

マルチエージェントによる プラトーン走行グループ構成の検討

河合功介[†] 田学軍[†] 井手口哲夫[†] 奥田隆史[†]

プラトーン走行とは車間距離を縮めた複数台の車両が隊列を成して道路を走行することにより、空気抵抗の減少による燃費の向上や、道路容量の増大による渋滞の抑制に期待されている走行形態である。プラトーン走行に関して、2010年現在、さまざまな研究、実証実験が行われてきた。しかし、プラトーンが一般車両と混在する場合における、プラトーンが一般車両に与える影響についてはあまり論議されていない。そこで、本稿では、高速道路上にプラトーン走行車両と一般車両が混在交通を行った場合、プラトーンを構成する車両台数の変化による一般車両への影響、また、一般車両の交通量の変化によって、プラトーンが一般車両へ与える影響について、シミュレーションにより評価を行う。

Evaluating Composition of Platoon Running Group by Multi agent

KOUSUKE KAWAI[†] XUEJUN TIAN[†]
TETSUO IDEGUCHI[†] TAKASHI OKUDA[†]

When two or more vehicles run in a way of platoon with a shorter distance between them, high fuel efficiency and relieved traffic congestion can be expected because of lower air resistance and higher road capacity. Till to 2010, various researches and an actual proof experiment related to Platoon run have been carried out in the world. However, it is remained to be studied and discussed about how the platoon influences to the usual vehicles and how it is influenced from the usual traffic. In this paper, we study the relations between the platoon run and usual traffic by simulation of multi-agent with cases of different number of vehicles which constitutes platoon and different usual traffic in expressway. From the simulation results, the usual traffic is an important factor and must be taken account, for Platoon run.

1. はじめに

現代社会において、自動車は輸送および、移動手段として欠くことは出来ない要素の一つである。しかし、毎年、自動車による交通事故や、渋滞による環境汚染などの問題が発生し続けている。近年では、このような問題を解決するために、自動車に先端技術を用いた高度道路交通システム (Intelligent Transport System : ITS) の研究開発がますます盛んになってきている。様々な ITS の技術分野の中の一つに、プラトーン (隊列) 走行がある。プラトーン走行とは、車間距離を縮めた複数台の車両が隊列を成して道路を走行するものである。空気抵抗の減少による燃費の向上や、道路容量の増大による渋滞の抑制に期待されている。

2010年現在、プラトーン走行を実現するために多くの実験が行われてきた^{[1][2][3]}。特にトラックによるプラトーン走行は燃費等の環境に対する期待と、輸送効率の面から大きな期待がされており、トラックを用いた実証実験も行われている^[3]。しかし、その多くは、プラトーンを維持するための各車両の制御方式や通信方式、車両の位置を特定する技術や、周辺車両や周辺環境を検知し情報を収集する技術などに関するものであり、複数台の車両やプラトーンが混在する中で、プラトーン全体を制御対象とする研究は少ない。

そこで、本稿では、プラトーン全体を制御対象とし、目的の高速道路上の出口 (以降目的地と呼ぶ) 付近における混雑の抑制を実現するため、一般車両とプラトーン車両が混在した場合における、プラトーン構成台数の変化による一般車両に与える影響、並びに、一般車両の交通量の変化によって、プラトーンが一般車両へ与える影響について、シミュレーションにより評価を行う。

2. 関連研究と問題点

2.1 プラトーン走行

プラトーン走行とは、複数台の車両が短い車間距離を保ち、高速道路上を走行することであり、道路容量を増大させることの出来る技術である。先頭車両はドライバによる運転が必要であるものの、後続車は車車間通信技術等を用い、また、センサ系、制御系、アクチュエータ系を多重化させることで、先行車両の走行軌跡上を走行する

[†] 愛知県立大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Technology, Aichi Prefectural University

同軸制御を行うことが出来る。そのため、車両のアクセルやブレーキのコントロールを手動で行わずとも、先行車両に自動で追従することが出来る。プラトーン走行によって期待される効果としては、以下が挙げられる。

2.1.1 道路容量の増大による効果

プラトーン構成車両が車間距離を自由走行時よりも縮めることで、高密度な走行を行うために、道路上の有効に使用出来る道路容量が増える。通常、高速道路を 80km/h で走行した場合には、80m 程度の車間距離が必要であるとされているが、2010 年現在、大型トラック 3 台を時速 80km/h、車間距離 15m に保って自動運転で隊列走行することに成功している^[3]。

2.1.2 省エネ効果

プラトーンを構成することで、後続車両が受ける空気抵抗が減少され、また、コンピュータによる自動制御を行うことで、急加速、急減速を減らすことが出来、燃費の向上が期待される。2010 年現在、プラトーン走行が実現できた場合には、約 15% の省エネ効果が見込まれるとされている^[3]。

2.1.3 省力効果

プラトーンを構成することで、後続車両はドライバ自らがハンドルやブレーキを使って制御を行う必要がなくなる。また、物流などの多くのトラックを用いた場合には、先行者のみにドライバが乗ることで、後続車はドライバが不要になり、人件費の削減を行うことが出来ると考えられている。

また、実験車および要素技術を開発するにあたりプラトーン走行の実現化を想定したコンセプトが策定されている^[4]。以下にコンセプトの概要を示す。

主な項目	コンセプト Y	コンセプト Z
コンセプトの概要	一般車と混在した中で隊列走行を可能とする。	一般車が走行しない専用レーンで無人隊列走行を可能とする。
狙い・目的	トラックの省エネ化と交通流の改善	トラックの省エネ化と省人化
隊列形態	3 台隊列走行	4 台以上の隊列走行
隊列形成	走行レーン走行中に隊列形成	ドライバ乗降場にて停止中に隊列形成
ドライバの有無	全車ドライバ乗車	先頭車のみドライバ乗車、 後続車：無人

表 1：プラトーン走行コンセプトの概要^[4]

2.2 プラトーン走行に必要なグループ構成条件

表 1 から分かるように、プラトーン走行を実用化するに依って、既存の高速道路を使用し、一般車両とプラトーンの混在交通を前提とした方法と、プラトーン走行専用レーンを敷設するようなインフラ整備を必要とする方法が考えられている。

特に、社会的ニーズや実現性の向上の点からインフラ整備を必要とせず、既存の道路のみでプラトーン走行を実現することを想定した策定（コンセプト Y）については、プラトーンは、複数台のトラックから構成されることが前提であり、プラトーンを構成することによって、省エネ化と交通流の改善が期待される。しかし、プラトーンの規模が大きい場合には、通常走行を行う一般車両との混在交通であることを考慮する必要があるため、最大構成車両台数を設定する必要がある。高速道路における一般車両のトラフィックは、一般的に、深夜などの時間帯や平日では少なく、土曜や日曜や長期休暇期間では多いなどと、時間や、日にちなどの時間的環境の変化によって異なる。一般車両の交通量が少ない場合には、プラトーン構成台数を多くすることが出来、また、交通量が多い場合には、プラトーン構成台数を少なくすることが出来る。

よって、一般車両とプラトーンが混在する環境では、一般車両に影響を与えない効率のよいプラトーン走行を実現するために、一般車両の交通量を考慮し、トラックによるプラトーン構成台数を変化させることが必要である。

2.3 既存研究の問題点

既存研究では、主にプラトーン内での通信に関する研究や、個々の車両の制御に関する研究が行われ、実際の車両を使用した実験も多く行われ^{[1][2][3]}、成果を上げている。しかし、一般車両とプラトーンが混在交通を行った場合の、プラトーンが一般車両に与える影響についてはあまり論議されていない。

3. 提案評価方式

本稿では、一般車両とトラックによるプラトーンが混在交通を行った場合における、一般車両の交通量を考慮した最適なプラトーン構成台数を評価する。

尚、前提条件としてプラトーン構成車両はすべてトラックのみとし、構成されたプラトーンは同じ目的地を持った車両で構成されているものとする。以下に、提案評価方式の詳細を示す。

3.1 一般車両とプラトーンの混在交通

本提案評価方式では、プラトーン専用レーンは存在しない環境における一般車両とプラトーンの混在交通を前提とした環境下でシミュレーションを行う

一般車両と、プラトーンが混在した場合、プラトーン走行レーン（追越車線）

にも一般車両が存在するため、目的地付近では、一般車両、プラトーン走行車両の両方が流出ランプと隣接するレーン（走行車線）へ車線変更を行う必要がある。ここで、プラトーン構成台数が多いければ、プラトーン全体での車線変更を行うことが難しくなり、また、一般車両の交通量が多い状況であっても、同様に、車線変更を行うことが難しくなることが考えられる。以下では、プラトーン構成台数と一般車両の交通量が増えた場合の車線変更による影響について述べる。

3.1.1 プラトーン構成台数

プラトーンは複数台のトラックを隊列することで構成されることを想定しているため、一般車両と同じように扱うことが出来ない。

2.1.1 節で述べたが、2010年現在では、車間距離 15m を保って走行することが成功している。また、NEDO（独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）では、最終目標に車間距離 4m を掲げている。これより、最終目標値の車間距離 4m では、トラックの車長を 7m と仮定した場合、3 台では 30m 程度のプラトーンを構成することが可能となる。しかし、構成台数が増えることで、プラトーンの長さは変化するため、構成台数を多くした場合では、道路容量が増大し、省エネ化等に繋がるが、目的地手前で、追越車線から走行車線へ車線変更を行う必要があるため、プラトーン長が長くなることで、プラトーン全体が車線変更を行えない、または、無理な加速、減速を強いられることが考えられる。（図 1、図 2）

3.1.2 一般車両の交通量

高速道路では、2.2 節でも述べたとおり時間的環境の変化により、交通量は変化する。一般的に高速道路の交通量が少ない時間帯では、プラトーンの構成台数を増やすことが出来ると考えられ、また、高速道路の交通量が多い場合では、プラトーン構成台数を減らすことが出来ると考えられる。これは、プラトーンが目的地付近で車線変更を行う必要がある場合では、一般車両の交通量が少ない場合では、円滑に車線変更を行うことが可能であるが、交通量が多い場合では、構成台数を多くした場合と同様に、車線変更を行えない、または、無理な加速、減速を強いられることが考えられるからである。（図 1、図 3）



図 1：プラトーン車線変更

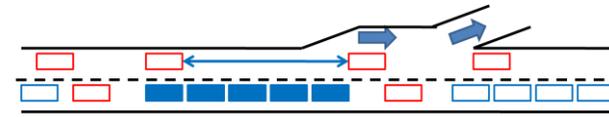


図 2：プラトーン車線変更（構成台数）

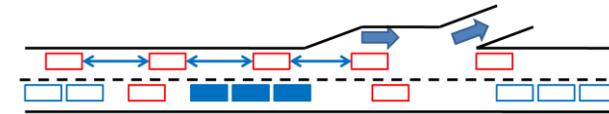


図 3：プラトーン車線変更（交通量）

3.2 車両挙動運動方程式

本提案評価方式では、シミュレーションに用いる車両挙動モデルは既存のモデルを使用することとする。車両走行モデルには、Treiber らの提唱する IDM (Intelligent Driver Model) ^[5] を用い、車線変更モデルには、同様に Treiber らが提唱する MOBIL (Minimizing Overall Braking decelerations Induced by Lane changes) ^[6] を用いた。以下に要約したものを示す。

3.2.1 Intelligent Driver Model (IDM)

IDMとは追従走行時における加速度の制御モデルであり、次式によって定義される。

$$\frac{dv_i(t)}{dt} = a \left\{ 1 - \left(\frac{v_i(t)}{v_{max}} \right)^4 - \left(\frac{\sigma}{\Delta x_i(t)} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

$$\sigma = \Delta x_{min} + \left\{ v_i(t)T + \frac{v_i(t)(v_{i+1}(t) - v_i(t))}{2\sqrt{ab}} \right\} \quad (2)$$

式 (1) の δ は必要とされる車間距離であり、式 (2) で定義される。 Δx_{min} は先行車と自車両との安全とされる最低車間距離であり、 T は安全とされる最小車間時間である。また、 $v_{i+1}(t)$ は時間 t 先行車両の速度、 $v_i(t)$ は自車両の速度であり、 a と b はそれぞれ最大加速度と最大減速度である。このモデルでは先行車がいる場合は自車両の速度が先行車の速度に近づくときに加速度はある値から 0 まで減少する。また、先行車との車間距離 $\Delta x_i(t)$ が δ に近づくとき加速度は 0 に減少する。

3.2.2 Minimizing Overall Braking decelerations Induced by Lane changes (MOBIL)

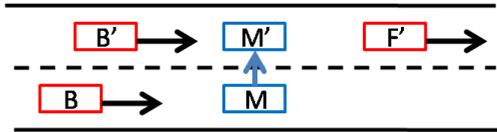


図4：MOBILによる車線変更

MOBILとは、IDMと共に用いられることを前提とし、車線変更を行なおうとする前に、IDMを用いることにより車線変更後の各車両の加速度を計算することで、車線変更可能であるかを判定する制御モデルである。MOBILは、図4に示した位置関係において、次式によって定義される。

$$acc'(B') > -b_{save} \quad (1)$$

$$acc'(M') - acc(M) > p[acc(B) + acc(B') - acc'(B) - acc'(B')] + a_{thr} \quad (2)$$

式(1)は安全条件を表している。accは各車両の加速度であり、また、式中の「'」は車線変更後の車両、または、加速度を表している。式(2)は親切度(p: politeness factor)、車線変更後の加速度から車線変更を行うことが自車にとって有益であるかを判定する。Mは車線変更を行なおうとする自車両、Bは車線変更前の後方車両、B'は車線変更後の後方車両、F'は車線変更後の前方車両を表している。式(2)のpは親切度を表しており、値が大きくなるほど、自車は利他的な車線変更を考えることとなり、また、値が小さいほど、利己的な車線変更を考えるようになる。a_{thr}は最低加速度である。このモデルでは、車線変更を行った場合の、自車の加速度と後方車の加速度の値から車線変更可能であるかを判定する。

本提案評価方式では、プラトゥーンが目的地手前で、走行車線へ車線変更を行う必要があるため、追越車線を走行するプラトゥーン並びに、一般車両は車線変更をすることでの利得は考えず、目的地までに式(1)を満たす場合に、追越車線から走行車線へ車線変更を行うこととした。このようにすることで、安全条件が満たされる状況のみ車線変更を行うことが出来る。

4. シミュレーション

3章で述べた車両挙動運動方程式をマルチエージェントシミュレータ artisoc 上で実装し、シミュレーションを行う。

4.1 シミュレーション環境

表2にシミュレーションパラメータを、図5にシミュレーション環境を示す。

モデル	二車線直線道路
車両環境	一般車両とプラトゥーンの混在交通
道路長	10km
出口	8kmの位置に1箇所
車両最高速度	走行車線 約80km/h・追越車線 約100km/h
車両の生起	指数分布
交通量	(1000, 1500, 2000) 台/h
車両走行モデル	IDM
車線変更モデル	MOBIL
プラトゥーン内車間距離	4m
プラトゥーン構成台数	2~8台

表2：シミュレーション条件

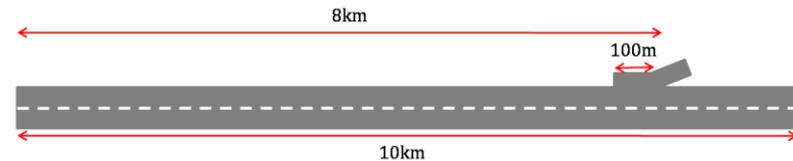


図5：シミュレーション高速道路モデル

車両は、発生時に一様乱数を用いて2車線の内どちらの車線を走行するかを選択し、IDMによる追従走行を行う。また、一様乱数により、走行車線内の一般車が目的地で高速道路を降りる割合、追越車線内での目的地で降りる一般車両の割合、追越車線内でのプラトゥーンの割合、プラトゥーンの内、目的地で高速道路を降りる割合を設定しシミュレーションを行うものとした。

また、プラトゥーン内車間距離は、最終目標値とされている4mを採用し、プラトゥーン構成台数、交通量は可変とし、プラトゥーンに構成されたトラックはすべて同じ出発地、かつ、同じ目的地を持つものとし、流出ランプに進行するまで、プラトゥ

ーンを解消しないものとする。

車両の大きさは一般車両を 5m, トラックを 7m とし, すべてのトラックはプラトウーンを構成しているものとし, トラックの生起台数は追越車線を走行する車両の 5% 程度とした。また, 追越車線では, 最高速度 100km/h 前後の値を, 走行車線では, 最高速度 80km/h 前後の値を設定している。また, 全シミュレーションにおいて, シミュレーション開始時に用いた車両の比率は, 以下のように設定した。

左車線走行比率	60%	右車線走行比率	40%
左車線 IC 流出比率	20%	右車線プラトウーン比率	5%
右車線一般車 IC 流出比率	20%	プラトウーン IC 流出比率	50%

表 3: シミュレーション条件 (2)

4.2 シミュレーション結果

本提案評価方式を 4.1 節の条件の下, シミュレーションを行った。結果はシミュレーション上での 1 時間のシミュレーションを, 各プラトウーン構成台数, 各交通量について 10 回行い, 平均を算出したものである。

4.2.1 プラトウーン構成台数変化

図 6 に示すように, 構成車両台数を増やすことで, 予め目的地手前で, プラトウーンを解消しない方法であっても, 目的地で降りるプラトウーンが実際に 3.2.2 節の安全条件を満たし, 車線変更を行うことで, 目的地へ流出することが出来るプラトウーンの数減少することがわかる。特に, 4 台以上のプラトウーンで構成された場合は, 目的地で降りることの出来ないプラトウーンの割合が大きく増える結果となった。

4.2.2 交通量変化

図 6 に示すように, 交通量を増やすことで, 各車両間の車間距離が縮まるため, 追越車線から走行車線へ安全条件を満たし, 車線変更を行うことが困難になる。このため, 流出することが出来るプラトウーンの数減少することがわかる。が, 交通量が 1000 台程度であれば, 3 台ほどのプラトウーン構成台数であれば, プラトウーンを解消しない状態で, 車線変更を行うために, 他の車両とウイーカーを点滅させることで, 車線変更後の車両の減速を促すなどの協調を行わない場合であっても, 95% 近くのプラトウーンが目的地で降りることが出来た。また, 交通量が 1 時間当り 1500 台と, 2000 台の場合で変化量が少ないのは, ある程度の交通量以上で車両が走行することで, 道路容量の飽和状態に近づくために, 道路の空き容量が車線変更を行った場合や, 前方車両がインターチェンジで降りた場合の加速などによることで発生することでの僅かな車間距離の歪みでしか, 安全に車線変更を行うために必要な道路の空き容量 (安全な車間距離) を確保することが出来ないからであると考えられる。

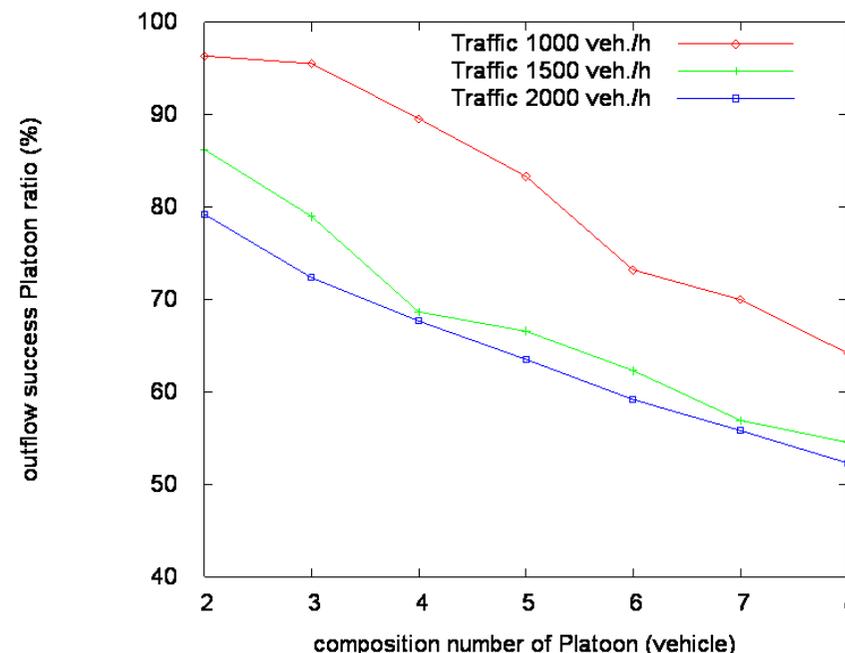


図 6: シミュレーション結果

5. まとめ

本研究の目的は, 提案評価方式により, 目的地が同じトラックが目的地手前で, プラトウーンを解消しない場合における, プラトウーンが一般車両に与える影響を評価し, 検討を行うことである。

本稿では, プラトウーン構成台数と一般車両の交通量を変化することで, どの程度の影響を与えるかを示した。結果として, 交通量が増加し, プラトウーン構成台数が増加することで, 複数のプラトウーンが目的地へ到達することが出来ない結果となった。

ここで, 目的地へ到達するために考えられるのが, 目的地の手前でプラトウーンを

解消することである。プラトーンを解消する場合には、目的地から何 km 程度離れた場所で解消を行う必要があるのかという問題になる。また、同じ目的地同士のプラトーンであれば、他車両と協調することで、プラトーン解消のコストを掛けずに目的地へ到達するという方法も考えられる。今後は、これらのことを考慮し、プラトーン走行を実現するための、プラトーン特有の目的地付近での問題を解決していく必要がある。

謝辞

本研究の一部は、平成 22 年度文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (B) (20300030) の支援を受けて行った。

参考文献

- [1] 徳田清仁:デモ 2000 協調走行の車車間通信技術, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.100, No.576, pp.25-30(2000)
- [2] 財団法人鉄道総合技術研究所:自動バス「IMTS」の開発現場について, <http://www.rtri.or.jp/>
- [3] 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構ホームページ, <http://www.nedo.go.jp/>
- [4] 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構:第 1 回「エネルギーITS 推進事業」(中間評価)分科会報告書(2010-8)
- [5] Martin Treiber, Ansgar Hennecke, and Dirk Helbing. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. Phys. Rev. E 62, 1805–1824
- [6] Martin Treiber, Arne Kesting, and Dirk Helbing, General Lane-Changing Model MOBIL for Car-Following Models. Transp ,Res Rec No.1999, Page86-94 (2007)