トラック隊列走行時の高速道路合流部における安全対策に対する一般合流車視点での評価

柴田　涼[1]・宇野　伸宏[2]・松中　亮治[3]・田中　皓介[4]

[1]非会員　元　京都大学工学研究科（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）
E-mail: shivachan@outlook.jp

[2]正会員　京都大学工学研究科（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）
E-mail: uno.nobuhiro.2v@kyoto-u.ac.jp

[2]正会員　京都大学工学研究科（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）
E-mail: matsunaka.ryoji.3v@kyoto-u.ac.jp

[2]正会員　京都大学工学研究科（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）
E-mail: tanaka.kosuke.6k@kyoto-u.ac.jp

トラックドライバ不足が深刻化する中，トラックの無人隊列走行技術が注目され，実用化に向けて技術開発，制度整備等が進められている．本研究では，高速道路本線走行中のトラック隊列の近傍に合流する一般車に着目し，ドライビングシミュレータを用いた実験を行い，当該状況で生じる危険事象を示した上で，トラック塗色に警戒色を採用する対策及び注意喚起の情報板を設置する対策の効果を統計的に検証することを目的とした．合流挙動の安全性評価には，“合流瞬間 PICUD”及び“累積ジャーク”の 2 指標を用いた．実験の結果，隊列遭遇初回に衝突危険性が有意に高くなること，及び，塗色として黄色を採用したトラック並びに注意喚起の情報板設置の両方で合流車の累積ジャークが有意に減少し，合流挙動の安定性が向上することが明らかになった．

Key Words: *Truck platooning, merging section, driving simulator, safety measures, automated driving*

1. 序論

(1) 研究の背景と目的

近年，国内物流の担い手であるトラックドライバの不足が深刻な問題となっている [1]．特に，長距離輸送時の労働時間や業務負荷が大きいことから，職業としての若年層のドライバ離れが著しく，就業者のうち 29 歳以下の割合は 10% 以下と低水準である [2]．労働力不足だけでなく，疲労による運転ミスやトラックの燃費問題等，運送業界には課題が山積している．

そこで，トラックの無人隊列走行技術が注目されている．トラックの無人隊列走行とは，複数台のトラックが隊列車群を形成して，後続車を無人とした状態で走行することを指す．これにより人手不足が解消され，また，運転の自動化が進めば，運転負担の軽減も期待される．さらに，トラックが短車間距離で隊列走行することで後続のトラックが受ける空気抵抗が低減し，燃費改善に繋がることも明らかになっている [3]

現在の隊列走行技術は実道での走行実験を実施できるレベルにあり，2021 年の実証実験ではトラック 3 台が隊列を形成し，時速 80km・車間距離 9m で走行することに成功した [4]．しかし，全長 50m 超の隊列が本線を走行するため，一般車両が合流しようとした際に阻害されてしまう事例が発生した [5]．一般車両が加速車線上で停車すると，再合流時に十分な加速ができなかったり，後続の合流車の合流スペースを遮ってしまったりするという問題を引き起こすため，重大な事故につながる可能性があり，交通安全面で重大な懸念が生じる．

上記事例からも分かるように，本線への合流を試みる一般車両がトラック隊列と鉢合わせたときに，トラックと接触・衝突する危険性が高まることは，想像に難くない．また，合流車両がトラック隊列との位置関係調整のために無理な加減速を行うと，トラック以外の周辺車両にも悪影響を及ぼす可能性が考えられる．

この種の問題に対する安全対策案として，隊列走行専用車線設置やランプメータリング等が検討されている [6]．

しかし，そのようなハード整備には莫大な費用や時間を要するという問題がある．より手軽で費用対効果に優れた安全対策を講じ，その効果を定量的に評価することには，隊列走行トラックの導入促進という面で価値がある．

そこで，本研究では，ドライビングシミュレータを用いて模擬走行運転実験を行い，トラック隊列走行時における一般車両の合流時安全性改善のために提案する 2 つの対策（トラック塗色の警戒色採用，及び，情報板による注意喚起）の効果を明らかにすることを目的とする．また，単体のトラックと比較した隊列のトラックの影響及びトラック隊列への遭遇経験の有無が与える影響についても併せて検証する．

⑵ 既往研究の整理

合流部での車両挙動や安全性評価を行う上で基礎となる既往研究として，a)ギャップ選択に関する研究，b)ドライビングシミュレータを用いた研究，c)交通シミュレーションを用いた研究について整理するとともに，本研究の特長を論じる．

a) ギャップ選択に関する研究

ギャップ選択とは，交通流における車両と車両との間隙のうちどこに合流するかを選択する行為である．

高速道路合流部における（トラック隊列走行でない）通常時のギャップ選択行動に関する研究として，谷田ら[7]，柳原ら[8]，CHU ら[9]の研究が挙げられる．

谷田ら[7]は，高速道路の合流部でドライバがどのような合流の場を形成しているかを，合流部上方から撮像した画像を用いて分析した．合流パターンを大きく 3 種類に分類し，距離と速度を変量としたときに，これらのパターンが明瞭な分布を形成することを示した．

柳原ら[8]は，画像データを活用し，合流挙動がギャップ選択と速度調節との 2 段階で構成されると仮定してモデル化を行った．ギャップを構成する車両の相対位置や相対速度が合流車両のギャップ選択に有意な影響を及ぼすことを明らかにした．

CHU ら[9]は，本線の交通状況と加速車線の長さとを考慮してギャップ選択モデルを作成した．相対速度，本線車両との距離，交通状況，加速車線長及びテーパ端までの残りの距離がギャップ選択における主要な影響因子であることを明らかにした．

b) ドライビングシミュレータを用いた研究

隊列走行を想定して，ドライビングシミュレータを用いた研究として，杉町ら[10]，郭[11]らの研究が挙げられる．

杉町ら[10]は，トラック同士の車間距離や隊列構成台数に着目し，被験者の発汗・心拍等の生体反応を分析することでトラック隊列走行の受容性評価を行った．車間距離が 20m のときに最も緊張度が高まることを明らかにし，車間距離は 4m が適切であると結論付けた．

郭[11]らは，加速車線長に着目し，ジャークを用いて被験者の運転の滑らかさの評価を行った．ジャークとは，加加速度ともいわれ，加速度の時間変化を意味する物理量である．そして，加速車線長が 100m のときは 250m のときと比して運転の滑らかさが低くなる傾向にあることを示した．また，加速車線長が短いときは安全確認のしやすさも低い傾向にあることを示した．

これらの既存研究は隊列トラックの受容性や安全性評価という点で大変有用であるが，具体的な安全対策の提案までには至っていない点，統計的分析ができていない点が課題である．

c) 交通シミュレーションを用いた研究

交通シミュレーションを用いた，高速道路合流部におけるトラック隊列走行の影響に関する研究として，東富ら[12]，Wang ら[13]の研究が挙げられる．

東富ら[12]は，合流シミュレーションモデルを作成し，長大車（隊列車両）の導入が一般合流車両に与える影響について分析を行った．長大車導入当初は，導入前と比較して合流成功確率が 0～11% 程度低下することを示した．また，長大車導入から一定期間経過後は， 導入前と比較して合流成功確率が 0～12% 程度低下する一方で，安全な合流の割合が 0～6% 程度上昇することを示した．ここでは，合流の安全性を PICUD により定義している．

Wang ら[13]は，交通シミュレーションを用いてトラック隊列の走行態様を変化させ，隊列走行が交通流の安全性に与える影響を分析した．トラック隊列が合流部手前で車線を変更する方法等により安全性が一定程度向上することを示した．また，隊列構成台数を 3 台でなく 2 台にしても合流阻害の発生は避けられないことから，より大きな効用を得られる 3 台での走行が適切であると提案した．

これらの既存研究も車両挙動面からトラック隊列走行の課題，可能性を示唆しており有用であるが，ドライバの実際の運転挙動が十分に反映できているか不明である点が課題である．

⑶ 本研究の特徴

前節に示した関連する既往研究の課題点を踏まえ，本研究が有する特徴を以下のとおりに想定する．

・合流車を対象として，低コスト化を追求した安全対策を提案している点．

・統計的分析に耐えうる程度のサンプルサイズを確保し，安全対策の効果を統計的検定に基づいて検証している点．

・ドライビングシミュレータを用いて個々人の現実的な運転挙動を分析している点．

2. 実験の設計及び実施方法

(1) ドライビングシミュレータ実験の目的

本研究では，ドライビングシミュレータ（以下，DS）を用いることにより，一般車両が高速道路に合流しようとする際に本線上を走行する 3 台のトラック隊列が後方から接近する状況を再現する．DS を用いることにより，条件統制の下で各被験者の走行データを収集することが可能になる．

本実験は，京都大学大学院工学研究科（桂キャンパス）の模擬運転実験室にある Forum8 社製の UC Win-Road を搭載した DS を用いた（図-1）．

なお，被験者が模擬運転を行うのは，高速道路本線に合流する乗用車を想定した車両であり，トラック隊列そのものではないことに注意されたい．

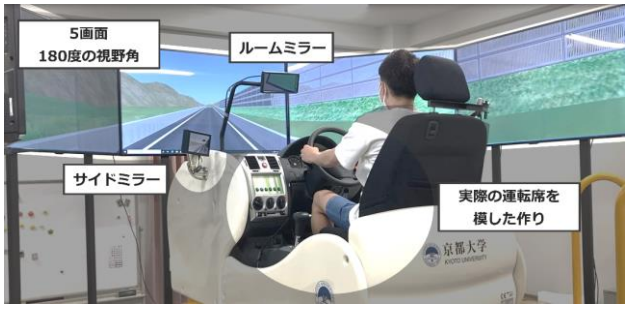


図-1　ドライビングシミュレータの全体写真

(2) 実験因子

本実験では，前述の 2 種類の安全対策の効果を明らかにするために，以下に示すように因子及び水準を設定する．

a) トラックカラー

第一の実験因子（安全対策）は，トラックカラーである．白色及び警戒色である黄色の 2 つの水準を設ける．具体的には，図-2 に示すような白い外装のトラック（以下，白色トラック）と黄色（厳密には山吹色に近い黄色）い外装のトラック（以下，黄色トラック）とを実験内で高速道路本線に出現・走行させる．

トラック塗装に黄色を採用する狙いは，黄色で視認性・注意力を高めることにより，被験者にトラック隊列の存在をいち早く認識させ，危険回避行動を促すことである．

また，一般的に，加速車線を走行する車両よりも本線を走行する車両のほうが速いため，危険が想定される場面は，具体的には，一般合流車の後方から隊列トラックが接近する場面であるといえる．そこで，トラック前面も側面と同様に黄色の塗色とすることにより，隊列を前方から見たときにトラック 3 台が別体でなく一体の交通主体として認識されやすくなると考えた（図–2）．



図-2　トラックカラー（白色・黄色）

b) 情報板

第二の実験因子（安全対策）は，合流車への注意喚起を与える情報板の有無である．情報板設置がない場合とある場合との 2 つの水準を設ける．

図-3 に示すような方法で [14]，ハードノーズ（加速区間の開始地点）150m 手前上方に情報板を設け，本線上の隊列走行トラックが接近状態にあることを合流車両に伝える．

情報板による対策の狙いは，あらかじめ隊列走行トラックの接近を通知することで，被験者に時間的・心理的な余裕を持って合流判断を行ってもらうことである．



図-3　情報板（なし・あり）

(3) 実験の設計

a) トラック隊列の設定

本実験では，トラック隊列走行の社会実装を想定し，1.で述べた 2021 年実施の実証実験での設定条件を参照し，以下の態様でトラック隊列を設計した．

隊列を構成するトラックの台数を 3，各トラックの車長を 11.6m，車間距離を 8.4m とした．これより，隊列全長は 51.6m となる．隊列走行速度については実験内で一律 80km/h とした [15]．

実験条件を統一して安全性指標を算出・比較するため，仮に被験者の運転する車両がトラック隊列に接近したとしても，トラック隊列は加減速，隊列解除等を行わないように設計した．同様の理由から，トラック隊列以外の本線上の車両についても走行速度を 80km/h に，車両間の距離を 120m に固定した．

b) 走行道路の設定

本実験に用いる道路は，Forum8 社製の UC Win-Road を用いて作成した．4 つの道路部をランプで接続し，道路全体で環を形成することにより（図示せず），被験者にとって違和感なく，連続的に走行ログデータを取得できるようにした．図-4 に示すように，各道路部は合流区間（500m），直進区間（600m），分流区間（300m）の計

3 区間で構成される．合流区間は，さらに加速車線区間（400m）とテーパ区間（100m）との2区間に区別される．

制限速度は，道路部では80km/h，ランプ部では50km/hと定め，道路標識により案内した（図-5）．

また，道路の側壁において，透過性の遮音壁と不透過性の遮音壁とを使い分けることにより，被験者はハードノーズ 100m 手前を通過した瞬間から本線後方の交通状況が視認できるように設計した（図-6）．

以上に示した本実験の走行道路は，隊列走行実装時の舞台として想定されている新東名高速道路，新名神高速道路等の高規格な都市間高速道路を模して設計した．したがって，一般的な高速道路と比較して，合流部が余裕のあるつくりになっており，トラック隊列走行の実用化に向けて再現性の高い道路条件設定となっている．

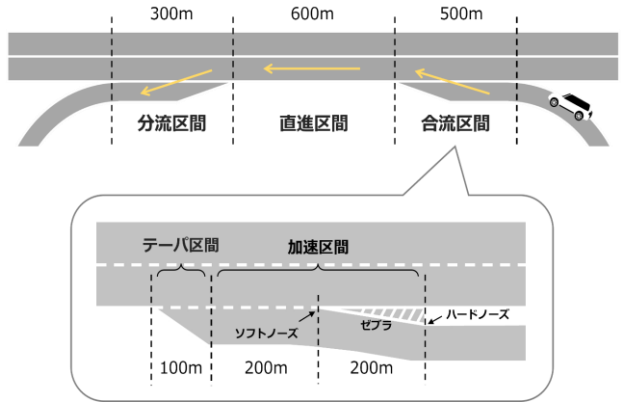


図-4　実験に用いる道路部の構造

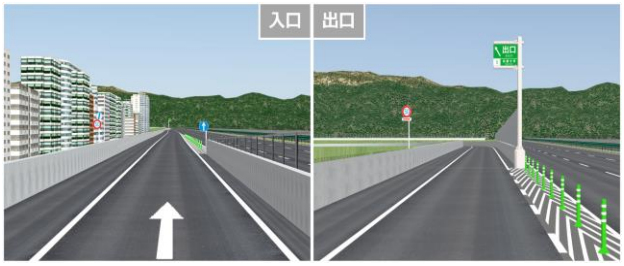


図-5　合流部及び分流部と速度制限標識

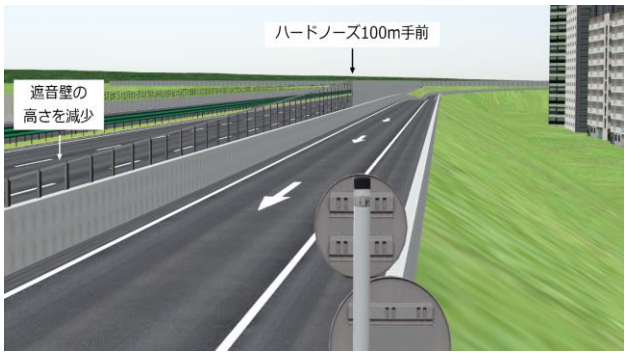


図-6　ランプ，本線及び本線後方が視認できる境界位置

c)　走行シナリオの設定

本実験では，表-7 に示す 4 種類のシナリオの下で被験者に DS による模擬運転を行ってもらう．

表-7　本研究の実験シナリオと実験因子・水準

シナリオ	隊列形成	カラー	情報板
A（基準）	あり（3台）	白色	なし
B	あり（3台）	黄色	なし
C	あり（3台）	白色	あり
D	なし（1台）	白色	なし

＜シナリオ A について＞

A は，後の合流時の安全性分析のための比較基準となるシナリオであり，何ら対策を行わない状況を再現するものである．

＜シナリオ B について＞

B は，黄色トラックを実施したときの状況を再現するものである．A と比較することにより，黄色トラックの効果を確かめることができる．

＜シナリオ C について＞

C は，情報板設置を実施したときの状況を再現するものである．A と比較することにより，情報板設置の効果を確かめることができる．

＜シナリオ D について＞

D は，トラックが隊列を形成しない（以下，単体トラック）ときの状況を再現するものである．A と比較することにより，トラックが隊列を形成すること自体の影響を確かめることができる．本実験における単体トラックの走行態様を隊列トラックと並べて図示したものが図-8 である．

本研究では，入念な予備実験を行い，被験者が合流しようとするタイミングで，どの位置にトラック隊列がいると対処が困難（危険）であるかを探った．そして，被験者にとって，平均的に合流時の困難性が高まるようにトラック隊列の走行位置を調整した．

とはいえ，勢いよく加速して合流する被験者と緩やかに加速して合流する被験者とでは，合流の瞬間における周囲の交通状況（主にトラック隊列との位置関係）が大きく異なってしまうため，実験因子の効果を適切に確かめることができなくなる．そこで，本実験では，トラック隊列に「前寄り」及び「後ろ寄り」の 2 種類の走行パターンを設ける．詳細な説明は省略するが，設定された合流車両側のトリガによって隊列走行を開始する開始位置を，前後方向に異ならせて 2 パターン作成する．したがって，被験者は上記シナリオ A～D を 2 回ずつ（計 8 回）経験することになる．これにより，被験者間の合流時の加速特性の違いに基づく系統誤差の影響の緩和をは

かった.

上記 8 回のシナリオの実施順は，コンピュータを用いて被験者それぞれに対して無作為化した．また，トラック隊列が出現しない（通常の交通流の）シナリオを，各シナリオ間にランダムに 0～4 回挟むようにし，被験者が実験内のどのタイミングでトラック隊列が出現するかを学習できないようにした．換言すると，走行ログデータを取得しないダミーの試行を計 15 回程度挟み込んだ.

さらに，実験前には，「練習走行」として被験者が DS の操作感に慣れるための練習時間を設けた．そして，被験者が運転に熟練したことを目視で確認した後に，予告なくシナリオ A と同様の白色のトラック隊列が出現する実験（シナリオ X とする）を全被験者に共通で実施した．ただし，被験者には，トラック隊列走行がどのようなものかについては，実験前に動画説明等で教示済みである（後述の e）を参照）.

＜シナリオ X について＞

シナリオ X 実施までの練習走行ではトラック隊列が出現しないため，シナリオ X は，被験者が初めてトラック隊列走行に遭遇したときの状況を再現するものである．シナリオ A と比較することにより，トラック隊列出現時の合流経験の有無が合流挙動に与える影響を確かめることができる.

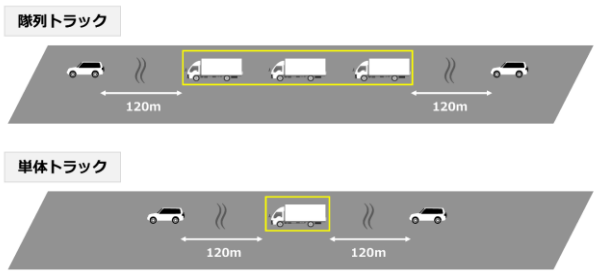


図-8　隊列トラックと単体トラックとの走行態様比較

d)　実験の実施と被験者の属性

本実験は，2022 年 11 月 22 日から 2022 年 12 月 29 日までの期間に実施した．被験者は，運転免許を有する一般成年計 25 名である．年齢と性別の内訳，被験者の運転頻度，及び，普通自動車免許を取得してからの経過年数を示したものが図-9 である．25 名中，運転頻度が週に 3 回以上の被験者が 17 名，免許取得後 20 年以上の被験者が 18 名と多いことから，本実験に参加した被験者は，運転熟練度が比較的高い標本であるといえる.

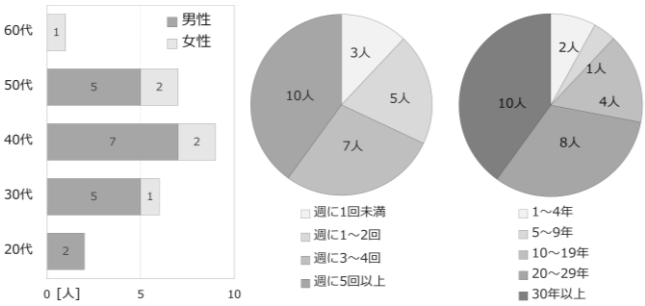


図-9　被験者の年齢と性別，運転頻度及び免許取得後の経過年数

e)　トラック隊列走行についての事前説明

練習走行前に，動画視聴によるトラック隊列走行の事前説明を行った．具体的には，トラック隊列走行技術の概要，公道実証実験の成果と課題，DS の操作方法等について 5 分程度の動画にまとめ，説明を実施した.

口頭でなく動画による説明を行った理由は，第一に視覚的にトラック隊列や DS 操作を理解してもらうため，第二に被験者間でトラック隊列に関する知識量を統一するためである.

f)　取得データと除外対象データ

本実験の DS による模擬走行実験で取得するデータは，ハンドル操作，アクセル・ブレーキ操作，走行位置，走行速度等を記録した走行ログデータであり，0.1 秒ごとに被験者車両及び周辺車両について上記情報が記録されたものである.

被験者 25 名のうち 1 名は，事前説明に従わず，制限速度を終始大幅に超過していたため，当該被験者の走行ログデータは分析対象から除外した.

なお，トラックとトラックとの間（車間距離 8.4m）に被験者車両が割り込む事象が懸念されていたが，本実験では当該事象は一度も発生しなかった.

3.　合流時安全性の評価方法

(1)　合流時の安全性評価方法

本研究では，合流挙動の安全性を評価するために a) 合流瞬間 PICUD 及び b) 累積ジャークの 2 種類の評価指標を用いる.

a)　合流瞬間 PICUD

第一の評価指標は合流瞬間 PICUD である．PICUD（Possibility Index for Collision with Urgent Deceleration）は，宇野ら [16] が提案した衝突危険性を示すコンフリクト指標であり，式(1) で定義される．これは 2 台の車両の位置・速度関係に基づき算出されるものであり，前方車両が急減速を行うと仮定し，両車が完全に停止したときの後方車両に対する前方車両の相対位置を示す．ただし，後方車

両は反応時間分の遅れを伴うことを考慮する．本研究では，後方車両の急ブレーキ時の挙動として，反応時間を 1.0 秒，減速時の加速度を－0.3G と設定した [17]．なお，後の分析においては，各要因がどのような変化・改善効果をもたらすかに着目することから，PICUD の値そのものの以上に値どうしの相対比較が重要となる．

$$PICUD = \frac{v_2^2}{-2a} + s_0 - \left(v_1 \Delta t + \frac{v_1^2}{-2a} \right) \quad (1)$$

v_1 : 減速開始時の後続車両速度[m/s]
v_2 : 減速開始時の先行車両速度[m/s]
s_0 : 後方車両から見た前方車両車尾の相対位置（車間距離）[m]
Δt : 反応遅れ時間[s]
a : 減速時の加速度[m/s^2]

本研究では，被験者が運転する合流車が加速車線から第一走行車線に車線変更した瞬間（合流瞬間）の PICUD を算出し，これによって安全性を評価する．合流時には，被験者にとって前方及び後方の双方に車両が存在するため，PICUD は一つの合流につき，合流車から見た前方車との PICUD と，後方車から見た合流車との PICUD との両方が算出可能である．本研究では，この 2 つの値のうち小さい値（より危険とされる方）を採用し，これを合流瞬間 PICUD と定義する．合流瞬間 PICUD が負で絶対値が大きいほど衝突危険性が高い危険な合流といえる．

b) 累積ジャーク

第二の評価指標は累積ジャークである．ジャークとは加速度の時間変化であり，加加速度や躍度ともいわれる．例えば，経時的にアクセルペダルの踏み込み量が増加するとき，ジャークは正の値をとる．反対に，アクセルペダルの踏み込み量が減少したりブレーキペダルの踏み込み量が増加したりするときに，ジャークは負の値をとる．さらに，一定の踏み込み量で走行している状態では，ジャークは±0 に近い値となる．

したがって，ペダルの踏み込み変化の激しい運転ではジャークの絶対値が大きい．このような不安定な運転では乗り心地 [18]や安全性 [19]が低下することが示されている．実際の車両開発においても，ジャークを 0 に近づけることによって乗り心地を向上させる取り組みが行われている [20]．また，同車線を走行する前後の車両に悪影響を及ぼす可能性も考えられる．

本研究では，式(2) に示すように，ハードノーズ通過時刻 t_a から本線合流瞬間時刻 t_b までの区間でジャークの絶対値を時間積分したものを，累積ジャーク J [m/s^2] と定義する．以上をまとめると，累積ジャークは合流車両の加速車線上での挙動を評価する指標であり，小さいほど安定性が高く滑らかな合流といえる．

$$J = \int_{t_a}^{t_b} \sqrt{\left(\frac{d^3x}{dt^3} \right)^2} \, dt \quad (2)$$

x : 車両位置[m]
t_a : ハードノーズの通過時刻[s]
t_b : 本線への合流時刻[s]

c) 本研究で検証する仮説

シナリオ X，B，C，D で効果を検証したい因子について，シナリオ A との比較により以下の仮説を立てた．

［仮説 X-1］
初めての隊列遭遇時と 2 回目以降とで，合流瞬間 PICUD に差異はない．

［仮説 X-2］
初めての隊列遭遇時と 2 回目以降とで，累積ジャークに差異はない．

［仮説 B-1］
トラック塗色が黄色の場合と白色の場合とで，合流瞬間 PICUD に差異はない

［仮説 B-2］
トラック塗色が黄色の場合と白色の場合とで，累積ジャークに差異はない．

［仮説 C-1］
注意喚起の情報板がある場合とない場合とで，合流瞬間 PICUD に差異はない．

［仮説 C-2］
注意喚起の情報板がある場合とない場合とで，累積ジャークに差異はない．

［仮説 D-1］
隊列トラックの場合と単体トラックの場合とで，合流瞬間 PICUD に差異はない．

［仮説 D-2］
隊列トラックの場合と単体トラックの場合とで，累積ジャークに差異はない．

d) 統計的仮説検定の手法

本研究では，提案する対策に効果がないものと仮定して，前項で示したように帰無仮説として仮説を設定した．ここでは，有意水準は $\alpha = 0.05$ とし，上記各仮説が棄却されるか否かの判定を行う．

本研究では，検定手法としてウィルコクソンの符号付順位和検定を採用した．シナリオ A のデータと，シナリオ X，B，C，D のデータとには対応があり（被験者内実験のため），各評価指標の母集団が連続値をとり，正規性を仮定しないことを手法選択の根拠としている [21]．

4. 合流時安全性に関する仮説の検証結果

(1) 初めて隊列走行に遭遇したときの影響

a) 合流瞬間 PICUD による評価

検定の結果，二つの母集団の間に統計的に有意な差が見られ，［仮説 X-1］は棄却される結果となった（z = 2.943，p = 0.003）．したがって，トラック隊列初回遭遇時と 2 回目以降とでは，合流瞬間 PICUD の点で合流時安全性に差異があるといえる．図-10 より，初回遭遇時の方が合流瞬間 PICUD が小さく（危険な合流に）なることが読み取れる．

b) 累積ジャークによる評価

検定の結果，二つの母集団の間に統計的に有意な差は見られず，［仮説 X-2］は棄却されなかった（z = 0.943，p = 0.346）．

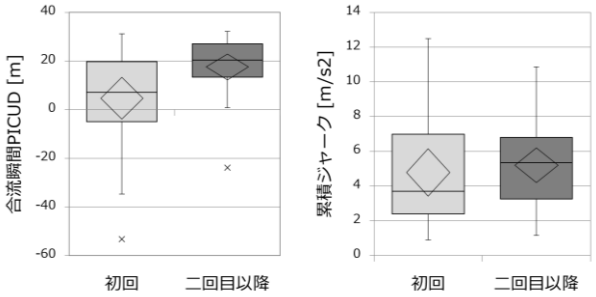


図-10 隊列遭遇経験有無が合流時安全性に与える影響

(2) 黄色トラックの効果

a) 合流瞬間 PICUD による評価

検定の結果，二つの母集団の間に統計的に有意な差は見られず，［仮説 B-1］は棄却されなかった（z = 0.339，p = 0.735）．

b) 累積ジャークによる評価

検定の結果，二つの母集団の間に統計的に有意な差が見られ，［仮説 B-2］は棄却される結果となった（z = 2.574，p = 0.010）．したがって，トラック塗装が黄色の場合と白色の場合とでは，累積ジャークの点で合流時安全性に差異があるといえる．図-11 より，黄色の場合の方が累積ジャークが小さく（安定性の高い合流に）なることが読み取れる．

黄色トラックによって累積ジャークが小さくなった（加速車線上での不安定さが改善された）実際の合流挙動例を図-12，図-13 に示す．横軸がハードノーズからの距離，縦軸折れ線が車両速度，縦軸棒がその地点までの累積ジャークを表す．本線への合流（車線変更）が完了すると最終的な累積ジャークが確定することから，棒グラフの値が固定される．図-12，図-13 より，最終的な速度増分が概ね等しくても，その過程によって挙動全体の安定感は大きく異なってくることが読み取れる．

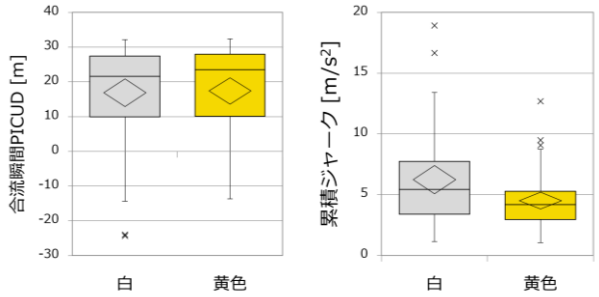


図-11 黄色トラックが合流時安全性に与える影響

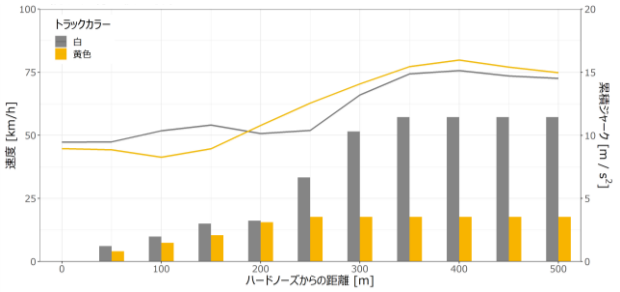


図-12 トラックカラーによる累積ジャーク改善例（被験者通し番号 3）

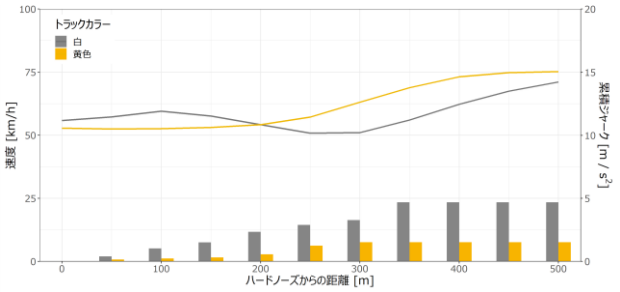


図-13 トラックカラーによる累積ジャーク改善例（被験者通し番号 11）

(3) 情報板の効果

a) 合流瞬間 PICUD による評価

検定の結果，二つの母集団の間に統計的に有意な差は見られず，［仮説 C-1］は棄却されなかった（z = 0.441，p = 0.659）．

b) 累積ジャークによる評価

検定の結果，二つの母集団の間に統計的に有意な差が見られ，［仮説 C-2］は棄却される結果となった（z = 2.318，p = 0.021）．したがって，情報板がある場合とない場合とでは，累積ジャークの点で合流時安全性に差異があるといえる．図-14 より，情報板がある場合の方が累積ジャークが小さく（安定性の高い合流に）なることが読み取れる．情報板による安全対策によって累積ジャークが小さくなった（加速車線上での不安定さが改善された）実際の合流挙動例を図-15，図-16 に示す．

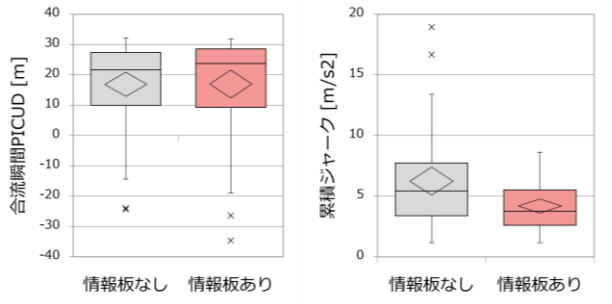


図-14　情報板設置が合流時安全性に与える影響

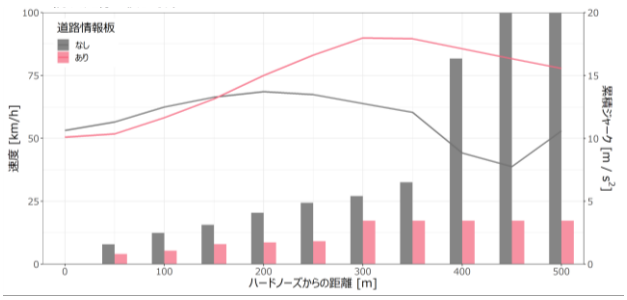


図-15　情報板による累積ジャーク改善例
（被験者通し番号 12）

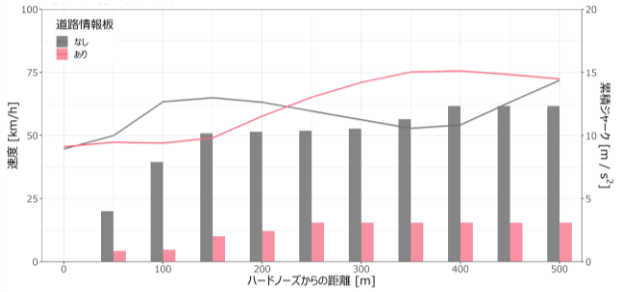


図-16　情報板による累積ジャーク改善例
（被験者通し番号 16）

(4) 単体走行と比較したときの隊列走行の影響

a) 合流瞬間 PICUD による評価

検定の結果，二つの母集団の間に統計的に有意な差は見られず，［仮説 D-1］は棄却されなかった（$z=0.421$, $p=0.674$）．

b) 累積ジャークによる評価

検定の結果，二つの母集団の間に統計的に有意な差は見られず，［仮説 D-2］は棄却されなかった（$z=1.692$, $p=0.091$）．

しかしながら，前記結果について仮に 5% 水準でなく 10% 水準とした場合には有意な差といえ，隊列形成時に累積ジャークが増加する傾向が見られた（図-17）．

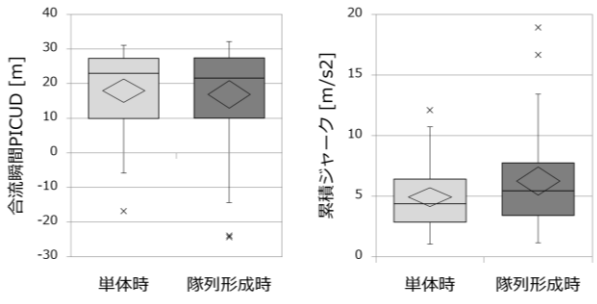


図-17　隊列形成が合流時安全性に与える影響

5. 検証結果に対する考察

(1) 初めて隊列走行に遭遇したときの影響

初めての隊列遭遇時に合流車の合流瞬間 PICUD が小さかった，すなわち安全性が低かった理由を，式(1) に示す PICUD 定義式の車間距離（変数 s_0）及び速度（変数 v）に着目して考察する．

はじめに，衝突対象車両との車間距離について被験者平均を算出したところ，初回遭遇時は平均 41.3m，以降は平均 50.5m であり，初回の方が合流時にスペースが狭いことが分かった．これが要因の一つであると考えられる．

次に，速度について被験者平均を算出したところ，初回遭遇時は平均 67.6km/h，以降は平均 69.5km/h であり，初回は本線交通流の速度 80km/h に対して，より低速で合流している（本線交通流との速度乖離が大きい）ことが分かった．ここで，図-18 を参照すると，合流瞬間 PICUD（定義は 3. (1) a）を参照）は，合流車両から見て後方にある車両との関係で算出される割合が高いことが読み取れる．すなわち，被験者にとっては，基本的に本線上のギャップを構成する後方車両と衝突する危険性の方が高いといえる．この点を踏まえれば，初めての隊列遭遇時に合流時速度が低速化することも，合流瞬間 PICUD を減少させる（安全性を低下させる）大きな要因であるといえる．

以上より，個別車両ごとに挙動は異なるものの，全体としては，隊列遭遇初回は危険な合流になることが明らかになった．2. (3) e)に示したように，被験者は隊列走行トラックに関する基本的な知識を有していたにもかかわらず，実際にトラック隊列に遭遇した際には対処が難しく，衝突危険性が高まることが明らかになった．

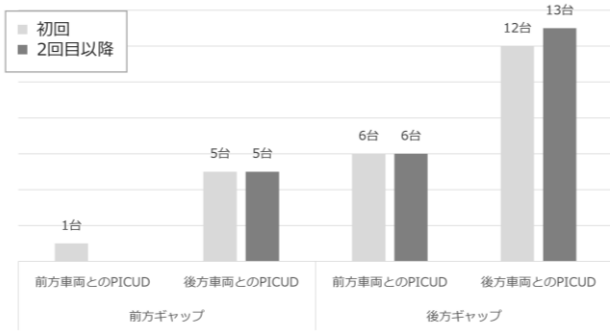


図-18　ギャップ選択結果と想定衝突対象の方向

⑵ トラック塗色を黄色とすることの効果

トラック塗色を白色ではなく，警戒色である黄色とすることによって累積ジャークが減少し，加速車線上での挙動が安定した理由としては，2.(2) a) に示したことが考えられる．つまり，トラック隊列の視認性が向上することにより，被験者が隊列走行しているトラック群の存在にいち早く気づき，危険回避行動に時間的余裕が生じた（どの位置，どの速度で合流するか等の見通しが立てやすくなり，余裕を持って対処できた）可能性が考えられる．

なお，実験終了後にトラック塗装を黄色にすることの効果についてアンケートを行ったところ， 25 人中 15 人が「通常時より合流しやすくなった」と答えた（図-19）．自由記述欄には，「目立つカラーでの車両であれば判断しやすい」という意見が寄せられた．

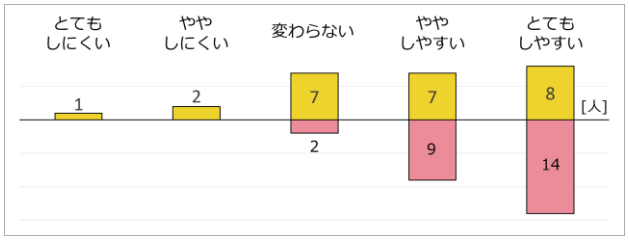


図-19　アンケート結果に基づく各対策の 5 段階効果
（上段：黄色トラック／下段：情報板）

⑶ 情報板の効果

注意喚起の情報板によって累積ジャークが減少し，加速車線上での挙動が安定した理由としては，2.(2) b)に示したことが考えられる．つまり，被験者がトラック隊列の出現を予見可能になり，心理的・時間的余裕をもって合流に臨めるようになった可能性が考えられる．

実験終了後に情報板設置の効果についてアンケートを行ったところ， 25 人中 23 人が「通常時より合流しやすくなった」と答えた（図-19）．自由記述欄には，「前もって隊列トラックと判れば対処しやすくなる」，「電光掲示板等で注意を促すと心の準備が出来ると感じた」，「情報板があることで心理的に先が予測でき合流タイミングの判断がしやすかった」という意見が寄せられた．

⑷ 単体走行と比較したときの隊列走行の影響

隊列形成時に累積ジャークが増加する傾向が見られた理由としては，隊列の長さ分だけ合流位置の調整に要する時間等が増加した可能性が考えられる．

⑸ 被験者が実験内で学習することについての検討

2 つの安全対策の効果が累積ジャークにのみ表れ，合流瞬間 PICUD には変化が見られなかったこと，及び，隊列形成時に合流瞬間 PICUD に変化が見られなかったことについては，(1)に示した内容との関連性が高いと考える．

本実験では，限られた時間内で複数回トラック隊列が出現するため，その出現頻度は実際の道路では起こり得ないものであるといえる．無警戒な状態で初めてトラック隊列に遭遇し，不覚にも衝突しそうになってしまった被験者は，実験内でトラック隊列が出現し得ることを学習し，以降しばらくの間，周辺車両と衝突しないよう警戒感が高まった状態となる．“衝突しない”ことは，安全な運転をする上での最優先事項であるといえるからである．

以上の理由から，本研究のように同一被験者に対して複数回の実験を行った場合，隊列遭遇 2 回目以降は衝突への警戒感が高まることにより，車両同士の“衝突”可能性を表す指標である合流瞬間 PICUD に変化が生じにくくなる可能性が考えられる．また，合流瞬間 PICUD が変化しない一方で，“衝突しない”ために意識的又は無意識的に行った合流時の調整行為の結果が累積ジャークに表れる，と解釈することもできる．

また，合流時の挙動について一般的に考えると，調整行為を行ったならば衝突しにくく，衝突しそうになったならば調整行為を行っていなかった，という可能性が高い．このことから，合流瞬間 PICUD と累積ジャークとは，定義式上は一見無関係でも，互いに密接に関連する指標である（少なくとも，両指標ともに悪くなるということはない）という仮説が考えられる．この仮説は，(1) b) に示した結果（合流瞬間 PICUD には差異が生じた一方で，累積ジャークに差異が生じなかったこと）にも裏付けられる．

6. おわりに

⑴ 結論

本研究では，高速道路本線をトラックが隊列走行しているところに一般車両が合流する，という場面をドライビングシミュレータ上で再現し，模擬走行運転実験を行

った．合流時の安全性評価のために，合流瞬間 PICUD（合流の瞬間における本線車両との衝突可能性を表す指標）及び累積ジャーク（加速車線上での加速挙動の安定性を表す指標）という 2 つの指標を定めた．そして，2 つの対策（トラック塗色を警戒色である黄色にすること，及び，情報板設置による注意喚起）によって合流時安全性が改善するか否かを走行ログデータから分析した．また，単体のトラックと比較したときの隊列トラックの影響，及び，隊列トラックの遭遇経験の有無が与える影響についても併せて分析した．

上記場面における合流車両（被験者）の挙動について，本研究で得られた成果のうち主要なものを以下に示す．

［成果 1］

隊列走行トラックに関する知識を有していたにもかかわらず，初めてトラック隊列走行に遭遇した際には，本線車両との衝突危険性が有意に高くなった．

［成果 2］

トラック塗装を白色でなく警戒色である黄色にすることにより，トラック隊列の視認性が向上し，加速挙動の安定性が有意に高くなった（累積ジャークが有意に小さくなった）．

［成果 3］

注意喚起の情報板を加速車線手前に設置することにより，トラック隊列の出現を予見できるようになり，加速挙動の安定性が有意に高くなった（累積ジャークが有意に小さくなった）．

⑵ 本研究で得られた成果の社会的意義

隊列走行技術の社会実装に向けて，本研究で得られた成果がどのような意義を有するかについて，考えるところを論じる．

［成果 1］より，隊列走行トラックを公道で実装する際には，道路利用者に対して隊列走行の知識を教示するだけでは対策として不十分であるといえる．本研究では隊列遭遇 2 回目以降の挙動が改善したが，現実の道路では期間が空くと元の危険な挙動に戻ってしまう可能性も考えられる．したがって，トラック隊列走行が十分に社会に浸透し，一般車両が順応できるようになるまでの期間は，事故を防ぐために特に手厚い対策が必要になると考えられる．

［成果 2］，［成果 3］に示したように，本研究で提案した 2 つの対策は，道路インフラ整備（専用レーン設置やランプメータリング，加速車線延長等）より実装コストが低いにもかかわらず，統計的分析の結果から確かな効果を発揮することが明らかになった．必ずしも大規模な改修工事等をしなくても，合流を阻害する物理的・心理的要因を考えて対策を講じることにより，一般合流車の安全性を向上させることが可能である．

以上に述べたことから，本研究は，トラック隊列走行普及への過渡期における交通事故削減や，費用対効果に優れた交通施策の実現に寄与することができたと考える．

⑶ 今後の課題

本節では，本研究で不十分であった点や今後検討すべき課題について述べる．

はじめに，実験設計におけるトラック隊列走行パターンを前寄りと後ろ寄りとの 2 種類のみしか扱えなかった点が挙げられる．トラック隊列走行時に合流車両にとって最も危険性が高い状況は，“前方ギャップを選択するか後方ギャップを選択するかの判断の分かれ目に置かれた状況”であると考えられる．本研究の設計においても，そのような判断の分かれ目に置かれる状況を一部合流車両（被験者）に対しては生成できていると思われるが，トラック隊列とのわずかな位置関係・速度関係の変化によってギャップ選択の判断が左右されるため，より細かく段階的に隊列走行位置を設定することによって，判断が困難な状況に置かれた車両の挙動を詳細に分析することができると考える．

次に，夜間の運用方法について考慮できていない点が挙げられる．隊列走行に関する既往研究がそれほど充実していないことから，本研究は今後の研究の土台となるよう，昼間走行という基本的な条件設定のもとで実施した，しかし，実際はトラックによる長距離輸送は渋滞を避けるために深夜帯に行われることが多い．特に，本研究で提案したトラック塗装を黄色にする対策は，夜間には視認性低下により大幅に効力を失うと考えられるため，実際に導入する場合には，トラック外装に電飾を用いる等，夜間の運用にも配慮する必要がある．

最後に，トラック隊列走行時の被験者の思考プロセスや心理的負荷について解明しきれていない点が挙げられる．例えば，被験者がどの段階でトラック隊列に気づき，どのような思考を経てギャップ選択を行ったのかが明らかになっていない．走行ログデータ分析時に，被験者が隊列を認識した時刻を 0.1 秒単位で特定しようと試みたが困難であった．ギャップ選択時の思考過程についてアンケートで被験者に尋ねたが，簡単に言語化できるものではなく，十分に検証することができなかった．しかし，この点は合流判断，ひいては交通安全に直結する重要な要素であるため，例えば生体機器を用いる等，本研究と別の切り口で検証することにも価値があると考えられる．

REFERENCES

1) 国土交通省：交通関係基本データ：輸送機関別輸送量，https://www.mlit.go.jp/k-toukei/，2023.1.28 最終閲覧

2) 総務省：労働力調査，2022
3) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：大型トラックの自動運転・隊列走行実験に成功，https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100178.html，2023.2.9 最終閲覧
4) 公益社団法人日本ロジスティクスシステム協会（JILS）：ロジスティックスコンセプト 2030，2020.1
5) 国土交通省：トラックの隊列走行に関する取組，https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/nls/pdf04/07.pdf，2023.2.9 最終閲覧
6) 国土交通省；新しい物流システムに対応した高速道路インフラの活用に関する検討会，https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/nls/pdf04/08.pdf，2023.2.9 最終閲覧
7) 谷田公二，木村真弘，吉田雄一：自動運転車制御へ向けた高速道路での合流行動モデル，自動車技術会論文集 48 巻 4 号 p885-890，2017
8) 柳原正実，宇野伸宏，塩見康博，倉内文孝：画像データを活用した都市高速合流部における合流ギャップ選択モデル，土木計画学研究・論文集 27 巻 3 号 p. 551-559，2010
9) Tien Dung CHU，Hideki NAKAMURA，Miho ASANO：MODELING GAP CHOICE BEHAVIOR AT URBAN EXPRESSWAY MERGING SECTIONS，土木計画学研究・論文集 69 巻 5 号 p. 881-891，2013
10) 杉町敏之, 橋本怜, 須田義大：ドライビングシミュレータを用いたトラックの隊列走行に対する一般車両の受容性の評価，自動車技術会論文集 48 巻 5 号 p.1121-1126，2017
11) 郭鐘聲, 郭曄璇, 杉町敏之, 霜野慧亮, 須田義大：トラックの隊列走行時における周辺ドライバへの受容性と安全性に関する研究，生産研究 72 巻 2 号 p.185-189，2020
12) 東富隆馬，西崎省伍，兵藤哲朗，坂井孝典：強化学習を用いた長大車の高速道路合流箇所の安全性評価，土木計画学研究・講演集，2022
13) Meng Wang，Sander van Maarseveen，Riender Happee，Onno Tool，Bart van Arem：Benefits and Risks of Truck Platooning on Freeway Operations Near Entrance Ramp，Transportation Research Record Vol. 2673(8) p.588-602，2019
14) Metichannel：高速道路におけるトラックの後続車無人隊列走行技術を実現しました②走行時の様子，https://youtu.be/GZf19fC_DPw，2023.2.9 最終閲覧
15) 経済産業省：高速道路におけるトラックの後続車無人隊列走行技術を実現しました，2023.10 最終閲覧
16) 宇野伸宏，飯田恭敬，安原真史，菅沼真澄：一般道織込み部における客観的コンフリクト分析と速度調整モデルの構築，土木計画学研究・論文集 20 巻 4 号 p.989-996，2003
17) 内閣府：平成 26 年度交通安全フォーラム基調講演資料，https://www8.cao.go.jp/koutu/keihatsu/forum/h26/pdf/kouen7.pdf，2023.1.9 最終閲覧
18) 王鋒，佐川貢一，猪岡光：自動車の加減速と乗り心地の関係に関する研究，人間工学 36 巻 4 号 p.191-200，2000
19) 久代育生，鈴木桂輔：ジャーク最小モデルに基づく熟練運転者の操舵パターンの数学モデル，自動車技術会論文集 47 巻 5 号 p.1103-1110，2016
20) 日立 Astemo 株式会社：電動化車両の乗り心地を向上させるアンチジャーク制御および電費・安定性を向上させるモータートルク制御のプロトタイプを開発，https://www.hitachi.co.jp/New/cnews/month/2022/10/1020b.pdf，2022.10.20
21) 新谷歩，加葉田大志朗：検定の選び方 検定は結論を変え得る！不適切な検定を故意に選ぶのは不正行為，2017.3.31
22) デジタル庁：官民 ITS 構想・ロードマップ これまでの取組と今後の ITS 構想の基本的考え方，高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部・官民データ活用推進戦略会議，2021.6
23) 豊田通商株式会社：平成 30 年度「高度な自動走行システムの社会実装に向けた研究開発・実証事業：トラックの隊列走行の社会実装に向けた実証」報告書 p.15-27，2019
24) 内閣府：令和元年度交通事故の状況及び交通安全施策の現況，https://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/r02kou_haku/zenbun/genkyo/h1/h1b1s1_2.html，2023.2.9 最終閲覧
25) 内閣府：平成 26 年度交通安全フォーラム基調講演資料，https://www8.cao.go.jp/koutu/keihatsu/forum/h26/pdf/kouen7.pdf，2023.1.9 最終閲覧
26) 吉本達也，深尾隆則，横小路泰義，伊能寛：ドライバの操作特性を考慮した動的環境下におけるレーンチェンジ経路生成法，自動車技術会論文集 47 巻 2 号 p.633-638，2016
27) 李，曙光：自動車運転行動の特徴量抽出とドライバ脳活動計測による運転技量の評価，東京大学博士論文 2015
28) 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エコシステムを考慮した社会受容性に関する研究，交通・物流部門大会講演論文集 25 巻，2016
29) Pushkin Kachroo，M. Tomizuka：Vehicle Control for Automated Highway Systems for Improved Lateral Maneuverability，Electrical and Computer Engineering Faculty Publications Electrical & Computer Engineering，1995
30) 中邨勉，堀洋一：ヨーレートの微分値まで考慮した車両の運動制御，東京大学卒業論文，2006
31) 中村義作：よくわかる実験計画法，株式会社近代科学社，2018.4.30
32) 大村平：実験計画と分散分析のはなし，株式会社日科技連出版社，1989.4.12

(Received July 1, 2022)
(Accepted November 1, 2022)

AN EVALUATION OF SAFETY COUNTERMEASURES AT MERGING SECTION FOR ORDINARY VEHICLE AGAINST PLATOONING OF TRUCKS

Ryo SHIBATA, Nobuhiro UNO, Ryoji MATSUNAKA and Kosuke TANAKA

As the shortage of truck drivers becomes more serious, truck platooning is attracting attention. As technological development and institutional improvements progress, truck platooning is becoming a reality. However, danger arises when ordinary vehicles try to merge near a truck platoon which is traveling on the main highway. Therefore, the purpose of this study is to statistically verify the effectiveness of two measures: “painting trucks yellow” and “warning drivers with information boards.” By conducting a virtual driving experiment using a driving simulator, test subjects' driving log data were obtained. Two indicators were used to evaluate the safety of merging behavior: “PICUD at the moment of merging” and “cumulative jerk.” The analysis revealed that both the yellow trucks and the information boards reduced the cumulative jerk of merging vehicles, in other words, improved driving stability. It was also found that the risk of collision increases when encountering a truck platoon for the first time.