照し、各列車、区間の過去の混雑度に応じ、列車の駅間走行アークの重みを増大させる。例えば、混雑度が100%を超える場合に、乗車時間が2倍になるのと等しい不便を生じさせる場合には、駅間走行アークの重みを、駅間走行時間の2倍に設定する。

このように、利用者属性に応じて、アークの重みが異なったグラフネットワークを作成することで、各利用者の嗜好を反映した列車乗継経路探索が可能となる。

4.3.5. 乗車位置の推定

大都市圏の鉄道路線のラッシュ時間帯には、多くの利用者が、降車駅の出口階段に近い車両、ドアを選択して乗車することにより、列車全体の混雑が特定の車両に偏ったり、特定のドアでの乗降に時間がかかり停車時間が延びたりという現象が発生する。この現象を模擬するため、各利用者の列車乗継経路探索にあたり、列車編成内の乗車位置をあわせて推定する。

過去の研究において、各利用者は、列車降車後に改札口や出口階段位置まで歩くことを、なるべく避けるように乗車位置を決めることが明らかにされている^[4-5]。これに基づき、改札口や出口階段に近いドア位置に乗車する確率を高め、それらの位置から遠いドア位置に乗車する確率を低めに設定する。この確率の設定には、ファジィ集合理論の三角ファジィ数を用いる。具体的には、Figure 4-3のように、降車駅プラットフォームの出口位置に対し、降車駅の出口位置に最も近い場所を三角ファジィ数の中央値とし、列車の両端（出口位置と一致する場合を除く）を、三角ファジィ数の最小値、最大値とする。この三角ファジィ数により得られる各乗車位置に対応する値を、メンバシップ関数とする。なお、出口位置が2箇所以上存在する場合には、各出口位置に対して三角ファジィ数を設定し、それらの和を、各乗車位置に対応するメンバシップ関数とする。

ここで、利用者が2列車以上を乗り継いで降車駅へ向かう場合には、以下の措置をとる。途中駅で階段等を使い、異なるプラットフォームへの乗換が発生する場合には、乗換駅の出口位置を参照して乗車位置を決める。異なるプラットフォームへの乗換が発生しない場合には、降車駅の出口位置を参照して乗車位置を決定する。

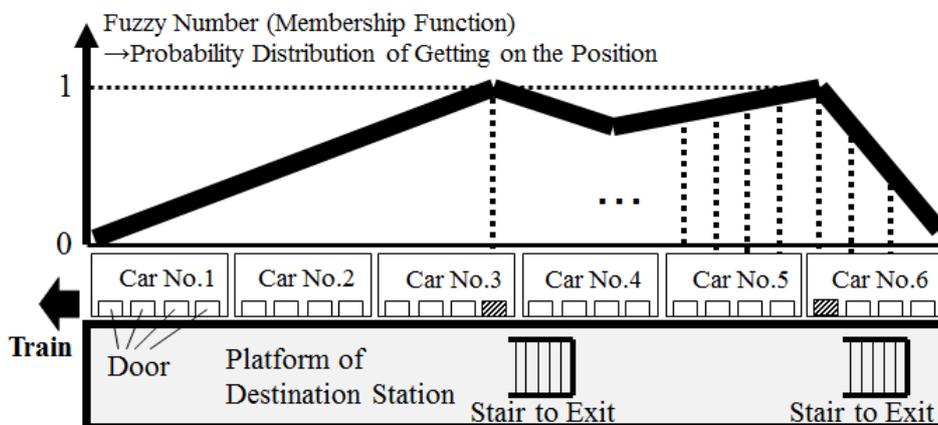


Figure 4-3 The membership function of each car or door

4.3.6. 列車遅延の推定

各利用者の列車乗継経路探索、乗車位置推定結果を集約すると、各列車の各駅、各ドアでの乗降人数が推定される。この推定結果に対し、下記の式(1)により、列車の乗降にかかる時間を、各ドアに対して計算する。なお、式(4-1)は、文献[4-11]の実験により得られた、乗降時間の回帰式である。

$$Dwell_{i,p} = \text{MAX}_d \{ 0.34707 + 0.646497 \times on_{i,p,d} + 0.370068 \times off_{i,p,d} + 0.16291 \times (arr_{i,p,d} - off_{i,p,d}) \} \dots \dots \dots (4-1)$$

$Dwell_{i,p}$: 列車 i , 駅 p , ドア d において、乗降にかかる時間 (秒)

$on_{i,p,d}$: 列車 i , 駅 p , ドア d において、乗車する人数 (人)

$off_{i,p,d}$: 列車 i , 駅 p , ドア d において、降車する人数 (人)

$arr_{i,p,d}$: 列車 i , 駅 p , ドア d において、乗降せず車内に残る人数 (人)

計算された各ドアの乗降時間に対し、その最大値をとり、それを当該列車が当該駅で乗降に必要な時間とする。これが、当該列車の所定停車時間を超過する場合には、その分だけ列車に遅延が発生するものとする。一方、乗降に必要な時間が所定停車時間を下回る場合には、既にその列車に遅延が発生しているならば、その差分だけ遅延が縮小するものとする。なお、列車に遅延が発生していない場合や、所定停車時間から乗降に必要な時間を引いた差分が遅延よりも大きい場合には、その列車の発車時には遅延は生じないものとし、その列車は所定の発車時刻に発車する。

一方、列車の駅間走行時間に関しては、原則として与えられた基準運転時分を最小値とし、いわゆる余裕時分の範囲で、列車の遅延が回復するものとする。なお、いかなる場合にも、所定の到着／出発時刻よりも早く運行されないものとする。

4.3.7. 案内ダイヤ

列車乗継経路探索において、各利用者が当日の運行状況を正確に把握しているか否かは、重要な問題である。例えば、ある通勤路線の複々線区間において、計画ダイヤどおりであれば、先発となる各駅停車に乗車するよりも、後発となる快速列車に乗車したほうが、先に降車駅に着くケースを考える。ある日、快速列車に遅延が発生し、各駅停車に乗車したほうが、先に降車駅に着くような状況が発生したとする。この場合、快速列車の遅延状況を駅のアナウンス等で案内され、知っている利用者は、先発の各駅停車が降車駅まで先に着くと考え、各駅停車を選択する。一方、快速列車の遅延を知らない利用者は、快速は定刻通り運行されると考え、後発の快速列車の到着を待つことになる。すなわち、各利用者が列車運行状況に関し、どのような情報を得ているかにより、列車乗継経路が異なることになる。

そこで本シミュレータでは、各利用者の列車乗継経路探索時に参照するダイヤを複数

設定可能な構成とし、それらを総称して「案内ダイヤ」とよぶ。案内ダイヤは、各利用者が「今後列車はこのような時刻、順序で運行されるはず」と考えるダイヤである。先述の例に対応して、快速の遅れが案内された利用者は、列車運行シミュレーションに用いるダイヤと同様の「情報あり」の案内ダイヤを参照し、常に最新の遅延、運行情報に基づいた列車乗継経路推定を行うようにする。これにより、各駅停車に乗車する乗継経路を推定可能である。一方、快速の遅延が案内されなかった利用者は、計画ダイヤと同様の「情報なし」の案内ダイヤを参照し、列車乗継経路推定を行うようにする。これにより、遅れている快速を待つ乗継経路を推定可能である。

案内ダイヤを使用することで、例えば、放送や案内板で適切な運行情報が案内される駅に居る利用者とそうでない利用者、携帯電話のメール等で最新の運行情報が得られる利用者とそうでない利用者を区別したシミュレーションが可能となる。その結果、運行情報の利用者への提供効果を定量的に測定したり、情報提供設備に応じた適切なダイヤ設定を検討したりすることも可能となる。

4.3.8. 列車運行と旅客行動の相互作用

本シミュレーションでは、4.3.3 節の利用者の列車乗継経路の推定と、4.3.6 節の列車遅延の推定が、始発列車より時刻順に反復して行われる。この構成により、4.2.1 節の増延現象、すなわち列車運行と旅客行動の相互作用が表現され、ラッシュ時間帯の列車運行状況について、より実態に近い模擬が可能である。

なお、鉄道事業者では、この増延現象を防ぐため、遅延により列車間隔が開くと、その前を走る列車に対し、駅での停車時間を長めに取るよう指示する。これは「延発手配」や「間隔調整」と呼ばれ、前の列車を意図的にある程度遅延させることで、後続列車への利用者の集中を防ぐ。本シミュレータでは、このような手配を模擬し、効果を測定することも可能である。

4.3.9. シミュレータの出力と画面例

本シミュレータの特徴として、前述の増延現象の再現に加え、詳細なシミュレーション結果の出力が可能である点がある。具体的には、1人1人の利用者が、乗車駅から降車駅までの間に、どの列車のどの位置に乗車し、どの程度の混雑度を体験し、どこで乗換え、降車駅までどの程度の所要時間がかかったのか、詳細な推定結果が出力できる。また、各列車の遅延、混雑度も、各駅間、各ドア単位で詳細に出力可能である。

本シミュレータの画面例を Figure 4-4 に示す。列車ダイヤ図表示では、一定値以上の混雑度、遅延の列車、区間を色付けして強調表示する機能がある。これにより、例えばダイヤ改正案をシミュレーションした場合に、具体的にどの箇所、混雑や遅延の問題が発生するか、容易に把握できる。さらに、列車状態表示により、各列車の号車毎の混雑度のバラツキを把握することや、駅状態表示により、各駅のホーム上の混み具合を

把握することが可能である。また、在線情報表示では、ある時刻における各列車の位置、混雑度、遅延が表示される。このように、シミュレータの画面上で可視化された結果を確認することで、そのダイヤ改正案の課題、問題点等を把握することができる。

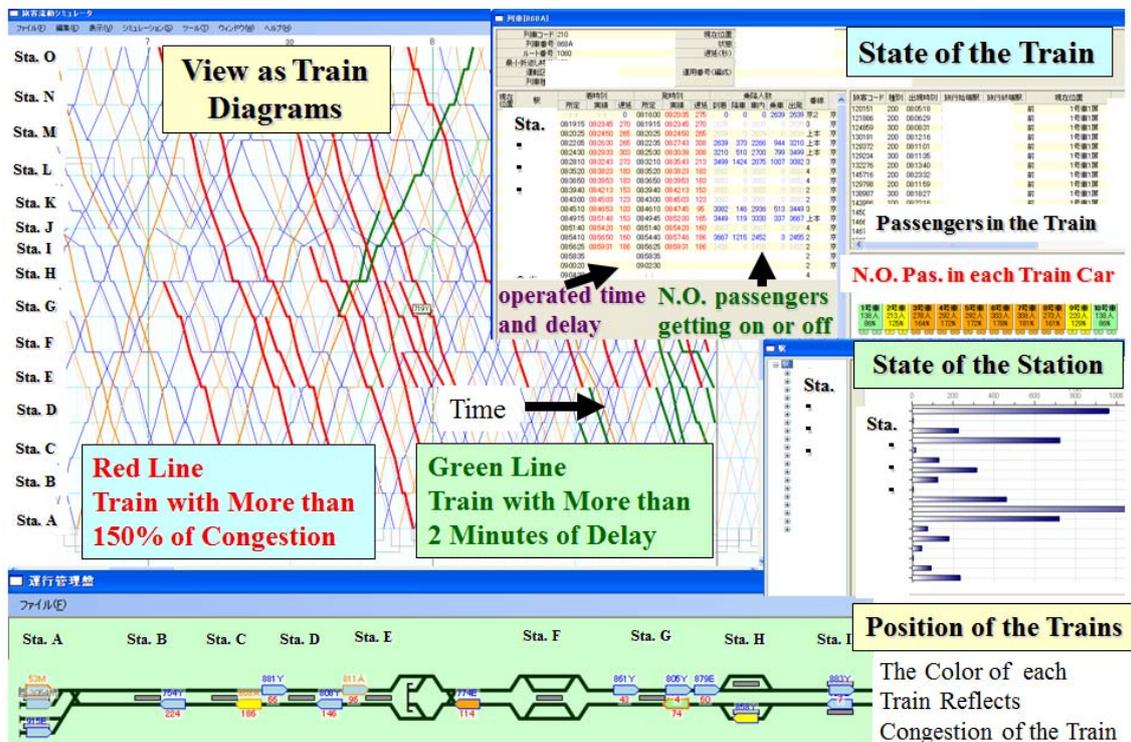


Figure 4-4 Screenshots of the simulator

4.4. 利用者視点による輸送計画評価手法

4.4.1. 利用者の体験する輸送サービスに基づく評価

本論文で提案する輸送計画評価手法を Figure 4-5 に示す。比較評価する 2 つの輸送計画 A, B に対し、まず、利用者を表す自動改札機等の OD データ等を利用し、各輸送計画に対し、本シミュレータによるシミュレーションを行う。次に、出力される各利用者の所要時間、待ち時間、乗換回数、混雑度等、「体験する輸送サービス」の推定結果を参照し、4.4.2, 4.4.3 節で詳述する、各利用者の不効用値や満足度を算出する。そして、これらの値について、全利用者の平均をとる等の方法により集約し、それを各輸送計画の評価値とする。

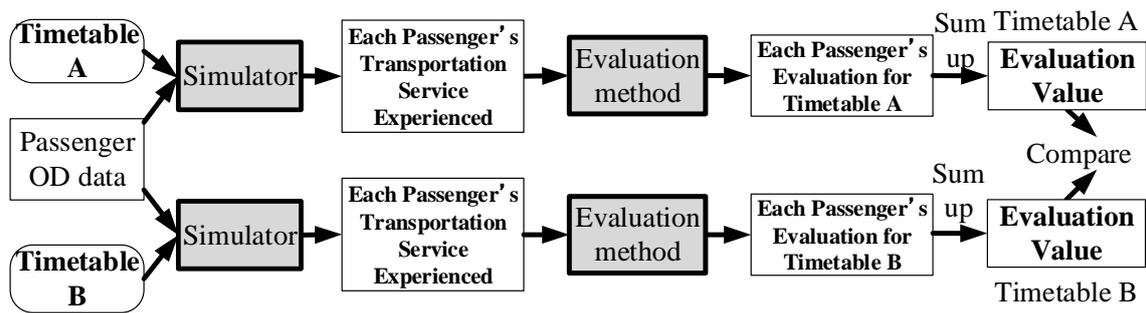


Figure 4-5 Approach for timetable evaluation

4.4.2. 評価尺度

各利用者の輸送計画に対する評価を推定するためには、「体験する輸送サービス」に対し各利用者がどの程度の評価を下すのか、すなわち、輸送計画に対する利用者の評価構造、評価尺度を明らかにする必要がある。これについては、経済学の効用理論をベースにして構築された、不効用値が提案されている^[4-12]。不効用値は、以下の式(4-2)により、待ち時間、乗換回数、混雑度等の利用者の不便要素を、列車乗車時間の延びに換算して算出される。

$$Disuti = time + 2 \times wait + 600 \times trans + \sum (inter_time \times cong_formula) \dots\dots\dots (4-2)$$

- ・ *Disuti*: 利用者の不効用値
- ・ *time*: 乗車駅出現～降車駅到着までの時間 (秒)
- ・ *wait*: 乗車駅や乗換駅での列車待ち時間の合計 (秒)
- ・ *trans*: 乗換回数 (回)
- ・ *inter_time*: 列車の隣接駅間走行時分 (秒)
- ・ *congestion*: 列車の混雑率 (定員に対する割合)
- ・ *cong_formula*: 列車の混雑度により、以下の各式を適用

- ① case 1: the congestion is under 1.0
 $cong_formula = 0.0270 \times congestion$
- ② case 2: the congestion is between 1.0 and 1.5
 $cong_formula = 0.0828 \times congestion - 0.0558$
- ③ case 3: the congestion is between 1.5 and 2.0
 $cong_formula = 0.179 \times congestion - 0.200$
- ④ case 4: the congestion is between 2.0 and 2.5
 $cong_formula = 0.690 \times congestion - 1.22$
- ⑤ case 5: the congestion is more than 2.5
 $cong_formula = 1.15 \times congestion - 2.37$

この評価尺度は、鉄道業界において、新線建設などの鉄道プロジェクトの評価に一般的に用いられてきたものである。なお、これらのプロジェクト評価では、新線が建設された場合の所要時間の平均的な短縮幅、平均混雑度の予測値等に基づいて不効用値を算出、効果を測定している。

それに対し本稿では、1人1人の利用者について予測した「体験する輸送サービス」に対して不効用値を算出し、それを各利用者の不便度とする。不効用値は、値が低いほど望ましい。これにより、体験する輸送サービスによる評価、すなわち各利用者の視点による輸送計画の評価が可能となる。

また筆者らは、大都市圏の複数の鉄道路線で、輸送計画に対する満足度アンケート調査を行った。その結果を分析することにより、列車本数や混雑度等、利用者の体験する輸送サービスと、利用者の満足度との関係を明らかにし、満足度を予測する式（以下、満足度式という）を重回帰分析により構築した^[4-13]。この満足度式を用いた場合には、利用者の心理的な満足度の観点から、輸送計画を評価することが可能である。

4.5. ケーススタディによる、提案する輸送計画評価手法の有用性の検証

4.5.1. 対象路線の概要

大都市圏のある通勤路線の朝ラッシュ時間帯を対象に、本シミュレータを構築した。この路線の路線図（種別と停車駅）を Figure 4-6 に示す。本章では、利用者データとして、自動改札機データの代わりに 2000 年度の大都市交通センサスデータ^[4-14]を用いる。

比較評価する輸送計画は、Figure 4-6 に示すように、この路線の現行の輸送計画（以下、ダイヤ A）、及び駅 4 に急行を停車させた輸送計画の改正案（以下、ダイヤ B）とする。

なお、この線区の 1 日分で、利用者データは約 64 万人分、列車本数 557 本（現行ダイヤ）である。また、ダイヤ A をシミュレーションしたときの計算時間は、CPU3.2GHz、メモリ 1GB の PC で 28 分であった。

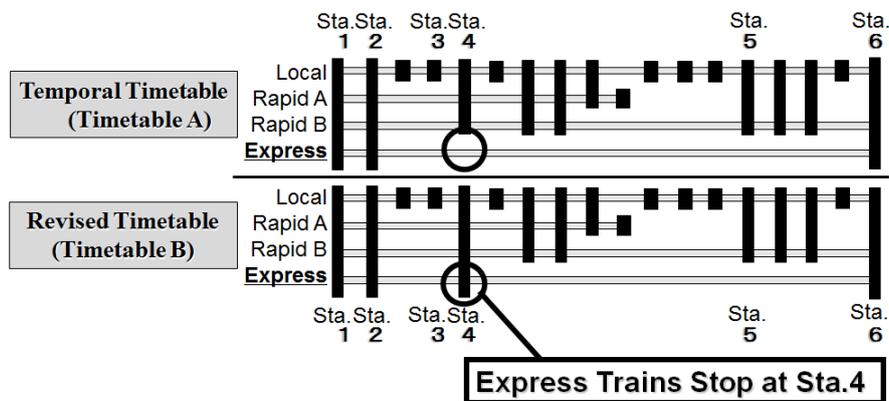


Figure 4-6 Two timetables to be compared

4.5.2. 前提条件

本路線でのシミュレーションの実施にあたり、以下の前提条件を適用した。

(1) 利用者の列車選択基準に関する前提条件

- (a) 60%の利用者は、最も早く到着の列車を選択する
- (b) 20%の利用者は、乗換回避行動をとる
- (c) 10%の利用者は、混雑回避行動をとる
- (d) 10%の利用者は、乗換、混雑両方を回避する行動をとる

ここで、(b)、(d)の乗換回避行動については、同一島ホームの乗換1回を乗車時間5分の増加に、異なる島ホームの乗換1回を乗車時間10分増加に換算し、列車乗継経路探索を実施する。また、(c)、(d)の混雑回避行動については、まず事前に、混雑回避行動を加味せずにシミュレーションを行い、各列車、区間の混雑度の推定結果を保持する。次に、その事前のシミュレーション結果における各列車、区間の混雑度を参照し、その混雑度が100%以上の列車、区間については、その列車の駅間走行時間を2倍に換算し、列車乗継経路探索を実施する。

(2) 案内ダイヤの設定

本ケーススタディでは、大都市圏の通勤路線を対象とすることから、利用者は、駅での放送、発車案内板等により、十分に情報提供がなされ、全列車の最新の運行状況をリアルタイムに把握している状況を想定する。最近では、駅での列車案内設備の充実が図られ、大都市の路線で列車発着案内により、個別の列車の遅延時分が案内されている現状を踏まえると、このような前提が現状を反映していると考えられる。

このような状況に対応して、本ケーススタディで使用する案内ダイヤとして「単純予測ダイヤ」を用いる。単純予測ダイヤとは、ある列車・駅で遅延が発生した場合に、その列車の以後の運行時刻は、その遅れ時間分だけ遅れる、と考えることにより生成されるダイヤのことである。例えば、ある駅で5分遅れた列車は、終点までの各駅で5分遅れるものとする。

4.5.3. 現行ダイヤ／ダイヤ改正案の比較評価

ダイヤ A、ダイヤ B の双方について、本シミュレーションを行い、評価した結果を Table 4-1、Figure 4-7 に示す。

Table 4-1 の上、および中央の表は、ダイヤ A、ダイヤ B それぞれに対し、利用者の「乗車駅、降車駅」の組合せ（以下、OD と表記する）毎に不効用値の平均値を算出したものである。不効用値は、各 OD 間の移動に関する平均的な不便度を、所要時間の増分に換算しており、例えば、ダイヤ A における不効用値がダイヤ B における不効用値よりも大きい場合には、この OD の利用者にとってみれば、ダイヤ B のほうが比較的便利、ということになる。なお、4.3.2 節で述べたとおり、本シミュレータの中では、利用

者データの生成に際し、乱数を用いて確率的に生成している。確率的シミュレーションに対し、乱数の影響を少なくし、平均値から定量的な知見を得るために、前節で述べた同条件のシミュレーションを、乱数を変化させながら 5 回実施した。表中の数値は、5 回分のシミュレーション結果の平均値である。また、両ダイヤの利便性を比較するために、不効用値の差分をとったものが、Table 4-1 下の表である。この表において、例えば、駅 6→駅 4、駅 3 のような OD は、ダイヤ B では急行列車が駅 4 に停車するため、正の値となり、「ダイヤ B が非常に便利」という判定になる。一方、駅 6→駅 1 のような OD は、ダイヤ B では急行列車の駅 4 停車により、駅 1 までの所要時間が延びるため、負の値となり、「ダイヤ A のほうが便利」という判定になる。このように、OD 毎の利便性比較をすることで、ダイヤ改正案について、利便性向上を意図した区間の利用者が便利になっているか否かを判定することができる。

Figure 4-7 では、ダイヤ A からダイヤ B にダイヤ改正を行った場合に、便利／不便になる利用者の割合を示したものである。便利になる利用者の割合が、不便になる割合よりも大きい場合には、このダイヤ改正はより多くの利用者から支持されると言える。この場合においては、不効用値について、ダイヤ改正により約 45%の利用者が便利になる一方、約 40%の利用者が不便になっている。したがって、全体としてみた場合には、このダイヤ改正は多くの利用者から支持されると予想される。このように、便利／不便になる利用者の割合を推定すると、そのダイヤ改正案を実施した場合に、どの程度の利用者から支持され、どの程度の利用者から苦情が来るのかななどを、事前に見積もることができる。

一方、Figure 4-8 に、ダイヤ A、B における、終日の利用者の不効用値の分布を示す。不効用値は、利用者の乗車時間、待ち時間、乗換回数、混雑度を、乗車時間に換算した値であるため、概ね、各利用者の乗車駅から降車駅までの所要時間と、乗換、混雑等の不便要素を加算した傾向となっている。一方で、ダイヤ B において、駅 4 に停車させた急行は、朝通勤時間帯の駅 1 方向を中心とした設定であり、このグラフからは、朝通勤時間帯の利便性の変化は分析出来ない。そこで、各利用者について、ダイヤ A、B における不効用値の差分を算出し、その分布を示したものを Figure 4-9 に示す。ここで、不効用値の差分が±60 以内である利用者が、全体の約 93%、37 万人となった。差分のある利用者のみを、より深度化して考察するために、図では、これら差分が±60 以内である利用者を除外して、グラフを作成している。これより、グラフの左側、不効用値がマイナスとなり、ダイヤ B が便利な利用者と、逆に右側のダイヤ A が便利な利用者の割合、およびその程度を分析可能である。例えば、不効用値が 60 以上減少する、ダイヤ B が便利な利用者は、上記の差が無い利用者を除き約 57%となり、逆の 60 以上増加する、ダイヤ A が便利な利用者は約 43%である。また、不効用値が 300 以上減少／増加する利用者でみると、ダイヤ B が便利な利用者は約 20%、ダイヤ A が便利な利用者は約 11%である。

Table 4- 1 Timetable comparison summarized by the origin-destination pairs

Timetable A		Destination Station					
		Sta.1	Sta.2	Sta.3	Sta.4	Sta.5	Sta.6
Origin Station	Sta.1		399	1,273	880	2,715	3,128
	Sta.2	524		1,108	773	2,645	3,308
	Sta.3	1,223	1,130		1,017	3,059	919
	Sta.4	919	852	955		2,198	3,022
	Sta.5	3,149	2,885	2,836	2,561		1,331
	Sta.6	3,215	3,286	4,129	3,305	1,275	

Timetable B		Destination Station					
		Sta.1	Sta.2	Sta.3	Sta.4	Sta.5	Sta.6
Origin Station	Sta.1		408	1,275	882	2,716	3,131
	Sta.2	524		1,110	775	2,644	3,322
	Sta.3	1,222	1,130		1,021	3,058	917
	Sta.4	917	851	955		2,197	2,957
	Sta.5	3,072	2,834	2,850	2,490		1,331
	Sta.6	3,301	3,350	3,788	3,005	1,271	

Difference (A-B)		Destination Station					
		Sta.1	Sta.2	Sta.3	Sta.4	Sta.5	Sta.6
Origin Station	Sta.1		▲ 8.76	▲ 2.33	▲ 2.12	▲ 1.26	▲ 2.35
	Sta.2	0.57		▲ 1.68	▲ 1.74	0.94	▲ 13.75
	Sta.3	0.52	▲ 0.05		▲ 3.85	1.07	1.69
	Sta.4	1.69	0.98	0.04		1.24	65.24
	Sta.5	76.24	50.95	▲ 13.50	71.05		0.07
	Sta.6	▲ 85.96	▲ 63.81	340.53	300.35	4.16	

Number with ▲: Below Zero (More Convenient in Timetable A)
 Other Number: Zero and More (More Convenient in Timetable B)

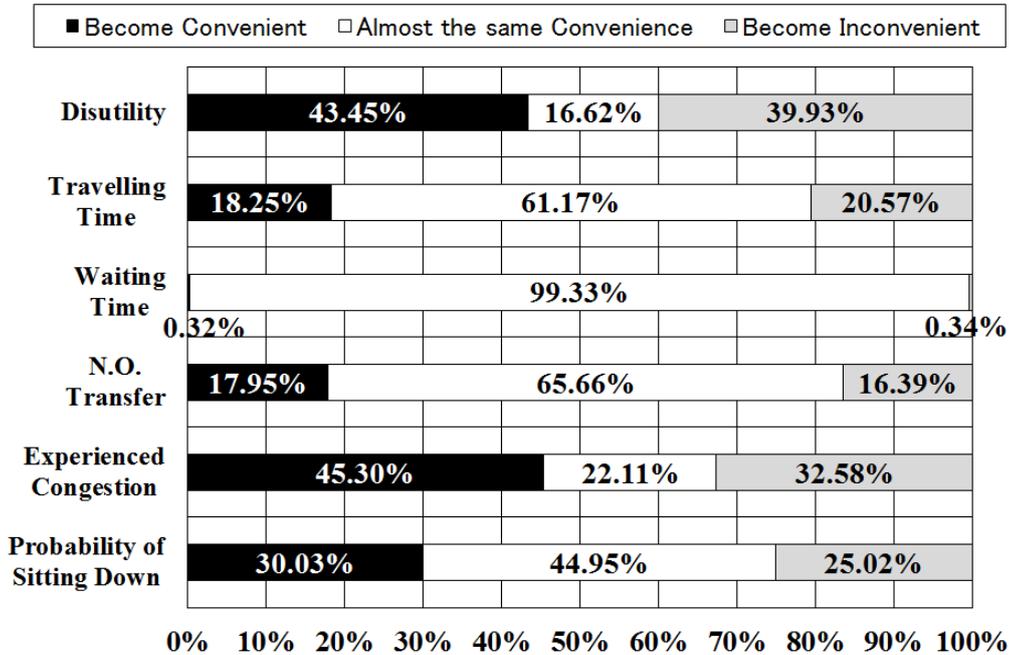


Figure 4- 7 Proportion of passengers becoming convenient or inconvenient

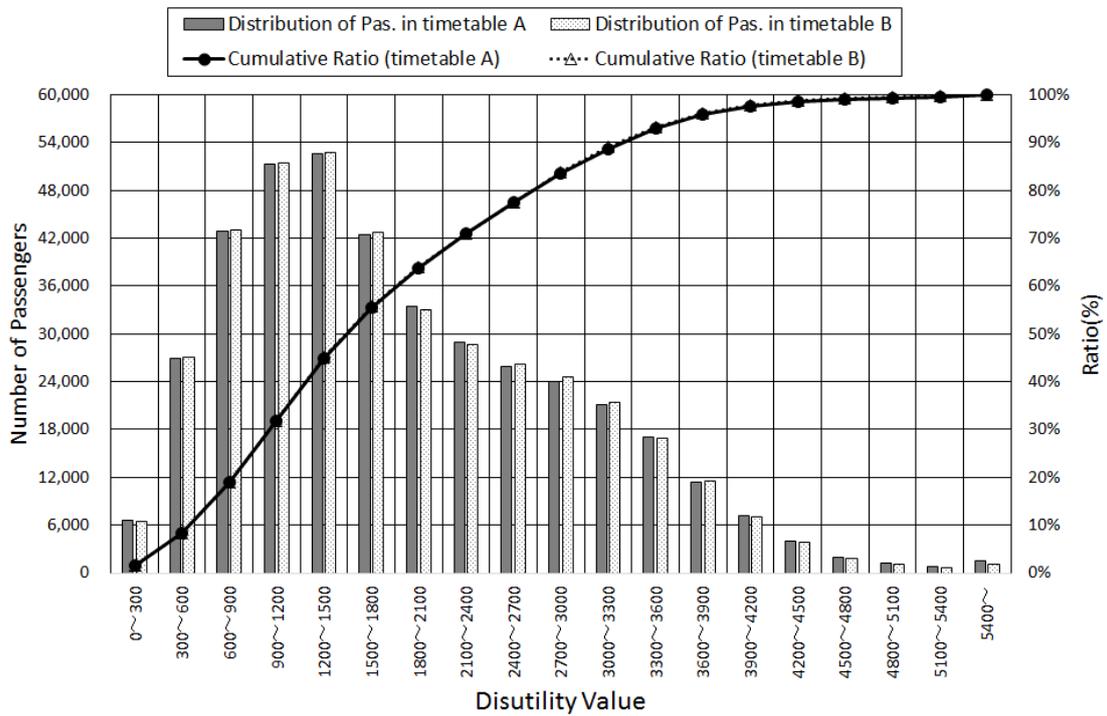


Figure 4- 8 Distribution of disutility values in timetable A and B

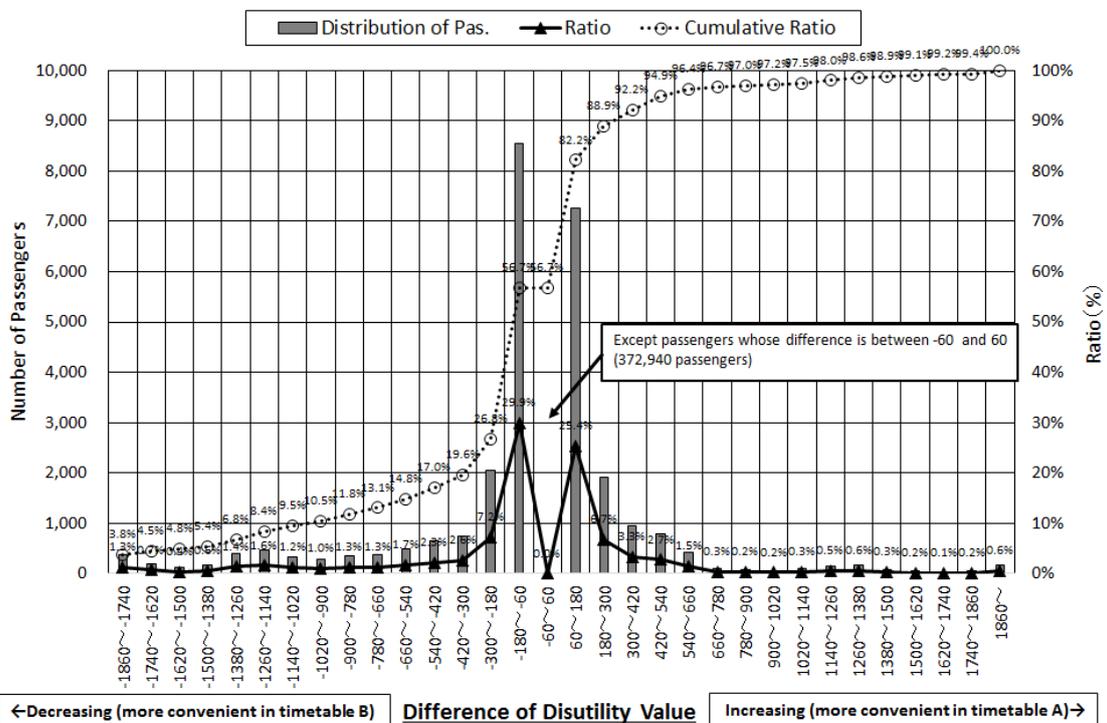


Figure 4- 9 Distribution of difference of disutility values in timetable A and B

4.5.4. 列車選択基準の変更による評価値の変動幅

本手法の適用にあたり、利用者の列車選択基準の比率として、4.5.2(1)に記載のとおり、最早：乗換回避：混雑回避：乗換・混雑回避＝60:20:10:10 となることを前提とした。本節では、感度分析として、この前提の設定による、評価結果への影響を分析する。

比較する列車選択基準の比率は、以下の3パターンを設定する。

- (a) 最早：乗換回避：混雑回避：乗換・混雑回避＝100:0:0:0
- (b) 最早：乗換回避：混雑回避：乗換・混雑回避＝60:20:10:10 (4.5.2(1)の前提)
- (c) 最早：乗換回避：混雑回避：乗換・混雑回避＝20:40:20:20

各前提において、各利用者の不効用値を算出し、その全体平均値を算出したものを、Table 4-2 に示す。利用者の列車選択基準の変動により、不効用値の平均値にも多少の変化が生じ、(c)においては、ダイヤ A, B の差はわずかとなる。これは、(c)においては、(a)や(b)と比較すると最早の利用者が比較的少ないため、ダイヤ B において E 駅に停車する、急行の利用者も少なくなり、その結果、急行の E 駅停車による恩恵を受ける利用者が限定的であるためと考えられる。一方で、ダイヤ A, B のどちらが良いか、不効用値の大小関係については、(a)～(c)の全てで、ダイヤ B のほうが良い結果となった。

以上より、構築した評価手法においては、対象路線の利用者特性を考慮し、その路線の利用者の列車選択基準の傾向を反映した評価が可能であるといえる。例えば、アンケート調査結果や、現況の列車乗車人数の再現性を踏まえ、列車選択基準の割合を設定することで、その路線の特性にあわせた輸送計画の評価が可能となる。

Table 4-2 Disutility values under different preconditions about passengers' behavior

	(a) 100:0:0:0	(b) 60:20:10:10	(c) 20:40:20:20
Timetable A	1895.45	1869.55	1875.88
Timetable B	1873.35	1858.54	1872.86
Difference	22.10	11.01	3.02

4.5.5. 提案手法の効果

本手法を用いることで、ダイヤ改正を行ったときに、狙い通りの改正効果が出るか否かを定量的に把握するだけでなく、改正により生ずるマイナス要素や、副次的な効果をも抽出し、それらを総合的に反映した評価が可能となる。

例えば、上記の例では、急行を駅 4 に停車させることで、①駅 6⇒駅 4 の利用者が、所要時間短縮で便利になる、②駅 6⇒駅 1,2 の利用者が、所要時間増加で不便になることは、改正案策定時にある程度、想定可能である。しかし、①と②の利用者の比率や、どちらの効果のほうが大きいのかは、本手法により評価を行って初めて明らかとなる。

さらに、③駅 5⇒駅 1,2,4 といった、急行列車とは一見無関係な利用者も、当初快速 B を利用していた駅 6⇒駅 4 の利用者が急行に移行し、混雑緩和によるプラスの効果があることがわかる。このような、副次的な効果を漏れなく把握するのは、本手法無しでは困難である。

ラッシュ時間帯の輸送計画の作成は、限られた車両数、乗務員数を如何に上手く配分し、大混雑や遅延を防ぐかが重要である。ある区間における列車の増発は、その区間の混雑緩和には一般的に有効であるが、列車密度の増加により列車の流れが悪くなり、遅延を生じやすい、という問題を孕む。したがって、改善を狙った所 1 箇所だけの評価に留まらず、路線全体での列車運行、旅客行動を推定し、総合的、定量的な評価をする本手法は、このような時間帯で特に有効である。

4.5.6. 様々な路線、輸送計画に対する評価の展開と、輸送計画の設計への反映

本手法は、上記のケーススタディの路線、輸送計画の比較評価以外に、様々な路線、輸送計画に対する評価でも有効である。具体的には、文献[4-15]において、大規模設備改良に伴う輸送計画の検討に、乗車率シミュレーションが用いられているが、この乗車率予測手法には、本章で構築した列車運行・旅客行動シミュレータの手法が適用されている。また、これ以外にも、例えば、直通運転を行う複数の通勤路線を対象に、直通の優等列車と線内の各駅停車の本数を変更した輸送計画の比較評価を行い、直通の優等列車を増発することで、線内の各駅停車の本数、運転区間を縮小しても、全体の利用者の利便性にはほぼ変化が無いことを明らかにするなど、合計 5 社 10 路線の輸送計画案に適用し、乗車率の予測や、輸送計画の定量的な比較評価が可能であることを確認している。

一方、輸送計画の設計に関する活用例としては、列車運行・旅客行動シミュレータによる乗車人数や利便性評価値の推定結果に基づき、輸送計画案を改良する再変更を行うことなどが挙げられる。実際に、ある路線の朝通勤時間帯の優等列車について、乗車人数が多く混雑が予測されるという結果に基づき、優等と各駅停車の順序を変更する輸送計画の改良を行い、混雑緩和効果があることを確認した事例がある。また、列車の乗車率を確認しながら、輸送計画の改良を行うためのシステムとして、対話型乗車率推定システムを開発している^[4-16]。さらに、Figure4-7 のように、利用者の乗車駅、降車駅の組合せ毎に利便性評価値を集約することで、優等列車の非停車駅で、利便性が大きく悪化している駅を明らかにし、それに対し、優等列車の停車駅を追加する形で、輸送計画の変更案を作成した事例もある。このように、構築した手法により、輸送計画の評価をし、その結果を輸送計画作成担当者にフィードバックすることで、さらなる輸送計画の作成、改良に活用することができる。

4.6. 本章のまとめ

本章では、大都市圏の通勤路線で実際に発生する、列車の混雑・遅延の相互作用を再現

し、1人1人の利用者の行動を追従、推定する列車運行・旅客行動シミュレータについて述べた。また、シミュレータを用いて、輸送計画の良否を、全利用者の利便性を推定して、総合的に評価する手法を提案した。

今後の課題として、輸送障害等によるダイヤ乱れ時の複雑な旅客行動の再現や、駅間の運転時分や遅延の精緻な推定のための、運転曲線の考慮、反映、およびシミュレーション結果の検証が挙げられる。

ダイヤ乱れ時への適用については、利用者は、そのような状況下において、駅での案内、携帯端末の有無等により、遅延や運休等、列車の運行状況についての認知が人によって異なる。したがって、それを反映したシミュレーションとする必要がある。これについては、4.3.4節で述べた、案内ダイヤの考え方が活用できると考えているが、個々人の情報取得環境をどのように想定するか等、詳細については5章で検討する。また、ダイヤ乱れ時の運転整理を、本シミュレータで評価可能となれば、利用者の利便性低下を極力防止できる、効果的な運転整理手法だけでなく、運行情報に関する利用者への効果的な案内方法や、運転整理が行いやすい輸送計画のあり方等も、議論可能になる。これらも、5章で検討する。

次に、駅間の運転時分推定のための、運転曲線の反映に関しては、まず、ATS等の列車制御方式を考慮し、列車の在線位置に対応した信号現示を推定したうえで、信号による速度制限や線路形状による速度制限等を守る運転曲線を推定する手法を、武内らとともに文献[4-15]で構築した。運転曲線推定機能により、路線全体の列車遅延の精緻な推定や、消費電力量の推定が可能となり、列車運行の多面的な評価が可能となった。また、列車遅延縮小のために、列車制御方式を移動閉そくに変更する、予測制御を適用し、先行列車との間隔を詰める等に対応した機能も文献[4-18]で構築し、これらの施策の効果も推定可能となった。

一方、シミュレーション結果の検証については、1人1人の利用者行動を全て正確に合致させるのは難しい。しかし、それらを集約した、各列車の乗車、乗降人数、運行時刻について、実績値に近い結果が得られれば、シミュレーションの実用的な観点からの有用性、正しさが示されることになる。したがって、検証方法としては、ほぼ全利用者のデータを自動改札機で捕捉できる路線を対象に、本システムの推定結果と、列車の応荷重（ばね圧）による乗車人数データや、運行管理システムに記録される実績ダイヤデータを比較することが考えられる。

4章の参考文献

- [4-1] 電気鉄道ハンドブック編集委員会：“電気鉄道ハンドブック”，コロナ社（2007）
- [4-2] 富井規雄：“列車ダイヤのひみつ”，成山堂（2005）
- [4-3] Zhonping Yang, Takafumi Koseki, Satoru Sone: “Railway Network Timetabling for Reducing Transfer Time Using Genetic Algorithm”，電気学会論文誌 D（産業応用部門），Vol. 119-D, No.6（2000）

- [4-4] 明星秀一: “自動改札機を活用した旅客流動推定”, 第 42 回鉄道サイバネ論文集, (2005)
- [4-5] 青木俊幸: “駅停車時分短縮のための乗降分布予測手法”, J-Rail2001, (2001)
- [4-6] Carey M, Carville S: “Testing schedule performance and reliability for train stations”, Journal of the Operation Research Society, Vol.51, pp.666–682 (2000)
- [4-7] Heimburger DE, Herzenberg AY, Wilson NHM: “Using simple simulation models in operational analysis of rail transit lines: case study of Boston’s red line”, Transportation Research Record, Vol.1667, pp.21–30 (1999)
- [4-8] 家田仁, 赤松隆, 高木淳, 畠中秀人: “利用者均衡配分法による通勤列車運行計画の利用者便益評価”, 土木計画学研究・論文集, Vol.6, pp.177-184 (1988)
- [4-9] 平井力, 富井規雄: “運転整理案評価のための列車別乗車人員推定手法”, 電気学会交通・電気鉄道研究会, TER-99-72 (1999)
- [4-10] 平井力, 富井規雄: “動的環境下における列車乗客数の推定手法”, 平成 11 年電気学会産業応用部門大会, No.316 (1999)
- [4-11] 大戸広道, 青木俊幸, 河合邦治, 都築知人: “鉄道駅における旅客流動に関する研究 その 8 乗降速度に関する実験”, 日本建築学会学術講演梗概集 (1999)
- [4-12] 国土交通省鉄道局: “鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル 2005”, 運輸政策研究機構 (2005)
- [4-13] 村越暁子, 國松武俊, 斎藤綾乃: “列車ダイヤに対する顧客満足度の予測”, 鉄道総研報告, Vol.22, No.7 (2008)
- [4-14] 大都市交通センサス: <http://www.jterc.or.jp/inforlib/data/17censasuHP/index.htm>
- [4-15] 米田将人: “混雑率を踏まえたダイヤの検討”, RRR, Vol.74, No.8 (2017)
- [4-16] 辰井大祐, 國松武俊, 石原裕介, 坂口隆: “乗車率推定機能を有する対話型ダイヤ作成システムの構築”, 電気学会交通電気鉄道研究会, Vol.48, pp.23-28 (2012)
- [4-17] 武内陽子, 坂口 隆, 熊澤一将, 國松武俊, 佐藤圭介: “高機能な列車運行・旅客行動シミュレータの開発と列車運行の多面的評価”, 電学論 D, Vol.135, No.4 (2015)
- [4-18] 國松武俊, 寺澤孝彦, 武内陽子: “移動閉そく・予測制御に対応した列車運行シミュレータの構築”, 平成 29 年度電気学会産業応用部門大会, No.1151 (2017)

5. マイクロシミュレーションを活用したダイヤ乱れ時の運転整理評価手法

5.1. はじめに

列車運行に乱れが生じた際の運転整理においては、その具体的計画である運転整理案を適切に作成する必要がある。しかし、運転整理案の作成は、利用者の現在の状況、すなわち旅客流動の正確な把握と予測が困難なこと、車両、乗務員等の多くのリソース制約を守る必要があること、どのような運転整理が良いのか、評価尺度が定まっていないこと、迅速な作成、手配が要求されること等から、極めて困難な作業となっている。このうち、旅客流動の正確な把握、予測は、ダイヤ変更の実施により、どれほどの利用者にどれだけの迷惑がかかるのかを考慮するためには極めて重要である。

特に、ダイヤ乱れ時の利用者の行動は、他線区へ迂回したり、駅や車内での案内により行動が変化したりと、平常時に比べて予測が困難である。また、運転整理の評価については、実際に迷惑を被る利用者の立場で評価するのが望ましいものの、ダイヤ乱れ時に各利用者が体験する迷惑を集約、定量化することは困難で、指令員の勘と経験に基づく評価がなされているのが現状である。適切に運転整理案を評価し、利用者にとって迷惑の少ない運転整理を実施するためには、まずはダイヤ乱れ時における利用者に対する運行情報の与え方を前提として設定したうえで、利用者の行動を予測し、それに基づいて運転整理を評価し、利用者の被る迷惑度合いを定量化しなければならない。

本研究では、4章で構築した平常時の列車運行・旅客行動シミュレータの機能向上を行い、ダイヤ乱れ時の旅客流動を推定可能とする。ダイヤ乱れ時の旅客流動を推定する際に課題となる事項として、①振替乗車による利用者の他路線への迂回、②運転整理内容についての案内の有無による利用者行動の変化が挙げられる。本研究ではこれらに対処するため、①については、ダイヤ乱れ時に、迂回経路を利用した場合と運転再開を待った場合の予測所要時間に基づき、迂回するか待つかを確率的に決定する迂回経路選択モデル¹⁵⁾を組み込む。②については、利用者が降車駅までの利用列車を決定するにあたり「案内ダイヤ」を導入する。利用者の状況に応じて、案内ダイヤを列車運行シミュレーションで使用する運転整理ダイヤと異なったものとする事で、案内の有無による利用者行動の変化を反映可能とする。

次に、運転整理案を1人1人の利用者の立場から定量的に評価するために、4章で使用した不効用値を使用する。不効用値を全利用者に対して計算し、その集約値を整理案の評価値とすることで、利用者の視点による運転整理案評価を可能とする。

そして、ダイヤ乱れ時に対応した列車運行・旅客行動シミュレータと、運転整理案評価手法を用い、実在する通勤路線を対象として、運転整理案の比較評価を行う。

5.2. ダイヤ乱れ時の旅客流動推定と課題

5.2.1. ダイヤ乱れ時の旅客行動

各利用者の列車乗継経路を推定する手法は、3, 4章で提案しているものの、これらは平常時を対象とした手法であり、ダイヤ乱れ時にはそのまま適用することは適切では

ない。その理由は、ダイヤ乱れ時には、他路線への迂回行動や利用者への案内情報による行動の変化等、利用者にとる行動パターンが多岐にわたり、平常時の手法で予測すると、実態と大きく異なる可能性があるからである。

他路線への迂回行動とは、ある路線で運転を見合わせている場合に、利用者が運転再開を待たずに、他の路線を利用して目的地へ向かうことである。事業者でも、不通が比較的長時間にわたる場合には、利用者へ復旧見込時刻や迂回経路の案内、振替輸送の取扱を実施し、迂回を推奨して利用者の便宜を図る。一方で、運転整理案の検討段階においては、ダイヤの早期回復を求めるならば、多くの列車を運休するのが良いのに対し、運転再開時に待っている利用者の便宜を図り、輸送力を確保するのであれば、ダイヤ回復が多少遅れても、運休を少なくしたほうが良い、というトレードオフがある。

利用者への案内情報については、例えば Figure 5-1 のように快速列車が遅れた場合、C 駅に早く行くには普通列車に乗り続けたほうが良い。しかし、もし普通列車が B 駅を発車する時点で、快速列車が遅れているという情報が入らなかつたらどうであろうか。早く着きたい利用者は、快速へ乗換えようとして、B 駅で普通列車を降りてしまう。結果、快速が遅れ、早く C 駅にたどり着けない列車を選択してしまうことになる。このようなケースでは、利用者が、現在の他の列車も含めた列車運行状況を、どのように把握しているのかを捉える必要がある。例えば、仮に利用者が、快速が遅れていることを携帯端末の情報で知っていたり、B 駅で乗換時に駅のアナウンスで快速の遅れが告知されたりしていれば、その利用者は B 駅での乗換をやめたであろう。ここで、計画の列車ダイヤで旅客流動推定を行うと、このような快速が遅れたため普通列車を利用した人を表現できず、普通の乗車人数を過小推定、快速の乗車人数を過大推定してしまう。一方で、実績の列車ダイヤで旅客流動推定を行うと、今度は逆に、普通を過大推定、快速を過小推定してしまう。以上のような理由で、ダイヤ乱れ時等、列車に遅れや運休が発生しているときには、利用者にとってどのような情報提供がなされるのかという案内属性を含んだ、平常時とは異なった旅客流動推定手法をとる必要がある。

一方、ある列車が一度遅延し出すと、次の駅以降で列車間隔が広がるため、その列車に対する利用者の集中が生じる。利用者が特定の列車に集中すると、駅での乗降にかかる時間が当初より延び、それがさらなる列車遅延を発生させる。このような現象を増延とよぶ。ダイヤ乱れ時には、特に運転再開初列車に利用者が集中し、この現象が起りやすい。混雑の増大、所要時間の増大等で利用者へ迷惑がかかるため、整理案作成時には、この増延を如何に防ぐかが重要である。

このように、ダイヤ乱れ時には、旅客行動の推定にあたり、様々な不確定要因があり、平常時のように、「全利用者は列車ダイヤ、運行順序の情報を全て把握している」という前提で推定すると、実態と大きく異なる旅客流動となる恐れがある。したがって、ダイヤ乱れ時には、上記の事情を踏まえた旅客行動モデルを構築し、それに基づいた旅客行動の推定を行う必要がある。

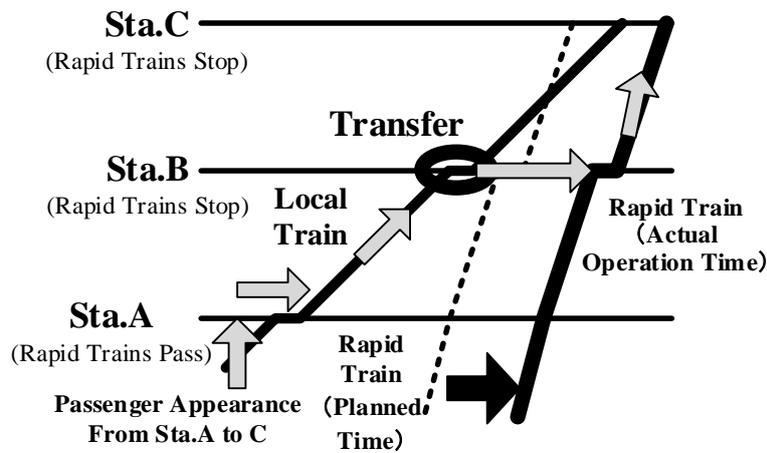


Figure 5- 1 Train choice behavior under timetable disruption

5.2.2. ダイヤ乱れ時の旅客行動推定に関する関連研究

ダイヤ乱れ時における旅客流動の推定に関しては、文献[5-1]の他に、オランダの鉄道路線網を対象に、不通区間発生時の利用者の迂回行動を、スマートカードの利用履歴データを使用して推定する研究^[5-2]や、遅延発生時における列車間の接続確保／解除の判断を、利用者の迂回行動を加味して最適化する研究^[5-3]等がある。しかしこれらの研究では、輸送障害時における運転再開時刻や、運転整理後の列車順序に関する情報を、利用者が完全に知っている前提で、利用者の迂回経路の利用を推定している。実際には、運転再開時刻は見込みであり、状況により前後する可能性があるほか、列車順序も十分に案内されるとは限らず、利用者が実際に行動を判断する状況に基づいているとは言い難い。

一方、ダイヤ乱れ時の運転整理に関する研究では、旅客流動を反映し、利用者の旅行時間の増大量の観点から、最適な運転整理案を、混合整数計画法に基づき自動作成する研究も提案されている^[5-4]。この研究においては、作成した運転整理案における旅客流動を推定し、各利用者の旅行時間の増大量を推定、集計したものを目的関数とし、旅行時間増大量の総和が最小となる整理案を採用する。また、この研究の手法の改良として、利用者の列車乗継経路の推定に際し、列車の乗車率を考慮したうえで、利用者の混雑による不効用を目的関数に入れた手法も提案されている^[5-5]。しかしいずれも、上記のような、利用者への案内情報による影響、迂回経路の利用可能性までは考慮されていない。

5.2.3. 運転整理案評価に求められる要件

2.3 節で述べたとおり、運転整理案の作成、評価に際しては、既存研究では、利用者の視点による尺度ではない、ダイヤ乱れ時の旅客流動を詳細に再現していない等の課題がある。これを踏まえ、筆者は、適切な運転整理案の評価手法について、以下の3つの要件が求められると考える。

- ①他路線への迂回，案内の有無など，ダイヤ乱れ時の複雑な旅客流動を予測・反映したものであること
 - ②増延現象に伴う列車の到着遅れによる影響を反映したものであること
 - ③利用者の視点に立った評価尺度であること
- 次節以降では，これらを満たしたシミュレーション，評価手法について詳述する。

5.3. ダイヤ乱れ時における列車運行・旅客行動シミュレーション手法

5.3.1. 列車運行・旅客行動シミュレータを，ダイヤ乱れ時へ適用する際の課題

列車運行・旅客行動シミュレータをダイヤ乱れ時など異常時に適用する場合には，そのままでは実際に予想される利用者の動きとは異なった動きが推定される恐れがある。その理由は，主に以下の2点である。

- ① 人身事故等で一時的な不通区間が発生した場合には，他社線への振替輸送等の手配がとられ，利用者は運転再開を待つだけでなく，場合によっては他路線へ迂回したり，利用時間を変更したり，旅行そのものを取り止めたりという行動を選択しうる
- ② ダイヤ乱れ時は，列車の順序変更や運休等の運転整理が生ずるが，それが利用者に迅速かつ正確に案内され，利用者が運転整理の内容を正確に知った上で行動するとは限らない

これらに対応し，ダイヤ乱れ時の利用者行動をより正確に推定し，運転整理案を適切に評価するためには，シミュレータの機能向上が必要になる。

5.3.2. 他路線への迂回行動モデル

輸送障害発生時に利用者が「待つ」か「迂回する」かの選択については，武藤が経路選択問題のモデルを応用し，運転再開までの予想時間をもとにしたモデルを作成している^[5-1]。そこで本研究では，このモデルをシミュレータに組み込み，輸送障害のシナリオに沿った形で迂回経路利用者数を予測し，迂回経路にまわる利用者をシミュレーション上から除去する。具体的には，Figure 5-2 で示すように，運転中断時も含め，何らかの情報が与えられたタイミング（以下，情報更新時刻という）に迂回判断を行なう。情報更新時刻の具体的な種類は，運転見合わせが認知された時刻（一般的には運転中断時刻と同じ），運転再開見込が案内された時刻，迂回乗車の取扱を終了した時刻等が相当する。したがって，迂回判断は，1人の利用者に対し複数回行われることもありうる。一方，一度迂回経路を選択した利用者が，当初の経路の運転再開見込時刻が早まったことを迂回経路上で認知し，当初の経路に戻ることも考えられる。しかし，迂回経路である他路線の利用中に，輸送障害の発生路線における運転再開見込み時刻の変更等，詳細な運行情報をタイムリーに得ることは困難である。また，利用者が一度変更した経路を再度変更することは，運転再開までの見込み時間が大幅に短縮される場合を除いては，経

路変更の手間を考えると稀であり、無視しても問題無い。したがって、本章のシミュレーションモデルでは、一度迂回経路を選択した利用者に対しては、再度の迂回経路選択に関する判断は行わない。

また、各利用者が迂回経路を利用するかどうかは、迂回した場合、当初の経路通りに利用した場合それぞれの予測所要時間に基づいた各経路の効用により、下記の式に基づき計算される確率で判定する。

$$P_1 = \frac{e^{U_1}}{e^{U_1} + e^{U_2}} \dots\dots\dots (5-1)$$

P_1 : 経路 1 の選択確率

U_1, U_2 : 経路 1, 経路 2 の効用

ここで、迂回をする場合の予測所要時間は、迂回経路の所要時間を用い、迂回しない場合の予測所要時間は、Figure 5-3 に則るものとする。この予測所要時間は、輸送障害発生当初、運転再開見込時刻が案内されず、利用者は実際の運転再開時刻より後の時刻に運転が再開されると自己予測している場合に相当する。その後、運転再開見込時刻が案内されると、利用者はその時刻に運転が再開されるものと考え、迂回の判断を行う。さらに、運転が再開された後も、利用者の集中、列車の詰まり等により、平常時に比べ降車駅までの所要時間が増大することが予想される。そこで、文献[5-6]の設定を参考に、再開直後の所要時間を通常時の 1.5 倍とし、振替輸送等の扱いが終了し平常運転に戻る時刻までに、この倍率が線形に減少すると仮定した。

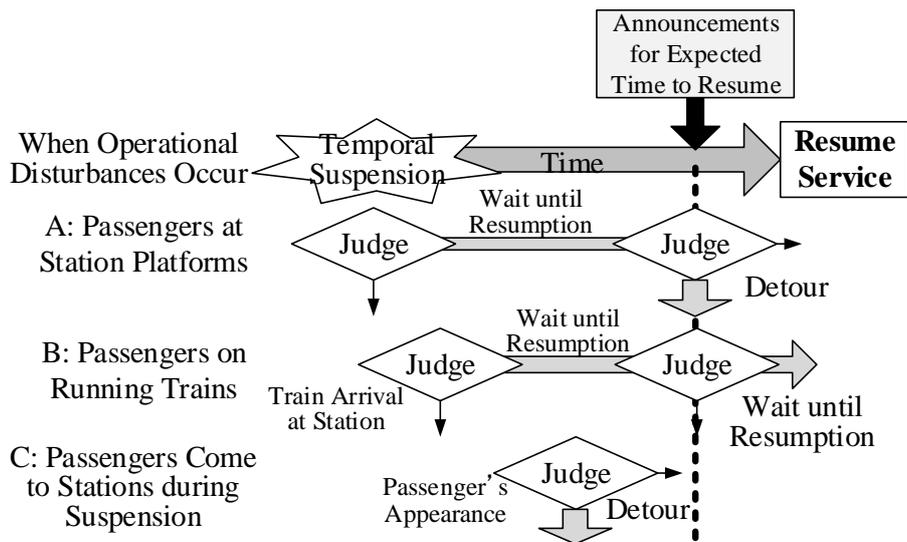


Figure 5-2 Decision making for detour behavior

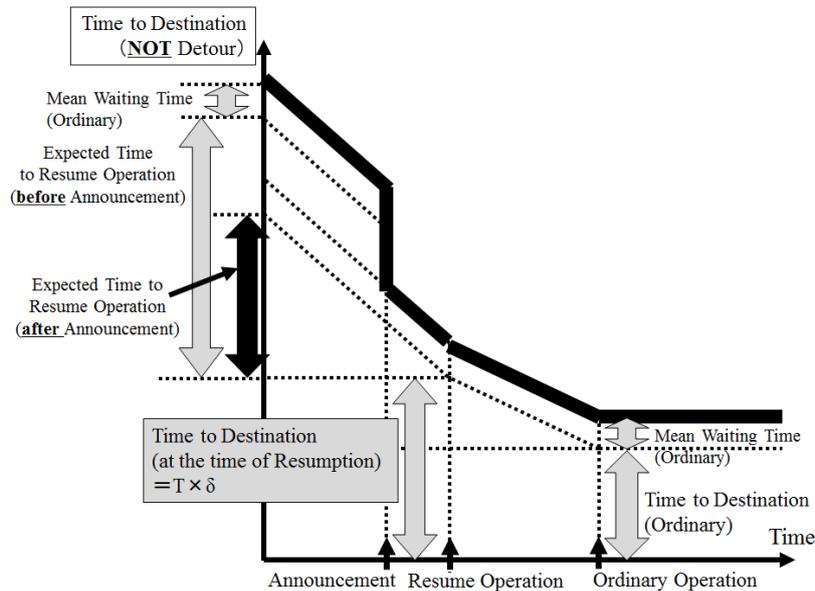


Figure 5-3 Estimation method of necessary time for passengers' destinations

5.3.3. 案内情報を反映した利用者行動モデル

ダイヤ乱れ時に利用者に提供される案内情報と利用者行動の関係について、前節までの議論を踏まえ、本研究では列車運行情報が完全に取得できるものとする前提を見直し、情報が完全には取得できない場合の行動モデルを実装する。本研究では、以下の「案内なし」タイプと「案内あり」タイプの2つを設定する。

(1) 案内なしタイプ

駅での案内や、携帯端末による情報取得が無い場合を想定したモデルである。このタイプの利用者は、基本的に全列車が計画ダイヤ通りに走ると認識するが、現在その利用者が居る駅に停車中の列車についてのみ、遅延情報を認知し、その時点での遅延時分を反映した列車経路選択を行う。また、運休等により間引かれた列車については、その次の同一方面の列車が到着したときに、その列車が運休したことを認識する。このタイプの利用者は、Figure 5-1 のケースでは、B 駅で遅れている快速列車に乗り換える。

(2) 案内ありタイプ

(1)とは逆で、駅での案内や、携帯端末による情報取得により、全ての列車の運行状況を把握する場合を想定したモデルである。このタイプの利用者は、全列車の運行状況(遅延、運休等)を完全に認識している。また、今後の運行時刻については、現在の各列車の遅延時分がそのまま継続するものとする。このタイプの利用者は、Figure 5-1 のケースでは、B 駅で遅れている快速列車に乗り換えず、普通列車でC 駅まで向かう。

現実にはもちろん、案内がある場合でも、その案内がどれだけ詳細、正確なものか、仮に案内されたとして、利用者がそれをどれほど信じ情報を活用するかも、利用者の行

動に影響を与える。しかし、不完全な情報のみ案内される状況、および一部の情報のみ活用する状況を、利用者個々に対して詳細に設定するのは、現実的には困難である。また、案内なし／ありの両極端の状況を想定、評価することで、中間的な状況下での評価は、その範囲内と推定可能である。そこで本研究の案内ありタイプでは、利用者への案内は正確になされ、各利用者は案内情報を全面的に信用し活用するものとする。

5.3.4. 案内ダイヤによる列車選択行動モデルの実装

前節の旅客行動モデルをシミュレーションシステムに実装するため、案内ダイヤという概念を導入する。案内ダイヤとは、計画ダイヤや実際に列車が運行されるダイヤ（実績ダイヤ）とは異なり、利用者が降車駅までの列車乗継経路を探索するために利用する、「今後このように列車が運行されるだろう」と考えるダイヤである。したがって案内ダイヤは、実態としては、各利用者の頭の中にあるダイヤで、各利用者の収集運行情報、および案内情報に対し、どの程度正しいと考えるのか、に基づき作成される。このうち、案内情報を正しいと信じる度合いに関しては、個別の利用者に対する考え方の把握、および分類は、現実的には困難である。したがって本研究では、収集運行情報による影響のみを表現する。具体的には、前節で設定した2つのタイプを利用者の情報取得属性とし、各属性の案内情報に応じた案内ダイヤを作成する。

一方、各利用者の情報取得属性は、その利用者が携帯端末等により運行情報にアクセスするか否かという、利用者による相違だけでなく、利用者が現在居る駅での情報取得環境（運行状況案内板があるか否か、適切な運行情報案内がなされているかどうか）も大きく影響する。本研究では、利用者の情報取得属性決定にあたり、Table 5-1のように、利用者の運行情報取得属性、駅の案内属性の両方を反映し、両方ともに「案内なし」の場合にのみ「案内なし属性」の利用者として、案内なしの場合の案内ダイヤ（遅延、順序変更等が反映されない所定ダイヤ）で列車乗継経路探索を行う。他の利用者は「案内あり属性」とし、案内ありの場合の案内ダイヤ（遅延、順序変更を反映したダイヤ）で探索を行う。これにより、駅での案内の有無が、各利用者の行動、および全体としての旅客流動にどのような影響を及ぼすのか、情報提供の効果についても評価可能となる。

Table 5-1 Definition of informed and non-informed passengers in this case study

Personal information devices	Guidance in the station	
	With	Without
With	Informed type	Informed type
Without	Informed type	Non-Informed type

5.3.5. シミュレータの全体構成

機能向上後のシミュレータ全体の構成を Figure 5-4 に示す。案内の有無、利用者が

情報を取得するか否かの部分を、案内ダイヤ作成システムにより作成される案内ダイヤで表現する。特に、列車に大幅な遅延が生じたときには、作成される運転整理案について、利用者へ運休、順序変更等が適切に案内されるか否かが重要で、それを運転整理案から案内ダイヤ作成システムへの矢印で表す。利用者は、案内ダイヤにしたがって、自らが乗車する列車を逐次選択し直す。このような構成にすることで、より実態に近い利用者行動、運行時刻の推定が可能となる。

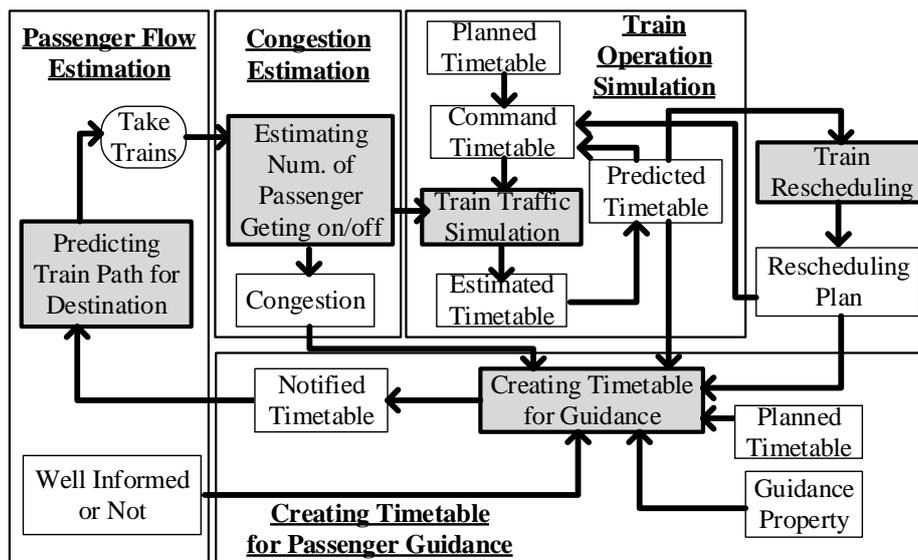


Figure 5- 4 Overview of the simulator

5.4. 利用者視点による運転整理の評価手法

本研究で提案する運転整理案評価手法を Figure 5- 5 に示す。比較評価する 2 つの運転整理案 A, B に対し、まず、自動改札機の OD データ等を利用し、整理案 A, B 実施時の旅客流動を推定するシミュレーションを行う。次に、出力される各利用者の所要時間、待ち時間、乗換回数、混雑度等、「体験する輸送サービス」を参照し、4.4.2 節の不効用値に基づき各利用者の運転整理案に対する評価値を算出する。これらの値について、全利用者の合計値を計算することにより集約し、それを各運転整理案の評価値とする。

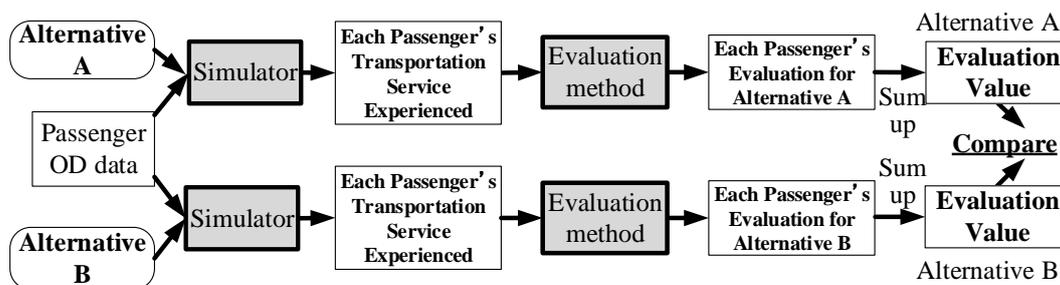


Figure 5- 5 Approach for evaluation of rescheduling alternatives

5.5. 実在路線への適用、ケーススタディによる提案手法の有効性検証

5.5.1. 路線、シナリオの概要

大都市圏のある路線を対象に、本手法を適用し、ケーススタディを実施した。この路線の概要を Figure 5- 6 に示す。ダイヤ乱れのシナリオは以下のとおりである。

- ・8:19 G 駅上り線で事故発生→列車抑止手配開始。不通区間を通る予定であった列車は、可能な限り駅のホームで停車。他列車との関係上、駅のホームに停車不可能な場合には、駅間で停車。
- ・8:20 列車抑止完了。利用者に全線運転見合わせ、迂回乗車・振替輸送実施の案内。（この後、当該路線内にいる利用者、駅に現れた利用者は皆、迂回経路を認知し、9:00 に運転再開すると自己予測）
- ・8:40 「全線での運転再開見込み時刻は 8:50」とアナウンス。事故当該列車から順次運転を再開。
- ・8:50 全列車で運転を再開。
（この間、迂回乗車・振替輸送は継続）
- ・10:10 迂回乗車・振替輸送の終了

一方、迂回経路の推定は、Figure 5- 6 の路線図で、他線により迂回ができる駅相互間の利用者のみを対象に行う。具体的には、A, B, E, J, Q, R 駅相互の利用者である。

上記のようなシナリオを設定した理由は、他線に迂回可能な区間の利用者が、時刻や状況に応じてどの程度、迂回にまわるのかを検証するためである。

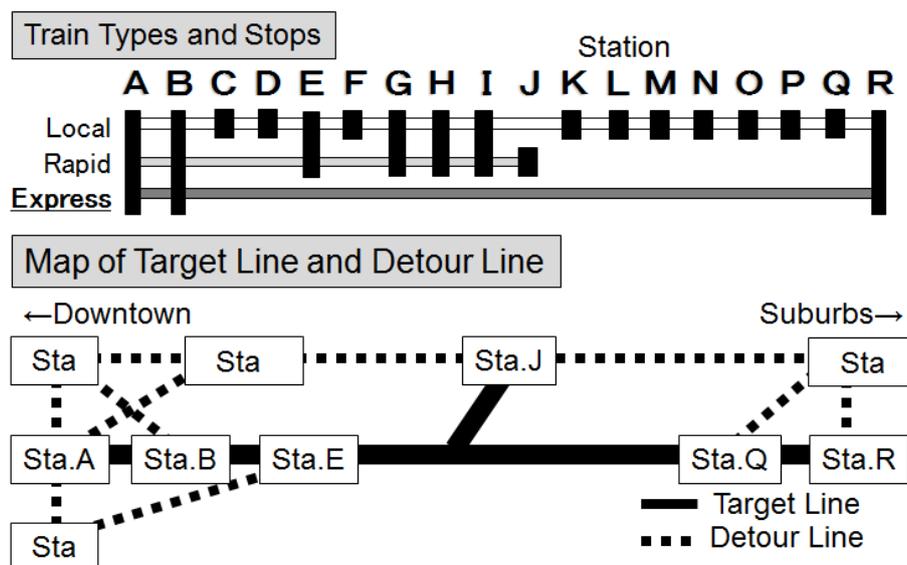


Figure 5- 6 Outline of the case study

5.5.2. 利用者の行動に関する前提と、対応する変数の設定方法

本検証における利用者の列車選択基準と、出現時刻、迂回経路選択は、下記を前提として設定した。

(1) 利用者の列車選択基準

- ・60%の利用者は、最も早く到着の列車を選ぶ
- ・20%の利用者は、乗換回避行動をとる
- ・10%の利用者は、混雑回避行動をとる
- ・10%の利用者は、乗換、混雑両方を回避する行動をとる

ここで、乗換回避の利用者については、同一ホーム上の乗換1回を乗車時間5分増加に、異なるホーム上の乗換1回を乗車時間10分増加に換算して、列車乗継経路探索を実施する。また、混雑回避の利用者は、まず1回、仮に混雑回避を行わない場合のシミュレーションを行う。そして、その結果における各列車、区間の混雑度を参照し、混雑度が150%以上の列車、区間は、その列車の駅間走行時間の2倍の走行時間を要するものと設定して、列車乗継経路探索を実施する。なお本研究では、参照する混雑度は、ダイヤ乱れが発生しない平常時の混雑度とし、その推定には、計画ダイヤに対して混雑回避行動を加味せずシミュレーションを実施し、得た混雑度を使用する。

(2) 利用者の出現時刻、迂回経路選択

各利用者の出現時刻は、ODデータの旅客数を反映したポアソン到着を前提に、設定する。なお、整理案同士の比較時に、極力同条件とするため、各シミュレーションでは同じ乱数シード値を使用とし、利用者1人1人の乗車駅出現時刻や、降車駅情報、迂回／待ち経路の予測所要時間に変化が無い場合の迂回経路選択行動は、同一に設定する。

5.5.3. 整理案①②の概要、狙い

本研究の実験で比較対象とする2つの整理案①②の一部（上り線のみ）を Figure 5-7, Figure 5-8 に示す。Figure 5-7 は、8:19 の運転中断と同時に、上下線の各列車を、先の運行可能な駅まで運行させた上で、極力駅間停車とならないように抑止させたものである。また、運転再開後の運行順序は一切変更せず、各列車とも所定通りの順序で終点の A 駅まで運行させている。

一方、Figure 5-8 は、Figure 5-7 に対し下り線の運転再開直後の2箇所の運行順序を入れ替えたものである。より具体的には、運転再開後 F 駅で特急を待避していた各停 L1 は、特急 E1 を待避することなく、終点の A 駅まで先着させている。同様に、各停 L2 の F 駅での快速 R1、特急 E2 待避も、順序変更により解消している。これにより、駅 A～H 間では先発列車が終点まで先着し、運転再開直後における混雑を分散させることを狙っている。

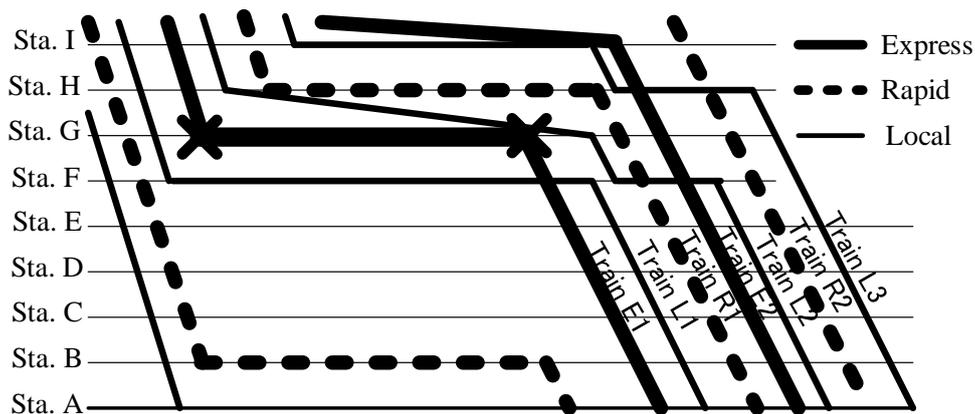


Figure 5-7 Rescheduling alternative 1

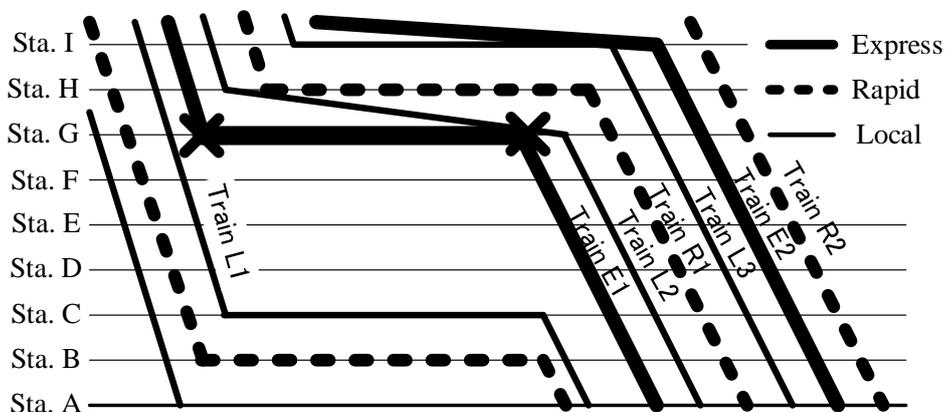


Figure 5-8 Rescheduling alternative 2

5.5.4. 整理案①②に対する適用, 評価結果 (案内なし)

上記整理案①, ②に対し, まず, 列車の順序変更の案内を一切行わなかった場合を対象にシミュレーションを実施し, 乗車人数の差分を求めたものを Table 5-2 に示す。ここで, 列車 R1 に注目すると, 整理案①②のいずれにおいても, H 駅⇒E 駅間で 2,000 人以上の乗車人数となり, 比較的混雑度が高い。これは, 整理案①においては, 列車 L2 が F 駅で列車 R1 を待避する関係で, H 駅や G 駅において, 列車 L2 から列車 E1 への乗換が発生したためと考えられる。しかし, 列車 L2 が待避せず, A 駅まで先着する整理案②においても, 同様の乗車人数の傾向である。その理由として, 案内なしの場合には, F 駅での列車 R1 待避取止めの情報を利用者が知らないため, 列車 L2 の乗客の一部が G 駅で降車し, 後続の快速列車 R1 を待つためである。

一方, 不効用値の計算対象の利用者を, この路線の各駅を 7:00~10:00 の間に出発する利用者とし, これらの利用者を対象に両整理案に対する不効用値を計算, それらの総和を算出し, 平常時の不効用値との差分により比較評価した結果を Table 5-3 に示す。Table 5-3 で値が正の項目は, ダイヤ乱れの無い平常時に比べ, 当日の不効用値が高く, 悪化している

ことを示す。一方、負となる整理案①の乗換回数項目については、当日の不効用値が平常時より低く、乗換回数は平常時よりも当日のほうが減少していることを示す。

整理案①と②を比較すると、乗換回数以外は、②のほうが各項目とも多少の減少がみられるが、乗換回数に関しては、整理案②のほうが、むしろ悪化してしまった。これは、整理案②で順序変更を行ったことが、利用者に十分周知されなかったため、整理案①で発生している乗換に加え、不要な乗換が発生しているためと推定される。具体的には、列車 R1 に乗り、E 駅で列車 L2 に乗換え、D 駅に向かおうとしたが、E 駅では列車 L2 が先に発車し、乗換えられず、結局、後続の列車 L3 を待つ、といったケースである。このように、整理案①ではなく②として、G 駅からの先発列車が終点の A 駅まで先着とした効果を出そうとしても、案内が十分に行われない状況下では、上述のような無駄な乗換が発生し、効果は限定的となるのがわかる。

Table 5- 2 Estimated number of passengers getting on each train under rescheduling alternatives 1 and 2 (without rescheduling guidance for passengers)

Estimated Num. of Passengers under Rescheduling Alternative 1

DEP.	Sta.I	Sta.H	Sta.G	Sta.F	Sta.E	Sta.D	Sta.C	Sta.B
ARR.	Sta.H	Sta.G	Sta.F	Sta.E	Sta.D	Sta.C	Sta.B	Sta.A
Train E1	319	319	319	319	319	319	319	183
Train L1	253	169	168	408	217	204	225	112
Train R1	1,119	2,044	2,147	2,147	739	739	739	475
Train E2	310	310	310	310	310	310	310	310
Train L2	223	165	52	90	113	64	39	23
Train L3	772	1,391	1,281	1,281	520	520	520	311
Train R2	1,095	205	91	103	150	25	25	14

Estimated Num. of Passengers under Rescheduling Alternative 2

DEP.	Sta.I	Sta.H	Sta.G	Sta.F	Sta.E	Sta.D	Sta.C	Sta.B
ARR.	Sta.H	Sta.G	Sta.F	Sta.E	Sta.D	Sta.C	Sta.B	Sta.A
Train L1	253	169	168	221	61	46	64	34
Train E1	319	319	319	319	319	319	319	183
Train L2	223	165	54	248	152	141	125	51
Train R1	1,119	2,047	2,135	2,135	745	745	745	478
Train L3	310	310	310	310	310	310	310	310
Train E2	772	1,392	1,295	1,295	519	519	519	309
Train R2	1,101	204	90	133	218	57	51	28

Table 5-3 Estimated disutility values under rescheduling alternatives 1 and 2
(without rescheduling guidance for passengers)

Contributing Factors	Rescheduling Alternatives ①	Rescheduling Alternatives ②	Comparing ② with ①
Whole Time on Train Cars	6,676,368	6,479,631	Decrease
Waiting Time for Trains	19,176,922	19,071,800	Decrease
Times for Transferring	-193,200	-180,000	Increase
Train Congestion	173,754	173,453	Decrease
Inconvenience in Detour Line	1,608,960	1,588,200	Decrease
Total Disutility (sum of above factors)	27,442,804	27,133,084	Decrease

5.5.5. 整理案①②に対する適用，評価結果（案内あり）

次に，運転整理案①②において，列車順序の変更が各利用者に完全に案内された場合（以下，案内ありという）の，各列車の乗車人数を

Table 5-4 に示す。整理案②により，列車 L1 の F 駅以降，列車 R1 の G 駅以降の乗員が減少し，列車 L2 の G 駅以降，列車 L3 の H 駅以降の乗員が増加している。特に列車 R1 は混雑度が比較的高い快速であるので，各停 L2 との順序変更により混雑度が低減されることは望ましいといえる。5.5.4 の「案内無し」の前提の場合には，整理案②を適用した場合にも，列車 R1 の混雑度が低下しなかったが，「案内あり」とすることで，列車 R1 の混雑度が低下したことがわかる。このように，運転整理案作成時に，混雑を分散させるべく列車順序を変更したとしても，それが利用者に正しく案内されない限りは，混雑分散の効果は生じない。本手法では，このような案内の有無が輸送サービスに与える影響について評価可能である。

一方，不効用値の計算対象の利用者を，この路線の各駅を 7:00～10:00 の間に出発する利用者とし，これらの利用者を対象に両整理案に対する不効用値を計算，それらの総和を算出し，平常時の不効用値との差分により比較評価した結果を Table 5-5 に示す。Table 5-5 で値が正の項目は，ダイヤ乱れの無い平常時に比べ，当日の不効用値が高く，悪化していることを示す。一方，負となる乗換回数の項目については，当日の不効用値が平常時より低く，乗換回数は平常時よりも当日のほうが減少していることを示す。整理案①と②を比較すると，②のほうが各項目とも不効用値の減少がみられ，輸送障害発生後に G 駅からの先発列車が終点の A 駅まで先着とした効果が出ていることがわかる。

さらに，Table 5-3，Table 5-5 の整理案②を比較すると，全体では案内なしのほうが案内ありよりも不効用値が高く，悪い評価結果となった。特に，ホーム待ち時間，乗換回数，混雑度の項目で，案内なしの場合のほうが悪化している。これは，整理案②案内なしにおいて，例えば G 駅⇒A 駅の利用者が列車 L2 を選択すれば A 駅に早く到達出来たにも関わらず，案内が無いため所定の運行順序と考え，遅く到達する列車 R1 を選択した影響によるものである。一方，Table 5-3，Table 5-5 のそれぞれで整理案①，②を比較すると，案内あ

りの Table 5- 5 のほうが、整理案①と②の効果の差が大きい。これより、整理案②での順序変更の効果をも、利用者サービスに反映させるためには、整理案②の列車順序等を利用者に適切に案内する必要があるといえる。すなわち、利用者の利便性確保のため、事業者が整理案②の順序変更のような、手の込んだ運転整理手配を行っても、それが利用者に案内されないと、利便性確保の効果が発揮出来ないことがわかる。このように、本手法では運転整理における利用者への案内の重要性について、定量的に評価することも可能である。

Table 5- 4 Estimated number of passengers getting on each train under rescheduling alternatives 1 and 2
(with rescheduling guidance for passengers)

Estimated Num. of Passengers under Rescheduling Alternative 1

DEP.	Sta.I	Sta.H	Sta.G	Sta.F	Sta.E	Sta.D	Sta.C	Sta.B
ARR.	Sta.H	Sta.G	Sta.F	Sta.E	Sta.D	Sta.C	Sta.B	Sta.A
Train E1	319	319	319	319	319	319	319	183
Train L1	253	169	168	408	217	204	225	112
Train R1	1,119	2,044	2,147	2,147	739	739	739	475
Train E2	310	310	310	310	310	310	310	310
Train L2	223	165	52	90	113	64	39	23
Train L3	772	1,391	1,281	1,281	520	520	520	311
Train R2	1,095	205	91	103	150	25	25	14

Estimated Num. of Passengers under Rescheduling Alternative 2

DEP.	Sta.I	Sta.H	Sta.G	Sta.F	Sta.E	Sta.D	Sta.C	Sta.B
ARR.	Sta.H	Sta.G	Sta.F	Sta.E	Sta.D	Sta.C	Sta.B	Sta.A
Train L1	253	169	168	221	61	46	64	34
Train E1	319	319	319	319	319	319	319	180
Train L2	223	165	290	484	285	274	258	137
Train R1	1,119	2,022	1,890	1,890	618	618	618	390
Train L3	310	310	310	310	310	310	310	310
Train E2	772	1,392	1,279	1,279	527	527	527	325
Train R2	1,101	229	115	158	218	58	52	28

Table 5- 5 Estimated disutility values under rescheduling alternatives 1 and 2
(with rescheduling guidance for passengers)

Contributing Factors	Rescheduling Alternatives ①	Rescheduling Alternatives ②	Comparing ② with ①
Whole Time on Train Cars	6,664,713	6,535,870	Decrease
Waiting Time for Trains	19,192,366	18,917,428	Decrease
Times for Transferring	-195,000	-217,200	Decrease
Train Congestion	173,527	151,428	Decrease
Inconvenience in Detour Line	1,608,960	1,596,180	Decrease
Total Disutility (sum of above factors)	27,444,566	26,983,706	Decrease

5.6. まとめ

本章では、運転整理案を利用者の視点から適切に評価するため、4章の平常時の列車運行・旅客行動シミュレータを機能向上し、ダイヤ乱れ時に旅客流動に影響を及ぼす他路線への迂回行動、利用者への案内の有無を考慮したシミュレーションシステムを構築した。また、実在路線を対象に、輸送障害発生を想定した運転整理案を複数作成し、比較評価を行った。その結果、構築したシステムが、個々の利用者の視点から運転整理案を評価することが出来ること、迂回や案内など、ソフト面の対応を含めた評価が可能であることがわかった。さらに、運転再開後の運転整理手法や、利用者への情報提供を変化させたケーススタディにより、普通列車における快速や急行の待避を、順序変更により解消し、先発列車が終着駅に先着するよう変更することは、混雑の平準化の面から有効であることや、利用者に対する運転整理内容の案内が重要であり、案内が行われない状況下では、順序変更を行っても、混雑平準化の効果は発揮されないことを明らかにした。

今後の課題として、様々な路線へ適用することによる評価手法の妥当性検証、利用者の不満足度評価モデル¹⁵⁻¹⁷⁾に基づく運転整理案の評価、望ましい運転整理案を自動で導出するアルゴリズムの構築が挙げられる。

利用者の不満足度評価モデルは、ダイヤ乱れ時の運転整理に対する利用者の心理的な不満足度を、Web アンケート調査を利用して調査、構築したモデルで、利用者の所要時間増等の物理的な迷惑だけでなく、案内の不適切さや急ぎ度合い等も反映したものである。本研究で提案した手法では、4.4.2節の不効用値以外にも、不満足度評価モデルに基づく評価尺度も使用することもできる。これにより、例えば、利用者からの苦情の件数を減少させる等の目的で、運転整理を分析することが可能になる。

このように、輸送障害時に望ましい対応を、運転整理案だけでなく、案内方法や迂回経路の利用可能性等を含め、総合的に評価、検討していきたいと考える。

5章の参考文献

- [5-1] 武藤雅威: “運転再開時における旅客数の予測手法の開発”, 鉄道総研報告, Vol. 22, No. 6, pp.17-22 (2008)
- [5-2] Van der Hurk, E., Kroon, L.G., Maroti, G., Bouman, P., Vervest, P.H.M.: “Network reduction and dynamic forecasting of passenger flows for disruption management”, Proc. of the 5th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (RailCopenhagen2013) (2013)
- [5-3] Dollevoet, T., Huisman, D., Schmidt, M., Schöbel, A.: “Delay management with rerouting of passengers”, Transportation Science No.46(1), pp.74–89 (2012)
- [5-4] 千種健二, 佐藤圭介, 古関隆章: “混合整数計画法に基づく列車運行乱れ時の旅行時間増大量に主眼を置いた運転整理最適化”, 電気学会論文誌 D, Vol.132, No.2, pp.170-177 (2012)

- [5-5] 大橋和也, 森拓哉, 古関隆章: “運転整理時における乗車率に応じた旅客行動のモデル化”, 電気学会論文誌 D, Vol.135, No.4, pp.438-443 (2015)
- [5-6] 土屋隆司, 山内香奈, 杉山陽一, 藤浪浩平, 有澤理一郎, 中川剛志: “列車ダイヤ乱れ時における経路選択支援システムとその利用者行動への影響把握”, LO-005, FIT2006 (2006)
- [5-7] 山内香奈, 平井力: “ダイヤ乱れ時の利用者不満モデルに基づく運転整理案評価手法”, 鉄道総研報告, Vol.25, No.12, pp.11-16 (2011)

6. 結言

6.1. 研究成果の要約

本論文では、鉄道利用者の利便性向上を実現可能な、輸送計画の作成、運行管理の実施を目的に、利用者の需要を表すデータを活用し、ある輸送計画、運転整理実施時の列車運行状況や旅客流動を再現し、1人1人の利用者の体験する輸送サービスの観点から、輸送計画や運転整理を評価する手法を構築した。また、実在路線への適用により、日々の利用者の需要にあわせ、輸送計画を弾力的に変更するデマンド指向輸送が、利便性向上に有効であることや、個々の利用者が体験する輸送サービスを評価、集約する手法により、輸送計画を評価することで、輸送計画の変更により便利／不便になる利用者の双方を考慮した、総合的な評価が可能であること、ダイヤ乱れ時における列車順序変更等の運転整理が効果を発揮するためには、利用者に対する適切な案内が重要であることを明らかにした。

第3章では、利用者デマンドが「出発駅、到着駅、到着駅に着きたい時刻」のデータで与えられるとき、どの列車に乗り、どこで乗換え、いつ目的地に着くのか、個々の利用者の列車乗継経路を推定、評価したうえで、列車の混雑や不満発生箇所の解消といった輸送計画を改良し、デマンドに合わせた利便性の高い輸送計画を作成するアルゴリズムを構築した。また、実在路線を対象とした実験により、提案アルゴリズムにより作成された輸送計画の有用性、および、このアルゴリズムによりデマンド指向輸送が効果的に実施可能であることを確認した。

第4章では、主に大都市圏の通勤路線の混雑時間帯において、列車の混雑による遅延発生と、その遅延により列車の混雑が増大するという、混雑と遅延の相互作用を再現する列車運行・旅客行動シミュレーション手法を開発した。また、開発した手法を用いて、各利用者の列車乗継行動を推定したうえで、利用者の体験する輸送サービスを評価し、それを集約することで、輸送計画を客観的、定量的に評価する手法を提案した。さらに、実在路線を対象としたケーススタディにより、輸送計画の変更により便利／不便になる利用者の双方を考慮した総合的な評価が、輸送計画の実施前に事前に可能であることを確認した。

5章では、運転整理案を利用者の視点から適切に評価するため、4章の平常時の列車運行・旅客行動シミュレータを機能向上し、ダイヤ乱れ時に旅客流動に影響を及ぼす、他路線への迂回行動や、利用者への案内を考慮した列車運行・旅客行動シミュレーション手法を開発した。また、実在路線を対象に、複数の運転整理案を比較評価した結果、提案手法により、個々の利用者の視点から運転整理案を評価可能なことを確認した。さらに、利用者への情報提供を変化させたケーススタディにより、列車順序変更等の運転整理が効果を発揮するためには、利用者に対する適切な案内が重要であることを明らかにした。

以上の議論を踏まえると、輸送計画の将来のあるべき姿として、日々の利用者のデマンドを反映し、輸送計画を弾力的に変更する、デマンド指向輸送による一層の利便性向上が考えられる。また、運転整理の将来像として、混雑平準化のための状況に応じた積極的、機動的な運転整理の実施と、IT デバイスを活用した積極的、機動的な利用者案内の組合

せによる、利用者に対する利便性低下防止が考えられる。両者ともに、列車運行を、その時々々の利用者デマンドや運行状況に応じ、フレキシブルに変更し、利用者にもリアルタイムに周知をするという点で、共通点が多いと考えられる。

以上、本論文では、まず、利用者の要求に合致した、利便性の高い輸送計画の作成、運行管理の実施を目的に、従来、明示的に反映されてこなかった、日々の利用者デマンドデータを直接使用し、事業者の運行コストとのバランスが取れた輸送計画を自動で作成する、デマンド指向輸送が実現可能なアルゴリズムを構築した。それをを用いて、利用者の集中による列車の混雑と、混雑に起因する列車遅延の発生を考慮した、利用者の列車乗継経路推定手法を開発した。計画の品質を、個々の利用者が体験する輸送サービスの観点で、定量的に評価する手法を提案、構築した。さらに、その評価法をダイヤ乱れ時における運転整理にも拡張し、迂回経路選択モデルの組み込みや、利用者への案内情報を考慮した列車乗継経路推定手法を構築した。これらの一連の旅客行動の推定法と運行計画の評価法の構築を通じ、これまで実務的に困難とされてきた、運転整理案を利用者の視点からの系統的な定量評価を可能としたものである。

6.2. 今後の課題

今後の主な課題として、①提案手法の様々な輸送改善施策の評価への活用、②粒度のより細かい利用者データの活用、③リアルタイムに取得する実績データを活用した運行管理手法の開発、④より適切な評価尺度の構築が挙げられる。

①の輸送改善施策については、輸送障害時の利便性低下防止のための折返し設備の新設や、車両（号車）による混雑の偏りの平準化のための駅出口階段の新設が考えられる。今後、これら様々な輸送改善施策を、各利用者の利便性の観点で評価していきたい。さらに、列車運行のレジリエンスの観点から、例えば、輸送障害発生時に、折返し運転等による運転整理、利便性確保が行いやすい輸送計画か否かを評価する等、輸送計画を従来とは別の観点で評価していくことも考えられる。

②の粒度のより細かい利用者データの活用については、本論文でを使用した利用者データに以下の問題がある。すなわち、本論文では、自動改札機で取得可能な「入場駅、出場駅、券種、出場駅の出場時間帯、人数」の形を想定した。これは、利用区間、時間帯毎に人数を集計したデータであり、個々の利用者の明細データではない。したがって、出場時間帯の幅が2時間となるケース等では、その時間帯内の利用者の分布が不明であるため、粒度が粗く詳細なデータであるとは言い難い。その結果、例えば他路線からの乗換等で利用が多い時刻に、ピンポイントで増発する等の対応は、このデータのみからでは困難である、という課題が生じる。上記の形式の、粒度の粗いデータをこれまで使用していた理由は、自動改札機のデータ集計機の容量の都合等である。しかし近年では、ハードディスクの性能向上により、データ容量の課題は解消され、入場、出場の1件明細の形で記録が開始され始めている。また、ICカードが普及し、その利用履歴データについても、匿名化し個人

情報に配慮すれば、活用可能となってきた。さらに、携帯電話の位置情報データや、SNS の投稿データ、ホームや車内の防犯カメラ画像についても、同様に個人情報に配慮することにより、活用が考えられるようになってきた。このような、最近新たに取得可能となった、粒度の細かいデータを活用することで、各利用者の列車乗継経路の推定精度が向上することが期待される。このような粒度の細かな新しい利用者データを活用した列車乗継経路推定手法、輸送計画評価手法の構築、実装も、今後の課題である。

③に挙げたリアルタイムに取得可能な、実績データを活用した運行管理手法に関しては、近年、各列車の実績運行時刻データや、応荷重装置を用いた乗車人数データが、収集、蓄積されている。また、これらのデータをリアルタイムに取得し、当日の運行管理に活用することも検討されている。実績運行時刻や乗車人数に関するリアルタイムデータを活用して、利用者の列車乗継経路を推定し、輸送計画を評価する手法も、検討していきたい。

④の評価尺度に関しては、本論文で使用した 4.4.2 節の不効用値以外にも、利用者の輸送サービスに対する評価手法をアンケート調査により構築した研究、手法が存在する^[6-1]^[6-2]。これらの適用や、対象路線の特性を踏まえ、アンケート調査により新たな評価尺度を構築することも考えられる。

その他にも、より実務的な観点から、推定結果の検証、列車乗継推定アルゴリズムの高速化、デマンド輸送実現のための、輸送計画や運転整理の情報提供手法の構築も課題である。例えば、仮にアルゴリズムの大幅な高速化が実現すれば、1つの輸送計画作成ソフトウェアの中で、ある輸送計画案に対する乗車人数を推定、担当者が結果を確認し、著しい混雑が推定される列車等、輸送計画案の課題箇所をその場ですぐに修正し、再度、乗車人数を推定して課題の解消を確認するといった、乗車人数推定によるユーザとの対話型の輸送計画作成システムも実現できる。このような取組みを進め、輸送計画業務の更なる品質向上、効率化を図ることで、事業者の実務面で貢献するとともに、利便性向上による鉄道の魅力向上にも繋げていきたい。

6 章の参考文献

- [6-1] 村越暁子，國松武俊，齋藤綾乃：“列車ダイヤに対する顧客満足度の予測”，鉄道総研報告，Vol.22, No.7, pp.49-54 (2008)
- [6-2] 山内香奈，平井力：“ダイヤ乱れ時の利用者不満モデルに基づく運転整理案評価手法”，鉄道総研報告，Vol.25, No.12, pp.11-16 (2011)

謝辞

本研究を遂行し、学位論文をまとめるにあたっては、指導教官である東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻教授の古関隆章先生に、ご多忙の中、多くのご支援、ご指導を賜りました。特に、勤務先での取組みを学位論文として執筆するにあたり、学術的な観点から様々なご指摘、コメントを賜り、その内容を議論することを通じて、研究が深まり、高い品質の成果と、学位論文の完成に繋がったと考えております。また、企業研究所に勤務しながらの学位取得に際し、効率的に進められるよう、打合せ方法、事務手続き等についても、多くのご高配を賜りました。さらに、私自身の至らない点で、先生にご迷惑をおかけする中、適宜、温かく励ましていただきながら、ご指導、ご支援を賜ったことについても、厚く御礼申し上げます。

東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻教授の堀洋一先生、大崎博之先生、相田仁先生には、審査の副査として、本研究に対し、貴重な多くのご意見、ご助言を賜りました。特に、本研究で得られた結果に対し、多角的な視点による分析を追加することで、学位論文の一層の品質向上に繋がったと考えております。

千葉工業大学情報科学部情報工学科教授の富井規雄先生は、私が 2004 年に今の勤務先に入社した当時の上司であり、本学位論文の研究内容に対する長期間のご指導だけでなく、研究者、企業人としての研究や業務の進め方について、基礎から様々なご指導を賜りました。今、振り返って考えると、先生のご指導、ご高配により、私が若いうちから、鉄道運輸分野の国内外の多くの研究者、技術者に接する機会に恵まれました。また、鉄道事業者の指令室等の現場見学や、実務ご担当者と接する機会も多く設定いただき、他ではできない、本分野の研究者としての大変貴重な経験を積むことが出来たと考えています。私の研究者人生の第一歩にあたり、最初に先生のもとで、親身で丁寧にご指導、ご支援を賜ったからこそ、現在の自分があると考えています。

鉄道総合技術研究所信号・情報技術研究部運転システム研究室長の平井力博士には、本研究の共同研究者として、また職場の上司として、本研究を実務的に進めるうえで、長期にわたり多くのご指導、ご支援を賜りました。入社以来、頼もしい先輩として、至らない私の些細な相談やお願いにも、ご多忙の中、嫌な顔せずにご丁寧にご対応、ご指導を賜りました。おかげさまで、研究開発業務を円滑に進めるだけでなく、研究者、企業人として私自身も成長出来たと考えています。

また、本研究の実施にあたっては、数多くの鉄道事業者様から、実在路線のダイヤデータ、利用者 OD データ等のご提供と、分析結果に対する有益なご助言を賜りました。様々な実在路線への適用により、提案手法の有用性が確認され、研究成果の向上に繋がったと考えています。

鉄道総合技術研究所 信号・情報技術研究部長の川崎邦弘氏、運転システム研究室の坂口隆氏、武内陽子氏には、日頃の業務において、未熟な私に対し、的確なご指導をいただいていることを、深く感謝申し上げます。同研究室の辰井大祐氏、加藤怜氏、熊澤一将氏、瀧本友晴氏、中挾晃介氏にも、日頃より多くのご支援をいただいております。感謝の意を表します。また、元研究部長である田中幹夫博士、後藤浩一博士、土屋隆司氏、平栗滋人氏、および元研究室長である福村直登氏にも、過去に本研究を実務的に進める上で、数多くのご指導、ご支援を賜りましたことを、厚く

御礼申し上げます。さらに、過去に運転システム研究室に在籍していた、佐藤圭介博士、寺澤孝彦氏、渡辺義大氏、石原裕介氏、松本康弘氏、近藤繁樹氏には、本研究の関連研究と一緒に取り組み、ご支援をいただきました。そこで得られた多くの知見やノウハウも、本研究の成果に繋がっていると考えています。

株式会社ジェイアール総研情報システムの高場基司氏をはじめとする、同社のプログラムの皆様には、本研究で提案した手法に基づき、列車運行・旅客行動シミュレータのプログラムを作成いただき、システムとして形にいただきました。高品質なプログラムを迅速に作成いただいたことは、本研究の提案手法の実現可能性を証明し、ケーススタディにより有効性を確認するうえで大変重要で、本研究の遂行に無くてはならぬご支援であったと考えています。

さらに、現在の勤務先以外でも、私が幹事や幹事補佐として参加した、電気学会の鉄道における運行計画・運行管理に関する調査専門委員会と、鉄道の運転に関する概念と用語の国際比較と標準化検討調査専門委員会では、ご一緒させていただいた大学の先生方、鉄道事業者の実務ご担当者、メーカーの技術者の皆様と、大変熱心な議論に参加させていただき、その過程で様々な貴重な勉強をさせていただきました。また、私が 2009-10 年度に鉄道事業者への出向でお世話になった、東京地下鉄株式会社運転部輸送課の皆様には、輸送計画の作成業務、運行管理業務等、数多くの貴重な実務経験をさせていただき、研究所に勤務していたのでは得られない知見、ノウハウを得ることが出来ました。それらも、本研究の実務的有用性の向上に、大いに貢献していると考えます。他にも、ここには書ききれませんが、不勉強な私に対し、多くの研究者、技術者、実務者の皆様から、鉄道運輸に関する多様な知識をご教示いただけたからこそ、本研究が遂行出来たと考えています。

今後は、お世話になった先生方、技術者、事業者の実務者の皆様と、私の勤務先にしっかり恩返しをすべく、1つ1つの研究開発にしっかり着実に取り組み、高い品質の成果を出し、展開していくことで、鉄道運輸分野の技術の更なる発展と、魅力的で利便性の高い鉄道の実現に貢献していきたいと考えています。

最後に、私の業務や学位取得活動を、日常生活面から全面的に支えていただいた、家族である妻の悠子、息子の隼、娘の佳歩と、私を育ててくれた両親に、心から感謝の意を表します。

研究業績

学術誌原著論文

- [1] 國松武俊, 平井力, 富井規雄: “利用者デマンドを反映した列車ダイヤ作成アルゴリズム”, 電気学会論文誌 D, Vol.129, No.1 (2009) (第 3 章関連)
- [2] Akiko Murakoshi, Taketoshi Kunimatsu, Ayano Saito: “Basic Features of Customer Satisfaction with Train Schedules”, Journal of Mechanical Systems for Transportation and Logistics”, Vol. 3, No. 1 (2010)
- [3] 國松武俊, 平井力, 富井規雄: “マイクロシミュレーションを用いた利用者の視点による列車ダイヤ評価手法”, 電気学会論文誌 D, Vol.130, No.4 (2010) (第 4 章関連)
- [4] 國松武俊, 平井力, 富井規雄: “マイクロシミュレーションを用いた利用者の視点による運転整理案評価手法”, 電気学会論文誌 D, Vol.133, No.7 (2013) (第 5 章関連)
- [5] 武内陽子, 坂口隆, 熊澤一将, 國松武俊, 佐藤圭介: “高機能な列車運行・旅客行動シミュレータの開発と列車運行の多面的評価”, 電気学会論文誌 D, Vol.135, No.4 (2015)
- [6] 國松武俊, 寺澤孝彦, 武内陽子: “移動閉そく・予測制御に対応した列車運行シミュレータの構築”, 電気学会論文誌 D, Vol.138, No.4 (2018)

国際会議論文

- [1] Chikara Hirai, Taketoshi Kunimatsu, Norio Tomii, Motoshi Takaba : "MODELING AND SOLVING THE TRAIN STOP DEPLOYMENT PLANNING PROBLEM," ASC2008, IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing, Palma de Mallorca, Sep. (2008)
- [2] Taketoshi Kunimatsu, Chikara Hirai, Norio Tomii, Motoshi Takaba : "Evaluation of timetables by estimating passengers' personal disutility using micro-simulation," RailZurich2009-The 3rd International Seminar on Railway Operations Modeling and Analysis, Zurich, Feb. (2009)
- [3] Akiko Murakoshi, Taketoshi Kunimatsu, Ayano Saito: "CUSTOMER SATISFACTION WITH TRAIN SCHEDULES," International Symposium on Speed-up, Safety and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2009 (STECH' 09), Niigata, June (2009)
- [4] Taketoshi Kunimatsu, Chikara Hirai, Norio Tomii: "TRAIN TIMETABLING ALGORITHM BASED ON PASSENGERS' DEMANDS," International Symposium on Speed-up, Safety and Service Technology for Railway and Maglev Systems 2009 (STECH' 09), Niigata, June (2009)
- [5] Taketoshi Kunimatsu, Takashi Sakaguchi, Yusuke Ishihara : "Evaluation of facility improvements from the viewpoints of service level robustness for passengers,"

RailCopenhagen2013-The 5th International Seminar on Railway Operations Modeling and Analysis, Copenhagen, May (2013)

- [6] **Taketoshi Kunimatsu**, Chikara Hirai: "Prediction of Passenger Flow under Transport Disturbance Using Accumulated Passenger Data," COMPRAIL2014- The 14th International Conference on Railway Engineering Design and Optimisation, Rome, June (2014)
- [7] **Taketoshi Kunimatsu**: " Microscopic timetable simulation and evaluation reflecting traffic control policies and passengers' competition towards seating," RailTokyo2015-The 6th International Seminar on Railway Operations Modeling and Analysis, Tokyo, March (2015)
- [8] Yoichi Sugiyama, Mitsuyoshi Fukuda, **Taketoshi Kunimatsu**, Daisuke Tatsui: " Improvement of train traffic control functions," WCRR 2016 11th World Congress on Railway Research Congress Proceedings, Milan, July. 2016.
- [9] Daisuke Tatsui, **Taketoshi Kunimatsu**, Takashi Sakaguchi: "Interactive Timetabling System with Function of Estimating Train Congestion on Timetable Planned," COMPRAIL2016- The 15th International Conference on Railway Engineering Design and Optimisation, Madrid, July (2016)
- [10] **Taketoshi Kunimatsu**, Daisuke Tatsui, Chikara Hirai, Masato Yoneda : " Estimation method for passengers' train paths under elaborate timetables in peak hours which reflects train capacity and passengers' preference for limited express trains," RailLille2017-The 7th International Seminar on Railway Operations Modeling and Analysis, Lille, April (2017)

国内学会・研究会・シンポジウム・その他口頭発表（主要なもの）

- [1] **國松武俊**, 近藤繁樹, 平井力, 富井規雄: “駅サービス指数による運転整理案評価の試み”, 電気学会産業応用部門大会 (2005)
- [2] **國松武俊**, 平井力, 富井規雄: “列車運行・旅客行動シミュレータの構築”, 第13回鉄道技術・政策連合シンポジウム J-RAIL2006 (2006)
- [3] 平井力, **國松武俊**, 近藤繁樹, 平井力, 富井規雄, 高場基司: “Petri net の可達性判断に基づく異常時の列車抑止位置決定アルゴリズム”, 電気学会システム・制御研究会 (2007)
- [4] **國松武俊**, 平井力, 村木国満, 高場基司: “旅客の流動と評価に基づく運転整理案作成アルゴリズム”, 電気学会交通・電気鉄道／リニアドライブ合同研究会 (2008)
- [5] 松本康宏, **國松武俊**: “路面電車の運行状況の分析と効率的な運行実現のための方策の検討”, 電気学会交通・電気鉄道／ITS合同研究会 (2008)
- [6] **國松武俊**, 坂口隆, 石原裕介: “列車運行・旅客行動シミュレーションによる折返設備評価”, 電気学会産業応用部門大会 (2012)

- [7] 辰井大祐, **國松武俊**, 坂口隆, 石原裕介: “乗車率推定機能を有する対話型ダイヤ作成システムの構築”, 電気学会交通・電気鉄道研究会 (2012)
- [8] 辰井大祐, **國松武俊**, 坂口隆, 石原裕介: “対話型ダイヤ作成システムにおける乗車率再推定の高速化”, 電気学会産業応用部門大会 (2013)
- [9] **國松武俊**, 平井力: “利用者動向データを用いた輸送障害時の旅客流動分析・予測手法”, 鉄道サイバネ・シンポジウム (2013)
- [10] **國松武俊**, 寺澤孝彦, 武内陽子, 平山純一郎, 御木孝亮, 山下修: “移動閉そく方式に対応した列車運行シミュレーション手法の高速化”, 電気学会全国大会 (2016)
- [11] 鉄道総研プレスリリース: “イノトランス 2016 に鉄道総研の研究活動成果を展示します”, http://www.rtri.or.jp/press/u83mct0000000e1m-att/20160912_01.pdf (2016)

著書・その他刊行物（主要なもの）

- [1] 電気学会 電子・情報システム部門 情報処理技術委員会 モデリングとシミュレーション調査専門委員会編（分担執筆）: “列車運行・旅客行動シミュレータ”, モデリングとシミュレーションの現状と応用, Vol.1150 (2009)
- [2] **國松武俊**, 平井力: “乗客の動きと列車遅延をシミュレーションで再現する”, 交通新聞 2009/03/24 (2009)
- [3] 村越暁子, **國松武俊**: “利用者の満足度による列車ダイヤの評価”, 日本鉄道技術協会誌, Vol.52, No.4 (2009)
- [4] 電気学会 鉄道における運行計画・運行管理業務高度化に関する調査専門委員会編（分担執筆）: “鉄道ダイヤ回復の技術”, オーム社 (2010)
- [5] **國松武俊**, 平井力: “利用者デマンドを考慮した運転整理案作成手法”, サイバネティクス, Vol.15, No.1 (2010)
- [6] **國松武俊**: “列車ダイヤを評価するツール～列車運行・旅客行動シミュレータ～”, 運転協会誌, No.637 (2012)
- [7] **國松武俊**, 平井力: “ダイヤ乱れ時の旅客流動分析手法”, 交通新聞 2014/01/24 (2014)

国内特許

- [1] **國松武俊**, 平井力, 富井規雄: “プログラム及び列車ダイヤ作成装置”, 特許第 4727459 号, 2011/03
- [2] **國松武俊**, 平井力, 富井規雄: “プログラム及びシミュレーション作成装置”, 特許第 4773306 号, 2011/06
- [3] 武内陽子, **國松武俊**: “プログラム、運行分析方法及び運行分析装置”, 特許第 5080422 号, 2012/09
- [4] 坂口隆, **國松武俊**, 辰井大祐, 石原裕介: “プログラム及び最適移動経路算出装置”, 特許第 5891186 号, 2016/02

表彰

- [1] 2007年 電気学会優秀論文発表賞 A賞
國松武俊, 平井力, 富井規雄: “利用者への案内の有無を考慮したダイヤ乱れ時の列車運行・旅客行動シミュレーションシステム”, 電気学会産業応用部門大会 (2007)
- [2] 2012年 電気学会優秀論文発表賞 A賞
國松武俊: “確率的列車運行シミュレータを用いた高密度列車ダイヤの評価手法”, 電気学会交通・電気鉄道研究会 (2012)
- [3] 2015年 (公財) 鉄道総合技術研究所 研究開発奨励賞 (勤務先部内表彰)
“需要変動を考慮した乗車率推定手法の開発と実用化”

学協会活動・部外委員

- [1] 2006年4月～2009年3月 電気学会 鉄道における運行計画・運行管理業務高度化に関する調査専門委員会 幹事補佐
- [2] 2013年12月～2015年9月 RailTokyo2015 国内実行委員会 幹事補佐
- [3] 2013年12月～2015年10月 日本鉄道サイバネティクス協議会 調査研究委員会 第二分科会 委員
- [4] 2014年10月～2016年3月 国土交通省 東京圏における今後の都市鉄道のあり方に関する小委員会 遅延対策ワーキング・グループ 委員
- [5] 2017年4月～ 日本鉄道運転協会 運転協会誌編集委員会 常任編集委員
- [6] 2017年4月～ 電気学会 鉄道の運転に関する概念と用語の国際比較と標準化検討調査専門委員会 幹事

業務への貢献

私は、2004年の鉄道総合技術研究所入社以来、輸送情報技術研究部、および信号・情報技術研究部において、輸送計画作成、運行管理、シミュレーションに関する研究開発に従事している。その中で特に「列車運行・旅客行動シミュレータ」は、私が入社後に開発に着手し、旅客の列車乗継経路推定技術や列車遅延の予測技術を開発、改良を継続することで、鉄道事業者の輸送計画、運行管理業務を支援するとともに、鉄道総研の運輸関連の研究開発を大きくリードしてきた。

事業者の実務への貢献の観点では、具体的には、これまで5つの事業者の輸送計画(案)の評価、乗車率の推定業務を、コンサルティング形式で受注し、分析結果を事業者に報告することで、ダイヤ改正等で実施される輸送計画の品質向上に寄与した^[1]。さらに、2016年には「混雑率シミュレーションシステム」を、事業者にソフトウェアとして実用化導入し、事業者の日常的なダイヤ作成業務の一環として、開発してきた乗車率推定技術が利用されるようになった^[2]。これらは、輸送計画作成業務を、これまでの担当者の経験、主観的な判断に依存するスタイルから、学術的合理性に基づき乗車率を推定し、客観的な数字を根拠に、輸送計画や施策を判断するスタイル

ルに、業務フローを変えるきっかけにもなった。

一方、鉄道総研の運輸関連の研究開発への貢献の観点では、開発した列車運行・旅客行動シミュレータは、2009年の交通新聞^[3]に記事として掲載されたほか、2013年のITS世界会議(2013/10/14-18 東京で開催)や、2016年のInnoTrans2016(2016/09/20-23 ドイツ・ベルリンで開催)^[4]にも出展され、鉄道以外の分野も含む、国内外の多くの事業者、研究者の関心を引き寄せ、鉄道総研の技術力のアピールに貢献した。さらに、本シミュレータをベースに、運転曲線推定機能や消費電力量推定機能を付加したシミュレータが開発されるきっかけとなり、鉄道総研の運輸分野や、省エネルギーに関する研究開発の活性化にも寄与した^[5]。これらの業務の取組みが認められ、私は2015年12月に「需要変動を考慮した乗車率推定手法の開発と実用化」の内容で、勤務先部内表彰「研究開発奨励賞」を受賞した^[6]。

本研究の成果は、エネルギーのほかにも、信号・列車制御方式や列車内の構造・レイアウト等、他分野と協調した分野横断型研究開発と相性が良く、実務ニーズにも応えられる。今後も、本成果を活用、発展させ、鉄道運輸分野や鉄道総研の研究開発をリードすることで、事業者の実務や鉄道総研の業務への貢献を継続、発展していきたいと考える。

- [1] 米田将人：“混雑率予測を踏まえたダイヤの検討”，RRR, Vol.74, No.8 (2017)
- [2] **Taketoshi Kunimatsu**, Daisuke Tatsui, Chikara Hirai, Masato Yoneda：“Estimation method for passengers' train paths under elaborate timetables in peak hours which reflects train capacity and passengers' preference for limited express trains,” RailLille2017-The 7th International Seminar on Railway Operations Modeling and Analysis, Lille, April (2017) (再掲)
- [3] **國松武俊**, 平井力：“乗客の動きと列車遅延をシミュレーションで再現する”，交通新聞 2009/03/24 (2009) (再掲)
- [4] 鉄道総研プレスリリース：“イノトランス 2016 に鉄道総研の研究活動成果を展示します”，http://www.rtri.or.jp/press/u83mct0000000e1m-att/20160912_01.pdf (2016) (再掲)
- [5] 武内陽子, 坂口隆, 熊澤一将, **國松武俊**, 佐藤圭介：“高機能な列車運行・旅客行動シミュレータの開発と列車運行の多面的評価”，電気学会論文誌 D, Vol.135, No.4 (2015) (再掲)
- [6] 鉄道総研プレスリリース：“平成 27 年度創立記念日式典について”，<http://www.rtri.or.jp/press/gtgh770000000feq-att/2015121401.pdf> (2015)