

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：34416

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K05147

研究課題名(和文)非局所相互作用を考慮した可積分な交通流モデルに基づく渋滞解消理論の構築と実践

研究課題名(英文)Construction and practice of jam resolution theory based on an integrable traffic flow model considering nonlocal interactions

研究代表者

友枝 明保 (Tomoeda, Akiyasu)

関西大学・総合情報学部・教授

研究者番号：70551026

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：高速道路での自然渋滞の解消を狙った運転術である「渋滞吸収運転術」のフレームワークを拡張するために、非線形偏差分方程式で記述される新しい交通流数理モデルを提案し、その数理モデルの解析を行った。その結果、提案モデルは、交通流モデルとして重要となる一様流不安定性を示し、双安定な解構造を持つことも示された。さらに、提案モデルと既存の交通流数理モデルの共通した数理構造を明らかにするために、提案モデルの連続極限と超離散極限によって導出された対応する偏微分方程式系および超離散方程式系についても詳細な検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

【学術的意義】平均密度や速度に注目するマクロモデルはこれまで偏微分方程式で記述されるモデルが主であり、数値シミュレーションのためには、差分法のテクニックやその誤差に注意が必要であったが、偏差分方程式で記述される交通流モデルを提案したことにより、この提案モデルで直接シミュレーションをすることが可能となった。

【社会的意義】提案モデルを用いることで、「渋滞吸収運転術」のフレームワークが拡張でき、自然渋滞形成後の渋滞解消のみならず、形成過程における渋滞予防にも適用範囲が広がる。

研究成果の概要(英文)：A new mathematical model of traffic flow described by nonlinear difference equation is proposed to extend the framework of the "jam-absorption driving", a driving technique aimed at eliminating spontaneous traffic jam on highways, and the proposed model is analyzed. As a result, it is shown that the proposed model exhibits instability of homogeneous flow, which is important for a traffic flow model, and that it has a bistable solution structure. Furthermore, to clarify the common mathematical structure of the proposed model and existing mathematical models of traffic flow, the corresponding partial differential equations and ultra-discrete equations derived by the continuous and ultra-discrete limits of the proposed model are also studied in detail.

研究分野：数理工学

キーワード：渋滞学 数理モデル 交通流 セルオートマトン 差分方程式 安定性 双安定

1. 研究開始当初の背景

高速道路の自然渋滞は、一様流の不安定性に本質的な要因があり、臨界車間距離以下になると速度揺らぎが後方に増幅伝搬してしまい、その結果として生じる渋滞であることが、数理モデル研究および実証実験によって示されていた。この結果をもとに、自然渋滞を解消する運転術として「渋滞吸収運転術」を提唱し、社会実験でも一定の成果を得ることができていた。しかし、この運転術は Burgers 方程式で記述される数理モデルに基づいて構築されたフレームワークであり、交通流の安定性の観点から数理モデルを改良する必要があった。さらに、Burgers 方程式は、差分および超離散化により、ルール 184ECA とよばれる交通流セルオートマトンモデルとの対応が明らかにされていたが、一様流の不安定性を示す交通流モデル、特に偏微分方程式で記述される交通流モデルとセルオートマトンの対応は十分明らかにされていなかった。

2. 研究の目的

Burgers 方程式を拡張し、非線形偏微分方程式で記述される、一様流の不安定性を示す新しい交通流モデルを提案する。さらに、提案した交通流モデルにおいて、一様流が不安定化する密度領域、進行波解が存在するかどうか等を明らかにするとともに、セルオートマトンモデルとの対応についても検証し、渋滞吸収運転術のフレームワークの拡張につなげていく。

3. 研究の方法

連携研究者が提案した積分核を用いて非局所相互作用を組み込んだ可積分方程式（積分核モデル）に注目する。この積分核モデルは、積分核をデルタ関数と設定したときに Burgers 方程式に帰着されることから、Burgers 方程式を拡張したモデルの一つと考えることができる。この積分核モデルを手掛かりとして、ドライバーの認知を積分核で組み込み、一様流の不安定性を示す新しい交通流モデルを提案する。また、提案モデルにおいて、平衡解の安定性解析を行うことで一様流が不安定化する密度領域を明らかにし、進行波解が存在するかどうかを数値的に確認する。さらに、超離散化を行い、対応するセルオートマトンモデルを明らかにする。この提案モデルを利用して、渋滞吸収運転術の条件を再検討し、フレームワークを拡張する。

4. 研究成果

連携研究者が提案した積分核モデルに対して、交通流モデルとしての一つの解釈を与えることに成功した。具体的には、Burgers 方程式では他車の認知が無限遠まで同等であるのに対し、積分核モデルでは認知距離が実質的に有限な交通流モデルとなっているという解釈を与えた。また、偏微分方程式で記述される交通流モデルとセルオートマトンで記述される交通流モデルの対応を見据えて、差分方程式で記述される交通流モデル：

$$\rho_x^{t+\Delta t} = \rho_x^t - \rho_x^t (1 - \rho_{x+}^t) + \rho_{x-}^t (1 - \rho_x^t)$$

を新しく構築し、このモデルは Rule 184 の Fuzzy セルオートマトン (FCA) となっていることがわかった。一方で、このモデルは交通流の本質である一様流の不安定性を示さないことも明らかとなったため、過去の状態も考慮した、偏微分方程式で記述される交通流モデル（提案モデル）：

$$\rho_x^{t+} = \rho_x^t - \rho_x^t (1 - \rho_{x+}^t) \left(1 - \left((1 - \alpha) \rho_x^{t-} + \alpha \rho_{x+}^{t-} \right) \right) + \rho_{x-}^t (1 - \rho_x^t) \left(1 - \left((1 - \alpha) \rho_{x-}^{t-} + \alpha \rho_x^{t-} \right) \right)$$

へと拡張した。

提案モデルでは、一様流が不安定となる密度領域が存在し（図1）、特に、一様流が不安定化するパラメータ領域では、渋滞を意味する安定な進行波解も確認できた（図2）。また、図1からもわかるようにモデルに含まれるパラメータの値の変化に応じて、一様流が不安定となる領域が変化することも明らかとなり、このパラメータを制御することが渋滞解消につながることも示唆された。さらに、提案モデルの超離散極限を考え、条件を限定することで、対応するセルオートマトンを導くことに成功し、このセルオートマトンモデルにおいても、進行波解が存在することを確認できた。提案モデルの連続極限では、既存の偏微分方程式系に似たモデルの導出に成功したが、一部差異があったため、その詳細な検討を引き続き行っていく予定である。これらの知見を研究成果としてまとめ、国際会議で発表するとともに、国際学術誌に投稿予定である。

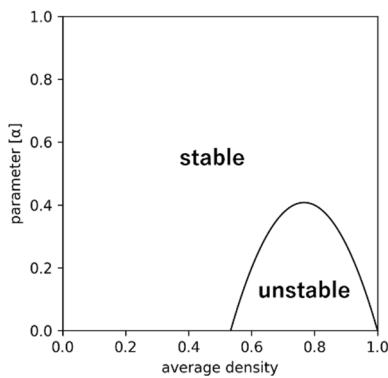


図 1：安定性の相図

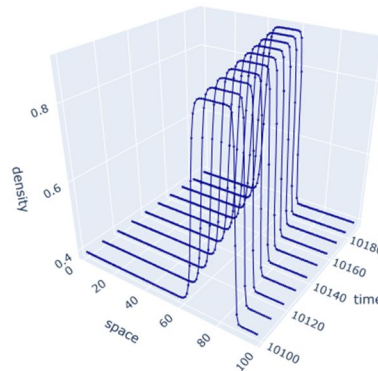


図 2：進行波解の時間発展の様子

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Miura Ayako, Tomoeda Akiyasu, Nishinari Katsuhiko	4. 巻 560
2. 論文標題 Formularization of entropy and anticipation of metastable states using mutual information in one-dimensional traffic flow	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physica A: Statistical Mechanics and its Applications	6. 最初と最後の頁 125152 ~ 125152
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physa.2020.125152	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 岡本 和也, 友枝 明保	4. 巻 5
2. 論文標題 双安定性をもつある非線形差分方程式について	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 武蔵野大学数理工学センター紀要	6. 最初と最後の頁 27-33
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 友枝 明保	4. 巻 63
2. 論文標題 「渋滞」を分析する数理モデルとしてのセルオートマトンとその応用	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 システム制御情報学会学会誌「システム/制御/情報」	6. 最初と最後の頁 523-529
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11509/isciesci.63.7_271	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 東康平, 糠谷樹, 薩摩 順吉, 友枝 明保	4. 巻 4
2. 論文標題 交通流を記述する新しい非線形離散モデルについて	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 武蔵野大学数理工学センター紀要	6. 最初と最後の頁 42--49
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 薩摩 順吉, 友枝 明保	4. 巻 3
2. 論文標題 ある非局所非線形発展方程式の差分化	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 武蔵野大学数理工学センター紀要	6. 最初と最後の頁 7--11
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ikeda Kota, Ei Shin-Ichiro, Nagayama Masaharu, Okamoto Mamoru, Tomoeda Akiyasu	4. 巻 99
2. 論文標題 Reduced model of a reaction-diffusion system for the collective motion of camphor boats	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 62208
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.99.062208	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22件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 岡本和也、友枝明保
2. 発表標題 双安定性を示すある非線形差分方程式の交通流モデルとしての妥当性
3. 学会等名 日本応用数理学会2020年度年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡本和也、友枝明保
2. 発表標題 交通流モデルとなりうる差分方程式の線形安定性解析とその基本図について
3. 学会等名 数学・数理科学専攻若手研究者のための異分野・異業種研究交流会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akiyasu Tomoeda
2. 発表標題 Traffic Jam : Cellular Automaton Modelling and a Dynamics inside a Queue of Vehicles
3. 学会等名 9th International Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 東康平, 糠谷樹, 友枝明保, 薩摩順吉
2. 発表標題 交通流を記述する新しい非線形離散モデルについて モデル構築編
3. 学会等名 日本応用数理学会「若手の会」主催 第4回学生研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 糠谷樹, 東康平, 薩摩順吉, 友枝明保
2. 発表標題 交通流を記述する新しい非線形離散モデルについて 数値実験編
3. 学会等名 日本応用数理学会「若手の会」主催 第4回学生研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本 和也, 友枝 明保
2. 発表標題 交通流モデルとしての双安定性をもつ非線形差分方程式
3. 学会等名 第27回交通流・自己駆動粒子系シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akiyasu Tomoeda, Kazuya Okamoto
2. 発表標題 A new nonlinear difference equation with bistability as a traffic flow model
3. 学会等名 Workshop on Scientific Computing 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akiyasu Tomoeda
2. 発表標題 Jamology - from Mathematical Modeling towards Practical Use on Traffic Flow
3. 学会等名 International Conference on Recent Advances in Mathematical and Physical Sciences (ICRAMPS2018) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
連携研究者	薩摩 順吉 (Satsuma Junkichi) (70093242)	武蔵野大学・工学部・教授 (32680)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------