

隊列自動走行のための 高速道路合流部の運用方法に関する研究

平田 輝満¹・讃良 将信²・影山 拓哉³

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)

E-mail: 13t5024y@vc.ibaraki.ac.jp

³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)

E-mail: 13T5007x@vc.ibaraki.ac.jp

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 : truck platoon, on-ramp merging, traffic simulation

1. はじめに

近年、特に物流分野において、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、トラックドライバー不足が問題となっている¹⁾。これに対し、自動走行による物流効率化が考えられており、例えば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) の導入がその代表例となる。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、いわば電気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 (例えば、欧州「CHAUFFEUR-1」²⁾ 「CHAUFFEUR-2」³⁾、米国「California PATH Program」⁴⁾、日本「NEDO エネルギーITS⁵⁾」、欧州 SARTRE、欧州 COMPANION⁶⁾、オランダ主導の European Truck Platooning Challenge⁷⁾ など)。日本における近年の状況としては、2016年6月に「日本再興戦略2016—第4次産業革命に向けて—」⁸⁾ 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、2018年1月には国内メーカー4社が開発したトラックによる高速道路における後続有人隊列走行の実証実験を新東名高速道路と北関東自動車道にて開始している。また、隊列走行技術はトラック輸送のみならず、一般車やバスなどの旅客輸送への応用も当然考えられ、さらに平常時のみならず災害時などの有事の際にも、例えば鉄道などの大量輸送機関に障害が発生した際の旅客代替輸送などに有益となる可能性も考えられる。

このように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長編成化する必要がある⁹⁾。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、車間距離が数 m (3~4m) を想定し、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¹⁰⁾。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車線変更、特に限られた区間における合流に関しては克服すべき大きな問題の一つと考えられる。

そこで、本研究では都市間高速道路を対象に、(1) 隊列走行の長編成化を念頭に置いた隊列走行車の合流方法に関する検討、(2) 2車線の高速道路を対象に交通流シミュレーション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する分析、を目的とした。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

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 (Zhang ら¹⁴⁾。交通工学の視点での研究としては、どのように隊列を組むかという車両コーディネーション問題に関するものが多い (例えば、Zhang ら¹⁴⁾, Larson ら^{16, 17)}。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、大きく分けて、事前に出発時刻やルート进行调整する方法 (off-road coordination) と走行しながら隊列相手を探す方法(on-road coordination)の 2 つがあり、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 (Zhang ら¹⁴⁾。一方、本研究で着目している隊列走行車両の合流が交通流に与える影響に関しては、河合ら¹⁸⁾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^{23, 24)}。合流部の運用方法という面では自動運転の研究ではないが、洪ら²⁰⁾は合流と本線の優先方向の動的変更 (動的可変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。友久ら²¹⁾は、首都高において路面へのライティングによる可変チャネリゼーション (本線車の避走誘導) を実施し、その効果を検証している。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²²⁾、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 (隊列の後続車も有人である場合など)、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。我が国では、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²⁶⁾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しているが、過去に西田・北村・中村²⁷⁾、石坂²⁸⁾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有効活用策の一つとして十分に検討すべき課題であると考えられる。

以上から、本研究は、将来の都市間物流システムにおける隊列走行トラックの導入実現に向けて、隊列を組んだまま合流を行うことを想定した場合の合流の円滑性と円滑化方策について検討、分析を行う点が従来研究にはない特徴となっている。特に、隊列編成長 (構成台数) と隊列合流頻度が合流円滑性と本線渋滞に与える影響を定量的に評価する点、隊列車両の合流円滑化方策として、合流優先方策に加えて、本線への影響を最小化しつつ隊列車両が円滑に合流可能な車線設計と運用方策を提案する点、また交通シミュレーションVISSIMを活用し、隊列走行の模擬と、動的なレーン制御と車両別レーン使用を模擬し、それらの合流円滑化に与える効果を定量評価している点が新しい特徴として挙げられる。

表-1 合流方法検討の条件

(a)車車間通信・自動運転車両の普及度	車車間通信はなく、隊列走行車以外は一般の非自動運転車と仮定。
(b)隊列走行車の合流車線 (オンランプ)	既存の合流車線の活用を念頭に置くが、隊列車両専用の合流車線への応用も可能。
(c)合流の位置	通常の左側合流を仮定。
(d)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 (走行車線) を走行することが前提。

3. 隊列走行の合流方法に関する検討

(1) 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

円滑化方策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・設定する。概要を表-1 に示しつつ、以下に説明する。

a) 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かり、非自動運転車両も混在することを前提とした。特に本研究では、最も単純なケースとして、隊列走行車以外は一般の非自動運転車と仮定している。

b) 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場合はその追加整備費用が必要となる。また、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基本的に念頭に置くが、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も一部あるため、その場合は専用オンランプの想定と考えることもできる。

c) 合流の位置

NEDO のエネルギーITS プロジェクトレポート²⁹⁾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。本研究では隊列の長編成化を想定しているため上記の Y コンセプトの前提に近いが、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。

d) 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ー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。

(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。

a) 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

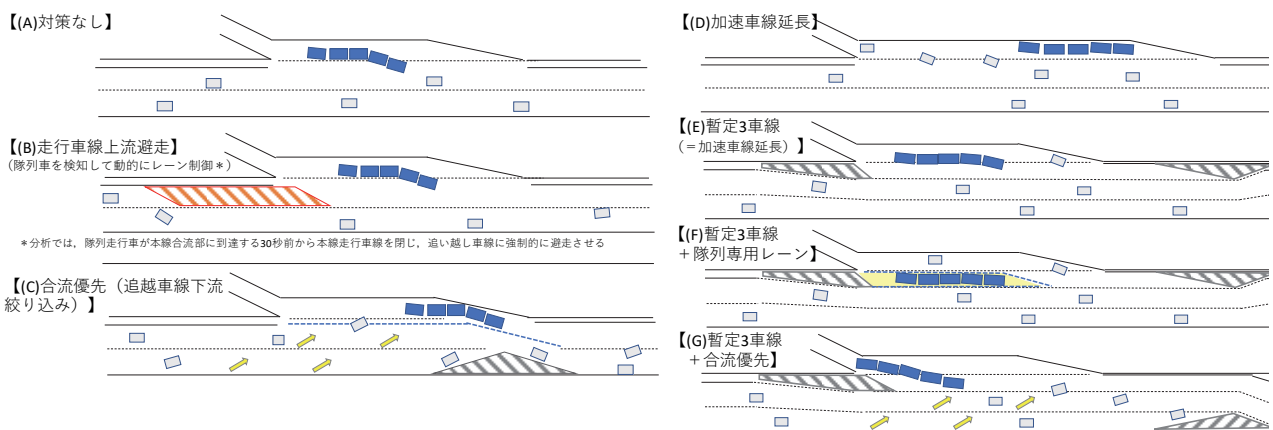


図-1 隊列車両の合流円滑化方策のイメージ

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²⁰⁾)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-1の
(B)(C)に示すような上流・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や速度に違いがあるため、交通
量ごとに最適な位置が異なると考えられる。

b) 合流車線の延長

単純に合流車線を延長する案であり、本線車との車間
距離調整や加速がしやすくなる効果が期待できるが、隊
列車両が長くなれば必要なギャップ長が長くなるため、
一般車合流に比べて合流車線の延長の効果は小さい可能
性が想定される。ここで、合流車線の延長方法としては、
用地を確保して通常の合流車線をそのまま延長するほか
(図-1の(D))、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「暫定3車線化」の方法がある。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-1の(E)は暫定3車線を活用して合流車線を実
質延長し、隊列走行車が合流するギャップを形成する機
会を増加させる案であり、(G)はさらに(C)の本線下流右
側絞り込み案と併用して合流を完全に優先する案である。
これができるれば、隊列車の合流は比較的円滑に行えるも
のと思われる。

c) 一般合流車の影響の軽減策

図-1の(D)に示すように、隊列車が合流できず合流車
線の末端部で停止した場合、狭いギャップでも合流が可
能な一般合流車が隊列車の後方から合流することで、隊
列車が合流するギャップが形成されづらくなる。このよ
うな一般合流車の影響を軽減するため、図-1の(F)に示
すような隊列車専用の合流レーンを一般合流車とは分離
する形で設置することを考えた。このような設計にする
ことで一般合流車の影響を受けずに隊列車は本線の合流
ギャップを待つことができ、一般合流車にとっても通常
とあまり変わらない状況で合流が可能と考えられる。

d) 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、上流側で形成されている本
線ギャップが安定的に下流側で継続するか、タイミング
の精度をどう確保するかが課題となる。交通量が少なく
隊列構成台数が少ない場合では有効と考えられる。

e) 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。

以上、複数の隊列走行車の合流円滑化方策を検討した
が、本研究では特に(a)(b)(c)の方策について、次章で説明
する交通シミュレーションを活用して評価を行う。

4. VISSIM を活用した高速道路合流部と隊列走行 トラックの再現

交通シミュレーション VISSIM²¹⁾を用い、隊列走行が
本線交通に与える影響と合流円滑化方策の評価を行った。

(1) キャリブレーションと現況再現性

評価に先立って、実際の合流挙動との整合性を極力持
たせるため、合流挙動に関するパラメータの調整を行
った。走行挙動モデルはVISSIMにおいて高速道路に適
したモデルとされているwiedemann 99(詳細は補注[1]
を参照)を使用した。なお、パラメータの調整に当たっ
ては巻上ら²²⁾の合流部交通実態調査により示された合流ギ
ャップの分布に極力合致するように、CC1(ドライバー
が保りたい車間距離に対する速度に応じた増分パラメー
タ)、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)、Safety distance reduc
tory factor(車線変更時の安全車間距離削減ファクター)、
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(走行挙動モ
デルの詳細は補注[1]を参照)。巻上ら²²⁾によると、合流
ギャップは、自由合流、高速合流、等速合流、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(低速合流等の正確な定義は不明
であったため、±1km/hは誤差として2km/h以上の速度差

を基準に、本研究では表-2のように仮定した)。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とした。合流ギャップ(車頭時間)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-2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差がない判断された。

また車両速度と交通量の関係(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(約15km)をシミュレーション上で作成し、その中盤7km地点の100m区間における平均速度と交通量を測定した。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、交通量500台/hごとに前後100台の範囲の交通量の際の速度データで、かつ自由流状態と思われるデータ(ここでは60km/h以上を仮定)を平均して比較データとした。なお、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。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関係は3000台/hの平均速度が約10%程度の誤差があるものの、その他の交通量においては5%未満の誤差であり、また交通容量(渋滞域へ落ちる交通量)についてはVISSIMの約3300台/hに対して実測では非常に限られた一部の混雑区間(3300台/h以上は全て横浜新道)を除けば、ほぼ同程度の交通容量であることから、Q-V関係については、概ね再現できていることとした(図-3)。

また、長編成の隊列車両が合流できるか否かは本線のギャップ長の発生分布に非常に影響を受ける。そこでVISSIM上で発生する本線のギャップ長(車頭時間)の分布と都市間高速道路の実測値と比較を行った。VISSIMでは2車線単路部で車両発生ノードから4.5km地点で車頭間隔を計測した結果で、実測値はH29~H30のテレビ朝日の年末年始渋滞情報Liveカメラ(Youtube) ^{補註2)}で目視で計測した一例を累積相対度数で図-4に示す。なお、目視計測においては、千分の一秒単位で計測できるラップタイム計測ソフトを用いて、画像中で極力分かりやすいラインを決めて、そこを通過する車両の時間間隔を計測した。実測値の交通量が限られるため、それに近い交通量をVISSIMで流しているが、車頭時間の累積相対度数分布をみると、4秒以下の比較的短い車頭時間ではVISSIMの発生頻度の方が高く、5~7秒程度では同程度、それ以上の比較的長い車頭時間ではVISSIMの方が発生頻度が若干低くなっている。以降のシミュレーションでは隊列の構成台数は3, 5, 10台の3種類で設定を行っているが、仮に合流のためには

表-2 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

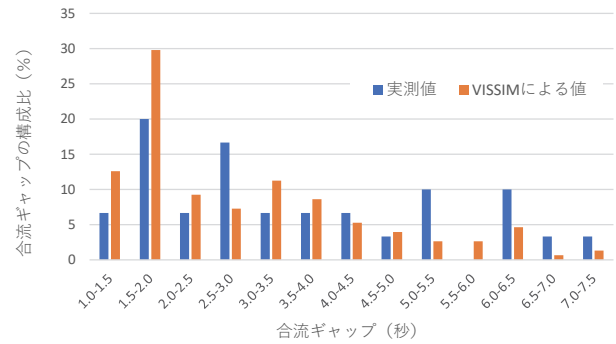


図-2 合流ギャップの分布の実測値(巻上ら²⁾とVISSIMによる再現の比較

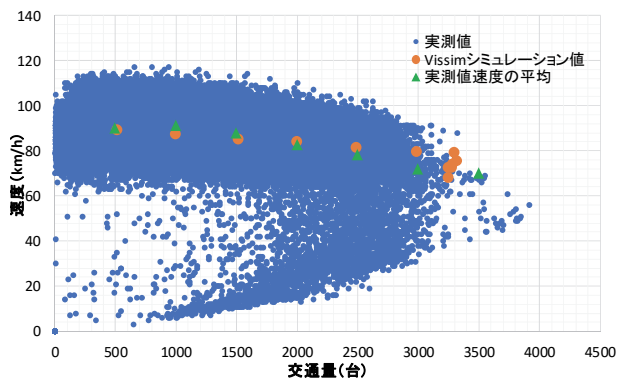


図-3 高速道路片側2車線区間のQ-V図およびVISSIMによるシミュレーション値

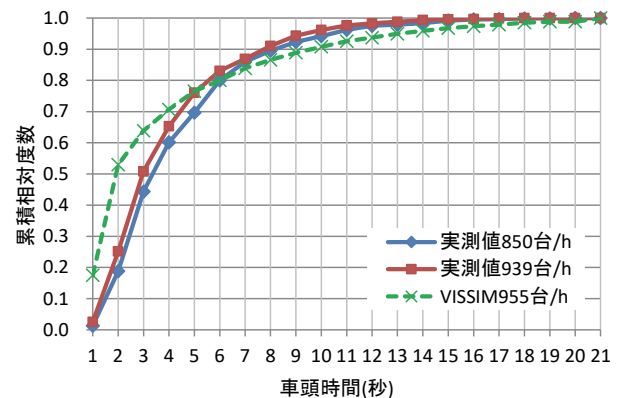


図-4 車頭時間分布のVISSIMと実測値^{補註2)}の比較

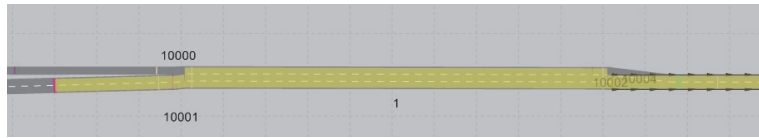


図-5 VISSIM上の合流部シミュレーション画面

表-3 シミュレーションの設定条件の概要

道路構造	<ul style="list-style-type: none"> 本線：片側2車線 合流加速車線長：200m
本線車の交通流特性	<ul style="list-style-type: none"> 車両発生位置：合流区間上流4.5km地点、2車線で均等に発生。 希望速度：実測値の分布形状をもとに平均90km/hで70km/h～110km/hで分布
シミュレーション時間・回数	<ul style="list-style-type: none"> 各シナリオで3600秒（シミュレーション開始直後から1000秒は分析から除外し、そこから3600秒）を50回実行して平均
合流円滑化方策	<ul style="list-style-type: none"> 対策なし：基準ケース（図-1 (A)） 合流車優先 <ul style="list-style-type: none"> 合流区間上流で強制避走（図-1 (B)） 合流区間下流で追い越し車線絞り込み（図-1 (C) (G)） 加速車線延長＋隊列専用レーン対策（図-1 (D) (E) (F)）
シミュレーション上の変数	<ul style="list-style-type: none"> 交通量 <ul style="list-style-type: none"> 対策なし：本線車「2000, 2500, 2800, 3000, 3200台/h」 一般合流車「0, 500台/h」 合流車優先方策：本線車「2500台/h」 一般合流車「500台/h」 加速車線延長＋隊列専用レーン方策：本線車「2500, 3000台/h」 一般合流車「500台/h」 隊列走行車両の構成台数と合流頻度 <ul style="list-style-type: none"> 対策なし：構成台数「3, 5, 10台」 合流頻度「6台/h」 合流車優先方策：構成台数「3, 5, 10台」 合流頻度「6, 8, 12, 24台/h」 加速車線延長＋隊列専用レーン方策：構成台数「3, 5, 10台」 合流頻度「6台/h」
評価指標	<ul style="list-style-type: none"> 隊列車両の合流時の停止時間 本線の旅行遅れ時間（合流優先対策の影響評価）

隊列長の倍のギャップが最低でも必要で（実際には相対速度等も影響して時々刻々と変化するが）、本線の速度を90km/hと仮定すれば、それぞれの構成台数で必要なギャップ長（車頭時間）は約4秒以上、6秒以上、12秒以上となる。従って、もし実際と比べてVISSIMの車頭時間分布が上記のような特徴があるとするれば、VISSIMにおいては構成台数3台では実際よりも合流しづらく、5台では同程度の合流しやすさ、10台では逆に合流しやすい傾向があると解釈できる。実際の道路の車頭時間分布は同程度の交通量でも場所や時間によって変化するので、一概に判断できないが、以降の分析で得られた結果については、隊列構成台数が5台以下であれば本線ギャップ長の観点からは実際の合流しやすさと同程度か若干厳しめで評価できるが、特に隊列構成台数が10台と多い場合には実際よりも合流しやすい状況での結果の可能性も否定できないため留意が必要である。

(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いて導入が想定されているため、高速道路を対象とした。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、本線交通における車両発生位置（ノード）は合流部より上流4.5kmに設定した（図-5）。

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道路構造令で決められている第1種道路（高速道路）の加速車線長の標準値（設計速度120km/h）を参考とした。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ITS²⁹⁾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。なお、隊列車両の加減速性能については、大型貨物車の重量とエンジンパワーがそれらの一般的な範囲からランダムに割り当てられるが、隊列内では同一の重量とパワーが割り当てられ、それに応じた最大加速度性能のカーブ（速度別最大加速度）が決まる。CACC（Cooperative Adaptive Cruise Control）による隊列編成を想定すれば、隊列になった場合の加減速性能が大きく低下することはないと思われるが、将来実現する性能は不明確である。本研究でのシミュレーションでは隊列走行でも単一の車両の場合と同じ加減速性能となっているが、もし隊列走行車両の加速性能が低下する場合には、より隊列車両の合流がし難くなるなど、シミュレーション結果も変化し得る。この点については今後の課題としたい。

(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（シミュレーション開始から1000秒間は分析から除外）、50回のシミュレーションを行い、合計50時間分の出力データを分析している。本線への影響は主に本線の旅行遅れ時間で評価する。旅行遅れ時間は、合流車なしの場合で本線が通常通り自由に走行できる状態での旅行時間（合流区間の上流、下流側それぞれ3.5km＋合流区間200mの合計7.2km区間）を基準に遅れ時間を計算した。

5. 隊列車両の合流円滑化方策に関するシミュレーション分析

(1) 合流方法の評価手順

前述の通り、隊列車両の合流については、一般の合流部を一般車と共有する形態と、隊列車両専用の合流部を新たに整備して合流する形態が考えられる。本研究では、比較的合流が困難な一般の合流部を対象に分析を行う。そのため、一般合流車も一定数発生させ、隊列走行車とのコンフリクトなどを分析する。一方で、一般合流車なしのケースも一部分析するため、その結果は隊列車両専用の合流部として考察が可能である。

分析は以下の手順で行う。

(a) 基準ケース（図-1(A)）：特に特別な対策はしないケースで、本線交通量、隊列車両の構成台数・合流

頻度、一般合流車の影響について分析する。

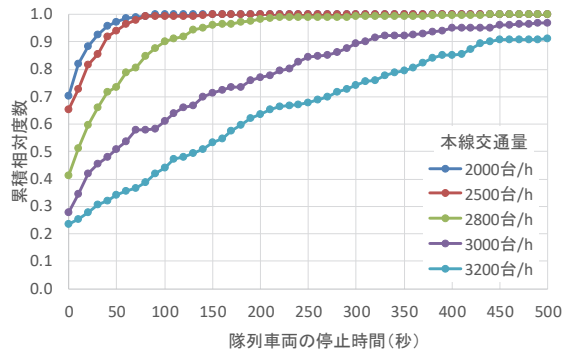
- (b) 合流車優先ケース（図-1(B)(C)(G)）：隊列車両がスムーズに合流できるように本線車両に避走を促す、または合流車優先の車線運用を行った際の本線車への影響を分析する。
- (c) 加速車線延長と隊列車両専用レーンの設置（図-1(D)(E)(F)）：合流のための加速車線延長と一般合流車の影響を軽減するための車線設計の効果を分析する。

以上、前章で説明したシミュレーションの前提条件を含め、評価を行う合流円滑化方策ごとの設定を表-3にまとめた。

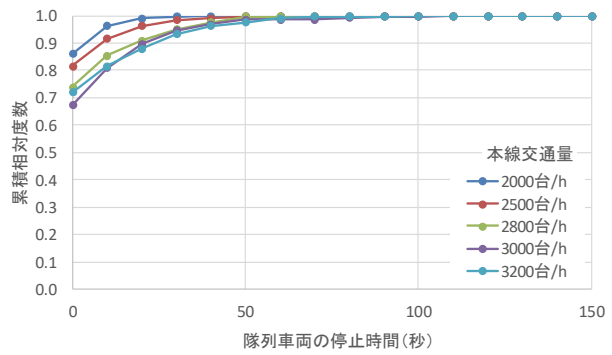
(2) シミュレーション結果

a) 基準ケース

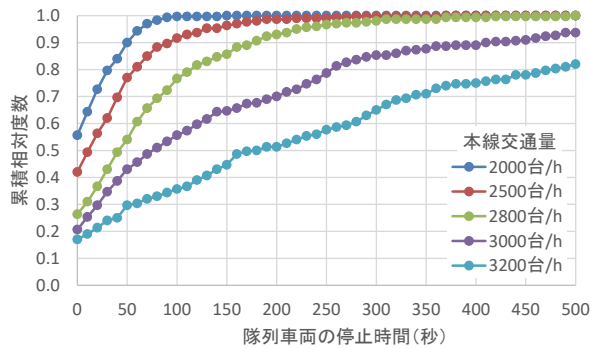
まず、合流部における対策を何も行わない場合の隊列車両の合流可能性について分析した。また、合流交通は隊列車のみとし、平均6台/h（6隊列/h）のポアソン分布で発生させた。評価にあたっては隊列走行車が合流車線で停止していた時間の平均値（合流部終端まで到達し、合流可能なギャップ発生まで停止した時間の平均値）を指標として用いた。本線交通における車両発生位置（ノード）は合流部より上流4.5kmに設定した。図-6にそれぞれ隊列構成台数3、5、10台において対策なしでの合流区間での隊列車の平均停止時間の累積相対度数（その値以下の台数割合）を示す。(A1)～(A3)は一般合流車500台/hで、(B1)～(B3)は一般合流車なしのケースである。まず、一般合流車の影響をみると、一般合流車が入ると大きく隊列車両の停止時間が大きくなるのが分かる。これは図-1の(D)に示すように、隊列車が合流できず合流車線の末端部で停止した場合、狭いギャップでも合流が可能な一般合流車が隊列車の後方から合流することで、隊列車が合流が邪魔されるからである。一般合流車が500台/hのみしか評価していないが、この程度の一般合流車が比較的多いケースでは、隊列構成台数が5台程度以下であれば本線交通量2500台/h（1250台/h/1車線）までは9割程度は2分以下の停止時間、2000台/h（1000台/h/1車線）であれば9割程度は1分以下の停止時間で合流できている。隊列構成台数が10台程度だと本線交通量2000台/hであれば9割程度は1分以下の停止時間で合流できているが、2500台/hになると2分以下の停止時間でも9割未満となっている。停止時間が0秒の累積相対頻度が停止することなく合流できた確率を示しているが、一般合流車がなければいつれの条件においても5割程度以上は無停止で合流できているが、一般合流車の影響を受けるとその確率も大きく低下することが分かる。明確な基準は設定できないが、特別な制御や対策がなくても隊列構成台数が5台程度であれば本線交通量2000～2500



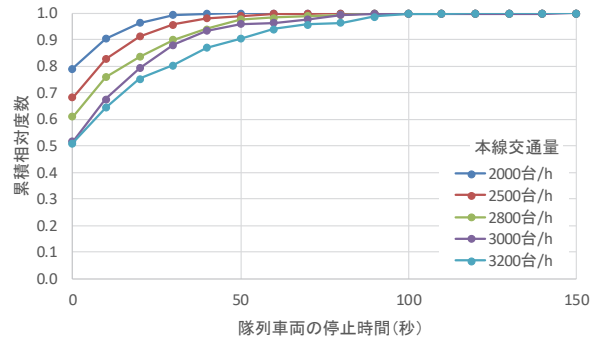
(A1) 隊列構成台数：3台，一般合流車：500台/h



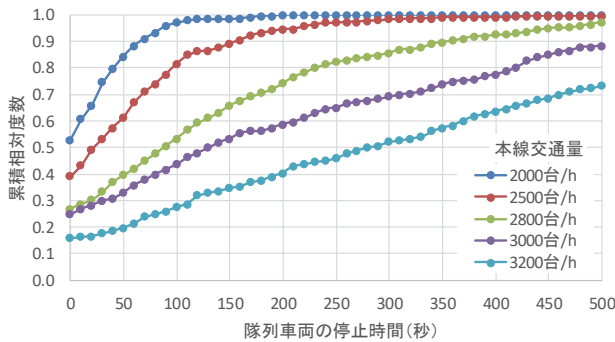
(B1) 隊列構成台数：3台，一般合流車：なし



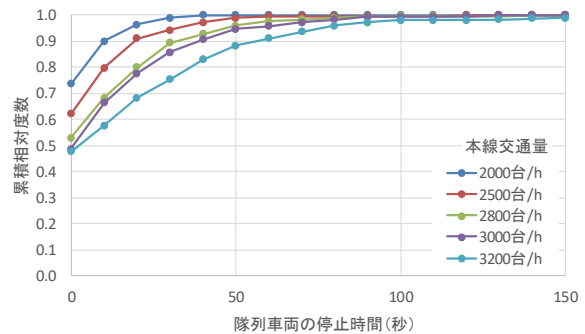
(A2) 隊列構成台数：5台，一般合流車：500台/h



(B2) 隊列構成台数：5台，一般合流車：なし



(A3) 隊列構成台数：10台，一般合流車：500台/h

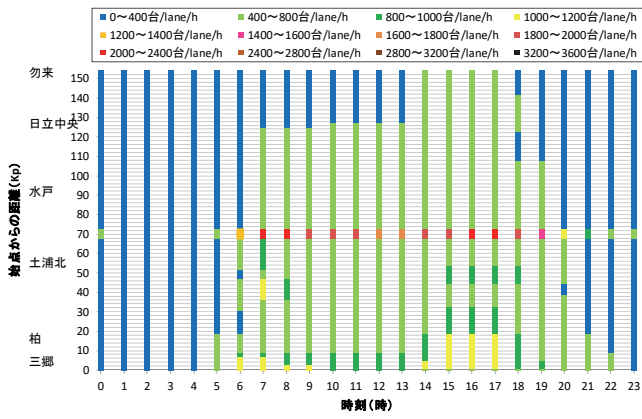


(B3) 隊列構成台数：10台，一般合流車：なし

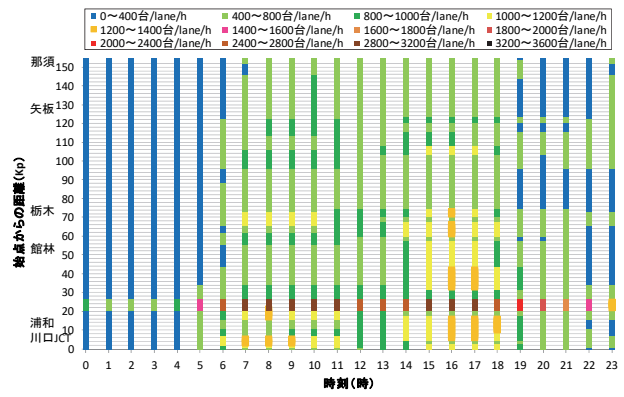
図-6 対策なしケースにおける本線交通量の変化に応じた隊列車両の合流時停止時間の累積相対度数分布（隊列車両発生頻度：6台/h。A1~A3は一般合流車500台/hでB1~B3は一般合流車なし。）

台/h (1000~1250台/h/1車線)程度であれば本線に合流すること自体は大きな問題にならないと思われる。また、一般合流車がない場合、つまり合流が少ない時間帯や隊列車両専用の合流ランプの場合は、仮に「9割が1分以下の停止時間」を目安にすれば隊列構成台数が10台でも3000台/h程度まで許容可能と判断でき、2500台/h程度であれば大半の隊列車両が1分以内で合流が可能である傾向が確認できる。また、一般合流車がない場合は、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

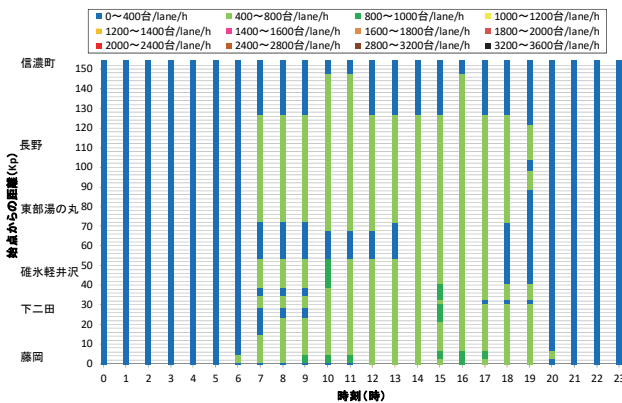
い。これは、本線の個々の車両の希望速度がランダムに分布しているためシミュレーションで自然に車群が形成され、本線に形成された車群が通過するタイミングではギャップが比較的小さく隊列車が合流できず、車群の通過しないタイミングで十分大きなギャップが生じるといった両極端な状況で合流していることが考えられる。このように本線車が合流部へ差し掛かるまでに車群が形成されることが考えられるため、隊列車の停止時間は、本線でどの程度の車群が形成され、その車群間のギャップが



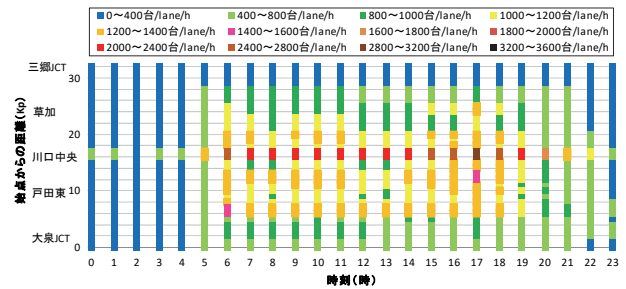
(A) 常磐道



(B) 東北道



(C) 上信越道



(D) 外環道

図-7 東日本エリアの高速道路の区間別時間帯別交通量の例
(2016年8月1か月の平日の平均値. NEXCO 東日本提供データをもとに集計)

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、当然ながら車群による大きなギャップが形成されづらくなり、詳細は省略するが、概ね 3~4 倍程度の停止時間となることを確認した。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る。図-7 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比較的スムーズに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(約 1000~1200 台/車線/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制御方法や車線設計を検討した。

b) 合流優先ケース

はじめに、本線交通を避走させる方法の検討を行った。前節の結果より本線交通流 2500 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高いと考えた。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方策の評価を行った。本研究では図-1 (B) に示す左側上流絞込みの評価を行った。動的交通運用により、隊列車が来たときのみ本線を絞るので本線への影響を最小限にできる。動的交通運用には、Vissim 上の priority rule という機能を用い、隊列走行車が本線合流部に到達する 30 秒前から本線走行車線の交通を止める設定とした(つまり走行車線車両は追い越し車

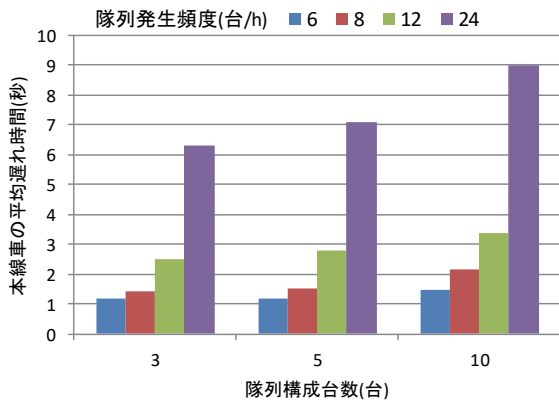


図-8 合流部上流絞り込み（動的交通運用）時の本線交通流の旅行遅れ時間（本線 2500 台/h，一般合流車 500 台/h）

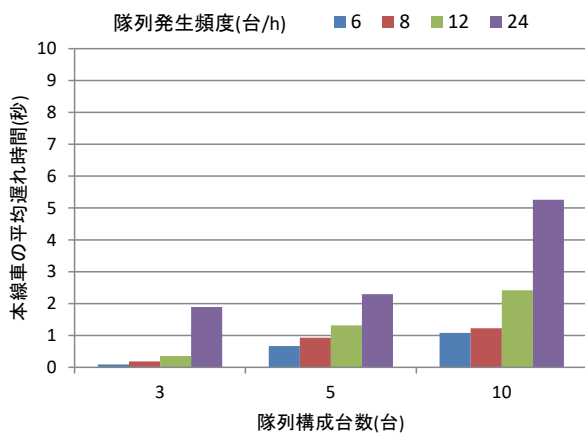


図-9 静的な合流部下流追越車線絞り込み時の本線交通流の平均旅行遅れ時間（本線 2500 台/h，一般合流車 500 台/h）

線に強制的に避走）。なお、動的交通運用に従わない車両が存在する可能性もあるため、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 2500 台/h，一般合流車を 500 台/h に設定した。また、隊列車両の構成台数とその発生頻度を変化させて、本線交通流への影響を自由流の際の旅行時間を基準にした旅行遅れ時間で評価した。結果を図-8 に示す。本線 2500 台/h の需要で仮に本線を常に（静的に）1 車線に絞り込めば 1 車線の交通容量をはるかに超過するため渋滞が伸び続けるが、動的に車線絞り込みを行えば、隊列走行の発生間隔が 5 分に 1 回程度以下であれば、本線が 2500 台/h でも、平均遅れ時間が 10 秒以下であり、特に隊列車両の発生頻度が 12 台/h（5 分ピッチ）程度であれば、平均的には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。

次に、上流より効果が高いと思われる合流区間下流部で本線追い越し車線を絞り込む方法（静的なケース）について、図-1の(C)に示す「追い越し車線絞り込み」の

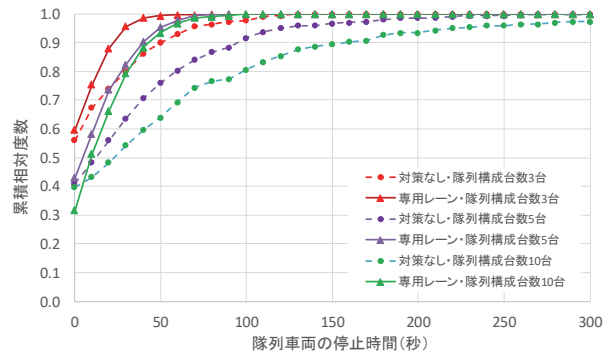


図-10 隊列車両専用レーンの設置効果（本線 2500 台/h，一般合流車 500 台/h，隊列車両 6 台/h，専用レーン長 200m）

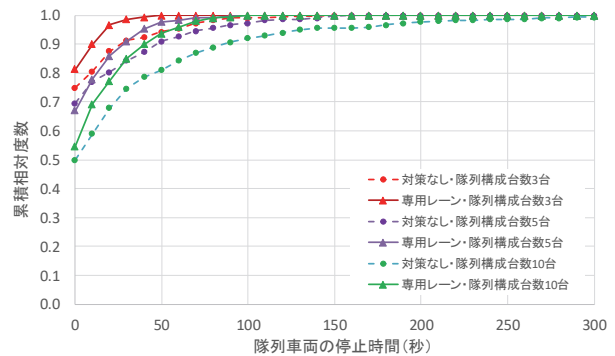


図-11 隊列車両専用レーンの設置効果（本線 2500 台/h，一般合流車 500 台/h，隊列車両 6 台/h，専用レーン長 800m）

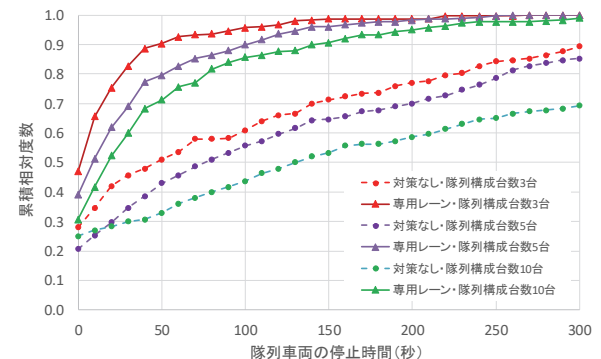


図-12 隊列車両専用レーンの設置効果（本線 3000 台/h，一般合流車 500 台/h，隊列車両 6 台/h，専用レーン長 200m）

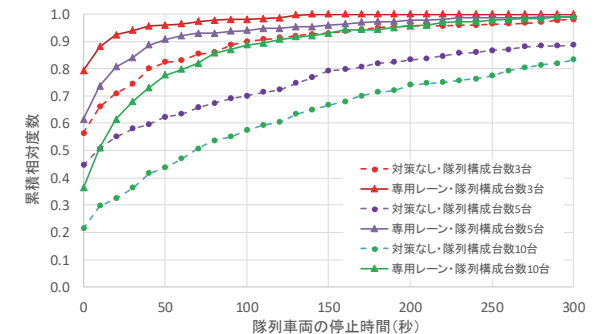


図-13 隊列車両専用レーンの設置効果（本線 3000 台/h，一般合流車 500 台/h，隊列車両 6 台/h，専用レーン長 800m）

評価を静的な道路構造改変の場合で行った。結果を図-9に示す。常に(静的に)本線追い越し車線を絞り込むケースであるが、全車線を最大限有効に活用できるため、当然ながら前節の動的上流絞り込みケースよりも円滑に流れる。ここで、図-1の(C)に示すように追い越し車線を絞り込まなくてもよいように見えるが、本線走行車線(合流区間では真ん中の車線)の車両を一定程度合流車線側に車線変更することを期待しているため、もし絞り込みを行わないとすると、その本線走行車線の車両は左右どちらかの車線に車線変更を行う必要が生じ、同時に左右を確認しながら、速度調整や車線変更判断を行うことになる。これは安全上決して好ましくないため、今回は追い越し車線側を絞り込む方法を考えている。

c) 隊列車両専用レーンの設置とレーンの延長

図-1(D)や図-6の結果に示すように、一般合流車が一度停止した隊列車の後方から合流することで、隊列車の合流が阻害される。このような一般合流車の影響を軽減するため、図-1(F)に示すような隊列車専用の合流レーン(200m or 800m)を一般合流車とは分離する形で合流区間の上流側に設置したケースをシミュレーションで再現し、その効果を評価した。本線交通量は2500台/hと3000台/hの2種類で設定し、一般合流車は500台/h(一般合流車用の合流車線長は200m)、隊列車両は6台/hの発生頻度とした。結果を図-10~図-13に示す。図の破線は比較対象となる対策のないケースでの結果であり、実線が隊列専用合流レーンを設置したケースの結果である。それぞれ隊列構成台数を3, 5, 10台と変化させた際の結果を示している。基本的には対策なしでレーン長200mのケースでの値は図-6の本線交通量2500台/hおよび3000台/hでの対策なしケースと同傾向となる。専用レーン設置時の結果は一般合流車の影響をなくす効果を期待しているため図-6の一般合流車なしの結果と近いと想定されるが、下流側で一般車が500台/hで合流することによる本線の混雑度上昇の影響により、それよりは隊列車両の停止時間が長くなっているものの、対策なしケースに比べて、非常に停止時間を低下させることができていることが確認できる。仮に「1分以下の停止時間が9割以上」という基準で判断するならば、本線交通量2500台/hであれば隊列構成台数が10台でも許容可能であり、3000台/hであれば隊列構成台数3台であれば許容可能と判断できる。また、隊列専用レーンを200mから800mに延長すると、いずれのケースでも停止時間が減少しており、隊列車両が加速する機会が増加する効果が確認できる。

6. 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。その結果、長編成化された隊列車の合流の影響について、以下のような基礎的な知見を得た。

- ✓ 「9割の隊列合流車が1分以下の停止時間で合流可能」という基準を目安にすると、特別な制御や対策がなくても隊列構成台数が5台程度であれば本線交通量2000~2500台/h(1000~1250台/h/1車線)程度であれば本線に合流すること自体は大きな問題にならないと思われる。また、一般合流車がない場合、つまり一般合流車が少ない時間帯や隊列車両専用の合流ランプの場合は、隊列構成台数が10台でも3000台/h程度まで許容可能である。ただし、これらの結果は本線における車群形成が一定程度生じている場合や隊列の車間が4mの場合を想定した結果であるため、本線の交通流や隊列編成上の条件によって結果は変化し得る。
- ✓ 合流車優先方策として、動的車線運用(本線避走誘導)と下流側追い越し車線絞り込み運用を評価した結果、遅れ時間の視点からは本線車両に大きな影響を与えることなく、隊列車両が円滑に合流できる可能性を示した。
- ✓ 隊列車両と一般合流車のコンフリクトを軽減するための隊列車両専用レーンの設置とレーンの延長の効果を分析したところ、有意な効果が確認され、仮に「1分以下の停止時間が9割以上」という基準で判断するならば、本線交通量2500台/hであれば隊列構成台数が10台でも許容可能であり、3000台/hであれば隊列構成台数3台であれば許容可能と判断できた。

以上の結果から、長編成化された隊列走行車両について合流円滑性の面からみた導入可能性を検討する上で、既存の高速道路区間のうち導入可能な本線交通量条件の目安を明らかにし、さらに、既存の高速道路空間上での運用面の工夫(動的な車線運用等)による合流優先対策の効果(本線への影響の程度)と、隊列専用レーンやレーン延長といった追加インフラ整備の効果について、定量的に明らかにし、無対策の場合の導入可能本線交通量条件が緩和できることを明らかにした。

一方で、本研究で実施したシミュレーションでは考慮できていない要素も現実には存在する。今後の課題としては、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、動的運用については隊列車両の発生に合わせて本線の車線を安全に変更することは実際には技術的にも安全上も課題がある。首都高で実施された避走誘導実験²⁹⁾のように LED 等による動的な路面標示で本線車両に避走を促す方法は安全であるが、その効果は限られる可能性があるとともに、交通量が増えることより避走比率が低下すると考えられるため、効率と安全を両立できる動的車線運用については今後精査が必要となる。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²⁹⁾。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。

補注

[1] 1台1台の車両を離散的かつ確率的に表現するVISSIM内の運転挙動モデルであるwiedemann 99は、Wiedemannによる研究に基づいている³⁰⁾。このモデルでは「自由走行（希望走行速度前後で振動しながら走行）」「接近（相対的に遅い前方車両に対してドライバーの希望安全車間距離を維持できるように減速）」「追従（希望安全車間距離を維持しながら追従）」「ブレーキング」の4つの運転モードを選択して挙動を再現しており、車線変更は隣接車線の車両との望ましい安全車間距離を判断しながら行う。各モードの加速度等は車両特性を考慮して確率的に決定される。設定されているパラメータのうち本研究でキャリブレーションのために使用した主なパラメータの詳細は以下の通りである。

速度を v 、 $CC0$ を基準車間距離（=1.5m）、速度に応じた車間距離の増分パラメータを $CC1$ とすると、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安全車間距離 dx_safe は以下で決定される。

$$dx_safe = CC0 + CC1 \times v$$

また、 dx_safe を基準に許容可能な車間距離の変動幅を規定する $CC2$ が設定されており、例えば $CC2$ が 10m に設定されている場合、追従時の車間距離は dx_safe と $dx_safe + 10m$ の間の距離となる。さらに、車線変更時の前後のギャップを判断する際、Safety distance reductory factor (SDRF) と呼ばれる「車線変更時の安全車間距離削減ファクター」が設定されている。車線変更の際の安全車間距離 dx_safe_lc は次式で計算する..

$$dx_safe_lc = dx_safe \times SDRF$$

[2] 図-4 で使用した実測の車頭時間分布は、中央自動車道の八王子料金所と八王子 JCT の中間地点(八王子料金所から 4.2km 地点)の Live 映像から計測し、図中の実測値(1車線の交通量)の観測日時と方面は以下の通りである(比較的交通量の多い日時を抽出)。

- ✓ 実測値 850: 2017/12/30, 14:30~15:30, 名古屋方面
- ✓ 実測値 939: 2017/12/30, 16:30~17:30, 東京方面

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：総合物流施策大綱（2013-2017），2013。
- 3) 外務省：ジュネーブ条約，http://www.mofa.go.jp/mofaj/gaiko/treaty/pdfs/B-S39%282%29-0533_1.pdf（2017年2月12日閲覧）
- 4) Fritz, H., Bonnet, C., Schiemenz, H. and Seeberger, D.: Electronic tow-bar based platoon control of heavy duty trucks using vehicle-vehicle communication: Practical results of the CHAUFFEUR2 project, *Proc. of 11th ITS World Congress*, 2004.
- 5) Shladover, S. E.: Truck automation operational concept alternatives, *2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, pp. 1072-1077, 2010.
- 6) Tsugawa, S., Jeschke, S and Shladovers, S. E.: A review of truck platooning projects for energy savings, *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, Vol.1, Issue 1, 2016.
- 7) COMPANION - COoperative dynamic forMation of Platoons for sAfe and eNergy-optmized gOods transportation, <http://www.companion-project.eu/>（2017年2月12日閲覧）
- 8) European Truck Platooning Challenge - EU Truck Platoon Challenge, <https://www.eutruckplatooning.com/>（2017年2月12日閲覧）
- 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>（2017年2月12日閲覧）
- 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（2017年2月12日閲覧）
- 11) 経済産業省ホームページ, <http://www.meti.go.jp/press/2017/01/20180112002/20180112002.html>（2017年2月12日閲覧）
- 12) Hall, R. and Chin, C.: Vehicle sorting for platoon formation: Impacts on highway entry and throughput, *Transportation Research Part C*, Vol.13, Issues 5-6, pp.405-420, 2005.
- 13) 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>)（2017年2月12日閲覧）
- 14) Zhang, W., Jenelius, E. and Ma, X.: Freight transport platoon coordination and departure time scheduling under travel time uncertainty, *Transportation Research Part E*,

- Vol.98, pp. 1-23, 2017.
- 15) Chen, D., Ahn, S., Chitturi, M. and Noyce, D. A.: Towards vehicle automation: Roadway capacity formulation for traffic mixed with regular and automated vehicles, *Transportation Research Part B*, Vol.100, pp.196-221, 2017.
 - 16) Larson, J., Kammer, C., Liang, K.-Y. and Johansson, K. H.: Coordinated route optimization for heavy-duty vehicle platoons, *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1196-1202, 2013.
 - 17) Larsson, E., Sennton, G. and Larson, J.: The vehicle platooning problem: computational complexity and heuristics, *Transportation Research Part C*, Vol.60, pp.258-277, 2015.
 - 18) 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.
 - 19) 未来投資会議構造改革徹底推進会合「第4次産業革命 (Society 5.0) ・イノベーション」会合 (第4次産業革命) (第3回) 配布資料, 2016.
 - 20) 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変換チャン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.
 - 21) 友久響, 角田征, 岡野孝司, 田中淳, 藤井駿, 藤田典之, 深水覚: 首都高速道路における可変チャンネルリゼーションの導入可能性の検証, 第15回 ITS シンポジウム, 2017.
 - 22) 卷上安爾, 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.
 - 23) 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.
 - 24) Sakaguchi, T., Uno, A. and Tsugawa, S.: Inter-vehicle communications for merging control, *Proceedings of the IEEE International Vehicle Electronics Conference*, pp. 365-370, 1999.
 - 25) 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, pp. 95-98, 2017.
 - 26) 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> (2017 年 2 月 12 日閲覧)
 - 27) 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.
 - 28) 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.
 - 29) 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> (2017 年 2 月 12 日閲覧)
 - 30) 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.
 - 31) PTV VISSIM ホームページ, <http://vision-traffic.ptvgroup.com/jp/%E8%A3%BD%E5%93%81/ptv-vissim/>
 - 32) Wiedemann, R.: Modeling of RTI-Elements on multi-lane roads, *Advanced Telematics in Road Transport* edited by the Commission of the European Community, DG XIII, Brussels, 1999.

(2018. 2. 23 受付)

OPERATION OF EXPRESSWAY ON-RAMP MERGING FOR LONGER PLATOONS

Terumitsu HIRATA, Masanobu SAWARA and Takuya KAGEYAMA

The truck platooning is one of the promising technologies that can improve the efficiency of the truck logistics, and its benefit will be increased if the platoon can be longer. However longer platoon will have some difficulties in lane-changing and merging. This study analyses the impact of longer platoon on-ramp merging on the traffic flow at expressway and assess some measures to improve the efficiency of longer platoon on-ramp merging by the traffic simulation VISSIM. The simulation results shows that the dynamic change of lane regulation in main lane for forcing give-way behavior and merging priority lane structure have a significant benefit for longer platoon merging with acceptable delay of travel time of main-lane vehicles. Finally, the exclusive merging lane and its extension for longer platoon are also shown to be beneficial for mitigating the delay time of longer platoon merging.