

審査の結果の要旨

サツカワ コウキ

論文提出者氏名 佐津川 功季

本研究は、混雑した道路交通ネットワークにおける交通流制御に関して、体系的な知見を得るための理論的な検討を行ったものである。

既往の研究には、ネットワークを構成する各リンクの交通密度、交通速度や交通量などの状態量の推移を記述する交通流モデルを用いて、その状態推移を詳細に予測して総旅行時間最小化などの最適化原理にもとづき交通流を制御するという微視的なアプローチによる研究が多く存在するが、一般的な構造の交通ネットワークにおける最適配分問題は、一般には非凸計画問題として定式化され、大域的な最適解を求めることは極めて困難であるばかりでなく、混雑したネットワーク上の交通流は本質的な予測不可能性を有するため、混雑下における微視的な交通制御方策のもつ脆弱性を考えると、信頼できる交通流制御手法の構築は極めて困難だと考えられる。

こうした微視的交通流制御の困難性を克服するために、交通ネットワーク全体の巨視的状态量を用いて、これらの状態量が持つ関係性として **Macroscopic Fundamental Diagram (MFD)** が知られており、これを活用しようとする巨視的アプローチの研究も存在する。しかし、**MFD** を把握しただけでは、各リンクの交通流制御手法は導くことができない。

そこで本研究は、混雑した道路交通ネットワーク上で、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上の空間的なパターンとそれらの捌け交通量（スループット）として定義される渋滞パターンに着目し、巨視的状态量であるネットワーク全体のスループットを最大化することによって、混雑した交通ネットワークの混雑軽減・解消する為に必要な理論的枠組みの構築に取り組んでいる。渋滞パターンとネットワーク・スループットの関係を実験的に解明し、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渋滞パターンに基づき構築することを目的としている。

具体的には、動的利用者均衡配分(DUE)理論を援用して渋滞パターンとネットワーク・スループットの関係を実験的に解析し、DUE 理論解析を時間分解法により理論解析可能なネットワーク構造 **unidirectional network** を前提とした理論構築を行っている。まず、DUE 配分理論に基づく解析の妥当性を保証するため、均衡状態の安定性解析を行っている。ここではゲーム理論の枠組みを援用して、ゆらぎを含む動的システムでの安定概念である確率的安定な

均衡が存在することを理論的に導いている。次に、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理論式を、DUE 配分問題を応用することで解析的に導出した。またこの理論式の感度分析を通して、ネットワーク・スループットを改善するために、どの渋滞リンクの交通量を増大・抑制する必要があるかを導くことのできる枠組みを構築し、その妥当性を数値計算によって確認している。

本研究で得られた主な成果は以下の通りである。

- 従来の均衡状態の安定性解析法は、そのほとんどが経路旅行時間関数の単調性に基づくものであり、結果として 1 経路にボトルネックが 1 つであるネットワークに解析が限定されていた。これに対し、本研究では DUE の安定性を解析するための新たな方法論を構築した。この理論は、交通ネットワーク理論とゲーム理論のそれぞれの分野で発展してきた、粒子モデルの時間分解法と、戦略型ゲームのクラスである **weakly acyclic game**、およびゆらぎを含むダイナミクスの定常分布解析により構成される。この方法論により、**unidirectional network** における DUE の確率的安定性を証明した。
- 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、確率的安定均衡の存在に、均衡解の狭義性または適用するダイナミクスにおける利用者効用の厳密な改善性が主要な役割を果たすことを明らかにした。すなわち、経路旅行時間関数の単調性に代わる、DUE 状態の数理的性質および解析に関する新たな視点を提供することができた。
- DUE 配分問題の逆問題として、渋滞パターンを与件としたネットワーク・スループットの理論解析モデルを導出した。さらに感度分析を通して、個別渋滞リンクの捌け交通量変化に対してネットワーク・スループットの感度が正/負となる一般的条件を、各渋滞リンクの上流側・下流側ノードが起点、終点、通過点のいずれであるかによって整理できることを示した。
- 本理論により、ネットワーク・スループットを改善するための、渋滞ネットワークにおける個別リンクの具体的な交通制御のロジックを明らかにすることができた。提案する制御は渋滞リンクの捌け交通量制御という汎用性の高いものであり、かつ、各制御主体が他の主体とは独立に制御を行うことができる自律分散的な性質を持っていることが示されている。さらに、提案制御の有用性を数値解析実験により検証している。

以上、本論文は混雑した道路交通ネットワークにおける交通流制御に関して、体系的な知見を得るための理論的な検討を行ったものである。DUE の安定性解析やスループット制御法構築のための画期的な理論的なアプローチは独自性の高いものと評価できる。また本研究で得られた知見はネットワーク交通流解析・制御研究といった広い枠組みに関して新たな視座を与えるものであり、学術的新規性のみならず、工学的有用性も認められる。

よって本論文は、博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。