

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K03749

研究課題名(和文) 数理モデル化を用いた複数車線の高速道路の交通渋滞を除去する運転方法の構築

研究課題名(英文) Construction of driving methods for removing multiple-lane highway traffic jam using mathematical modeling

研究代表者

西 遼佑 (Nishi, Ryosuke)

鳥取大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10727093

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：並走した n 台の低速車によって N 車線(N は n より大きい)上の渋滞を除去する運転方法であるMulti-lane Green-driving (MGD) Algorithmにおいて、渋滞を除去し、かつ、二次渋滞を理論的に抑制するパラメーター領域を見出した。並走していない状態から開始するランデブー型のMGD Algorithmを構築した。一定台数間隔で配置された低速車が車線減少部に発生する渋滞を継続的に除去可能な条件を構築し、条件を満たすパラメーター領域を見出した。基礎的な研究として、単車線道路上のサグ部で発生する渋滞に対する渋滞吸収運転のシステムサイズ依存性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

MGD Algorithmにおける二次渋滞の抑制を理論的に保証したこと、および、ランデブー型のMGD Algorithmを構築したことは、複数車線上の渋滞を除去する運転方法の実用化に寄与すると期待される。本研究で構築した、一定台数間隔で配置した低速車によって車線減少部で発生する渋滞を継続的に除去可能な条件は、低速車を用いた渋滞除去における指針として寄与すると期待される。単車線道路上のサグ部における渋滞吸収運転のシステムサイズ依存性は、今後の複数車線道路上のボトルネック渋滞緩和に向けての基礎的な知見として寄与すると期待される。

研究成果の概要(英文)：In the Multi-lane Green Driving (MGD) algorithm, which is a driving method to remove traffic jam on N -lane roads by n slowly moving vehicles lined up in a row (N is larger than n), we have found the parameter region where the traffic jam is removed and the secondary jam is theoretically restricted. We have developed a rendezvous-type MGD algorithm, which starts before slowly moving vehicles line up in a row. We have constructed a condition such that slowly moving vehicles deployed in regular intervals can keep removing traffic jam caused by a lane-reduction point, and found the parameter region where the condition is satisfied. As a basic research, we have clarified the system-size dependence of a jam-absorption driving against traffic jam caused by a sag on a single-lane road.

研究分野：交通流

キーワード：交通渋滞 複数車線 渋滞吸収運転 MGD Algorithm 二次渋滞 Linear String Stability

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自動車交通渋滞(これ以降は単に「渋滞」と表記する)は深刻な社会問題であり,2017年に米国494都市部で88億時間と燃料120億リットルが渋滞によって失われたと報告されている[1].ゆえに,現代社会において渋滞緩和が強く求められている.近年,安価な渋滞緩和方法の一つとして,1台の自動車を能動的に用いて単車線の高速道路上における渋滞を除去する渋滞吸収運転が提案された[2].渋滞吸収運転では,吸収車と呼ばれる1台の車が以下の2つの動きをすることで単車線道路上の渋滞を除去する.第一の動きとして,渋滞よりも上流に位置する吸収車が通常の前方向追従走行をやめて減速し,車間距離を拡大する.渋滞への車の供給が途絶えるため,渋滞は縮小し,やがて消失する.渋滞消失後,第二の動きとして,吸収車は通常の前方向追従走行に復帰する.なお,吸収車の上流の交通状態を安定に保ち,二次渋滞(渋滞吸収運転によって引き起こされる渋滞)の発生を抑制しなければならない.追従モデルを用いた数値シミュレーションによって,単車線道路上において二次渋滞を抑制可能であることが見出され[3,4],二次渋滞抑制を理論的に保証するパラメータ領域の存在が見出された[5].このように単車線道路上における渋滞吸収運転は発展してきたが,多くの高速道路は複数車線である.複数車線道路上では,他の車が吸収車を追い越したり追い抜いたりすることで吸収車が作り出した前方空間に割り込み,渋滞吸収運転を妨害する可能性がある.これまでの車の割り込みの影響の分析は,不完全な複数車線道路系(割り込み付きの単車線道路系)に限られていた[5].ここで,他の車の割り込みを防止する単純な方策の一つとして,全車線に吸収車を並走状態で配置することが挙げられる.二車線道路上において並走状態の車によって渋滞を除去する数値シミュレーションが報告されたが[6],吸収車が並走状態からかけ離れた交通状況における複数車線道路上の渋滞吸収運転は報告されていなかった.したがって,複数車線道路において渋滞を除去する運転方法を確立するためには,全車線上における吸収車の並走状態を実現する方法を設計する必要がある.また,もし並走状態の実現が不可能な場合でも,吸収車を連携させることで,割り込みに対して可能な限り頑健性を高める必要があると考えられた.

2. 研究の目的

本研究の目的は,様々な複数車線道路において渋滞を除去する運転方法を構築し,数理モデルのパラメータが評価指標(旅行時間や燃料消費量など)に及ぼす影響を明らかにし,さらに,二次渋滞を抑制する可能性を明らかにすることであった.

3. 研究の方法

系を数理モデル化し,数値シミュレーションと理論解析を駆使して渋滞を除去する運転方法を評価した.数理モデル化にあたって,車線数やボトルネックの観点から対象の道路を設定した.道路上に交通流を設定し,除去すべき渋滞を発生させた.吸収車以外の交通流を車1台単位で取り扱う場合は,各車の前進挙動を追従モデル[7-9]で再現し,各車の車線変更を車線変更モデル[10]で再現した.吸収車以外の交通流を巨視的に扱う場合は,均衡状態の追従モデルを用いて交通状態を設定した.対象の系に応じて渋滞を除去する運転方法を設計し,微視的な交通流の数値シミュレーションや巨視的な交通流の数値計算を実施した.必要に応じて,微視的な数値シミュレーション結果として総旅行時間や総燃料消費量を取得し,その運転方法の効果を評価した.燃料消費量の推算にあたっては,瞬間的な燃料消費量の推算モデル[11]を用いた.また,必要に応じて,車の隊列を伝播する微小じょう乱に対する交通流の安定性(linear string stability)条件[8,12]を適用し,二次渋滞の抑制を理論的に保証できるかどうかを検討した.もし吸収車の上流の交通流がlinearly string stable (unstable)であるならば,吸収車によって生じた微小じょう乱は減衰する,または,一定となる(成長する)ので,二次渋滞は発生しない(する)と判定した.

4. 研究成果

(1) 複数車線道路上の渋滞を除去する運転方法において,二次渋滞の抑制が可能であることをlinear string stabilityの観点から保証した.当初は,他の車の割り込み防止のために全車線上で吸収車が並走する状態の実現を目指していた.しかしながら,YangとOguchiは,渋滞上流に配置したn台の低速走行車(ムービング・ボトルネックと呼ばれる)を並走させることによって,ムービング・ボトルネックを追い抜いたり追い越したりする車を許容しつつ,全N車線(Nはnよりも大きい)道路上を伝播する渋滞を除去する運転方法としてMulti-lane Green Driving (MGD) Algorithmを構築した[13].当初の全車線上における吸収車の並走状態を目指す設計方針よりも,吸収車に対する追い抜きや追い越しを許容する設計方針のほうが有望であると考えられたので,後者の設計方針で研究を進めた.MGD Algorithmでは,ムービング・ボトルネックの上流に二次渋滞が発生する可能性については保証されていなかった.そこで,linear string stability条件[8,12]をMGD Algorithmに適用した.交通流モデルとしては,追従モデルの一つであるintelligent driver model (IDM) [7,8]を用いた.得られた結果として,様々な車線数Nとムービング・ボトルネックの並走台数nに対して,ムービング・ボトルネックの上流をlinearly

string stable に維持したまま渋滞を除去可能なパラメーター領域が存在することを見出した。本成果は、複数車線道路上において二次渋滞の抑制が可能であることを保証したという意義を持ち、複数車線道路上の渋滞を除去する運転方法の実用化に向けて寄与すると期待される。

(2) ランデブー型の MGD Algorithm を構築した。通常の MGD Algorithm は n 台のムービング・ボトルネックが並走した初期状態を扱う[13]。一方で、ランデブー型の MGD Algorithm は、ムービング・ボトルネックが並走していない初期状態から開始し、その後、並走に至るまでの過程を考慮した MGD Algorithm である。交通状況としては、合流や分岐のない全 3 車線道路上を渋滞が伝播している状況を想定した。ランデブー型の MGD Algorithm は以下のように設計した。まず、渋滞後方の 1 台のムービング・ボトルネック（車 1 とする）が初期時刻に低速走行を開始する。初期時刻に車 1 からある距離だけ上流に位置する別の車（車 2 とする）が IDM に従って追従走行し、やがて車 1 に追いついた場合は、減速して車 1 と並走し、渋滞を除去する。得られた結果として、車 1 が時空図上の渋滞消失点に到達する場合、すなわち、時間の無駄を生み出すことなく渋滞を除去する場合において、車 1 と車 2 の初期間隔パラメーターによって時空図の交通状態が 5 種類に分類されることを見出した。また、ランデブー型の MGD Algorithm において、二次渋滞を抑制しつつ渋滞を除去するパラメーター領域が存在することを見出した。また、通常の MGD Algorithm に比べて、ランデブー型の MGD Algorithm は低速走行時の巡航速度をより高くすることができることを見出した。低速走行時の巡航速度が高くなるほど、通常の追従走行状態から低速走行状態に移行する際の減速量を小さくすることができるので、Time-To-Collision (TTC, 前方車に衝突するまでの時間的猶予を表す衝突リスク指標)[14]の観点から衝突リスクを低減することができる。したがって、ランデブー型の MGD Algorithm は、通常の MGD Algorithm よりも衝突リスクを抑制することができ、より安全な複数車線道路上の渋滞を除去する運転方法の実現に向けて寄与すると期待される。

(3) 車線減少部で発生する渋滞を一定台数間隔で配置したムービング・ボトルネックによって継続的に除去する可能性について検討した。系としては、片方の車線が減少するような二車線道路を想定した。減少しないほうの車線上に十分な台数の車を配置し、減少するほうの車線上に M 台の車を配置し、減少するほうの車線上の先頭車 1 台のみがムービング・ボトルネックとして低速走行する場合の数値シミュレーションを実施した。交通流モデルとしては、追従モデルの一つである intelligent driver model plus (IDM+)[9]を用いた。その数値シミュレーション結果に基づいて、減少するほうの車線上に M 台間隔でムービング・ボトルネックを配置することによって、車線減少部で発生する渋滞を継続的に除去可能な条件を構築した。その条件とは、「仮想的に $M+1$ 台目の車を 2 台目のムービング・ボトルネックとして配置した場合に、その 2 台目のムービング・ボトルネックが渋滞を除去するように低速走行する際の巡航速度が、1 台目のムービング・ボトルネックの低速走行時の巡航速度以上になること」とした。この条件を満たすようなパラメーター領域が存在することを見出した。本条件は、ムービング・ボトルネックを用いた複数車線道路上のボトルネック渋滞除去における新たな指針として寄与すると期待される。

(4) ボトルネックを持つ複数車線道路上における渋滞吸収運転を目指すための基礎的な研究として、1 箇所のサグ部（下り坂が上り坂に変わる箇所）を持ち、合流や分岐を持たない単車線道路上における渋滞吸収運転のシステムサイズ（すなわち、交通流に含まれる車の台数）依存性を明らかにした。交通流モデルとしては IDM+[9]を用いた。サグ部における車の減速挙動の再現にあたっては、サグ部の道路勾配がドライバーの加速度に及ぼす影響に関する数理モデル[15]を用いた。数値シミュレーションで検証した結果、システムサイズが大きくなるほど、渋滞吸収運転によって車 1 台あたりの総旅行時間と総燃料消費量を低減することができることを見出した。ただし、総旅行時間と総燃料消費量を同時に最小化することはできないと判明した。本成果は論文にまとめて文献[16]として公表することができた。本成果は、今後の複数車線道路上におけるボトルネック渋滞緩和に向けての基礎的な知見として寄与すると期待される。

< 引用文献 >

- [1] Schrank, D., Eisele, B., Lomax, T., Urban mobility report 2019, Texas A&M Transportation Institute with Cooperation from INRIX (2019).
- [2] Nishi, R., Tomoeda, A., Shimura, K., Nishinari, K., Theory of jam-absorption driving, Transportation Research Part B, 50 (2013), 116-129.
- [3] Taniguchi, Y., Nishi, R., Ezaki, T., Nishinari, K., Jam-absorption driving with a car-following model, Physica A, 433 (2015), 304-315.
- [4] He, Z., Zheng, L., Song, L., Zhu, N., A jam-absorption driving strategy for mitigating traffic oscillations, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 18(4) (2017), 802-813.
- [5] Nishi, R., Theoretical conditions for restricting secondary jams in jam-absorption driving scenarios, Physica A, 542 (2020), 123393.
- [6] Ghiasi, A., Li, X., Ma, J., A mixed traffic speed harmonization model with connected autonomous vehicles, Transportation Research Part C, 104 (2019), 210-233.

- [7] Treiber, M., Hennecke, A., Helbing, D., Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations, *Physical Review E*, 62(2) (2000), 1805-1824.
- [8] Treiber, M., Kesting, A., *Traffic flow dynamics: data, models and simulation*, Springer, Berlin, Heidelberg (2013).
- [9] Schakel, W. J., Knoop, V. L., Van Arem, B., Integrated lane change model with relaxation and synchronization, *Transportation Research Record*, 2316(1) (2012), 47-57.
- [10] Kesting, A., Treiber, M., Helbing, D., General lane-changing model MOBIL for car-following models, *Transportation Research Record*, 1999(1) (2007), 86-94.
- [11] Cappiello, A., Chabini, I., Nam, E. K., Lue, A., Abou Zeid, M., A statistical model of vehicle emissions and fuel consumption, In *IEEE 5th international conference on intelligent transportation systems*, (2002), 801-809.
- [12] Wilson, R. E., Mechanisms for spatio-temporal pattern formation in highway traffic models, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 366(1872) (2008), 2017-2032.
- [13] Yang, H., Oguchi, K., Multi-lane freeway oscillation mitigation at early-stage development of connected vehicles, In *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, (2019), 2072-2079.
- [14] Hayward, J. C., Near miss determination through use of a scale of danger, *Highway Research Record*, 384 (1972), 24-34.
- [15] Goñi Ros, B., Knoop, V. L., Shiomi, Y., Takahashi, T., van Arem, B., Hoogendoorn, S. P., Modeling traffic at sags, *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 14, (2016), 64-74.
- [16] Nishi, R., Watanabe, T., System-size dependence of a jam-absorption driving strategy to remove traffic jam caused by a sag under the presence of traffic instability, *Physica A*, 600, (2022), 127512.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Nishi Ryosuke, Watanabe Takashi	4. 巻 600
2. 論文標題 System-size dependence of a jam-absorption driving strategy to remove traffic jam caused by a sag under the presence of traffic instability	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physica A: Statistical Mechanics and its Applications	6. 最初と最後の頁 127512 ~ 127512
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physa.2022.127512	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5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 西田 悠作, 西 遼佑
2. 発表標題 複数車線道路におけるランデブー型渋滞除去運転方法
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部 第61期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 坂倉 義笙, 西 遼佑
2. 発表標題 ボトルネック付き道路におけるムービング・ボトルネックによる継続的な渋滞緩和に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国支部 第61期総会・講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Siyu Li, Ryosuke Nishi, Daichi Yanagisawa, Katsuhiro Nishinari
2. 発表標題 A jam-absorption driving system based on moving jam propagation speed estimation with camera sensors
3. 学会等名 Traffic and Granular Flow 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 西田 悠作, 西 遼佑
2. 発表標題 複数車線道路の渋滞吸収運転における, ストリング安定性を援用した二次渋滞判別法
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国学生会 第51回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 坂倉 義笙, 西 遼佑
2. 発表標題 二車線道路の自動車交通におけるムービング・ボトルネックによる衝突リスクの軽減
3. 学会等名 日本機械学会 中国四国学生会 第51回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------