

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15246

研究課題名(和文)新興国に見られる二次元混合交通の車列順制御を用いた流れ改善

研究課題名(英文)Improvement of two-dimensional mixed traffic flow in developing countries using vehicles' order

研究代表者

長濱 章仁(Nagahama, Akihito)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：40822797

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):本研究は、様々なタイプの車両が縦横無尽に走行する新興国道路交通(二次元混合交通)の流れを改善するために、車列順の特徴を探索し改善点を発見する手法の提案を目指した。具体的に取り組んだ内容は(1)混合交通において車両同士が及ぼす影響の測定、(2)車両の行動モデルに基づく、車列順の特徴抽出、(3)車列改善点の探索手法の提案である。これらを通じて、限定的ではあるものの車列の改善点を定量的に検出するアルゴリズムが作成できた。また、二次元混合交通に潜む特徴的な現象(反応遅れの渋滞発生への影響/特定車種の群れ行動)が発見された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の第一の意義は、車列順による交通流改善という手法の実現可能性を示した点にある。交通流を個々の車両の行動によって改善する手法は既に提案されているが、車両タイプ毎の特徴的な行動まで考慮し活かす手法は存在しなかった。第二の意義は、(時として異なる車両タイプまでも)群れを形成することを定量的に発見した点である。これは車両交通の中で見られる創発現象として定性的にも指摘されてこなかった。これらを通じて本研究は「何らかのメリットを求めの中で創発的にグループ行動を起こす異種エージェント群」の存在を示唆し、また「グループ行動が全体の流れにいかに関与し、制御しうるか」という新たな問題を提起した。

研究成果の概要(英文): This study aimed to propose a method to search for features of vehicle order and find points for improvement to improve traffic in developing countries (two-dimensional mixed traffic) in which various types of vehicles travel not following lanes. Specifically, we worked on (1) measuring the effects of vehicles on each other in mixed traffic, (2) extracting features of the vehicle order based on a behavioral model of vehicles, and (3) proposing a method to search for points to improve the order. Through these activities, we developed an algorithm for quantitatively detecting improvements in vehicle order, albeit to a limited extent. In addition, characteristic phenomena in two-dimensional mixed traffic (influence of delayed reactions on the occurrence of traffic jams/ herding behavior of specific vehicle types) were discovered.

研究分野：応用数理 交通工学

キーワード：新興国道路交通 二次元混合交通 車両の群れ 交通シミュレーション 車列改善

### 1. 研究開始当初の背景

新興国の自動車台数は近年著しく増加し、重大な交通渋滞を引き起こしている。環境問題、経済活動の効率やユーザーの QOL 低下と言った渋滞に付随する諸問題に、各国が実行可能なコストで取り組むために、道路拡張に頼らない渋滞対策手法の提案が期待されている。

新興国の自動車交通の特徴として、車線概念が希薄で二次元に広がりを持ち、かつ様々な大きさや挙動の車両（大型車・乗用車・オート三輪車・バイク等）が混じった「二次元混合交通」であることが挙げられる。これまでこれら車種の混合が少ない交通に対してはその物理的解析が進み、様々な渋滞対策手法が提案されている。一方、二次元混合交通の物理的解析は途上段階にあり、渋滞対策手法に関して、未だ検討がされていない。

既往研究では、車線内を走行する2車両（前方を走る車 (leader) と追いかける車 (follower)）の車種組み合わせによって、流れの安定性（渋滞しづらさ）や速度が改善することが分かっている。停止位置の分離や、自動運転技術を用いて、図1のように安定性の高い車種の順（車列順）を実現できれば、道路拡張を減らしつつ渋滞回避が可能になると期待できる。安定性の高い車列順を実現するためには、実際の交通に対して車列順をどう改善するべきかを調べる必要がある。すなわち、実際の交通に存在する車列順の特徴を検知するとともに、もしそれが不安定な車列順であれば、安定な車列順に修正するに対して車列順をどう改善するべきか知ることができれば、交通全体が安定化されると期待できる。

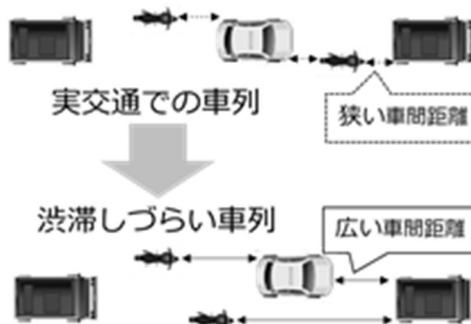


図1 車列順変化による渋滞回避のイメージ

### 2. 研究の目的

1節の背景に基づいて、本研究は実際の二次元混合交通車列の特徴を抽出し、その車列を安定な、渋滞しづらい車列へと導く改善点を示すアルゴリズムの提案を目的とした。

### 3. 研究の方法

2節の目的を達成するために本研究は以下の項目に取り組んだ。

- (1) 二次元交通においてドライバーが前方車両の挙動を受けて引き起こす加減速量の測定
- (2) 二次元混合交通における車列順の特徴抽出
- (3) 混合車列の評価指標、および車列順改善点を示すアルゴリズムの提案

以下各項目でとった方法を概説する。なお項目 A・B はインドで観測した実交通データを用いて行った。

(1) 本研究では、加減速が影響する/される位置にある車両同士を「追従関係」にあると呼ぶ。通常車列順は、この追従関係にある前方車両 (leader) と後続車両 (follower) の連なりによって定義される。しかし車線の無い二次元交通においては、leader が follower に対して左右にずれた場所に位置することが多く、追従関係を検知しにくい。そこでドライビングシミュレータ (DS) を用いて車線の無い道路を作成し、様々な場所に配置され突然減速してくる前方車両に対処させる被験者実験を行った。減速してくる前方車両を、自車両が減速して回避する範囲を同定すれば、その範囲を追従関係が結ばれる位置だと定義することができる。

(2) 二次元車列において追従関係は1対多の車両間に定義される可能性がある。すなわち交通はノードが各車種、エッジが追従関係であるネットワークとみなすことができる。交通をネットワークとみなすことで、グラフ理論に基づくネットワークの特徴抽出、具体的には①追従関係を結ぶペアの出現数期待値に基づく偏り検出 ②頻出サブネットワーク検出法に基づく出現頻度が有意に多いサブネットワークの検出 が可能となる。①は、ネットワーク内部にある追従関係を結んだペアの車種組合せに、統計的に偏りが無いかを調査するものである。各車種の観測台数から予測されるペアの出現数期待値と実際の出現数を比較することで偏りが検知される。②では、各観測時刻における頻出サブネットワークを C1-GBI 法を用いて検出するとともに、検出されたサブネットワークの数と存在時間をかけ合わせた値から、当該サブネットワークの単位時間あたり平均出現頻度  $\lambda_i^0$  を計算する。さらに、観測車列のネットワークをランダム化したものでも同じ指標  $\lambda_i^0$  を算出し、 $\lambda_i^0$ 、 $\lambda_i^0$  それぞれから得られるサブネットワークの出現数分布を比較する。これにより当該サブネットワークが有意に多く/長く観測された車両群、すなわち群れであるかどうかを判別する。

(3) 車列の安定性は速度・密度を定めることにより計算されるため、これらが様々な変化する状況では車列の良し悪しを決定できなかった。そこで本研究では、ある車列を定めたときに想定

される速度-密度プロット上で、車列が不安定に陥る領域までの面積を VF-VS 値とし、これが大きいほど「車列が低い速度・高い密度まで安定である」と判断する。

さらに、ある混合車列が与えられたとき、その構成車種からなるあらゆる車列の中からより良い VF-VS 値を持つ車列を探索することが、車列順の改善点を示すことになる。しかしながらそのようなより良い VF-VS 値を探索する際には、①組合せの多さから最適解を求めることが困難であり、また②最適解を求めても現在の車列から組み換えが困難である可能性がある。そこで本研究では、考えうる可能な限り多くの車列から、与えられた回数で組み換え可能な、より良い（局所解である）VF-VS 値をもつ車列を探索する遺伝的アルゴリズム (V00-G-NSGA-II) を提案し、その性能を検証する。

(4)4 節で述べる (1)に関する結果で、前走車位置によって加減速の強さに加えてドライバーの反応時間も変化する事が明らかになった。反応速度変化は既往研究でまだ指摘されていなかったが、加減速の強さと同様車列の安定性に影響を及ぼす要素である。そこで本研究は、観測された反応速度変化がどの程度二次元車列の安定性に影響を及ぼすかを調べるため、既往研究で理論的に求められていた二次元車列の安定性指標を、反応速度変化を鑑みたものに拡張する。さらに拡張した指標に観測された反応速度変化を組み込み、既往研究から予測される安定性との比較を行う。

(5)4 節で述べる (2)に関する結果で、大きさや挙動が似ているバイクとオート三輪が群れを形成しにくいということが明らかになった。これは、特定車種が道路上で偏在することを説明する際に用いられてきた「粒子の偏析現象」では説明ができない。すなわち自己駆動するエージェントならではの創発現象である可能性がある。大きさと挙動が類似するエージェントが偏析しない現象を再現するため、本研究ではカニを用いた動物実験にも取り組んだ。ここでは初期実験として、コース内に同種の大中小のカニを多数歩行させ、それらが偏在するかを観察した。使用したミナミコメツキガニは、光によって歩行方向をある程度誘導可能であり、また群れを形成する社会性をもつ。本種のカニを用いることで、ある程度定まった方向をもつ交通を社会性をもって形成する人間の混合交通を模擬することを試みる。

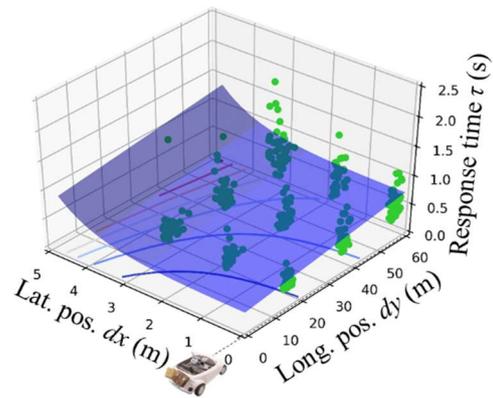


図2 各前走車位置に対する反応速度

#### 4. 研究成果

(1) 様々な前走車位置における加減速の強さを、DS を用いて観測した。さらに既往研究では測られていなかった反応速度の変化も観測した。図2は反応速度をプロットしたものである。本観測を通じて、加減速の強さが既往のモデルで説明できることを確認するとともに、反応速度が変化する事が明らかになった。

(2) 3.2 節 (2) ①の手法で検出された「追従関係を結びやすい・結びにくいペア」を図3に示す。図中「m・r・c・h」はそれぞれ「バイク・オート三輪・乗用車・大型車」を示し、赤線が関係を結びやすかったペア、青線が結びにくかったペアである。ここから、バイクのみが孤立して群れを作る可能性・他3車種が混合して群れを作る可能性などが示唆された。

さらに3.2 節 (2) ②の手法で検出された、明らかに多く・長く交通で観測された「群れ」の一例を図4に示す。図中 (a-c) は単独車種による群れの例、(d) は複数車種による群れの例である。ここでは分布の差が特に大きかったものを示している。

検知された群れから以下のような結果が得られた。

1. バイクや乗用車に比べ、オート三輪は大規模な群れを作る傾向がある。
2. 乗用車やオート三輪は走行方向に向けて先細りの群れ形状を取る傾向にある。
3. 複数車種が混じる群れが確かに存在する。ただしバイクとオート三輪は群れを形成しにくい。

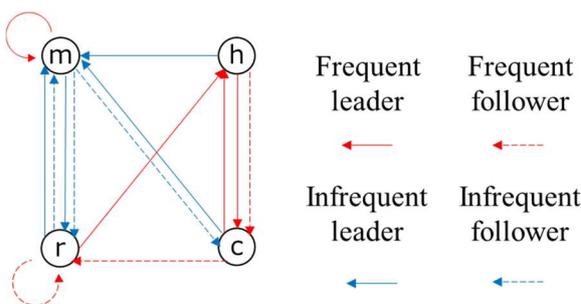


図3 各車種が取りやすい・取りにくい leader-follower のペア

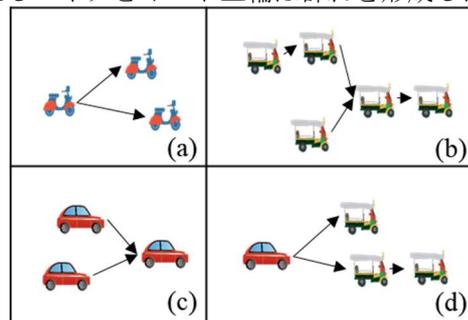


図4 検出された群れの例。a-c は単独車種によるもの、d は複数車種による群れである

特に 3 つ目の結果に関して、大きさや挙動が似ているバイクとオート三輪が群れを形成しにくいという現象は、特定車種が道路上で偏在することを説明する際に用いられてきた「粒子の偏析現象」では説明ができない。すなわち自己駆動するエージェントならではの創發現象である可能性が示唆されたと言える。

(3) 図 5 に VF-VS の計算例を示す。図中濃い青色にて示された領域は、車列が自由流から不安定流に至るまでの領域であり、この面積が大きいほどその車列が幅広い状況で安定であることを示す。既往研究の安定性計算方法と合わせて本指標の計算が実現された。

さらに VOO-G-NSGA-II を用いて乗用車 5 台トラック 3 台のあらゆる車列 (56 通り) から 3 回の組み換えで至ることができるより良い局所解の VF-VS をもつ車列を探索した結果を図 6 に示す。ここから平均して 7 つの「より良い車列」が見つかり、56 通りの全ての車列からそれらの車列に至ることができることが確認された。さらに得られた局所解の平均 VF-VS 順位は 3 位であり確かにより良い車列が選ばれていることも確認された。

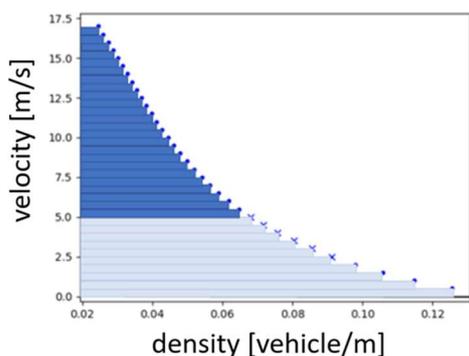


図 5 VF-VS の計算例

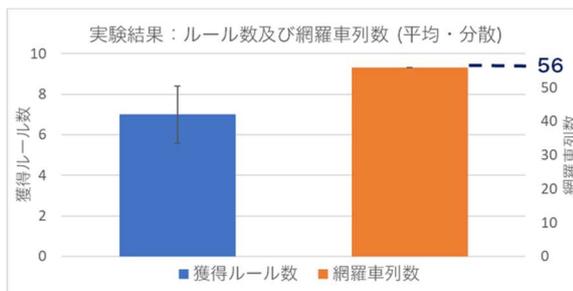


図 6 VOO-G-NSGA-II を用いた局所解である車列の探索結果。左の獲得ルールは得られた局所解である車列数、右の網羅車列数はその獲得ルールに至ることができる車列数である

(4) 図 7 は反応速度変化を鑑みた場合と鑑みない場合で、二次元車列の安定性がいかに変化するかをプロットしたものであり、領域が主に I から III まで分けられている。特に領域 I と II は反応速度変化がある場合交通が不安定化する領域である。ここから、二次元交通、すなわち車線の無い交通は、追い越しなどによって隊列が崩れ始めるタイミングや速度が、既往研究で想定されるものと異なる可能性が示唆された。

(5) 図 8 にカニを用いた歩行実験の例を示す。画像ではコース上のゲートで既に偏在させたカニがどのように偏在を解消するかを観測している。その他ゲートがなく自由に歩行できるよう教での偏在化および、信号機の様にな一定時間で挿入されるゲートによる偏在化の様子を観測した。現在ビデオ動画から軌跡データを抽出中である。

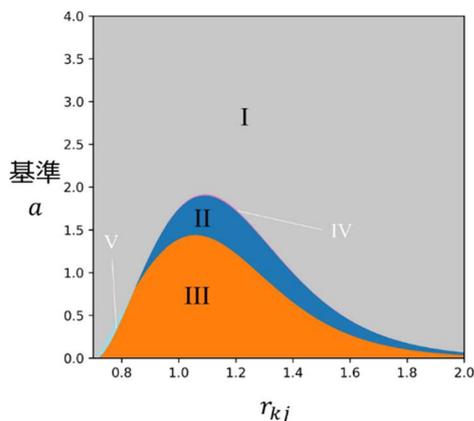


図 7 横軸を車両の車間距離、縦軸をモデルパラメタとしたときの安定性変化のプロット。領域が主に I から III に分けられた



図 8 大中小のカニを用いた偏在実験の様子

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Nagahama Akihito, Wada Takahiro, Yanagisawa Daichi, Nishinari Katsuhiko	4. 巻 570
2. 論文標題 Detection of leader-follower combinations frequently observed in mixed traffic with weak lane-discipline	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physica A: Statistical Mechanics and its Applications	6. 最初と最後の頁 125789 ~ 125789
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physa.2021.125789	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 Akihito Nagahama, Takahiro Wada, Daichi Yanagisawa, Katsuhiko Nishinari	4. 巻 14
2. 論文標題 Certain Types of Vehicles in Heterogeneous Traffic in India Tend to Gather	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies	6. 最初と最後の頁 1794 ~ 1813
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.11175/easts.14.1794	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 -

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 2件／うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Akihito Nagahama, Takahiro Wada, Daichi Yanagisawa, and Katsuhiko Nishinari
2. 発表標題 Certain Types of Vehicles in Heterogeneous Traffic in India Tend to Gather
3. 学会等名 The 14 th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古屋敬祐, 中理怡恒, 河野航大, 長濱章仁, 佐藤寛之, 高玉圭樹
2. 発表標題 渋滞緩和に向けた交通流率と車列の不安定性を考慮した進化計算による車両順最適化
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門 第49回 知能システムシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 長濱章仁, 和田隆広, 柳澤大地, 西成活裕
2. 発表標題 特定車種の群れに関する統計的検証
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会 (SSI2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長濱章仁, 三谷友彦
2. 発表標題 新興国交通で見られる特徴的な車列順の再現
3. 学会等名 第441回生存圏シンポジウム生存圏ミッションシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akihito Nagahama, Takahiro Wada
2. 発表標題 Response time and deceleration affected by lateral shift of leaders in vehicular traffic with weak lane discipline
3. 学会等名 Traffic and Granular Flow 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長濱章仁
2. 発表標題 多様な車種が入り交じる自動車交通の微視的解析
3. 学会等名 京都大学生存圏研究所学際萌芽研究センター第254回定例オープンセミナー (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長濱章仁
2. 発表標題 新興国交通で見られる特徴的な車列順の抽出
3. 学会等名 京都大学生存圏研究所第425回生存圏シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Akihito Nagahama, Kenji Tanaka, and Katsuhiko Nishinari
2. 発表標題 Analysis of Connection Characteristics between Random Sections and Patternized Groups in No-lane Heterogeneous Traffic
3. 学会等名 The 4th ASEAN - UEC Workshop on Informatics and Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Akihito Nagahama, Takahiro Wada, Keiki Takadama, Daichi Yanagisawa, Katsuhiko Nishinari, and Kenji Tanaka
2. 発表標題 Prototype models for predicting vehicle types generated in heterogeneous traffic simulation
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 Akihito Nagahama
2. 発表標題 Possibilities for Research on Heterogeneous Traffic -From the viewpoint of a Japanese researcher-
3. 学会等名 Traffic and Granular Flow 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 古屋敬祐, 中理怡恒, 長濱章仁, 佐藤寛之, 高玉圭樹
2. 発表標題 車列表現の一般化による多様な車列に適用可能な車両入替手順の進化的最適化
3. 学会等名 進化計算シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 交通渋滞予防、又は、予防及び緩和方法、並びに、制御装置	発明者 長濱章仁	権利者 学校法人立命館
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-165966	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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