

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

長大車両を考慮した強化学習による高速道路の合流挙動モデルの開発

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2021-06-25 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 西崎, 省伍 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/2148

修士学位論文

長大車両を考慮した強化学習による
高速道路の合流挙動モデルの開発

2020 年度
(2021 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海運ロジスティクス専攻

西崎 省伍

修士学位論文

長大車両を考慮した強化学習による
高速道路の合流挙動モデルの開発

2020 年度
(2021 年 3 月)

東京海洋大学大学院
海洋科学技術研究科
海運ロジスティクス専攻

西崎 省伍

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 本論文の構成	4
第2章 強化学習について	5
2.1 本章の概要	5
2.2 強化学習の概要	5
2.3 使用アルゴリズム	5
第3章 シミュレーション環境の設定	7
3.1 本章の概要	7
3.2 ダブル連結トラックと隊列走行の現状把握	7
3.3 道路ネットワークの設定	8
3.3.1 使用データの概要	9
3.3.2 交通量の設定	9
3.3.3 加速車線長の設定	14
3.3.4 車両構成の設定	15
3.3.5 走行車の速度設定	18
3.4 避走挙動のアルゴリズム	19
第4章 強化学習を用いたシミュレーションモデルの構築	20
4.1 本章の概要	20
4.2 強化学習環境	20
4.3 学習用環境の作成	21
4.4 学習状況の監視	22
第5章 シミュレーションモデルの妥当性検証	24
5.1 本章の概要	24
5.2 シミュレーション結果の分析指標	24
5.2.1 合流成功確率	24
5.2.2 合流位置割合	24
5.2.3 合流時加速度と合流時相対速度	24
5.2.4 コンフリクト指標	24
5.3 ダブル連結トラック	25
5.3.1 交通量を変化させた場合のシミュレーション	25
5.3.2 加速車線長を変化させた場合のシミュレーション	27
5.3.3 走行車線の大車割合を変化させた場合のシミュレーション	28
5.3.4 コンフリクト指標を用いた分析	30

5.4 隊列走行	32
5.4.1 交通量を変化させた場合のシミュレーション	32
5.4.2 加速車線長を変化させた場合のシミュレーション	33
5.4.3 走行車線の大車割合を変化させた場合のシミュレーション	35
5.4.4 コンフリクト指標を用いた分析	36
第6章 結論	38
6.1 各章のまとめ	38
6.2 今後の課題	38
謝辞	38
参考文献	39

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

近年、日本社会では少子高齢化やそれに伴う労働人口の減少が大きな課題となっている。その中でも物流業界はその影響が大きい。ドライバーの高齢化が進む一方で、再配達や宅配スピードの向上が求められている。(図 1-1)

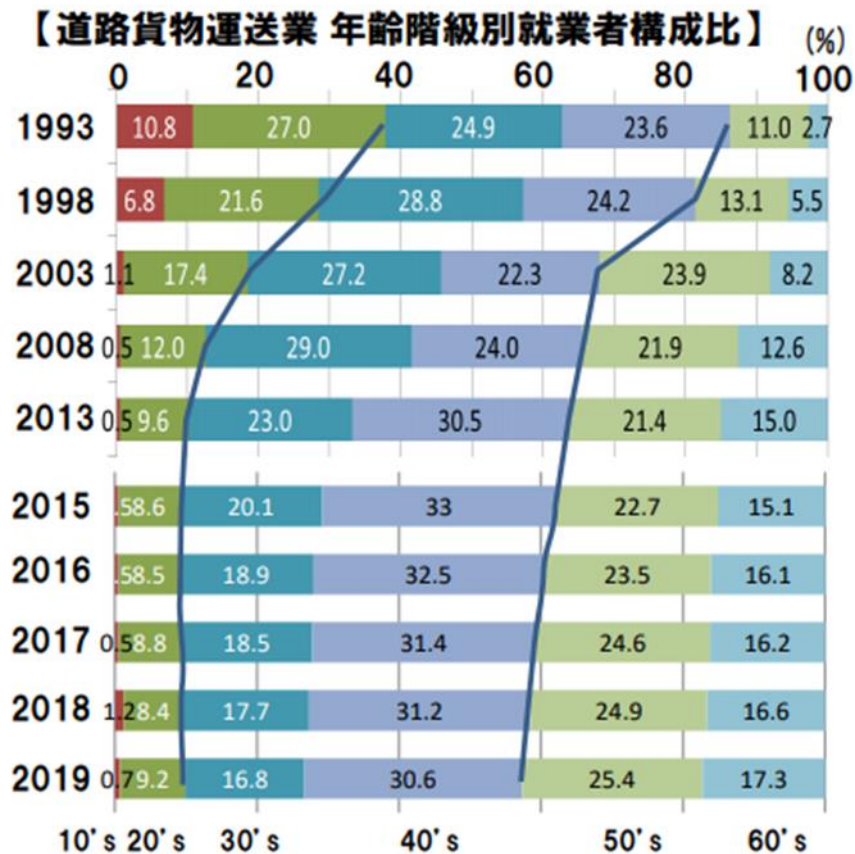


図 1-1 年齢階級別就業者構成比

(公益社団法人全日本トラック協会 2020 年度日本のトラック輸送現状と課題⁽¹⁾)

そこで大型トラック 2 台分の積載量を持つ「ダブル連結トラック」の導入や、5G などの発展に伴い有人運転のトラックを先頭に自動制御された複数台のトラックが追従して走る「隊列走行」の導入実験が進められている。(図 1-2, 図 1-3)

■福山通運株式会社



■ヤマト運輸株式会社



■日本梱包運輸倉庫株式会社



■西濃運輸株式会社



図 1-2 ダブル連結トラック

(出典：ダブル連結トラック実験協議会，ダブル連結トラック実験 最終報告書（案）⁽²⁾)



図 1-3 ソフトバンクによる 5G を活用した隊列走行

(出典：ソフトバンクプレスリリース⁽³⁾)

これらの長大車両の導入は，トラック輸送の省人化を促進する，として非常に期待されてい

る。しかしその一方で、これらの車両は車長が長い分、合流に危険が伴うのではないかと考えられる。もともと高速道路の分合流部では事故が多発しており、事前に分合流部における合流シミュレーションを行い、どこにどのようなリスクがあるのか、などの状況を把握する必要がある。(図 1-4)

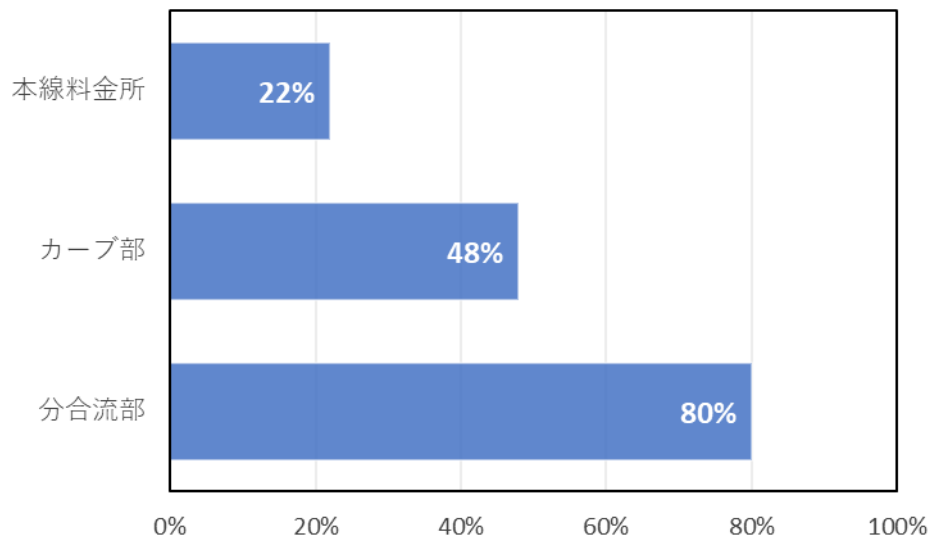


図 1-4 高速道路の事故多発区間の道路構造

(出典：割田博・上篠俊介・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⁽⁴⁾)

高速道路の合流部におけるシミュレーションは喜多らの流入タイミング調整行動を考慮した流入挙動モデル⁽⁶⁾があるが、このモデルはパラメータを人為的に決めなくてはならず、そのパラメータを決め方に課題を抱えている。そこで今回は強化学習を高速道路合流部のシミュレーションに適用する。

なお本研究では、Google Colaboratory で Python による開発を行う。シミュレーション環境は、OpenAI が提供する強化学習用のツールキットである OpenAI Gym を用いて構築する。また、強化学習アルゴリズムの実装セットである Stable Baselines を用いて強化学習を行う。

1.2 本論文の構成

本論文は以下 6 章で構成される。

第 1 章 序論

序論として本研究の背景と目的を述べた上で、本論文の構成の説明を行う。

第 2 章 強化学習について

強化学習の概要と本研究で使用する強化学習アルゴリズムの説明を行う。

第 3 章 シミュレーション環境の設定

道路ネットワークや運転挙動などのシミュレーション環境の設定の説明を行う。

第 4 章 強化学習を用いたシミュレーションモデルの構築

強化学習を用いてシミュレーションモデルを構築する。

第 5 章 シミュレーションモデルの妥当性検証

シミュレーションモデルの妥当性検証を行う。

第 6 章 結論

結論として本研究をまとめ、今後の課題を述べる。

第2章 強化学習について

2.1 本章の概要

強化学習の概要と本研究で使用する強化学習アルゴリズムについて説明を行う。

2.2 強化学習の概要

強化学習とはシステム自身が試行錯誤しながら、最適なシステム制御を実現する機械学習手法の1つである。

表 2-1 に強化学習で用いられる用語を示す。

表 2-1 強化学習で用いられる用語

用語	説明
エージェント	環境に対して行動を起こす主体
環境	エージェントがいる世界
行動	エージェントがある状態において採ることができる行動
状態	エージェントの行動に応じて更新される環境が保持する状態
報酬	エージェントの行動に対する環境からの評価
方策	エージェントが行動を決定する原理

まず、エージェントがある環境に置かれ、その環境に対して行動を起こす。そして、環境がエージェントに、行動により更新された状態と報酬をフィードバックされ、その環境からのフィードバックを元に、方策を修正する。この一連の行動の結果として変化した環境の中で、再びエージェントが環境に対して行動を起こす。以上のサイクルを繰り返しながら、強化学習は進んでいく。

2.3 使用アルゴリズム

近年は、前節で説明した従来の強化学習にディープラーニングを組み合わせた学習手法である深層強化学習が主流となっている。現在、深層強化学習は様々なアルゴリズムが考案されており、Stable Baselines で多くのアルゴリズムがサポートされている。表 2-2 に Stable Baselines でサポートされている強化学習アルゴリズムを示す。

表 2- 2 Stable Baselines でサポートされる強化学習アルゴリズム

学習 アルゴリズム名	Box	Discrete	Multi Discrete	Multi Binary	Multi Processing	Recurrent
A2C	○	○	○	○	○	○
ACER	×	○	×	×	○	○
ACKTR	○	○	×	×	○	○
DDPG	○	×	×	×	○	×
DQN	×	○	×	×	×	×
GAIL	○	○	×	×	○	×
HER	○	○	×	○	×	×
PPO1	○	○	○	○	○	×
PPO2	○	○	○	○	○	○
SAC	○	×	×	×	×	×
TD3	○	×	×	×	×	×
TRPO	○	○	○	○	○	×

本研究では、Proximal Policy Optimization(PPO)を用いる。PPO は実装と調整が非常に簡単でありながら、最先端のアプローチと同等以上のパフォーマンスを発揮する強化学習アルゴリズムである。使いやすさと優れたパフォーマンスのバランスが取れているため、OpenAI のデフォルトの強化学習となっている。Stable Baselines には PPO1 と PPO2 の 2 種類あり、PPO2 は GPU にも対応した最新版になっている。今回は PPO2 を用いる。

第3章 シミュレーション環境の設定

3.1 本章の概要

道路ネットワークや避走挙動などのシミュレーション環境の設定の説明を行う。常時観測データ（トラフィックカウンターデータ）を分析し、実際の交通で起こりうる状況を再現する。

3.2 ダブル連結トラックと隊列走行の現状把握

2016年10月から新東名高速道路を中心とするフィールドでダブル連結トラックの実験が行われた。表3-1に実験に参加した各会社の運行区間を示し、その運行区間を地図上に表したものを図3-1に示す。

表 3-1 各会社のダブル連結トラック運行区間
(出典：国土交通省 ダブル連結トラックについて⁽⁶⁾)

会社名	運行区間
福山通運	裾野IC: 裾野営業所〔静岡県裾野市〕 ～一宮IC・小牧IC: 名古屋支店〔愛知県北名古屋市〕(262km)
ヤマト運輸	厚木GWから中部圏央厚木IC: 厚木GWB〔神奈川県愛甲郡愛川町〕 ～茨木IC: 関西GWB〔大阪府茨木市〕(447km)
日本梱包	入間IC: 狭山営業所〔埼玉県狭山市〕 ～鈴鹿IC: 鈴鹿センター営業所〔三重県鈴鹿市〕(417km)

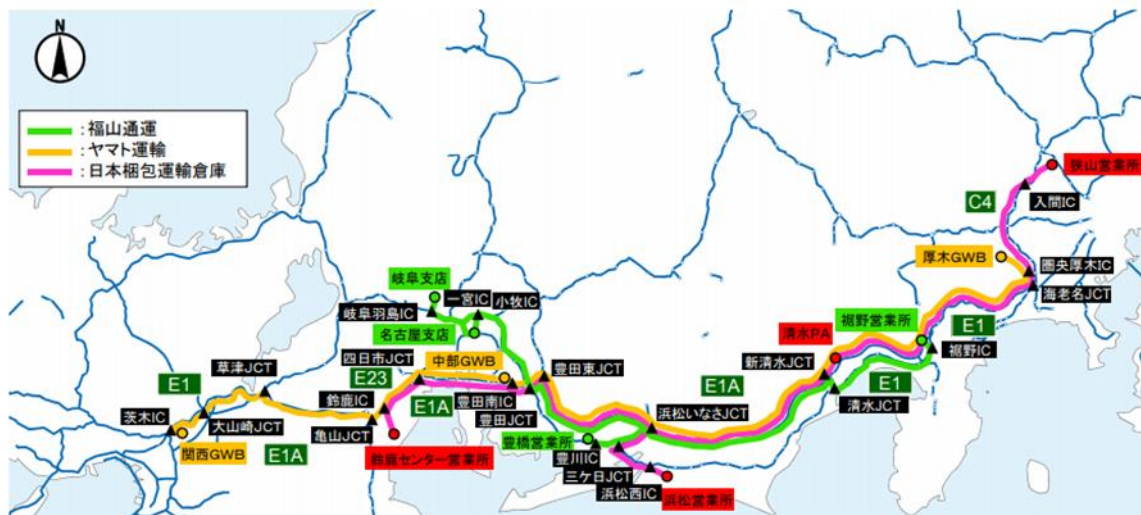


図 3-1 地図上での各会社のダブル連結トラック運行区間
(出典：国土交通省 ダブル連結トラックについて⁽⁶⁾)

この実験を経て、2019年1月29日には国土交通省が新東名高速道路の海老名JCTから豊田東JCT区間内において、特殊車両通行許可基準の車両長を25mまで緩和された。

そして、2019年8月8日に今まで新東名区間でのみ通行可能だったダブル連結トラックは、

して車長 25m のダブル連結トラックと車長 12m の特大車 3 台で車間距離 10m での隊列走行（全長 56m）の場合を考える。

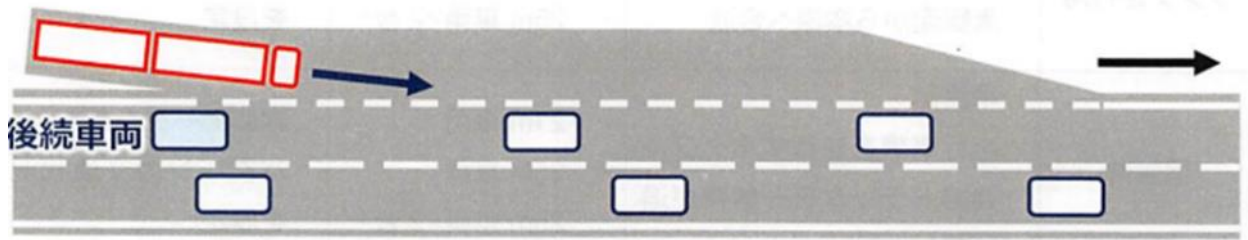


図 3-4 合流部（ダブル連結トラック：流入車線から合流）

（出典：ダブル連結トラック実験 最終報告書（案）⁽⁹⁾）

3.3.1 使用データの概要

令和元年 12 月の東名高速道路・新東名高速道路のトラフィックカウンターデータを使用する。トラフィックカウンターデータとは、道路管制・施設制御や利用車に渋滞情報を提供するために収集しているデータである。

3.3.2 交通量の設定

表 3-2 に全データを用いた交通量の統計値を示す。第一走行車線と追越車線の交通量は同じ程度であるように思える。

表 3-2 交通量の統計値

	交通量(台/h/lane)			
	東名高速道路		新東名高速道路	
	第一走行車線	追越車線	第一走行車線	追越車線
第一四分位	176	379	226	190
中央値	364	529	360	336
第三四分位	576	685	591	524
最高値	1964	1878	1203	1713
平均値	427	531	407	380

しかし、全データを集計するだけでは、曜日や時間帯などの影響や関係を見出すことは難しい。そこで、前節であげた実験で実際に出発点となった「裾野 IC 下り」、「浜松いなさ JCT 上り」の 2 地点での 1 時間ごとの交通量の推移を曜日別に示す。まず、図 3-5 から図 3-11 に裾野 IC 下りの曜日ごとの時間別交通量を示す。全体的に走行車線の方が追越車線よりも交通量が多い傾向にある。深夜や早朝は交通量が少なくなっており、走行車線では 200~600 台/h/lane 程度に追越車線では 100~300 台/h/lane 程度になっていることがわかる。また、昼から夕方にかけては交通量が多くなっており、走行車線では 400~800 台/h/lane 程度に追越車線では 250~700 台/h/lane 程度になっていることがわかる。

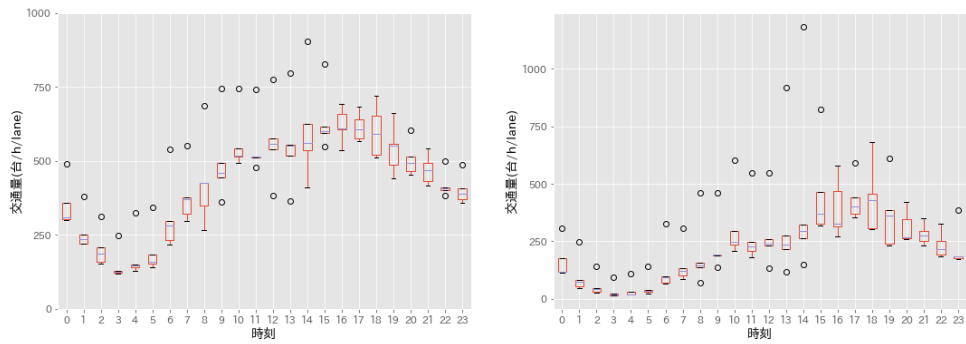


図 3-5 日曜日の時間別交通量（裾野 IC 下り，左：走行車線，右：追越車線）

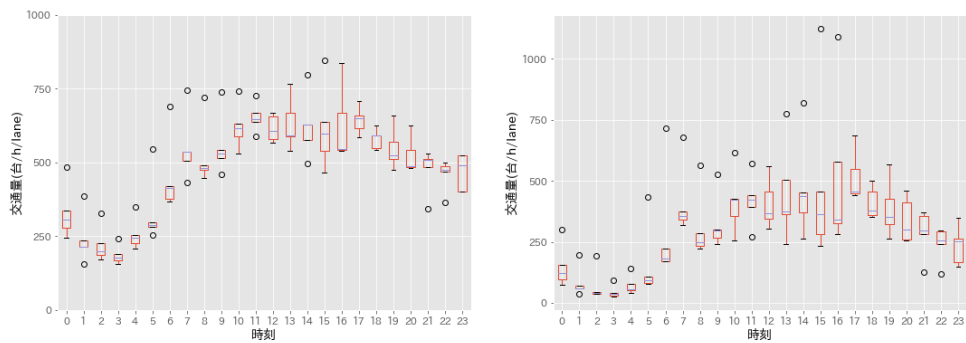


図 3-6 月曜日の時間別交通量（裾野 IC 下り，左：走行車線，右：追越車線）

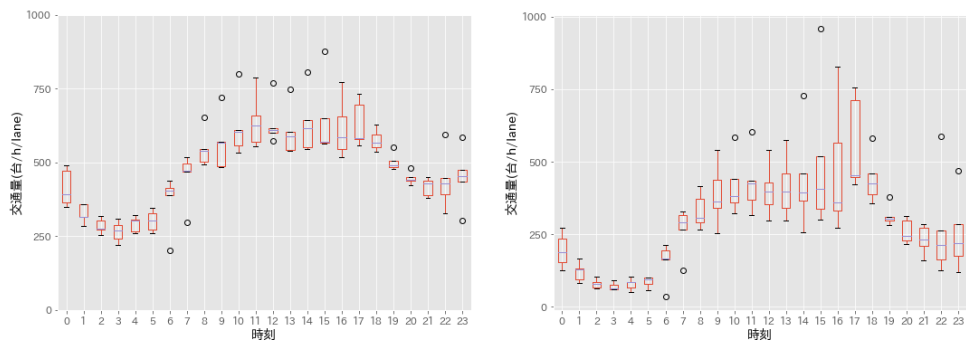


図 3-7 火曜日の時間別交通量（裾野 IC 下り，左：走行車線，右：追越車線）

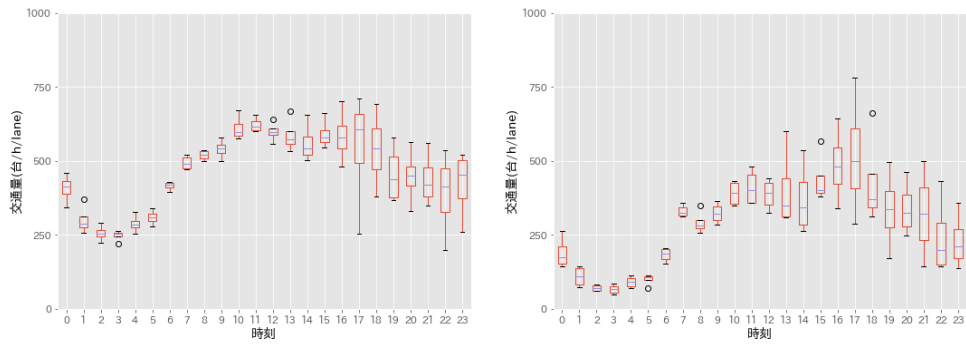


図 3- 8 水曜日の時間別交通量（裾野 IC 下り，左：走行車線，右：追越車線）

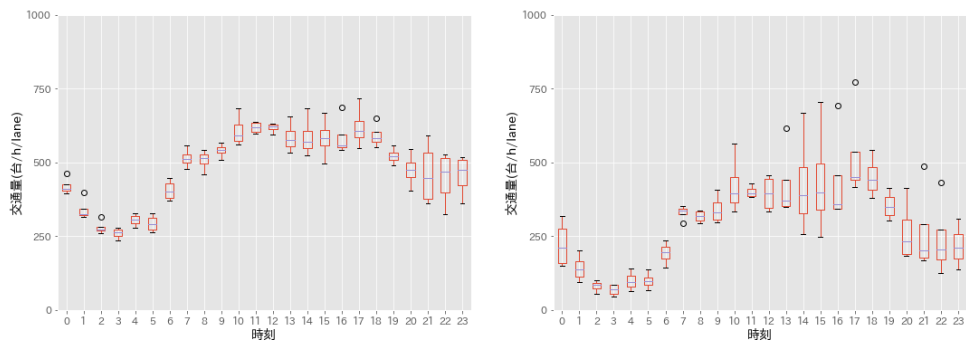


図 3- 9 木曜日の時間別交通量（裾野 IC 下り，左：走行車線，右：追越車線）

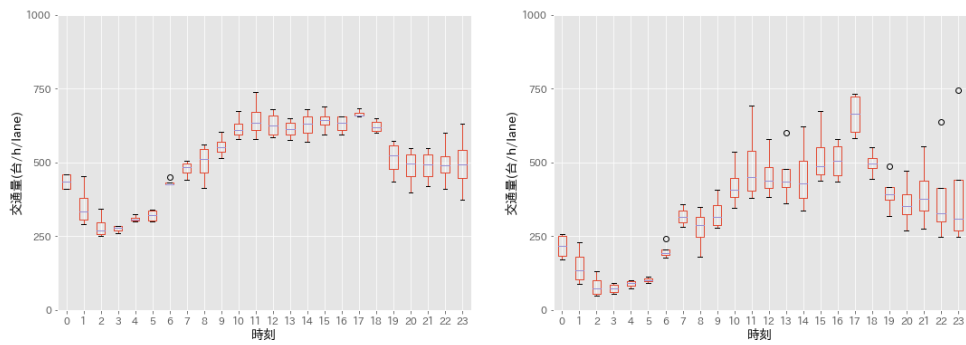


図 3- 10 金曜日の時間別交通量（裾野 IC 下り，左：走行車線，右：追越車線）

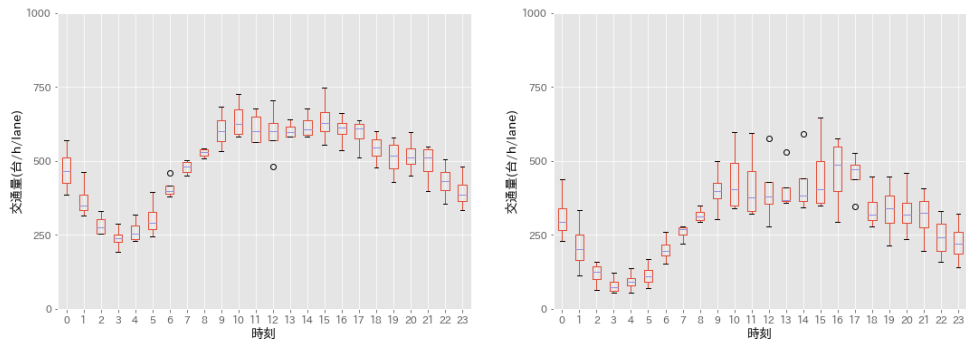


図 3- 11 土曜日の時間別交通量（裾野 IC 下り，左：走行車線，右：追越車線）

次に図 3- 12 から図 3- 18 に浜松いなさ JCT 上りの曜日ごとの時間別交通量を示す．先程と同様に，基本的に走行車線の方が追越車線よりも交通量が多い．深夜や早朝は，走行車線では 400～800 台/h/lane 程度に追越車線では 200～600 台/h/lane 程度になっていることがわかる．また，昼から夕方にかけては交通量が多くなっており，走行車線では 600～800 台/h/lane 程度に追越車線では 400～700 台/h/lane 程度になっていることがわかる．

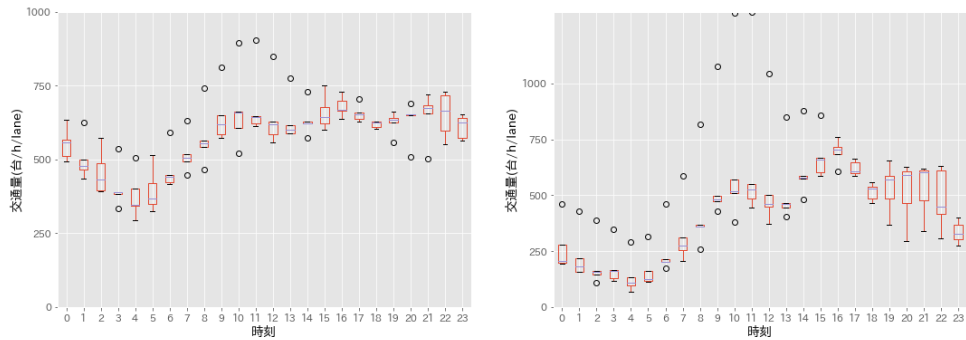


図 3- 12 日曜日の時間別交通量（浜松いなさ JCT 上り，左：走行車線，右：追越車線）

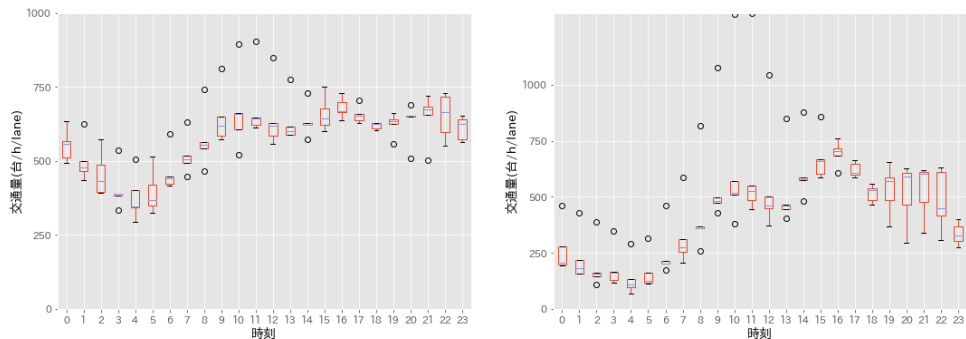


図 3- 13 月曜日の時間別交通量（浜松いなさ JCT 上り，左：走行車線，右：追越車線）

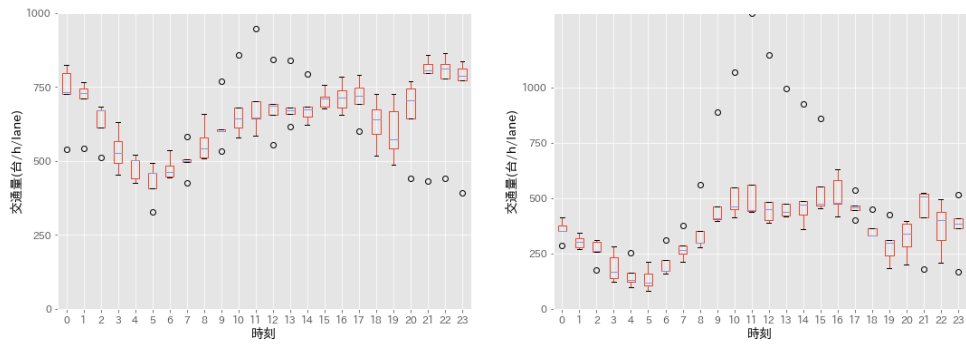


図 3-14 火曜日の時間別交通量（浜松いなさ JCT 上り，左：走行車線，右：追越車線）

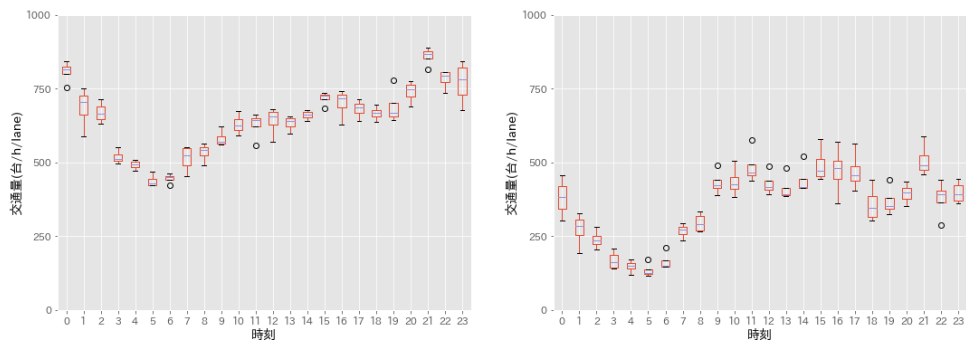


図 3-15 水曜日の時間別交通量（浜松いなさ JCT 上り，左：走行車線，右：追越車線）

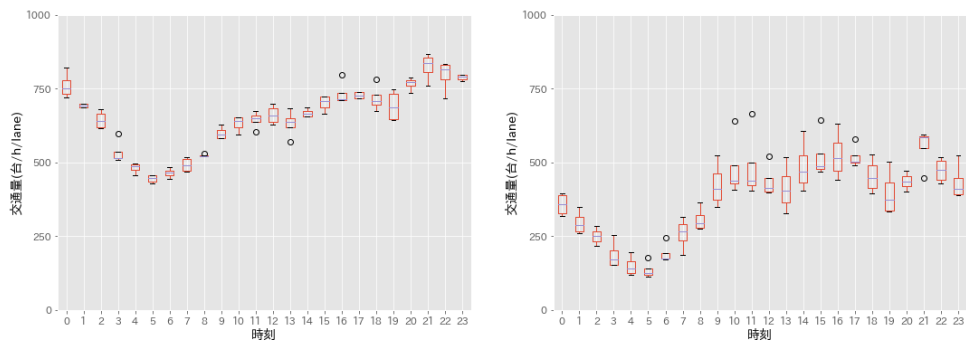


図 3-16 木曜日の時間別交通量（浜松いなさ JCT 上り，左：走行車線，右：追越車線）

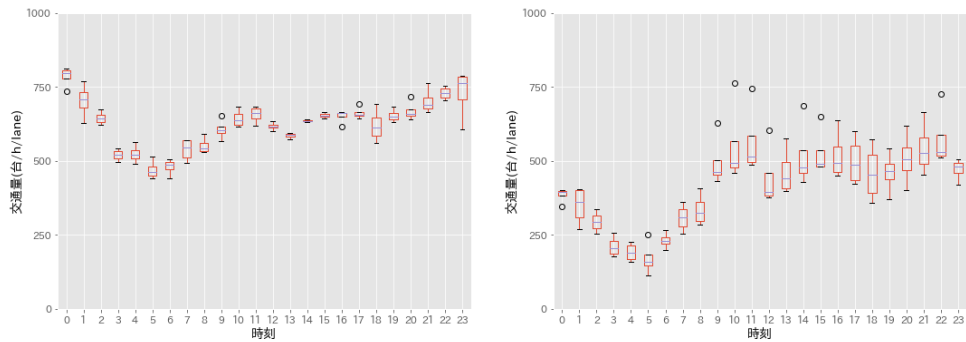


図 3-17 金曜日の時間別交通量（浜松いなさ JCT 上り，左：走行車線，右：追越車線）

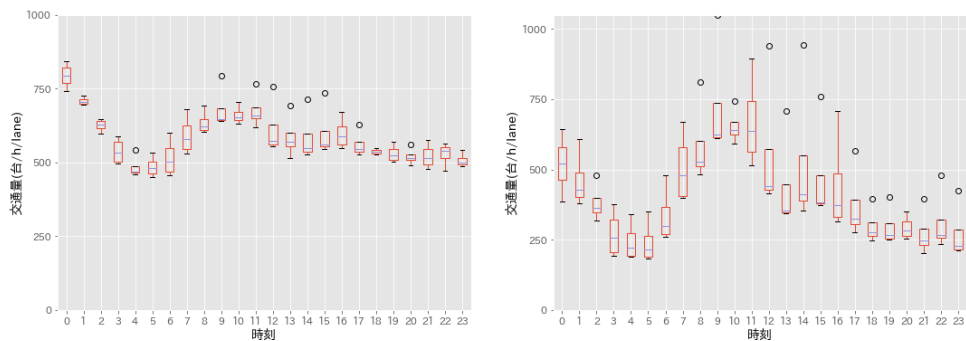


図 3-18 土曜日の時間別交通量（浜松いなさ JCT 上り，左：走行車線，右：追越車線）

以上のことを踏まえて、本研究では、交通量を 400~1600 台/h/lane の間で 200 ずつ変化させ、分析を行うことにする。400 台/h/lane 以下の交通量ではほとんど車が走行していないので、合流が容易であると考えたためである。また、1200 台/h/lane 以上の交通量になることは稀であり、そこまで交通量の多い場合を考える必要がないと考えたため、本研究では交通量の上限を 1600 台/h/lane とする。なお、今回は全データの統計で走行車線と追越車線の交通量に大きな差がなかったため、走行車線の交通量と追越車線の交通量を同じとする。交通量のベンチマークは 600 台/h/lane を採用する。

3.3.3 加速車線長の設定

前節で紹介したダブル連結トラックの走行対象路線の中で各路線におけるトラック運送業者の利用数が多い IC、条件が厳しい・緩い IC を抽出し、その IC における加速車線長を表 3-3 を示す。

表 3-3 加速車線長

路線	IC	上り	下り
東北自動車道	国見IC	180m	180m
圏央道	入間IC	160m	165m
東名高速道路	裾野IC	235m	230m
新東名高速道路	新富士IC	465m	465m
名神高速道路	茨木IC	200m	200m
新名神高速道路	甲賀土山IC	260m	270m
山陽自動車道	志和IC	200m	200m
九州自動車道	福岡IC	375m	240m

加速車線長が長いとその分合流する時間に猶予ができ、合流が成功する確率は上がると考えられる。しかし、表 3-3 から分かるように同じ加速車線長といっても、長さはそれぞれ全然違う。そこで、これらのことを考慮に入れるために本研究では加速車線長を 100~400m の間で 50 ずつ変化させ、分析を行うことにする。なお、加速車線長のベンチマークは 200m を採用する。

3.3.4 車両構成の設定

3.3.2 と同様に実験で実際に出発点となった「裾野 IC 下り」、「長泉沼津 IC 下り」の 2 地点での 1 時間ごとの大車率の推移を曜日別に示す。なお、大車は中型車、大型車、特大車の総称とする。まず、図 3-19 から図 3-25 に裾野 IC 下りの曜日ごとの大車率の 1 ヶ月平均を示す。深夜から早朝にかけて走行車線、追越車線ともに大車率が急激に高くなっていることがわかる。深夜から早朝にかけては走行車線が 50~90%程度、追越車線が 30~60%程度となっている。

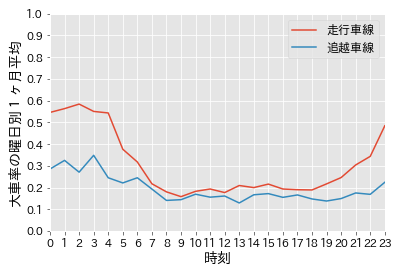


図 3-19 日曜日の大車率の 1 ヶ月平均
(裾野 IC 下り)

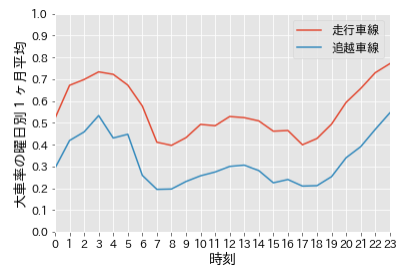


図 3-20 月曜日の大車率の 1 ヶ月平均
(裾野 IC 下り)

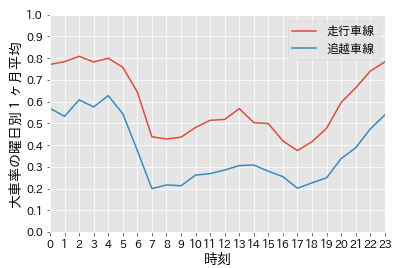


図 3-21 火曜日の大車率の 1 ヶ月平均
(裾野 IC 下り)

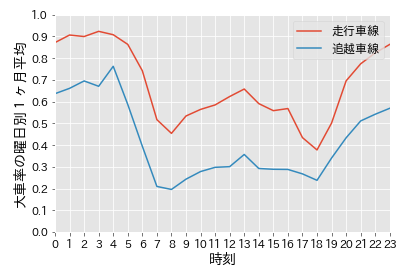


図 3-22 水曜日の大車率の 1 ヶ月平均
(裾野 IC 下り)

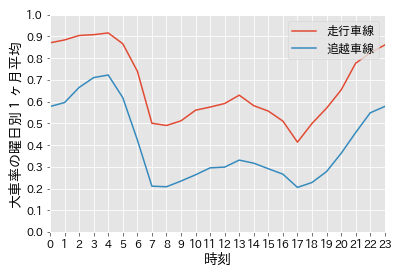


図 3-23 木曜日の大車率の 1 ヶ月平均
(裾野 IC 下り)

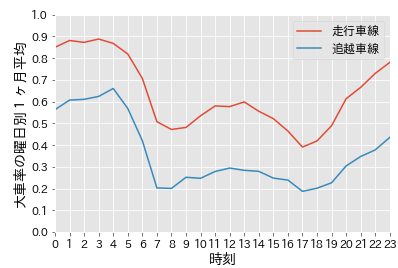


図 3-24 金曜日の大車率の 1 ヶ月平均
(裾野 IC 下り)

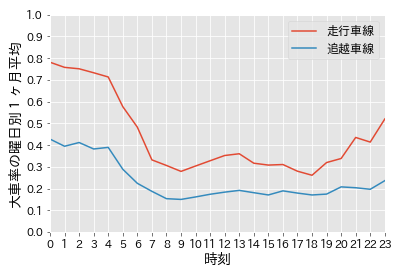


図 3-25 土曜日の大車率の 1 ヶ月平均
(裾野 IC 下り)

次に図 3-26 から図 3-32 に浜松いなさ JCT 上りの曜日ごとの大車率の 1 ヶ月平均を示す。先程と同様に、深夜から早朝にかけて走行車線、追越車線ともに大車率が急激に高くなっていることがわかる。深夜から早朝にかけては走行車線が 30~40%程度、追越車線が 40~60%程度となっている。

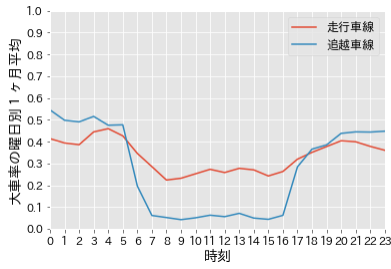


図 3-26 日曜日の大車率の 1 ヶ月平均
(浜松いなさ JCT 上り)

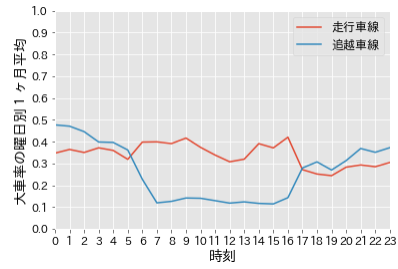


図 3-27 月曜日の大車率の 1 ヶ月平均
(浜松いなさ JCT 上り)

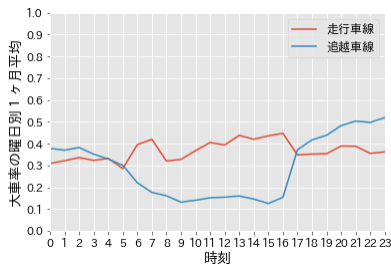


図 3-28 火曜日の大車率の 1 ヶ月平均
(浜松いなさ JCT 上り)

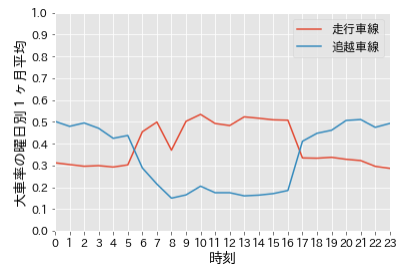


図 3-29 水曜日の大車率の 1 ヶ月平均
(浜松いなさ JCT 上り)

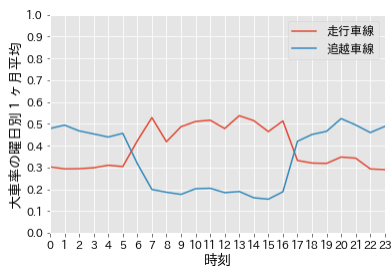


図 3-30 木曜日の大車率の 1 ヶ月平均
(浜松いなさ JCT 上り)

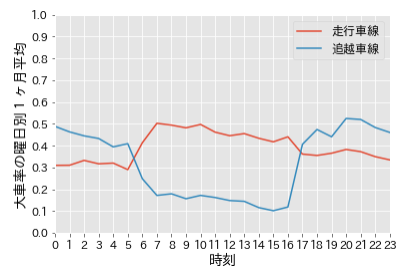


図 3-31 金曜日の大車率の 1 ヶ月平均
(浜松いなさ JCT 上り)

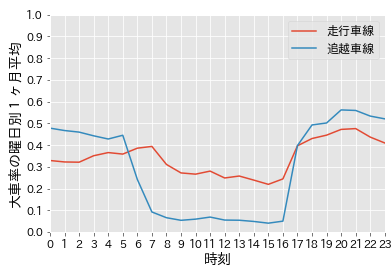


図 3-32 土曜日の大車率の 1 ヶ月平均
(浜松いなさ JCT 上り)

深夜から早朝にかけての追越車線の大車率はそこまで変動がなかったため、50%に固定する。走行車線は変動が激しいため、10~90%の間で20ずつ変化させ、分析を行うことにする。大車率のベンチマークは走行車線を90%、追越車線を50%とする。なお、本研究では、簡単にするために大車は全て12mの特大車であるとする。

3.3.5 走行車の速度設定

図 3-33 と図 3-34 にそれぞれ東名・新東名高速道路における Q-V 図を示す。

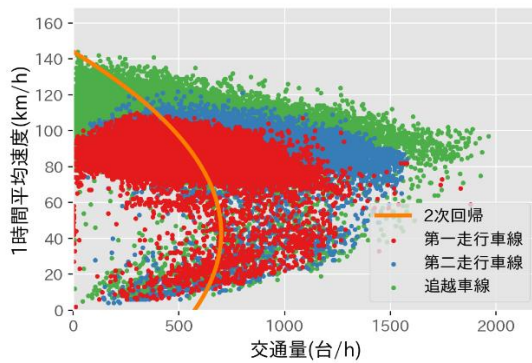


図 3-33 東名高速道路における Q-V 図

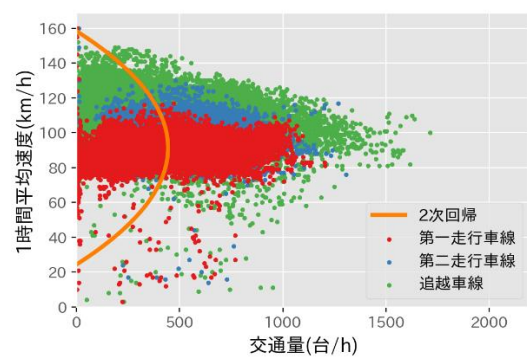


図 3-34 新東名高速道路における Q-V 図

1時間平均速度が高いときや低いときに交通量は少なくなり、中間部分である 60~100km/h あたりでは交通量が多くなっていることがわかる。今回は、この中の第一走行車線と交通量に着目し、交通量から第一走行車線の速度を求め、シミュレーションに適用する。

図 3-35 と図 3-36 にそれぞれ東名・新東名高速道路における第一走行車線、追越車線の速度分布、また両車線の速度差分布を示す。

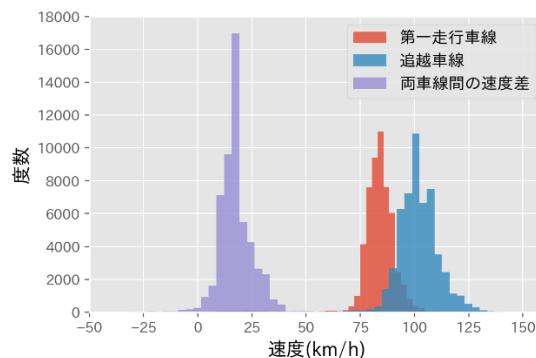


図 3-35 東名高速道路における
車線別の速度分布・両車線間の速度差分布

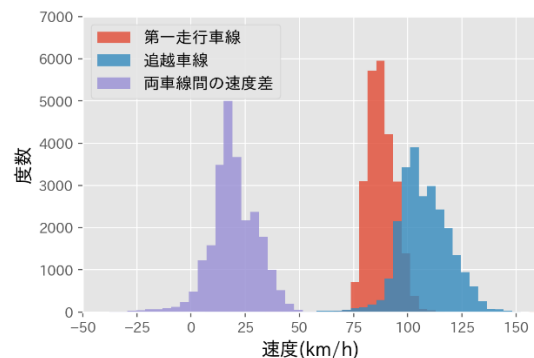


図 3-36 新東名高速道路における
車線別の速度分布・両車線間の速度差分布

走行車線と追越車線の速度差は約 10~20km/h になっていることがわかる。今回は、追越車線の速度を先程求めた第一走行車線より 15km/h 速いように設定する。また、エージェントと走行車線走行車との初期相対速度も 15km/h とする。

以上より、各交通量のエージェントの初期速度と走行車線走行車と追越車線走行車の速度をまとめたものを表 3-4 に示す。

表 3-4 交通量別の速度設定

交通量 (台/h/lane)	400	600	800	1000	1200	1400	1600
エージェントの初期速度(km/h)	82.5	77.5	72.5	67.5	62.5	57.5	52.5
走行車線の速度(km/h)	97.5	92.5	87.5	82.5	77.5	72.5	67.5
追越車線の速度(km/h)	112.5	107.5	102.5	97.5	92.5	87.5	82.5

3.4 避走挙動のアルゴリズム

本線走行車の中には合流部からの流入車を早期に発見し、追越車線へ車線変更を行う（避走挙動）場合がある。

本研究では本線車線が追越車線に避走挙動を行う場合の条件を式(1)から式(3)に示す。

$$d_k < \min. gap_k \quad (1)$$

$$d_{kl} > \min. gap_l \quad (2)$$

$$d_{kl-1} > \min. gap_k \quad (3)$$

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

第4章 強化学習を用いたシミュレーションモデルの構築

4.1 本章の概要

前章で説明したシミュレーション環境を強化学習の環境に適用し、学習させる。なお、本研究では次節で説明する行動や状態は全て離散値として扱っている。これには、2つの理由がある。1つ目は、実際のトラックドライバーが運転する際に細かい連続的な数値を考慮しているとは考えにくいためである。トラックドライバーは感覚的な判断のもと運転していると考えられるため、連続値よりも離散値で表したほうがより現実に即したシミュレーションになると考えられる。2つ目は、連続値にすると計算量が膨大になり、学習に時間がかかりすぎてしまったり、うまく学習しきれなかったりしてしまうためである。

4.2 強化学習環境

表4-1にシミュレーション強化学習の概要を示し、表4-2に報酬の設定を示す。また、図4-1に2つのシミュレーション画面を用いた環境の説明を示す。エージェントの加速度は -2m/s^2 から 2m/s^2 の間の 0.1m/s^2 刻みの離散値としている。急加速や急減速は非常に危険であるため、加速度を制限しシミュレーション上では急加速や急減速が起きないようにした。

表 4-1 シミュレーション強化学習の概要

用語	概要
エージェント	合流する車(ダブル連結トラック、隊列走行車)
環境	高速道路合流部
行動	加速度($-2\text{m/s}^2 \sim 2\text{m/s}^2$)、合流選択
状態	エージェントのx位置(合流可能領域かどうか)、エージェントのy位置 直近での流入スペースの有無、1つ先での流入スペースの有無 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 直前の車との距離、直後の車との距離
報酬	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 4-2 報酬の設定

項目	報酬
合流成否	合流時に直前・直後の車との車間距離がそれぞれ1秒間に進む距離以上にはなれている ⇒ +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1秒間に進む距離より短い ⇒ -40 直後の車との車間距離が1秒間に進む距離より短い ⇒ -40
不可侵領域への侵入	すでに合流しているのにさらに車線変更を選択する ⇒ -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)より低い ⇒ -5

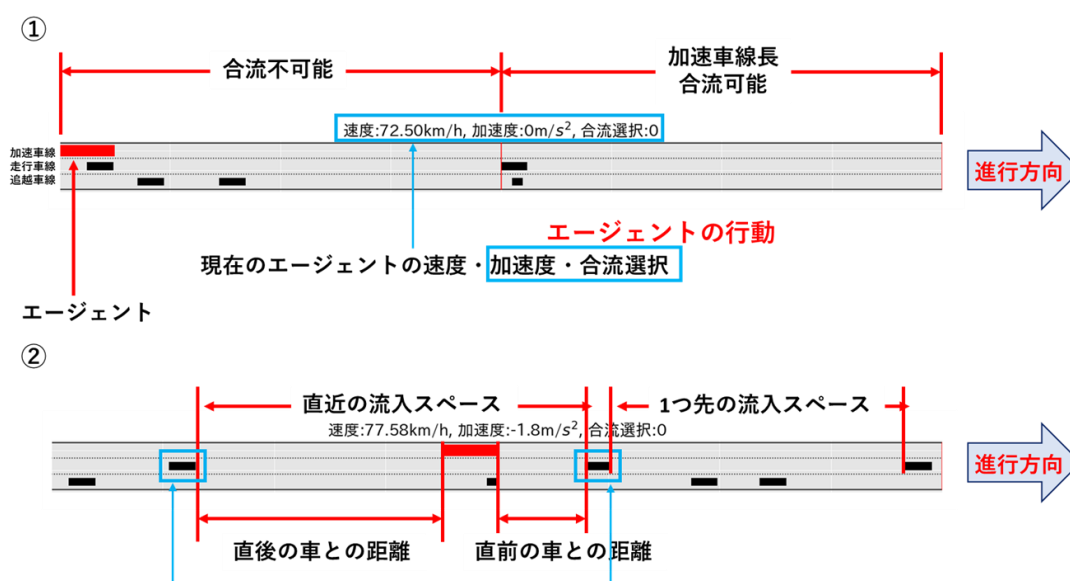


図 4-1 シミュレーション画面を用いた環境の説明

図 4-2 に今回のシミュレーション環境における強化学習の流れを示す。この 1 サイクルを 1 ステップとし、強化学習の訓練 1 回分を 1 エピソードとする。ここでいう訓練 1 回分とは、シミュレーション環境の開始から衝突するか、衝突せずに加速車線長を走り切るかでシミュレーション環境が終了するまでのことである。

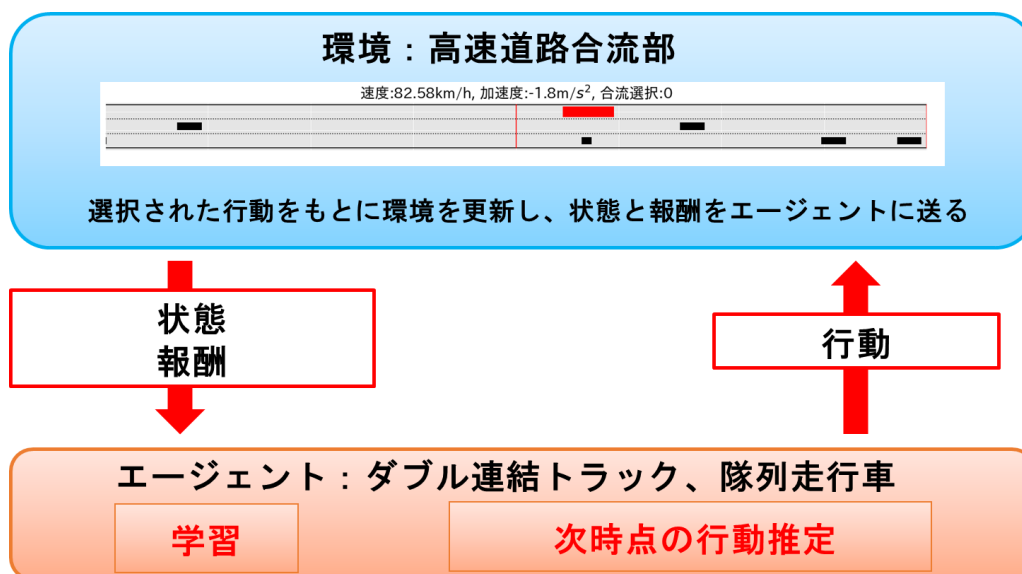


図 4-2 強化学習の流れ

4.3 学習用環境の作成

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 70 個ずつ作成する。なお全ての学習用環境で加速車線長は 200m, エージェントの初期加速度は 0m/s^2 , 走行車線の大車率は 90%, 追越車線の大車率は 50%, 走行車線走行車との初期相対速度は 15km/h と

設定している。

4.4 学習状況の監視

今回は、学習する総ステップ数を 50,000,000 とし、前節で作成した学習用環境を順に学習させる。図 4-3 に最初に学習される環境におけるエピソード毎の報酬の推移を、図 4-4 に全ての環境における合流成功・合流失敗・衝突の割合の推移を示す。始めの方はより良い行動を探索している段階であるため報酬は下がっているが、徐々に上がっていき獲得できる報酬の最大値である 30 に近づいている。また、合流成功確率が徐々に上がるとともに、合流失敗確率と衝突確率が下がっている。これらから学習が順調に進んでいることがわかる。

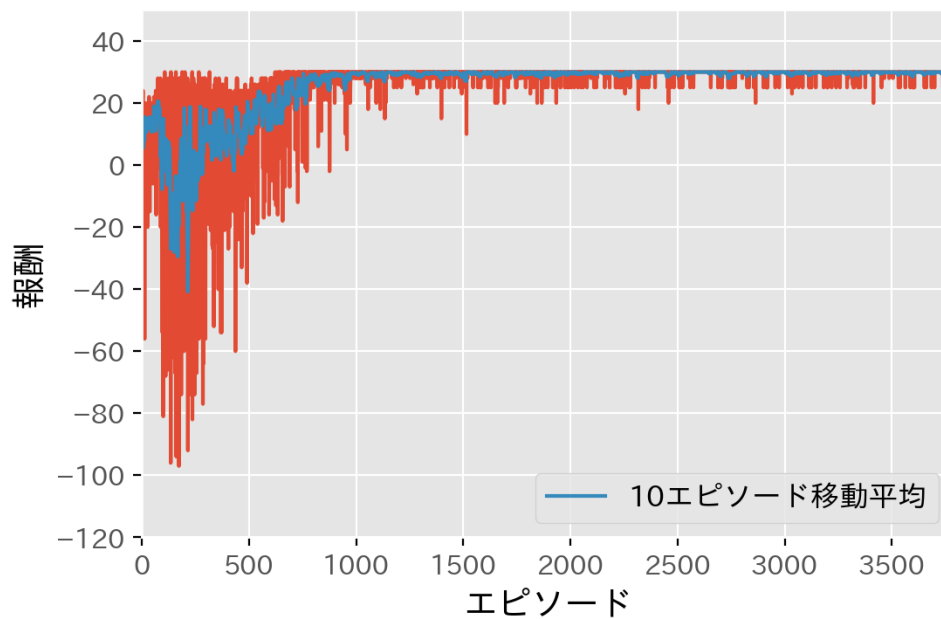


図 4-3 最初の環境におけるエピソード毎の報酬の推移

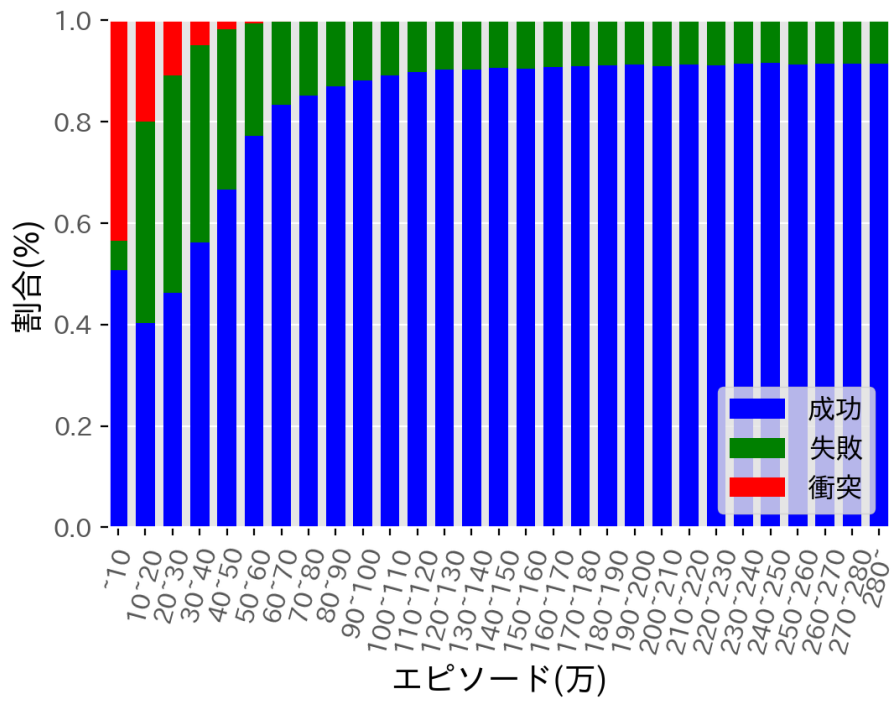


図 4-4 全環境における合流成功・合流失敗・衝突の割合の推移

第5章 シミュレーションモデルの妥当性検証

5.1 本章の概要

10,000 個のテスト用環境を用いて、前章で作成したモデルの妥当性検証を行うとともに、感度分析を行う。なお、感度分析の際の各変数のベンチマークは第3章で求めたものを使用する。

5.2 シミュレーション結果の分析指標

5.2.1 合流成功確率

合流がどれくらいの割合で成功したかを確認する。合流成功確率は式(4)のように表すことができる。

$$\text{合流成功確率(\%)} = \frac{\text{合流に成功した回数}}{\text{試行回数}} \times 100 \quad (4)$$

なお、ここでの合流成功とは加速車線長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。合流後の挙動も考慮しないと無理に加速や減速をして合流させてしまう可能性がある。その場合、合流は成功するが、合流後にスムーズに交通の流れに乗ることができずに衝突してしまう。そのような合流の仕方は適切といえない。そのため合流してから合流可能地点を抜けるまでの挙動も考慮している。

5.2.2 合流位置割合

加速車線長に対する合流した位置の割合を確認する。合流位置割合は式(5)のように表すことができる。

$$\text{合流位置割合(\%)} = \frac{\text{合流した位置}(m)}{\text{加速車線長}(m)} \times 100 \quad (5)$$

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、エージェントの先頭が合流可能領域に入ってから加速車線長を超えるまでの間に合流した時の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エージェントの車長になる。

5.2.3 合流時加速度と合流時相対速度

合流の際の加速度と相対速度がどのような傾向になっているかを確認する。基本的に合流するまでは、走行車線との速度差を少なくする方が安全な合流であると考えられる。しかし、合流時に加速して合流しようとするのは危険である。このことを踏まえ、合流時にどのような挙動をしているか、またその挙動は現実に即しているかを確認する。

5.2.4 コンフリクト指標

先行者に対する追突事故リスクを示す指標として TTC (Time To Collision) ⁽¹⁰⁾ と PICUD (Possibility Index for Collision with Urgent Deceleration) ⁽¹¹⁾ がある。式(6)と式(7)に定義を示す。TTC は現在の相対加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。衝突被害軽減ブレーキシステムなど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、両車が停止した時の相対的な位置を表す指標である。PICUD が 0 以下の場合には衝突を意味するため、急減速が発生した場合、

両車が衝突する潜在的なリスクが高いことを示す。

$$TTC = \frac{D}{V_1 - V_2} \quad (6)$$

$$PICUD = D + \frac{V_2^2}{-2a} - \left(V_1 \Delta t + \frac{V_1^2}{-2a} \right) \quad (7)$$

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を用いて算出している。また、減速時の加速度 a を $0.7G$ (6.9m/s^2)、反応遅れ時間 Δt を 1 秒と想定する。

5.3 ダブル連結トラック

本節では、エージェントを車長 25m のダブル連結トラックとし分析を行う。

5.3.1 交通量を変化させた場合のシミュレーション

本項では、交通量を 400~1600 台/h/lane で変化させて、合流成功確率・合流位置割合についてシミュレーション分析を行う。

図 5-1 に交通量を変化させた場合の合流成功確率の推移を示す。交通量が増えると合流成功確率が下がることがわかる。また、本研究の交通量のベンチマークである 600 台/h/lane のとき合流成功確率が約 100%となっていることがわかる。

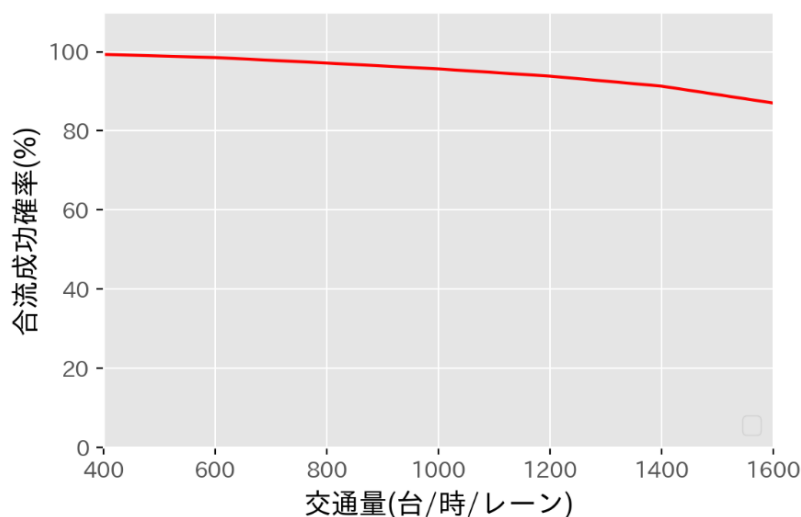


図 5-1 交通量の変化による合流成功確率の推移

図 5-2 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。交通量が増えると平均合流位置割合が高くなることがわかる。平均値に注目するとどの交通量でも約 40%以下で合流

できているが、特に交通量が 1600 台/h/lane の場合は最大値が約 80%となっており、安全な合流とは言いづらい。本研究の交通量のベンチマークである 600 台/h/lane のときでは合流位置割合が約 35%で高くても約 40%となっている。

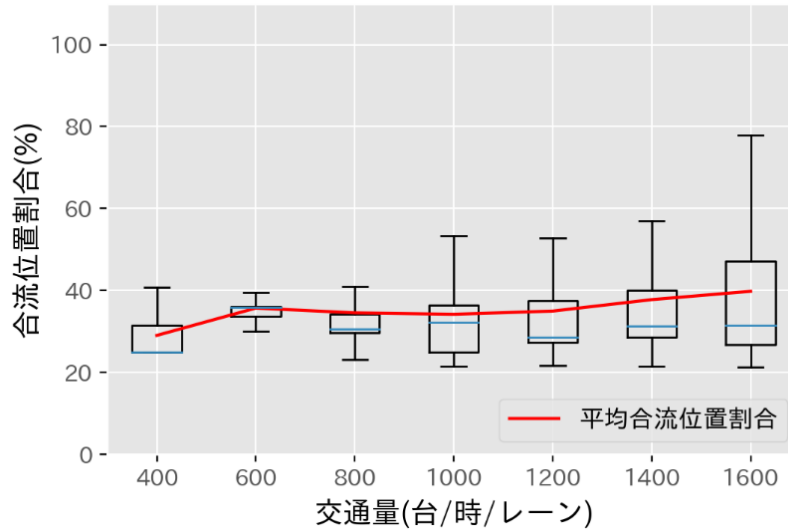


図 5-2 交通量の変化による合流位置割合の推移

図 5-1, 図 5-2 から深夜などの交通量が少ない場合では、ダブル連結トラックは問題なく合流できると考えられる。一方で交通量が多くなる時間帯では、合流部分にまだ課題があると考えられる。

図 5-3 に交通量の変化による合流時平均加速度と合流時平均相対速度の推移を示す。もともと相対速度は-15km/h であったので、合流する前に加速して走行車線の速度に近づけていることがわかる。また、合流するときには加速度がマイナスになっていることから、安全な合流をしていると考えられる。

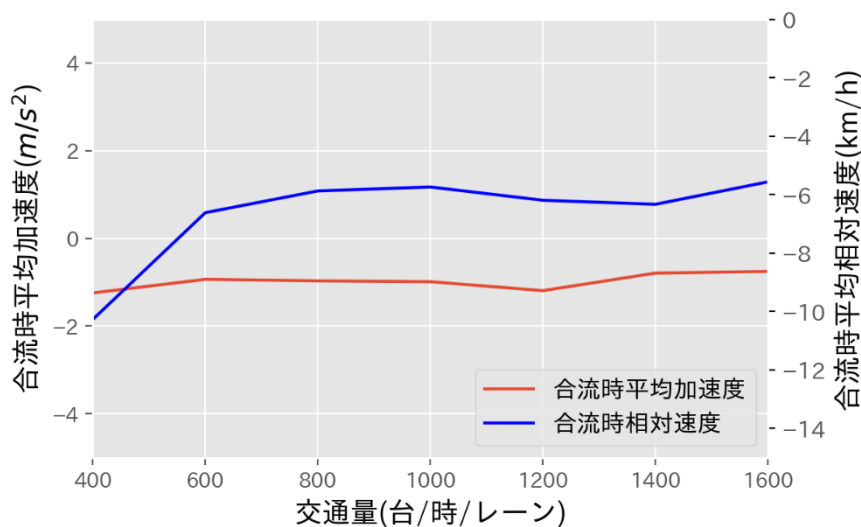


図 5-3 交通量の変化による合流時平均加速度と合流時平均相対速度の推移

5.3.2 加速車線長を変化させた場合のシミュレーション

本項では、加速車線長を 100~400m の間で 50 ずつ変化させ感度分析を行う。

図 5-4 に加速車線長を変化させた場合の合流成功確率の推移を示す。全ての加速車線長で合流成功確率が 95%以上になっている。交通量は 600 台/h/lane であり、これはトラックが多くなる時間帯である深夜や早朝を想定した交通量である。よってダブル連結トラックが走行する可能性が高い時間帯では、加速車線長が 100m と短くても合流成功確率は高いことがわかる。

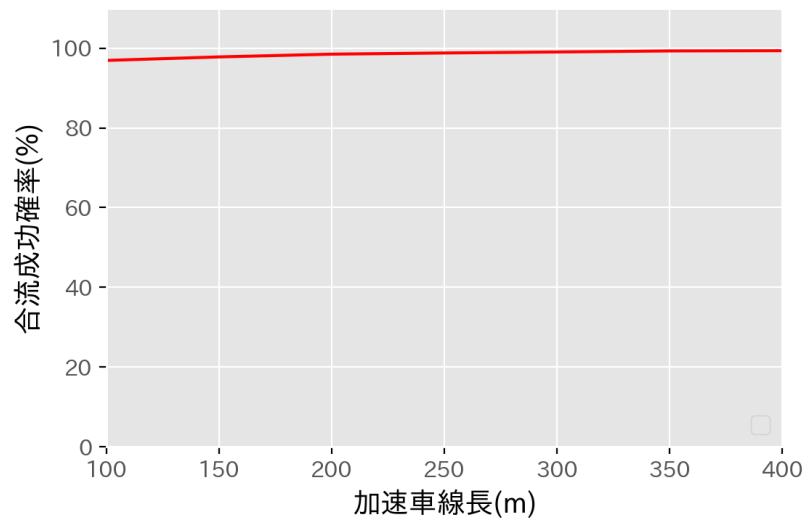


図 5-4 加速車線長の変化による合流成功確率の推移

図 5-5 に加速車線長を変化させた場合の合流位置割合の推移を示す。加速車線長が長くなると合流位置割合が低くなることわかる。図 5-4 では、交通量が 600 台/h/lane の場合、加速車線長が 100m と短くてもうまく合流できていたように見えたが、実際は合流位置割合が平均でも 70%近くになっているので、安全な合流とは言えない。深夜や早朝のような交通量が少ない時間帯でも、加速車線長は余裕をもって 200m 程度が良いと思われる。

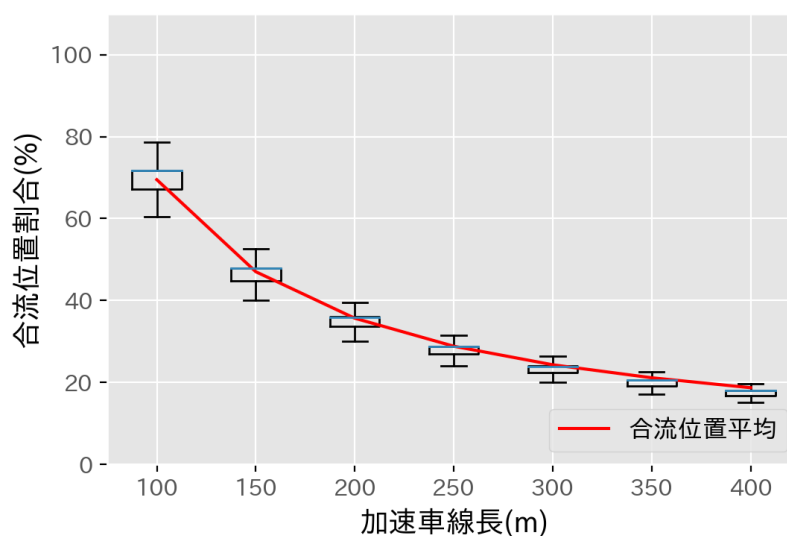


図 5-5 加速車線長の変化による合流位置割合の推移

図 5-6 に加速車線長の変化による合流時平均加速度と合流時平均相対速度の推移を示す。前項と同様に、合流前に走行車線の速度に近づけて合流時は加速をマイナスにしている。安全で理にかなった合流をしていると考えられる。

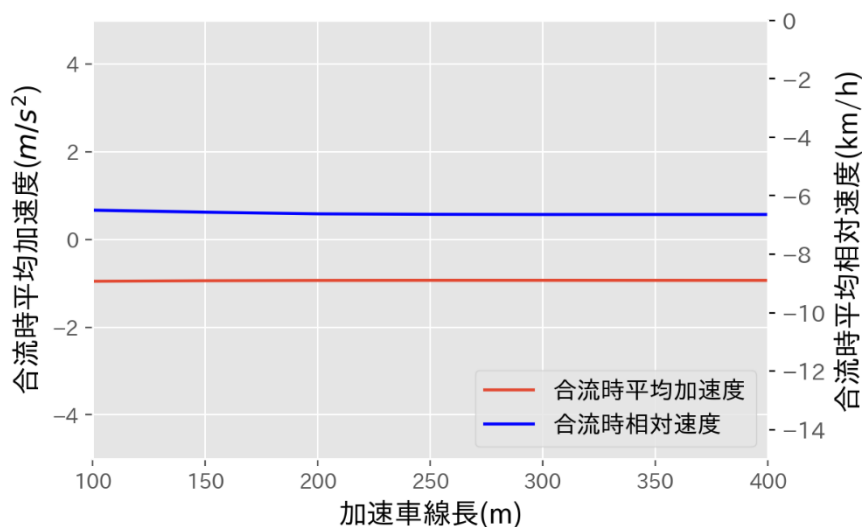


図 5-6 加速車線長の変化による合流時平均加速度と合流時平均相対速度の推移

5.3.3 走行車線の大車割合を変化させた場合のシミュレーション

走行車線の大車割合を 10~90%で 20 ずつ変化させ感度分析を行う。

図 5-7 に走行車線の大車割合の変化による合流成功確率の推移を、図 5-8 に走行車線の大車割合の変化による合流位置割合の推移を示す。走行車線の大車割合が変化しても両指標ともほとんど変化していない。大車の割合はあまり合流に関して影響を与えないことがわかる。

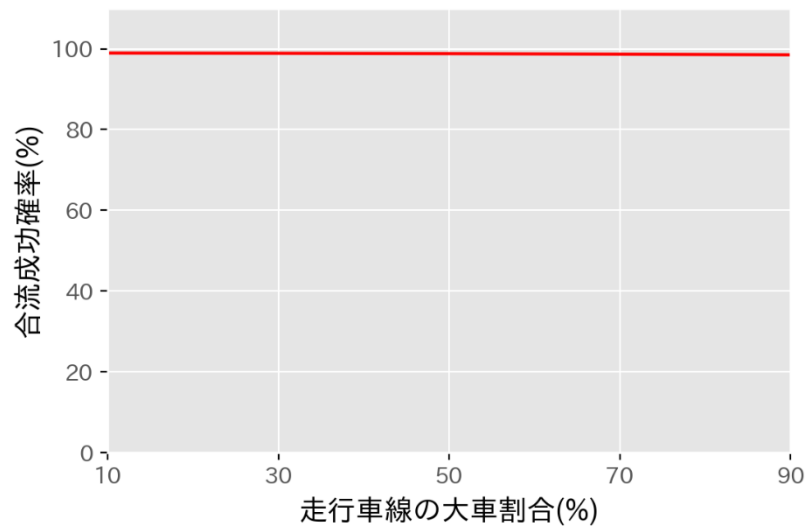


図 5-7 走行車線の大車割合の変化による合流成功確率の推移

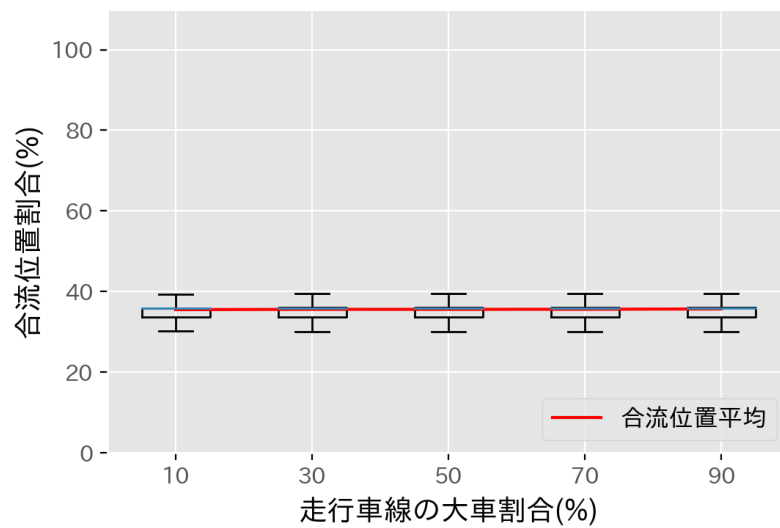


図 5-8 走行車線の大車割合の変化による合流位置割合の推移

図 5-9 に走行車線の大車割合の変化による合流時平均加速度と合流時平均相対速度の推移を示す。合流前に走行車線の速度に近づけて合流時は減速をしている。安全で理にかなった合流をしていると考えられる。

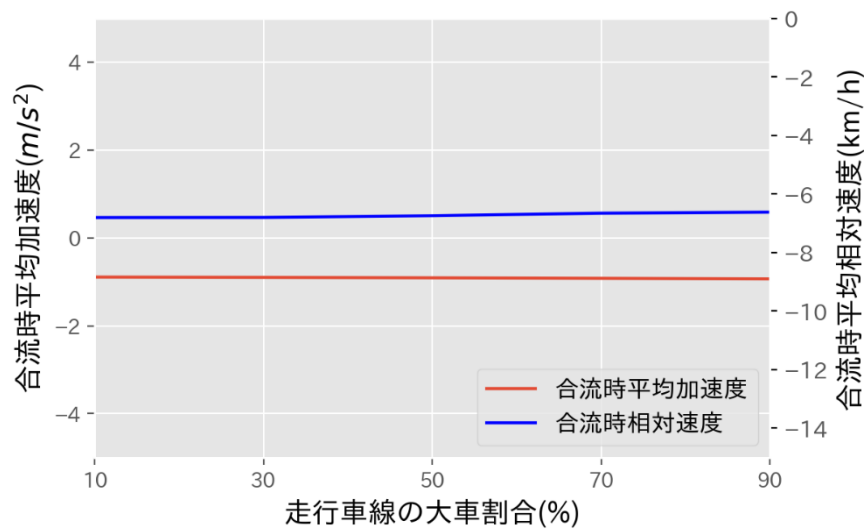


図 5-9 走行車線の大車割合の変化による合流時平均加速度と合流時平均相対速度の推移

5.3.4 コンフリクト指標を用いた分析

図 5-10 と図 5-11 にそれぞれ交通量 400 台/h/lane の場合の合流時の先行車との車間距離と相対速度の分布と後続車との車間距離と相対速度の分布を、図 5-12 と図 5-13 にそれぞれ交通量 1600 台/h/lane の時の合流時の先行車との車間距離と相対速度の分布と後続車との車間距離と相対速度の分布を示す。合流時にはほとんど相対速度がマイナスになっている。ここから、衝突リスクは選考車よりも後続車との間の方が大きいことがわかる。TTC のみで判断すると衝突危険性が認められる車両はほぼ無いが、PICUD で判断すると急減速した場合の潜在的衝突リスクを評価することができることがわかった。潜在的衝突リスクは車間距離不足による衝突リスクと相対速度が遅いことによる衝突リスクに分けることができる。交通量が 1600 台/h/lane の場合に衝突リスクと相対速度が遅いことによる衝突リスクがないのは、走行車線走行車の速度が遅く、相対速度を遅くしすぎると報酬で課した制限速度を下回る可能性があるため、相対速度を遅くしすぎないように制御したためであると考えられる。

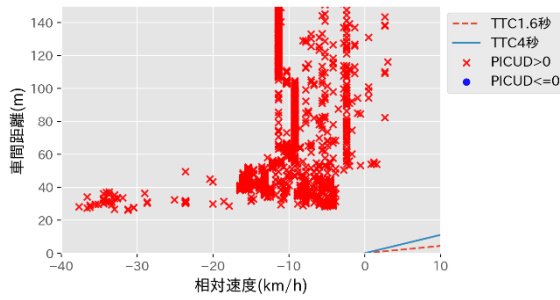


図 5- 10 先行車との車間距離と相対速度の分布 (400 台/h/lane)

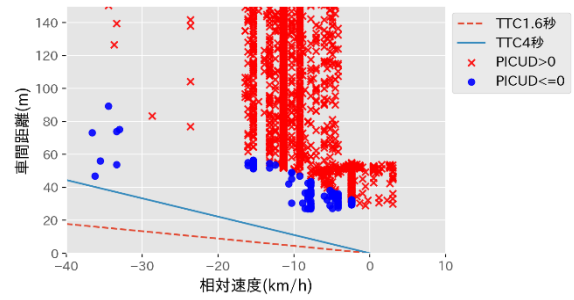


図 5- 11 後続車との車間距離と相対速度の分布 (400 台/h/lane)

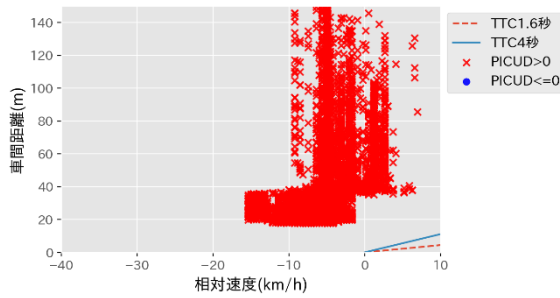


図 5- 12 先行車との車間距離と相対速度の分布 (1600 台/h/lane)

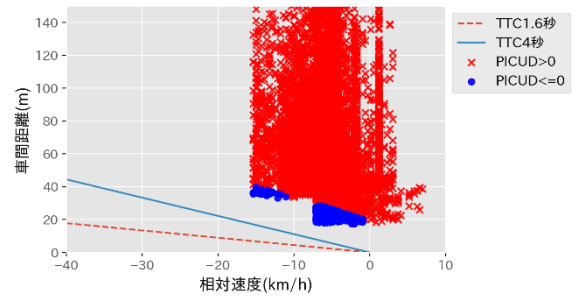


図 5- 13 後続車との車間距離と相対速度の分布 (1600 台/h/lane)

図 5- 14 に危険事象割合の分布を示す。危険事象割合とは、合流が成功した回数に対して PICUD が 0 以下であるものの割合である。合流位置割合が中盤から終盤にかけて危険事象の割合が高くなる傾向があるように見える。これは、序盤になかなか合流できない車が合流失敗を回避するために多少無理をして合流しているからだと考えられる。また特に交通量 400 台/h/lane の場合合流位置割合が中盤以降急激に上がっていることがわかる。これは、前述の理由に加え、減速して直近の走行車線走行車をやり過ごす際に減速しすぎて、相対速度が遅いことによる衝突リスクがあがったためだと考えられる。

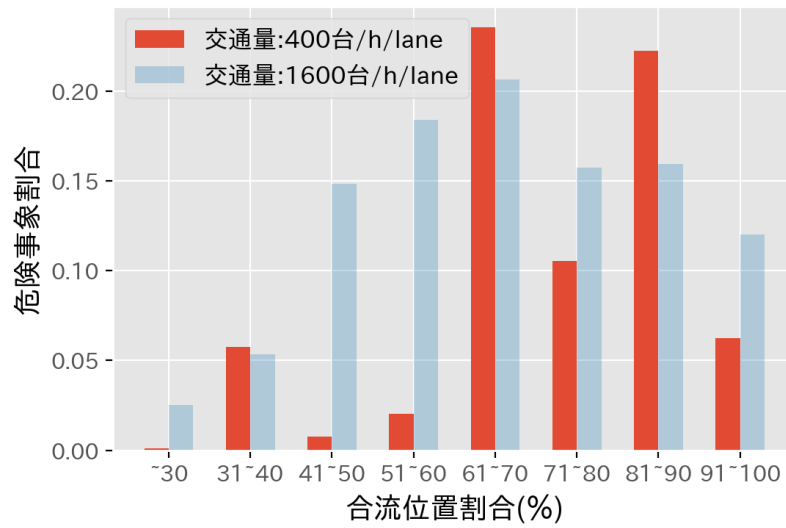


図 5- 14 危険事象割合の分布

5.4 隊列走行

本節では、エージェントを3台の特大車の隊列走行（全長56m）とする。

5.4.1 交通量を変化させた場合のシミュレーション

本項では、交通量を400～1600台/h/laneで変化させて、合流成功率・合流位置割合についてシミュレーション分析を行う。

図5-15にダブル連結トラックと隊列走行の交通量の変化による合流成功率の推移の比較を示す。傾向としては似通っているが、隊列走行の方がダブル連結トラックよりも交通量の増加に伴う合流成功率の低下が激しいことがわかる。

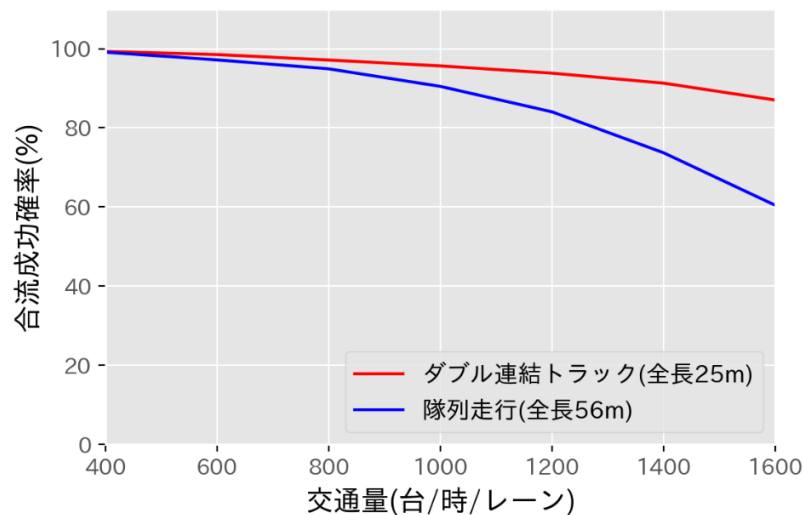


図 5- 15 交通量の変化による合流成功率の推移

図5-16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。交通量が増えると平均合流位置割合が高くなるのがわかる。特に交通量1600台/h/laneのとき平均の合流位置割合は60%ほどであるが、最大で100%近くになっており、非常に危険であると推測さ

れる。

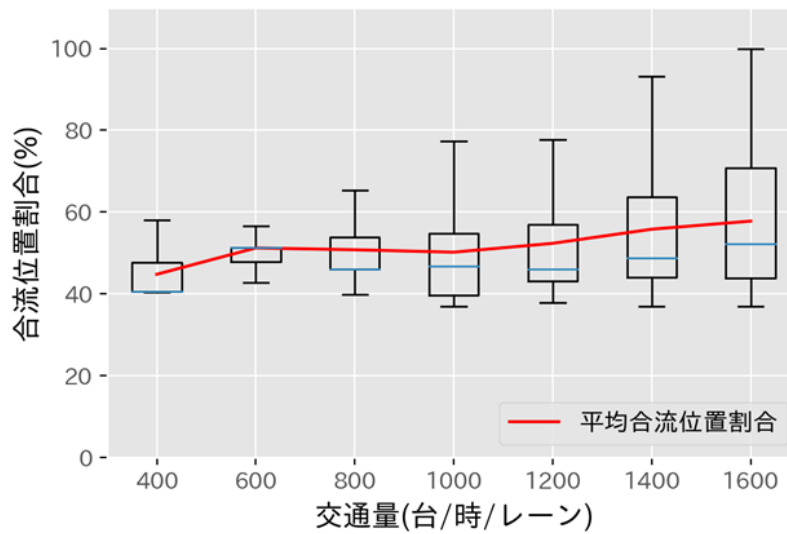


図 5- 16 交通量の変化による合流位置割合の推移

図 5- 17 に交通量の変化による合流時平均加速度と合流時平均相対速度の推移を示す。前節のダブル連結トラックの場合と同じ傾向になった。

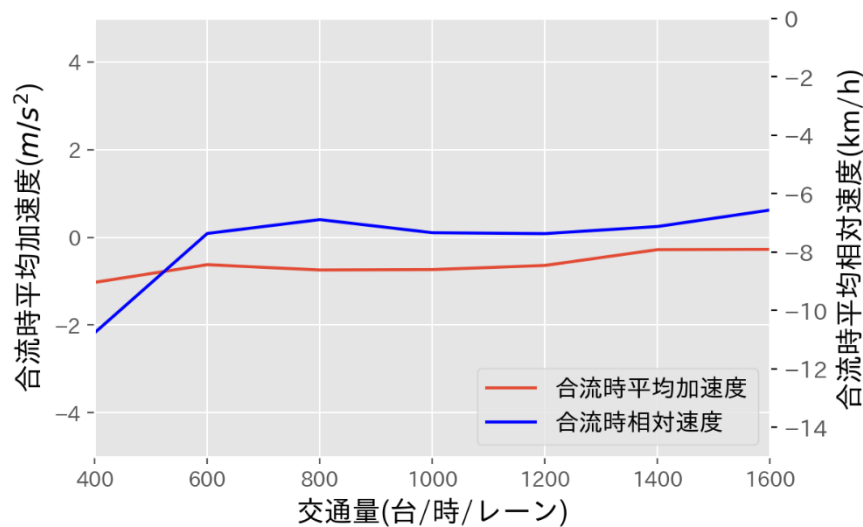


図 5- 17 交通量の変化による合流時平均加速度と合流時平均相対速度の推移

5.4.2 加速車線長を変化させた場合のシミュレーション

本項では、加速車線長を 100~400m で変化させて、合流成功確率・合流位置割合についてシミュレーション分析を行う。

図 5- 18 にダブル連結トラックと隊列走行の交通量の変化による合流成功確率の推移の比較を示す。傾向としては似通っているが、隊列走行の方がダブル連結トラックよりも加速車線長の短縮に大きな影響を受けることがわかる。

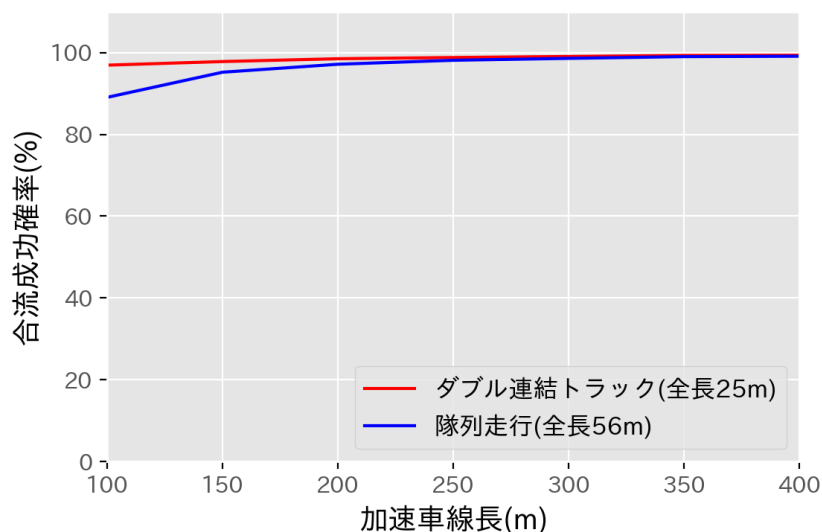


図 5- 18 加速車線長の変化による合流成功確率の推移

図 5- 19 に加速車線長を変化させた場合の合流位置割合の推移を示す。加速車線長が長くなると合流位置割合が低くなることがわかる。隊列走行が安全に合流するには、加速車線長が 300m 程度ないといけないと思われる。

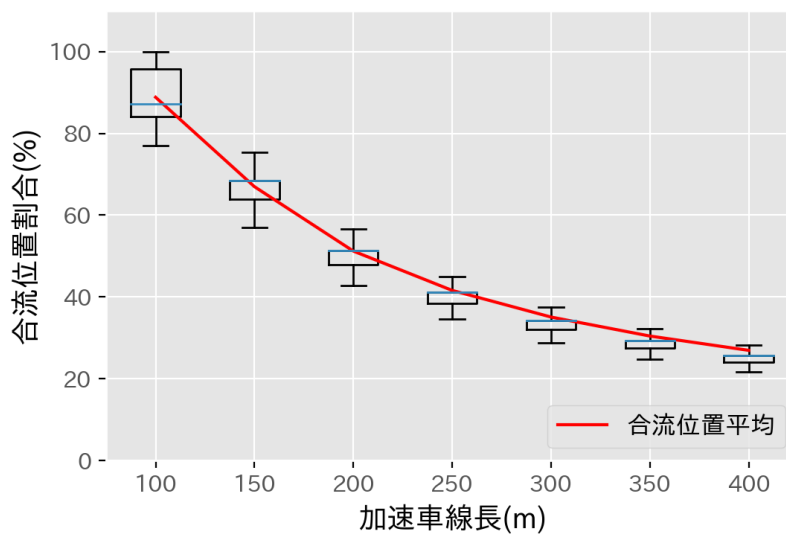


図 5- 19 加速車線長の変化による合流位置割合の推移

図 5- 20 に加速車線長の変化による合流時平均加速度と合流時平均相対速度の推移を示す。こちらも前節のダブル連結トラックと同様の傾向が見られた。

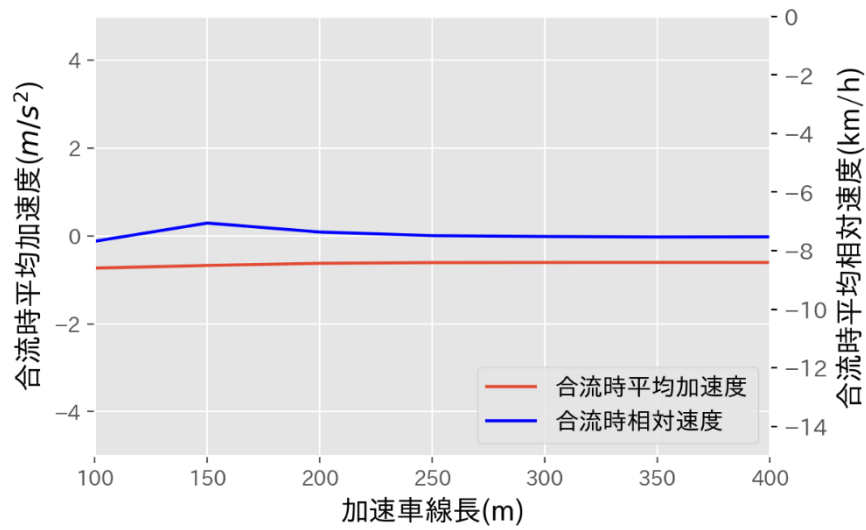


図 5-20 加速車線長の変化による合流時平均加速度と合流時平均相対速度の推移

5.4.3 走行車線の大車割合を変化させた場合のシミュレーション

走行車線の大車割合を 10~90%で 20 ずつ変化させ感度分析を行う。

図 5-21 にダブル連結トラックと隊列走行の走行車線の大車割合の変化による合流成功確率の推移の比較を, 図 5-22 に走行車線の大車割合の変化による合流位置割合の推移を示す。こちらでも前節のダブル連結トラックと同様で, 走行車線の大車割合はあまり合流に影響しないと考えられる。

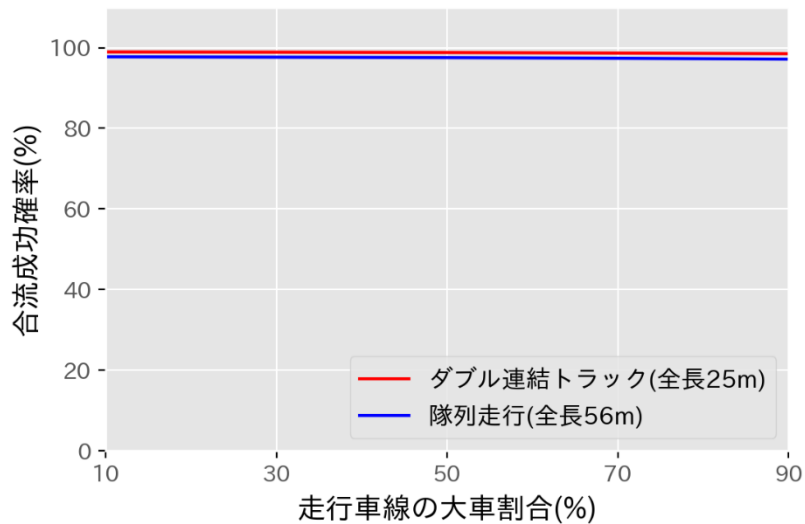


図 5-21 走行車線の大車割合の変化による合流成功確率の推移

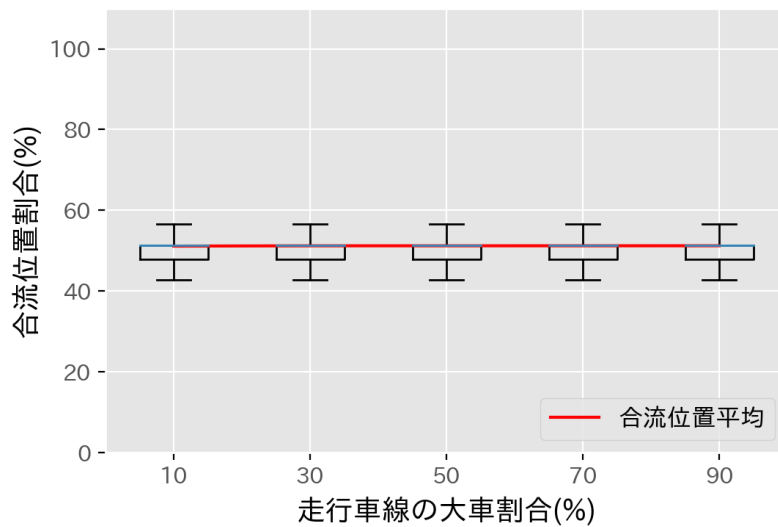


図 5- 22 走行車線の大車割合の変化による合流位置割合の推移

図 5- 23 に加速車線長の変化による合流時平均加速度と合流時平均相対速度の推移を示す。こちらにも前節のダブル連結トラックと同様の傾向が見られた。

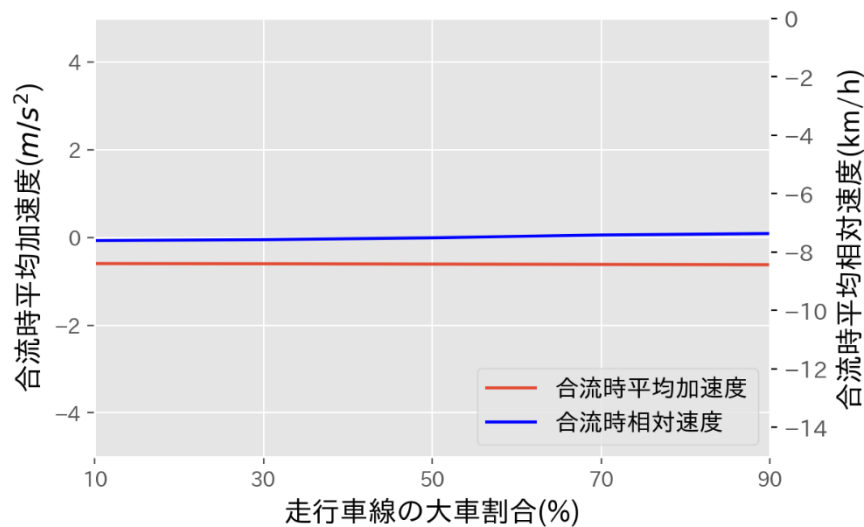


図 5- 23 走行車線の大車割合の変化による合流時平均加速度と合流時平均相対速度の推移

5.4.4 コンフリクト指標を用いた分析

図 5- 24 と図 5- 25 にそれぞれ交通量 400 台/h/lane の場合の合流時の先行車との車間距離と相対速度の分布と後続車との車間距離と相対速度の分布を、図 5- 26 と図 5- 27 にそれぞれ交通量 1600 台/h/lane の時の合流時の先行車との車間距離と相対速度の分布と後続車との車間距離と相対速度の分布を示す。前節のダブル連結トラックの場合と同様の傾向が見られたが、交通量が少ない場合は、ダブル連結トラックのときよりも相対速度が遅いことによる衝突リスクが高いことがわかる。

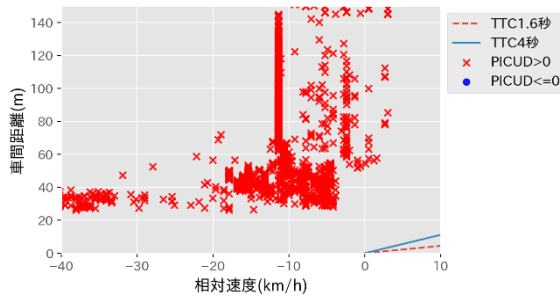


図 5-24 先行車との車間距離と相対速度の分布 (400 台/h/lane)

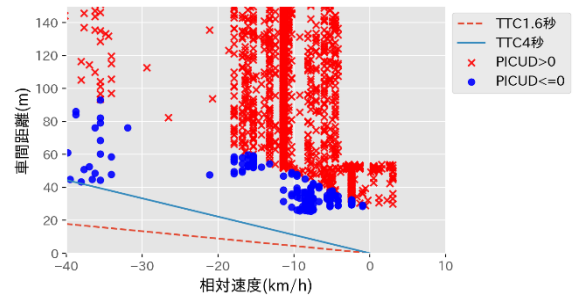


図 5-25 後続車との車間距離と相対速度の分布 (400 台/h/lane)

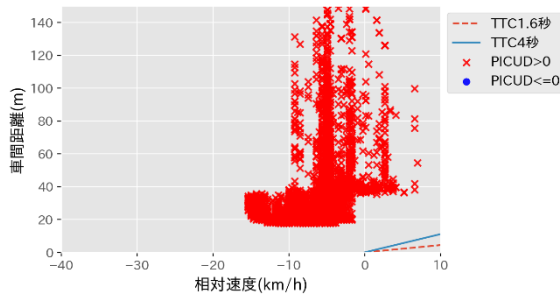


図 5-26 先行車との車間距離と相対速度の分布 (1600 台/h/lane)

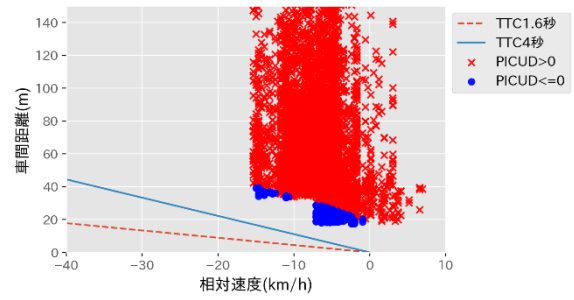


図 5-27 後続車との車間距離と相対速度の分布 (1600 台/h/lane)

図 5-28 に危険事象割合の分布を示す。前節のダブル連結トラックの場合と同様に合流位置割合が中盤から終盤にかけて危険事象の割合が高くなる傾向があることがわかった。

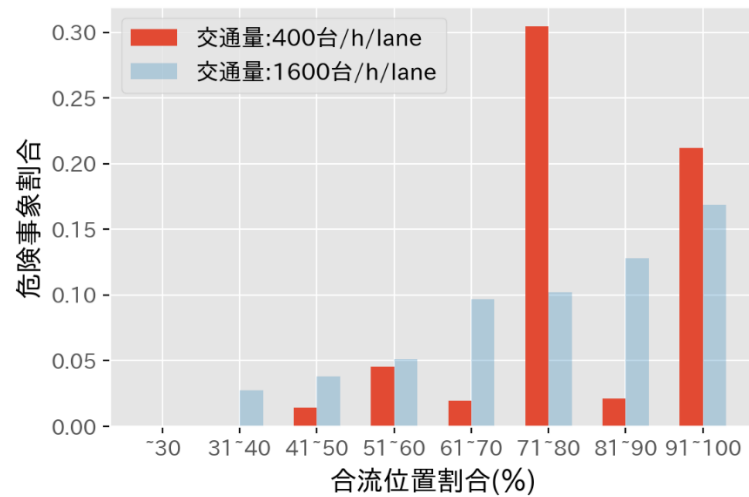


図 5-28 危険事象割合の分布

第6章 結論

6.1 各章のまとめ

<第3章>

トラフィックカウンターデータを用いて東名高速道路や新東名高速道路の交通実態を把握し、それを基にシミュレーションの環境を設定した。

<第4章>

第3章で作成したシミュレーション環境を強化学習の環境に適用し、学習を進めた。その際に設定する必要のある行動・状態・報酬についての説明を行った。また、報酬の推移や合流成功確率の推移などで学習がうまくいっていることを確認した。

<第5章>

第4章で作成した強化学習モデルを用いて、様々な感度分析を行った。強化学習のモデルが従来のモデルよりも現実に近い動きをしていることも確認できた。また、シミュレーション環境を決定する変数を変えていき、どの変数が合流の挙動に影響を与えているかを分析した。夜間での走行はダブル連結トラック、隊列走行共に合流できる確率も高く、合流位置割合においてもそれほど高くはないことがわかった。昼間から夕方での走行は特に隊列走行で合流成功確率が低く、合流位置割合においても非常に高くなっていることがわかった。ダブル連結トラックや隊列走行は夜間に稼働させるのが現実的といえる。また、その際に使用する合流部の加速車線長にも考慮する必要があると考えられる。

6.2 今後の課題

本研究では、強化学習の状態を8種類の状態変数で定義したが、この定義の仕方によってはより現実に近いモデルを作ることができ、より本格的なシミュレーションを行うことができると考えられる。例えば、状態を変数で定義するのではなく、ドライバーが実際に見ることのできる範囲をシミュレーション画面の中から抜き取り、それを状態として保持するなどである。ルームミラーやバックミラーなどで見える範囲も状態として保持することで、強化学習はリアルな視界をもとに学習を行うので、実際のドライバーの意思決定に近づけることができるはずである。同様に報酬の決め方などもまだまだ改善の余地があるように思われる。

また、シミュレーション環境においては、エージェント以外の走行車の挙動を細かく設定することでより現実に近いモデルとなることが期待される。

謝辞

本研究を進めるにあたり、お忙しい中丁寧にご指導・助言をして下さいました兵藤哲朗教授に、この場を借りて厚く御礼申し上げます。また本論文の作成にあたり、様々な面でサポートしてくれた地域計画研究室の後輩たち、留学生の皆様へも心から深く感謝申し上げます。本当にありがとうございました。

参考文献

- (1) 公益社団法人全日本トラック協会，2020 年度日本のトラック輸送現状と課題
- (2) ダブル連結トラック実験協議会，ダブル連結トラック実験 最終報告書（案）
- (3) ソフトバンクプレリリース https://www.softbank.jp/corp/news/press/sbkk/2018/20180327_01/，
閲覧日：2021 年 1 月 22 日
- (4) 割田博・上篠俊介・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，土木計画学研究・講演集，vol.29，2004 年 9 月
- (5) 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，土木計画学研究・論文集，No.12，1995 年 8 月
- (6) 国土交通省，ダブル連結トラックについて <https://www.mlit.go.jp/common/001263654.pdf>
- (7) 国土交通省，道路局道路交通管理課 高速道路課，トラック輸送の生産革命「ダブル連結トラック」の対象路線を拡充～東北から九州まで拡充し，トラック輸送の省人化を促進～，2019 年 8 月 8 日
- (8) 国土交通省，自動車局技術政策課，トラック隊列走行 実証実験，2019 年 6 月 7 日
- (9) 国土交通省，ダブル連結トラック実験 最終報告書（案）
- (10) 北島 創・丸茂 喜高・平岡 敏洋・伊藤 誠，先行車に対する追突リスク認知の評価指標の比較・検討，自動車技術会論文集，vol.30 No.9，2008 年 9 月
- (11) 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 年 2 月
- (12) 小川雄太郎，つくりながら学ぶ！深層強化学習 PyTorch による実践プログラミング，マイナビ出版，2018 年
- (13) 布留川英一，OpenAI Gym / Baselines 深層学習・強化学習 人工知能プログラミング 実践入門，ポーンデジタル，2020 年
- (14) 曾我部東馬，強化学習アルゴリズム入門:「平均」からはじめる基礎と応用，オーム社，2019 年
- (15) 森村哲郎，強化学習 (機械学習プロフェッショナルシリーズ)，講談社，2019 年