

令和 2 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K18164

研究課題名(和文) 車両の異質性を考慮した交通流の時空間ダイナミクスの理論構築と実証分析

研究課題名(英文) Development and verification of model describing spatiotemporal dynamics of traffic flow consists of heterogeneous vehicles

研究代表者

瀬尾 亨 (Seo, Toru)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・助教

研究者番号：90774779

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、車両の異質性が道路交通流全体の時空間ダイナミクスに及ぼす影響の理論構築と実証である。その達成のため、最新技術を活用したデータ収集の活用を念頭に置き、交通流理論に関する先行研究の調査と体系化、車両の異質性を考慮した交通流の理論モデルの定式化と解析、交通状態・モデルパラメータ推定法の開発と検証を行った。主要な成果として、車両軌跡データに基づき車両の異質性を考慮した流率密度関係を推定する手法の開発と検証、異質性を明示的に考慮した交通流モデルの開発、開発したモデルを用いてマクロな交通現象が車両の異質性から創発することの確認が挙げられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

交通流は道路を走る車両の集合体であり、個々の車両の挙動が全体のダイナミクス(例：渋滞伝播)に影響する。そのため、個々の車両の挙動が異なること、すなわち異質性があることが巨視的な交通現象に影響を及ぼす。異質性が重要となる現象として、交通容量の短期・長期変動や、自動運転車の普及過渡期が指摘されている。しかし、異質性を考慮した交通流理論の一般的な枠組みは確立していなかった。さらに、既存の代表的な交通データでは、仮に異質性を考慮しても実証できなかった。本研究は、異質性の影響を説明する理論の構築と、最新技術によって収集された実データに基づく実証分析により、異質性と巨視的な交通現象の関連を明確化した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to build a theory and demonstrate the effect of vehicle heterogeneity on the overall spatio-temporal dynamics of the road traffic flow. In order to achieve this goal, we have reviewed and systematized previous studies on traffic flow theory, formulated and analyzed a theoretical model of traffic flow considering the heterogeneity of vehicles, and developed and verified a method for estimating traffic states and model parameters, with the aim of utilizing data collection using the cutting-edge technology. The main results include the development and validation of a method to estimate the fundamental diagram based on probe vehicle trajectory data, the development of a traffic flow model that explicitly considers the vehicle heterogeneity, and the confirmation that macroscopic traffic phenomena emerge from the heterogeneity of vehicles using the developed model.

研究分野：交通工学

キーワード：交通工学 土木計画学 交通流理論 データ同化 交通シミュレーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

交通流は道路を流れる車両の集合体である。本来であれば、交通流現象は、位置・時刻固有の属性とそれらに対する車両・運転者固有の反応により説明されるべきである(例:大型車は上り坂で速度が遅くなる;自動運転車と手動運転車の違い;それら要素と渋滞伝播の関係)。以下では、「位置・時刻固有の属性に対する車両・運転者の反応が車両毎に固有であり、異なる様子」を「車両の異質性」と呼称する。しかし、既存のマクロ交通流理論では、そのような異質性は明示的に考慮されていないことが多い(例:全車両が全時空間で同様の挙動をすると仮定;偶然誤差として扱う)。その理由は以下と考えられる。まず、オイラー座標系(時刻×位置)に基づく既存のマクロ交通流理論では、車両を一定の時空間に渡り集計する必要があり、車両を区別した理論構築が困難である。さらに、異質性を考慮する理論を構築したとしても、実データの利用可能性の限界により実証が困難であった。例えば、既存の代表的な交通データである車両感知器データ、プローブカーの実験データには、車両が区別できない、データ収集期間が短いなどの問題があった。

近年、交通流のモデル化の方法論に関して大きな進展がみられる。それは、ラグランジュ座標系(例:車両×時刻)に基づくマクロ交通流モデルの枠組みの考案と発展である。当枠組みは、マクロ交通流理論の特色である数学的扱い易さを持ち、かつ個々の車両を区別した交通流のモデル化が可能である。そのため、当枠組みを活用すれば、演繹的な説明が可能で、かつ異質性を明示的に考慮した交通流モデルが構築できると期待される。

利用可能な実データの量・質が充実しつつある。すなわち、大量かつ詳細な移動体観測データが利用可能となってきた。移動体観測データとは、車載GPS等により特定の車両の行動を観測したものである。例えば、個々の車両を区別した詳細なデータ(車両軌跡)が収集できる。また、ごく最近では、統計分析に供せられるほどの大量のデータが蓄積されつつある。さらに、最新技術を用いれば、車両とその周辺車両との相互作用・挙動の異質性も観測(車々間距離など)できる。そのため、これらのデータを活用すれば、異質性を考慮した交通流理論の実証分析が可能と期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、交通流の時空間ダイナミクスを、位置・時刻固有の属性とそれらに対する車両・運転者固有の反応により説明する理論の構築と実証である。そのための具体的目標は以下の通り:

- 車両の異質性を明示的に考慮した交通流理論の構築:車両の異質性を所与とした際の、交通流の時空間ダイナミクス(例:渋滞伝播)のモデルを定式化する。その数値計算法を開発し、様々な状況でのダイナミクス表現法を構築する。
- 異質性が交通流のダイナミクスへ与える影響の理論解析:定式化したモデルの理論解析を通し、車両の異質性が交通流に及ぼす影響を演繹的に表現する。また、そのメカニズムを説明する。例えば、平均交通容量や交通容量変動と異質性の大きさの関係を導出する。
- 実データに基づく本理論の実証:実データを用いた実証分析を通し、本理論と実現象との間の整合性を検証し、その適用範囲を明確にする。また、異質性とその影響の実態を把握する。

3. 研究の方法

本研究は、既往研究のレビュー、A:交通流理論の構築、B:モデル推定手法の構築、C:実データに基づく検証、D:研究のとりまとめの4つの部分から構成される。第A部では異質性を明示的に考慮した交通流理論を構築する。すなわち、理論モデルの定式化、理論解析、数値計算法の構築を行う。第B部では、第A部のモデルをデータから推定するための手法を構築する。第C部では、第B部の手法を用い、実データに基づきモデルを推定・検証する。

4. 研究成果

既往研究のレビューでは、交通流理論と交通状態推定について広範な文献調査を行い、既存研究の体系化と今後の課題の整理を行った。この成果は国内雑誌論文1報¹⁾と国際ジャーナル論文1報²⁾として出版されるなど、単なる研究の前準備以上の成果を上げたといえる。

第A部では、異質性を明示的に考慮した交通流理論を構築した。これは、個々の車両の性質を所与とした際に、その異質性(車両固有の要素と位置・時刻固有の属性の関係性)を明示的に考慮して、広範囲に渡る交通流の時空間ダイナミクスを表現できるものである。具体的には、Kinematic Wave理論に基づき、自由流速度、反応時間、車体長が車両ごとに異なる状況を考え、Lagrange座標系上で交通流のダイナミクスを計算するモデルを開発した。数値実験により、本モデルは異質性による巨視的な交通現象(例:stop-and-go波)の創発を表現できることを確認した(図1)。また、実データから容易に推定できるモデルとして、個々の車両の挙動が平均的なFundamental diagramを中心に分布しているときに、実現するFundamental Diagramの分布を簡略化して表現するモデルを開発した。後者は前者の近似とみなせる。

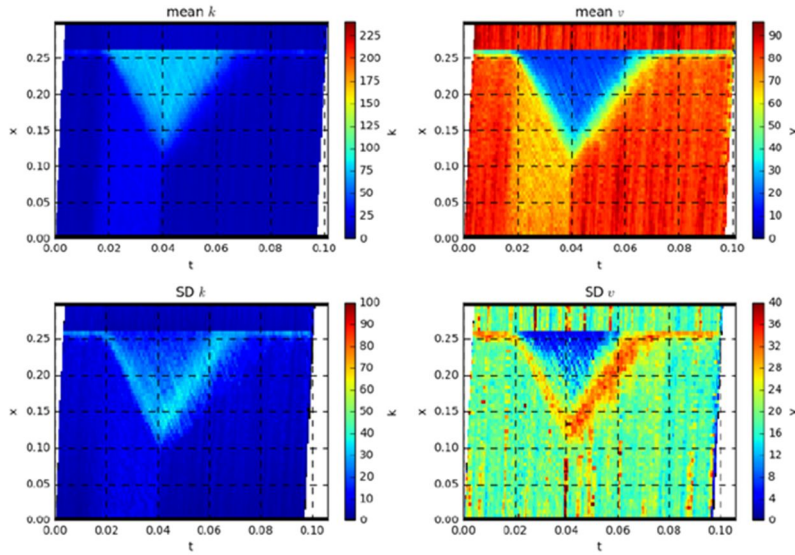


図 1: 個々の車両挙動に異質性がある場合の巨視的な交通状態 . 渋滞中の交通状態の標準偏差 (SD) が大きくなっていることがわかる .

第 B 部では、第 A 部で構築したモデルをデータから推定する方法論を構築した . これは、ある交通流の状態が与えられたときに、車両ごとの異質性の分布と、交通流に車両の異質性が与えた影響の大きさを推定するものであり、第 A 部の簡略化モデルを推定するものと位置づけられる . 近年普及の著しい GPS プローブカーにより、長期間に渡って収集されたデータ (車両軌跡) への適用を念頭に置き、「プローブ交通状態」という新たな概念に基づき EM アルゴリズムにより巨視的で確率的な流率密度関係を推定する手法を開発した (図 2) .

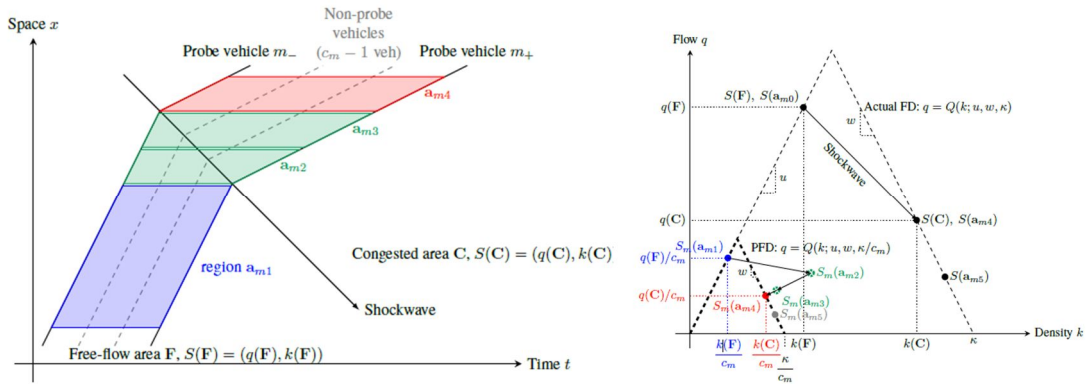


図 2: プローブ交通状態による (確定的な) 流率密度関係の推定法³⁾

第 C 部では、第 B 部の手法を用い、実データに基づきモデルを推定・検証した . 実際の GPS プローブカーのデータを長期間にわたり収集し、第 B 部の手法に適用した . 結果を車両感知器データと比較したところ、提案手法は良好な精度を持っていることが確認された .

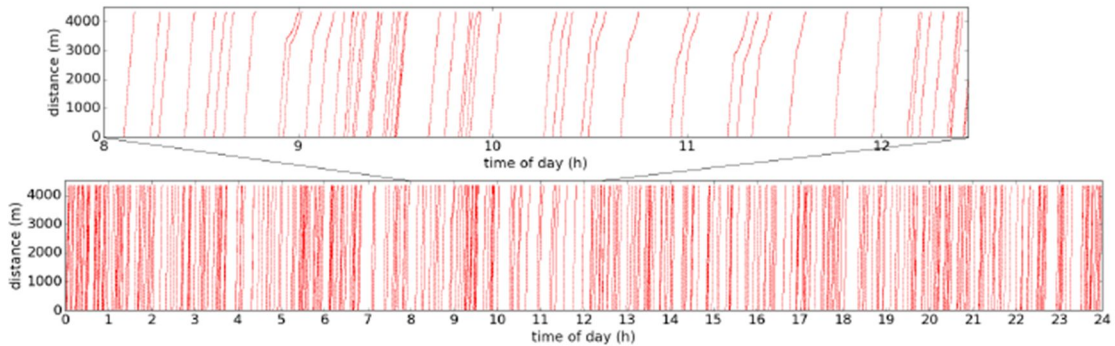


図 3: 高速道路区間におけるある 1 日のプローブカー軌跡³⁾

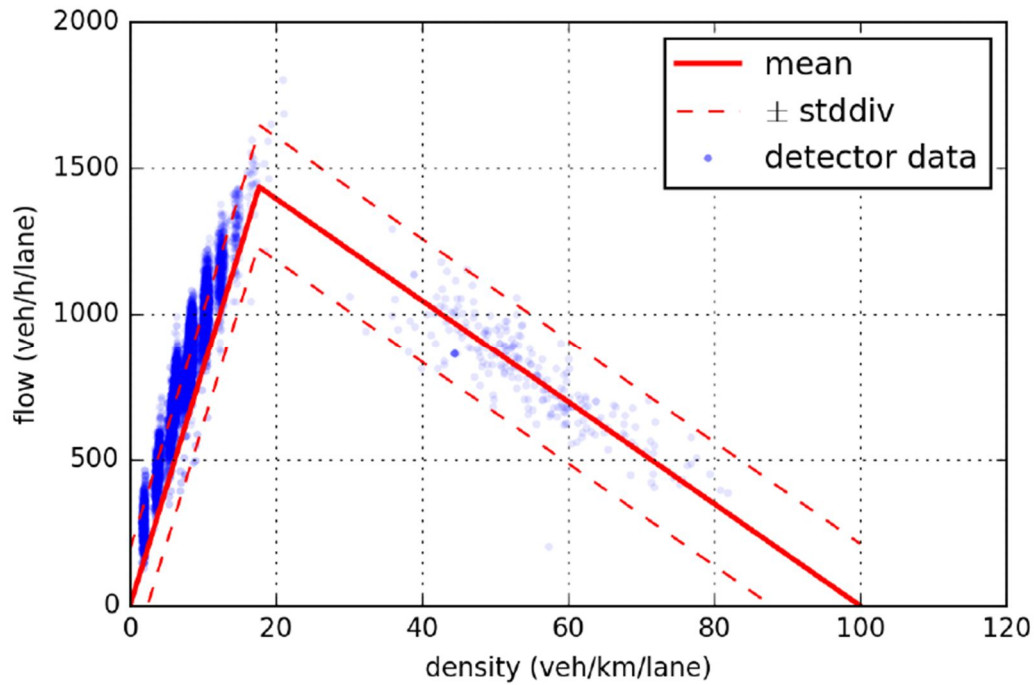


図 4: 推定された流率密度関係（赤実線：平均，赤破線：標準偏差）と車両感知器による観測値（青点）³⁾

以上により，車両の異質性が道路交通流全体の時空間ダイナミクスに及ぼす影響の理論構築と実証ができたと結論づける．

引用文献

- 1) 和田健太郎, 瀬尾亨, 中西航, 佐津川功季, 柳原正実. Kinematic Wave 理論の近年の展開：変分理論とネットワーク拡張. 土木学会論文集 D3(土木計画学), Vol. 73, No. 5, pp. I_1139-I_1158, 2017.
- 2) Seo, T., Bayen, A. M., Kusakabe, T., and Asakura, Y. Traffic state estimation on highway: A comprehensive survey. Annual Reviews in Control, Vol. 43, pp. 128-151, 2017.
- 3) Seo, T., Kawasaki, Y., Kusakabe, T., and Asakura, Y. Fundamental diagram estimation by using trajectories of probe vehicles. Transportation Research Part B: Methodological, Vol. 122, pp. 40-56, 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 瀬尾 亨、日下部 貴彦	4. 巻 5
2. 論文標題 衛星画像とプローブカー軌跡を用いたネットワーク交通状態推定のシミュレーション分析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 交通工学論文集	6. 最初と最後の頁 A_1 ~ A_10
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.14954/jste.5.2_A_1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Seo Toru, Kawasaki Yutaka, Kusakabe Takahiko, Asakura Yasuo	4. 巻 122
2. 論文標題 Fundamental diagram estimation by using trajectories of probe vehicles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Transportation Research Part B: Methodological	6. 最初と最後の頁 40 ~ 56
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2019.02.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 和田 健太郎、瀬尾 亨、中西 航、佐津川 功季、柳原 正実	4. 巻 73
2. 論文標題 Kinematic Wave理論の近年の発展：変分理論とネットワーク拡張	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 土木学会論文集D3 (土木計画学)	6. 最初と最後の頁 I_1139 ~ I_1158
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.2208/jscejipm.73.I_1139	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 瀬尾 亨	4. 巻 52
2. 論文標題 追従モデルとしてのKWモデル	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 交通工学	6. 最初と最後の頁 23 ~ 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 瀬尾亨, 柳原正実	4. 巻 52
2. 論文標題 多クラス多車線の交通流モデル	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 交通工学	6. 最初と最後の頁 27~32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Seo, T., Bayen, A. M., Kusakabe, T. and Asakura, Y.	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Traffic state estimation on highway: A comprehensive survey	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Annual Reviews in Control	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.arcontrol.2017.03.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 川崎 雄嵩, 瀬尾 亨, 日下部 貴彦 and 朝倉 康夫	4. 巻 36
2. 論文標題 プローブカー軌跡を用いた流率密度関係の推定 EMアルゴリズムを用いた手法と実データに基づく検証	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 交通工学研究発表会論文集	6. 最初と最後の頁 7-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計16件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Seo, T. and Kusakabe, T.
2. 発表標題 Use of small satellites and connected vehicles for large-scale traffic monitoring in road network
3. 学会等名 IEEE 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Seo, T. and Kusakabe, T.
2. 発表標題 Traffic state estimation using small imaging satellites and connected vehicles
3. 学会等名 ISTS and IWTDCS 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀬尾亨, 日下部貴彦
2. 発表標題 小型衛星とプローブカーを組み合わせた広域交通状態推定手法
3. 学会等名 第16回ITSシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 瀬尾亨
2. 発表標題 データ融合に基づく交通状態推定における交通流モデルの比較分析
3. 学会等名 土木計画学研究・講演集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Seo, T.
2. 発表標題 Traffic flow monitoring with cutting-edge technology
3. 学会等名 International Workshop on Quality Transport in the Age of Cutting-edge Technology (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Seo, T. and Bayen, A. M.
2. 発表標題 Traffic state estimation method with efficient data fusion based on the Aw-Rascle-Zhang model
3. 学会等名 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kawasaki, Y., Seo, T., Kusakabe, T., and Asakura, Y.
2. 発表標題 Fundamental diagram estimation using GPS trajectories of probe vehicles
3. 学会等名 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Seo, T. and Asakura, Y.
2. 発表標題 Endogenous market penetration dynamics of automated and connected vehicles: Transport-oriented model and its paradox
3. 学会等名 20th EURO Working Group on Transportation Meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 瀬尾亨, 朝倉康夫
2. 発表標題 移動体観測を用いた多車線多クラス交通流のモデル変数推定
3. 学会等名 土木計画学研究・講演集
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Seo, T. and Yin, Y.
2. 発表標題 Estimating individual congestion externality using connected vehicle data
3. 学会等名 2018 Global Symposium for Connected and Automated Vehicles and Infrastructure (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 上野秀樹, 尾崎信之, 佐藤俊雄, 鈴木美彦, 大場義和, 堺浩, 瀬尾亨, 朝倉康夫, 松下雅行, 割田博
2. 発表標題 画像プローブシステムを用いた交通状況の推定
3. 学会等名 電気学会ITS研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Seo, T., Kusakabe, T. and Asakura, Y.
2. 発表標題 Calibration of fundamental diagram using trajectories of probe vehicles: Basic formulation and heuristic algorithm
3. 学会等名 International Symposium of Transport Simulation and International Workshop on Traffic Data Collection and its Standardisation 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Seo, T., Tchrakian, T. T., Zhuk, S. and Bayen, A. M.
2. 発表標題 Filter comparison for estimation on discretized PDEs modeling traffic: Ensemble Kalman filter and Minimax filter
3. 学会等名 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 和田 健太郎, 瀬尾 亨, 中西 航, 柳原 正実 and 佐津川 功季
2. 発表標題 Kinematic Wave理論の近年の展開：交通流の変分理論とネットワーク拡張
3. 学会等名 第54回土木計画学研究発表会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Seo, T.
2. 発表標題 Fundamental Diagram Calibration Using Trajectories of Probe Vehicles
3. 学会等名 ITS Seminar Series, University of California, Irvine (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Seo, T.
2. 発表標題 Endogenous Market Penetration Dynamics of Automated and Connected Vehicles: Basic Model and Paradox
3. 学会等名 International Workshop on Dynamic Risk Management of Transport Network (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>Kinematic Wave理論の近年の発展に関する研究解説 https://www.researchgate.net/publication/313985673</p>
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----