

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：32680

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2017

課題番号：25790099

研究課題名(和文) 渋滞列における発進波の数理的解明から渋滞解消の実践へ

研究課題名(英文) Mathematical Understanding of a Starting-Wave in a Queue to Practice of Eliminating Congestion

研究代表者

友枝 明保 (TOMOEDA, Akiyasu)

武蔵野大学・工学部・准教授

研究者番号：70551026

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：渋滞解消のキーワードは「slow-in fast-out」である。渋滞列にゆっくりと近づき、渋滞列から素早く抜け出すアクションを行うことで、渋滞を短くすることができる。本研究では、確率セルオートマトンを数理モデルの基盤モデルとし、従来の待ち行列理論では考慮されてこなかった渋滞列内部の空間構造(排除体積効果)を陽に組み込むことで、渋滞列から抜け出す際の反応の連鎖の波(発進波)の特徴を明らかにした。具体的には、発進波の伝播速度は密度のべき関数で特徴づけることができ、伝播速度が遅い場合には、ある最適な車間距離を保った状態から動き出す方が渋滞列がスムーズに解消されることがわかった。

研究成果の概要(英文)：The keyword of eliminating traffic congestion is "slow-in fast-out". In principle, traffic jams can be shortened by slowly approaching the traffic queue and taking action to quickly get out of the queue. In this research, using the stochastic cellular automaton as the fundamental mathematical model and explicitly incorporating the spatial structure (excluded volume effect) inside the traffic queue which has not been considered in the conventional queuing theory. We have revealed the characteristics of the starting-wave (the chain of reaction). Specifically, the propagation speed of the starting-wave can be characterized by a power function of the density, and in the case where the propagation speed is slow, it is found that the queue is smoothly eliminated by moving from an optimal headway distance.

研究分野：渋滞学, 計算錯覚学

キーワード：渋滞学 待ち行列 発進波 セルオートマトン 交通エントロピー 分岐解析 追従モデル

1. 研究開始当初の背景

渋滞解消のキーワードは「slow-in fast-out」である。渋滞列にゆっくりと近づき (slow-in)、渋滞列から素早く抜け出す (fast-out) アクションを行うことで、原理的に渋滞を短くすることができる。この原理は、待ち行列理論における到着率とサービス率のバランスに対応し、これまでも考えられているアイデアではあるが、従来の待ち行列理論では空間構造が陽に入っていないため、車の大きさの影響 (排除体積効果) や車同士の相互作用といった渋滞列内部の詳細なダイナミクスまでは積極的に議論されてこなかった。

一方で近年、確率セルオートマトンを用いた渋滞現象の数理モデル研究が急速に発展し、空間構造が陽に組み込まれるセルオートマトンの特徴から渋滞列内部の車両の振る舞いを考慮した数理モデリングおよびその解析が可能となってきていた。さらに、代表者は、確率セルオートマトンを用いた待ち行列の最適形状に関する共同研究もっており、移動距離を考慮するとフォーク型の待ち行列よりもパラレル型の待ち行列の方が待ち時間が短くなるという、従来の待ち行列理論からは導かれない結果を得ることに成功していた。

2. 研究の目的

渋滞列のダイナミクスに対して、確率セルオートマトンを用いて数理モデルを構築し解析することで、既存の待ち行列理論より深化した渋滞列の議論が可能となる。そこで、本研究では、渋滞列内部の相互作用が本質的に寄与する fast-out に着目し、渋滞列内部を伝播する発進波 (車が動き出す反応の連鎖の波) の特徴を解明し、渋滞列内での最適な車間距離を導出することを目的とする。

3. 研究の方法

車の渋滞列における発進波のダイナミクスを解明するために、金井ら (Phys. Rev. E, 2005) が提案した確率セルオートマトンモデルである Stochastic Optimal Velocity (SOV) モデルを用いる。このモデルは、交通流現象の本質である臨界密度付近での metastability を再現していることや、あるパラメーター極限において可解な数理モデルに帰着することから、大変性質の良いモデルである。この数理モデルを基盤として発進波のダイナミクスに対する数値実験を行い、様々な密度における発進波の伝播速度を検証し、密度依存性を明らかにする。さらに、渋滞列の先頭の車両が動き始めてから最後尾の車両が動き始めるまでの時間 (発進波の伝播時間) と、車両が動き始めてから先頭の位置を通過するまでに必要な時間の和をトラベルタイムとし、このトラベルタイムが最

小となる最適な密度を検証する。

4. 研究成果

図1のようにSOVモデルを用いて行列から抜け出していく状況を数理モデル化し、数値実験を行った。その結果、高密度と低密度の二つの領域に分けることで、発進波の伝播速度 a の密度依存性が示された (図2)。具体的には、発進波の伝播速度を密度の関数として

$$a(\rho) = \alpha \rho^\beta$$

の形を仮定しフィッティングを行うことで、高密度領域 ($\rho > 0.25$) では (α, β) = (0.33, 1.74)、低密度領域 ($\rho < 0.25$) では (α, β) = (0.9, 1.0) という値をとることがわかった。後者の低密度の場合は、行列内部がスムーズにほどけていく自由流の状態であるため、車の前方へ進む確率 (hop 確率) が 1.0 となり、車間距離 (密度の逆数) に対して線形な関係になることも確認された。さらに、hop 確率が小さい場合については、図3のようにトラベルタイムが最小となるような密度が存在する、つまり、渋滞列内部における最適な車間距離の存在を示すことに成功した。

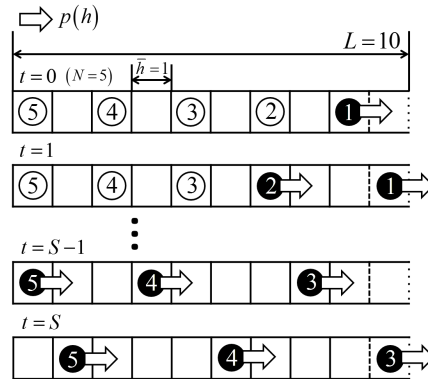


図1 : Schematic view of time development of relaxation process

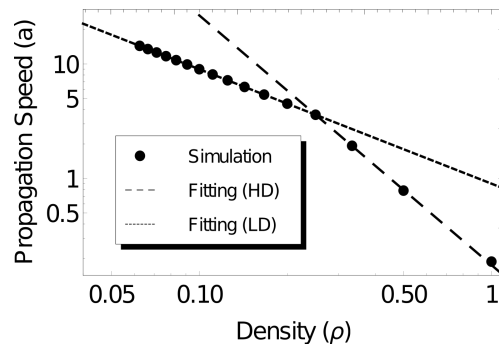


図2 : The numerical results and fitting relation between propagation speed of starting-wave and the initial density of vehicles

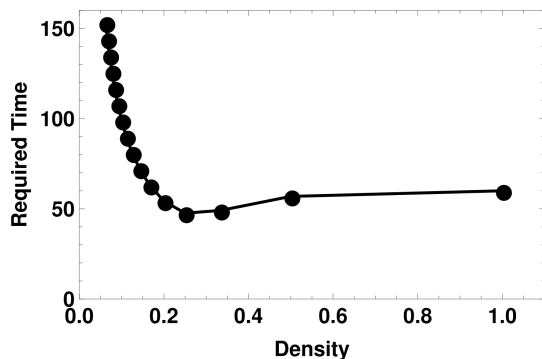


図 3 : Required time plots in numerical simulations.

また、本研究課題を推進中に、当初の研究計画に加えて、交通流モデルの「分岐構造」に関する数理研究、交通エントロピーに関する数理研究、という新しいテーマを発見することもできた。それぞれの研究テーマについては、現在次のような研究成果を得ることに成功している。

の着眼点は交通流モデルを力学系として解釈した際の解構造の安定性にある。渋滞が出現する状況は、平衡解が不安定化し渋滞を意味する安定な周期解が出現することで説明される。したがって、数理モデルがもつ何らかのパラメータを変化させることで、大域的な解構造が変化し、周期解を不安定化させることができれば、渋滞を解消できる可能性がある。この発想のもと、相対速度を考慮した交通流モデルに対して、計算機を用いた分岐解析を行った。その結果、これまで明らかにされていなかった相対速度を考慮した場合の大域的な解構造を明らかにすることができ、相対速度の強さによって、(A)渋滞解が安定に存在し双安定な解構造の場合、(B)渋滞解が安定に存在するが単安定な解構造の場合、(C)平衡解が常に安定となる場合の三種類に分類することに成功した。(C)を実現するパラメータを実社会で実装することができれば、渋滞は原理的に解消されることが示された。

の着眼点はエントロピーという指標を交通において定義することで、道路上の車両状況を特徴づけるというものである。この研究成果については、現在論文執筆中である。

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 9件)

Akiyasu TOMOEDA, Tomoyuki MIYAJI, Kota IKEDA, "Bifurcation Structure of a Car-following Model with Nonlinear Dependence on the Relative Velocity", *Transportmetrica A: Transport Science*, 1-17

(2017).

Akiyasu Tomoeda, "Cellular Automaton Modeling of SDP System and its Applications in 1D Traffic Flow", "2016 Fourth International Symposium on Computing and Networking (CANDAR)", pp243--248 (2016).

Daichi Yanagisawa, Yushi Suma, Akiyasu Tomoeda, Ayako Miura, Kazumichi Ohtsuka and Katsuhiko Nishinari, "Walking-Distance introduced Queueing Model for Pedestrian Queueing System: Theoretical Analysis and Experimental Verification", *Transportation Research Part C*, Vol.37, 238-259 (2013).

Kohta Suzuno, Akiyasu Tomoeda and Daishin Ueyama, "Analytical investigation of the faster-is-slower effect with a simplified phenomenological model", *Physical Review E.*, Vol.88 No.5, 052813 (2013).

Ryosuke Nishi, Akiyasu Tomoeda, Kenichiro Shimura and Katsuhiko Nishinari, "Theory of jam-absorption driving", *Transportation Research Part B*, Vol.50, 116-129 (2013).

[学会発表](計 6 4 件)

「Jamology - from Mathematical Modeling towards Practical Use on Traffic Flow」(Invited Talk), International Conference on Recent Advances in Mathematical and Physical Sciences (ICRAMPS2018) @ Jahangirnagar University, Dhaka, Bangladesh

「交通流現象の数理モデリング～Mathematicaで見る数理モデルの特徴～」(招待講演), Wolfram コンファレンス 2017 JIKEI @ 東京慈恵会医科大学

「Cellular Automaton Modelling of SDP System and its Applications in 1D Traffic Flow」, 4th International Workshop on Applications and Fundamentals of Cellular Automata (AFCA'16) @ Higashi Hiroshima Arts and Culture Hall, Hiroshima, Japan

「交通流の数理 - 数理モデルでの表現・解析・理解・発展」(招待講演), 日本応用数理学会 2016 年度年会 @ 北九州国際会議場, 小倉

「相対速度を考慮した交通流モデルとその分岐構造について」, 日本応用数理学会 2015 年度年会, 金沢大学 角間キャンパス

[図書](計 1 件)

友枝 明保, 西成 活裕, "第 3 章 社会の現象数理--渋滞学入門", 現象数学入門 (三村 昌泰 編), (ISBN: 978-4-13-062916-4, 判型 A5, 216 頁).

〔産業財産権〕
出願状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

報道，アウトリーチ活動：
BS フジ「ガリレオX」（2013/4/28）
フジテレビ「めざましテレビ」
（2014/8/14）
JAL 機内誌「SKYWAARD」（2014/11）
平凡社・スタイル株式会社「自動運転の
論点」（2017/4）
ABC 朝日放送「おそらく世界イチ調査テ
レビ」（2017/7/22）
など 33 件

ホームページ：
<http://tomoeda.jp>
<http://jamology.science>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

友枝 明保 (TOMOEDA, Akiyasu)
武蔵野大学・工学部数理工学科・准教授
研究者番号：70551026

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()