

都市間高速道路における隊列走行の 長編成化ニーズと分合流部の運用に関する検討

平田 輝満¹・影山 拓哉²

¹正会員 茨城大学准教授 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町四丁目12-1)
E-mail:terumitsu.hirata.a@vc.ibaraki.ac.jp

²非会員 茨城大学 工学部都市システム工学科 (〒316-8511 茨城県日立市中成沢町四丁目12-1)

近年、物流分野においてトラックドライバー不足が問題となっており、ネット通販の普及などを背景とした貨物の小口化の進行とともに、件数ベースでの物流量が増加しており、物流の高度化・効率化が必要となっている。その対策の一つとして自動運転を活用した物流システムが考えられており、先頭車両のみドライバーが運転し、後続車は車両間通信により無人で追従する隊列走行の導入に期待がかけられている。隊列走行はなるべく長編成化できた方が効率化につながるが、隊列走行の長編成化が分合流交通流に与える影響については必ずしも明らかにされていない。そこで、本研究では長編成化された隊列車両の合流円滑化方策を検討し、交通シミュレーションによりその効果を分析した。

Key Words : platoon, long formation, highway, merge, operation

1. はじめに

近年、特に物流分野においてトラックドライバー不足が問題となっており、さらに、ネット通販の普及などを背景とした貨物の小口化の進行、件数ベースでの物流量の増加から、物流の高度化・効率化が必要となっている^{1) 下の1)2)}。これに対し、自動走行による物流効率化が考えられている。しかし、現在はジュネーブ条約において、車両には運転手がいなければならないことが定められている^{3) 3)} ため、当面の対応策として先頭車両のみドライバーが運転し、後続車は車両間通信により無人で追従する隊列走行 (Platoon または Convoy) の導入が考えられている。隊列走行はレーダーやカメラ、通信技術を活用し後続車が先行車に自動で追従・車線維持を行う、いわば電氣的な車両牽引システムであり、トラックの隊列走行の技術開発については、主に環境対策 (省エネルギー対策) や道路容量対策として欧米や日本において国家プロジェクトとして進められてきた。最初の走行実験プロジェクトは 1990 年代半ばから 2000 年代初期に欧州 (EU) で行われた「CHAUFFEUR1」「同 2」^{4) 6)} であり、3 台の大型トラックの隊列走行をオーストリアとイタリア間の道路で走行実験を行っている。2000 年代初期には米国でも「California PATH Program」^{5) 6)} が開始され、longitudinal 制御のみであったが車間 6m で 3 台のトラック隊列走行を実験走行し、平均 10% の燃費向上の確認や高速道路の容量への影響について分析された。2005～2009 年にかけてドイツのアーヘン大学の研究者を中心とした

チームがプロジェクト「KONVOI」として 4 台のトラック隊列走行を実験し、先頭車は人間が運転、後続 3 台が車間 10m で自動走行させている⁶⁾。日本においても 2005 年から 5 年間、NEDO において「エネルギーITS」プロジェクトとしてトラック隊列走行の研究開発を実施し、テストコースにおいて 3 台で車間 4.7m、速度 80km/h の走行実験を成功させている⁶⁾。近年では欧州で EU のファンディングによるトラック等の隊列走行実験プロジェクトが盛んであり、SARTRE (Safe Road Trains for the Environment : 2009 年から 3 か年)、COMPANION⁷⁾ (COoperative dynamic for Mation of Platoons for sAfe and eNergy-optimized gOODs transportation: 2013 年から 3 か年) などが実施され、実フィールドでの走行実験や発着地の異なる複数トラックを Platoon 化するための走行ルートのコーディネーションなどが実施されている。最近では、欧州でクロスボーダー実道走行テストを目指し、2016 年にオランダ政府が主導した European Truck Platooning Challenge 2016⁸⁾ が実施され、同年には EU 内で調和のとれた自動運転・コネクティドカーの技術開発・制度設計を行うためのアムステルダム宣言 (Declaration of Amsterdam on cooperation in the field of connected and automated driving)⁹⁾ がサインされ、トラック隊列走行に関しては、現在 Real Life Cases Truck Platooning (2017-2019) というプロジェクトが開始されており、主にロジスティクス企業などの需要面からみたメリットや、道路管理面の適合性・メリット、トラックドライバーや他の道路ユーザーからみた受容性などの検証を計画している。日本においても、2016 年 6 月に「日本再興戦略

2016—第4次産業革命に向けて—¹⁰⁾が閣議決定され、その中で 2020 年までに高速道路における隊列走行の実現が謳われ、物流企業なども連携して公道実証が計画されている。

以上のように、欧米や日本において隊列走行の技術開発や実道実験が展開されているが、隊列走行のメリットを最大化するためには、当然ながら隊列に加わる車両数を 5 台程度以上の規模にする、つまり長編成化が必要がある¹¹⁾。例えば、隊列走行による空気抵抗低減で燃費が向上するが、先頭車で 10%、間に挟まれた車両で 20%、最後尾車で 15% の燃費向上を仮定すると 10 台程度までは長編成化によって有意なメリットが見られる¹²⁾。トラックドライバー不足への対応を考えれば、長編成化すればするほど人件費が抑えられ、物流の生産性は格段に向上する可能性がある。一方で、隊列の長編成化に伴い、周辺交通流への影響や分合流の困難さなどが問題となる。

隊列走行に関するこれまでの研究は、主として安全で効率的な自動運転のための技術的要件に関する研究が多い(Chang ら¹³⁾)。一方で交通工学の視点から隊列走行が交通流に与える影響や、隊列を編成するための複数車両のコーディネーションに関して分析した研究も存在し、Chen ら¹⁴⁾は車線数の異なる単路部の交通容量について自動運転車の普及率や隊列走行の車間距離条件などの影響を理論的に解析するモデルを開発している。車両コーディネーション問題に関しては、隊列を編成する場合、事前に出発時刻やルートを調整する方法(off-road coordination)と走行しながら隊列相手を探す方法(on-road coordination)があり、前者は隊列走行のための自動運転車両の普及率が低い状況で適している(Chang ら¹³⁾)。なお、我が国政府の未来投資会議(2016)¹⁸⁾では、高速道路に併設した隊列編成拠点や、隊列編成による物流の効率化のため、複数の物流事業者の共同輸送などについても提案され、人件費や燃料費の削減などの概算も行っているが、これも off-road coordination の一種と考えられる。Larson ら¹⁵⁾はリアルタイムの位置情報などを活用した速度制御を行うことによる経路途中での隊列化とそれによる走行コスト削減効果の推計を行っている。また Chang ら¹³⁾は所要時間の不確実性も考慮した出発時刻制御によるコスト最小化問題を分析している。またオンランプにおいて、隊列走行車両を目的地別にどのようにソーティングするかという研究も行われている¹¹⁾。一方、本研究で着目している隊列走行車両の分合流が交通流に与える影響に関しては、河合ら¹⁷⁾は、隊列走行車が目的の出口で高速道路本線を降りられるのかについてシミュレーションを用いて分析している。また、隊列走行ではないが自動運転車に対応した合流制御に関しては、例えば合流車を本線側に仮想的に配置し、合流ギャップの形成を行う方法の提案がなされている²¹⁾²²⁾。合流部の運用方法と面では自動運転の研究ではないが、洪ら¹⁹⁾は合流と本線の優先方向の動的変化変更(動的変換チャネリゼーション)の効果をマイクロシミュレーションにより分析している。また、隊列走行の交通

流へ影響や合流といった視点ではないが、隊列走行に関する社会受容性に関してドライビングシミュレータを活用して分析している事例があり²³⁾、分合流への対応以外でも、このような社会受容性や走行安全性に関する研究も当然ながら重要である。

以上、自動運転による隊列走行に関する研究は様々な視点で実施されているものの、隊列走行車の分合流、特に隊列の長編成化による分合流(または車線変更)への影響についてはあまり研究がなされていない。前述のとおり、隊列走行の編成については、走行途中で実施されることも十分あり得るが、一方で貨物に関しては高速道路の路外などの拠点で積み替えや混載、ドライバーの乗り降り・交代などのニーズも考えられ、隊列を組んだあとも JCT 部での分合流は発生するため、隊列走行自体の分合流に関しても検討する必要性はあると考えた。なお、高速道路のインターチェンジについては国交省の H29 年度予算²⁴⁾に「高速道路と民間施設を直結する専用インターチェンジ整備制度の創設」が盛り込まれ、物流拠点など民間企業による提案や整備費用負担を含めた高速道路直結の新たな施設整備と運用に関する検討も始まっており、上記のようなニーズは益々高まっていると思われる。また、本研究は主に都市間高速道路における物流システムを想定としているが、過去に西田・北村・中村(1998)²⁵⁾、石坂(2006)²⁶⁾が高速道路の近代化による新たな自動貨物輸送システムとして第二東名・名神高速道路を対象に高速道路に専用軌道を敷き、鉄道貨物におけるピギーバック輸送形式の貨車による自動輸送システムを提案し、ターミナルの設計や費用対効果の試算まで詳細に分析が行われている。トラックの自動運転・隊列走行はこの研究で提案されているような自動輸送システムを新たな技術で達成する一手法とも考えられ、既存の高速道路ストックの最大有効活用策の検討の一つとして十分に検討すべき課題であると考えた。

以上を踏まえ、本研究では都市間高速道路を対象に、以下の 2 点を目的とする。

- ・ 隊列走行の長編成化を念頭に置いた隊列走行車の分合流の方法に関して検討する。
- ・ 2車線の高速道路を対象に交通流シミュレーション Vissim を活用して隊列走行の長編成化による合流部の処理効率への影響と合流円滑化策の効果に関して分析を行う。

2. 隊列走行の分合流方法に関する検討

2.1 分合流方法検討の条件

本研究では、2 車線以上の高速道路を念頭に、主に長編成隊列車両の合流の影響と隊列走行車を考慮した合流方法について検討を行う。本節ではその前提条件について考察・設定した。整理結果を図-1 に示している。

- ① 車車間通信・自動運転車両の普及度: 乗用車も含め全

車両に車車間通信や自動運転の機能が普及するにはまだ時間がかり、非自動運転車も混在することを前提とした。特に本研究では、簡単のため隊列走行車以外は一般の非自動運転車と仮定している。

- ② 隊列走行車の合流車線(オンランプ):既存の合流車線(一般車と混在)と隊列専用の専用合流車線(新設)の2つが考えられる。既存と専用双方にメリットがあるが、新たに専用オンランプを設置する費用や、将来的に全ての車両に車車間通信が可能となり、合流の順序付けや間隔設定が自動的にできるようになれば既存の合流車線もそのまま活用できる可能性もある。本研究では既存の合流車線の活用を念頭に置くが、分析においては隊列走行車両のみを発生させているケースが多いため、今回は特に厳密にどちらを想定ということはない。
- ③ 分合流の位置:NEDO のエネルギーITS プロジェクトレポート²⁷⁾では隊列走行車の合流位置と走行車線についてはXとYの2つのコンセプトが提案されている。Xは隊列3台以下で、単独車両で本線に合流した後、本線上で隊列を組むコンセプト(一般車と混在)、Yは隊列4台以上を想定し隊列専用の車線を確保し、専用車線直結のドライバー乗降場で隊列を組み本線に合流するコンセプトである。Yのイメージ図では専用車線は本線の内側(追い越し車線)に設定されており、恐らく隊列が外側の走行車線を走行していることによる他の合流車への影響を回避する狙いがあると想像される。本研究では隊列の長編成化を想定しているので上記のYコンセプトの前提に近いが、本研究では「一般車両への影響を最小化」「追加施設整備コストの低減」をコンセプトに、まずは専用車線化をしなくても対応できる案を検討することとし、既存の合流車線の活用を前提にすることとし、通常の左側合流を仮定した。なお、追い越し車線側に合流させるのは我が国の道路スペースや構造を考えた際には必ずしも容易ではない(整備コストがかかる)ため、検討から除外した。
- ④ 本線における隊列車の走行車線(走行位置):本研究ではこの項目については精査していないが、左側合流を前提とすると一定区間は本線も左側(外側の走行車線)を走行することが前提となる。このことによるデメリットは一般車の合流を受ける際に(被合流と記載)、本線の隊列車が長編成であると合流の妨げになることが挙げられる。もしこれがクリティカルな問題になるようであれば、本線の隊列車を感知し合流車側にランプメタリングのようなシステムで合流タイミングを制御することも考えられる。また、IC間の本線で隊列車が内側の追い越し車線(2車線区間)や中央車線(3車線区間)に車線変更ができれば問題はないが、長編成化や交通量の過多により必ずしも容易ではなくなるかもしれない。ただし、アイデア段階ではあるが、長編成化した隊列走行車の車線変更の際、

一般的には隊列の先頭車から車線変更することがイメージされると思われるが、逆に最後尾車両から車線変更するような制御が可能であれば、1台分のギャップで最後尾車両から車線変更をし、その車両の速度を適切に制御(例えば若干の低速走行をしてギャップを形成するなど)を行うことで、順次、他の隊列内車両の車線変更も比較的容易にできるのではないかと考えられる。もしこのような方法で長編成隊列車の車線変更が可能となれば、被合流の問題もなくなり、他の分合流・JCT 関連の動線でも走行の自由度が上がると思われる。

- ⑤ 合流方法:本研究における検討対象であり詳細は後述する。
- ⑥ 隊列車の本線走行時の合流(被合流):隊列車が本線走行中に合流を受ける被合流に関するもので、④で述べたような問題が生じる可能性があり、対応策は精査していないが、前述のようなアイデアは考えられる。また、欧州の隊列走行実道実験では隊列車の間に一般車が入り込むことも許容できているシステムのものであり、これを前提とすると、合流区間では隊列をばらして、間に一般車をジッパリー式のように入れ込むことで被合流も円滑にできる可能性も考えられる。一方で、前述のようにランプメタリングのような信号による合流車制御により隊列の間に車両を合流させない方法も考えられるが、隊列の間を一般車が走行することによる隊列の乱れや隊列の再編成の必要性を考え、④の隊列車の車線変更かランプメタリングのような方法を本研究では前提とした(つまり、一般車の挟み込みはなし)。

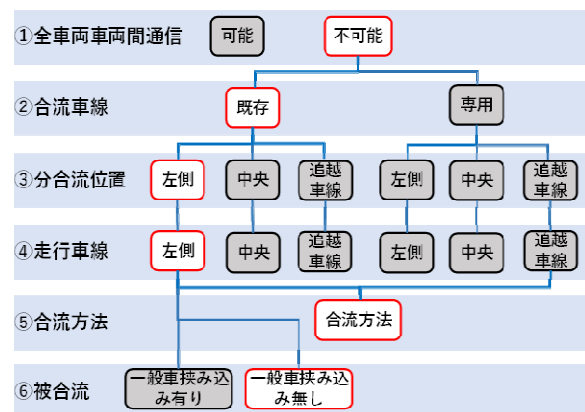


図-1 本研究で仮定した隊列走行車両合流の前提条件

2.2 隊列走行車の合流円滑化方法の検討

高速道路上の合流にはインターチェンジ(以下 IC)等の単純な合流とジャンクション(以下 JCT)での複雑な分合流がある。本研究では IC での一般的な合流を対象に以下の方法を検討した。

- ① 本線走行車を避走させる方法

後述のシミュレーション分析ではこの方法を対象に分析を実施しているが、この方法では道路構造(車線形状の変更)により恒常的に本線走行車を避走させる方法と、隊列合流車が接近した場合のみ必要に応じて車線を制御する「動的交通(車線)運用」(動的可変チャネリゼーション¹⁹⁾)により隊列走行車の合流時のみ本線交通を避走させる方法を考えた(LED等のレーンライティングや Variable-message sign などの活用をイメージ)。また、本線交通を避走させるための絞り込み位置は図-2に示す上流・下流、走行車線・追越車線の組み合わせが考えられる。上流・下流については上流で絞込を行うと一時的に車線数が1車線少ない状態になるため、下流が妥当と思われる。絞り込む車線については、交通量ごとに車線利用率に違いがあるため、交通量ごとに最適な位置が異なる。また、図3はもともと2車線区間を合流区間付近のみ車線幅を狭め・路肩も狭めることで、2→3車線化する案である。これと同様の事例は実際にあり、平成23年度10月から東名高速道路の音羽蒲郡IC～豊田JCT間で渋滞対策として車線と路肩の幅員を縮小することにより、もともと2車線区間であったところを暫定3車線化し、大幅に渋滞を減らした実績がある²⁰⁾。図3では①は合流車線を実質延長し、隊列走行車が合流するギャップを形成する機会を増加させる案、②はさらに合流車(隊列車)が下流側で車線変更する必要もなくす案(合流優先)である。これができれば、隊列車の合流は非常に円滑に行えるものと思われる。

② 隊列合流車側を制御する方法

この方法では、合流区間の本線上流の本線交通状況を観測し、合流する隊列車両すべてが合流できるギャップが形成されると判断されたタイミングで隊列を合流させる方法である。前述のランプメタリングと同様の発想であるが、タイミングがあればスムーズに隊列走行車が加速しながら合流ができるが、本線ギャップの安定性とタイミングの精度が課題となる。交通量が少なく隊列構成台数が少ない場合には有効かもしれない。また、前述のように隊列車の間に一般車を挟み込みながらジッパース式に合流する方法も考えられるが、前述のような課題がある。

③ 本線においてペースカーのような特殊任務車が合流ギャップを確保する方法

この方法の1例として、合流部上流から2台1組のペースカーのような車両を走行させ、合流部に向かいながら車間距離を広げ、隊列車と通信等を行うことでタイミングを合わせつつ合流分のスペースを確保するという方法も特殊な方法であるがアイデアとしては考えられる。間に一般車を入れさせない方法などの検討が必要にはなる。

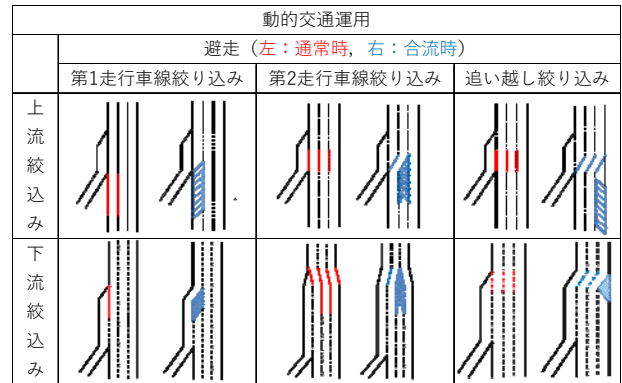


図-2 動的交通(車線)運用時の絞り込み位置について

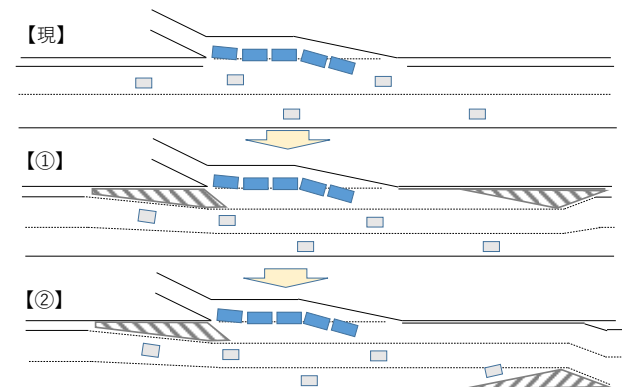


図-3 暫定3車線化の応用による合流円滑化案

3. VISSIM を活用した隊列走行の合流シミュレーションと周辺交通流への影響分析

交通シミュレーション Vissim を用い、隊列走行が本線交通に与える影響と最適な合流手法の検証を行った。

3.1 キャリブレーション

検証にあたって、現状の合流挙動との整合性をとるため、合流挙動に関係するパラメータの調整を行った。パラメータは高速道路に適したモデルであるwiedemann 99を使用した。なお、調整に当たっては巻上ら⁷⁾の合流部交通実態調査により示された合流ギャップの分布を参考に、下記の3つのパラメータをデフォルト値から試行錯誤で変更して適切な車間距離を取るように変更した。

- 1) CC1: ドライバーが保ちたい車頭時間間隔。
速度を v とすると安全車間距離は以下で定義される。

$$\text{安全車間距離} = 1.5 + \text{CC1} \times v$$

安全車間距離は、ドライバーが他の車両を追従する際に保つ最小車間距離を定義する。

- 2) CC2: 進行方向の振動を規定し、適切な車間距離よりもどれくらい距離を取るか、あるいは前の車に故意に近づくのをどの距離まで許すかを決定する。この値が、例えば 10m に設定されている場合、追従時の車間距離は dx_safe と $\text{dx_safe} + 10\text{m}$ の間の距離となる。

3) Safety distance reductory factor：車線変更時の安全車間距離削減ファクター

車線変更の間中、安全車間距離は次式で計算する。

安全車間距離＝元の安全車間距離×削減ファクター
 巻上ら²⁰⁾によると、合流ギャップは①自由合流、②高速合流、③等速合流、④低速合流に分けられる。本研究では、一般的に高速道路合流部での本線交通に対し合流車のほうが速度は遅いと考えられるため、低速合流の合流ギャップの分布にあわせてパラメータの調整を行った。合流ギャップに関しても独自に分類する必要があるため、表-1の方法で分類した。なお、パラメータはデフォルト値よりも安全車間距離を保つように設定した。結果として、キャリブレーション後の3つのパラメータの値は、CC1：1.1、CC2：14、Safety distance reductory factor：0.9となった。

合流ギャップの分布に関する実測値とVissimによる再現の比較について図-4に示す。χ²検定の結果から5%有意水準で合流ギャップのシミュレーション値の分布は巻上らの実測値と統計的に同じと判断できている。

また、設定したパラメータでの走行挙動の確認のため、車両速度と交通量（トラフィックカウンターによる計測値）の関係（以降Q-V関係とする）について実際のデータとパラメータ調整後のVissimによる値の比較を行った。Vissimのシミュレーション値を算出するにあたって、単純な2車線の単路部上（約15km）上を7km地点から100mの範囲における平均速度、交通量を測定した。実際のデータは、NEXCO東日本関東支社管内の片側2車線区間の2016年8月のデータを用いて集計した。なお、中央環状線・京葉道路などの都心部に近い道路のデータについては除外した。結果を図-5に示す。緑で実測値の平均は、500台/h毎の交通量の前後50台/hの幅で平均したものを使用した。Vissim上では発生交通量を500台/h毎に増加させた際の交通量との関係を示した。結果として平均的なQ-V関係と交通容量（渋滞域へ落ちる交通量）が概ね一致していることを確認した。

3.2 交通条件の設定と隊列走行車の再現

前提条件として、隊列走行は現在高速道路における導入が想定されているため、想定する交通状況は高速道路とした。本線は片側2車線、合流車線は1車線とし、合流車線長は約200mとした。

本研究では、本線交通において実際の高速道路のように追越車線と走行車線での車線ごとの速度差や車線利用率の違いは再現していない。これは、vissim上の設定で簡易に設定をしたところ道路構造を変化させた場合において、左側の車線から右側の車線へ車線変更する際、速

度差の違いから極端に車線変更の発生が減少していたためである。よって、車線ごとの違いをなくし、すべての車線で同じ平均速度、車線利用率で検証を行った。

表-1 合流ギャップの前提条件

拘束合流		
ギャップ前後の車両を合流車が認識し合流する場合		
低速合流	等速合流	高速合流
(合流車の速度－ギャップ後方の速度) < -2km/h	-2km/h < (合流車の速度－ギャップ後方の速度) < 2km/h	(合流車の速度－ギャップ後方の速度) > 2km/h

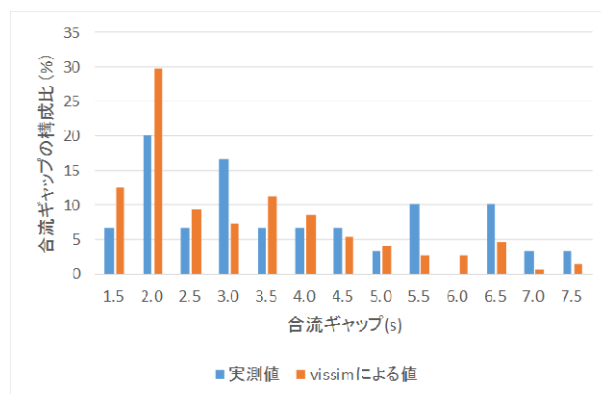


図-4 合流ギャップの分布の実測値（巻上ら²⁰⁾）とVissimによる再現の比較

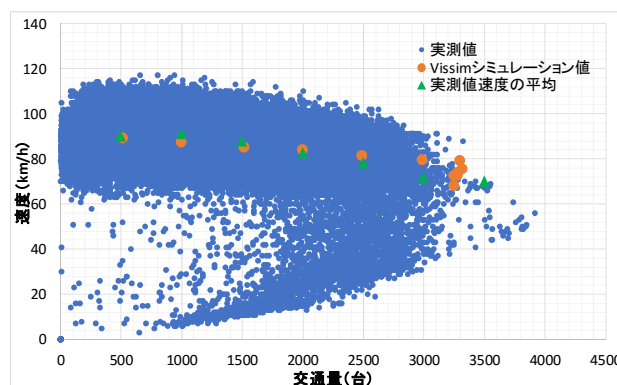


図-5 高速道路片側2車線区間のQ-V図およびvissimによるシミュレーション値

本線交通の個々の車両が持つ希望速度の分布は実際の交通（平成28年8月のNEXCO東日本支社管内の片側2車線区間のデータ）の自由流と思われる範囲（400<交通量[台/h]<600かつ速度60km/h以上）での速度分布を基に設定した。本線交通の希望速度の平均が約90km/hのため、合流交通の希望速度は本線交通より少し遅い80km/h付近で分布させた。合流車線長の決定には広島高速道路公社による加速車線長の標準値と、本研究での発生交通の希望速度の平均が約90km/hであることから決定した。車両の前後視認

距離の範囲はデフォルトの値、前方250m、後方150mで行った（つまり、それ以上離隔している他車両は視認できないため、その車両は存在しないものとして車線変更等の挙動をする）。隊列走行車に関しては前述の通り、車線変更を避けるには、分合流の車線と同じ車線を走行し続けたほうが望ましいと考えられるため、左側の車線を走行する設定にした。

隊列走行車の合流について検証を行うためにVissim上で隊列走行車を簡易的に再現した。車長は、Vissimのデフォルトに存在するHGV（Heavy Goods Vehicle、重量貨物車）を参考に10.215mとし、エネルギーITS²⁷⁾による隊列走行技術開発の現在の技術で車間距離4mとなっているため、車間距離は4mとした。隊列走行の再現については、Vissimの2D/3D Modelsの項目にて、HGVの項目を複製(deuplicate)し、2D/3D Model segmentsの項目にてセグメントの複製を行い、車間距離を4mにするためShaft Lengthに4.275を入力した。設定上、本研究で再現された隊列走行車は、電子的に連結している実際の隊列走行と異なり、牽引車のように物理的な連結での再現となっているが、周辺交通流への影響を見る上では大きな問題はないと考えられる。

3.3 シミュレーションで変化させる条件(検証項目)

実際に隊列走行を導入する際、交通量などの状況による導入のしやすさの検討および交通状況ごとの合流方法の検討のため、①隊列走行車の構成台数、②隊列走行車の発生間隔、③本線交通量、の3つを変化させシミュレーションを行った。検証時間は3600秒（1時間）とし（前後の数分間は除外）、すべての検証において10回シミュレーションを行い、出力データを平均している。本線への影響は主に本線渋滞長で評価する。渋滞長の測定にはVissimのQueue Counterを用いた。ノーズ端から本線上流3.5kmまでの区間に10m間隔でQueue Counterを設置し、発生した待ち行列を観測している。速度が5km/hを下回り、10km/hを上回るまでを待ち行列状態とし、車頭距離20m以上はなれた待ち行列は別の待ち行列となる。待ち行列長は10m間隔で観測された待ち行列長の総計により算出した。以降、この待ち行列長を渋滞長として扱う。

3.4 合流方法の検証

本研究では、隊列走行車と一般車の有無による最適な合流方法案を検討した。検証の際は、(1)隊列車の合流による影響のみを把握するため、合流車線の発生交通は隊列走行車のみで検証し、2章で検討した合流円滑化方策案の一部（道路構造（車線形態）の違い）による本線渋滞長への影響を比較分析した。図-6に本研究で検証する道路構造のイメージ図を示す。その後、(2)通常時と

隊列走行車合流時の違いを検証するため、隊列走行なしの状態での合流方法の検証を行った。最後に、(3)合流交通に一般車と隊列走行車の両方を発生させて検証を行った。

3.4.1 隊列走行車のみでの検討

① 合流に関する対策無しでの検証

まず、合流部における対策を何も行わない場合の隊列走行車の合流可能性について検討した。また、合流交通は隊列車のみとし、平均6台/h(6隊列/h)のポアソン分布で発生させた。評価にあたっては隊列走行車が合流車線で停止していた時間の平均値(合流部終端まで到達し、合流可能なギャップ発生まで停止した時間の平均値)を指標として用いた。本線交通における車両発生位置（ノード）は合流より上流4.5kmに設定した。図-7に対策無しでの合流区間での平均停止時間を示す。まず、隊列台数の増加に伴う停止時間の増加はさほどみられない。これは、本線の個々の車両の希望速度がランダムに分布しているためシミュレーションで自然に車群が形成され、本線に形成された車群が通過するタイミングではギャップが比較的小さく隊列車が合流できず、車群の通過しないタイミングで十分大きなギャップが生じるという両極端な状況で合流していることが考えられる。本線交通量の影響をみると、隊列台数10台程度でも、本線交通量が2400台/h(=1200台/lane/h)以下であれば平均停止時間15秒以下であり、隊列走行車の合流に係る遅延時間からのみ見れば、この程度の交通量レベルであれば、特別な制御や対策がなくても本線に合流すること自体は大きな問題にならない可能性がある。ただし一般車の合流車の影響を見ていないため、専用の合流車線であればという結果である可能性もある。ここで、上記のように本線車が合流部へ差し掛かるまでに車群が形成されることが考えられるため、隊列車の停止時間は、本線でどの程度の車群が形成され、その車群間のギャップがどの程度になるかにも依存する。そこで参考として、車群の影響を受けない状況での検証として、本線交通の発生位置を合流部上流約300mに近づけた場合の結果を図-8に示す。これにより車群が形成される前に合流区間に到達しやすくなる。この結果、やはり、車群による大きなギャップが形成されづらくなり、隊列車の停止時間が伸びていることが分かる。実際には車群が形成される場合が通常であると思われるが、その前提条件の精査は今後必要と考えられる。

さて、ここで、参考として東日本エリアの高速道路の時間帯別交通量をみてみる。図-9～12には東日本の都市間主要高速道路の1車線あたりの区間別時間帯別交通量を示しているが、仮に前述の隊列走行の合流が可能な交通量の閾値を目安にすると、一部混雑時間では閾値を超える交通量となっているが、都市間物流貨物車両が比較的多く動く深夜帯はもちろん、昼間の時間帯でも多くの時間帯・区間で閾値

(1200 台/lane/h)を下回る交通量であるので、特別な対策がなくても隊列走行の合流が可能である区間は一定程度あると考えられる。しかしながら、一般車の合流の考慮や本線車とのコンフリクト回避を極力できた方が望ましいため、以降ではいくつかの特殊な交通流制御方法を検討した。

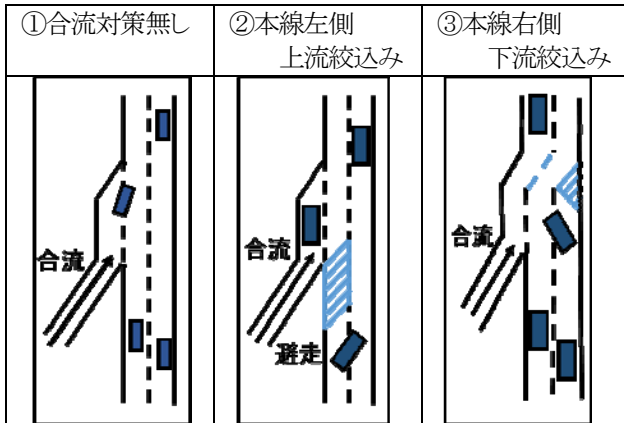


図-6 本研究で検討する道路構造のイメージ図

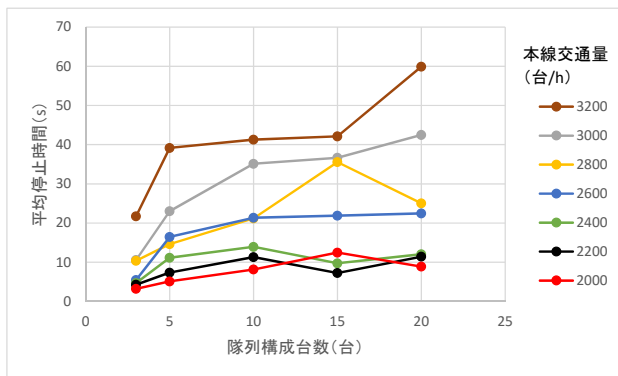


図-7 対策無しでの合流部終端での平均停止時間 (車両発生位置を上流 4.5km に設定)

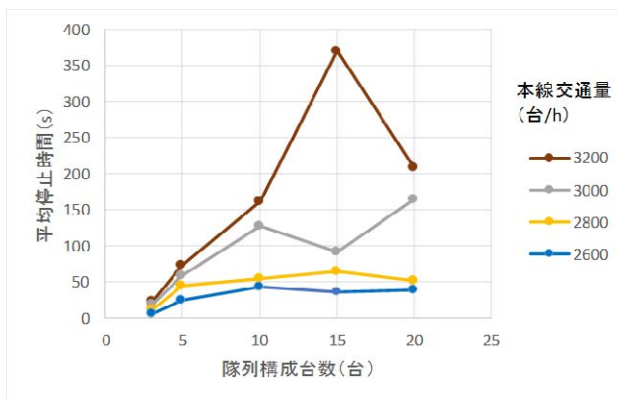


図-8 対策無しでの合流部終端での平均停止時間(車両発生位置を上流 0.3km に設定し、本線車群形成を抑制)

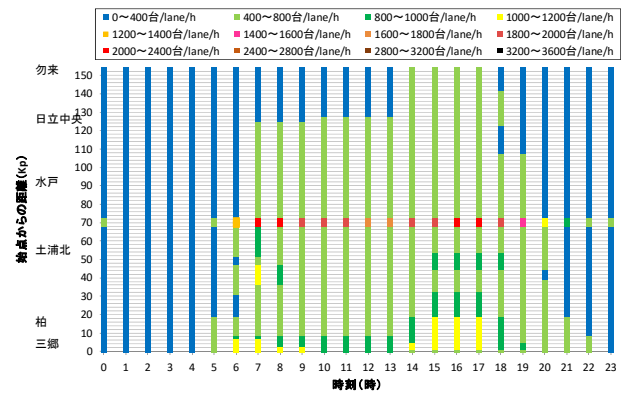


図-9 常磐道の区間別時間帯別交通量 (2016 年 8 月の平日平均)

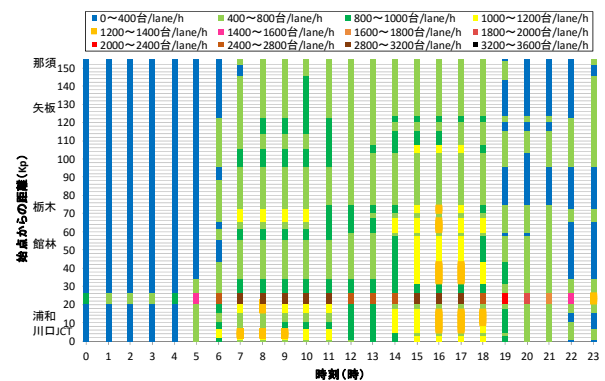


図-10 東北道の区間別時間帯別交通量 (同上)

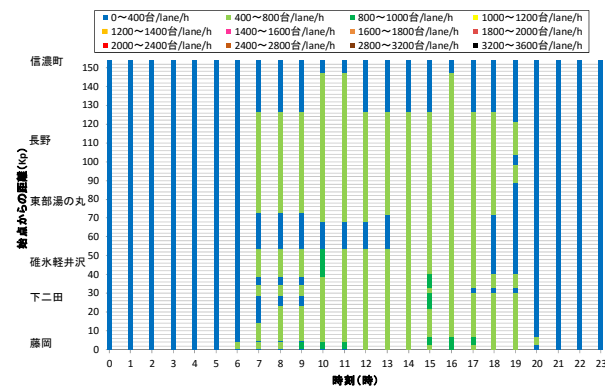


図-11 上信越道の区間別時間帯別交通量 (同上)

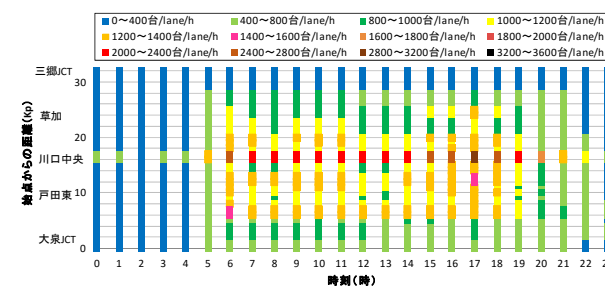


図-12 外環道の区間別時間帯別交通量 (同上)

② 本線交通を避走させる方法の検討

前節の結果より本線交通流2400台/h以上(1200台/lane/h以上)の場合、何らかの方法で本線交通流を制御し隊列車を合流させやすくする必要があると考えられる。そこで合流方法案のうちVissimにより容易に再現できる方法として隊列走行車合流時に動的交通(車線)運用により本線走行車に避走を促す場合の検証を行った。本研究では左側上流絞込みのみ検証を行う。動的交通運用には、Vissim上のpriority ruleという機能を用いた。Priority ruleとは停止線と交錯マーカーの2つを道路上に設置し、交錯マーカーに車両が接近した際、最小車間距離または最小車間時間以下になると停止線を設置した車線の交通を停止させるものである。本研究では合流車線に交錯マーカー、本線左側の車線に停止線を設置した。停止線を連続的に設定することで避走区間を再現し、合流区間終端から合流部上流約75mまでの区間に5m間隔で設置し、隊列走行車が本線合流部に到達する30秒前から本線交通を止める設定とした。検証の際は、動的交通運用により本線を絞り込む位置と同じ位置で道路構造(静的車線運用)により絞り込むパターンの検証も行い比較を行った。また、動的交通運用の方法では、動的交通運用に従わない車両が存在する場合は道路構造のほうが有効といえる可能性があるため、本線交通のうち動的交通運用に従わない車両を5%発生させ、本線交通量を3000台/hとした。合流交通が隊列車のみにおいて合流部上流本線走行車線絞込を道路構造と動的交通運用で本線渋滞長を比較した結果を図-13に示す。図-13より、当然ではあるが、本線交通へ与える影響から道路構造による恒常的な絞込みに対し、動的交通運用による絞込みの方が本線への影響が少ないことが分かり、隊列走行の発生間隔が5分に1回程度であれば、本線が3000台/hでも、さほど大きな影響が出ない可能性があることを確認できる。

③ 本線絞込位置の検証

次に、合流円滑化のための動的交通運用による本線車線の絞込位置の検討のため、上流より効果が高いと思われる下流絞込みについて、図-14に示す「追い越し車線絞り込み」と「走行車線絞り込み」の検証を静的な道路構造改变の場合で行った。合流交通が隊列走行車のみの場合において道路構造により合流部下流で走行車線と追越車線を絞り込む方法を比較した結果を図-15(本線交通量は3000台/h)に示す。図-15より、本線交通へ与える影響が少ないことから追越車線絞込が妥当という結果を得た。このような結果になった理由についてはシミュレーションを行った際のアニメーションから、シミュレーション上の特性により左右両方の交通を十分認識できずに走行車線絞込みでは絞り込み位置において危険な車線変更が発生し、その結果渋滞が発生したと思われる。

実際の交通においても走行車線絞込みではシミュレーションと同じように危険な車線変更が発生すると思われるため追越車線絞込みが妥当と考えられる。また、図-15に示すように隊列構成台数10台以上においては隊列走行車の発生間隔が2.5分以下で急激に本線へ与える影響が大きくなることがわかった。

3. 4. 2 一般車のみ合流の場合の分析

VISSIM上で合流部下流での車線の絞込を動的に行うことは今後の課題とし、その代わりに隊列走行が合流しない通常時でも追越車線絞込のほうがよければ動的車線変更を行う必要が無いとも考えられるため、隊列を発生させず、一般車両のみ合流する状態での検証を行った。検証では一般合流車の交通量を500台/hに固定、本線交通量は2000~3000台/hとした。結果を図-16に示す。検証の結果、通常時は既存の道路構造のほうが妥当ということがわかった。そのため動的交通運用を用いた方がよい可能性がある。

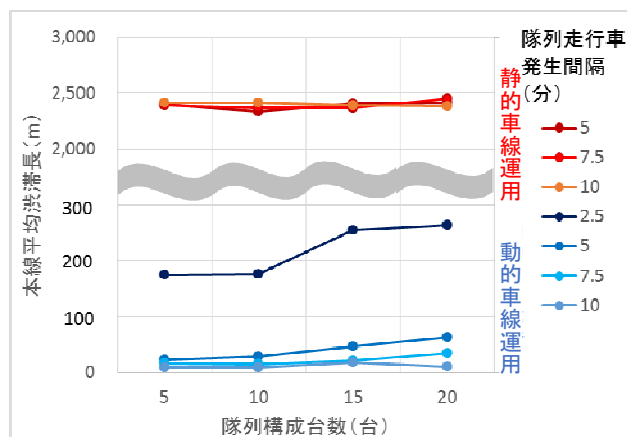


図-13 合流部上流絞込みの道路構造改变(静的)と動的交通運用の影響比較(本線 3000 台/h)

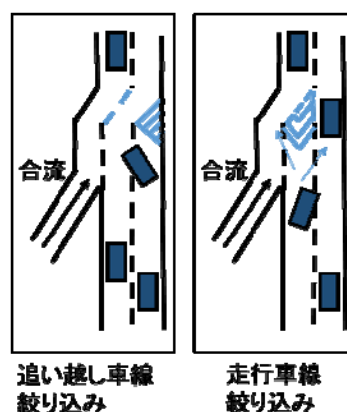


図-14 合流部優先形態における合流部下流追越車線絞込と走行車線絞り込み

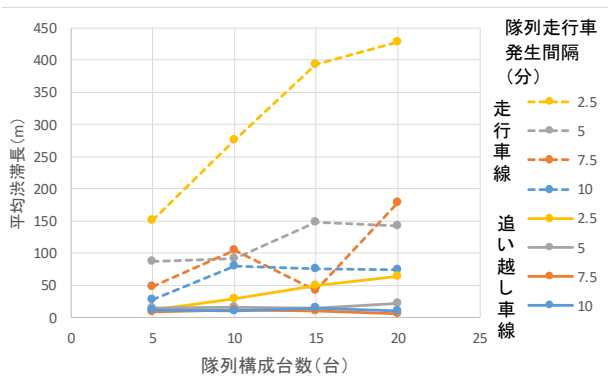


図-15 合流部下流追越車線絞込時と走行車線絞り込みの平均渋滞長比較(本線 3000 台/h, 合流交通が隊列走行車のみ)

3. 4. 3 隊列走行車及び一般走行車混在での合流

最後に、既存の合流車線を用いて隊列走行車と一般車が混在して合流する場合について簡単なシミュレーションを行った。ここでは、合流後の合流車と本線車の合計交通量を 3000 台/h と仮定し、そのうち本線交通量を 2500 台/h, 合流交通量 500 台/h を仮定した。合流車に一般車が混在するため静的な道路構造改変による合流部下流追越車線絞込でシミュレーションをした。その結果を図-17 に示しているが、本線交通量:合流交通量=5:1 の状況では、合流後交通量が交通容量(渋滞域の直前)の約 9 割程度でも、ほとんど渋滞が発生せず、隊列走行の合流による本線への影響があまり生じない。あくまである特定の合流・本線交通量の条件での結果であるが、追越車線絞込の有用性を確認できる。

3. 5 検証結果の整理

本研究では、長編成化された隊列走行車の合流に着目して合流方法を整理し、その上でシミュレーションにより合流の円滑性と本線交通流への影響について分析を行った。得られた主な結果は以下の通りである。

1) 隊列走行の合流に関して特別な対策が無い場合でも、本線交通量が 2400 台/h (1200 台/lane/h) 程度以下であれば、平均的にはさほど大きな待ち時間もなく 10 台規模の長編成化した隊列車両の合流が可能であり、例えば東日本エリアの高速道路では、多くの時間帯・区間で合流自体は可能であることを示した。ただし一般車合流を考慮していないため追加的な検討が必要である。

2) 隊列車の合流を円滑にするための方策としては、隊列 10 台で 5 分に 1 回程度の合流であれば、本線交通量 3000 台/h (1500 台/lane/h) において、合流部上流における動的な車線運用による強制避走により本線に大きな影響を与えずに合流優先運用が可能となる可能性を示した。また、同様の条件で、合流部下流部における追い越し車線絞り込みを道路構造改変(静的対策)によって実施すれば、合流優先運用が可能となる可能性を示した。ここでも同様に一般車合流の影響を追加的に分析する必要がある。

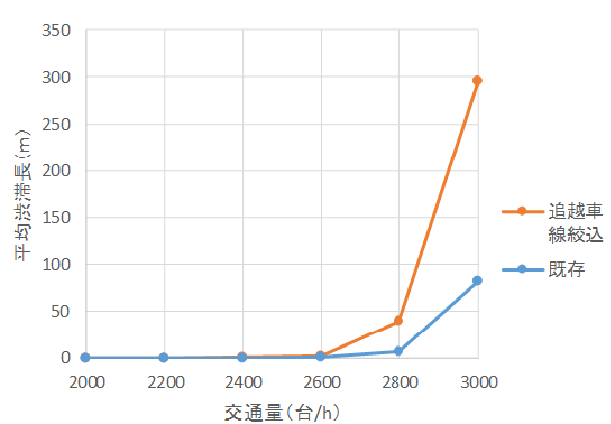


図-16 合流が一般車両のみの場合の通常の合流部構造と追越車線絞込みの本線渋滞長の比較(一般合流車の交通量 500 台/h, 本線交通量は 2~3000 台/h)

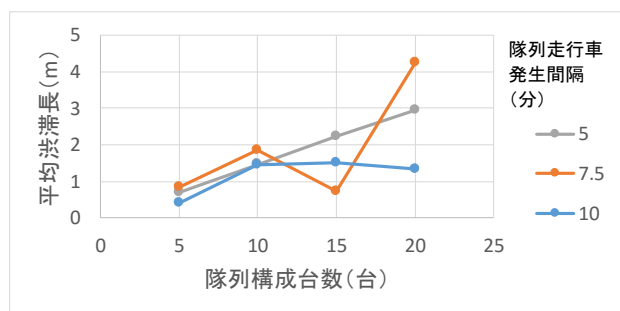


図-17 合流交通の隊列走行車と一般車混在時における道路構造による合流部下流追越車線絞込での平均渋滞長

4. 結論

本研究では、都市間高速道路における自動運転による隊列走行の長編成化の導入を想定し、長編成化に対応した合流円滑化方策について検討した。さらに、いくつかの合流円滑化方策についてシミュレーションにより分析を行った。一般車の合流を考慮していないなど、限られた条件での分析であるため、さらなる追加分析が必要であるが、長編成化された隊列車の合流の影響について、基礎的な知見を得た。分合流の円滑性評価においては、シミュレーションに内包された運転挙動モデルや交通流条件に大きく依存する部分があり、それらの影響についてもさらに詳細に分析が必要である。また、実際のドライバーが感じる隊列走行への不安感や社会受容性、実際の反応挙動についても十分に検討が必要となる²³⁾。また、隊列を組む車両や貨物のマッチング手法や編成のためのインフラ整備などの検討課題も重要な課題と考えており、それらを含め今後の課題としたい。

謝辞:

本研究は科学研究費補助金基盤研究(C)16K01282 の成果の一部であり、また研究を実施するにあたり、東日本高速道路株式会社殿から交通量等データをご提供いただいた。ここ

に記して感謝の意を表する。

【参考文献】

- 1) 社会資本整備審議会・交通政策審議会：今後の物流政策の基本的な方向性等について(答申), 2015.
- 2) 国土交通省：総物流施策大綱(2013-2017), 2013.
- 3) 外務省：ジュネーブ条約
http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/treaty/pdfs/B-S399%282%29-0533_1.pdf (2017年2月12日閲覧)
- 4) H. Fritz, C. Bonnet, H. Schiemenz, and D. Seeberger : Electronic tow-bar based platoon control of heavy duty trucks using vehicle. Vehicle communication: Practical results of the CHAUFFEUR2 project, ITS World Congress., Nagoya, 2004.
- 5) S. E. Shladover, Truck automation operational concept alternatives, 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp. 1072–1077, 2010.
- 6) Sadayuki Tsugawa, Sabina Jeschke, Steven E. Shladovers: A Review of Truck Platooning Projects for Energy Savings, IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, Volume:1, Issue:1, 2016.
- 7) COMPANION – COoperative dynamic forMation of Platoons for sAfe and eNergy-optImized gOods transportation , <http://www.companion-project.eu/>
- 8) European Truck Platooning Challenge - EU Truck Platoon Challenge , <https://www.eutruckplatooning.com/>
- 9) Declaration of Amsterdam -Cooperation in the field of connected and automated driving, April 2016, <https://english.eu2016.nl/binaries/eu2016-en/documents/publications/2016/04/14/declaration-of-amsterdam/2016-04-08-declaration-of-amsterdam-final-format-3.pdf>
- 10) 日本再興戦略 2016—第4次産業革命に向けて—, http://www.kantei.go.jp/jp/singi/keizaisaisei/pdf/2016_zentaihombun.pdf
- 11) Randolph Hall , Chinan Chin: Vehicle sorting for platoon formation: Impacts on highway entry and throughput , Transportation Research Part C, Volume 13, Issues 5–6, pp.405–420, 2005.
- 12) Driverless platoons: Analysis finds autonomous trucks that drive in packs could save time and fuel, MIT News Office, December 20, 2016 (<http://news.mit.edu/2016/driverless-truck-platoons-save-time-fuel-1221>)
- 13) Wei Zhang , Erik Jenelius , Xiaoliang Ma: Freight transport platoon coordination and departure time scheduling under travel time uncertainty, Transportation Research Part E, Volume 98, pp. 1–23, 2017.
- 14) Danjue Chen, Soyoung Ahn, Madhav Chitturi, David A. Noyce: Towards vehicle automation: Roadway capacity formulation for traffic mixed with regular and automated vehicles, Transportation Research Part B, Volume 100, pp.196–221, 2017.
- 15) Larson, J., Kammer, C., Liang, K.-Y., Johansson, K.H.: Coordinated route optimization for heavy-duty vehicle platoons. In: 2013 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). IEEE, pp. 1196–1202, 2013.
- 16) Larsson, E., Sennton, G., Larson, J.: The vehicle platooning problem: computational complexity and heuristics. Transport. Res. Part C: Emerg. Technol. 60, pp.258–277, 2015.
- 17) 河合功介, 田学軍, 井手口哲夫, 奥田隆: 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, 情報処理学会研究報告書, Vol.2010-MBL-56 No.12, 2010.
- 18) 未来投資会議構造改革徹底推進会合「第4次産業革命(Society5.0)・イノベーション」会合(第4次産業革命)(第3回) 配布資料, 2016.
- 19) 洪性俊, 田中伸治, 桑原雅夫: 首都高速道路の合流部における動的可変チャネルリゼーション導入効果の評価手法に関する研究, 生産研究 62 巻 2 号, 2010.
- 20) 巻上安爾, 安達靖夫, 末田元二: 高速道路改築に伴う合流部の合流車線について, 土木学会論文集 第 371 号/IV-5, 1986.
- 21) 宇野篤也・阪口健・津川定之: 仮想車両を用いた車両群の合流制御, システム制御情報学会論文誌, Vol.12, No.2, pp.136-138, 1999.
- 22) Sakaguchi, T., Uno, A., Tsugawa, S.: ‘Inter-vehicle communications for merging control’. Proceedings of the IEEE International Vehicle Electronics Conference, pp. 365–370, 1999.
- 23) 橋本 怜, 杉町 敏之, 須田 義大, 隊列走行システム実現のための社会受容性に関する研究, 生産研究, Vol. 69, No. 2 p. 95-98, 2017.
- 24) 平成 29 年度道路局関係予算決定概要, 2016 年 12 月 22 日. <https://www.mlit.go.jp/common/001156703.pdf>
- 25) 西田雅, 北村公大, 中村英夫: 高速幹線物流システムの提案, 運輸政策研究, Vol.1 No.2 pp.2-11, 1998.
- 26) 石坂久志: 第二東名・名神自動車道への先端貨物輸送システムの導入提案, 運輸政策研究, Vol.8, No.4, pp.12-18, 2006.
- 27) NEDO: 研究開発項目①「自動運転・隊列走行技術の研究開発」, <http://www.nedo.go.jp/content/100095912.pdf>
- 28) 前田忍, 矢田浩規, 森本紘文, 木村真也: 東名岡崎地区暫定 3 車線運用による交通状況改善効果と利用者意識, 土木計画学研究・講演集, Vol.46, No.105, 2012.

Needs for Longer platooning in intercity expressways and operation of merging sections
Terumitsu HIRATA and Takuya KAGEYAMA