

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820207

研究課題名(和文) 動的なネットワーク交通流特性を内包した都市スケールの交通状態解析理論

研究課題名(英文) Development of a Theoretical Method for Analyzing Urban Traffic Performance:
Dynamic Traffic Assignment Approach

研究代表者

和田 健太郎 (Wada, Kentaro)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号：20706957

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、都市エリアの交通状態・性能を巨視的に表す「Macroscopic Fundamental Diagram」を、よりミクロなネットワーク交通流特性と結びつけて解析する方法論を構築する。具体的には、まず、ネットワーク上の渋滞パターンを与件とした動的利用者均衡モデルに対する逆問題を定式化する。この逆問題は線形方程式系で記述されており、ネットワーク全体のスループットを解析的に導出することができる。この解析式によりスループットを決定づける要素を考察するとともに、その感度分析を行い、スループットの低下を引き起こす渋滞パターンとそのメカニズムを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：This study clarifies the relationship between a Macroscopic Fundamental Diagram (MFD) and congestion patterns on a general networks with one-to-many/many-to-one OD pairs. Specifically, we formulate a new inverse problem of the dynamic user equilibrium assignment problem for a give congestion pattern. The proposed problem is formulated as a system of linear equations; by solving this, we can derive analytical formula of a network throughput consistent with the congestion pattern. Through a sensitivity analysis of this formula, we identified the types of congestion patterns that cause the decreasing of a network throughput (i.e., the mechanism of a decreasing branch of MFDs).

研究分野：交通工学

キーワード：MFD 交通ネットワーク 動的均衡配分 スループット 逆解析 交通流 渋滞

1. 研究開始当初の背景

混雑したネットワークにおける動的な交通流は本質的な“予測不可能性”を有している：予測の入力データである交通需要に対してリンク交通量が“hypersensitive”となる (Daganzo, 1998). そのため、予測に頼らないロバストな制御手法の確立は多くの都市が抱える渋滞問題解決に繋がる重要な課題である。これに対して、都市レベルの複雑な道路網(エリア)の交通状態・性能を巨視的に捉える「Macroscopic Fundamental Diagram (MFD)」が Daganzo (2007) により提案された。MFD は、時々刻々のエリアの平均密度(車両台数)と平均交通量(スループット)をプロットしたときにあらわれる(上に凸の)関数関係であり、再現性の高い well-defined MFD の存在が実証的に確認されている (Geroliminis and Daganzo, 2008).

このような MFD は、平均密度のみでエリアの交通状態をリアルタイムに観測できるため、ロバストな制御法の構築に直接繋がる有用な指標になり得る。例えば、エリア内の密度を臨界密度(平均交通量が最大となる密度)以下に保つよう流入制御することでネットワーク性能を最大化できると考えられている。しかし、MFD の概念を実用段階のものとしていくためには、「どのような条件下で well-defined MFD が発現するのか? その容量や形状はどのような要因・メカニズムで特徴付けられるのか?」といった MFD の特性を把握することが必須である。

これらの問いに対しては、エリア内のリンク密度分布が鍵となることがいくつかの理論・シミュレーション分析 (Mazlounian et al., 2010; Daganzo et al., 2011) や実証分析 (Geroliminis and Sun, 2011) により示されている。具体的には、前者は、「同一平均密度レベルにおけるリンク密度分布の分散の増加とともに平均交通量が減少すること」を示しており、また、後者では、「同一平均密度にある異なる日時のリンク密度分布が統計的に同一であれば、well-defined MFD が発現すること」を示している。しかし、これらの研究は、リンク密度分布と MFD 形状の相関関係を議論しているのみであり、そこにどのようなメカニズムが働いているかは明らかにされていない。また、上記の事実を実観測データにより確認した研究は非常に限られており、実証的な検証や知見の蓄積が乏しい。

さらに、ネットワークの物理的条件から MFD の容量・形状を解析的に近似する手法 (Daganzo and Geroliminis, 2008; Helbing, 2009) も提案されているものの、それらは極めて単純な単一道路区間の解析に基づくものであり、空間的側面 (e.g., ネットワーク構造) やドライバー特性 (e.g., 経路選択構造) を捨象している。すなわち、これらの手法は、現象理解の鍵とされるリンク密度分布を考慮できる枠組みではない。

2. 研究の目的

本研究は、道路の物理条件やネットワーク上の動的な交通流特性を考慮可能な MFD の解析理論の構築を目指す。具体的には、まず、(a) ネットワーク条件/ドライバー特性と MFD を「渋滞パターン」(リンク密度の空間的分布)を通して結びつける手法を開発する。続いて、(b) この手法を用いた系統的な感度分析により、渋滞パターンの変化が MFD に影響を与えるメカニズムを明らかにする。さらに、以上の理論分析と並行して(かつ、理論を踏まえて)、(c) 実際の都市の MFD を実証的に分析・評価する。

3. 研究の方法

(1) 理論解析

本研究で構築する手法の基盤となる理論は、時々刻々と進展する渋滞とドライバーの選択行動の相互作用を記述する枠組み“動的交通量配分 (DTA) モデル”である。提案手法の基本アイデアは、「渋滞パターンを与件とした DTA モデルの逆解析を行うことでネットワークに流れうるスループットを求める」という点である (図1を参照)。この逆解析は、線形システム方程式を解くことに帰着するため、物理条件/経路選択条件からスループットを解析的に評価することができる。

また、この評価式の解析的な感度分析から、渋滞延伸(による容量の低下)によりネットワーク全体のスループットが低下する渋滞パターンおよびそのメカニズムを分析した。

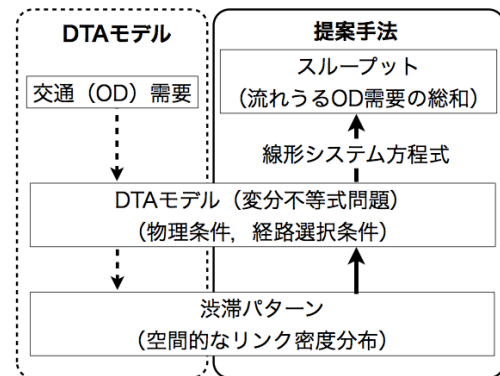


図1 提案手法の枠組み

(2) 実証分析

仙台市、京都市、那覇市、東京都の市区町村、首都高の道路網における長期間観測データ(約1年)による、MFDの実証分析を行った。具体的には、各都市のMFDがどのような形状になるのか、年間を通してどの程度ばらつくのか、MFD形状とエリア内部の交通状態(e.g., 渋滞延伸数や空間的な渋滞パターン)の関係性を分析した。

4. 研究成果

(1) 理論解析結果

1 起点多終点の一般構造を持つネットワークに対して、渋滞パターンを与件とした定常状態（ネットワーク内の車両存在台数が変化しない状態）のネットワーク全体のスループットを解析的に導出した。その結果、MFDの渋滞領域のある車両存在台数におけるスループットが、“縮約ネットワーク”（渋滞リンク同士の接続関係、OD位置、および、リンク容量パターン、図2）、から決まることが理論的に明らかになった。また、ネットワーク内の車両存在台数が時々刻々変化する動的な条件下におけるスループットも解析的に導出し、その場合には、上記の要素に加えて、OD旅行時間の変化率がMFDに影響を与えることを明らかにした。さらに、動的均衡配分シミュレーションにより数値的に求めたMFD（図3の青プロット）と理論的に導出したMFD（図3の赤および緑プロット）が概ね一致することを確認した。なお、同様の解析式を多起点1終点ネットワークに対しても導出した。

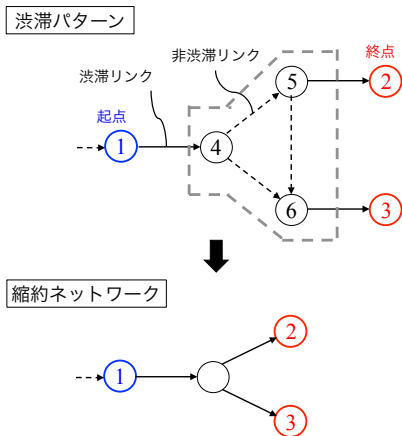


図2 縮約ネットワーク

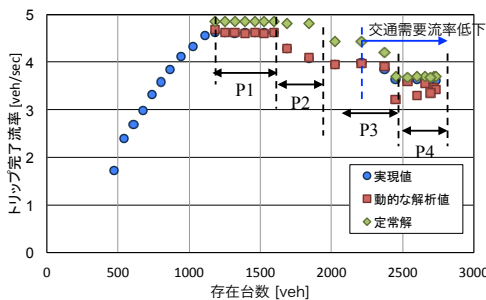
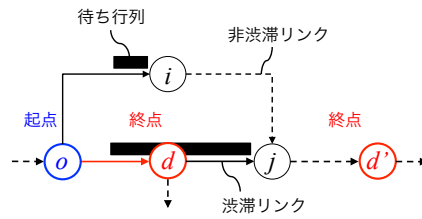


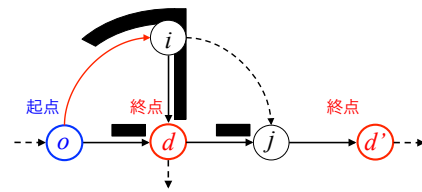
図3 MFDの実現値と理論値の比較

また、解析式の感度分析により、スループットの低下が、(a) 延伸した渋滞による終点流入フローのブロッキング現象（図4(a)）、(b) 終点流入リンク容量に占める通過交通の増加現象（図4(b)）、により引き起こされるが理論的に明らかになった。一方で、多起点1終点ネ

ットワークでは上記の(a)、(b)のメカニズムが働かないことをいくつかの例、数値実験により示した。このことから、MFDの渋滞領域発現には、異なる終点を持つフローの相互作用が重要であることがわかった。



(a) ブロッキング現象



(b) 通過交通の増加現象

図4 スループットの低下を引き起こす渋滞パターン（赤色のリンクに渋滞延伸が到達することで終点dからのスループットが低下）

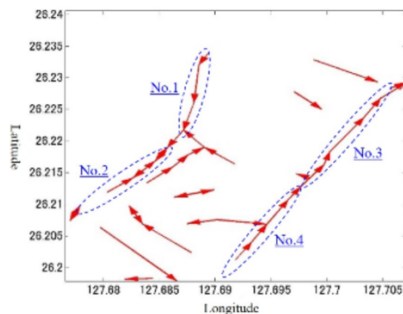
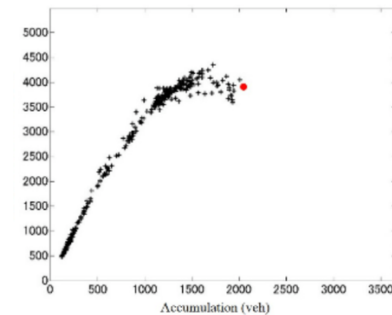


図5 MFDと渋滞パターンの対応例（上段赤点に対応する那覇市CBDの渋滞パターン）

(2) 実証分析結果

実証分析により得られた主な知見は以下の通りである：

- (i) Well-defined MFDの渋滞領域と道路ネットワーク上の空間的な渋滞パターンには対応関係がある（図5）；
- (ii) MFD渋滞領域のある車両存在台数（平均

密度)に対する走行台キロ(平均交通量)レベルが渋滞延伸数と負の比例関係にある(図6)。

このうち、(i)は理論解析の前提であり、MFDを渋滞パターンから解析する妥当性を示している。さらに、詳細な渋滞パターン分析の結果、理論解析により示唆された(a)の現象がMFDの渋滞領域発現時に生じていることが確認された(図5の点線で囲まれた部分)。一方、(ii)は、Mazlounian et al., (2010)がシミュレーション分析により示していた関係性が、現実の道路ネットワークでも成立することを示したものであり、MFD研究の知見の蓄積に貢献するものである。

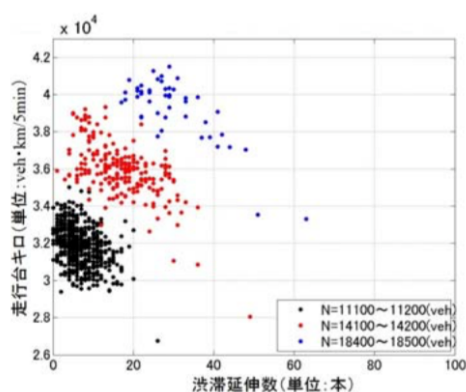


図6 車両存在台数N別の走行台キロと渋滞延伸数の関係(仙台市の例)

<引用文献>

- Daganzo, C. F.: Queue spillovers in transportation networks with a route choice, *Transp. Sci.* **32**(1), 3-11, 1998.
- Daganzo, C. F.: Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches, *Transp. Res. B* **41**(1), 49-62, 2007.
- Geroliminis, N. and Daganzo, C. F.: Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings, *Transp. Res. B* **42**(9), 759-770, 2008.
- Mazlounian, A., Geroliminis, N., and Helbing, D.: The spatial variability of vehicle densities as determinant of urban network capacity., *Phil. Trans. Roy. Soc. A* **368**(1928), 4627-47, 2010.
- Daganzo, C. F., Gayah, V. V., and Gonzales, E. J.: Macroscopic relations of urban traffic variables: Bifurcations, multivaluedness and instability, *Transp. Res. B* **45**(1), 278-288, 2011.
- Geroliminis, N. and Sun, J.: Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram for urban traffic, *Transp. Res. B* **45**(3), 605-617, 2011.
- Daganzo, C. F. and Geroliminis, N.: An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic, *Transp. Res. B* **42**(9), 771-781, 2008.
- Helbing, D.: Derivation of a fundamental diagram for urban traffic flow, *Eur. Phys. J. B* **70**(2), 229-241, 2009.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6件)

- 1) 王鵬飛, 和田健太郎, 赤松隆, 杉田正俊, 名古屋利一, 鷺見浩: 長期間観測データを用いた Macroscopic Fundamental Diagram の特徴づけ: 仙台市および京都市におけるケース・スタディ, 交通工学論文集 **2**(5), in press, 2016. (査読有)
- 2) 和田健太郎: 交通ネットワーク流の安定性と制御, 計測と制御 **55**(4), 368-375, 2016. (doi: 10.11499/sicej1.55.368) (査読有)
- 3) Takashi Akamatsu, Kentaro Wada and Shunsuke Hayashi: The corridor problem with multiple bottlenecks, *Transportation Research Part B* **81**, 808-829, 2015. (doi: 10.1016/j.trpro.2015.06.025) (査読有)
- 4) 佐津川功季, 和田健太郎: 多起点1終点ネットワークにおける巨視的な交通性能解析, 交通工学研究発表会論文集 **35**, 299-306, 2015. (査読有)
- 5) Pengfei Wang, Kentaro Wada and Takashi Akamatsu: An empirical analysis of Macroscopic Fundamental Diagram for Sendai road networks, *Interdisciplinary Information Sciences* **21**(1), 49-61, 2015. (査読有) (doi: <http://10.4036/iis.2015.49>)
- 6) 赤松隆, 和田健太郎: 動的な交通ネットワーク流問題, RAMP シンポジウム論文集 **26**, 31-46, 2014. (査読無) (<http://www.orsj.or.jp/ramp/2014/paper/1-3.pdf>)

[学会発表] (計 11件)

- 1) Kentaro Wada and Kouki Satsukawa: A theoretical analysis of Macroscopic Fundamental Diagram based on dynamic user equilibrium, The 6th International Symposium on Dynamic Traffic Assignment, 2016/6/30, Sydney, Australia, 2016. (accepted)
- 2) 王鵬飛, 赤松隆, 和田健太郎: 高速道路ネットワークにおける Macroscopic Fundamental Diagram 特性と渋滞パターンの対応関係に関する実証分析: 首都高速道路のケース・スタディ, 第53回土木計画学研究発表会, 2016/5/29, 北海道大学.
- 3) Le Thi Thuong, 佐津川功季, 和田健太郎, 大口敬, 井料(浅野)美帆: A cluster analysis of variations of Macroscopic Fundamental Diagrams: A case study in Tokyo metropolitan areas, 第53回土木計画学研究発表会, 2016/5/28, 北海道大学.
- 4) Pengfei Wang, Takashi Akamatsu and Kentaro Wada: Empirical research on the occurrence mechanism of congested regime in a Macroscopic Fundamental Diagram, The 20th International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies,

- 2015/12/12, Hong Kong, China.
- 5) Kouki Satsukawa and Kentaro Wada: Effect of origin-destination structures on network performance: Some simple examples, The 20th International Conference of Hong Kong Society for Transportation Studies, 2015/12/14, Hong Kong, China.
 - 6) 佐津川功季, 和田健太郎, 大口敬, 井料(浅野)美帆: 渋滞パターンに着目したネットワークスループットの低下メカニズムに関する分析, 第 52 回土木計画学研究発表会, 2015/11/21, 秋田大学.
 - 7) Takashi Akamatsu, Kentaro Wada and Shunsuke Hayashi: The corridor problem with multiple bottlenecks, The 21st International Symposium on Transportation and Traffic Theory, 2015/8/7, 神戸国際会議場.
 - 8) 王鵬飛, 赤松隆, 和田健太郎: Macroscopic Fundamental Diagram における渋滞領域発生メカニズムに関する実証研究, 第 51 回土木計画学研究発表会, 2015/6/6, 九州大学.
 - 9) 赤松隆, 和田健太郎, 林俊介: 複数ボトルネックをもつ通勤時刻選択問題とその均衡解, 最適化: モデリングとアルゴリズム, 2015/3/20, 統計数理研究所.
 - 10) 和田健太郎, 佐津川功季: 動的利用者均衡状態における MFD の解析: 1 起点多終点ネットワークの場合, 第 50 回土木計画学研究発表会, 2015/11/2, 鳥取大学.
 - 11) 王鵬飛, 和田健太郎, 赤松隆: 仙台市一般道路ネットワークにおける Macroscopic Fundamental Diagram に関する実証研究, 第 50 回土木計画学研究発表会, 2015/11/1, 鳥取大学.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

<http://researchmap.jp/wadaken/>

<http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/~wadaken/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

和田 健太郎 (Kentaro Wada)

東京大学・生産技術研究所・助教

研究者番号: 20706957

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし