

強化学習を用いた 長大車の高速道路合流箇所安全性評価

東富 隆馬¹・西崎 省伍²・兵藤 哲朗³・坂井 孝典⁴

¹ 非会員 国土交通省道路局路政課 (〒100-8918 東京都千代田区霞ヶ関 2-1-3)

E-mail: tohtomi-r2e8@mlit.go.jp

² 非会員 シンプレクス株式会社 (〒105-6319 東京都港区虎ノ門 1-23-1 虎ノ門ヒルズ 19 階)

E-mail: 非公開

³ 正会員 東京海洋大学教授 海洋工学部流通情報工学科 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6)

E-mail: hyodo@kaiyodai.ac.jp

⁴ 非会員 東京海洋大学准教授 海洋工学部流通情報工学科 (〒135-8533 東京都江東区越中島 2-1-6)

E-mail: tsakai2@kaiyodai.ac.jp

近年、我が国の物流産業では、少子高齢化に伴う労働人口の減少により、人手不足問題が深刻化している。今後、物流網を安定的に維持・発展させていくためには、新技術の導入等を通じて、労働生産性を向上させていく必要があると考えられる。現在、物流産業においては様々な新技術の導入が検討されているが、中でも注目されているのが、ダブル連結トラックや隊列走行といった長大車である。しかし、長大車は車長が極めて長く、事故リスクが高いと考えられる。特に、高速道路合流箇所では、従来事故の発生確率が高く、長大車導入上の隘路となっている。本研究では、強化学習を用いて、高速道路合流箇所における合流シミュレーションモデルを構築し、長大車の導入が高速道路合流箇所の安全性に与える影響について、定量的かつ多角的に分析を行った。

Key Words: reinforcement learning, double trailer truck, truck platooning, highway merging

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

我が国では、少子高齢化が急速に進展した結果、2008年をピークに急激に人口減少が進行している。人口減少は、国内需要の減少による経済規模の縮小、労働人口の減少による労働力不足、医療・介護費の増大等による社会保障制度の崩壊、財政危機、国際競争力の低下等様々な影響を及ぼすと考えられている¹が、その中でもとりわけ、人口減少に伴う労働力不足問題は、既に現在進行形で日本社会に対して著しい影響を及ぼしている。特に、物流業界においては、トラックドライバー不足が深刻化しており、公益社団法人鉄道貨物協会の本部委員会資料(平成30年度)によれば、2028年度には278,072人のトラックドライバーが不足すると予想されている²。また、道路貨物運送業に従事する労働者の年齢構成は、50代以上が43.3%となっており³、これらの年齢層の労働者が定年退職を迎える頃には、さらにトラックドライバー

不足が深刻化することが予想される。その一方で、楽天やAmazonといったECサイト等の普及を背景に、宅配便等の貨物量は年々増加している⁴。

物流産業は、生産要素に対する労働の割合が極めて高い、典型的な労働集約型の産業である。今後加速的に進行していく少子高齢化・労働人口の減少といった諸課題に対応しながら、現在の物流網を安定的に維持・発展させていくためには、新技術の導入等を通じて、労働生産性を向上させていく必要があると考えられる。現在、物流業界においては様々な新技術の導入が検討されているが、その中でも注目されているのが、ダブル連結トラックや隊列走行車といった長大車の存在である。

ダブル連結トラックとは、通常的大型トラックの後部にトレーラーを連結させることで、1台で通常的大型トラック2台分の輸送を可能にしたトラックを指す言葉である。ダブル連結トラックは、平成31年に本格導入を開始し、現在東名高速道路や新東名高速道路等の高速道路を中心に運行されている。一方、隊列走行車とは、ト

トラック等を電子連結技術（車車間通信）により一体に制御し、数台のトラックが隊列走行群を構成し走行するもので、省エネ効果・省人化・安全性や運行効率の向上が期待されている技術である。現在、日本のみならず世界各国において実用化に向けた取り組みが活発化し、米国等では一部商業運用されている。日本では、電子連結技術を電子牽引とみなすことで、先頭車両は有人、後続車両は無人で隊列走行が可能かどうか検討を進めている⁵⁾。

しかし、ダブル連結トラックや隊列走行車といった長大車は、車長が極めて長いという特性を有しているが故に、事故を起こすリスクが高いと考えられる。特に、高速道路の合流部では、元来より事故の発生確率が高く⁶⁾、ダブル連結トラックや隊列走行車等の長大車を導入する上での隘路となりかねない。本研究では、ダブル連結トラックや隊列走行車といった長大車の、高速道路合流部における挙動を再現し、長大車の導入が高速道路の安全性にどのような影響を及ぼすのか、定量的かつ多角的に分析することを目的としている。

(2) 既往研究と本研究の位置づけ

高速道路合流箇所に関する研究は、様々な手法を用いて行われている。喜多・原田⁷⁾は、高速道路合流箇所における合流車の合流挙動を、流入すべきギャップの選択と、そこに流入するための加速継続時間の選択からなる二段階選択モデルとして定式化している。山科・瀬谷・喜多⁸⁾は、相前後に走行する複数の本線車とのゲームを二段階のゲームとして記述した上で、ロジットモデルを用いた複数近郊選択確率の導出を行い、複数ギャップを考慮し得る合流モデルを構築している。鈴木・松村⁹⁾は、都市高速道路3か所の合流地点を対象に映像データから走行車両の位置、速度、加速度を測定し、コンフリクト指標を用いて、各合流部における錯綜発生時の潜在的な衝突危険性の現状について分析している。飯田・隅本¹⁰⁾は、ドライビングシミュレータを用いた走行実験を用いた走行実験より取得したデータを用いて本線車線の原則開始地点の分布を求めた上で、高速道路合流部における本線車線走行車両の減速開始地点と視認開始地点、減速開始地点と車間距離との関連性について分析を行っている。

また、ダブル連結トラックや隊列走行車等の長大車に関する研究についても、多様な研究が行われている。相馬・兵藤¹¹⁾は、ダブル連結トラックのGPSデータとドライバーの心拍データから、ダブル連結トラックの運行特性とドライバーのストレスに関する分析を行っている。林ら¹²⁾は、官公庁が発行している資料を基に、高速バスの自動運転・隊列走行の社会実装化に向けたコンセプトについて検討している。

しかし、長大車を考慮した高速道路合流箇所に関する

研究は、極めて少ない。平田・讃良・影山¹³⁾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策について検討した上で、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ている。また、Scholte et al.¹⁴⁾は、高速道路の合流箇所において、1台の協調型自動運転車が複数の車両からなる隊列走行に合流する状況での、合流制御戦略について研究を行っている。しかし、これらの研究では、研究対象を隊列走行に限定しており、ダブル連結トラックの合流については検討していない。また、Scholte et al.の研究では、普通車の隊列走行に限定して研究を行い、トラック隊列走行については分析していない。

これらを踏まえ、本研究ではダブル連結トラック・トラック隊列走行の両方に対応した合流シミュレーションモデルを作成する。そして、作成したモデルを用いて、長大車の導入が高速道路合流箇所の安全性に与える影響について、定量的かつ多角的な分析を行う。

2. 強化学習

(1) コンセプト

機械学習とは、人工知能(AI)の一種であり、「データから規則性や判断基準を学習し、それに基づき未知のものを予測、判断する技術」を指す言葉である。機械学習は、「教師あり学習」「教師なし学習」「強化学習」に大別される。教師あり学習は、結果や正解にあたる「教師データ」が与えられる。教師データを既知の情報として学習に利用し、未知の情報に対応することができる回帰モデルや分類モデルを構築することが多い。一方、教師なし学習は、正解に相当する「教師データ」が与えられない。教師なし学習は、データのグループ分けや情報の集約等に活用されることが多い。そして、強化学習とは、「エージェント」に「環境」の「状態」に応じてどのように「行動」すれば「報酬」を多く獲得することができるのか学習させる手法である。エージェントは、試行錯誤を通じて、報酬(評価)が得られる行動や選択を学習する。強化学習において、エージェントと環境は相互関係にある。エージェントは、環境に対して行動を起こす。そして、環境はエージェントの行動に対して、状態を更新し、報酬をエージェントに返す。エージェントや環境といった強化学習特有の用語の説明は、表-1の通りである。

表-1 強化学習の用語

| 用語 | 説明 |
|-----------------|-------------------------|
| エージェント(agent) | 行動する主体 |
| 環境(environment) | 働きかけられる対象 |
| 行動(action) | エージェントが環境に行う働きかけ |
| 状態(state) | エージェントが行動することで変化する環境の要素 |
| 報酬(reward) | 行動の結果の良さをスカラー値で表したもの |
| 方策(policy) | エージェントの行動を決定する原理 |

(牧野貴樹ら, これからの強化学習, 森北出版, 2016年, p2~p3を基に筆者作成¹⁵⁾)

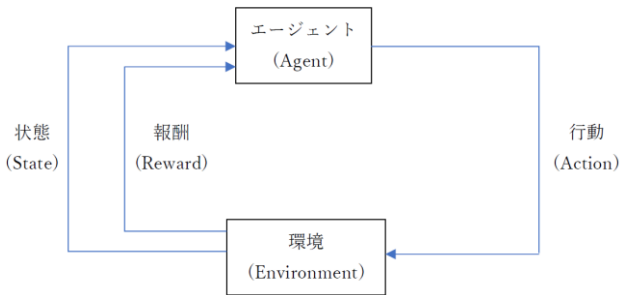


図-1 環境とエージェントの関係

(2) アルゴリズム

本研究では, OpenAI が 2017 年に公開した Proximal Policy Optimization (以下“PPO”と称する) と呼ばれる強化学習アルゴリズムを用いる。PPO は, 方策勾配法と呼ばれる手法を用いている。PPO は, 実装と調整がシンプルでありながら, 同じ方策ベースの Trust Region Policy Optimization (TRPO) や Asynchronous Advantage Actor-Critic (A3C) といった最先端のアプローチと同等もしくはそれ以上のパフォーマンスを発揮するという点で, 優れる。PPO の詳細については, John Schulman ら¹⁶⁾を参照されたい。

(3) OpenAI Gym/Baselines

本研究では, OpenAI Gym 及び Stable Baselines を用いて強化学習の実装を行った。OpenAI Gym は, OpenAI が提供している強化学習用のツールキットで, 強化学習のエージェントと環境間の共通インターフェイスを提供している。一方, Stable Baselines は, OpenAI が提供する強化学習アルゴリズムの実装セット OpenAI Baselines の改良版で, 種々の強化学習アルゴリズムをサポートしている。Stable Baselines には PPO1 と PPO2 の 2 種類の PPO が用意されているが, GPU に対応した最新版の強化学習アルゴリズム PPO2 を用いる。なお, 本研究では Google 社が提供している Google Colaboratory 用いて, python 言語によってモデルの開発を行う。

3. シミュレーションモデルの構築

ここでは, ダブル連結トラックや隊列走行車等の長

大車両が, 加速車線から本線車線に合流する場合のシミュレーションモデルの構築方法を説明する。構築したモデルは, 長大車導入が高速道路の安全性に与える影響について定量的に分析を行うために用いる。

(1) 環境の設定

a) 車両

現在, ダブル連結トラックを運行するためには, 道路法第 47 条の 2 に規定される「特殊車両通行許可制度」に基づき, 特殊車両通行許可申請を行わなければならない。従って, ダブル連結トラックを運行させるためには, 特殊車両通行許可基準を満たす必要がある。表-1 にダブル連結トラックに関する特殊車両通行許可基準の概要を示す。本研究では, ダブル連結トラックの車長を 25m とし, 追い越しは行わないように設定する。また, 制限速度に関しては, 道路交通法に基づき 80km/h と設定する。

表-2 ダブル連結トラックに関する特殊車両通行許可基準の概要

| 項目 | 内容 |
|------|--|
| 車両 | 車両の長さは, 最大 25m. |
| 運転者 | ・大型車両免許 5 年以上保有及び牽引免許 5 年以上の保有 ・直近 5 年以上の大型自動車運転業務への従事 ・2 時間以上の訓練の講習 等 |
| 運転区間 | 東北自動車道 (北上江釣子 IC まで) ~ 圏央道 ~ 東名高速道路・新東名高速道路 ~ 名神高速道路・新名神高速道路 ~ 山陽自動車道 ~ 九州自動車道 (太宰府 IC まで) を主な通行経路にすること。 |
| その他 | 追い越し, 縦列走行の禁止。 |

また, 隊列走行には様々な種類のものが存在するが, 本研究では全長 12m の大型トラックが 3 台が隊列を構成し, 各トラックの車間距離が 10m の全長 56m の隊列走行を想定する。また, ダブル連結トラックと同じく追い越しは行わないように設定し, 制限速度は道路交通法に基づき 80km/h に設定する。

本研究では, 便宜上, 車長が 5.5m 未満の車両を「普通車」, 車長が 5.5m を超える車両を「大型車」と定義する。

b) 車両割合

合流車 (エージェント) が長大車で, 走行車線走行車及び追い越し車線走行車を走行する車両は, 普通車もしくは大型車と仮定して, シミュレーションを行う。本研究では, 追越車線の大型車率を 50% で固定し, 本線車線の大型車率を 10~90% の間で変化させて分析を行う。

c) 交通量

図-3 に令和元年度 12 月における東名高速道路のトラフィックカウンターデータ (NEXCO 中日本提供) に記載されている交通量をヒストグラム化したものを示す。

図-3 より、交通量が 1600 台/h/lane を超えることは極めて稀であることが分かる。よって、本研究では交通量を 400~1600 台/h/lane の区間で 200 台/h/lane ずつ変化させて分析を行うこととする。なお、交通量 600 台/h/lane を基準値（ベンチマーク）とする。

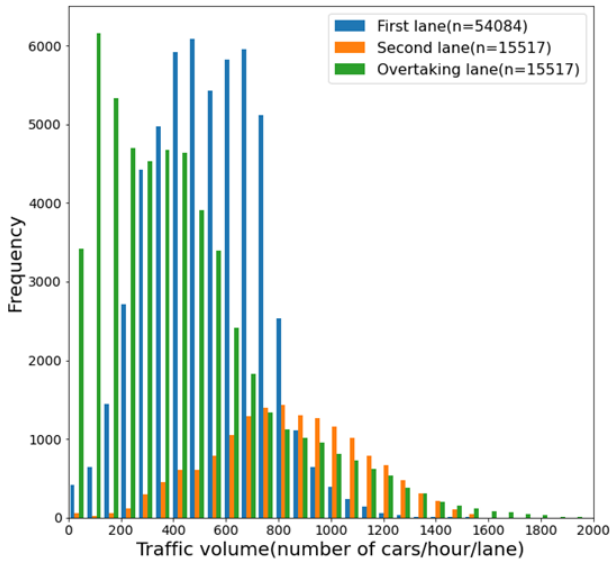


図-3 東名高速道路の交通量分布

d) 速度

本線車線走行車ならびに追越車線走行車は、速度一定と仮定し、合流車（エージェント）のみ速度変更可能とする。図-4 に、令和元年度 12 月における東名高速道路・新東名高速道路における QV 曲線を示す。

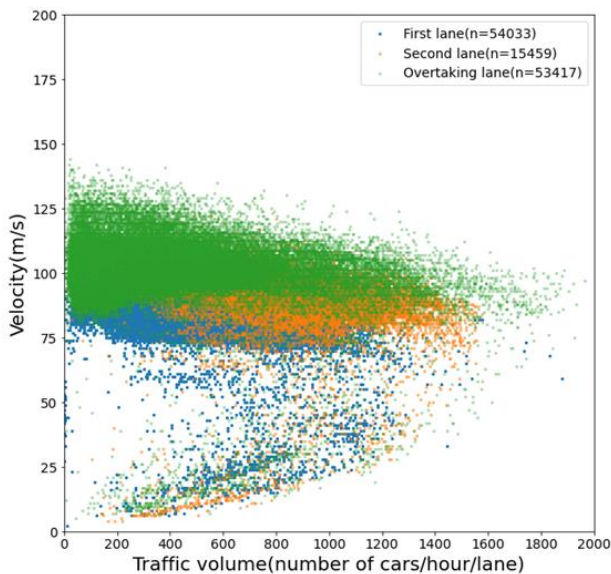


図-4 東名高速道路における QV 曲線

走行車線走行車の速度は、便宜上、図-5 に表される QV 曲線モデルを用いて設定を行う。 V_0 は交通量が 0 の

時の速度、 V_c は交通容量 Q_c における速度、 Q_c は交通容量である。図-5 を参考に、 V_0 を 80km/h、 V_c を 50km/h、 Q_c を 1600 台/h/lane と仮定し、走行車線走行車の速度を設定する。なお、自由走行領域のみを研究対象とし、渋滞領域に関しては取り扱わない。

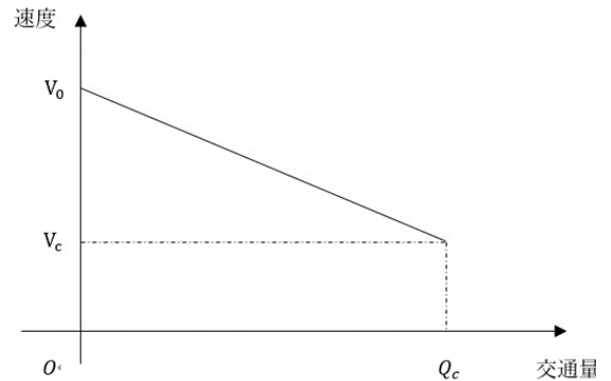


図-5 QV 関数のモデル

追越車線走行車の速度は、先ほど説明した本線車線走行車の速度に基づいて決定する。図-6 に東名高速道路における本線走行車線走行車・追越車線走行車の速度分布並びに両車線の速度差を示す。図-6 より、本線車線走行車と追越車線走行車の速度差は、おおよそ 10~20km/h となっている。本研究では、本線車線走行車と追越車線走行車の速度差を 15km/h と仮定して、追越車線走行車の速度を設定する。

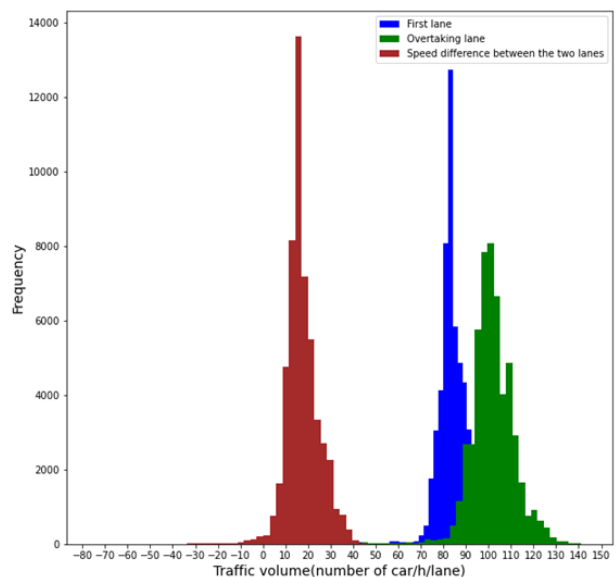


図-6 東名高速道路における本線車線走行車・追越車線走行車の速度分布及び両車線の速度差

最後に、合流車（エージェント）の速度設定について説明する。まず、本線車線走行車の速度と合流車（エー

エージェント) の速度差を 15km/h と仮定して、エージェントの初期速度の基準値 k を決定する。次に、基準値 k を基に、 $k-3.0$ から $k+3.0$ の間で一様分布を発生させて、合流車 (エージェント) の初期速度を設定する。

以上を踏まえ、合流車 (エージェント) の初期速度、走行車線走行車の速度、追越車線走行車の速度についてまとめたものを表-3 に示す。

表-3 車両の速度設定

| 交通量 (台/h/lane) | 400 | 600 | 800 | 1000 | 1200 | 1400 | 1600 |
|----------------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
| エージェントの初期速度の基準値 k (km/h) | 80 | 75 | 70 | 65 | 60 | 55 | 50 |
| 走行車線走行車の速度 (km/h) | 95 | 90 | 85 | 80 | 75 | 70 | 65 |
| 追越車線走行車の速度 (km/h) | 110 | 105 | 100 | 95 | 90 | 85 | 80 |

e) 車頭間隔の設定

車頭間隔を「前方車両のヘッドから追従車両のヘッドまでの距離」と定義する。車頭間隔は、車両間の車頭時間に車両の走行速度を掛け合わせることで算出することができる。

ここで、車頭時間の設定に関しては、塩見¹⁷⁾を参考にする。対象区間始点への到着パターンとして、アラン到着を仮定した場合、車両 j の区間始点での車頭時間 h_j [sec] は式(1)で算出される。

$$h_j = - \sum_{i=1}^K \frac{1}{\lambda} \ln(1 - RND) \quad (1)$$

ここで、 K はアラン分布の位相 ($K = 1$ もしくは $K = 2$)、 RND は 0-1 の間に一様分布する乱数、 λ は流入量交通量 Q [veh/h] の関係で、

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{3600}{K \cdot Q} \quad (2)$$

と表されるパラメータである。

f) 周辺車両の挙動

避走挙動とは、合流部からの流入車を早期に発見し、追い越し車線へ車線変更を行う本線車線走行車の挙動のことである。本研究では、以下の条件を全て満たしたとき、本線車線走行車は避走挙動を行うこととする。

$$d_k < \min. gap_k \quad (3)$$

$$d_{kl} < \min. gap_l \quad (4)$$

$$d_{kl-1} < \min. gap_k \quad (5)$$

k : エージェントの直後の走行車線走行車

l : 走行車線走行車 k の直後の追越車線走行車

$l-1$: 走行車線走行車 k の直前の追越車線走行車

d_k : エージェントと走行車線走行車 k との車間距離

d_{kl} : 走行車線走行車 k と追越車線走行車 l との車間距離

d_{kl-1} : 走行車線走行車 k と追越車線走行車 $l-1$

との車間距離

$\min. gap_k$: 走行車線走行車 k が 0.5 秒間に進む距離

$\min. gap_l$: 追越車線走行車 l が 0.5 秒間に進む距離

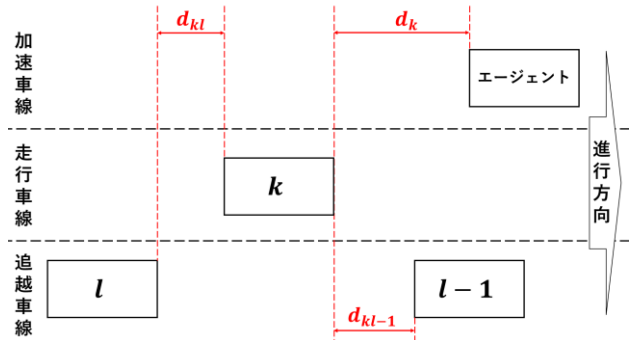


図-7 避走挙動の説明

g) 道路

加速車線、走行車線、追越車線がそれぞれ 1 レーンである高速道路合流部を想定し、加速車線長を 150~400m の間で 50m ずつ変化させて分析を行うこととする。なお、基準値 (ベンチマーク) は 200m とする。

(2) 強化学習モデルの構築

a) 強化学習環境

表-4 に本研究で用いた強化学習の概要、表-5 に報酬の設定を示す。

以下、報酬の加速度項目について説明する。まず、高速道路合流部において合流車は、急減速・急加速することはほとんどなく、基本的に微加速、微減速或いは速度維持すると思われる。これらをシミュレーションに反映させるために、以下の数式に基づいて報酬の加減を調整することにした。ここで、 a_t は t 秒における加速度である。

$$\frac{1}{0.4\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{a_t^2}{0.32}\right) - \frac{1}{0.4\sqrt{2\pi}} \quad (6)$$

式(6)は、正規分布 $N(0, 0.4^2)$ から、正規分布 $N(0, 0.4^2)$ に $x=0$ を代入した値を引いたものである。式(6)は、エージェントが微加速、微減速又は速度維持した場合と比較して、急加速・急減速した場合、報酬の値が相対的に低くなるように設計されている。

次に、高速道路合流部において合流車が、アクセルとブレーキを頻繁に踏み変えることは基本的にないと思われる。従って、合流車の加速度の符号が頻繁に変化することは、極めて稀だと思われる。これらをシミュレーションに反映させるために、現在の加速度と 1 秒前の加速度の符号が異なる場合、報酬を 0.7 減少させるよう設定した。

最後に、加速度は、基本的に連続的に変化すると思わ

れる。これらをシミュレーションに反映させるために、現在の加速度が 1 秒前の加速度と変化しない場合は報酬を 0.1 追加した。また、現在の加速度が 1 秒前の加速度 $\pm 0.1[m/s^2]$ の範囲の中にある場合は報酬を 0.05 追加し、そうでない場合は報酬を 0.5 減少させるよう設定した。

表-4 強化学習の概要

| 用語 | 概要 |
|--------|--|
| エージェント | 合流車（ダブル連結トラック、隊列走行車） |
| 環境 | 高速道路合流部（加速車線、走行車線、追越車線が各 1 レーン） 走行車線走行車は、普通車又は大車 追越車線走行車は、普通車又は大車 |
| 行動 | 加速度 ($-2.0m/s^2 \sim +2.0m/s^2$) |
| 状態 | エージェントの x 座標・y 座標 直近での流入スペースの有無（直前及び直後の車両の間のスペース） 1 つ先での流入スペースの有無（直前及びその 1 つ前の車両の間のスペース） エージェントの速度 エージェントと合流車線走行車との相対速度 直前・直後の車との距離 |
| 報酬 | 加速度、合流成否、衝突、車間距離、不可侵領域への侵入、スピード制限違反 |

表-5 報酬の設定

| 項目 | 報酬 |
|-----------|---|
| 合流成否 | 合流時に直前・直後との車間距離が、それぞれの車両が 1 秒間に進む距離以上に離れている → +30 エピソード終了までに合流できなかった → -50 |
| 衝突 | 車との衝突 → 100 |
| 車間距離 | 直前の車との車間距離が、合流車が 1 秒間に進む距離より短い → -40 直後の車との車間距離が、合流車が 1 秒間に進む距離より短い → -40 |
| 不可侵領域への侵入 | 既に合流しているにも関わらず、加速車線に戻る → -2 合流可能領域外で車線変更を選択する → -2 |
| スピード制限違反 | エージェントの速度が 28m/s（約 100km/h）以上か 13m/s（約 46km/h）以下 → -5 |
| 加速度 | 現在の加速度が、1 秒前の加速度と変化しない → +0.1 現在の加速度が、1 秒前の加速度 $\pm 0.1m/s^2$ の範囲の中にある → +0.05 現在の加速度が、1 秒前の加速度 $\pm 0.1m/s^2$ の範囲の中にない → -0.5 現在の加速度と、1 秒前の加速度の符号が異なる → -0.7 正規分布を基に報酬を決定する → $\frac{1}{0.4\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{a_t^2}{0.32}\right) - \frac{1}{0.4\sqrt{2\pi}}$ |

b) 学習用環境の設定

学習用環境としてエージェントの車長25mと56mで、それぞれの交通量が、400台/h/lane, 700台/h/lane, 900台/h/lane, 1000台/h/lane, 1300台/h/lane, 1600台/h/laneの環境をそれぞれ70個ずつ作成する。なお、すべての環境で加速車線長は200m, エージェントの初期速度は0[m/s²], エージェントと走行車線走行車との初期相対速度は15km/h, 走行車線の普通車割合は10%, 走行車線の大型車割合は90%, 走行車線の長大車の割合は0%, 追越車線の普通車割合は70%, 追越車線の大型車割合は30%, 追越車線の長大車の割合は0%と設定する。

c) 学習状況の監視

学習する総ステップ数を50,000,000とし、前項で作成した学習用環境を順番に学習させる。図-8に全環境における合流成功・合流失敗・衝突の割合の推移を、図-9に初期の環境におけるエピソード毎の報酬の推移を示す。図-8より、合流成功確率が徐々に上昇する一方で、合流失敗確率及び衝突確率が徐々に減少していることが分かる。また図-9を見ると、エピソードが増えるにつれて報酬の値が上昇し、最終的に+35程度で収束していることが分かる。

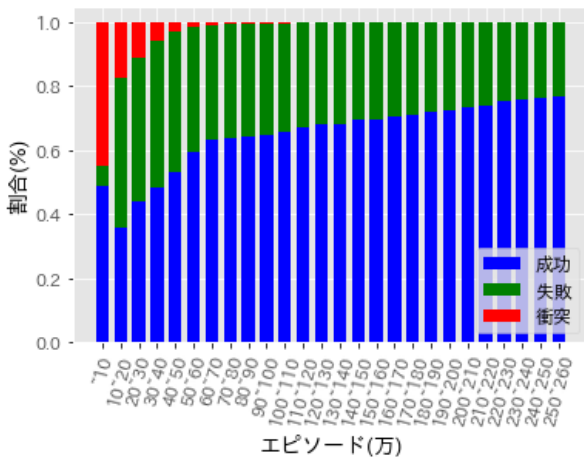


図-8 全環境における合流成功・合流失敗・衝突の割合の推移

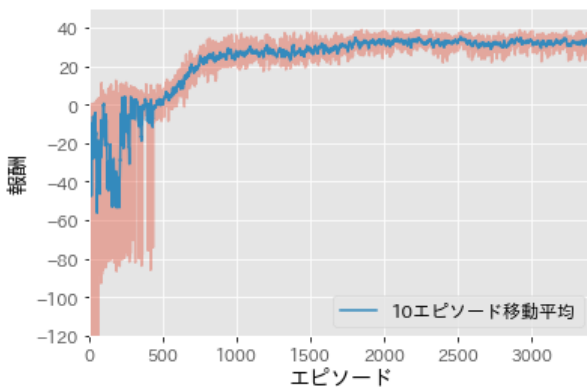


図-9 初期の環境におけるエピソード毎の報酬の推移

4. 高速道路における合流挙動データの収集とシミュレーションモデルの妥当性検証

本章では、高速道路合流部における車両の合流挙動データの収集と解析、また、同データに基づくシミュレーションモデルの妥当性検証について説明する。

(1) 実測データの収集

首都圏中央連絡自動車道(圏央道)入間ICの合流部(加速車線長150m)を撮影場所に選定した。ICの合流部付近にある橋にビデオカメラを固定し、約20分間撮影を行った。撮影日時は、2021年11月24日(水)の午後で、撮影当日は晴天であった。撮影には日本ビクター株式会社製のビデオカメラ Everio (GZ-HM670)を使用した。



図-10 撮影箇所の様子

まず、撮影した映像から1フレームごとの合流車及び本線走行車両の座標を取得し、その座標を基に①合流車の合流位置、②合流車の合流時の前後車両との車間距離を計算した。合流車及び本線走行車両の座標は、ビデオ映像から以下の3段階の行程を通じて取得した。

- (ア) レンズ歪みの補正
 - (イ) 画像上の車両座標の取得
 - (ウ) 画像上の車両座標を道路上の車両座標に変換
- 以下、各工程の概略を示す。

① レンズ歪みの補正

撮影した映像は、レンズ特性により歪みが生じている。従って、画像から車両の座標を取得する前に、動画編集ソフト Adobe Premiere 等を用いて、レンズ歪みの補正を行った。

② 画像上の車両座標の取得

撮影した映像を、1フレームごとの画像に分解し、フレームごとの画像における合流車及び本線走行車両の座標を取得した。

③ 画像上の車両座標を道路上の車両座標に変換

②で取得した合流車、及び、本線走行車両の画像上の座標を、道路上の座標に変換する。変換にあたっては、

重回帰分析を用いた座標変換を行う。画像上の座標 (X,Y) は、道路上の座標 (x,y) をアフィン変換したものと表現できる。従って、(X,Y) を (x,y) で重回帰分析することによって、変換の数式を求めることができる。なお、道路の勾配変化や曲率に関しては、本対象区間においては極めて影響が少ないと思われるため考慮していない。

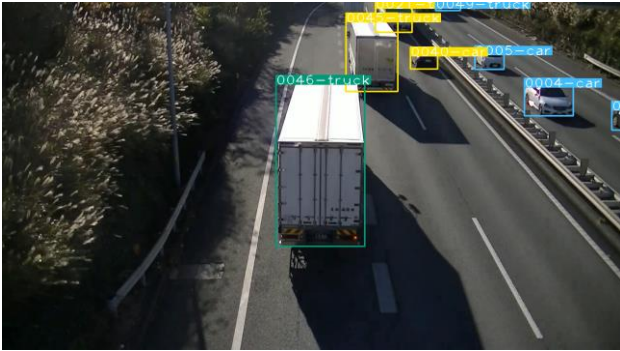


図-11 データ解析の様子

撮影した映像から 22 サンプルの合流例を抜き出して、分析を行った。表-6 に撮影した映像から抽出した 22 サンプルの合流例の車種、合流位置、合流時の先行車との車間距離、合流時の後続車との車間距離についてまとめたものを示す。合流位置が 16.5m 未満の合流車に関しては、画角の関係上正確な合流位置を捕捉できなかったため、合流位置 16.5m 未満と記録した。

表-6 合流データ

| 番号 | 車種 | 合流位置(m) | 先行車との車間距離(m) | 後続車との車間距離(m) |
|----|-----|---------|--------------|--------------|
| 1 | 大型車 | 16.5未満 | 21(※) | 64.23(※) |
| 2 | 大型車 | 39.14 | 11.95 | 39.1(※) |
| 3 | 大型車 | 57.06 | 48.57 | 150以上(※) |
| 4 | 普通車 | 16.5未満 | 150以上 | 33.59(※) |
| 5 | 普通車 | 16.5未満 | 33.59(※) | 41.2(※) |
| 6 | 大型車 | 24.45 | 80.61 | 6.61(※) |
| 7 | 普通車 | 18.58 | 13.16 | 42(※) |
| 8 | 普通車 | 16.5未満 | 45.14 | 150以上(※) |
| 9 | 大型車 | 16.5未満 | 71.48 | 25.76(※) |
| 10 | 普通車 | 16.5未満 | 25.76 | 31.68(※) |
| 11 | 普通車 | 16.5未満 | 31.68 | 150以上(※) |
| 12 | 大型車 | 16.6 | 70.74 | 36.61(※) |
| 13 | 普通車 | 16.5未満 | 36.61 | 77.97(※) |
| 14 | 大型車 | 16.5未満 | 77.97 | 150以上(※) |
| 15 | 普通車 | 37.92 | 13.58 | 150以上(※) |
| 16 | 普通車 | 16.5未満 | 150以上 | 42(※) |
| 17 | 普通車 | 20.22 | 23.28 | 43.28(※) |
| 18 | 普通車 | 16.5未満 | 43.28 | 28.16(※) |
| 19 | 普通車 | 16.5未満 | 28.16 | 31.34(※) |
| 20 | 普通車 | 16.5未満 | 17.51 | 34.19(※) |
| 21 | 普通車 | 40.29 | 19.39 | 48.34(※) |
| 22 | 普通車 | 16.5未満 | 31.76 | 150以上(※) |

本線車線の交通量は、約 1100 台/h/lane であった。また、本線車線走行車の車種別割合は、普通車が約 53.37%、大型車が約 46.33%、バイクが約 0.29% だった。なお、走行車線別に見ると、第一走行車線では普通車が約 53.24%、大型車が約 46.42%、バイクが約 0.34% となっており、追越車線では普通車が約 53.47%、大型車が約 46.27%、バイクが約 0.26% であった。

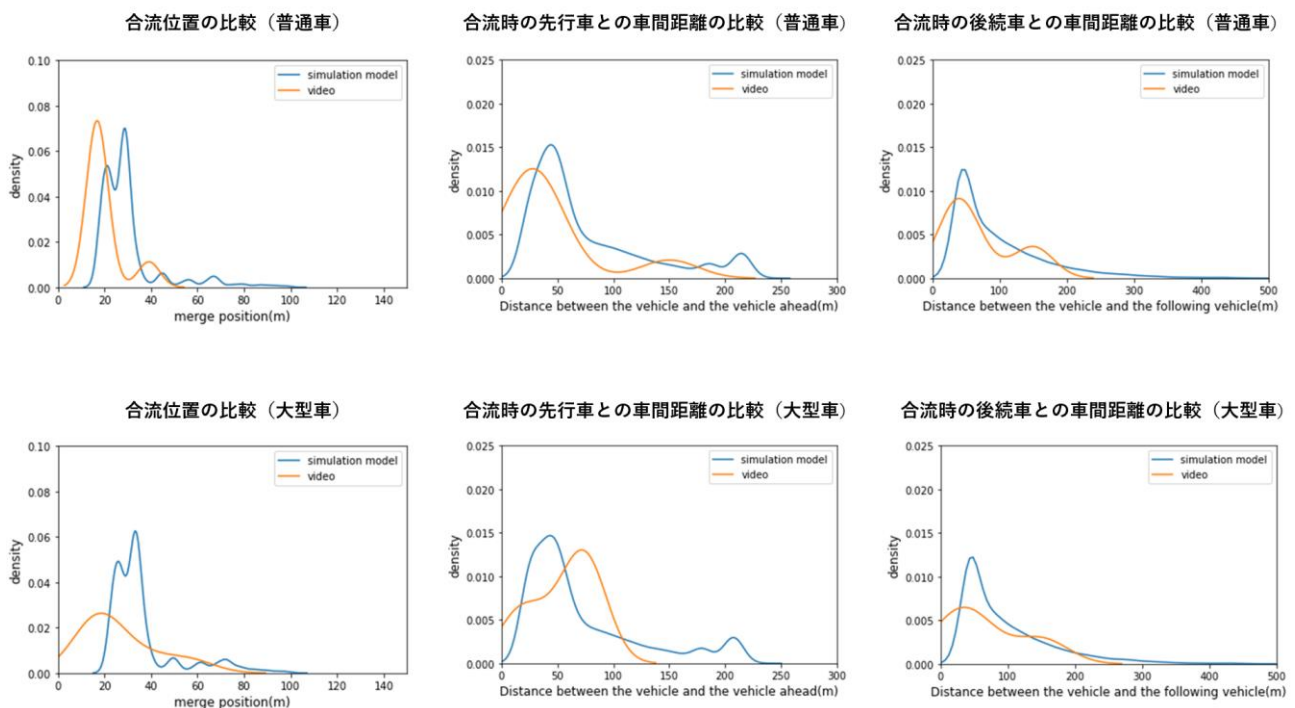


図-12 モデルの妥当性検証

(2) **モデルの妥当性検証** ここでは、映像から抽出した合流車の合流挙動と、シミュレーションモデルの合流車の合流挙動を比較することによって、作成したモデルの妥当性検証を行う。

図-12 に、合流位置、合流時の先行車との車間距離、合流時の後続車との車間距離の確率密度関数を示す。なお、密度関数の推定は、カーネル密度推定の手法を用いて行った。図-12 より、普通車の合流位置、普通車の先行車との車間距離、普通車の合流時の後続車との車間距離、大型車の合流時の後続車との車間距離は、モデルと映像の確率密度関数の形状がかなり近いことが分かる。一方で、大型車の合流位置、大型車の合流時の先行車との車間距離については、モデルと映像との間に違いがみられ、一部課題が残る形となった。本研究では、他の交通量時のデータが収集できなかったため、厳密に映像のデータと合うように調整は行わなかったが、今後の課題とする。

5. 長大車が高速道路の安全性に与える影響

(1) 分析指標

以下の 5 つの分析指標を用いて、長大車が高速道路の安全性に与える影響について分析を行った。

a) 合流成功確率

合流がどの程度の割合で成功したかを表す。ここでの合流成功とは、加速車線を抜けるまでに衝突せずに合流でき、合流後も衝突せずに合流可能地点を抜けることを指す。合流成功確率の定義式を式(7)に示す。

$$\text{合流成功確率(\%)} = \frac{\text{合流に成功した回数}}{\text{試行回数}} \times 100 \quad (7)$$

b) 合流位置割合

加速車線長に対する合流車が合流した位置を表す。合流位置割合の定義式を式(8)に示す。

$$\text{合流位置割合(\%)} = \frac{\text{合流した位置(m)}}{\text{加速車線長(m)}} \times 100 \quad (8)$$

なお、ここでは合流に成功した場合のみを用いて算出している。また、ここでの合流位置とは、合流車の先頭が合流可能領域に入ってから、加速車線を抜けるまでの間に合流した時の合流車（エージェント）の先頭の位置である。そのため、合流位置は最低でも合流車（エージェント）の車長になる。

c) 合流時加速度・合流時相対速度

合流時の加速度と、合流車と第一走行車線を走行する車両の相対速度を表す。合流車が、合流直前に急加速・急減速して合流することは極めて危険である。また、合

流時に合流車と第一車線を走行する車両の速度差が大きい状態で合流することは非常に危険である。以上を踏まえた上で、合流車の合流時の加速度・相対速度を確認し、合流車の合流挙動の安全性について評価する。

d) コンフリクト指標

衝突事故リスクを示す指標として、TTC (Time To Collision) と PICUD (Possibility Index for Collision with Urgent Deceleration) がある。TTC と PICUD の定義式を式(9)と式(10)に示す。

TTC は、現在の相対速度が維持されると仮定して、後続車が先行車に衝突する時間を予測する指標である¹⁸⁾。衝突軽減ブレーキ等において自動ブレーキが作動するタイミングは、大型車で TTC が 1.6 秒以下と定められている。

一方、PICUD は、先行車が仮に急減速を行うとしたときに、後続車が反応遅れ後に急減速して、両者が停止した時の相対的な位置を表す指標である¹⁹⁾。PICUD が 0 以下の場合には衝突を示すため、急減速が発生した場合、両者が衝突する潜在的なリスクが高いことを示す。

$$TTC = \frac{D}{V_1 - V_2} \quad (9)$$

$$PICUD = D + \frac{V_2^2}{-2a} - \left(V_1 \Delta t + \frac{V_1^2}{-2a} \right) \quad (10)$$

D : 車間距離, V_1 : 後続車の速度, V_2 : 先行車の速度
 a : 減速時の加速度, Δt : 反応遅れ時間

なお、ここでは合流に成功した場合のみ TTC と PICUD の算出を行う。また、減速時の加速度は $0.7G$ [$6.9m/s^2$], 反応遅れ時間 Δt を 1 秒とする。

e) 安全合流割合

PICUD の定義式を用いると、先行車との衝突事故リスクと後続車との事故リスクの 2 つの衝突事故リスクを求めることができる。そして、先行車との衝突事故リスクと後続車との衝突事故リスクが共に無い合流こそ真に安全な合流だと言える。本研究では、先行車との PICUD 値と後続車との PICUD の値が、共に 0 以下でない合流を「安全合流割合」と定義した。

(2) 安全性評価

合流車（エージェント）をダブル連結トラック・隊列走行に設定し、ダブル連結トラックや隊列走行の合流が高速道路の安全性に与える影響について分析を行った。

a) 交通量を変化させた場合

交通量を 400~1600 台/h/lane の間で変化させて、分析を行った。図-13 に交通量を変化による合流成功確率の推移を示す。まず、ダブル連結トラックに着目する。ダブル連結トラックは、交通量が 400~1000 台/h/lane の場合は合流成功確率が 89~95% 程度、交通量が 1200~1600 台/h/lane では 73~85% となることが判明した。次に、隊

列走行に着目する。隊列走行の合流成功確率は、ダブル連結トラックと比較して、8~37%程度低くなることが判明した。特に、交通量が1400台/h/laneを超える状況での合流成功確率は50%を切っており、非常に危険である。

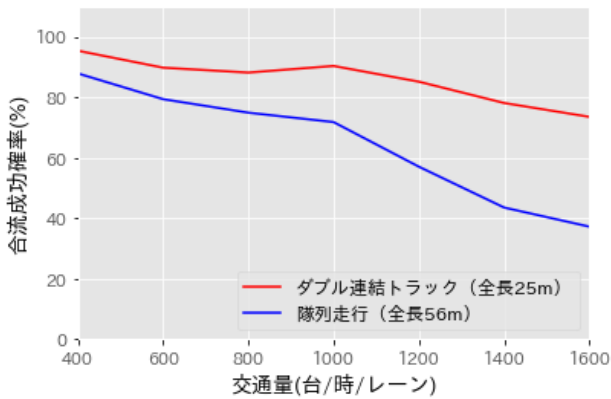


図-13 交通量の変化による合流成功確率の推移

図-14, 図-15 に交通量を変化させた場合の合流位置割合の推移を示す。全体的な傾向として、交通量が増加すると、合流位置割合が上昇することが分かる。また、交通量が1200台/h/lane以上の合流位置割合のばらつきは、非常に大きくなっている。合流位置割合の平均に着目すると、合流車がダブル連結トラックの場合は、すべての交通量において50%を下回っていることが分かる。また、合流車が隊列走行の場合の合流位置割合は、50~60%の間を推移することが分かった。

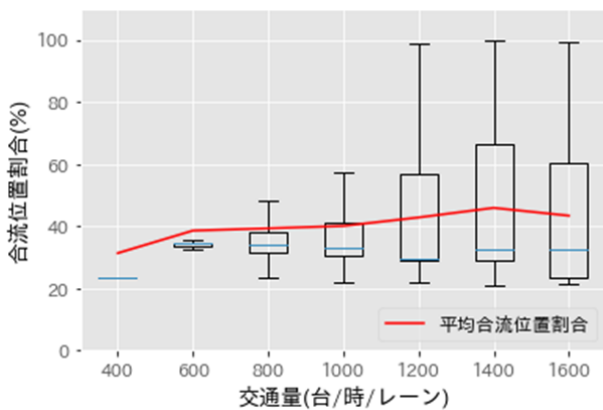


図-14 交通量の変化による合流位置割合の推移 (ダブル連結トラック)

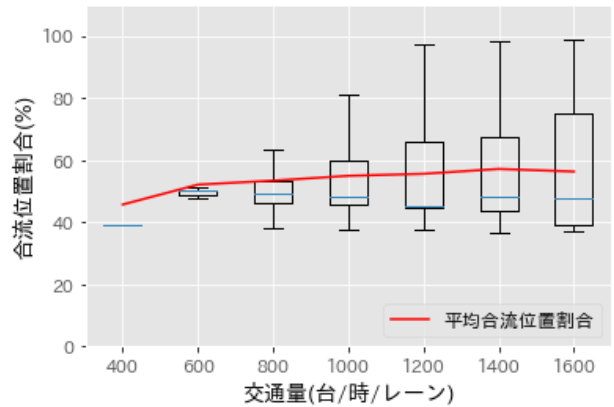


図-15 交通量の変化による合流位置割合の推移 (隊列走行)

図-16 に交通量の変化による合流時平均加速度・合流時平均相対速度の推移を示す。ダブル連結トラック及び隊列走行車の合流時平均加速度に着目すると、両者ともに0~1m/s²の範囲に収まっており、合流時に無理に加速することなく、合流できていることが分かる。一方、合流時平均相対速度は、交通量によって大きく違いがある。交通量400~800台/h/laneにおける合流時平均相対速度が小さくなっているのは、ダブル連結トラック及び隊列走行車の制限速度を80km/hに設定したことが影響したためと思われる。

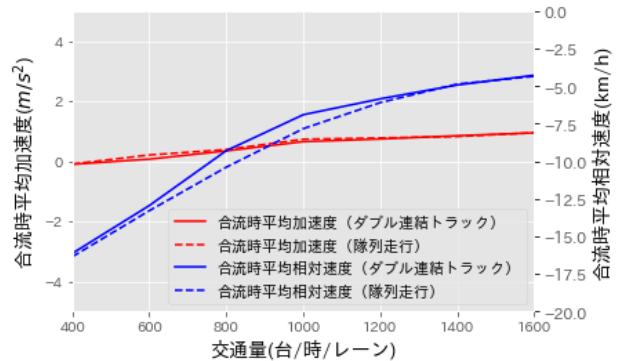


図-16 交通量の変化による合流時平均加速度・合流時平均相対速度の推移

b) 加速車線を変化させた場合

加速車線長を150~400mの間で50mずつ変化させて感度分析を行った。図-17 に加速車線長の変化によるダブル連結トラックの合流成功確率の推移、図-18 に加速車線長の変化による隊列走行の合流成功確率の推移を示す。

まず、ダブル連結トラックに着目する。交通量を600台/h/laneに固定した場合、交通量を1000台/h/laneに固定した場合は、加速車線延長による合流成功確率の上昇幅はほぼ同じであることが判明した。一方、交通量が1400台/h/laneに固定した場合は、交通量を600台/h/lane, 1000台/h/laneに固定した場合に比べ、加速車線延長による合

流成功確率の上昇幅が大きいことが判明した。また、加速車線長が 300m までは、加速車線延伸による合流成功確率の上昇が一定程度みられるものの、加速車線長が 300m を超えると、合流成功確率の上昇はさほどみられないことも判明した。

次に、隊列走行に着目する。隊列走行は、ダブル連結トラックよりも加速車線延長による合流成功確率の上昇幅が大きいことが判明した。特に、交通量が 600 台/h/lane のとき、加速車線長を 150m から 400m に延長すると、合流成功確率は約 42% も上昇することが分かった。また、交通量が多い環境ほど、加速車線延長が合流成功確率の上昇に寄与する度合いも大きくなることが分かった。

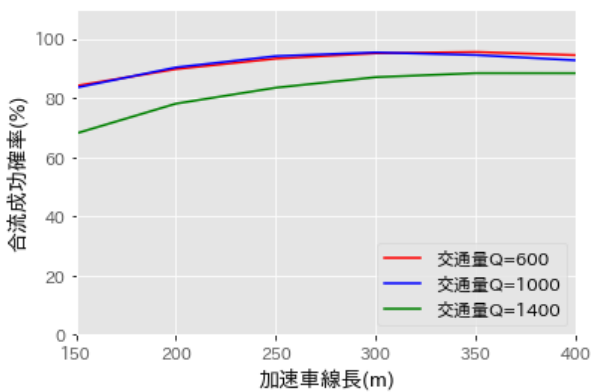


図-17 加速車線長の変化による合流成功確率の推移 (ダブル連結トラック)

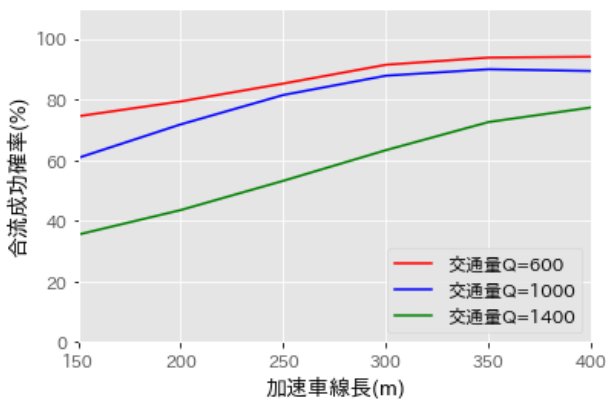


図-18 加速車線長の変化による合流成功確率の推移 (隊列走行)

c) 走行車線の大型車割合を変化させた場合

本線車線に走行する大型車の割合を 10~90%の間で変化させて感度分析を行う。なお、追越車線走行車の大型車の割合は 50%で固定してシミュレーションを行う。図-19 に走行車線の大型車割合を変化させた場合の合流成功確率の推移を示す。図-19 より、走行車線の大型車割合は、合流成功確率に対してほとんど影響を与えないこ

と判明した。

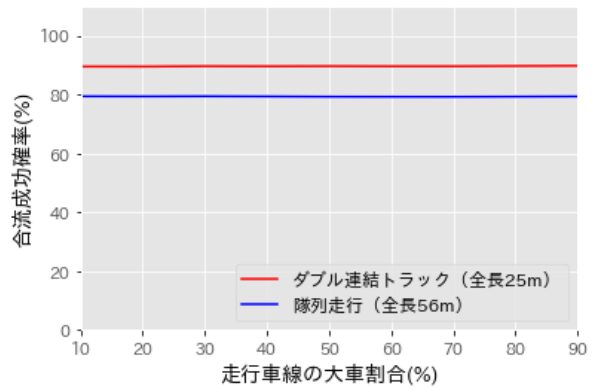


図-19 走行車線の大型車割合の変化による合流成功確率の推移

図-20 に走行車線の大型車割合の変化によるダブル連結トラックの合流位置割合の推移、図-21 に走行車線の大型車割合の変化による隊列走行の合流位置割合の推移を示す。図-20、図-21 より、走行車線の大型車割合は合流位置割合に対して、ほとんど影響を与えないことが分かった。

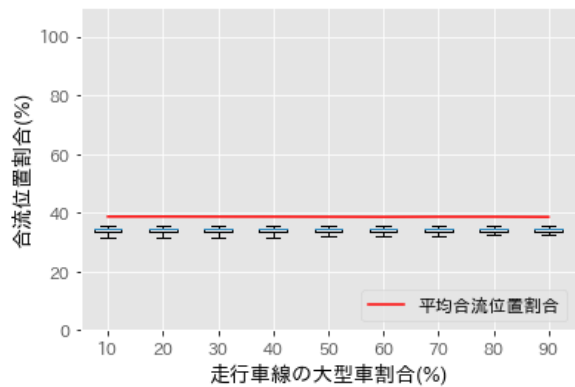


図-20 走行車線の大型車割合の変化による合流位置割合の推移 (ダブル連結トラック)

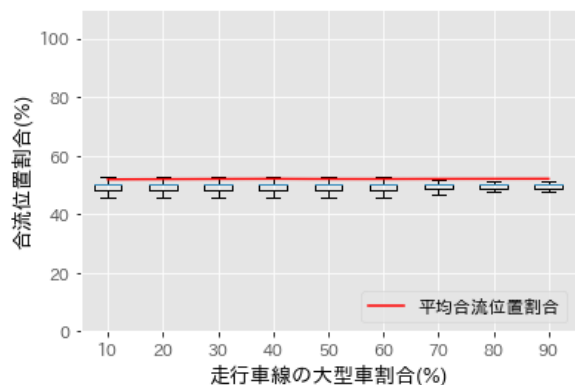


図-21 走行車線の大型車割合の変化による合流位置割合の推移 (隊列走行)

d) コンフリクト指標を用いた分析

次に、コンフリクト指標を用いて、長大車の合流が高速道路の安全性に与える影響について分析を行う。図-22と図-23に、それぞれ交通量400台/h/laneの時の合流時の先行車・後続車とダブル連結トラックとの車間距離と相対速度の分布を示す。また、図-24と図-25に、それぞれ交通量400台/h/laneの時の合流時の先行車・後続車と隊列走行との車間距離と相対速度の分布を示す。

図-22~25より、合流車（エージェント）と本線車線走行車の相対速度は-30～-15km/hの間で分布していることが分かる。相対速度が-15km/h以上にならないのは、合流車（エージェント）の制限速度を80km/hに設定しているためである。相対速度が低いため、先行車との衝突リスクはあまりなく、逆に後続車との事故リスクは大きいことが分かる。

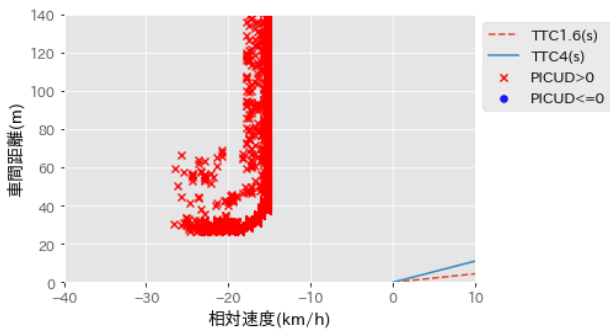


図-22 交通量400台/h/laneにおける先行車との車間距離と相対速度の分布（ダブル連結トラック）

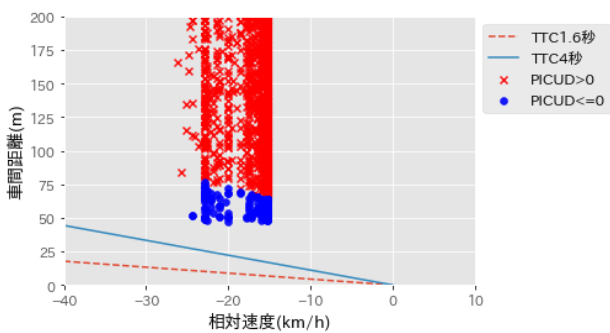


図-23 交通量400台/h/laneにおける後続車との車間距離と相対速度の分布（ダブル連結トラック）

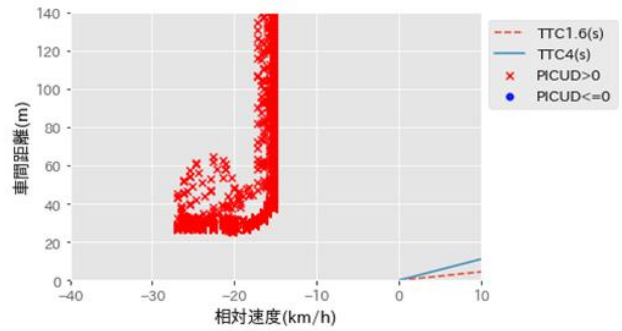


図-24 交通量400台/h/laneにおける先行車との車間距離と相対速度の分布（隊列走行）

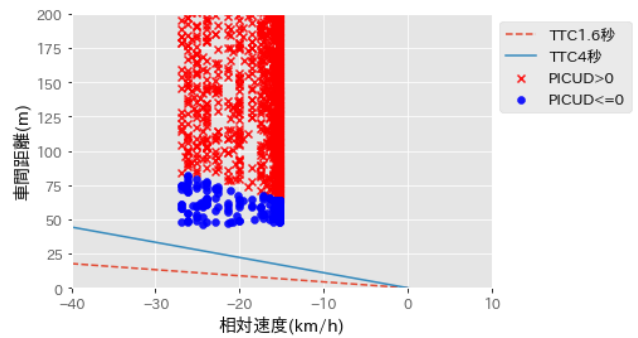


図-25 交通量400台/h/laneにおける後続車との車間距離と相対速度の分布（隊列走行）

5. 長大車導入時のシナリオ分析

(1) 目的

本章における分析の目的は、走行車線に長大車が走行する環境での合流シミュレーションを行い、長大車の導入が高速道路の安全性に与える影響について、定量的に評価をすることである。従来の研究では、本線車線に普通車や大型車が走行しており、そこに加速車線からダブル連結トラックや隊列走行車のような長大車が合流するという状況を想定しているものが一般的であった。しかし、本線車線に長大車が走行しており、そこに普通車や大型車が加速車線から合流するケースの研究は行われていない。そこで、本研究では、走行車線に長大車が走行している環境での合流シミュレーションを行い、長大車の導入が高速道路の安全性に与える影響を分析した。

長大車導入当初では、本線車線に長大車が走行している環境での合流に不慣れなドライバーが多数存在すると思われる。一方、長大車導入から一定期間経過後では、本線車線に長大車が走行している環境下の合流に慣れていくドライバーの割合が、導入当初と比較して増加すると思われる。そのため、長大車導入当初と導入期間から一定期間経過後では、長大車が高速道路の安全性に与える影響も異なると予想される。このため、長大車導入前、導入当初、及び、導入から一定期間経過後を想定したシミュレーションを行うことで、短期・長期の視点から長

大車が高速道路の安全性に与える影響について分析を行った。

(2) シナリオ

以下の5つのシナリオを設定した。(図-26)

a) シナリオ① (Base)

シナリオ①では、長大車導入前の普通車・大型車を運転する一般ドライバーの合流挙動をシミュレーションした。具体的には、本線車線に長大車が存在しない学習環境で合流のトレーニングを行い強化学習モデルを作成し、作成した強化学習モデルを用いて、本線車線に長大車が存在しない環境での合流シミュレーションを行った。

b) シナリオ②

シナリオ②では、ダブル連結トラック導入当初に普通車・大型車を運転するドライバーの合流挙動をシミュレーションした。ダブル連結トラック導入当初では、本線車線にダブル連結トラックが存在する環境での合流に不慣れたドライバーが多数存在すると思われる。このシナリオでは、まず、本線車線にダブル連結トラックが存在しない学習環境で合流のトレーニングを行い、強化学習モデルを作成した。そして、作成した強化学習モデルを用いて、本線車線にダブル連結トラックが存在する環境での合流シミュレーションを行った。

c) シナリオ③

シナリオ③では、隊列走行車導入当初に普通車・大型車を運転するドライバーの合流挙動をシミュレーションした。隊列走行車導入当初では、本線車線に隊列走行車が存在する環境での合流に不慣れたドライバーが多数存

在すると思われる。このシナリオでは、まず、本線車線に隊列走行車が存在しない学習環境で合流のトレーニングを行い、強化学習モデルを作成した。そして、作成した強化学習モデルを用いて、本線車線に隊列走行車が存在する環境での合流シミュレーションを行った。

a) シナリオ④

シナリオ④では、ダブル連結トラック導入から一定期間経過後に普通車・大型車を運転するドライバーの合流挙動をシミュレーションした。ダブル連結トラック導入から一定期間経過後では、本線車線に隊列走行車が存在する環境での合流に慣れていないドライバーが、ダブル連結トラック導入当初よりも多く存在すると思われる。このシナリオでは、まず、本線車線にダブル連結トラックが存在する学習環境で合流のトレーニングを行い、強化学習モデルを作成した。そして、作成した強化学習モデルを用いて、本線車線にダブル連結トラックが存在する環境での合流シミュレーションを行った。

b) シナリオ⑤

シナリオ⑤では、隊列走行車導入から一定期間経過後に普通車・大型車を運転するドライバーの合流挙動をシミュレーションした。隊列走行車導入から一定期間経過後では、本線車線に隊列走行車が存在する環境での合流に慣れていないドライバーが、隊列走行車導入当初よりも多く存在すると思われる。このシナリオでは、まず、本線車線に隊列走行車が存在する学習環境で合流のトレーニングを行い、強化学習モデルを作成した。そして、作成した強化学習モデルを用いて、本線車線に隊列走行車が存在する環境での合流シミュレーションを行った。

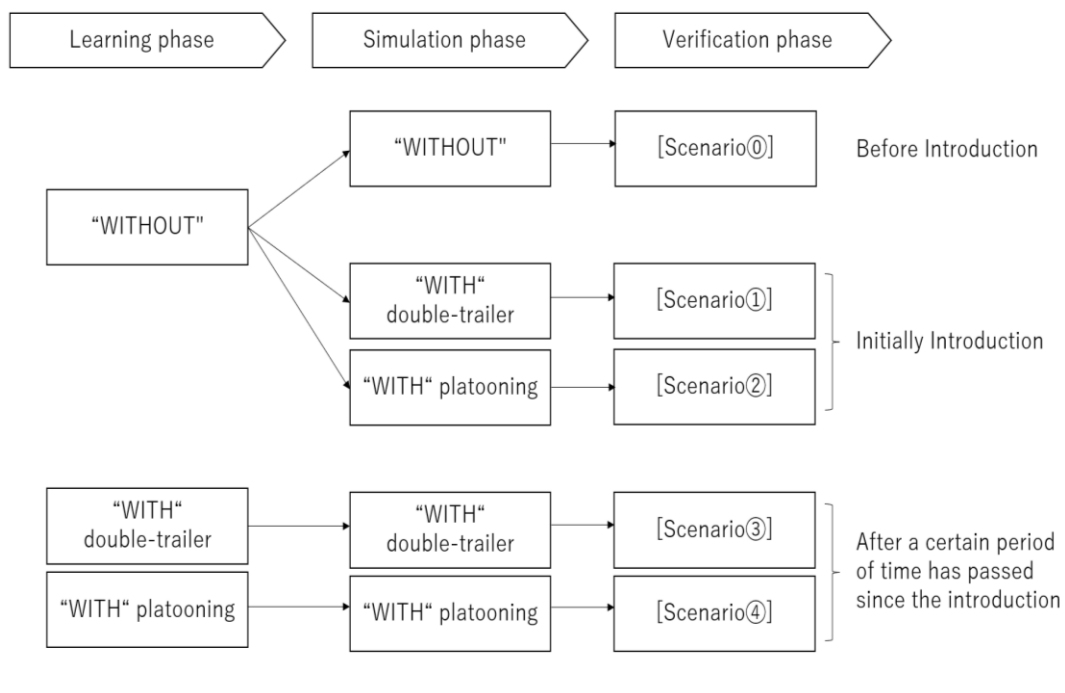


図-26 シナリオ設定

(3) ダブル連結トラック導入による影響の分析

シナリオ①, シナリオ②, シナリオ③の結果を比較した結果を以下に示す。

a) 交通量を変化させた場合の分析

交通量を 400~1600 台/h/lane の間で変化させた場合の合流成功確率を図-27 に示す。ダブル連結トラック導入後と導入前の合流成功確率を比較すると、導入当初は導入前よりも 0~6%程度、導入から一定期間経過後は導入前よりも 0~5%程度合流成功確率が低下している。また、ダブル連結トラック導入当初と導入から一定期間経過後を比較すると、交通量が 1200 台/h/lane までは、導入当初の方が合流成功確率が 1~3% 程度高く、交通量が 1400 台/h/lane 以上は導入から一定期間経過後の方が合流成功確率が 2~3%程度高くなること分かる。

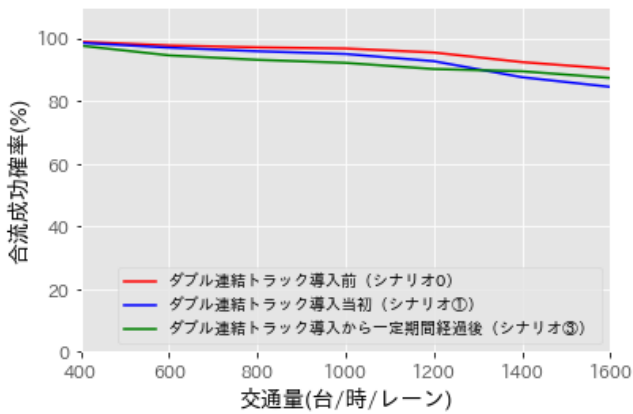


図-27 交通量の変化による合流成功確率の推移

b) 加速車線長を変化させた場合の分析

加速車線を 150~400m の間で 50m ずつ変化させた場合 (交通量は基準値の 600 台/h/lane で固定) の合流成功確率を図-28 に示す。加速車線が増加に伴い、合流成功確率は上昇していることが確認できる。

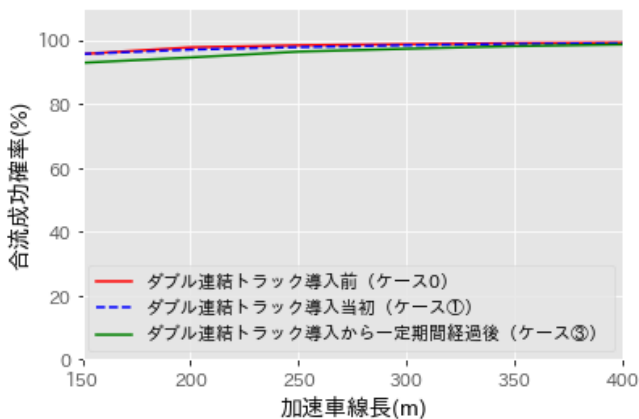


図-28 加速車線の変化による合流成功確率の推移

c) 安全合流割合を用いた分析

図-29 に交通量の変化による安全合流割合の推移を示す。まず、ダブル連結トラック導入前と導入当初を比較する。ダブル連結トラック導入当初は、導入前と比較して合流成功確率は 0~6% 程度低下するものの、安全合流割合はほぼ変化しないことが確認できた。

次に、ダブル連結トラック導入当初と導入から一定期間経過後を比較する。両者の安全合流割合を比較すると、導入から一定期間経過後の方が、約 0~3% 高くなっている。これは、本線車線にダブル連結トラックが走行している環境での合流に慣れているドライバーは、慣れていないドライバーと比較して、合流時の適切な車間距離や速度を経験的に学習しているためだと思われる。そして、本線車線にダブル連結トラックが走行している環境での合流に慣れているドライバーは、合流の際に危険な合流になると予想した場合、合流を諦める判断をすることが多く、その結果、合流成功確率が導入前と比較して 0~2% 程度低くなったと推測される。さらに、交通量が多い 1000~1600 台/h/lane の場合での合流は、交通量が少ない場合の合流と比較して、相対的に難易度が高い。一般的に、難易度が高い合流になればなるほど、高い技術や経験が必要となる。交通量が増加すればするほど、ケース①とケース③の合流安全割合の差が大きくなるのは、そのようなことが原因だと思われる。

最後に、ダブル連結トラック導入前と導入から一定期間経過後を比較する。両者を比較すると、ダブル連結トラック導入から一定期間経過後の方が、安全合流確率が 0~3% 程度高い一方で、合流成功確率は 0~5% 程度低くなる。本線車線にダブル連結トラックが走行している環境では、ダブル連結トラックが走行していない環境と比較して、相対的に合流の危険性が高い。ダブル連結トラックが本線車線に走行している環境での合流に慣れているドライバーは、様々な合流を通じて、合流時に衝突リスクを回避する傾向が強まったと推測される。その結果、ダブル連結トラック導入から一定期間経過後の方が、導入前と比較して合流成功確率が低く、その代わりに安全合流割合が高くなったと推測される。

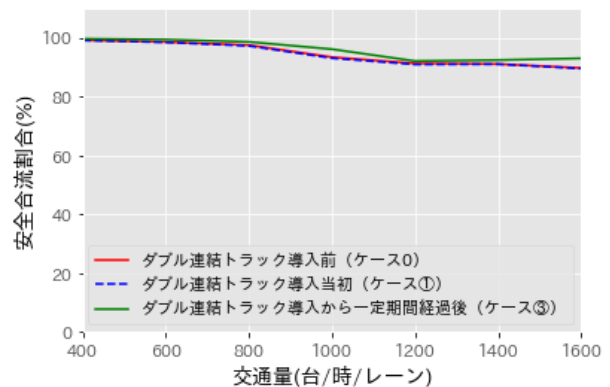


図-29 交通量による安全合流割合の推移

(4) 隊列走行導入による影響の分析

シナリオ①, シナリオ②, シナリオ④を比較することによって, 隊列走行の導入が高速道路の安全性に与える影響を短期・長期の視点から分析を行う。

a) 交通量を変化させた場合の分析

交通量を 400~1600 台/h/lane の間で変化させて, 合流成功率・合流位置割合・合流時平均速度・合流時平均相対速度の推移を分析する。図-30 に交通量の変化による合流成功率の推移を示す。隊列走行導入後と導入前の合流成功率を比較すると, 導入当初は導入前よりも 2~11% 程度, 導入から一定期間経過後は導入前よりも 4~12% 程度合流成功率が低下することが確認できる。また, ダブル連結トラック導入当初と導入から一定期間経過後を比較すると, 交通量が 1400 台/h/lane までは, 導入当初の方が合流成功率が約 1~4% 程度高く, 交通量が 1400 台/h/lane 以上は両者の合流成功率はほぼ同じとなることが分かった。

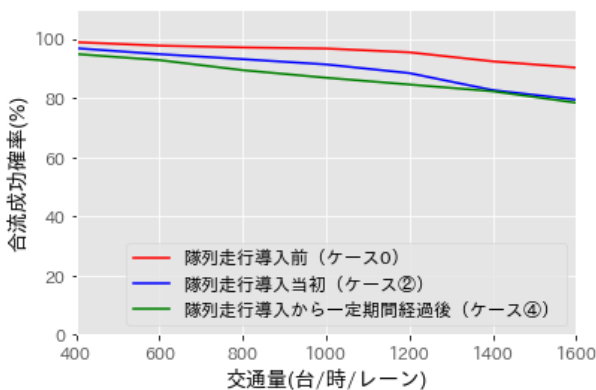


図-30 交通量の変化による合流成功率の推移

b) 加速車線長を変化させた場合の分析

加速車線を 150~400m の間で 50m ずつ変化させた場合 (交通量は基準値の 600 台/h/lane で固定) の合流成功率を図-31 に示す。図-31 から, 加速車線が増加すればするほど合流成功率は上昇することが分かる。

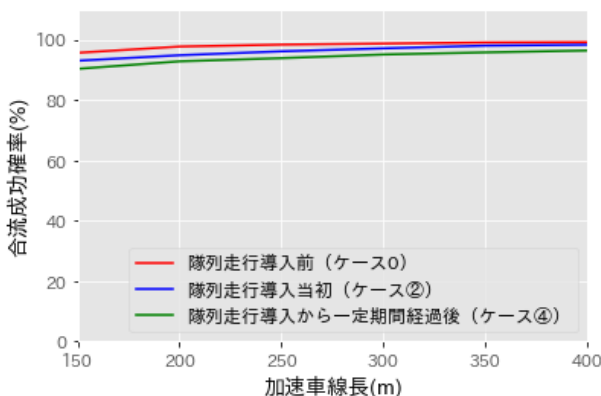


図-31 加速車線長の変化による合流成功率の推移

c) 安全合流割合を用いた分析

図-32 に, 交通量の変化による安全合流割合の推移を示す。まず, 隊列走行導入前と導入当初を比較する。隊列走行導入当初は, 導入前と比較して合流成功率は下がるものの, 安全合流割合はほとんど変化しないことが判明した。

次に, 隊列走行導入当初と導入から一定期間経過後の安全合流割合を比較する。両者を比較すると, 導入から一定期間経過後の方が, 約 0~6% 程度安全合流割合が高くなっている。これは, 本線車線に隊列走行が走行している環境での合流に慣れているドライバーは, 慣れていないドライバーと比較して, 合流時の適切な車間距離や速度を経験的に学習しているためだと思われる。そして, 本線車線に隊列走行が走行している環境での合流に慣れているドライバーは, 合流の際に危険な合流になると予想した場合, 合流を諦める判断をすることが多く, その結果, 合流成功率が導入前と比較して 0~5% 程度低くなったと推測される。さらに, 交通量が多い 1000~1600 台/h/lane の場合での合流は, 交通量が少ない場合の合流と比較して, 相対的に難易度が高い。一般的に, 難易度が高い合流になればなるほど, 高い技術や経験が必要となる。交通量が増加すればするほど, ケース②とケース④の合流安全割合の差が大きくなるのは, そのようなことが原因だと思われる。

最後に, 隊列走行導入前と導入から一定期間経過後を比較する。両者を比較すると, 隊列走行導入から一定期間経過後の方が, 安全合流率が 0~6% 程度高い一方で, 合流成功率は 4~12% 程度低下する。本線車線に隊列走行が走行している環境では, 隊列走行が走行していない環境と比較して, 相対的に合流の危険性が高い。隊列走行が本線車線に走行している環境での合流に慣れているドライバーは, 様々な合流を通じて, 合流時に衝突リスクを回避する傾向が強まったと推測される。その結果, 隊列走行導入から一定期間経過後の方が, 導入前と比較して合流成功率が低く, その代わりに安全合流割合が高くなったと推測される。

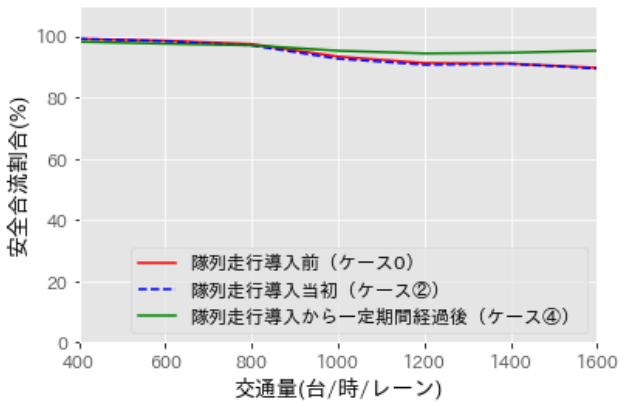


図-32 交通量の変化による安全合流割合の変化

6. 結論

(1) まとめ

- ・強化学習を用いて、ダブル連結トラックと隊列走行を考慮した合流シミュレーションモデルを構築した。
- ・作成したモデルと現実の車両の合流挙動を比較することによって、モデルの妥当性検証を行った。
- ・①本線車線に普通車・大型車が走行しており、そこに加速車線から長大車が合流する状況、②本線車線に長大車が走行しており、そこに加速車線から大型車が合流する状況の2種類の状況を想定した合流シミュレーションを行い、長大車導入が高速道路合流箇所の安全性に与える影響について明らかにした。
- ・分析の結果得られた知見として、特に重要であると思われるものは以下である。①長大車が加速車線から合流する状況でのシミュレーションを行った結果、交通量を400~1600台/h/laneの間で変化させた場合、ダブル連結トラックの合流成功確率は73~95%、隊列走行の合流成功確率は37~87%となることが分かった。また、加速車線を150mから400mに延長した場合（交通量は600台/h/laneに固定）、ダブル連結トラックの合流成功確率は84%から94%に、隊列走行の合流成功確率は74%から94%にまで上昇することが分かった。②長大車が走行車線を走行する環境でのシミュレーションを行った結果、長大導入当初は、導入前と比較して安全合流割合はほとんど変化しない一方で、合流成功確率は0~11%程度低下することが分かった。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は0~12%程度低下する一方で、安全合流割合は0~6%程度上昇することが分かった。③以上を踏まえ、長大車導入にあたっては、ソフト面では、長大車が走行する環境での合流に慣れさせるためのトレーニング、交通量が多い環境での走行を避けるよう促す仕組み作りが、ハード面では、加速車線延長等のインフラ整備が重要である。

(2) 今後の課題

本研究では地理上・法律上の制約のため、実際の長大車の撮影をすることが出来なかった。また、現時点において、長大車は渋滞している区間や時間帯を避けて走行するため、より混雑している条件下での観測は不可能である。今後想定されるダブル連結トラックの台数増加に伴い、継続的に観測し、シミュレーションモデルに反映することが重要である。

本研究では、ダブル連結トラックや隊列走行車等の長大車の導入が、高速道路の安全性に与える影響について定量的な指標をもって明らかにした。将来の課題として、長大車が本格導入されるにあたって、より安全かつ円滑に一般車や長大車を合流させるための仕組みの評価にモデルを活用することが考えられる。現在、長大車を安全かつ円滑に合流させるための仕組みづくりとして、「ランプメータリングの設置」や、「ITS・車車間通信技術を活用した合流支援システム」の活用が検討されている。これらの技術の活用がどの程度安全かつ円滑な合流に寄与するのか、定量的な指標をもって検証していく必要がある。

謝辞・付記：トラフィックカウンターデータを提供頂いたNEXCO中日本に謝意を表する次第である。また、本研究は国土交通省・新道路技術会議プロジェクト「ダブル連結トラックおよび貨物車隊列走行を考慮した道路インフラに関する技術研究開発」の成果の一部であることを付記しておく。

参考文献

- 1) 総務省：平成30年度版情報通信白書，pp.2，2018。
- 2) 公益社団法人鉄道貨物協会：平成30年度本部委員会資料，<https://rfa.or.jp/wp/pdf/guide/activity/30report.pdf>，閲覧日：2022年2月26日。
- 3) 公益財団法人全日本トラック協会：日本のトラック輸送産業現状と課題，https://jta.or.jp/wp-content/themes/jta_theme/pdf/yusosangyo2021.pdf，閲覧日：2022年2月26日。
- 4) 国土交通省：最近の物流政策について，<https://www.mlit.go.jp/common/001388194.pdf>，閲覧日：2022年2月26日。
- 5) 国土交通省道路局：第2回自動運転に対応した道路空間に関する検討会配布資料，https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-council/road_space/pdf02/02.pdf，閲覧日：2022年2月26日。
- 6) 割田博，上條俊介，田中淳，後藤秀典：首都高速道路における事故発生状況と安全対策効果の検証，第29回土木計画学研究発表会・講演集，2004。
- 7) 喜多秀行，原田裕司：流入タイミング調整行動を考慮した流入挙動モデルの開発，土木計画学研究・論文集，No.12，1995。
- 8) 山科卓摩，瀬谷創，喜多秀行：複数ギャップを考慮

- した高速道路における流入・避走挙動に関するゲーム理論的分析, 土木学会論文集・論文集, 2020.
- 9) 鈴木弘司, 松村 悠貴 :都市高速道路合流部の錯綜事象における衝突危険性評価に関する研究, 土木学会論文集, vol.71, No.5, 2015.
- 10) 飯田克弘, 隅本雄一 : 高速道路合流部における本線車線車両の原則開始地点分布に関する考察, 土木計画学研究・論文集, 2007.
- 11) 相馬大, 兵藤哲朗 : ダブル連結トラックの運行特性とドライバーのストレスに関する研究, 交通工学論文集, 2020.
- 12) 林世彬, 須田義大, 横溝英明, 小宮浩資, 平山幸司 : 高速バスの自動運転・隊列走行の社会実装に向けた考察, 生産研究, 2019.
- 13) 平田輝満, 讚良将良, 影山拓哉 : 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, 土木計画学研究・論文集, 2018.
- 14) Scholte, W.J., Zegelaar, P.W.A. and Nijmeijer, H.: A control strategy for merging a single vehicle into a platoon at highway on-ramps. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 136, p.103511, 2022.
- 15) 牧野秀樹, 渋谷長史, 城川真一 : これからの強化学習, 森北出版株式会社, 2016, pp.2-5.
- 16) Schulman, J., Wolski, F., Dhariwal, P., Radford, A. and Klimov, O.: Proximal policy optimization algorithms. *arXiv preprint arXiv:1707.06347*, 2017.
- 17) 塩見康博 : 車群交通流モデルによる渋滞現象解析, 博士論文, 京都大学, 2008.
- 18) Hayward, J.C. : Near-miss determination through use of a scale of danger. *Highway Record*, 24-34, 1972.
- 19) 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”, 土木計画学研究講演集, VOL.25, 200s2

SAFETY EVALUATION OF HIGHWAY MERGING WITH DOUBLE TRAILER TRUCKS AND TRUCK PLATOONING USING REINFORCEMENT LEARNING

Ryuma TOTOMI, Shogo NISHIZAKI, Tetsuro HYODO and Takanori SAKAI

In recent years, the logistics industry in Japan has been facing a serious problem of labor shortage due to the decrease in the working population caused by the declining birthrate and aging population. In order to maintain and develop a stable logistics network in the future, it is necessary to improve labor productivity through the introduction of new technologies. The introduction of various new technologies in the logistics industry is currently under consideration, and one of the most notable is novel high capacity mobility such as double trailer truck and truck platooning. However, it entails vehicles/sets of vehicles which are extremely long and are considered to have a high accident risk. Especially, highway merging points is bottleneck for introducing such high-capacity mobility due to a high potential for accidents. In this research, a simulation model was developed using reinforcement learning to quantitatively and comprehensively analyze the impact of introducing double trailer trucks and truck platooning on the safety of highway merging areas.