

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04053

研究課題名(和文) 道路網の巨視的な交通量-密度関係の特性解明とそれに基づく交通流制御

研究課題名(英文) Exploration and Exploitation of Properties of Macroscopic Fundamental Diagrams for Managing Traffic Congestion in Road Networks

研究代表者

赤松 隆 (Akamatsu, Takashi)

東北大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：90262964

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、道路網全体の巨視的な交通量・密度を関係づける Macroscopic Fundamental Diagram (MFD) の特性を実証・理論の両面から解明し、その結果に基づいた交通流制御法を開発する。より具体的には、(1)国内の複数都市における大量・長期間の交通観測(路側感知器)データの系統的な分析によって、MFDの基本特性や再現性の高い well-defined MFD成立の条件を特徴づけ、(2) 実証的に得られた MFDの特性を渋滞パターンと関係づけて説明しうる理論(メカニズム・モデル)を構築し、(3) その理論を用いてネットワーク性能を改善する制御法を開発した。

研究成果の概要(英文)：This study explores the empirical properties of Macroscopic Fundamental Diagrams(MFD) linking vehicle accumulation and traffic production in road networks, and then develops traffic control methods exploiting the properties of MFDs and a theory to explain them. More specifically, (1) by analyzing long term detectors data (traffic flow-speed data observed every 1-minute throughout one year) of Japanese major cities, we revealed the basic properties of MFDs, and characterized the conditions for emergence of a well-defined MFD; (2) we developed a theory (mathematical models) to explain the mechanisms for the empirically observed properties of MFDs and the relationships between congestion patterns and MFD features; (3) we developed traffic control methods (signal control and ramp metering strategies) to improve performance (throughput) of congested networks based on the theory developed in (2).

研究分野：土木計画学，交通工学，交通計画

キーワード：道路網 渋滞 交通流 交通量-密度関係 MFD 制御

1. 研究開始当初の背景

現在、都市内道路網のリンクレベルの交通状態把握やそれに基づく局所的なリアルタイム交通制御 (e.g., 信号制御) は実施されている一方で、道路網全体の性能を向上させる実用に耐えうる制御手法は確立されていない。

その根本的な原因は、(リンクレベルでの) 制御変数と状態変数および道路網全体の性能指標との feedback 関係が非常に複雑であり、明確に把握できていない (あるいは頑健に評価できない) という点にある。

これに対して、近年、上記の時々刻々の feedback 関係を巨視的 (ネットワーク全体) レベルで頑健に評価しうる可能性を持った指標 MFD (Macroscopic Fundamental Diagram) が Daganzo (2007) によって提案されている。これは時刻毎のネットワーク平均密度 (総車両台数) と平均交通量 (スループット) をプロットしたときに現れる関数関係であり、(観測日時に強く依存しない) 再現性の高い well-defined MFD の存在が横浜エリアの道路網で実証的に確認されている (Geroliminis and Daganzo, 2008)。

Well-defined MFD は、平均密度 (状態変数) のみで対象ネットワーク全体の性能 (平均交通量) をリアルタイムで観測できるため、都市内道路網のマクロな制御法の構築に直接繋がる強力な概念になりうる。しかし、(申請者の研究も含む) その後のいくつかの実証研究では、well-defined MFD の存在が普遍的なものではなく、需要・供給条件の異なる観測日時によるばらつきやヒステリシス・ループを伴った MFD の発現が報告されている (Wang et al., 2014)。そのため、MFD の概念を実用に耐えうるレベルにするためには、「どのような条件下で well-defined MFD が成立するのか? その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。

このような問いに対して、エリア内の密度分布 (渋滞パターン) が MFD の再現性に大きな影響を与えることが Geroliminis and Sun (2011) によって示されている。しかし、この事実を確認した研究は他にはなく、実証的な検証や知見の蓄積が乏しい。また、その他の実証研究の数も限られている上に、それらは僅か数日のデータしか分析対象としておらず、一般的に信頼しうる MFD の再現性評価はなされていない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、MFD の基本特性および再現性の高い “well-defined MFD” 成立の条件を実証的・理論的に解明し、その結果に基づいた渋滞制御法を開発することである。より具体的には、①国内の複数都市における路側感知器等による大量 (数分単位・24 時間)・長期間 (数年間) の交通観測データを系統的に分析することによって、MFD の基本特性を実

証的に特徴づけ、②適切なサブ・エリア (都市内道路網を複数領域に分割したサブ・ネットワーク) 毎に well-defined MFD を構成するための方法を観測データと数理モデルの両面から明らかにし、③ well-defined MFD を活用した渋滞制御法を開発する。

3. 研究の方法

研究方法は、研究目的①～③にほぼ対応する以下の 3 つのフェイズから構成される。

第 1 フェイズでは、交通流観測データの系統的な分析によって、MFD の特性を実証的に特徴づける。より具体的には、仙台市・京都市・那覇市・横浜市の一般道路網および首都高速道路網における長期観測データ (路側車両感知器により 1 年間 365 日・5 分単位で観測された交通量・交通速度データ) に対して、各種条件別に MFD を描画・分類する。その結果から、各種条件下での MFD の基本特性および定常性/頑健性を検証する。

第 2 フェイズでは、第 1 フェイズで得られた MFD の基本特性と渋滞パターンの関連性を実証的および理論的に分析する。より具体的には、まず、実証分析の準備として、機械学習による渋滞パターン抽出法を開発する。次に、開発した手法を用い、MFD 分析を実施した上記道路網における渋滞パターンを系統的に抽出し、その渋滞パターンと MFD 特性との関係性を分析・考察する。

第 3 フェイズでは、まず、第 1, 2 フェイズで得られた MFD の特性と渋滞パターンとの関連性を説明しうる数理モデルを (動的交通流配分理論を援用し) 構築する。そして、そのモデルの解析結果を基に、MFD と渋滞パターン情報を活用した渋滞制御法を開発する。

4. 研究成果

上記の第 1 フェイズの分析の結果、対象とした多くの都市の (高速道路網は除く) 一般道路網における MFD に共通する特性として、以下の事実が明らかにされた: (1) 曜日・天候等による適切な分類下では、各グループ毎にほぼ同様の形状・特性の MFD が得られる; (2) 渋滞領域の現れる well-defined MFD は、必ずしも典型的とは言い難い (頻繁には観測されない)。一方、首都高速道路網では、(3) 分析対象領域を適切に限定すれば、well-defined MFD が定常的に観測される、ということが明らかにされた。国内外の従来研究では、長期観測データに基づいた MFD の実証分析は存在せず、well-defined MFD に関する上記事実の発見は重要な貢献と認められている (論文⑧⑫, 学会発表⑬⑭⑮⑲)。

より具体的には、(1) については、仙台・京都・横浜・那覇市等の一般道路網の分析を通じて、日々の MFD 形状は、交通需要サイドに影響を与える要因である曜日 (平日/土日祝日) と供給サイドに影響を与える要因である天候 (晴天/強雨・雪等) によって明確に

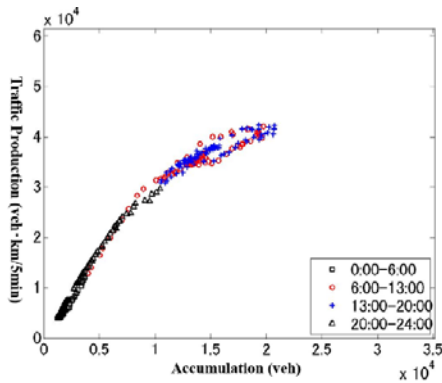


図1-a 仙台市道路網における典型的なMFD

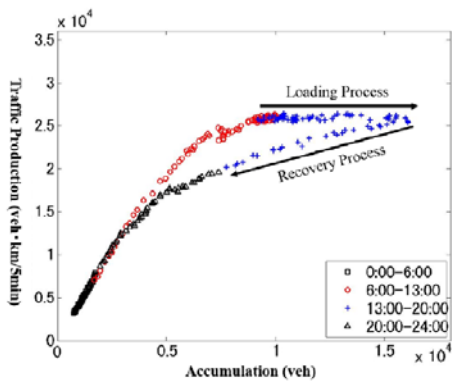


図1-b 京都市一般道路網のMFDに現れるヒステリシス・ループ

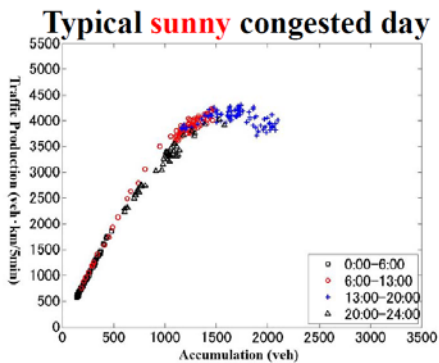


図2-a 那覇市一般道路網で現れるwell-defined MFD (典型例)

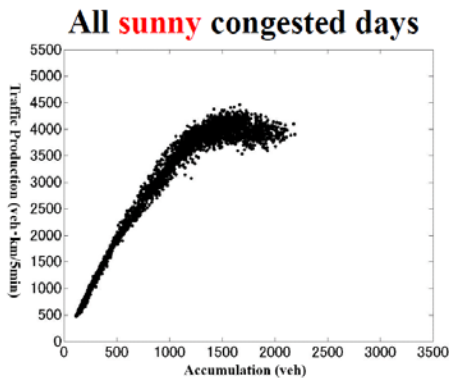


図2-b 那覇市一般道路網で現れるwell-defined MFD (発現日全体)

クラスター分類された。(2)については、仙台・京都・横浜市的一般道路網では、well-defined MFDは、(悪天候日等の例外を除くと)ほとんど観測されなかった。ただし、仙台市においては、ほぼ確実にヒステリシス・ループが発現し(図1-a)、また、京都市では、休日のみ、大きなヒステリシス・ループが発現する(走行台キロが一定を維持しつつ車両存在台数が増加し続ける)現象が観測された(図1-b)。また、本研究で分析した都市の一般道路網では、那覇市においてのみ、well-defined MFDが観測され(図2)、その発現頻度は、平日の約20%(晴天日12%、雨天日31%)であった。(3)については、都心環状線に限定すると、ほとんどの平日において、ほぼ定常的に渋滞領域を持つMFDが観測され、うち約66%はヒステリシス・ループを伴い、約30%は、明確な(ぼらつきの小さい)三角形のwell-defined MFDであった(図3)。

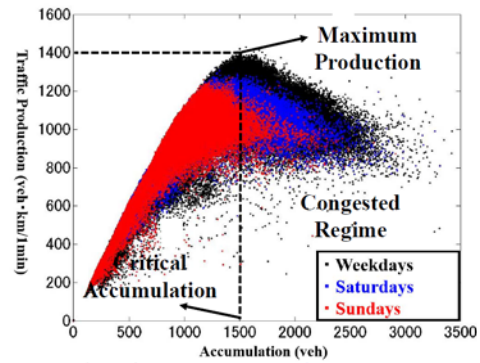


図3-a 首都高速道路・都心環状線のMFD (全データ)

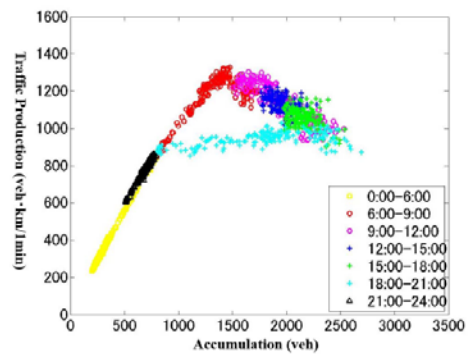


図3-b 首都高速道路・都心環状線で現れるwell-defined MFD (典型例)

第2フェイズでは、まず、頻出パターン・マイニングと系列パターン・マイニング法を組み合わせることによって、渋滞の時空間パターンを効率的に抽出する方法が開発された(論文⑦⑨⑩⑪)。そして、この手法等を用いて抽出した渋滞パターンとMFD特性との関連性(および、そのメカニズム)が実証的・理論的に明らかにされた(論文⑦⑧⑫、学会発表⑬⑭⑮)。より具体的には、まず、仙台市・京都市のMFDにおけるヒステリシス・ループ

の発現が渋滞延伸数と強く相関していることが示され、これを説明する理論として、特定の（比較的少数の）ボトルネックから進展した渋滞延伸とともに、その影響を受けるリンクの容量（捌け量）低下がネットワーク総捌け量の低下をもたらすメカニズムが提示された。次に、那覇市における MFD については、渋滞パターンを基にしたネットワークのサブ・エリア分割によって、より渋滞レジームが明瞭な well-defined MFD が得られることが明らかにされた。この渋滞レジーム発現についても、少数のボトルネックから進展した渋滞延伸による捌け容量低下によって説明されることが、比較的簡明な定量的モデルを用いて示された（これらメカニズムのより一般的な数理モデルは、第 3 フェイズの分析で明らかにされた）。

第 3 フェイズでは、動的均衡(DUE) 配分を仮定した数理モデル分析によって、多起点・1 終点 / 1 起点・多終点構造ネットワークにおける車両存在台数とトリップ完了流率の関係を解析する方法を構築した。具体的には、まず、ネットワークの物理的条件及び OD 需要から渋滞パターンを求める DUE 配分問題の逆問題、すなわち、渋滞パターンを与件として、トリップ完了率を導出する問題を定式化した。この問題は、ネットワークのマクロな性能を表すトリップ完了流率と、よりミクロな状態である渋滞パターンとを解析的に関係づけることができる。この解析式の感度分析を行うことで、待ち行列の延伸によるトリップ完了流率の低下が生じる渋滞パターンとそのメカニズムを明らかにした。すなわち、(1) トリップ完了流率が、渋滞パターンを表す縮約ネットワーク構造、OD 分布・旅行時間の変化率により特徴づけられること、(2) トリップ完了流率の低下が、待ち行列延伸による終点流入フローのブロッキングおよび終点流入リンク容量に占める通過交通量の増加により引き起こされること等、が理論的に明らかにされた。次に、この理論的成果を基に、MFD の最大容量を改善しうる (1) 一般街路網での信号制御や (2) 高速道路でのランプ流入制御の方法を開発した。上記の理論的成果は、MFD の特性を解明し、新たな制御手法開発に導く重要な貢献と認められ、交通分野の国際的 top journal である *Transportation Research Part B, C* に掲載された (論文①②⑤⑭)

さらに、上記制御手法開発の研究過程において、ランプ流入制御法の開発に必要な動的システム最適配分および動的均衡配分の特性を解析し、解析解が求められるケースや最適解に簡潔な規則性 (e.g., “時間-空間 sorting” 特性, 出発/到着時刻別の分解特性等) があることを明らかにした。これらの理論的成果も、新たな渋滞制御手法開発のための重要な貢献と認められ、交通分野の国際的 top journal である *Transportation Research Part B, C* に掲載された (論文③④⑥⑬)

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14件: 全て査読有り)

- ① Kentaro Wada, Koki Satsukawa, Mike J. Smith, and Takashi Akamatsu, Network Throughput under Dynamic User Equilibrium: Queue Spillback, Paradox and Traffic Control, *Transportation Research Part B (in press)*, 2018.
<http://doi.org/10.1016/j.trb.2018.04.002>.
- ② Kentaro Wada, Kento Usui, Tsubasa Takigawa, and Masao Kuwahara, An Optimization Modeling of Coordinated Traffic Signal Control based on the Variational Theory and its Stochastic Extension, *Transportation Research Part B (in press)*, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.08.031>
- ③ Minoru Osawa, Haoran Fu, and Takashi Akamatsu, First-best Dynamic Assignment of Commuters with Endogenous Heterogeneities in a Corridor Network, *Transportation Research Part B (in press)*, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.trb.2017.09.003>
- ④ Takashi Akamatsu and Kentaro Wada, Tradeable Network Permits: A New Scheme for the Most Efficient Use of Network Capacity, *Transportation Research Part C*, Vol.79, pp.178-195, 2017.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2017.03.009>
- ⑤ 和田健太郎, 佐津川功季, 動的配分による道路ネットワークの性能解析, 土木学会論文集 D3, Vol.73, pp.56-72, 2017
<http://dx.doi.org/10.2208/jscejipm.73.56>
- ⑥ 佐津川功季, 和田健太郎, 単一終点ネットワークにおける動的交通量配分問題の Nash 均衡解の解法について, 土木学会論文集 D3, Vol.73, pp.103-108, 2017.
<http://dx.doi.org/10.2208/jscejipm.73.103>
- ⑦ 井上亮, 宮下明久, 杉田正俊, 車両感知器データのマイニングによる那覇市の渋滞波及過程抽出, 交通工学論文集, Vol.3, A_145-A_152, 2017.
http://dx.doi.org/10.14954/jste.3.2_A_145
- ⑧ 王鵬飛, 赤松隆, 和田健太郎, 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, Vol.2, pp.11-20, 2016.
http://dx.doi.org/10.14954/jste.2.5_11
- ⑨ 井上亮, 宮下明久, 杉田正俊, 車両感知器データのマイニングによる都市内渋滞

の時空間形態抽出, 交通工学研究発表会
論文集, Vol.36, pp.27-32, 2016.

- ⑩ Ryo Inoue, Akihisa Miyashita, and Masatoshi Sugita, Mining Spatio-Temporal Patterns of Congested Traffic in Urban Areas from Traffic Sensor Data, *Proc. of the 19th IEEE conference on Intelligent Transport Systems*, Vol.19, pp.731-736, 2016.
<http://dx.doi.org/10.1109/ITSC.2016.7795635>
- ⑪ Yuki Shittaka and Takeshi Nagae, An Evolutionary Game Model and MCMC Estimation for Analyzing Stochastic Properties of Traffic State on a Road Network, *Proc. of the IEEE International Conference on Agents*, pp.82-85, 2016.
<http://dx.doi.org/10.1109/ICA.2016.027>
- ⑫ Pengfei Wang, Kentaro Wada, Takashi Akamatsu, and Yusuke Hara, An Empirical Analysis of Macroscopic Fundamental Diagrams in Sendai Road Network, *Interdisciplinary Information Sciences*, Vol. 21, pp.49-61, 2015.
<https://doi.org/10.4036/iis.2015.49>
- ⑬ Takashi Akamatsu, Kentaro Wada, and Shunsuke Hayashi, The Corridor Problem with Discrete Multiple Bottlenecks, *Transportation Research Part B*, Vol.81, pp.808 - 829, 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.07.015>
- ⑭ 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, Vol.35, pp.299-306, 2015.

[学会発表](計24件)

- ① Takeshi Nagae, Ren Toda, and Kentaro Wada, A method for evaluating travel time distribution on signalized arterial roads, *the 7th International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR)*, 2018.
- ② Kentaro Wada, Kento Usui, Tsubasa Takigawa, and Masao Kuwahara, An optimization modeling of coordinated traffic signal control based on the variational theory and its stochastic extension, *the 22nd International Symposium on Transportation and Traffic Theory (ISTTT)*, 2017.
- ③ Minoru Osawa, Haoran Fu, and Takashi Akamatsu, First-best dynamic assignment of commuters with endogenous heterogeneities in a corridor network, *the 22nd International Symposium on Transportation and Traffic Theory (ISTTT)*, 2017.
- ④ Koji Yoshida and Ryo Inoue, Relation

between proximity of streets in urban network and parameters of neural network for traffic volume prediction, *International Conference on GeoComputation*, 2017.

- ⑤ 宮下明久, 井上亮, 誤差修正モデル・閾値モデルを用いた交通状態予測手法の開発・検討, 第56回土木計画学研究発表会(秋大会), 2017.
- ⑥ 吉田幸司, 井上亮, 道路リンクの接続関係を反映したニューラルネットワークによる道路交通量予測の検討, 第56回土木計画学研究発表会(秋大会), 2017.
- ⑦ 戸田廉, 長江剛志, 動的計画法を用いた交差点の期待遅れ時間の厳密評価手法, 第31回人工知能学会全国大会, 2017.
- ⑧ 佐津川功季, 森部伸一, 和田健太郎, 大口敬, 首都圏高速道路ネットワークの効率的利用のためのランプ制御, 第55回土木計画学研究発表会(春大会), 2017.
- ⑨ Hikaru Okuda and Takeshi Nagae, Analysis of stochastic dynamics and short-term forecast of macroscopic traffic using the Markov chain approach, *the 21st Hong Kong Society of Transportation Studies International Conference (HKSTS)*, 2016.
- ⑩ Yuki Shittaka and Takeshi Nagae, Evaluation of the travel time reliability of an urban road network: An evolutionary game theory and MCMC approach, *the 21st Hong Kong Society of Transportation Studies International Conference (HKSTS)*, 2016.
- ⑪ Ryo Inoue and Motohide Tsukahara, Travel pattern analysis from trajectories based on hierarchical classification of stays, *the 9th International Conference on Geographic Information Science (GIScience)*, 2016.
- ⑫ 森部伸一, 和田健太郎, 大口敬, 一般ネットワークにおける最適ランプ制御パターンの導出とその考察, 第54回土木計画学研究発表会(秋大会), 2016.
- ⑬ 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 (DTA)*, 2016.
- ⑭ Haoran Fu, Takashi Akamatsu, and Kentaro Wada, Dynamic traffic assignment in a corridor network: Optimum vs. equilibrium, 日本OR学会秋季研究発表会, 2016.
- ⑮ Haoran Fu, Takashi Akamatsu, and Minoru Osawa, System-optimal dynamic traffic assignment in a corridor network: An

analytical approach and regularities of traffic flow pattern, 第 53 回土木計画学研究発表会 (春大会), 2016.

- ⑩ Le Thi Thuong, Koki Satsukawa, Kentaro Wada, and Kei Oguchi, 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 (春大会), 2016.
- ⑪ Pengfei Wang, Takashi Akamatsu, and Kentaro Wada, Exploring the relationship between the features of macroscopic fundamental diagram and congestion pattern for expressway networks: A case study of Tokyo metropolitan expressways, 第 53 回土木計画学研究発表会 (春大会), 2016.
- ⑫ 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 (HKSTS), 2015.
- ⑬ 佐津川功季, 和田健太郎, 大口敬, 井料美帆, 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 (秋大会), 2015.
- ⑭ Takashi Akamatsu, Kentaro Wada, and Shunsuke Hayashi, The corridor problem with discrete multiple bottlenecks, the 21st International Symposium on Transportation and Traffic Theory (ISTTT), 2015.
- ⑮ Takashi Akamatsu, Kentaro Wada, and Shunsuke Hayashi, The departure-time choice equilibrium of the corridor problem with discrete multiple bottlenecks: modeling, solvability, and uniqueness, the 27th European Conference on Operational Research (EURO 2015), 2015.
- ⑯ Takashi Akamatsu, Kentaro Wada, and Shunsuke Hayashi, Infinite-dimensional complementarity reformulation for the departure-time choice equilibrium problem with discrete multiple bottlenecks, the 13th EUROPT Workshop on Advances in Continuous Optimization, 2015.
- ⑰ 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 (春大会), 2015.
- ⑱ 赤松隆, 和田健太郎, 林俊介, 複数の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 (統計数理研究所), 2015.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

赤松 隆 (AKAMATSU, Takashi)
東北大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 9 0 2 6 2 9 6 4

(2) 研究分担者

長江 剛志 (NAGAE, Takeshi)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 3 0 3 7 9 4 8 2

井上 亮 (INOUE, Ryo)
東北大学・大学院情報研究科・准教授
研究者番号: 6 0 4 0 1 3 0 3

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: 2 0 7 0 6 9 5 7