

論文の内容の要旨

論文題目 動的利用者均衡配分理論に基づく渋滞ネットワークの動的制御方策の構築

A dynamic traffic control method in congested networks based on dynamic user equilibrium assignment theory

氏 名 佐津川 功季

都市圏での慢性的な交通渋滞は依然として大きな社会問題となっている。交通ネットワーク・システムでは、現在の交通状況に対応して道路利用者が行動選択をする一方、その選択に応じて道路交通性能（交通状況）が変化するという、需要・供給間に相互作用が生じている。その結果、交通施策によりシステム全体の性能がかえって低下することが起こりうる。相互作用を適切に考慮してシステムの挙動特性を理解することによって初めて、交通渋滞を解消した望ましい状態を達成するためのネットワーク交通流の制御方策を体系的かつ合理的に構築することができる。

ネットワーク交通流の制御方策に関する既往研究は、取り扱う交通状態/性能の詳細度に応じて微視的・巨視的なアプローチの2種類に大別できる。

微視的なアプローチに基づいた交通制御問題は、動的システム最適配分問題として定式化されている。この問題は、ネットワークを構成する各リンクの交通状態を記述する交通流モデルを用いた詳細予測に基づき、総旅行時間を最小化する時々刻々のフロー・パターンを求めている。しかし、一般構造ネットワークでのシステム最適配分は通常非凸計画問題として定式化されるため、大域的最適解を得ることは極めて困難である。また、混雑したネットワーク上のフロー・パターンは本質的な予測不可能性を有する。こうした混雑下における微視的な交通制御方策の脆弱性を考えると、信頼性のある制御方策の構築は困難であると考えられる。

一方巨視的なアプローチは、システム・モデルとして交通状態/性能関係を巨視的に表わす Macroscopic Fundamental Diagram (MFD) を活用するものである。MFD は各リンクの時々刻々の交通状態をネットワークレベルで集計した結果現れる、車両存在台数とネットワーク・スループット（ネットワークから流出またはトリップ終了する単位時間当たり交通量）との凸型の関数関係である。MFD を活用すれば、観測情報から車両存在台数を把握さえすれば、ネットワーク性能をリアルタイムに推定できる。そのため MFD からは、微視的なアプローチが持つ脆弱性を克服したロバストな制御方策を構築できると期待されている。しかし MFD を把握しただけでは各リンクの交通制御の方法論を導出できない。これは、何らかの交通制御方策を行った場合に、どのようなネットワーク・スループットが得られるかを予測する理論体系が確立されていないためである。

これに対して本研究は、幾つかの実証・理論研究からネットワーク・スループットを特徴づける鍵として示唆されている、渋滞パターンに着目する。渋滞パターンとは、時々刻々の待ち行列が滞留している渋滞リンクのネットワークにおける空間的なパターンおよびそ

これらの捌け交通量として定義する．ネットワーク・スループットは，原理的にこの渋滞パターンによって変化するものと考えられる．従って，渋滞パターンとネットワーク・スループットとの関係を理論的に結びつけて，ネットワーク上のどの渋滞リンクがどのようにネットワーク・スループットに影響を与えているかを解明できれば，渋滞ネットワークの制御方策の構築に大きく寄与するものと考えられる．

以上より，本研究では，渋滞パターンに基づくネットワーク・スループットの解析理論を確立し，ネットワーク・スループットを改善する渋滞リンク制御方策を構築することを目的とする．渋滞パターンとネットワーク・スループットを結びつけるための基盤理論として，本研究は動的利用者均衡配分（DUE）理論を用いる．特にこれらの関係性を解析的に理解するため，DUE の時間分解法を適用可能なネットワーク構造である *unidirectional network* に着目する．

本論文は大きく 2 つの研究内容からなる．

第一に，均衡解析の妥当性を保証するための DUE 配分の安定性に関する理論解析を行う．安定性は均衡状態が実際に起こりうることを保証する重要な性質であるが，既存の解析法が経路旅行時間の単調性という性質を要求するため，1 経路に 1 ボトルネックが存在するネットワーク以外の構造を持つネットワークでは安定性は示されていない．これに対し本研究では単調性を必要としない方法として，ゲーム理論の枠組みから安定性を解析する新たな方法論を構築する．そしてゆらぎを含む動的システムの安定性概念である確率的に安定な均衡が存在することを示す．

第二に，渋滞パターンとネットワーク・スループットとの関係を理論的に定式化し，ネットワーク・スループットを改善するネットワーク制御方策を構築する．ここでは，観測される渋滞パターンを与件としてネットワーク・スループットを導出する問題を構築する．そして，この問題を解くことで得られる解析式の感度分析を行い，ネットワーク・スループットを改善するために容量を増強または抑制すべき渋滞リンクを明らかにする．

本論文は全 7 章から構成される．各章の内容の要約を以下に記す．

第 1 章では本研究の背景と目的を述べる．ここでは，動的な交通ネットワーク制御方策の必要性を論じ，それに対する既往研究の限界を指摘している．これらを踏まえた上で，本研究の着眼点を示した後，目的および内容をまとめる．

第 2 章では利用者均衡配分の定式化と均衡状態の数理特性の解析の基礎について説明した後，動的な交通ネットワーク制御方策に関する既往研究を整理する．ここでは微視的アプローチである動的システム最適配分と巨視的アプローチである MFD アプローチの二つに研究を大別し，それらの特徴・問題点を整理する．それを踏まえ本研究の位置付けを明確化する．

第 3 章では，第 4 章において DUE の安定性を解析するための準備として，流体モデルの時間分解特性が示唆されている *unidirectional network* での粒子モデルの時間分解特性を明らかにする．

第 4 章では，ゲーム理論の枠組みを用いて DUE の確率的安定性を解析する．まず，時間分解できるネットワークの DUE 問題は，戦略型ゲームの *weakly acyclic game* のクラスに属することを示す．次に，このクラスに関してゲーム理論分野で蓄積されてきた知見を援

用し、粒子モデルでの基本的な day-to-day ダイナミクスである better response ダイナミクスの収束性を示す。そして収束性に基づき、ゆらぎが含まれるダイナミクスの確率的安定性を示す。さらに、複数のゆらぎを含むダイナミクスの確率的安定性の解析結果を比較考察することで、ダイナミクスにおける利用者効用の厳密な改善性が、DUE 配分問題における収束性・確率的安定均衡の存在を保証するにあたり重要な役割を果たすことを示す。

次に第5章では、渋滞パターンに基づくネットワーク・スループットの解析理論を確立する。まず、DUE 配分問題を、渋滞パターンを与件として定常的に流れ得る OD 交通流率であるネットワーク・スループットを導出する問題へと変換する。この問題は逆問題の解を一意に定めるための基準として、ネットワークの車両存在台数が一定となる周期境界条件を仮定している。その結果、提案逆問題は線形方程式系で記述され、これを解くことにより渋滞パターンとネットワーク・スループットとを解析的に結びつけている。そして、ネットワーク・スループットが渋滞パターンおよび起終点の空間分布により特徴づけられることを明らかにしている。

第6章では導出した解析式の感度分析を行い、渋滞リンクの容量が変化することによるスループットの改善・低下の条件とそのメカニズムを明らかにする。ここでは、容量が変化する渋滞リンクの種類 (i. e., 上・下流ノードが起点, 通過, 終点のどれであるか) 別に網羅的に場合分けして感度を調べる。これにより、ネットワーク・スループットを改善するために容量を増強・抑制するべき渋滞リンクを、渋滞リンクの種類別に明らかにした。そして、感度分析の結果に基づき、具体的な交通制御形態として過飽和交差点での信号制御を想定し、渋滞リンク制御方策を構築する。ここではノードを信号交差点に見立てて、ノードに流入する2本のリンクに割り振られる青時間スプリットの総和が一定となる制約条件を考える。その下で、これらのリンクが両方とも渋滞状態である過飽和状態の信号交差点における交通制御として、青時間スプリット配分を調整する制御方策を提案する。さらに、提案方策は各制御主体が独立に制御可能な自律分散的な性質を持つことを示し、この方策の有効性を、数値計算を通して確認している。

第7章では本論文の結論をまとめ、今後の展望を示している。