

2021年度～2022年度成果報告書

戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第2期 ／自動運転(システムとサービスの拡張) ／合流支援(本線隙間狙い)システム検証のための シミュレーション環境構築および分析

2023年2月

株式会社構造計画研究所

本報告書は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が管理法人を務め、内閣府が実施した「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期／自動運転（システムとサービスの拡張）」(NEDO管理番号：JPNP18012)の成果をまとめたものです。

目次

1. 事業概要	1
1.1. 要約.....	1
1.2. 合流支援ロードマップと本事業の位置づけ.....	3
1.3. 事業の目的.....	4
1.4. 事業の概要.....	4
2. 分析対象箇所の選定および上流部軌跡データの取得	5
2.1. 分析対象箇所の選定	5
2.2. 上流部軌跡データの取得.....	7
3. 合流の評価方法の検討	10
3.1. 評価点マップ	10
3.2. 合流評価対象分類.....	14
4. 合流支援システム検証のためのシミュレーション環境構築 ...	15
4.1. 分析対象箇所の道路線形および合流挙動を再現したベースシミュレーション環境.....	15
4.1.1. 道路ネットワークモデル.....	16
4.1.2. 車両発生モデル	17
4.1.3. 合流発生時の車両挙動モデル.....	18
4.2. シミュレーション環境への本線上流部走行挙動モデルの追加	21
4.2.1. 取得した上流部軌跡データの分析	21
4.2.2. 本線上流部における走行挙動の再現.....	23
4.3. シミュレーション環境への自動運転車モデルの追加	26
4.3.1. 自動運転車の2秒車間追従走行モデル.....	26
4.3.2. 自動運転車の合流発生時の車両挙動モデル.....	28
4.4. シミュレーション環境へのDAY2システムモデルの追加.....	30
4.5. シミュレーション環境へのDAY3システムモデルの追加.....	32
4.5.1. Day3システムの発動開始のトリガー	33
4.5.2. Day3システムによる支援発動時の状況判定	34
4.5.3. Day3システムによる支援を受けた車両の挙動.....	35
4.5.4. Day3システムによる支援を受けた後の車両挙動.....	36

5. シミュレーション環境を用いた合流支援システム検証・効果分析の諸条件	37
5.1. 交通流条件.....	37
5.1.1. 交通流量区分としての飽和度.....	37
5.1.2. 合流支援システム検証・効果分析に使用する交通流条件.....	39
5.2. 合流支援システムのシステム物理条件.....	42
5.2.1. センシングエリア・通信エリアの長さ.....	42
5.2.2. 本線車情報の伝達時間.....	44
5.2.3. 本線車位置情報の誤差.....	46
5.2.4. 本線車速度情報の誤差.....	47
5.3. 自動運転車両混在率.....	48
5.4. 留意点.....	49
5.4.1. 東池袋モデルにおける車種について.....	49
5.4.2. 東池袋モデルにおける渋滞.....	49
5.4.3. 合流時減速機能解除による副作用.....	50
5.4.4. 評価対象外フィルタの設定.....	51
5.5. 前提条件のまとめ.....	52
6. DAY2 システムの検証.....	53
6.1. シミュレーションの推計幅の検証.....	53
6.1.1. 検証内容.....	54
6.1.2. 検証条件.....	55
6.1.3. 検証結果.....	55
6.2. コンセプト成立性の検証.....	57
6.2.1. 検証内容.....	57
6.2.2. 検証条件.....	57
6.2.3. 検証結果.....	57
6.3. システム物理条件変更時の合流改善効果の検証.....	64
6.3.1. 分析内容.....	64
6.3.2. 分析条件.....	64
6.3.3. 分析結果.....	66
6.4. 交通流条件変更時の合流改善効果の検証.....	71
6.4.1. 分析内容.....	71
6.4.2. 分析条件.....	71

6.4.3. 分析結果	71
7. DAY3 システムの検証.....	74
7.1. 自動運転車両混在率変更時の合流への影響の検証.....	74
7.1.1. 検証内容	74
7.1.2. 検証条件	75
7.1.3. 検証結果	75
7.2. コンセプト成立性の検証.....	78
7.2.1. 検証内容	78
7.2.2. 検証条件	78
7.2.3. 検証結果	79
8. 実交通流を想定した合流支援システムの1日の導入効果推計	89
8.1. 推計内容	89
8.2. 推計条件	89
8.3. 推計結果	90
8.3.1. 1日の合流改善効果推計結果	90
8.3.1. 日中の合流改善効果推計結果.....	94
8.3.2. 夜間の合流改善効果推計結果.....	97
9. 合流支援システム検証のための分析結果のまとめと考察	100
9.1. 合流支援システムの効果に関する分析結果と課題.....	100
9.2. 合流支援システムの今後の方向性に関する一考察.....	102
9.2.1. 合流可能車間の選択肢拡大	103
9.2.2. 合流可能車間の車間時間拡大.....	104
9.3. 合流支援シミュレーション環境の一般化に向けた課題	105
9.3.1. 道路線形	105
9.3.2. 車種.....	105
参考文献.....	106

1. 事業概要

1.1. 要約

（1） 和文要約

高速道路等における合流は、走行速度の速い本線車両の隙間を狙って合流することが求められる、自動運転車両の制御が難しいユースケースの一つである。特に、首都高をはじめとする都市内高速道路は合流車線長（合流車両が本線に合流できる区間）の距離が短く、合流車両は短い合流部の中で本線速度まで加速したうえで、本線車両間の隙間（ギャップ）に合流することが求められる。このような合流車線長が短い首都高速道路をはじめとする都市内高速道路の合流部においては、円滑な合流を支援するため路車間通信システムによる合流支援を行う「合流支援システム」を社会実装することが検討されている。

そこで、本事業ではこの合流支援システムについて、シミュレーション環境を構築しコンセプトの検討や成立性の評価を実施した。

まず首都高速道路の中でも特に合流車線長が短い首都高速5号池袋線下り東池袋入口を対象に、実際の交通流の軌跡データを取得のうえ、それらを再現した交通流シミュレーション環境を構築した。さらに、「本線隙間狙い支援」を行うDay2システムと、Day2システムに追加して「本線協調支援」を行うDay3システムをシミュレーション環境に追加した。「本線隙間狙い支援」とは本線上を走行する車両情報を連続的に取得、インフラを通じて合流車線の自動運転車両に連続的に提供する支援であり、本線走行車両の隙間を狙った合流の支援を行うことであり、「本線協調支援」とは路側管制より本線を走行する自動運転車両に車間の調整等を指示し合流の支援を行う支援である。以上のDay2システムとDay3システムにおける合流改善効果およびコンセプト成立性の検証を、シミュレーションを用いて実施した。

評価する際、合流の余裕度や良し悪しを測る指標として、合流時の車間時間と前後の車両との相対速度から定義される評価点を定義した。システム導入有無のシナリオごとに、各合流挙動に対し評価点を算出・比較することで合流改善効果を検証し、評価点が基準値以下となる合流の発生頻度を比較することでコンセプト成立性を検証した。Day2システムについては、コンセプト成立性の検証、合流支援システムの物理条件を変更した際の合流改善効果の検証、交通流を変動させた場合の効果検証を行った。

Day3システムについてはコンセプト成立性の検証を行った。

以上の結果、本事業の検証範囲内において、Day2システムは合流改善効果があり、コンセプト成立性の水準を満たすという結論となった。Day3システムについては合流改善効果があるものの、本事業で仮定したコンセプト成立性があると判断できる水準には至らないという結論となった。Day2システムには、合流部で本線車と横並びになる場合において合流車線の自動運転車にあらかじめ本線の情報を伝えることでそれを回避させる効果があることが確認された。Day3システムでは本線の自動運転車が前方車との車間を広く確保することで合流する自動運転車が比較的広い車間に合流可能となった。一方で本線の交通量が多い状況においては、狙うべき広い車間がないためDay2、Day3システムの支援効果では限界があることが確認された。

（2） 英文要約

Merging at expressway is one of the most difficult use cases for automated driving vehicles to control, as they must merge through gaps between main lane vehicles traveling at high speeds. In particular, the length of merging area is short on urban expressways such as the Metropolitan Expressway, so that the merging vehicles are required to accelerate to the speed of main lane within the short merging area to merge into the gap between main lane vehicles. To assist smooth merging on such short merging area lengths of expressways in urban areas such as the Metropolitan Expressway, the "Merging Assistant System" is considered for social implementation, which uses a road-to-vehicle communication system to assist the merging process.

In this project, we construct the simulation environment to study the concept of this merging assistance system and evaluate the feasibility. First, we construct a traffic flow simulation environment for the Higashi Ikebukuro Entrance of the Metropolitan Expressway No. 5 Ikebukuro Line where the length of the merging area is particularly short and reproduce the traffic flow from the actual traffic trajectory data. In addition, we add two merging assistant systems to the simulation environment: "Assistance for Merging Lane Automated Driving Vehicles in Targeting Gaps between Main Lane Vehicles" (Day 2 system), which assists merging by continuously acquiring vehicle information on the main lane and continuously providing this information to merging automated driving vehicles through the infrastructure, and "Assistance for Main Lane Automated Driving Vehicles to Coordinate" (Day 3 system), which assists merging by automated driving vehicles on the main lane to coordinate gaps between vehicles from the roadside control. We verify the effectiveness of improvement of the merging process and the feasibility of the concept, of the Day 2 and Day 3 systems above using simulation.

To evaluate, we defined the evaluation score as an index to measure the level of leeway and goodness of merging, which is defined by the time gap between vehicles and the relative speeds of the vehicles in front and behind at the time of merging. The effectiveness of the merging improvement is verified by comparing the evaluation scores of each scenario with and without the system installation, and the feasibility of the concept is verified by comparing the probability of merging events where the evaluation scores are below the standard value. For the Day 2 system, we verify the feasibility of the concept, the effect of improvement of changing the physical conditions of the merging assistant system, and the effect of the changes of traffic flow. For the Day3 system, we verify the feasibility of the concept.

As a result, this project found that the Day 2 system improved the merging process and thus met the criteria for concept feasibility, while the Day 3 system improved the merging process but did not meet the criteria for concept feasibility. The Day2 system is confirmed to be effective in avoiding merging traffic by providing main lane information in advance to automated driving vehicles in the merging lane when they are side-by-side with main lane vehicles at the merging point. The Day3 system allows the merging vehicles to merge into a relatively large gap on main lane. On the other hand, it is confirmed that the assistance effect of the Day2 and Day3 systems is limited because there is no large gap to aim for in situations where there is heavy traffic on the main lane.

1.2. 合流支援ロードマップと本事業の位置づけ

本事業で検証対象となる、合流支援システムについて説明する。

車両への情報提供により高速道路等でスムーズな速度調整・合流の実現を目指す合流支援システムの検討が進められている。それに伴い、密集した交通流や将来的に自動運転車がある程度混在した環境までを考慮して、どのような合流支援システムが有効であるかの検討が求められている。

現在、合流支援システムは以下の4段階で進化させていくことが検討されている（図 1-1）。

- ・ 第一段階「予備加減速支援」：本線上の車両流（速度・密度）を計測、インフラを通じて合流車両に提供し、合流部での予備加減速の支援を行う。（Day1 システム）
- ・ 第二段階「本線隙間狙い支援」：本線上の車両流を連続的に計測、インフラを通じて合流車両に連続的に提供し、本線走行車両の隙間を狙った合流の支援を行う。（Day2 システム）
- ・ 第三段階「本線車協調支援」：本線上の車両流を面的に計測、インフラを通じて合流車両に提供すると共に、路側管制より本線走行車両側に車間調整等を指示し合流の支援を行う。（Day3 システム）
- ・ 第四段階「渋滞時合流支援」：Day3 システムに加えて、混雑した本線への合流の際に本線車両と合流車両の車車間通信によるネゴシエーションによる合流の支援を行う。（Day4 システム）

2019、2020 年度では Day1 システムについて実証環境構築、実証実験が行われた。2021、2022 年度に行われた本事業は、この実証実験の結果を踏まえて Day2 システムのコンセプト成立性の検証および諸条件変更時の効果の検証を行い、さらに Day3 システムのコンセプト成立性を検証するものである。

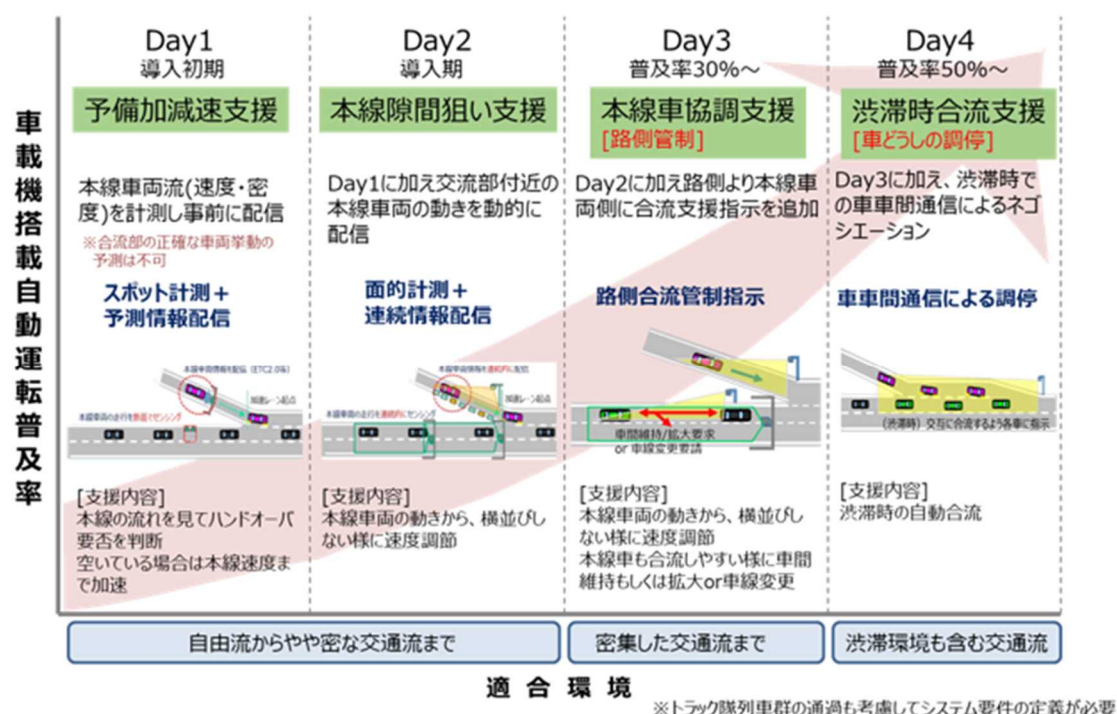


図 1-1 合流支援ロードマップ¹

¹ 合流支援シミュレーションに関する検討会 自工会資料より

1.3. 事業の目的

本事業の目的は、第一に、合流支援システム検証のため、合流部付近における合流車両や本線車両の挙動を再現したシミュレーション環境を構築することである。

第二に、構築したシミュレーション環境を用いて Day2 システムの導入による合流改善効果を導出し、Day2 システムのコンセプト成立性を確認することである。加えてセンサを始めとしたシステム物理条件と Day2 システムのコンセプト成立性の関係や交通流条件変化時の合流改善効果についても確認する。

第三に、構築したシミュレーション環境を用いて Day3 システムの導入による合流改善効果を導出し、Day3 システムのコンセプト成立性を確認することである。

1.4. 事業の概要

本事業では、以下の項目を実施した。

はじめに、合流支援システム検証のためのシミュレーション環境構築に向けて、分析対象箇所を選定と対象箇所における車両軌跡データの取得を行った。また、合流支援システム検証における評価の基準として、合流挙動の評価方法を検討した。さらに Day2 システム・Day3 システムのコンセプトをシミュレーション環境上に再現し、合流支援システム検証のためのシミュレーション環境を構築した。

Day2 システムの検証として、構築したシミュレーション環境を用いて Day2 システムのコンセプト成立性を評価した。また、システム物理条件変更時の合流改善効果を検証することで Day2 システムにおいてコンセプト成立性が確保されるシステム物理条件の整理を行った。加えて交通流条件変更時の Day2 システムの合流改善効果を検証した。

Day3 システムの検証として、Day2 システムの合流改善効果が低減した交通流条件を対象に Day3 システムのコンセプト成立性を検証した。Day3 システムのコンセプト成立性の検証においては、自動運転車の混在率の変化も考慮した。

最後に、分析対象箇所において1日の交通流を想定したときの合流支援システムによる合流改善効果を推計した。

以降では、以下の項目について、それぞれ括弧内の章で詳細を報告する。

- | | |
|--------------------------------------|------|
| ① 分析対象箇所を選定および車両軌跡データの取得 | (2章) |
| ② 合流挙動の評価方法の検討 | (3章) |
| ③ 合流支援システム検証のためのシミュレーション環境構築 | (4章) |
| ④ シミュレーション環境を用いた合流支援システム検証における諸条件の検討 | (5章) |
| ⑤ Day2 システムの検証 | (6章) |
| ⑥ Day3 システムの検証 | (7章) |
| ⑦ 実交通流を想定した合流支援システムの1日の導入効果推計 | (8章) |

2. 分析対象箇所の選定および上流部軌跡データの取得

2.1. 分析対象箇所の選定

合流車線長（ハードノーズからテーパー端までの距離）が短い高速道路等の合流部は、自動運転車両の制御が難しいユースケースの一つであり、事前に車両位置情報等を自動運転車両に共有する合流支援システムが、有効に機能する場面であると考えられる。そこで、本事業では合流支援システムの分析対象箇所として、特に合流車線長が短いと考えられる首都高速道路の合流部を取り上げることとした。

首都高速道路の合流部（入口）には、旧規格と新規格の2つの規格が存在する。首都高速道路の各入口について道路線形調査を行い、規格ごとに合流車線長を整理すると、図 2-1 の通りとなった。旧規格の合流部は合流車線長が短く、新規格は合流車線長が長いという傾向があることが判明した。

合流車線長の長い新規格では、合流支援なしの自立走行で合流が達成可能である可能性がある一方、合流車線長の短い旧規格では、ハードノーズ到達から合流区間終了地点までの走行時間が短く、合流支援が有効なケースが多いと考えられる。そのため本事業では旧規格の合流部を取り上げることとした。

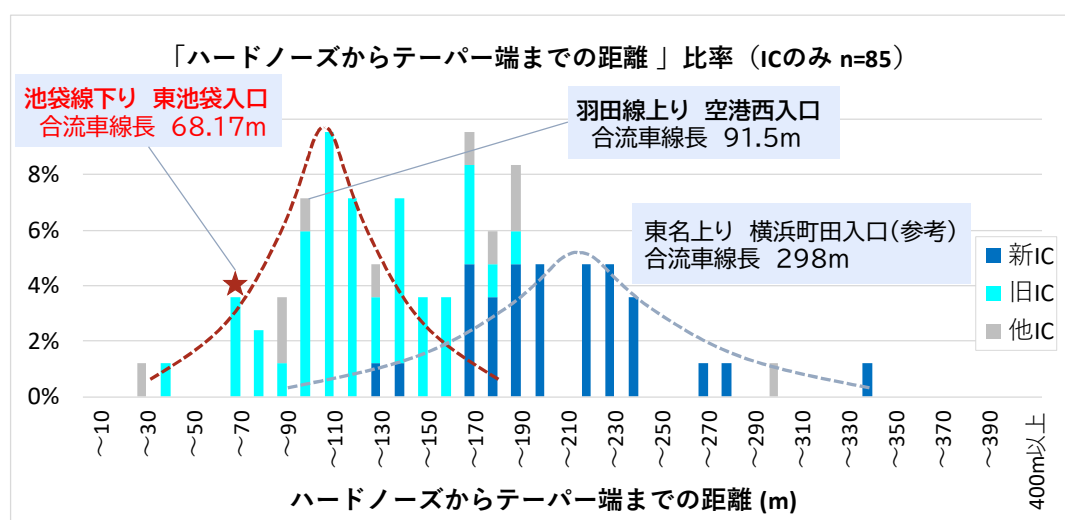


図 2-1 ハードノーズからテーパー端までの距離別の、首都高速道路の合流部（入口）の比率

合流部入口が接する本線の1日当たりの交通流量と合流車線長の関係を整理したのが図 2-2 の通りである。旧規格の合流部の中でも首都高速5号池袋線下り東池袋入口（以下、東池袋入口）は、特に合流車線長が非常に短い入口であり、かつ1日当たりの交通流量も平均的な量があることがわかる。東池袋入口は、合流支援システムの導入に向けた検討の対象箇所として有効であることが確認できた。

また、東池袋入口は、経済産業省 SAKURA プロジェクトにおいて取得した東池袋入口合流部の軌跡データ（以下、合流部軌跡データ）に基づき合流挙動を再現したシミュレーションモデルが存在する。そのため本事業の2021年度・2022年度の取り組みでは、合流支援システム検証の対象箇所として、東池袋入口を選定した。

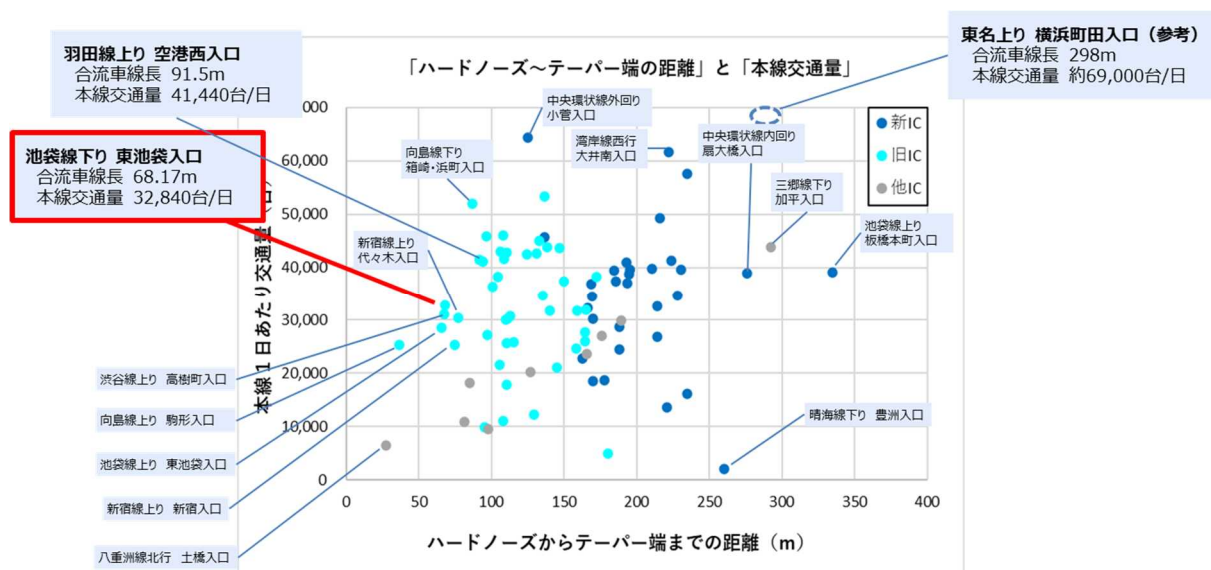


図 2-2 ハードノーズからテーパー端までの距離別×本線交通量別の首都高速道路の合流部（入口）

なお、将来的な取り組みとして、東池袋入口以外の分析対象箇所を選定するに際し、合流車線長・本線1日当たりの交通流量の他に、合流車線上流部に位置する料金所から合流部までの距離についても加味することが望ましいことを付記しておく。これは、料金所から合流部までの距離によって、合流支援システムの支援方法は大きく影響を受けるためである。

東池袋入口は、東池袋 IC の料金所を出てから合流部までの合流車線の区間が 300m 以上ある。そのため、料金所を出た合流車線の車両が本線合流部に向かうまでの間に距離的な猶予がある。その間に合流車両が本線車速度に達するまでに加速をしながら、並行して合流支援システムから本線車線情報の配信を受け、事前に速度を変更し、合流に備える行動を取る余裕がある箇所であるといえる。一方、例えば首都高速1号羽田線 上り 空港西入口（以下、空港西入口）は、東池袋入口と同程度の合流車線長・交通流量がある入口であるが、合流車線上流部の料金所から本線合流部までの区間が 140m と東池袋入口の半分以下である。この短い区間で合流車両は、本線車速度に達するまでに加速をせねばならず、合流支援システムからの情報配信を受けたとしても、合流に備えた行動を取る余裕はない箇所であるといえる。そのため、空港西入口で合流支援システムを利用してスムーズな合流を達成するためには、配信する本線車線情報や本線車線情報を受信した合流車両の行動を、東池袋入口に導入する合流支援システムよりも高度に工夫する必要があると考えられる。

本事業ではこの点も考慮しつつ、合流支援システムの基礎的な知見を得ることを第一優先としたため、空港西入口ではなく、合流に備えた行動を取る余裕がある東池袋入口を分析対象箇所として選定している。

2.2. 上流部軌跡データの取得

合流支援システムが提供する合流支援サービスの1つである合流自動運転車両への本線隙間狙い支援は、本線を走行する車両の情報をセンサで取得し、合流車線上の車両に配信するサービスである。シミュレーションを用いて本線隙間狙い支援の効果検証を行うためには、本線を走行する車両の挙動が高い精度でシミュレーション上に再現されている必要がある。

本事業では合流支援システムの分析を行う対象箇所である東池袋入口は、経済産業省 SAKURA プロジェクトにおいて取得した合流部軌跡データから作成したシミュレーションモデルが存在する。しかし、この合流部軌跡データの本線データ取得対象範囲は合流上流部（ハードノーズ端点から上流に）90m程度までである。したがって、既存のシミュレーションモデルを用いて合流支援システムの効果検証を行うためには、上流部の車両挙動の精度が不十分であった。

そのため、東池袋入口の本線上流部の軌跡データ（以下、上流部軌跡データ）を新たに取得し、上流部の車両挙動の精度を高めることとした。2022年7月21日（木）7:00-19:00に、東池袋入口の本線上流部（図2-3の3か所の範囲）を対象として動画撮影を行った。



図 2-3 動画撮影箇所

※背景の航空写真の取得元：<https://maps.gsi.go.jp>（閲覧日：2023/1/31）

上流部軌跡データの動画は、合流部付近の建物に設置した定点カメラを利用して撮影している。取得したカメラの画角は、それぞれの図 2-4 とおりである。下り線の東池袋出口方面、および東池袋入口からのランプウェイによって死角ができ、一部撮影できない部分があることがわかる。

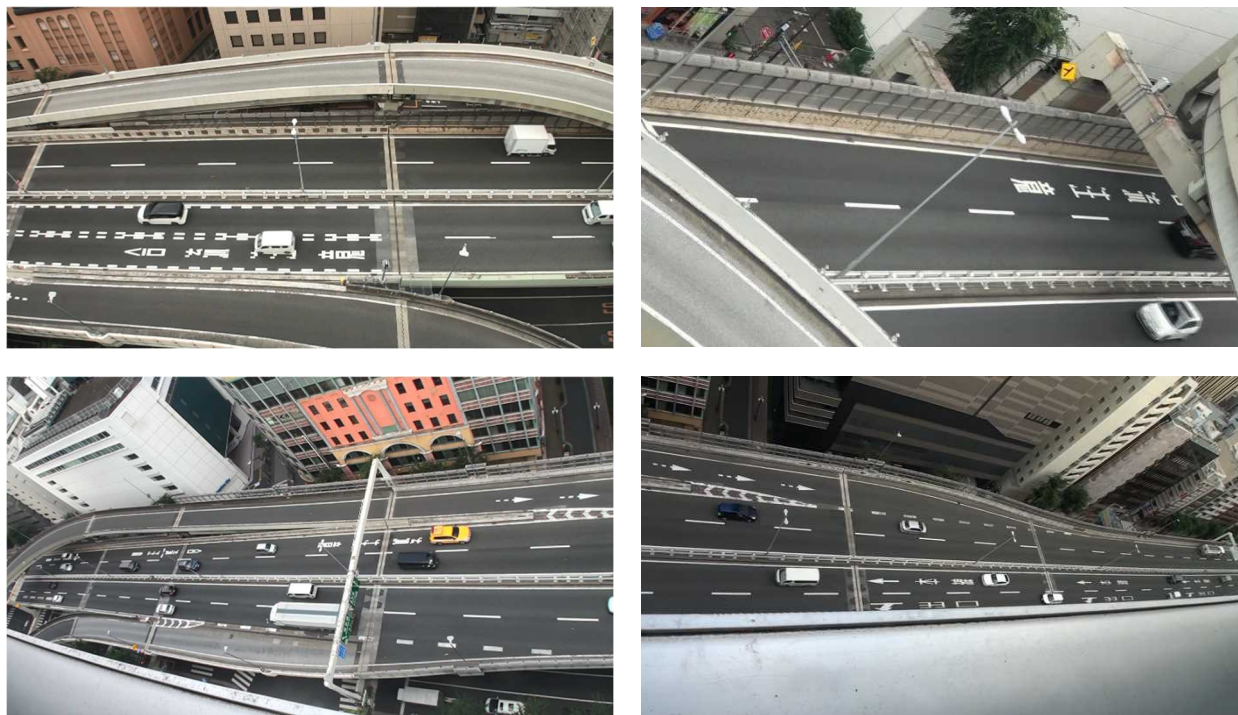


図 2-4 カメラ画角（カメラ 1～4）

取得した上流部軌跡データのうち、本線交通流量が粗の時間帯から密の時間帯をカバーするため、7:00-12:00, 15:00-19:00(計 9 時間)の時間帯のデータを利用した。取得した上流部軌跡データは図 2-5 の通りである。y 座標成分の推移が段階的であり、このまま上流部軌跡データを利用して車両挙動を構築すると、加速度が局所的に大きくなってしまふことが考えられたため、上流部軌跡データのクレンジングを行った。

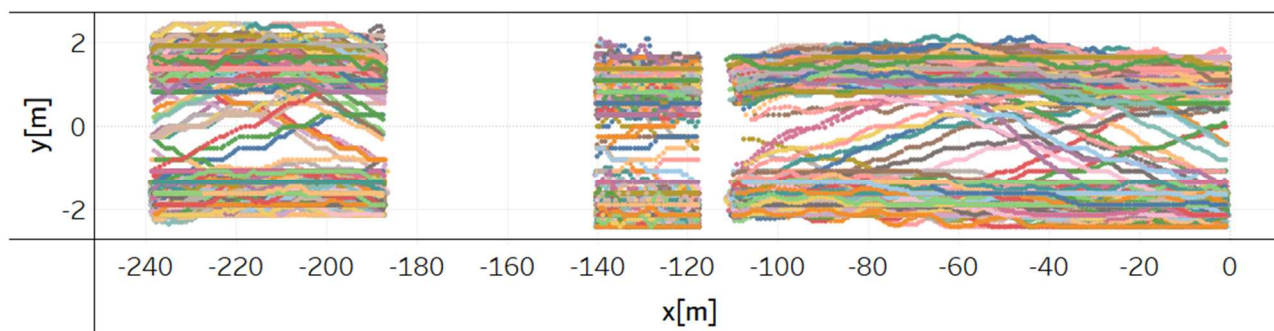


図 2-5 取得した上流部軌跡データ（クレンジング前）

クレンジング手法として、移動平均＋カルマン smoother を利用した。この手法は、SAKURA プロジェクトの合流部軌跡データに対して実施した処理と同様の処理である。図 2-6 に、上流部軌跡データに対してクレンジングを実施した結果を示す。クレンジングにより、軌跡の y 座標成分が連続的になった一方で、クレンジングによりデータの区間が若干短くなった。

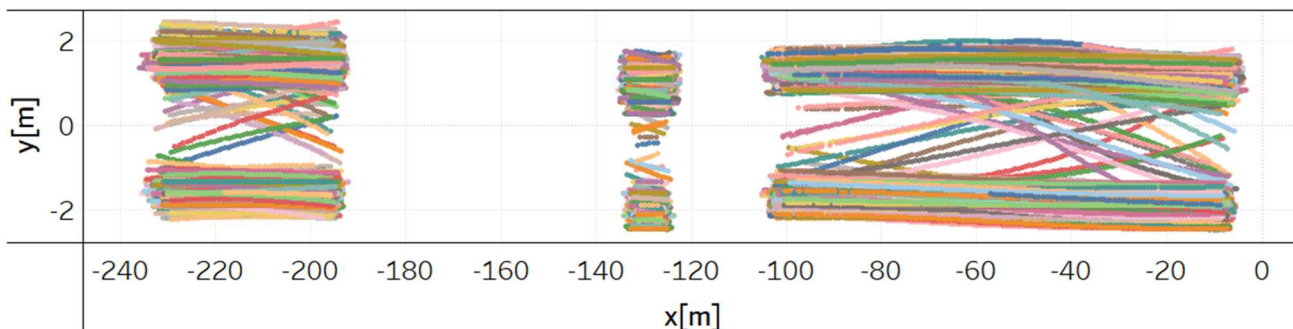


図 2-6 取得した上流部軌跡データ（クレンジング後）

図 2-7 に、クレンジング後の上流部軌跡データを用いて作成した平均通過速度と通過台数の分布（以下、QV 特性）と、同じ場所で 2021 年度に取得した 1 週間分のトラフィックカウンタデータ（以下、トラカンデータ）（5.1 節 交通流条件 参照）から作成した QV 特性を示す。2 つの QV 特性を比較することで、どちらも通常走行時の平均通過速度が 60km/h～80km/h であること、また後述する飽和度区分で分類した場合の、各飽和度の発生頻度が同様の傾向となっていることを確認できた。

このことから、上流部軌跡データを取得した時間帯は、特別な交通状況ではなく東池袋入口における日常的な交通状況であると判断し、本データを利用して本線上流部のモデルの精緻化を進めることとした。

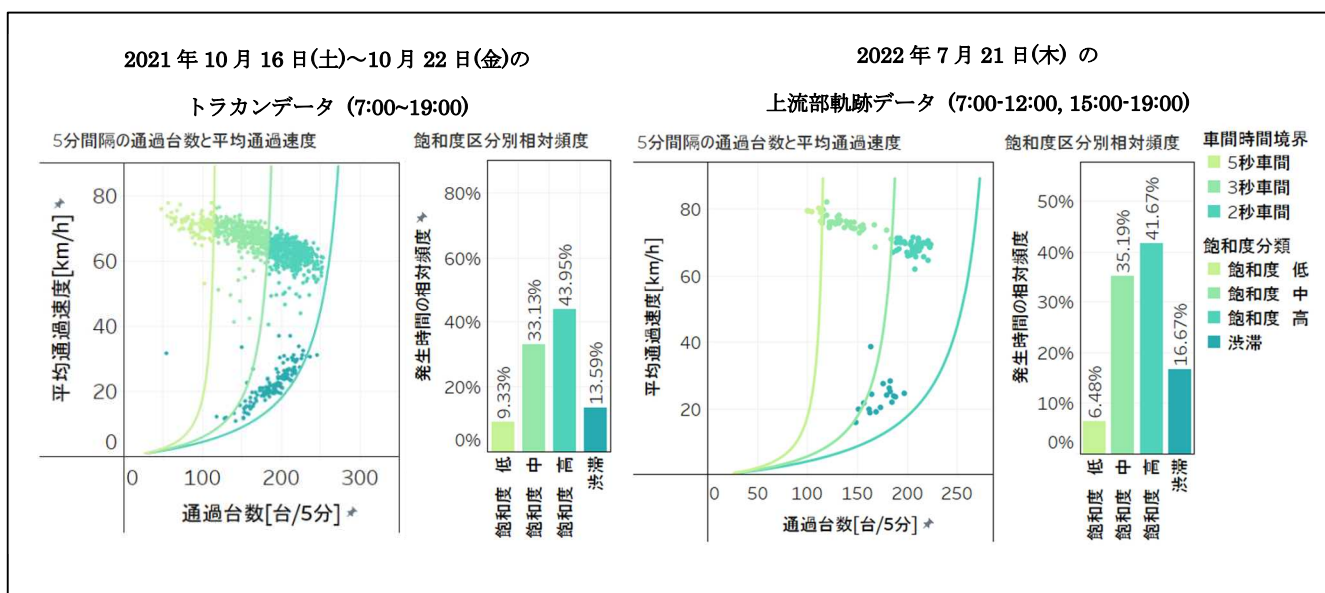


図 2-7 トラカンデータと取得した上流部軌跡データの QV 特性の比較

3. 合流の評価方法の検討

3.1. 評価点マップ

合流支援システムの検証にあたって、合流支援システムの導入による合流改善効果を合流車両のドライバー視点で評価する必要がある。そこで、評価指標として「評価点」を導入し、下記の2つの状況を区別し配点できるようにすることとした。

- ・ 合流車両が本線車両に対して接近する場合、車間距離がある程度長ければ余裕のある合流とする評価とする。ただし、合流車両と本線車両の速度差が大きい（接近する速度が速い）場合は、合流した後の速度調整に時間を要し、その間に距離が詰まることを考慮し、車間距離が長くても余裕のない合流として扱うこととする。
- ・ 合流車両が本線車両に対して遠ざかる場合、車間距離がある程度長ければ余裕のある合流の評価とする。合流車両と本線車両の速度差が大きい（遠ざかる速度が速い）場合でも、遠ざかるのであれば合流した後の速度調整は不要となるため、速度に応じて評価は変化しない。

配点の基準について、合流支援システムによって達成したい、余裕のある合流を100点とした。そこから合流時の余裕がなくなるほど評価点が下がる仕組みとした。後述の配点の設定と合わせて、評価点水準の区分を合流の余裕度と対応する形で表3-1のように整理した。

表 3-1 評価点水準の区分と合流の余裕度

評価点水準	色	合流の余裕度	合流後の速度調整	速度調整後の車間
100点≦評価点	青色	余裕のある合流	0.2G以下の <u>弱い減速</u> が必要	25m以上の <u>広い車間</u> を <u>確保</u> できる
0点≦評価点<100点	黄色	余裕がないと感じる ことのある合流	0.2～0.3Gの 減速が必要	15～25mの <u>十分な車間</u> を <u>確保</u> できる
評価点<0点	赤色	余裕のない合流	0.3G以上の <u>強い減速</u> が必要	15m以上の <u>十分な車間</u> を <u>確保できない</u>

合流の評価を行うため、合流時における合流車両と周辺車両の状況に応じて評価点をつけることとした。また、評価点の算出にあたり、合流車両と本線にいる周辺車両との『車間距離』『相対速度』を入力とする関数を構築した。合流部軌跡データから抽出した代表的な合流時の車両挙動の動画を参照しつつ合流支援検討会の関係者と議論を行うことで、評価点算出関数について、合流車両が本線車両に対して接近/離反の状況を表現できるように図3-1の通りとした。

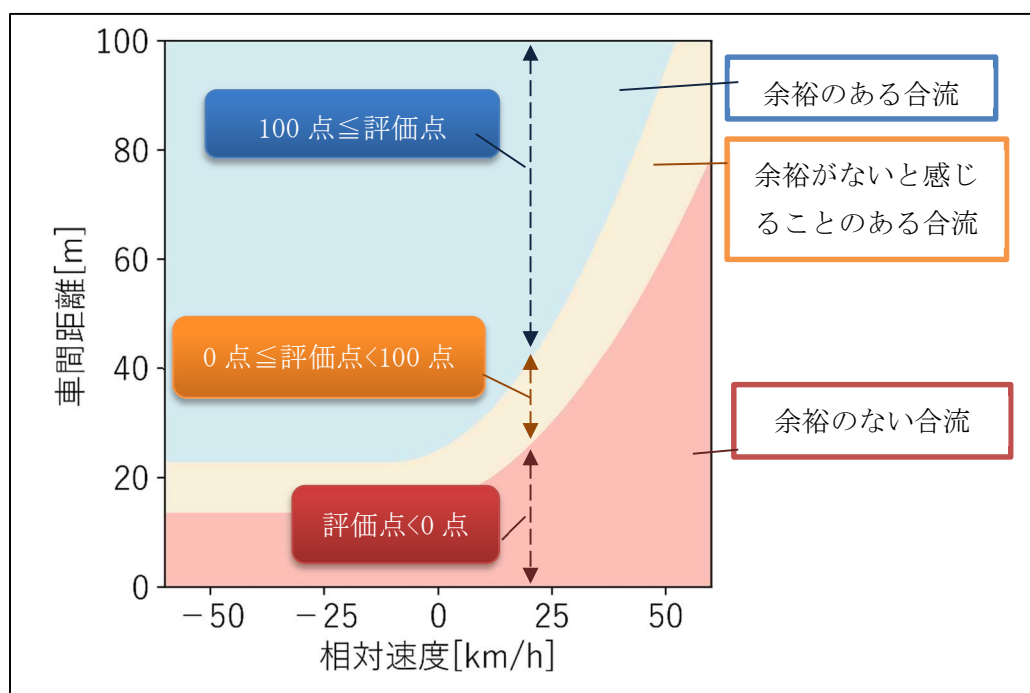


図 3-1 評価点マップ

評価点の算出方法としては、以下の考え方をもとにしている。

図 3-2 のように、合流車両に対して本線後方車両が接近している合流を仮定する。本線後方車両は合流車両より速い場合、合流車両が本線に合流してきたのを確認した後、反応遅れ時間の後に減速を開始し、前方の合流車両と同じ速度になるまで速度調整を行う。この時、反応遅れ時間が長く、減速が緩制動でも、速度調整後の車間距離が十分確保できている場合に、余裕がある合流となる。反対に、反応遅れ時間が短く、減速が急制動であっても、速度調整後の車間距離が十分確保できていない場合は、余裕がない合流となる。

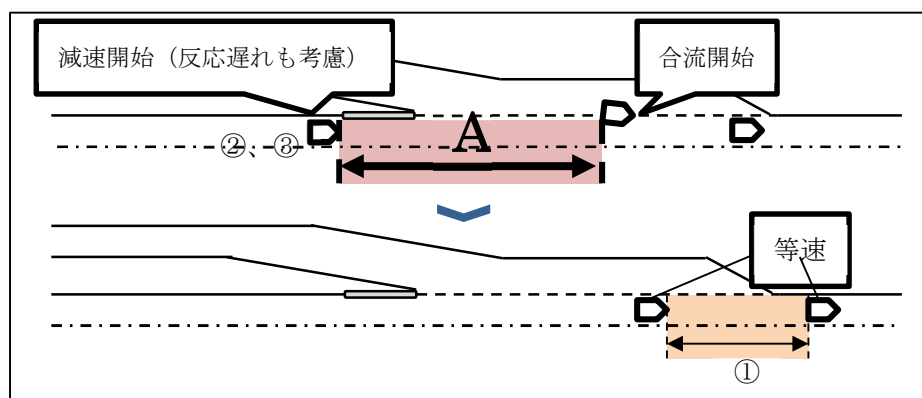


図 3-2 評価点の算出時に想定する合流の状況

反応遅れ時間、減速制動、速度調整後の車間距離のそれぞれについて、表 3-1 に従って、一般的なドライバーが概ね余裕を感じる組み合わせを 100 点、一般的なドライバーが概ね余裕がないと感じる組み合わせを 0 点とし、表 3-2 の数値を採用することとした。

表 3-2 評価点マップが採用している関数の値およびその出典

項目	0 点境界線	100 点境界線
①減速後の車間距離 マージン [m]	15^2	25^3
②反応遅れ時間 [秒]	1.0^4	1.5^4
③減速度 [G]	0.3^5	0.2^5
A (x: 相対速度)	$\frac{x^2}{0.6G} + 1.0x + 15$	$\frac{x^2}{0.4G} + 1.5x + 25$

評価点点数の算出方法は、下記の機序としている。

1. 評価対象とする相対速度を対象とし、0 点となる車間距離と 100 点となる車間距離を取得する。
これら 2 つを利用し、0 点以上 100 点未満の領域における単位車間距離あたりの評価点変化量を算出する。
2. 0 点以上 100 点未満の領域と、0 点未満の領域について、0 点となる車間距離を基準として、単位車間距離あたりの評価点変化量を利用し、点数を算出する。
3. 100 点以上の領域については、後述の上限点が 200 点である場合は、同様の方法で 100 点以上 200 点以下について、点数を算出する。

図 3-3 では相対速度が 25km/h の場合、0 点となる車間距離が 47.7m、100 点となる車間距離が 30.1m になることで単位車間距離あたりの評価点変化量は 5.682[点/m]となり、車間距離 39m の場合は約 50 点と評価されることを示している。

また、0 点となる車間距離、100 点となる車間距離が連続した関数であるため、評価点マップ内に同じ評価点点数である箇所をつなぎ合わせ等高線を引くと、下図のように 0 点、100 点の境界線を補間するような形状となる。

² 15m : 3 車長分

³ 25m : 高速道の区画線（破線）1 区間分 + 1 車長分

⁴ H28 年「高速道路における適正な車両間隔に関する調査研究」公益財団法人 高速道路調査会（<https://www.express-highway.or.jp/info/document/sharyokannaku2.pdf>）を参照

⁵ ISO 定義 ACC 最大減速度から引用

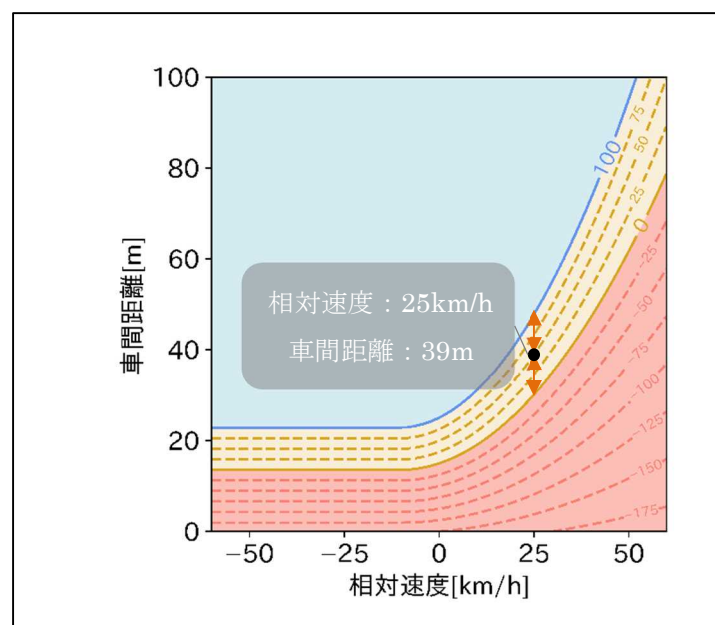


図 3-3 評価点マップにおける点数補間結果

評価点による指標は下記の2つの場面で利用する。

1つ目は、シミュレーション中、合流支援を受けた合流自動運転車両が速度調整・本線隙間狙いのための行動を決定する場面である。合流車線を走行する自動運転車両が Day2・Day3 システムから本線車両の情報提供を受けた際、その時点から未来に「最も良い合流が達成できる加速/減速」の判断を行う際の基準として評価点を利用する。2021年度の評価点マップ試作時に、100点以上を上限とすることで合流車両の合流改善が見込まれると判明した。そのため、この場合においては評価点の上限値は200点とした。

2つ目は、シミュレーション完了後の結果を評価する場面である。各シナリオのシミュレーション実行ログを対象とし、その中で行われた各合流自動運転車両の合流行動の良し悪しを評価する際、評価点マップを用いて評価点をつける。この場合、余裕がある合流が達成できれば十分であるため、評価点の上限値は100点とした。

3.2. 合流評価対象分類

本事業において合流挙動の分析を進める中で、3.1節で構築した評価点による合流評価が不適切である場面が、少なくない頻度で確認された。具体的には「本線の合流部付近に複数の車両が走行している状況で、合流車両が狭い車間に合流するのではなく、大きく減速して本線の複数の車両を見送ること」で、その上流にある広い車間に合流する」場面である。このような場面では、減速して広い車間に合流することにより、より余裕がある合流が達成できる（評価点が向上する）。しかし、東池袋入口のような自動車専用道における合流において、広い車間を求めて複数台見送る挙動は、スムーズな交通を妨げる影響があり好ましくないと考えられる。したがって、広い車間を求めて複数台見送る挙動は、評価点が向上したとしても、合流行動が改善したとは言えないと考えた。このような複数台の見送りを行う合流は評価点ではなく複数台見送りの有無により評価することが望ましいと考え、図 3-4 のフローを用いて評価方法ごとに合流車両を分類するとした。フロー内で評価対象外となる「不要な追い抜き」については後述する。

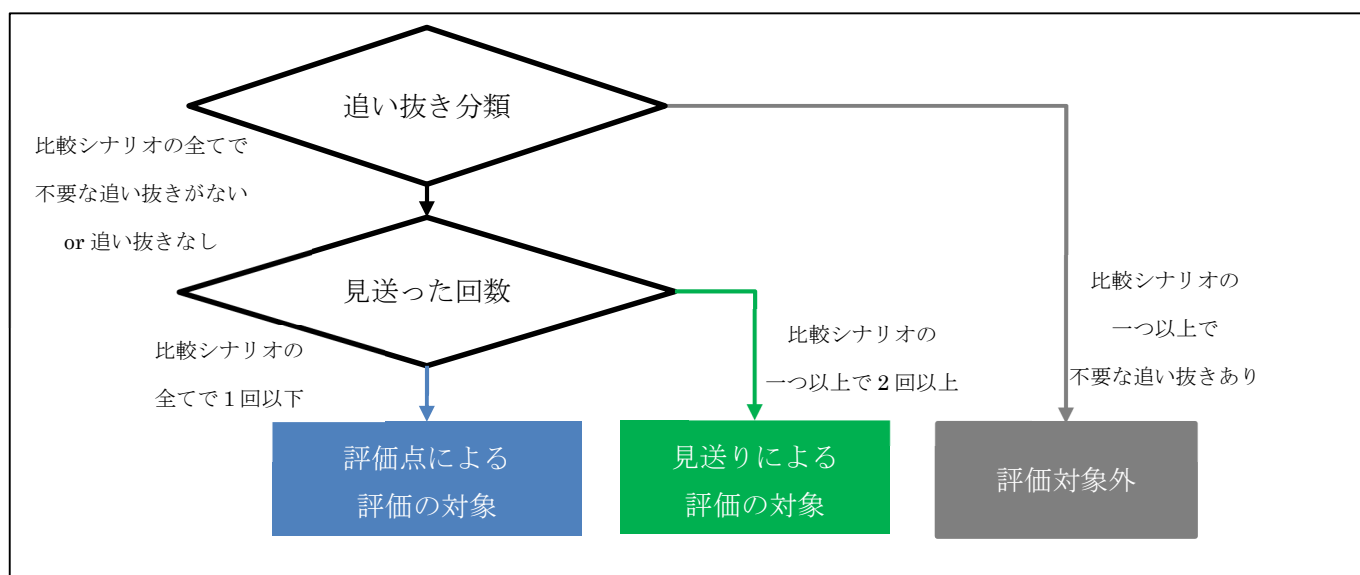


図 3-4 評価方法の決定フロー

4. 合流支援システム検証のためのシミュレーション環境構築

4.1. 分析対象箇所の道路線形および合流挙動を再現したベースシミュレーション環境

合流支援システムの効果検証にあたっては、実際の道路にシステムを導入し検証することも考えられるが、導入したシステムを改修・変更することは容易ではなく、多様な条件下における検証は困難である。そこで、合流支援システムをシミュレーションモデルに落とし込んでコンピュータ上に再現し、コンピュータ上のシミュレーションにより評価することが有効である。そのためには合流支援システムそのもののモデルのみならず、合流支援システムが対象とする道路交通環境もシミュレーションモデルとして用意する必要がある。合流支援システムが近い将来に社会実装されることを意識した検証を行うためには、システムが対象とする車両が走行する道路環境も仮想的なものではなく、実道路を再現した環境であることが望ましい。

そこで、構造計画研究所が所有する首都高速5号池袋線下り東池袋入口のシミュレーションモデル（以下、東池袋モデル）を活用する。このシミュレーションモデルは、シミュレーション上で車両同士の相互作用を考慮した実車両の模倣が求められる性能評価（例：自動運転車両が一般交通流の中で自然に走行できるか等）を行うため、合流部軌跡データを用いて交通流シミュレーションソフト「Vissim」上に構築されたシミュレーションモデルである。下記の3つの実道路環境をシミュレーション上に再現している。

1. 道路ネットワークモデル：道路形状
2. 車両発生モデル：発生する車両の属性
3. 合流発生時の車両挙動モデル：合流時の車両挙動

4.1.1. 道路ネットワークモデル

東池袋モデルでは、東池袋入口における白線の座標データ（緯度、経度、標高）を利用し、東池袋入口の上流部 329m 地点～下流部 398m 地点までの区間における道路形状（道路長、幅員、勾配、車線数、合流位置など）をシミュレーション上に反映している。本モデルの全体像は図 4-1 の通りである。

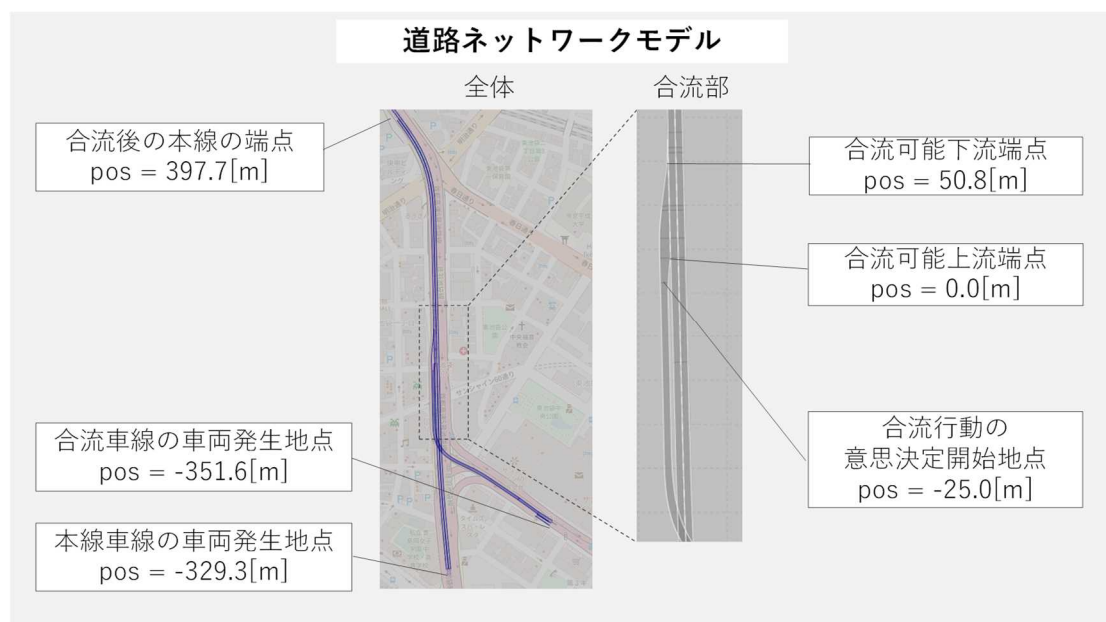


図 4-1 分析対象箇所の道路ネットワークモデル

東池袋モデルの道路は大きく 2 つの道路で構築されている。首都高速 5 号池袋線下りの護国寺出入口から北池袋出入口に至る区間のうち、東池袋入口付近のみを切り取った 2 車線で構成されている道路（以下、本線）と、東池袋入口の IC から首都高速 5 号池袋線下りに合流するまでの道路（以下、合流車線）である。本線のうち、下流に向かって左車線を走行車線、右車線を追越車線とする。

シミュレーション上では、本線および合流車線の上流部端点（本線：上流部 329m 地点、合流車線：上流部 352m 地点）で車両が発生する。本線上流端点で発生した車両はそのまま本線を走行する。合流車線上流端点で発生した車両は合流車線を走行し、本線と合流車線が交わる箇所で本線に合流した後、本線を走行する。両方の車両は本線を下流端点（下流部 398m 地点）まで走行し、シミュレーション上から消失する。

4.1.2. 車両発生モデル

合流車線、走行車線、追越車線の3車線の上流端点から発生する車両について、シミュレーション上で発生台数、走行速度、車間距離の3項目を合流部軌跡データに基づき設定している。

発生台数は、合流部軌跡データから取得した時間当たりの通過台数を与えている。なお後述する飽和度を表現する際は、この発生台数の項目のみを変更し、走行速度、車間時間の項目については変更していない。

走行速度は、合流部軌跡データをもとに作成した走行速度分布を与えている。SAKURA プロジェクトにおいて取得された時間帯ごとのデータのうち、速度分布の最頻値が60km/h～70km/h程度の通常走行時間帯のデータを走行速度分布として使用している。速度分布の最頻値がそれ以下となる低速走行時間帯についてはシミュレーションモデルの構築対象から除外している。これは、東池袋モデルの作成目的が、自動運転車両が通常交通流量の中で自然な走行を行うことができるのかという観点の性能評価のためであることに由来する。

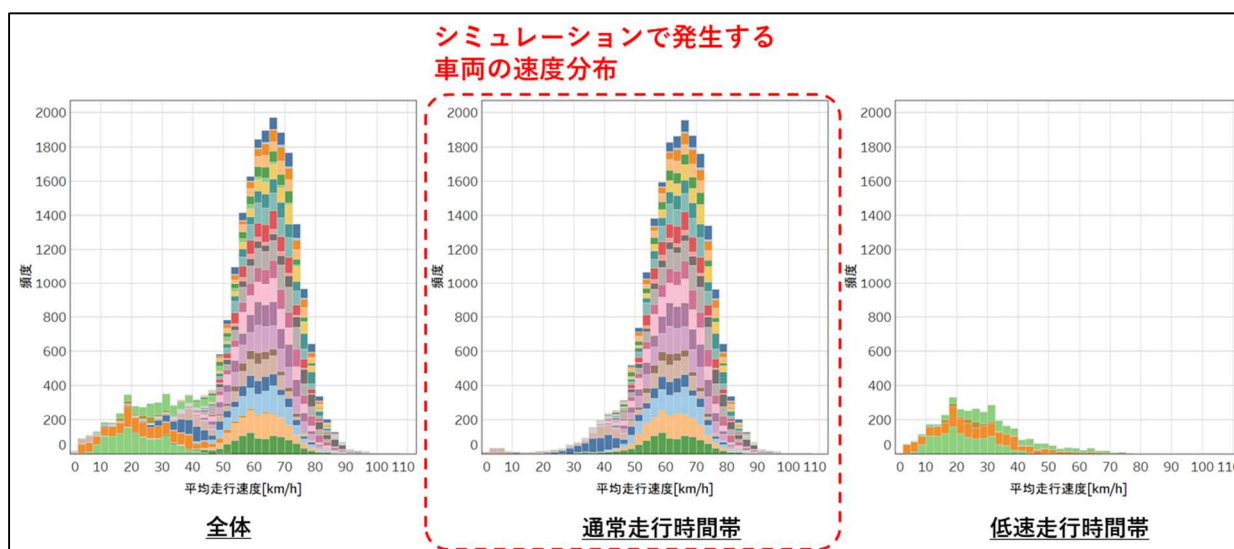


図 4-2 実データより取得した車両の走行速度分布

東池袋モデルにおける再現性を示すため、合流支援なし、自動運転車両混在率 0%のシナリオでシミュレーションを実行した結果（図中、「シーン調整後シミュレーション結果」を参照）と合流部軌跡データとの比較結果を図 4-3 に示す。対象区間をハードノーズ地点のおよそ 70m 下流～130m 上流までとしたとき、その区間を走行する各車両の速度・加速度・車間距離の平均値の分布を示している。本モデルでは、単純に対象道路エリア内の交通流の入出力のデータを合わせるだけでなく、合流部での車両同士の相互作用（シーン別の車両挙動学習）による走行挙動を組み込んでいるため再現性が高く、東池袋入口の交通流および合流挙動の特徴を表現することができている。

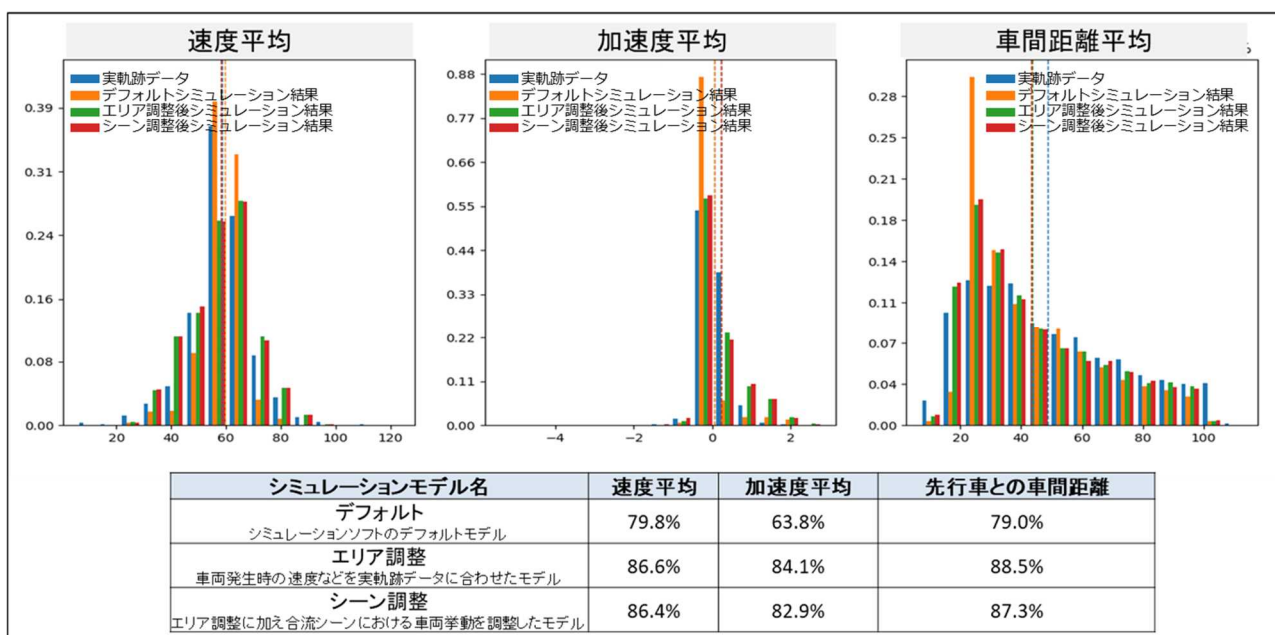


図 4-3 シミュレーション実行結果の、速度・加速度・車間距離の平均

後述する上流部モデルとの関係を述べる。合流部軌跡データを取得した地点は東池袋入口の合流部付近であるが、その範囲は合流上流部 90m 程度までであり、東池袋モデルではこの範囲の台数・走行速度・車間距離の情報を、各上流端点に拡張して設定している。本線上流部における走行速度の変化については、4.2 節で後述する上流部モデルを採用している。

4.1.3. 合流発生時の車両挙動モデル

合流発生時の車両挙動は、合流車両と本線車両の合流に関する相互作用を意識して構築している。合流に関する相互作用とは、合流車両と合流車両の後方に位置する本線車両が行う、下記の行動選択のことを指す。実交通環境では方向指示器の点滅やアイ・コンタクトを行うなどにより達成されると考えられる。

- ・ 合流車両は、本線を走行する周辺車両との関係から「合流する」「見送る」の行動を適切に選択する
- ・ 本線車両は、合流車線および本線を走行する周辺車両との関係から、合流車両に自車前方の車間を「譲る」「譲らない（直進する）」の行動を適切に選択する

上記の相互作用をシミュレーション上で実現するため、合流部軌跡データ（経済産業省 SAKURA プロジェクトにおいて取得した東池袋入口合流部の軌跡データ）を対象に機械学習などを活用して学習した合流挙動を採用している。その際の行動を決定するアルゴリズム（以下、決定木アルゴリズム）は下記の手順に従い構築した。なお、合流部軌跡データには一部に大型車両や二輪車といった車種を含むがその発生頻度は5.4.1項で後述する通り小さく、車種別に決定木アルゴリズムを構築するにはデータ量が不足していると考え、すべての車種を普通車とみなして決定木アルゴリズムを構築した。

1. 合流部軌跡データ（経済産業省 SAKURA プロジェクトにおいて取得した東池袋入口合流部の軌跡データ）に含まれる全ての合流について、合流が発生した時点における合流車線、本線上の車両の位置情報をもとに、統計的クラスタリング（g-means 手法）により類似の合流シーンとして分類する。
2. 分類された合流シーンごとに、合流車両については「合流する」「見送る」の行動選択結果を、本線車両については「譲る」「譲らない（直進する）」の行動選択結果を目的変数とし、自車や周辺車両の速度や相対距離の情報を説明変数として、決定木を構築する。

決定木アルゴリズムを用いた合流行動の決定は以下の機序に従う。この決定木アルゴリズムにより、合流部軌跡データにみられるような合流部における合流車両・本線後方車両の相互作用をシミュレーション上で再現している。

1. 合流車両が合流行動の意思決定開始地点に到達した瞬間に自車および本線上の車両の位置情報に基づき合流シーンを分類
2. 分類された合流シーンに対応する決定木を用いて、合流車両は「合流する」「見送る」、本線後方車両は「譲る」「譲らない（直進する）」のいずれかの行動を選択
3. 双方の車両について選択された行動に準拠するようにシミュレーション上で走行挙動を変更

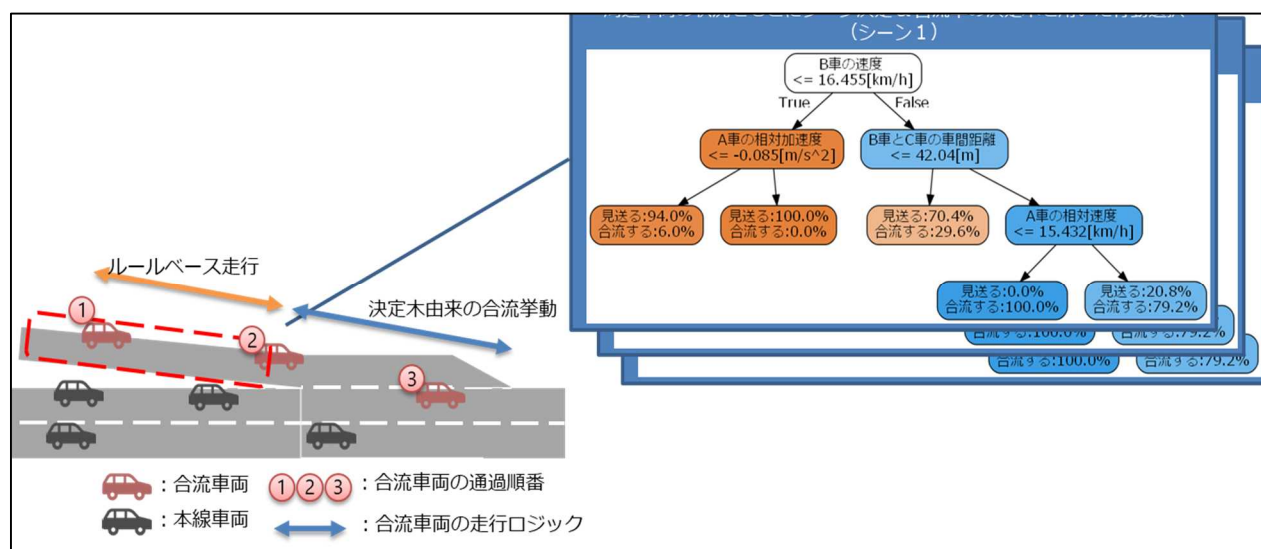


図 4-4 合流部の車両挙動の概略

なお、上記の決定木アルゴリズムについて、本事業以前の取り組みにおいて道路線形の違いによって決定木アルゴリズムが変化することが確認されている。具体的には、合流車船長が長い道路において東池袋入口とは特徴の異なる決定木アルゴリズムとなった。したがって、東池袋入口以外を対象として合流支援システム検証のためのシミュレーション環境を構築する際は、新たに対象となる箇所の道路線形（道路ネットワークモデル）や交通流（車両発生モデル）のみならず、決定木アルゴリズム（合流発生時の車両挙動モデル）についても新規に構築することが望ましい。また、多様な道路線形への合流発生時の車両挙動モデルの適応・展開を進める際には、同一の合流発生時の車両挙動モデルで合流挙動を表現できる道路線形の条件等について検討することで効率的に展開できる可能性がある。

4.2. シミュレーション環境への本線上流部走行挙動モデルの追加

4.2.1. 取得した上流部軌跡データの分析

（1） 分析方法

本項では取得した上流部軌跡データをもとに構築した上流部走行挙動モデルについて述べる。上流部軌跡データの詳細については2.2節を参照のこと。

上流部軌跡データは、カメラ画角の死角によって図4-5の通り3つのブロックで取得されている。そのため分析のため60mずつ4つの区間に分割し、それぞれの傾向を見ることとした。なお区間2はカメラの死角の影響でデータ取得範囲が20メートルと短いため、今後の分析では区間2単独で結論を出すのではなく、前後の区間1、3の結果と照らし合わせて進めていくこととした。

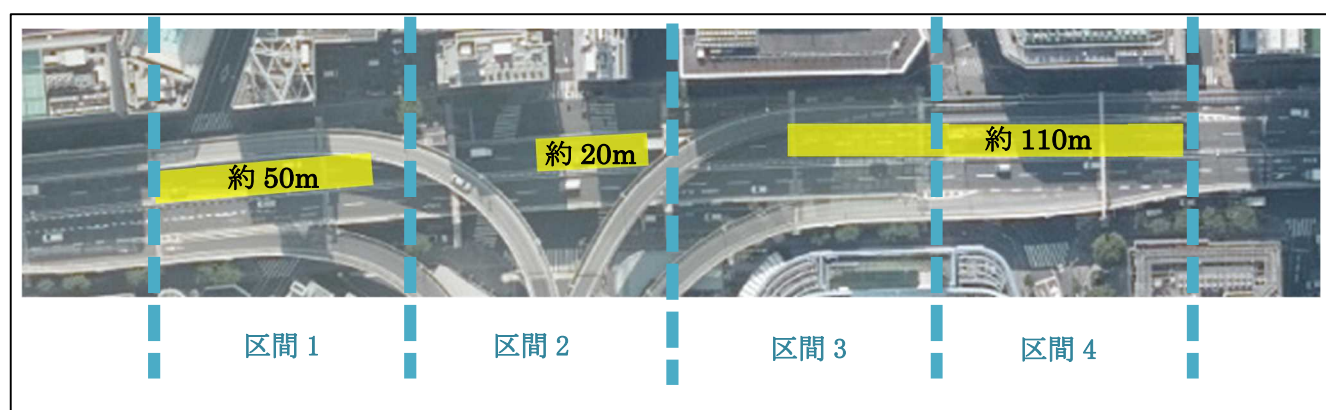


図 4-5 東池袋入口の本線上流部における4つの区間

死角の扱いについて述べる。加速度挙動については、死角領域での車両の加減速が不明なため、死角以外の取得できた領域のデータのみを対象に分析を行うこととした。一方、車線変更挙動については、死角領域を跨いだとしても、区間内で車線変更したか否か、およびその方向（右方向：走行車線→追越車線、左方向：追越車線→走行車線）については、区間の間を走行する車両の走行車線の分析により取得できる。そのため、車線変更挙動については死角に当たる領域も含んだ区間ごとの分析を行った。

（2） 加減速挙動の分析結果

合流支援システムのセンシングの対象となる走行車線について、60m区間ごと、飽和度ごとの平均加速度分布を算出した。結果は図4-6の通りである。

区間ごと・飽和度ごとの各区分において、本線上流部加減速モデルの導入是非の閾値として、各区間の平均加減速が $\pm 0.5\text{m/s}^2$ の範囲を超える車両の割合が5%より多いかを目安とした。これは、東池袋モデルが利用している交通流シミュレータ：Vissimの追従モデルが、おおよそ $\pm 0.05G$ （約 0.5m/s^2 ）の範囲で加減速を行うため、 0.5m/s^2 よりも強い加減速が観測できた区間・飽和度は、上流部モデルとして追加調整を行うことが望ましいと考えたからである。

分析の結果、60m 区間 4 において、 0.5m/s^2 より強い減速が 5%以上の割合で見られた。60m 区間 2 においても同様の傾向がみられたが、本区間についてはデータ取得区間が短いため結果の信頼性は低いと考えられる。60m 区間 2 において十分なデータが得られていた場合の分布は、前後の 60m 区間 1, 3 の形状に近いものになると推測されると判断し、 0.5m/s^2 よりも強い加減速は発生していないとみなした。

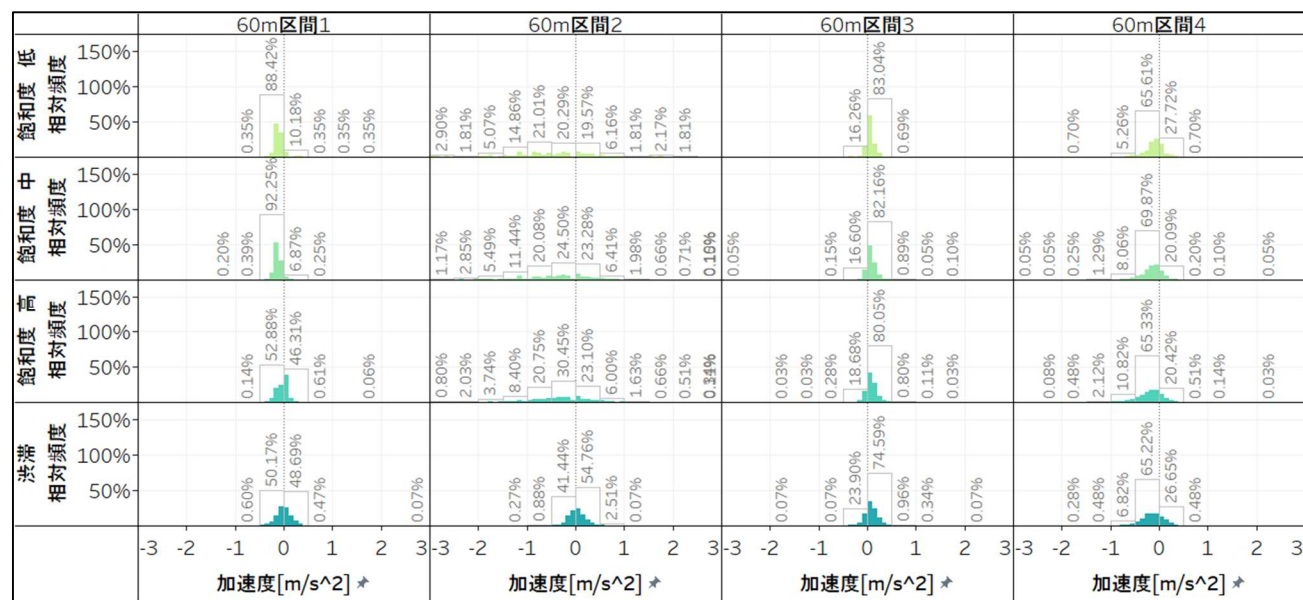


図 4-6 東池袋入口上流部における区間ごと×飽和度ごとの平均加速度分布

(3) 車線変更挙動の分析

60m 区間ごと、飽和度ごとに車線変更の発生確率を算出した。結果は図 4-7 の通りである。どの区間・飽和度においても車線変更の発生確率は約 1%以下と極めて小さいが、各飽和度・区間でコンスタントに発生していることが判明した。

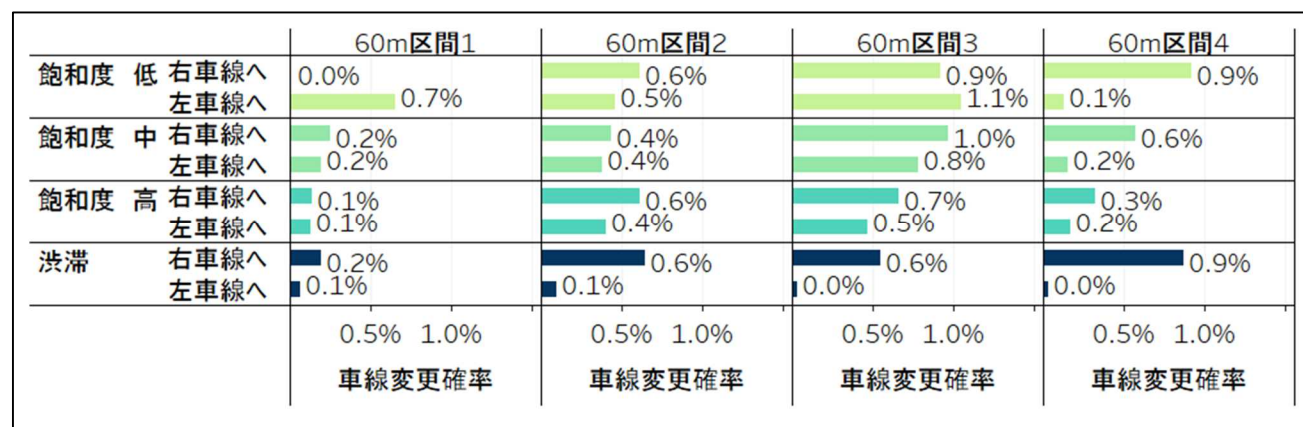


図 4-7 東池袋入口上流部における区間ごと×飽和度ごとの車線変更確率

4.2.2. 本線上流部における走行挙動の再現

4.2.1 項で説明した上流部軌跡データの加減速挙動、および車線変更頻度を、シミュレータ上で再現する。4.1 節で説明した東池袋モデルでは、加減速挙動は使用している交通流シミュレーションソフト「Vissim」のデフォルトの加減速挙動を採用しており、車線変更頻度は 0%（車線変更しない）としている。取得した上流部軌跡データに整合するように、これらを更新した。

（1） 加減速挙動の再現

上流部の加減速挙動反映前の東池袋モデルにおける加減速挙動は図 4-8 のオレンジ色の通りである。上流部軌跡データ 60m 区間 4 における減速傾向（ 0.5m/s^2 より強い減速が 5%以上の割合存在する傾向）が、加減速挙動を反映していない状態（Vissim のデフォルト加減速挙動）でも確認できた。これは区間 4 が合流部直上流であり、合流車両に反応して減速を行う本線車両が一定数存在するためであると考えられ、区間 4 における減速傾向は上流部軌跡データとシミュレーションモデルに大きく差はないと判断した。一方、大きく差があるのは、飽和度高における区間 1～3 の減速傾向である。上流部の加減速挙動反映前の東池袋モデルの結果から、飽和度高において合流直上流の区間 4 以外でも高い減速傾向が確認された。これは飽和度が高い場合、本線車両が前方車両に追いつき減速する際に、Vissim のデフォルト加減速挙動は 0.5m/s^2 よりも強い減速を行っているためである。

これは、Vissim が採用している高速道路走行用の車両追従モデルである Wiedemann99 モデルにおいて、デフォルト値の状態では追従時は $\pm 0.25\text{m/s}^2$ 程度の加減速の範囲に収まる一方で、前方車両に追いつく際は -1m/s^2 程度の減速を許容する設定となっているためである。これを解消するため、隊列走行を表現するパラメータからヒントを得て以下 2 点の変更を加えた。

1. 前方車両に気づいて減速を開始するタイミングをデフォルト状態より上流に変更
2. 前方車両への追従状態の変化に対してデフォルト状態より機敏に対応するように反応時間を変更

上流部の加減速挙動を反映した状態での、東池袋モデルにおける加減速挙動は図 4-8 の緑色の通りである。飽和度高では合流発生頻度が高いため、下流部（特に区間 3）における減速傾向をこれ以上実データに合わせることは困難であった。

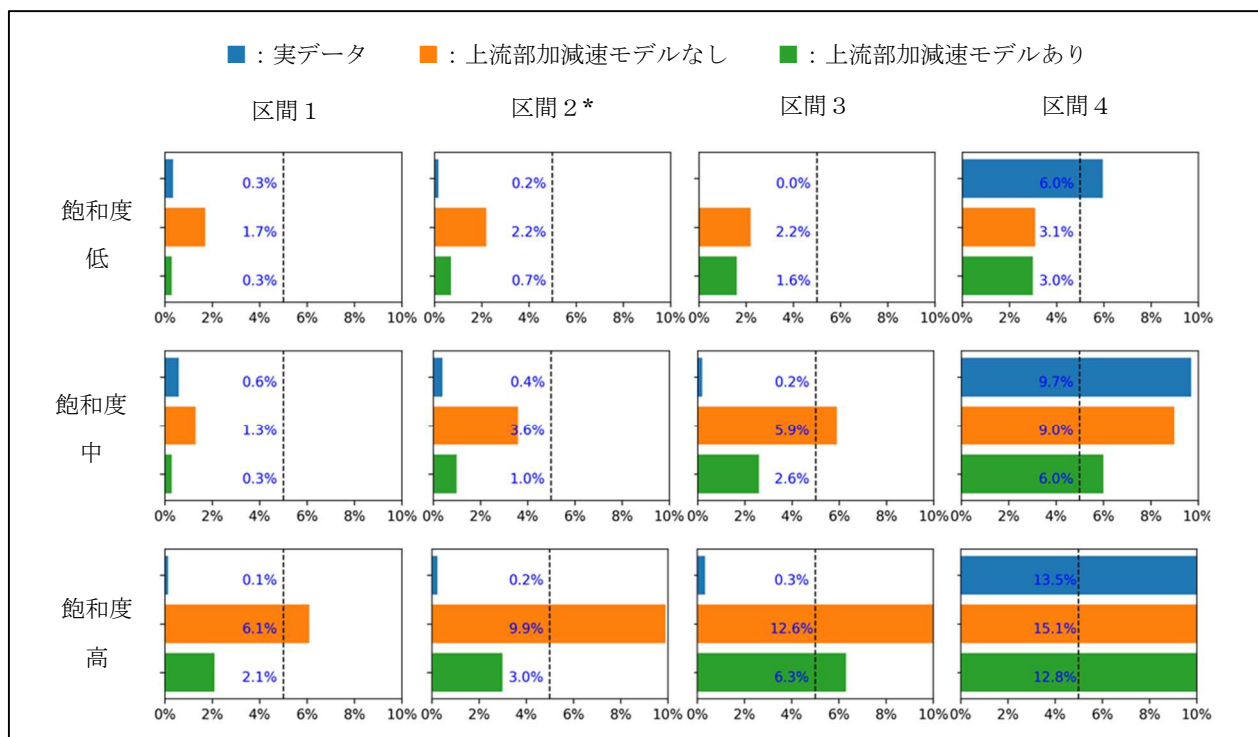


図 4-8 上流部加減速モデルの有無ごとのシミュレーション結果の実データとの比較

（2） 車線変更挙動の再現

上流部軌跡データで観測した車線変更頻度をシミュレーションモデルにそのまま設定すると、物理的に車線変更できない（十分安全なスペースがない）車両の分だけシミュレーション上での車線変更頻度が小さくなるのが想定されたため、上流部軌跡データで観測された車線変更頻度に補正係数を乗じ、車線変更頻度として与えることとした。

補正係数は、東池袋モデルで既定の車線変更頻度（例：2%）と、シミュレーションを実行して車線変更が達成された頻度（例：1.6%）をもとに算出する（例：125%=2/1.6）。この補正係数をかけた車線変更頻度を与えた場合の、飽和度・区間ごとの車線変更頻度が図 4-9 の通りである。飽和度高における左方向への車線変更が少ないという傾向や、飽和度低～中における区間2～4での右方向への車線変更が多いという傾向などがシミュレーション上に反映できていることを確認した。

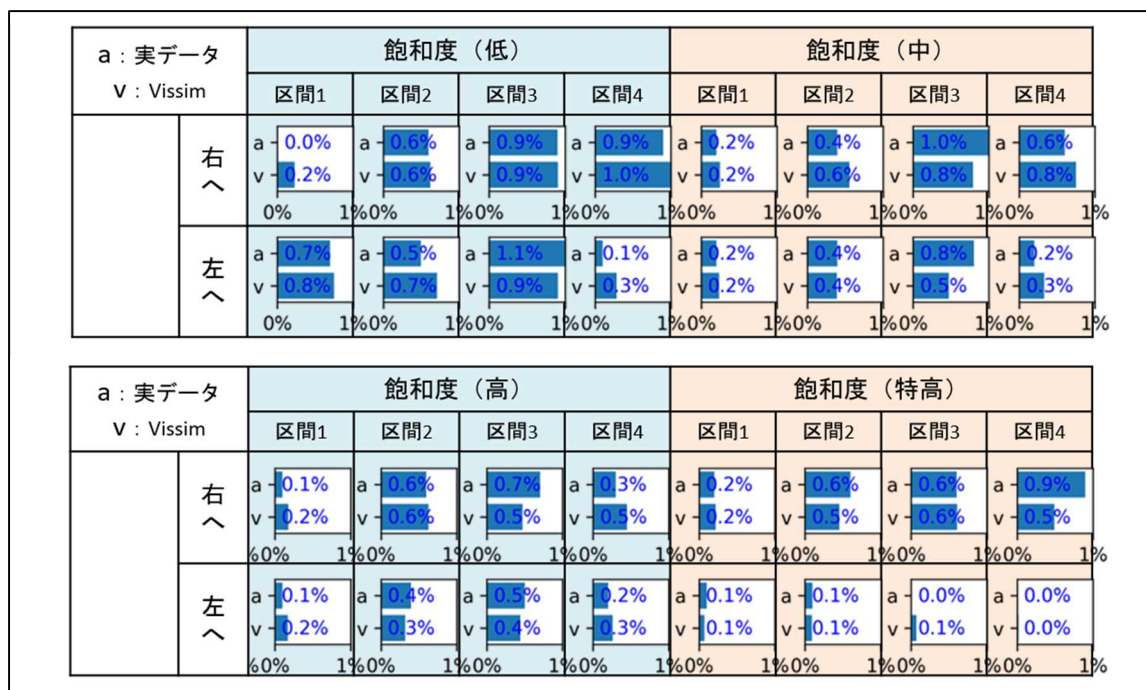


図 4-9 上流部車線変更モデルの有無ごとのシミュレーション結果の実データとの比較

4.3. シミュレーション環境への自動運転車モデルの追加

4.3.1. 自動運転車の2秒車間追従走行モデル

自動運転車両が前方車両との間に確保する車間は、ドライバーが運転する一般車両（以下、一般車）と比較して広いと考えられる。本線車線の車間が広がることで合流が改善する可能性があるため、合流支援システムの評価を行う際に、車間を広く維持する自動運転車両の特徴を加味することとした。

合流支援検討会の関係者と協議の上、自動運転車両が前方車両との間に確保する車間時間は2.0秒以上とした。図4-10は、シミュレーション結果における本線一般車と本線自動運転車の車間時間分布である。一般車の平均車間時間のピークが1.0秒前後である一方、自動運転車両の平均車間時間が2.0秒以上を確保できていることがわかる。

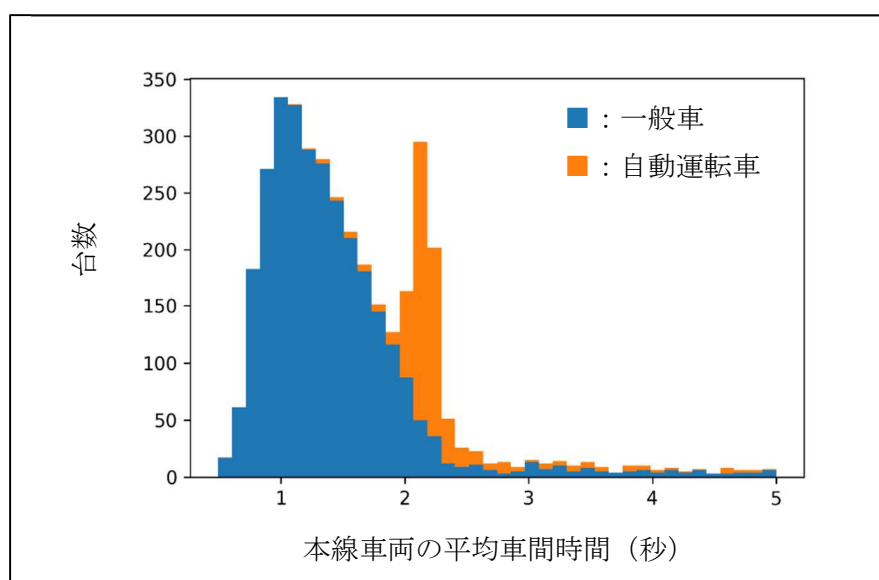


図 4-10 自動運転車両混在率 20%の時の平均車間時間の分布
(対象：3 時間分、本線車線発生台数：1800 台/H/車線、
データ取得区間：合流部上流 95m 地点～合流部下流端)

自動運転車両が前方車両との間に2.0秒の車間時間を維持して走行することによる交通容量への影響を確認するため、自動運転車両混在率が0%と20%の場合のQV特性を比較した。比較結果は、図4-11の通りである。本線一車線あたりの発生台数が1800[台/時]未満の範囲で、混在率2種のQV特性が同じ水準であることが確認できた。本線一車線あたりの発生台数が1800～2000[台/時]で、平均通過速度の低下、および通過台数の頭打ちが見られた。本事業における各種分析では本線一車線あたりの発生台数は最大でも1800[台/時]としている。したがって、自動運転車両が混在することによる交通容量低下の影響はないと考えてよい。

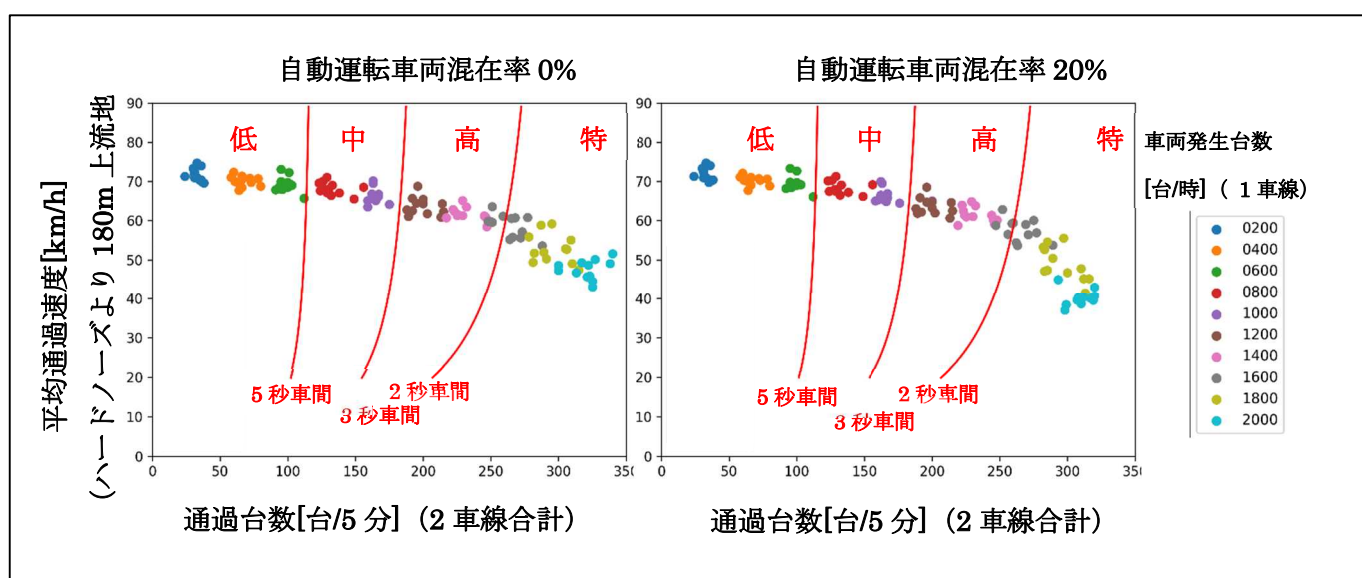


図 4-11 自動運転車両混在率 20%の時の平均車間時間の分布

なお、追従走行モデル構築時に用いる先行車両との距離を表す指標として、車頭時間ではなく車間時間を用いている。2つの指標の違いは先行車両の車長分となるが、東池袋モデルで発生するすべての車両の車種を普通車として設定しているため（後述の5.4.1項で説明）、車頭時間へ変換する際は注意が必要である。

4.3.2. 自動運転車の合流発生時の車両挙動モデル

本シミュレーション環境における合流発生時の車両挙動モデルにおいては、自動運転車とドライバーが運転する一般車とで合流の挙動が若干異なる。一般車の場合は、決定木による合流確率が $p\%$ であった場合、 $p\%$ の確率で現在の車間への合流を選択し、 $100-p\%$ の確率で現在の車間を見送る選択をする。一方、自動運転車の場合は、図 4-12 に示したように、合流確率が 40%以上であった場合は必ず現在の車間への合流を選択し、40%未満であった場合は必ず現在の車間を見送る選択をする。この挙動は、自動運転車は人間のドライバーとは異なり、「迷う」ことなく合流の判断を行うことを想定している。したがって、たとえ Day2 システムによる支援がない場合でも、自動運転車か否かで合流挙動が変化し得ることに留意が必要である。

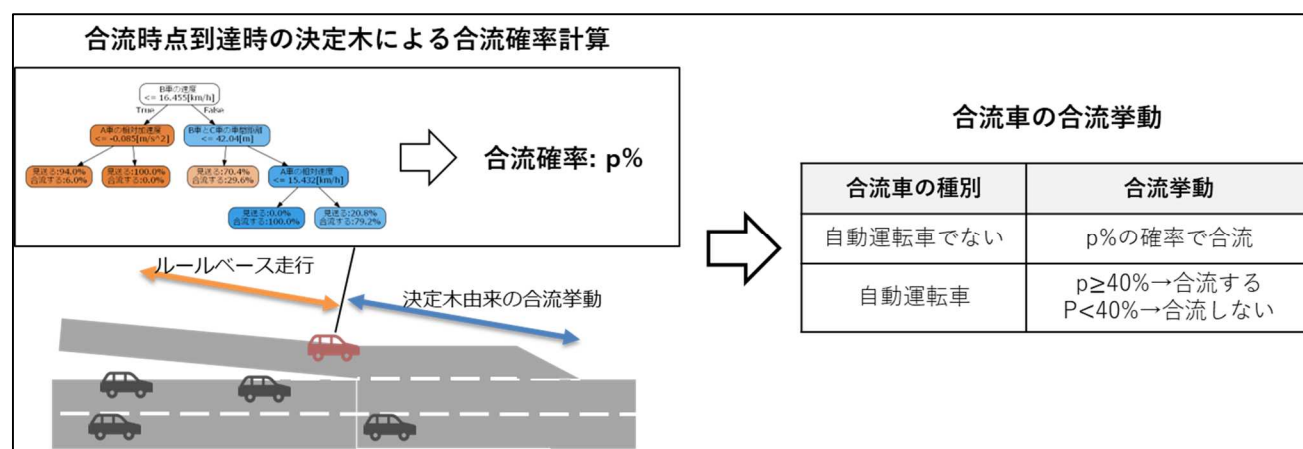


図 4-12 合流部の車両挙動の詳細

なお、自動運転車の行動選択の閾値である合流確率 40%は、下記の通りの方法で合流閾値ごとの合流挙動の改善率を確認し、合流支援検討会の関係者と協議の上で決定している。

図 4-13 は、合流支援がない状況と Day2 支援がある状況の 2 つで、最初のシーンで合流選択をした車両台数を示したものである。最初のシーンで合流選択をする車両が多いほど、不必要な見送りが解消されるなどの理由で、合流が選択されやすくなっていることを示している。合流確率の閾値が小さくなる（50%→40%→30%）ほど、最初のシーンで合流選択をする車両数は多くなったが、40%→30%では台数変化が頭打ちとなっていることがわかる。また 40%→30%で改善したケースについて個別に合流行動を確認した結果、必ずしも良い合流が実現されたとは言えないことが判明した。そのため本分析では 40%が行動選択の閾値として相応しいと判断し、以後行動選択の閾値として 40%を採用することとした。

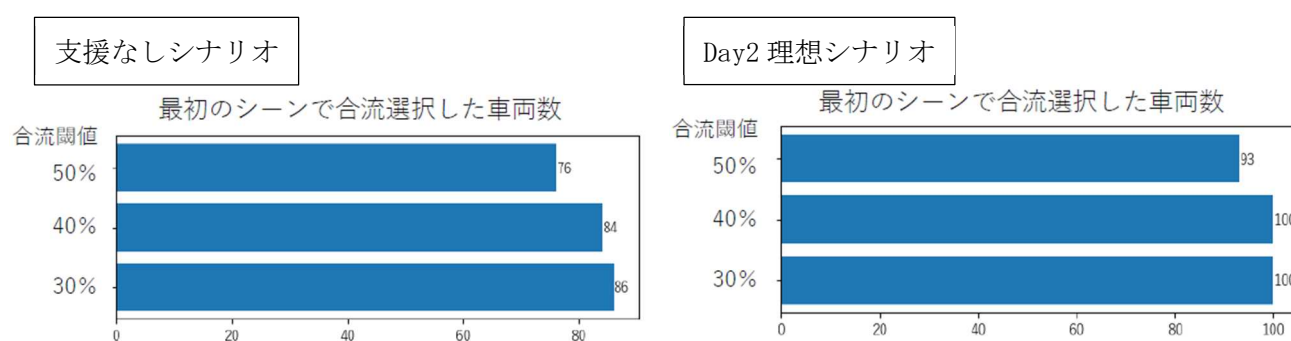


図 4-13 合流閾値別の、支援なし（左）と Day2 支援あり（右）シナリオにおける最初のシーンで合流選択した自動運転車の車両数（自動運転車混在率 20%）

4.4. シミュレーション環境への Day2 システムモデルの追加

Day2 システムによる合流支援コンセプトは図 4-14 の通りである。

本線車線の車両検知センサは、本線車線センシングエリア上を走行している本線車両の位置・速度情報を連続的に取得し、それぞれの車両の合流起点(合流可能上流端点)到達予測時刻を算出する。その情報を、路車間通信機が通信エリア内の合流車両に 100ms 周期で配信する。情報を受けた合流自動運転車両は、加速または減速を行うことで合流起点到達時点で本線車両と横並びにならないように位置を調整し、スムーズな合流を達成する。

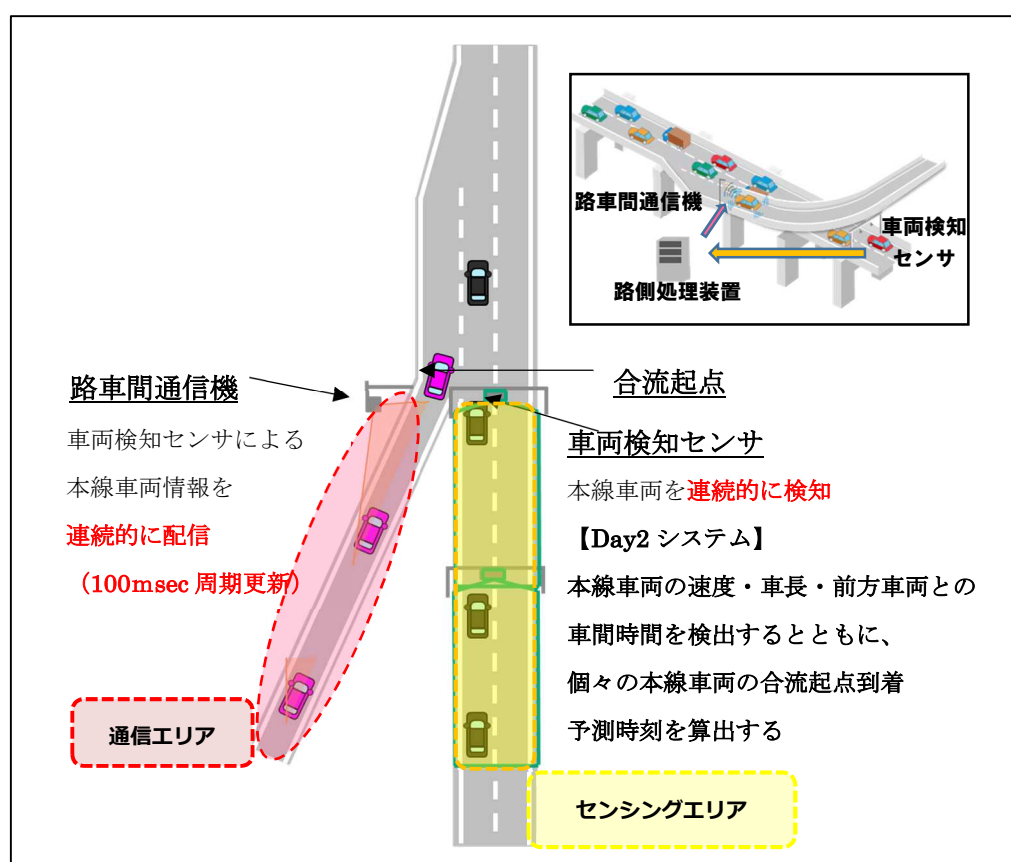


図 4-14 Day2 システムのコンセプト図

Day2 システムのシミュレーションモデルへの実装として、東池袋入口の道路の合流部付近を3つに分割し、センシングエリアで取得した本線車両の情報を、通信エリアを走行中の合流車両に配信する仕組みを実装した。

シミュレーション内の Day2 システムによる情報提供とそれを受けた合流車線内の自動運転車両の挙動を図 4-15 に示す。Day2 システムは図に示したセンシングエリア内の本線車両の位置と速度の情報をセンサにより検知し、個々の本線車両の合流起点(合流可能上流端点)到達予測時刻を算出し、その情報を通信エリア内の合流車両に 100ms 周期で配信する。情報を受けた自動運転車は、強加速 (+0.2G)、弱加速 (+0.1G)、加減速なし (+0.0G)、弱減速 (-0.1G)、強減速 (-0.2G) の5通りの選択肢につい

て、その行動を次の1秒間行ったと仮定したときの合流起点到達時の状況を予測し、合流の評価点を計算する。そして最も評価点の高い行動をとる。図4-15の例で言えば、弱減速（-0.1G）の選択肢が最も評価点が高いため、弱減速の行動をとる。なお、評価点の最も高い選択肢が複数存在した場合、加減速度が小さい行動を優先して選択する。この行動選択を100ms周期で行う。

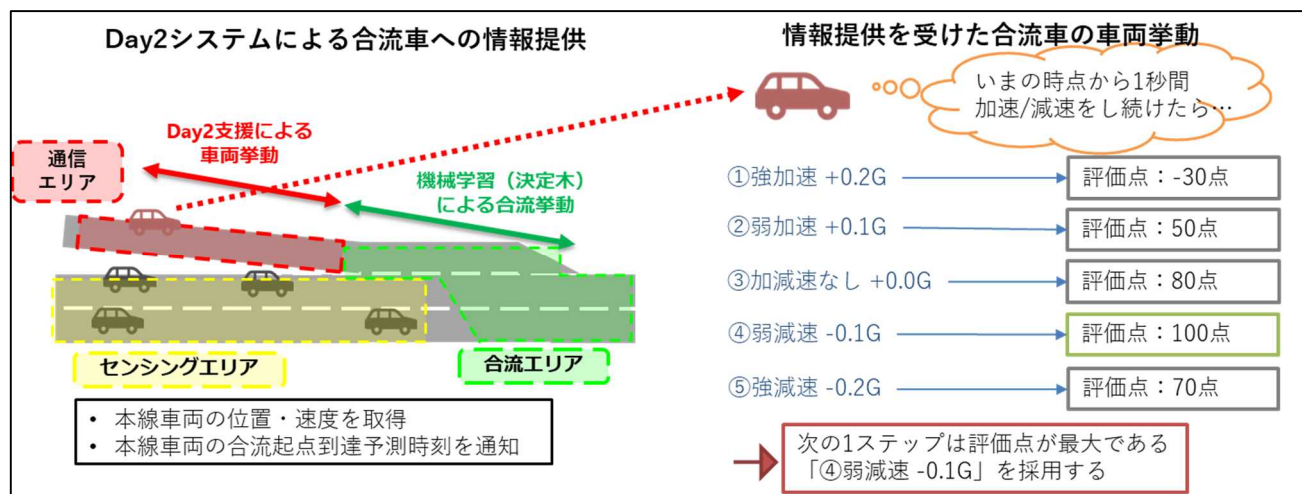


図 4-15 Day2 システムによる情報提供とそれを受けた合流車両の車両挙動

なお、自動運転車両の走行速度も他の車両と同様に実データの観測から得られた分布をもとに生成しているため、必ずしも法定速度を遵守するとは限らない点についても留意されたい。

4.5. シミュレーション環境への Day3 システムモデルの追加

Day3 システムによる合流支援コンセプトは図 4-16 の通りである。Day3 システムは、Day2 システムで実施する本線隙間狙い支援に加えて、本線車線の車両に対しても合流車線に関する情報配信を行い本線車両の減速・車間拡大を促しより余裕のある合流の実現を目指すものである（本線車協調支援）。

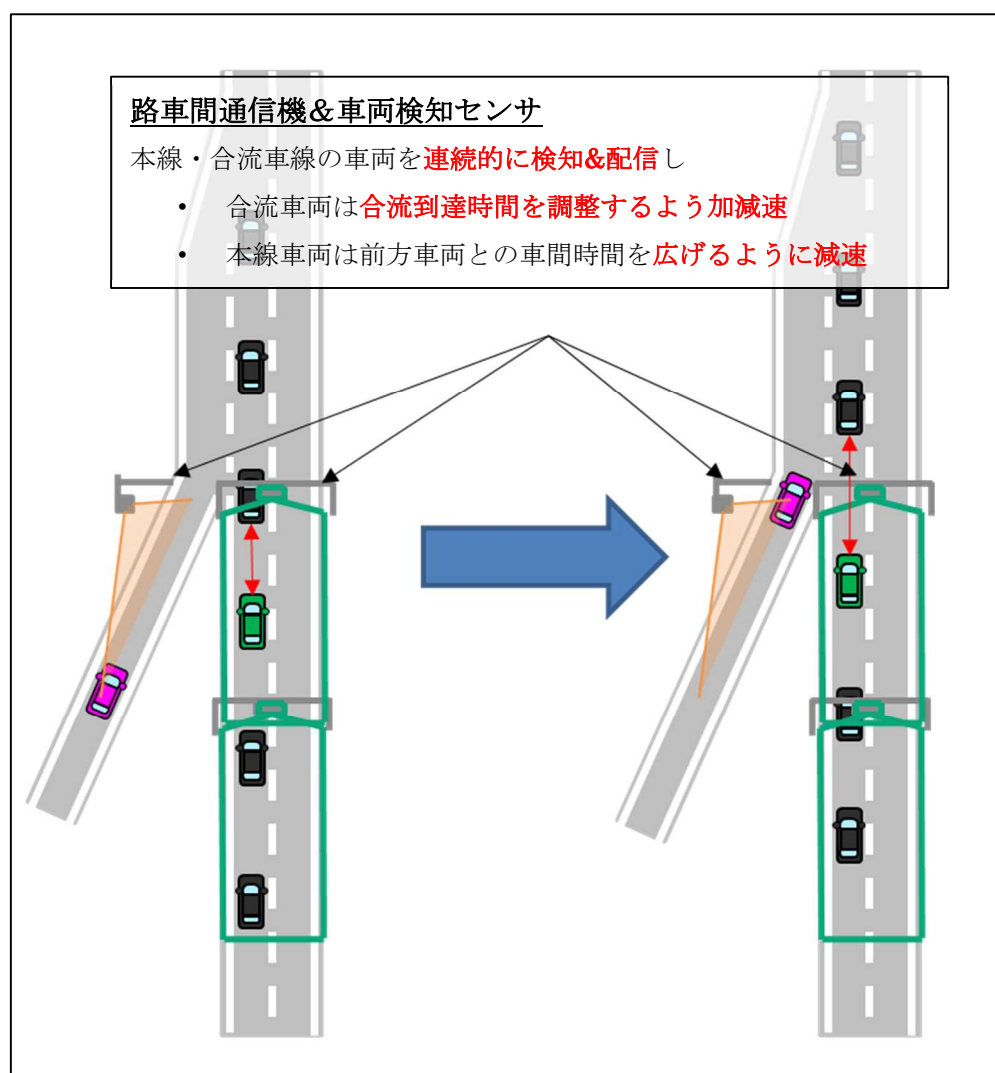


図 4-16 Day3 システムのコンセプト図

Day2 システムは、合流車線上の車両に一方方向に本線車線の情報を配信するシステムであった。そのため本線車線には車両の情報を取得する車両検知センサが、合流車線には車両に情報を配信する路車間通信機が設置され、車両検知センサが検知する範囲をセンシングエリア、路車間通信機が情報配信する範囲を通信エリアとしていた。Day3 システムでは、情報の配信は双方向となり、本線車線の情報を合流車線上の車両に配信するのみならず、合流車線の情報を本線車線上の車両に配信する。そのため合流車線、本線車線の双方に、車両検知センサと路車間通信機の両方が設置されている必要がある。Day3 シス

テムの構成を検討するにあたり、本来であれば各車線に設置されている車両検知センサと路車間通信機がカバーする範囲について別々に検討することが望ましい。しかし本事業では簡便のため、各車線に設置されている車両検知センサと路車間通信機がカバーする範囲をセンシング・通信エリアとし、エリアは同じ長さで仮定している。

4.5.1. Day3 システムの発動開始のトリガー

ある時点における合流車両と本線車両の状況に応じて、Day3 システムの本線隙間狙い支援と本線車協調支援のそれぞれについて実施の要否を決定することとした。この状況決定プロセスに進むことを発動と表現し、発動を開始するトリガーを下記の2種類と定めた。

1. 本線車線上の自動運転車両がセンシング・通信エリアに侵入→合流車線上の自動運転車両がセンシング・通信エリアに侵入、の順番で発生した時点

本線車線上の自動運転車両が本線上のセンシング・通信エリアに侵入した時点では、合流車線上のセンシング・通信エリアには合流車両がないため、Day3 システムによる支援は発動開始されない。

その後、合流車線上の自動運転車両が合流車線上のセンシング・通信エリアに侵入した時点で、合流車両・本線車両の双方に対して Day3 システムによる支援を開始する判定が行われる。Day3 システムによる支援を開始した後のフローの詳細は次章を参照のこと。

2. 合流車線上の自動運転車両がセンシング・通信エリアに侵入→本線車線上の自動運転車両がセンシング・通信エリアに侵入、の順番で発生した時点

合流車線上の自動運転車両が合流車線上のセンシング・通信エリアに侵入した時点で、本線車線上のセンシング・通信エリアの車両有無にかかわらず、Day3 システムによる支援の発動を開始する。Day3 システムによる支援を発動した後のフローの詳細は次章を参照のこと。

その後、本線車線上の自動運転車両が本線車線上のセンシング・通信エリアに侵入した場合、侵入した本線車線の位置が合流車両から隣接後方車両2台以内の位置である場合、Day3 システムによる支援の発動が再実施され、これまでの発動で決定した Day3 システムによる支援の状況によらず、新しい Day3 システムによる支援状況を採用する。侵入した本線車線の位置が合流車両から隣接後方車両3台以降の位置である場合、侵入した本線車両は Day3 システムによる支援の対象外となるため、Day3 システムによる支援は再発動されない。

4.5.2. Day3 システムによる支援発動時の状況判定

Day3 システムによる支援が発動するタイミングで、下記の手順で行われる支援の状況を決定する。

1. 今の時点から合流車線と本線車線の車両がすべて等速移動したと仮定して、Day3 システムによる本線隙間狙い支援の対象となった合流車両が合流エリアに到達する時点における、本線の状況を算出する。
2. 本線車両の車種（自動運転車 or 一般車）および本線車両間の車間時間に基づき、表 4-1 のように Day3 システムによる本線車協調支援の有無を取得する。

表 4-1 Day3 システムによる支援の状況判定と実施する支援ケースの分類表

#	自動運転車(AD)/一般車			右図の 車間	右図の 車間	合流車両 への 本線隙間 狙い支援	本線車両 への 本線車 協調支援	本線車 協調支援 対象	合流車両が合流エリアに進入後 全ての車両が等速移動すると して 予測した合流エリアの状況
	合流	本線後方 1台め (C車)	本線後方 2台め (F車)						
1	一般	-	-	-	-	行わない	行わない	-	
2	AD	一般	一般	-	-	行う	行わない	-	
3	AD	一般	AD	2.5秒以上	-	行う	行わない	-	
4	AD	一般	AD	2.5秒未満	2.5秒以上	行う	2.5秒以上の車間を キープ	後方 2台め (F車)	
5	AD	一般	AD	2.5秒未満	2.5秒未満	行う	減速指示	後方 2台め (F車)	
6	AD	AD	-	2.5秒以上	-	行う	2.5秒以上の車間を キープ	-	
7	AD	AD	-	2.5秒未満	-	行う	減速指示	後方 1台め (C車)	

※ “-”：確認しない条件、★：合流AD車支援対象、☆：本線AD車支援対象、◆◆：ターゲット車間

4.5.3. Day3 システムによる支援を受けた車両の挙動

Day3 システムによる本線隙間狙い支援を受けている間の合流自動運転車両は、本線自動運転車両の状況に応じて行動を更新する。

Day3 システムの本線隙間狙い支援は、下記の1点を除き Day2 システムの場合と同じである。

合流支援システムは、本線車線のセンシング・通信エリア内の個々の本線車両について、支援を開始する時点の位置と速度から、合流起点(合流可能上流端点)到達予測時刻を算出する。その際、本線自動運転車両が本線協調支援の対象となっている場合、その本線車両の合流起点到達予測時刻に対して、支援を受けて減速することを考慮した補正を行う。

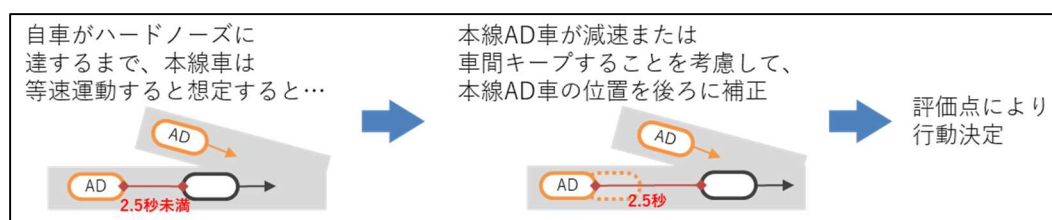


図 4-17. Day3 システムによる支援下における合流自動運転車両が行う補正の説明

Day3 システムによる支援を受けている間の本線自動運転車両は、現時点で車間が2.5秒以上である場合は、車間キープ指示を受ける。その場合、2.5秒以上の車間をキープする。現時点で車間が2.5秒未満である場合は、減速指示を受ける。その場合、合流起点まで119.05m以上距離がある場合は「最大0.05Gで減速ののち最大0.1Gで加速」を行うことで、車間を2.5秒以上開ける。それ未満の距離の場合は、「最大0.05Gで減速ののち最大0.1Gで加速」では2.5秒の車間を確保することができないため、合流起点までの残り距離に応じて表4-2に沿った車間時間を目指すよう、「最大0.05Gで減速ののち最大0.1Gで加速」を行う。

表 4-2 合流起点までの距離と目標車間時間

車間時間	合流起点までの距離
2.5 秒	119.05m 以上
2.4 秒	106.48m 以上
2.3 秒	92.21m 以上
2.2 秒	75.29m 以上
2.1 秒	53.24m 以上
2.0 秒	それ未満

4.5.4. Day3 システムによる支援を受けた後の車両挙動

Day3 支援システムによる支援を受けている間の合流自動運転車両は、合流車線のセンシング・通信エリアを抜けて合流エリアに進入した後、決定木アルゴリズムにより「合流する」または「見送る」を選択する。その行動に準拠するように走行挙動を変更し、本線に合流した後、本線下流端点まで走行する。

Day3 支援システムによる支援を受けている間の本線自動運転車両は、本線のセンシング・通信エリア内および合流エリア内で、前方車両と車間時間が2.5秒未満である場合は2.5秒以上になるように、前方車両との車間時間が2.5秒以上ある場合は2.5秒以上を維持するように走行する。合流エリア通過後はDay3 支援外となり、前方車両との維持する車間時間の設定を2.0秒以上に戻して走行する。

決定木アルゴリズムによる「譲る」「譲らない（直進する）」の行動選択を行う対象となった本線自動運転車両は、基本的には選択した行動に準拠するように走行挙動を変更する。これに加えて、本線車協調支援の対象となっておりかつ本線のセンシング・通信エリア内および合流エリア内を走行中の場合は、前方車両との車間時間を2.5秒以上になるように減速もしくは速度維持を行う。すなわち、本線自動運転車両は、決定木アルゴリズムまたは本線車協調支援のどちらか一方で減速の指示となった場合、減速することとした。

5. シミュレーション環境を用いた合流支援システム検証・効果分析 の諸条件

本章では、次章以降の合流支援システムの検証および効果分析を行う際の諸条件について説明する。本事業のシミュレーション環境の条件項目は、大きく以下の3項目である。以降の節で条件項目について説明する。

- ・ 交通流条件
- ・ 合流支援システムのシステム物理条件
- ・ 自動運転車両混在率

5.1. 交通流条件

5.1.1. 交通流量区分としての飽和度

本事業における合流支援システムの検証の一環として、本線交通流量ごとにDay2システムの効果検証を行う。本線交通流量をその水準で区分するため、「飽和度」という考え方を導入した。

図5-1に本線交通流のQV図と飽和度の分類を、表5-1に飽和度境界条件の定義を示す。図は東池袋入口付近で取得されたトラカンデータ（提供：首都高速道路株式会社）をもとに作成したものである。図の各点は、5分間における通過車両の台数と通過車両の平均通過速度を表している。トラカンデータの取得期間は、2021年10月16日～2021年10月23日の7日間である。QV図の各点について平均車間時間を計算することができるため、平均車間時間を飽和度境界条件としてQV図の各点を飽和度別に分類した。基準となる平均車間時間と基準値設定の根拠は表5-1のとおりである。実際の東池袋入口においては、下流部に交通流のボトルネックとなる箇所が存在する。したがって、車間時間が2秒未満となるような飽和度高以上に密な交通流は生じず、交通流全体の速度が40km/hを下回る渋滞が発生する。本事業では、本線の平均車間時間が2秒未満となるような密な交通流も考慮し、合流支援システムの評価を行う。飽和度高以上に密な交通流を飽和度特高と呼ぶこととする。

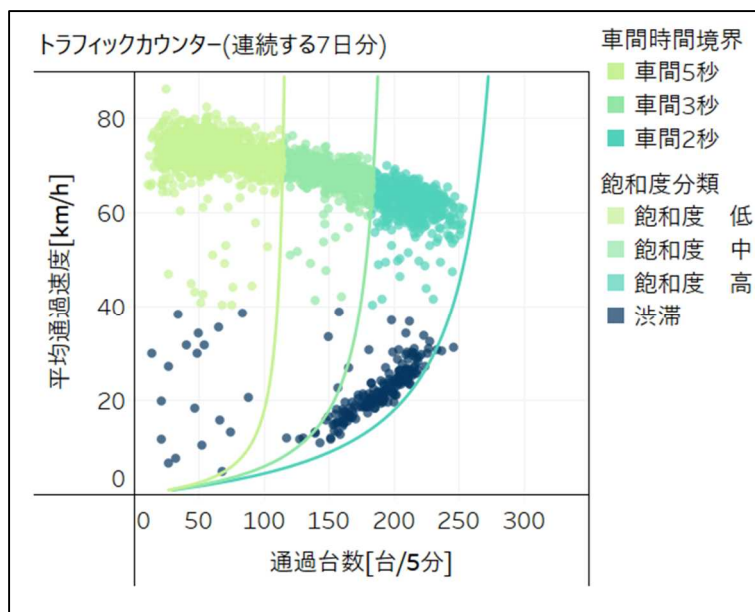


図 5-1 首都高 5 号池袋線下り東池袋入口の QV 図
 （首都高速道路株式会社提供のトラカンデータより作成）

表 5-1 飽和度境界条件の定義

飽和度境界条件	定義
平均車間時間 2 秒	これ以上詰まると短いと感じる車間 一般道路走行時（40～60km/h）の目標車間時間 ⁶
平均車間時間 3 秒	余裕を感じる車間 高速道路走行時（80～100km/h）の目標車間時間 ⁶
平均車間時間 5 秒	前方に割り込まれても問題ないと感じる車間

⁶ JAF 「[Q] 走行中の適切な車間距離は？」

<https://jaf.or.jp/common/kuruma-qa/category-drive/subcategory-technique/faq138>（閲覧日：2023/01/31）

5.1.2. 合流支援システム検証・効果分析に使用する交通流条件

（1） 飽和度別交通流

飽和度低から高までの飽和度別交通流の定義とシミュレーション環境における1時間あたりの車両発生台数を表5-2に示す。また、図5-2に飽和度低～特高をシミュレーション環境上で再現した場合のQV図を示す。飽和度別交通流は交通流変更時のDay2システムの合流改善効果検証において使用する。

表 5-2 飽和度の定義と車両発生台数

飽和度	本線平均車間時間	1時間当たり 合流車線発生台数	1時間当たり 本線車線発生台数
低	5秒以上	20～140	100～700
中	3秒以下、5秒未満	140～220	700～1100
高	2秒以下、3秒未満	220～300	1100～1500
特高	2秒未満	300～360	1500～1800

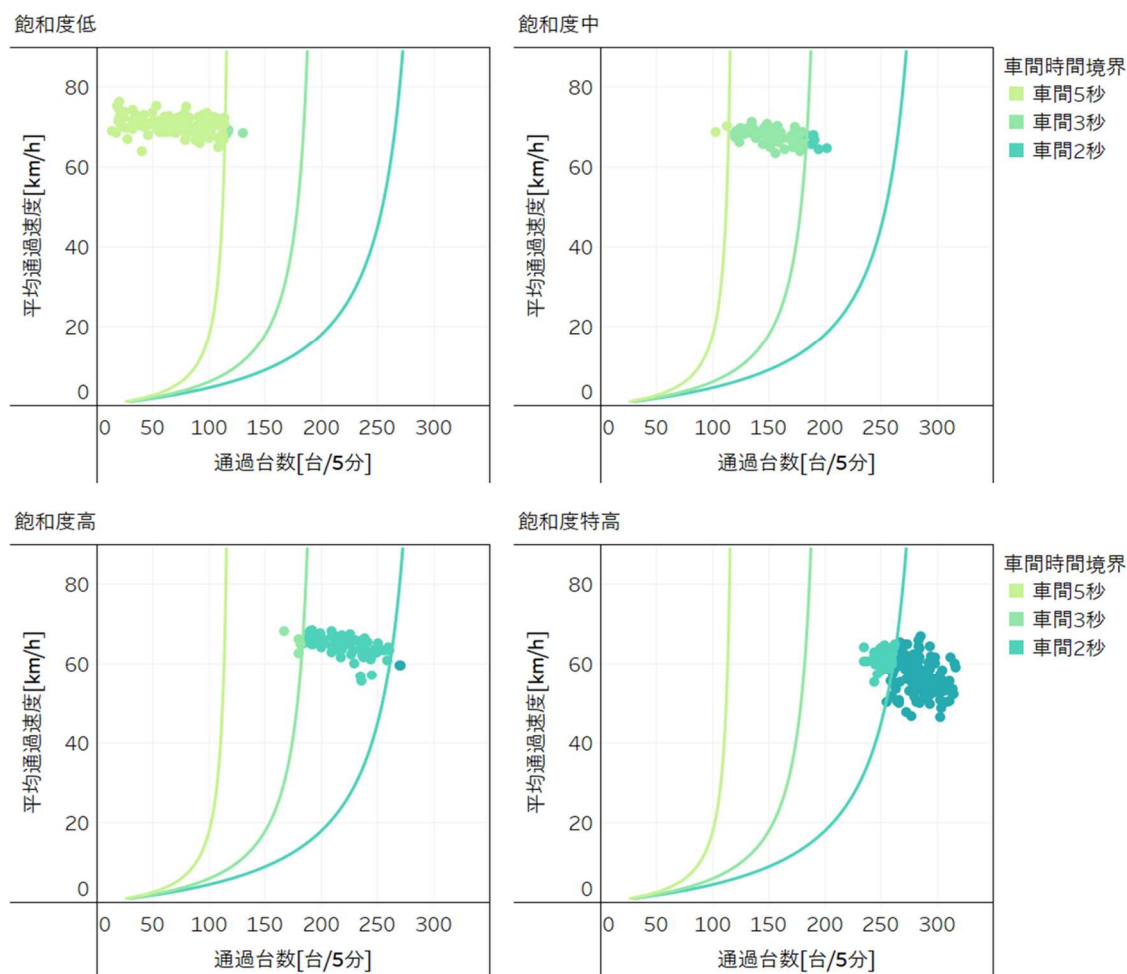


図 5-2 飽和度別 QV 図

（2） 疑似東池袋交通流

疑似東池袋交通流は、シミュレーション計算コストを軽減するため、トラカンデータを圧縮しつつも1日分の交通流変化を表現できる交通流を再現したものである。コンセプト成立性の検証およびDay2システムの物理条件変更の合流改善効果の検証で使用する。

疑似東池袋交通流は以下の手順に従い構築した。

1. 5分間隔トラカンデータについて30分間隔で飽和度別相対頻度を集計（図 5-3）

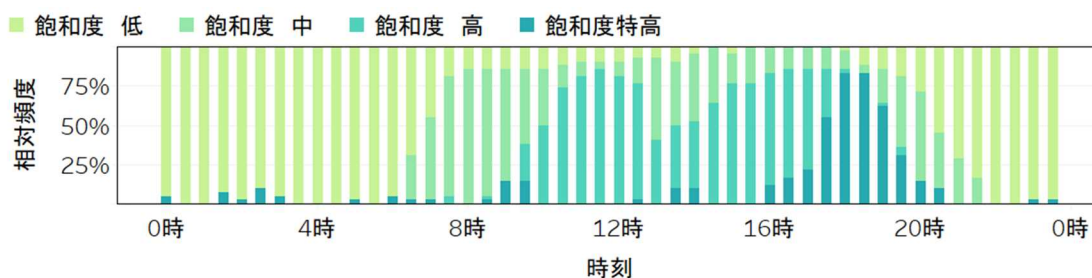


図 5-3 トラカンデータの 30 分コマ別の飽和度発生頻度

2. 各 30 分コマで最も発生頻度が大きい飽和度を抽出（図 5-4）



図 5-4 トラカンデータの 30 分コマ別最大頻度飽和度

3. 飽和度別発生割合を維持しつつ各コマ 20 分×10 コマに圧縮（図 5-4）



図 5-5 疑似東池袋交通流の時系列交通流変化と飽和度別発生割合

図 5-6 に疑似東池袋交通流をシミュレーション環境上で再現した場合の QV 図を示す。

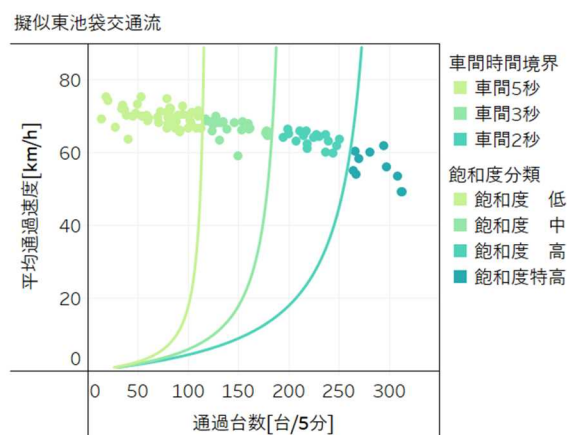


図 5-6 疑似東池袋交通流の QV 図

(3) 1 日東池袋交通流

1 日東池袋交通流はトラカンデータに準拠し、1 日 5 分間隔の飽和度変化を再現した交通流である。1 日の効果推定で使用する。なお、トラカンデータにおいて平均速度 40km/h 以下となる渋滞が記録されている時間帯は、シミュレーション上では飽和度特高として再現し、1 日の効果推計対象からは除外している。渋滞時間帯は、Day2・Day3 システムではなく車車間通信によるネゴシエーションを想定した Day4 システムによる支援が適切であると考えられるためである。図 5-7 に 1 日東池袋交通流をシミュレーション環境上で再現した場合の QV 図と夜間・日中の時間帯を切り出した QV 図を示す。

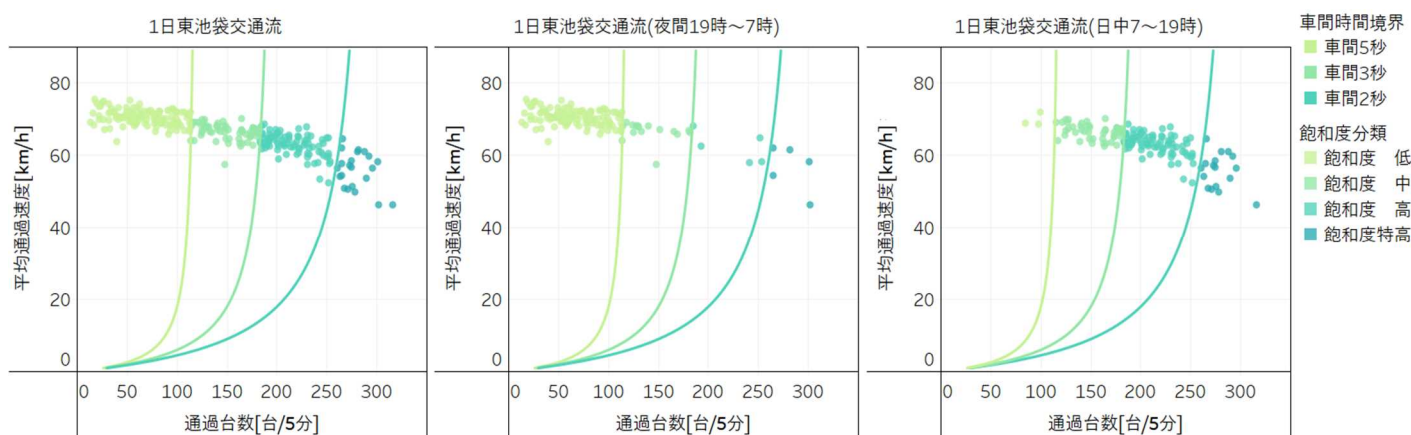


図 5-7 1 日東池袋交通流の QV 図

5.2. 合流支援システムのシステム物理条件

本事業では、社会実装に際して Day2 システムに要求されるシステム物理条件を明らかにすべく、各システム物理条件が合流支援効果に与える影響について検証した。本事業で検証する物理条件は以下の5つである。

- ・ センシングエリア・通信エリアの長さ
- ・ 本線車情報の伝達時間
- ・ 本線車位置情報の誤差
- ・ 本線車速度情報の誤差

5.2.1. センシングエリア・通信エリアの長さ

センシングエリア・通信エリアの長さによって、合流支援システムが達成できるサービスレベルは影響を受ける。本線車線の走行速度が速い状況では、合流車線の車両に対して有効な合流支援の情報を提供するためには、本線車線の上流の情報を提供する必要があり、そのために本線に設置したシステムのセンシング範囲を十分広くすることが求められる。一方、本線車線の走行速度が遅い状況では、センシング範囲がそこまで広くなくとも合流に有効な情報が提供できると考えられる。

本線車線の走行速度は、飽和度に大きく依存する。飽和度が低であり、交通流量が少ない場合、本線車線の走行速度をトラカンデータから作成した図 5-8 から取得すると、おおよそ 75km/h となる。飽和度によらず合流車線の走行速度を実績データから 51km/h とした時、合流車両が図 5-9 の合流支援を受けた合流車両が最も距離が長くなる走行パターンを採用した際に必要となるセンシングエリア:通信エリアの長さは、それぞれ 240m:130m となる。同様に、飽和度が中、高の場合について、走行速度が 70km/h、65km/h となるため、センシングエリア:通信エリアの長さを、210m:120m、180m:110m と計算した。さらに混雑した場合を想定し、走行速度が 60km/h、55km/h となった場合の、150m:90m、130m:80m を追加し、計 5 つのセンシングエリア:通信エリアの長さの組み合わせを検討することとした。

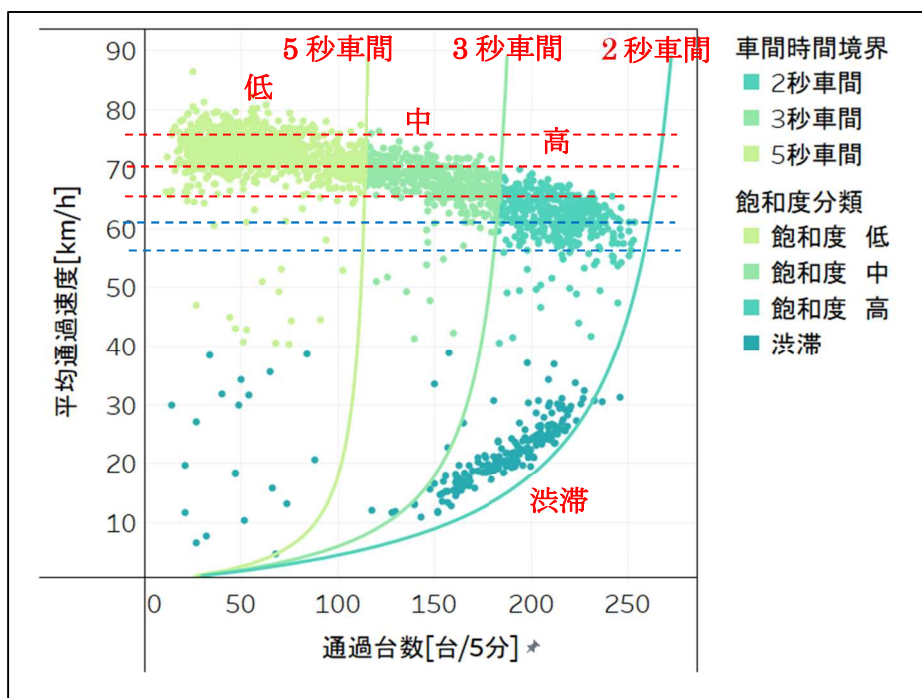


図 5-8 東池袋 QV 図と本線車間時間分布

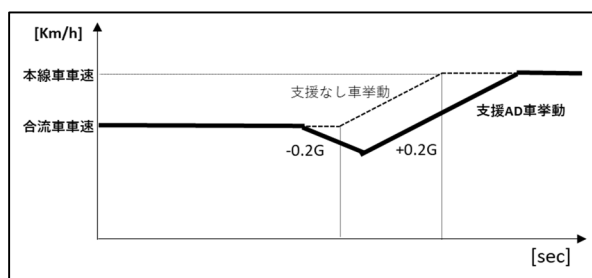


図 5-9 合流支援を受けた合流車両の速度調整のための走行距離が最も長くなる走行パターン

表 5-3 シミュレーション時のパラメータ組合せ（Q-V 図からの支援エリア設計）

本線平均 車速 [km/h]	合流平均 車速 [km/h]	通信エリア [m]	センシングエリア [m]	備考 エリア規模に対する支援公開期待値
75	51	130	240	交通密度低までカバー (元々車間時間大の支援効率はよくない)
70	51	120	210	交通密度中までカバー (最も効率的に支援効果が出せる)
65	51	110	180	交通密度高までカバー (最も効率的に支援効果が出せる)
60	51	90	150	交通密度高 1/2~1/3 までカバー
55	51	80	130	効果が少ないとみこまれる物的限界

5.2.2. 本線車情報の伝達時間

合流車両への本線隙間狙い支援の場合は、本線車両の情報を合流車両に伝達する際に、本線車両への本線車協調支援の場合は、合流車両の情報を本線車両に伝達する際に、情報伝達の時間がかかる。本線隙間狙い支援の場合、情報伝達の時間を細かく分類すると、図 5-10 の通りとなる。



図 5-10 センサ検知から車載器受信までの流れ（出典 [1] p43）

伝達時間が長くなればなるほど、支援を受けた車両には遅延した情報が提供されることになるため、合流支援の精度に負の影響があると考えられる。なお、実際に合流支援サービスが社会実装される場合は、本線情報を受信した合流車両が情報伝達の時間の遅延を考慮して補正する走行挙動を選択するようなこと考えられる。本事業では単純な情報伝達の精度を評価するため、情報伝達の時間の遅延の補正は考慮しないものとしている。

情報伝達の時間として、既往研究では図 5-11 の情報が得られている。長い伝達時間として、95 パーセンタイル値を足し合わせると約 1.3 秒（ $\approx 900\text{ms} + 204\text{ms} + 158\text{ms}$ ）、中程度の伝達時間として平均値を足し合わせると約 0.8 秒（ $\approx 515\text{ms} + 140\text{ms} + 102\text{ms}$ ）を得る。また、図 5-12 のプロセス別の遅延時間分布から、各プロセスにおいて考えられる短い伝達時間を足し合わせると約 0.4 秒（ $\approx 300\text{ms} + 70\text{ms} + 40\text{ms}$ ）となる。

本分析における情報伝達の時間として、理想的な状況として 0 秒とするほか、考えられる遅延秒数として 0.4 秒、0.8 秒、1.3 秒を採用することとした。図 5-12 から、本線車情報の伝達時間は一定のばら

つきを持って発生していることがわかる。これを表現するため、シミュレーション上では、平均値がそれぞれ0秒/0.4秒/0.8秒/1.3秒、標準偏差が0.2秒の正規分布として本線車情報の伝達時間を与えることとした。

統計指標	センサ検知～ 情報生成	情報生成～ センサ情報受信	センサ情報受信～ 車載器受信
平均値	515	140	102
95パーセンタイル値	900	204	158
標準偏差	180	46	47

※ 単位はミリ秒
 ※ N=100～105

図 5-11 システムの遅延時間のプロセス別統計量（出典 [1] p43）

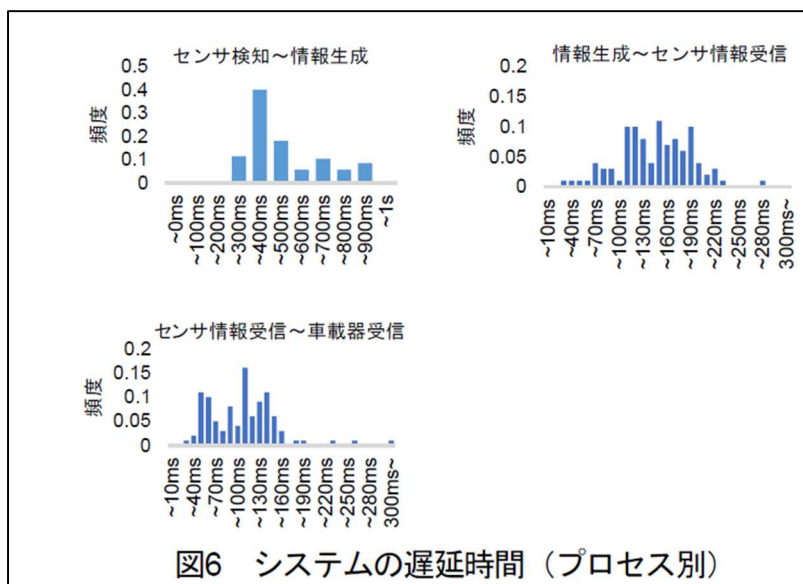


図 5-12 システムの遅延時間プロセス別分布（出典 [1] p43）

5.2.3. 本線車位置情報の誤差

情報伝達の時間、速度情報の誤差と同様、センサが取得する車両（本線隙間狙い支援の場合は本線車線の車両、本線車協調支援の場合は合流車線の車両が対象）の進行方向の位置情報の誤差の精度によって、合流支援の精度は影響を受けるため、位置情報の誤差についても考慮する。

位置情報の誤差の実験値として、既往研究では図 5-13 の情報が得られている。実験値を踏まえ、本分析では誤差なしの他に、-1～1m となる一様分布を与えることとする。

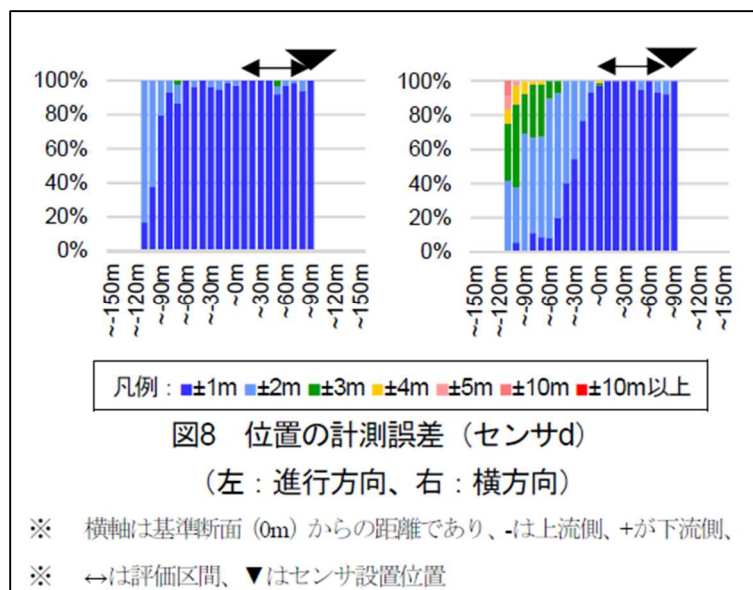


図 5-13 システムの進行方向の位置の誤差（出典 [2] p57）

5.2.4. 本線車速度情報の誤差

情報伝達の時間と同様、センサが取得する車両（本線隙間狙い支援の場合は本線車線の車両、本線車協調支援の場合は合流車線の車両が対象）の速度情報の誤差の精度によって、合流支援の精度は影響を受けるため、速度情報の誤差についても考慮する。

速度情報の誤差の実験値として、既往研究では図 5-14 の情報が得られている。この誤差分布は、既往研究 [1] の実施主体者である国総研より、最も誤差精度良いセンサの速度計測誤差の分布の情報を提供いただいたものである。

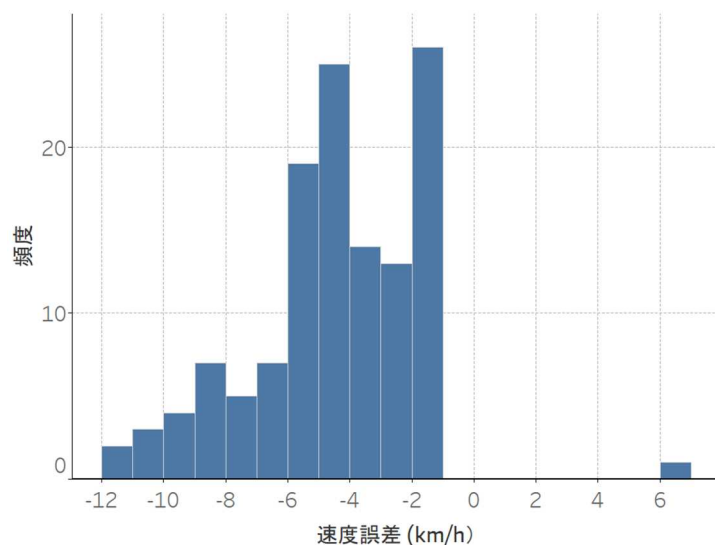


図 5-14 実道上での実験から得られた速度誤差分布

実験値を踏まえ、本分析では誤差なしの他に、異なる速度誤差分布を与えることとする。誤差は協議の上、正規分布とし、95%信頼区間がそれぞれ、 $-6 \sim 6 \text{ km/h}$ 、 $-12 \sim 12 \text{ km/h}$ 、 $-12 \sim 0 \text{ km/h}$ となるようにした。それぞれを図示したものは図 5-15 の通りである。

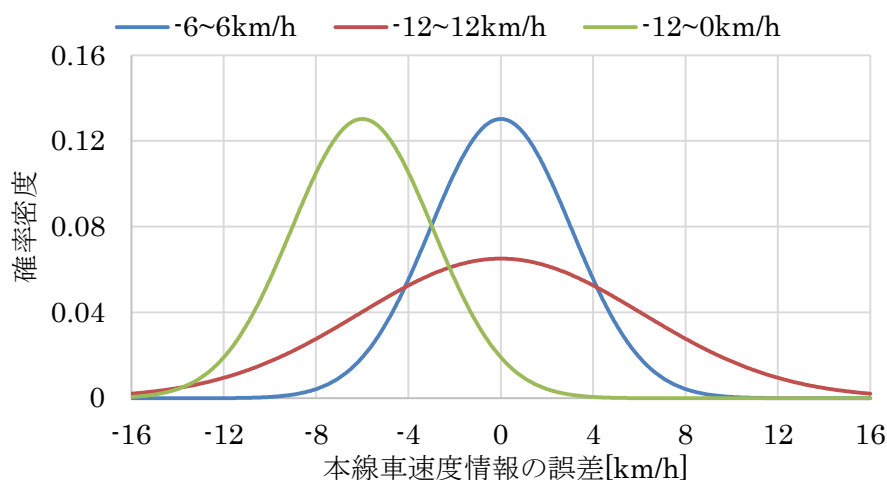


図 5-15 シナリオとして与える本線車速度情報の誤差分布

5.3. 自動運転車両混在率

自動運転車両の混在率によって、合流支援システムが達成できるサービスレベルは下記の2つの影響を受ける。

1つ目は合流支援の発生確率である。本分析で対象とする合流支援システムは、他車線の情報を受信してスムーズな合流のために車両挙動を変更する車両は、自動運転車両のみに限定しているため、自動運転車両の混在率によって合流支援を受ける車両の台数が増える。特に Day3 システムでは、合流車線支援と本線車線支援の両方が同時に発生しうる場合があるが、支援対象の両方の車線の車両が自動運転車両である必要があるため、自動運転車両混在率が少ないとこのケースがほとんど発生しないこととなる。

2つ目は本線車線の車間への影響である。4.3.1 項で記載の通り、自動運転車両は前方車両との車間時間が2.0秒以上となるよう走行する挙動としている。一般車（自動運転車両ではない車両を指す）の平均車間はこれより狭い（特に飽和度が高いほど平均車間は狭くなる傾向がある）ため、本線車線においては、自動運転車両の混在率が高くなるにつれて平均車間が広がる。これにより、合流支援を行わなくとも合流がスムーズになる可能性がある。

そのため、本分析では自動運転車両混在率として、0%の他に、図 1-1 に記載の車載器搭載自動運転普及率を採用し、20%、30%の混在率を対象とした。

5.4. 留意点

これまで説明してきた各種モデルやシナリオについて、何点か留意すべき点がある。下記に記す。

5.4.1. 東池袋モデルにおける車種について

東池袋モデルを利用する際の留意点として、発生するすべての車両の車種を普通車として設定している点が挙げられる。経産省 SAKURA プロジェクトで取得された合流部軌跡データには、平均して 16.1%の大型車、0.2%の二輪車が、2.2 節で述べた上流部軌跡データには、平均して 14.5%の大型車、0.6%の二輪車が含まれている（図 5-16）。これらの車種で分割してしまうと 4.1.3 項の合流発生時の車両挙動モデル構築時に十分な台数が確保できないと判断し、すべての車両を普通車として扱った上で合流発生時の車両挙動モデルを構築し、車両発生モデルで発生させる車両はすべて普通車とした。

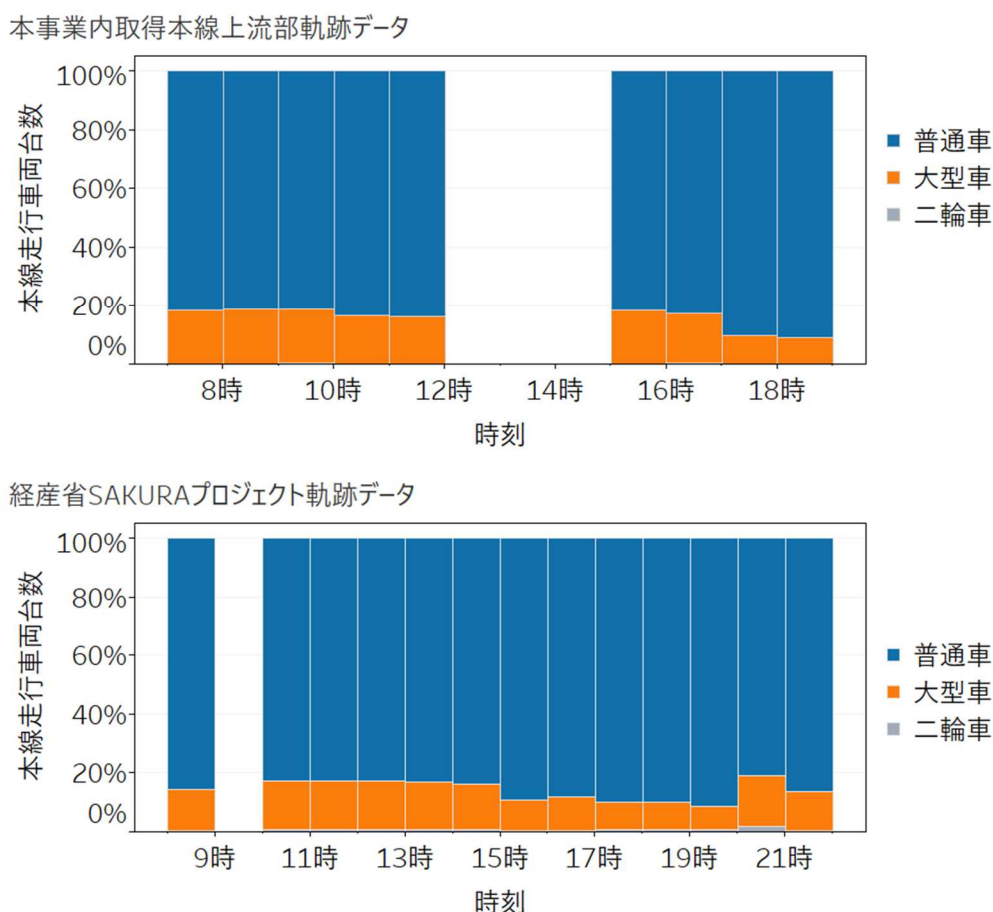


図 5-16 上流部軌跡データ（上）および合流部軌跡データ（下）における車種割合

5.4.2. 東池袋モデルにおける渋滞

東池袋モデルの留意点として、道路ネットワークの範囲は東池袋入口の前後のみに限定されている点があげられる。実際の首都高速 5 号池袋線下りでは、東池袋入口より下流の場所（例：北池袋出入口、熊野町ジャンクション等）にボトルネックがあることが示唆されている。ボトルネックの存在は、5.1

節 交通流条件 で示している東池袋入口のトラカンデータでみられる QV 特性について、高速度帯と低速度帯（渋滞時）の分布が非連続であり、この分布はボトルネックの上流部で観測した QV 特性に特徴的な形状（図 5-17 参照）である点から示唆されるものである。シミュレーションモデルでは、東池袋入口より下流地点にあると考えられるボトルネックは考慮していない。

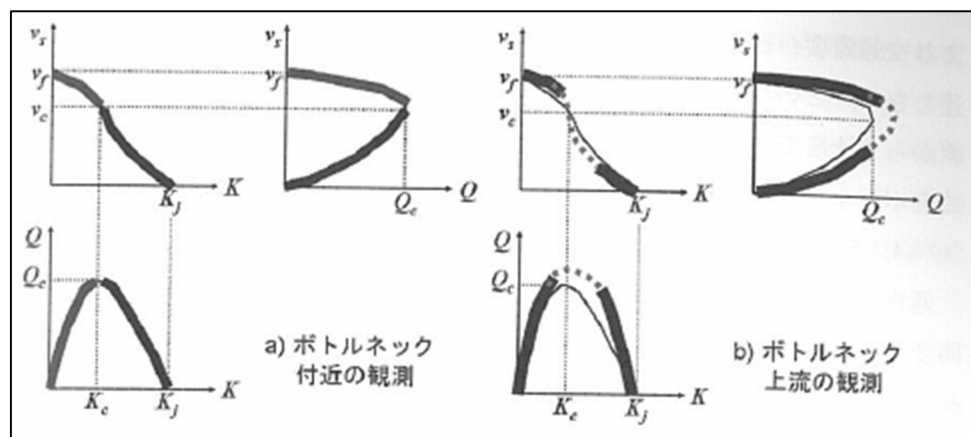


図 5-17 ボトルネック位置と QVK 関係（出典 [3] p35）

飽和度特高相当の交通流量が実際の首都高速 5 号池袋線下りに発生した際は、下流のボトルネック部で渋滞が発生・延伸し、東池袋入口付近では渋滞となる。一方、シミュレーションモデルではこのボトルネックは考慮されないため、飽和度特高相当の交通流量を発生させても渋滞は発生しない。そのため飽和度特高は、東池袋入口で実際には起こりえない仮想的な高密度の交通流となり、飽和度特高における合流の意思決定は、機械学習により構築した決定木アルゴリズムの学習範囲外に外挿した形となる。

5.4.3. 合流時減速機能解除による副作用

Vissim で採用している車両挙動について、合流そのものを扱う機能は存在しない。東池袋モデルにおける合流は、Vissim における車線変更の機能を利用することで表現している。東池袋モデルの合流車線の区間で車両が加速して合流エリアに侵入する場合に、合流のための横移動時に一時的に減速の挙動をとることがある。この挙動は Vissim が車線変更を行う際に意図的に対象車両に対してブレーキを指示しているために発生している。しかし、合流支援を評価する際に、合流車両が通信エリアで本線車に合わせて加速したにも関わらず Vissim の設定により減速してしまうことになると、支援効果がなくなってしまい、適切な合流支援の評価ができなくなってしまう。そのため、Day2・Day3 システムによる支援を受けた合流自動運転車両に対して、合流時に Vissim による車線変更のための減速挙動を解除するような設定を追加で行った。これにより上記の問題は解決したが、その副作用として、全合流車両の一部に、本線車追い抜きという現象が発生している。

本線車追い抜き現象のうち、上記のように合流時減速機能解除による副作用として本線車を追い抜いているケースは本来シミュレーションで意図していた挙動でないとし、後述の方法で分類・分析対象外としてフィルタリングする。

5.4.4. 評価対象外フィルタの設定

合流時減速機能解除による副作用を考慮するため、本線車を追い抜く挙動を、仕方ない本線車追い抜きと、不要な追い抜きに区分し、後者を評価対象外とすることとした。

仕方ない本線車追い抜きとは、本線車両の速度が遅いか、本線車間が詰まっているために、減速したとしても本線車を追い抜かざるをえないケースで発生している追い抜きである。分析に使用していた SAKURA プロジェクトデータは比較的飽和度が低いため、東池袋モデル構築時にはこのケースが発見されなかったが、本事業で飽和度が高いシナリオを扱う際にこうしたケースが確認された。

不要な追い抜きとは、減速していれば本線車を追い抜く必要はなかったが、合流時減速機能解除の副作用で本線車を追い抜くケースである。

仕方ない本線車追い抜きと不要な追い抜きを分類するにあたり、本線前方車両との TTC の秒数で、本線車と同じ速度まで減速するときの必要加速度を採用した。不要な追い抜きのケースは、本線前方車両との TTC の秒数の間、許容される減速度で減速していれば、本線前方車両と同じ速度まで減速できていたケースと言い換えることができる。そこで、必要加速度 $> -0.2G$ の場合を不要な追い抜きとし、評価対象外とするフィルタを設定した。

図 5-18 の左側は仕方ない本線追い抜きの例である。合流車両と本線車両の相対速度、車間距離から算出される必要減速度が $4.8m/s^2$ であり、 $0.2G$ より大きな減速が必要となることから、仕方ない本線追い抜きとして判定される。他方、図 5-18 の右側は不要な追い抜きである。同様に算出される必要減速は $0.09m/s^2$ であり、 $0.2G$ 以下であることから、不要な追い抜きと判定される。

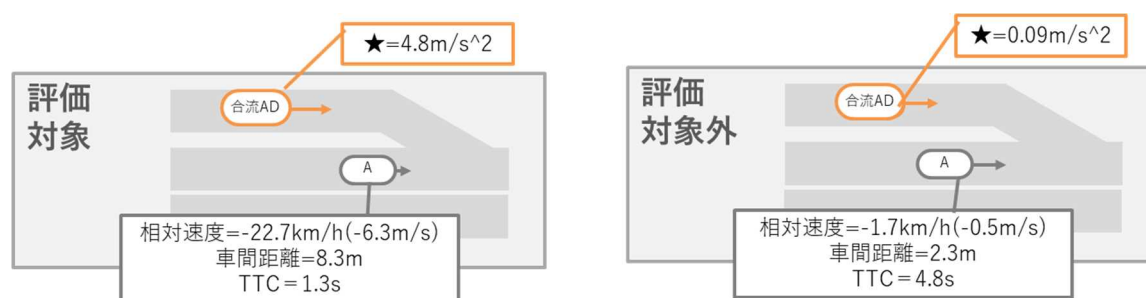


図 5-18 仕方ない本線車追い抜き（左）と不要な追い抜き（右）

不要な追い抜きと判定された合流は、図 3-4 のフローに則り、評価対象外とする。

5.5. 前提条件のまとめ

4章および5章で述べた主な前提条件について整理すると、表 5-4 のようになる。6章以降の結果は、この前提条件のもと得られたものであり、前提条件・本事業の検証範囲外においても同様の結果を保証するものではない点に留意されたい。したがって、合流支援システムについてより頑健な結論を得たい場合は、本事業の検証範囲外における検証も必要になると考える。

表 5-4 本事業の検証における主な前提条件

項目	内容
シミュレーションによる分析対象箇所(2.1 節)	首都高速 5 号池袋線下り東池袋入口 合流部
評価点の定義(3.1 節)と合流改善効果	評価点の定義は本事業内で合流支援検討会の関係者と協議の上決定したもの。シナリオ間の評価点の比較により合流改善効果を検証する。
評価点水準の区分(3.1 節)とコンセプト成立性	評価点水準の区分は本事業内で合流支援検討会の関係者と協議の上決定したもの。余裕のない合流の発生頻度に基づきコンセプト成立性を検証する(0 節にて詳説)。
自動運転車の前方車との車間(4.3.1 項)	2.0 秒以上の車間を空ける
Day2・Day3 システムモデルにおける合流車の行動変更を判断する頻度(4.4 節)	100ms に 1 回
本線車隙間狙い支援における合流起点(合流可能上流端点)到達予測時刻(4.4 節)	-0.2G から+0.2G の範囲の加減速を 1 秒間継続した場合を想定
本線車協調支援における対象本線自動運転車の前方車との車間(4.5.3 項)	維持すべき最小車間時間を 2.0 秒から 2.5 秒の車間に拡大
シミュレーションにおける発生車両(5.1.4 項)	普通車のみ
飽和度特高の交通流時の合流挙動について(5.4.2 項)	分析対象箇所の実交通流では発生し得ない流量である。そのため合流挙動の決定木アルゴリズムの学習範囲外であり合流挙動の再現性が未検証。

6. Day2 システムの検証

本章では、シミュレーション環境を用いた Day2 システムの検証について説明する。Day2 システムの検証に際して実施した項目は、大きく以下の4項目である。以降の節で各検証項目についてその内容・条件・結果を説明する。

- シミュレーションの推計幅の検証
- コンセプト成立性の検証
- システム物理条件変更時の合流改善効果の検証
- 交通流条件変更時の合流改善効果の検証

6.1. シミュレーションの推計幅の検証

本事業で構築したシミュレーション環境は内部で乱数生成器を用いた確率による処理を行っている。そのため、同一条件のシミュレーションであっても、乱数生成器に与える乱数種(シード値)が異なればシミュレーション結果も異なる。したがって、同一条件のシミュレーションを複数回実施した場合、シミュレーション結果にはばらつき(推計幅)が生じる。

合流支援システム導入シナリオの推計結果が支援システムなしシナリオの推計幅の範囲内であった場合、その推計結果は支援システムなしシナリオに対して明らかな差があるとはいえないと解釈することができる。言い換えると、「合流支援システムのコンセプト成立性がある」ということは、合流支援システムを導入したシナリオにおいて「支援システムなしシナリオの推計幅を超えた改善が見られる」とと考えることができる。

本事業では暫定的に、上記のシミュレーション結果の推計幅をコンセプト成立性の基準とした。本節では、その基準の算出方法・算出結果について説明する。なお、本事業で算出したコンセプト成立性の基準は5.5節の前提条件に基づいたものであり、条件の変化に伴いコンセプト成立性の基準も変化する。また、システム導入のコストについては考慮していないため、コンセプト成立性の基準についてはシステムの導入に伴うコストも考慮した基準とするなど、今後の継続した検討が必要であるとする。

6.1.1. 検証内容

シミュレーション結果の推計幅を考慮したコンセプト成立性があるかどうかの基準として、箱ひげ図における外れ値の判定方法に則ってコンセプト成立性があるかどうかを決定する方法を提案する。

箱ひげ図とは、図 6-1 に示すように四分位数を用いてデータのばらつき具合を表すものである。

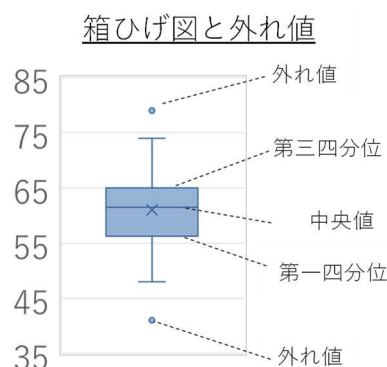


図 6-1 箱ひげ図と外れ値のイメージ

箱ひげ図においては、他のデータから大きく外れた値(外れ値)を検出する基準値として、しばしば「 $\text{第一四分位} - 1.5 \times \text{四分位範囲}$ ， $\text{第三四分位} + 1.5 \times \text{四分位範囲}$ 」が用いられる。この考え方を踏襲し、以下の手順に従って合流支援システムのコンセプト成立性を判断することとした。

1. 支援システムなしシナリオのシミュレーションを 100 回試行し、それぞれについて、「自動運転車両の評価点評価対象台数に占める合流評価点 0 点未満台数割合(A)」を算出する。
2. 試行 100 回分のAを対象に箱ひげ図の外れ値検出基準を適応し、 $\text{第一四分位} - 1.5 \times \text{四分位範囲}$ の値を算出する。
3. 以下の式に従い、試行 100 回分のAの中央値に対する、 $\text{第一四分位} - 1.5 \times \text{四分位範囲}$ の改善率の値を求める。これを合流支援システムのコンセプト成立性の基準値とする。

$$\text{合流支援システムのコンセプト成立性の基準値} = 1 - \frac{\text{第一四分位} - 1.5 \times \text{四分位範囲}}{\text{中央値}}$$

4. 以下式によって算出される「Aの改善率」が3. の基準値を上回るとき、「合流支援システムはコンセプト成立性あり」と判断する。ここで、以下式の A_{target} は合流支援導入シナリオにおける自動運転車両の評価点 0 点未満台数の割合を、 A_{base} は自動運転車両の評価点 0 点未満台数の割合を表す。

$$A \text{ の改善率} = 1 - \frac{A_{target}}{A_{base}}$$

6.1.2. 検証条件

支援システムなしシナリオについて 100 回シミュレーションを実施し、6.1.1 項の手順に従いシミュレーションの推計幅を検証する。支援システムなしシナリオの諸条件は表 6-1 のとおりである。

表 6-1 シミュレーションの推計幅検証シナリオの諸条件

項目		支援システムなし
交通流		疑似東池袋交通流
自動運転車両混在率		20%
支援システムの 諸条件	合流支援システム	なし
	センシングエリア /通信エリア	－
	本線車情報の伝達時間	－
	本線車位置情報の誤差	－
	本線車速度情報の誤差	－

6.1.3. 検証結果

支援システムなしシナリオのシミュレーションを 100 回試行し、それぞれについて合流自動運転車両の評価点評価対象台数に占める評価点 0 点未満(余裕のない合流)台数割合Aを算出した結果を図 6-2 に示す。試行 100 回分のAの分布は中央値 59.5%・第一四分位 56.0%であり、外れ値検出の基準値は 46.9%となった。したがって、合流支援システムのコンセプト成立性の基準値は改善率 21.3%($=1 - 0.468/0.595$)となる。

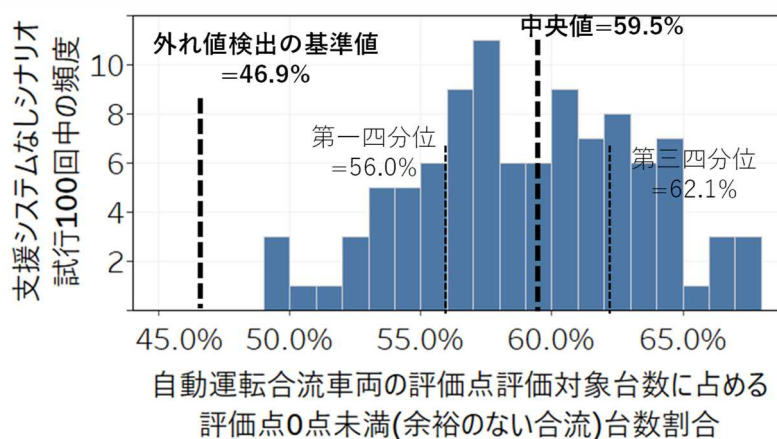


図 6-2 支援システムなしシナリオにおける自動運転車両に占める余裕のない合流の台数割合分布

上記の結果より合流支援システム導入シナリオの余裕のない合流の台数割合Aの改善率が、以下の基準を満たすとき当該の合流支援システムはコンセプト成立性があると考えることができる。ここで、以

下式の A_{target} は合流支援導入シナリオにおける自動運転車両の評価点0点未満台数の割合を、 A_{base} は自動運転車両の評価点0点未満台数の割合を表す。

$$\text{合流支援システム導入に伴うの}A\text{の改善率} = 1 - \frac{A_{target}}{A_{base}} < 21.3\%$$

6.2. コンセプト成立性の検証

6.2.1. 検証内容

本節では、Day2 システムのコンセプト成立性の検証として、「Day2 システムの導入により、合流改善効果は見られるか」という観点からシミュレーションの実施及び結果の評価を行う。Day2 システムは、合流車線の車両に対して本線を走行している車両の情報を配信し、合流車両に対して合流前の事前の速度調整を促すものである。したがって、特に合流部で合流車両と本線車両が横並びになるような場面对して、Day2 システム導入による合流改善効果が期待される。

6.2.2. 検証条件

支援システムなしシナリオ・Day2 システム導入シナリオのそれぞれについてシミュレーションを実施し、各シナリオの余裕のない合流となった自動運転車両の割合を比較分析することで Day2 システムのコンセプト成立性を検証する。各シナリオの諸条件は表 6-2 のとおりである。

表 6-2 Day2 システムのコンセプト成立性検証シナリオの諸条件

項目		支援システムなし	Day2 システム導入
交通流		疑似東池袋交通流	
自動運転車両混在率		20%	
支援システムの 諸条件	合流支援システム	なし	Day2
	センシングエリア /通信エリア	－	240m/130m
	本線車情報の伝達時間	－	0s
	本線車位置情報の誤差	－	誤差なし
	本線車速度情報の誤差	－	誤差なし

6.2.3. 検証結果

ここでは、以下の観点から、Day2 システムの導入による効果を検証する。

- ・ 合流支援を受けた自動運転車両の挙動の検証
- ・ 合流評価点に基づく合流改善効果の検証
- ・ 余裕のない合流の割合に基づくコンセプト成立性の検証

(1) 合流支援を受けた合流自動運転車両の挙動の検証

ここでは、代表的な合流自動運転車両の例を挙げ、合流支援を受けたことで合流自動運転車両の挙動や合流評価がどのように変化したのかを検証する。

● Day2 システム導入に伴い余裕のない合流が改善した例

図 6-3 に Day2 システム導入に伴い余裕のない合流が改善した例を示す。支援システムなしシナリオの場合は、丸枠内の合流自動運転車両は合流部進入時に初めて本線車両の存在を認知する。本線車両と横並び状態になってしまい、十分な車間距離を確保できないまま合流した。合流評価は余裕のない合流となった。

Day2 システム導入シナリオの場合は、本線車の情報を事前に受け取って速度の調整を行うことで、合流部進入時の本線車両との横並びを回避して合流した。合流評価は余裕のある合流となり、大きな合流改善効果が見られた。このように、Day2 システムによって合流部における本線車両との横並びを回避することで合流が大きく改善することが確認された。

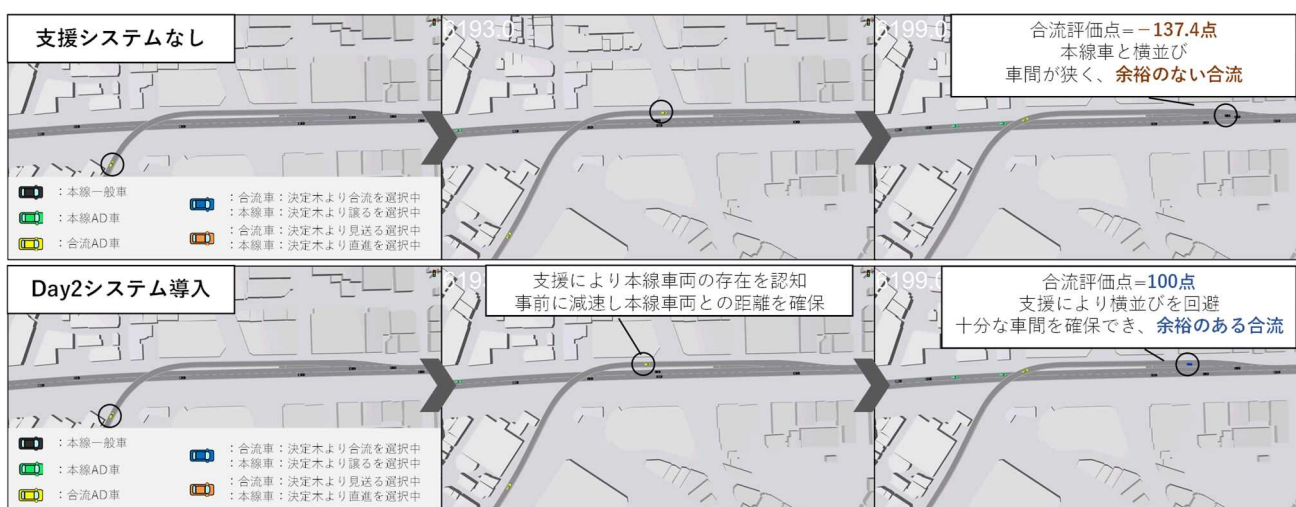


図 6-3 Day2 システム導入により余裕のない合流が改善した車両の例

● Day2 システム導入後も余裕のない合流が解消しなかった例

図 6-4 に Day2 システムを導入しても余裕のない合流が解消しなかった例を示す。支援システムなしシナリオの場合は、丸枠内の合流自動運転車両は合流部進入時に初めて本線車両の存在を認知するが、横並び状態になってしまい、十分な車間距離を確保できないまま合流した。合流評価は余裕のない合流となった。

Day2 システム導入シナリオの場合は、本線車の情報を事前に受け取って速度の調整を行うことで、合流部進入時の本線車両との横並びは回避できた。しかしながら、合流した車間は狭く合流評価は余裕のない合流となった。合流自動運転車両の合流支援中の挙動に注目すると、本線前方車両の速度が早いいため 0.2G で 1 秒間加速しても本線前方車両の前に合流することはできない。また、本線後方に車両が 3 台連なって走行しているため、-0.2G で 1 秒間減速しても本線後方車両 3 台の後ろに合流することはできない。したがって、加減速なしまたは弱加減速($\pm 0.1G$)によって本線車両との横並びを回避し、4 台連なっている本線車群の中に合流する結果となっている。このように、本線車両が複数台連なった車群と横並びの状態になった際には、 $\pm 0.2G$ の範囲内で 1 秒間加減速した場合を想定した Day2 システムでは余裕のない合流を解消することは困難であることが確認された。しかしながら横並び回避により合流評価点は 100 点以上改善している。



図 6-4 Day2 システム導入後も余裕のない合流が解消しなかった車両の例

（2） 合流改善効果の検証

合流評価点マップ上に合流自動運転車両の合流時の相対速度と車間距離をプロットした図を図 6-5 に示す。支援システムなしシナリオの車間距離 10m 以下の自動運転車両群が減少し、Day2 システム導入シナリオの車間距離 30m 付近の自動運転車両が増加した。Day2 システムの導入により、本線車両との横並びを回避し合流時の車間距離を確保できるようになった合流自動運転車両が増加したことが示唆される。

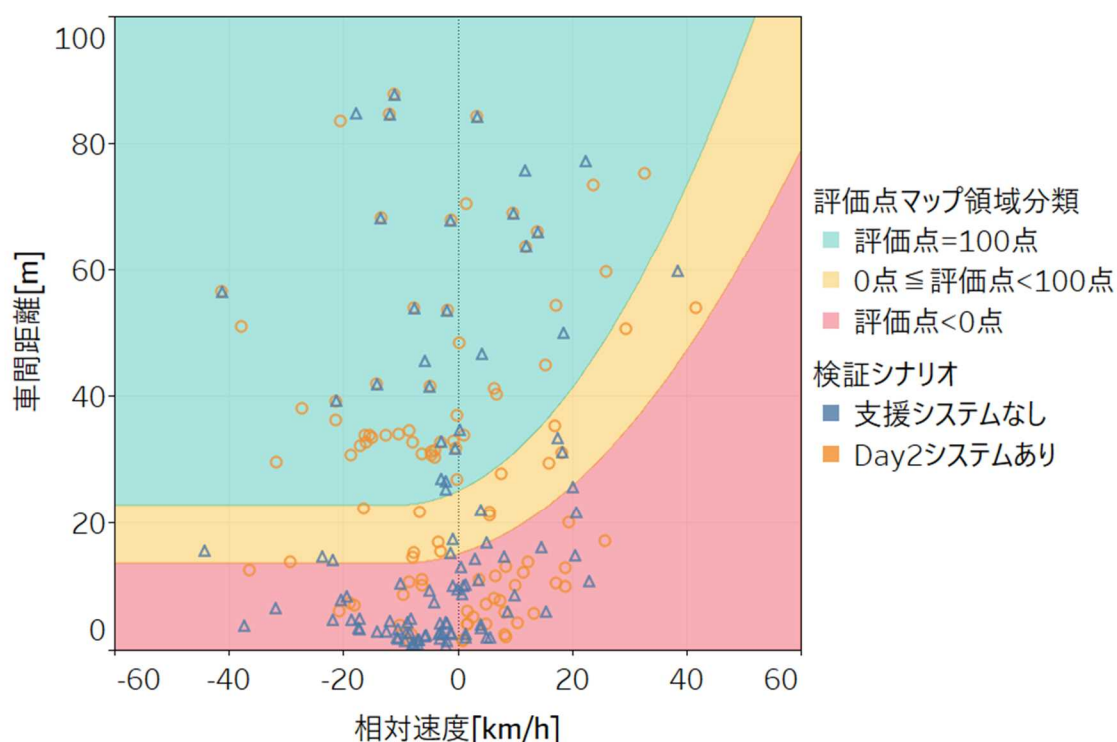


図 6-5 合流評価点マップ上の合流自動運転車両分布の支援システムなしと Day2 システムの比較
[自動運転車両混在率 20%・疑似東池袋交通流]

評価点評価の対象車両について、支援システムなしシナリオにおける評価点に対する Day2 システム導入シナリオにおける評価点を表した図を図 6-6 に示す。図の各点は合流自動運転車両一台一台を表し、対角線は線上の点について 2 つの検証シナリオで評価点が高いことを表している。対角線より左上の領域は Day2 システム導入シナリオの評価点のほうが高いことを表しており、対角線より右下の領域は支援システムなしシナリオの評価点のほうが高いことを表している。すなわち、同一 ID の合流自動運転車両について、Day2 システムの導入に伴い合流が改善した車両は対角線より左上の領域に、悪化した合流は右下の合流に位置することになる。Day2 システムの導入に伴い、多くの合流自動運転車両において評価点の向上が見られ、程度の差こそあるものの一定の合流改善効果が確認された。

一部の合流自動運転車両において Day2 システムの導入に伴い評価点の悪化が見られたが、これはバタフライエフェクト現象による影響と考えられる。Day2 システム導入に伴う軽微な交通流変化がその後の合流部の交通流に連鎖的に影響していった結果、検証シナリオ間で合流時の交通流に大きく差が生じるケースが発生しうる。これは、各エージェントの相互作用を考慮したマルチエージェント・シミュレ

ーションにおいてしばしば見られる現象であり、バタフライエフェクト現象と呼ばれる。バタフライエフェクト現象の影響が見られるこのようなケースにおいて、交通流条件が異なるため支援の導入による純粋な効果を比較することは困難である。しかしながら、バタフライエフェクト現象により検証シナリオ間で評価点が悪化するケースがあれば同様に改善するケースもあるため、シナリオ全体で見るとバタフライエフェクト現象の影響は相殺され、シナリオ全体として見られる傾向には影響しないと考えられる。散布図を参照する際は、上記の点に留意されたい。

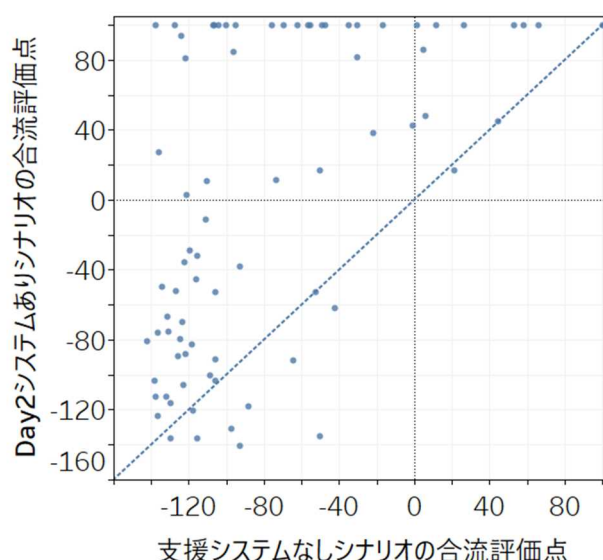


図 6-6 合流自動運転車両別の合流評価点比較 [自動運転車両混在率 20%・疑似東池袋交通流]

図 6-6 に示した、合流評価点のシナリオ間比較について、合流自動運転車両ごとの評価点変化量を集計した結果を図 6-7 に示す。見られる傾向としては図 6-6 と同様で、Day2 システムの導入に伴い合流評価点が改善する合流自動運転車両が多い。合流自動運転車両の 58%で合流評価点の改善が見られ、比較シナリオの両方で評価点が 100 点となった（評価点改善の余地がない）合流自動運転車両を除くと、合流評価点の改善が見られた合流自動運転車両の割合は 85%程度であった。評価点の変化量が 100 点を超えるような大幅改善となった合流自動運転車両も一定数確認された。

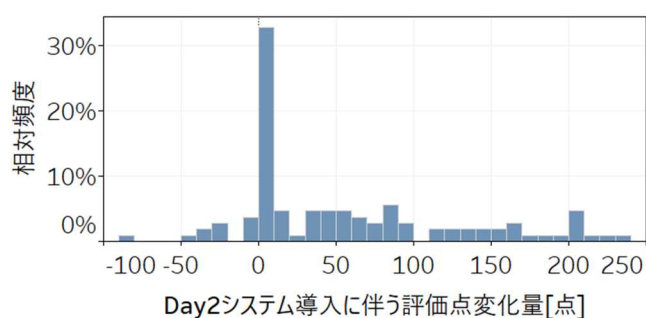


図 6-7 合流自動運転車両の支援なしに対する Day2 システムの合流評価点変化量
 [自動運転車両混在率 20%・飽和度高交通流]

合流自動運転車両の合流評価点平均値を検証シナリオごとに集計した結果を図 6-8 に示す。支援システムなしシナリオでは、多くの合流自動運転車両が評価点 0 点未満の余裕のない合流となっており、合流評価点の平均値は-26.5 点となった。対して Day2 システム導入シナリオでは、合流評価点が 0 点以上となる合流自動運転車両が増加し、合流評価点の平均値は 28.3 点となった。Day2 システムの導入により、平均合流評価点はおよそ 54 点改善する結果となった。

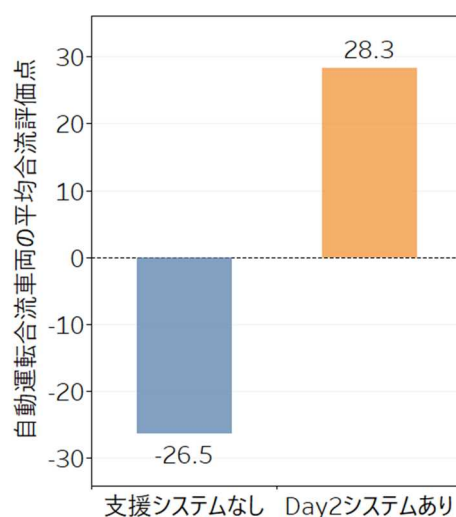


図 6-8 Day2 システムのコンセプト成立性検証シナリオにおける合流自動運転車両の平均合流評価点
[自動運転車両混在率 20%・疑似東池袋交通流]

合流自動運転車両について、検証シナリオ間の合流評価点マップ上の車両分布・検証シナリオ間の車両別評価点・検証シナリオ間の車両別評価点の 3 つの観点から比較分析を行った。いずれの結果からも Day2 システムの導入によって合流自動運転車両の合流評価点の向上が確認できたことから、Day2 システムには合流改善効果があると考えられる。

（3） コンセプト成立性の検証

合流自動運転車両を対象に、評価結果分類ごとに車両台数割合を集計した結果を図 6-9 に示す。Day2 システムの導入により、評価点 0 点未満の余裕のない合流の発生割合がおおよそ 20%減少し、反対に余裕のある合流の発生頻度が増加する結果となった。2 回以上見送りとなる合流の発生確率に大きな変化は見られなかった。

合流自動運転車両の評価点評価対象台数に占める余裕のない合流の割合は支援システムなしシナリオで 60.7% $(=46.1/(22.7+7.1+46.1))$ 、Day2 システム導入シナリオで 34.6% $(=26.2/(39.0+10.6+26.2))$ となった。Day2 システムの導入に伴う余裕のない合流の改善率は 43.0% $(=1-34.6/60.7)$ となり、これは 0 節で算出されたコンセプト成立性の基準値 21.3%を超えているため、5.5 節にまとめた本事業における検証の前提条件の範囲内において、Day2 システムのコンセプト成立性はあると考えられる。

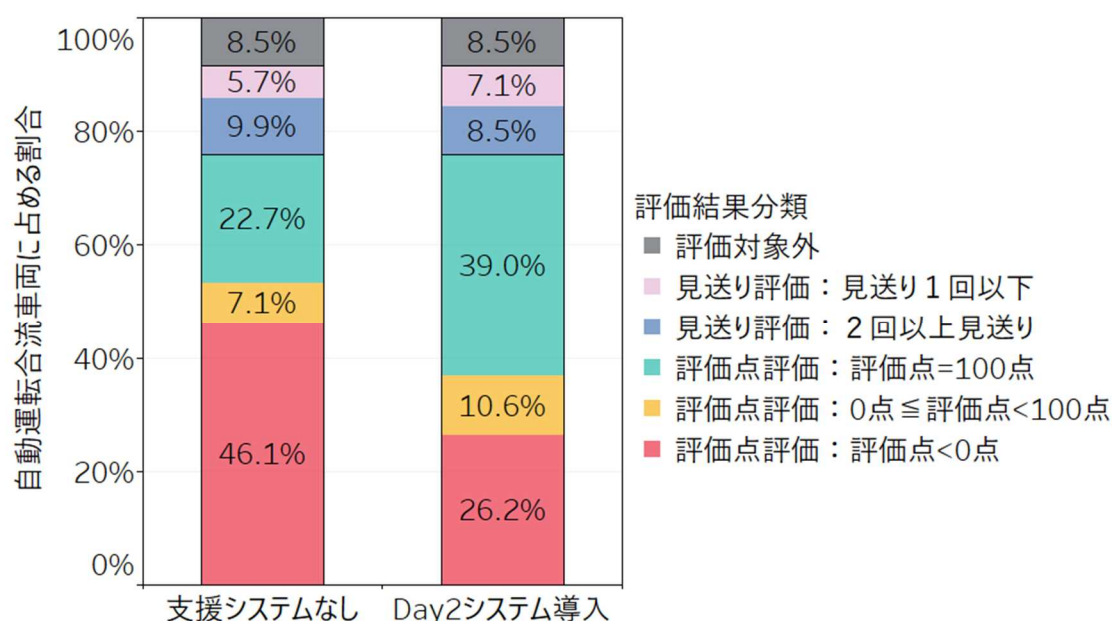


図 6-9 Day2 システムのコンセプト成立性検証シナリオにおける

自動運転車両にしめる各評価結果分類の台数割合 [自動運転車両混在率 20%・疑似東池袋交通流]

6.3. システム物理条件変更時の合流改善効果の検証

6.3.1. 分析内容

本節では、社会実装に際して Day2 システムに要求されるシステム物理条件を明らかにすべく、各システム物理条件が合流支援効果に与える影響について検証する。また、各システム物理条件の組み合わせについても検証し、本事業内で暫定的に定義したコンセプト成立性の基準値を満たすシステム物理条件の範囲を明らかにする。

6.3.2. 分析条件

各シナリオの諸条件は表 6-3 のとおりである。まず、各システム物理条件をそれぞれ単独で変動させた場合について検証を行った。その後、残りのシステム物理条件について総当たり組み合わせ 80 シナリオについてシミュレーションを実施し組み合わせごとにコンセプト成立性を検証した。

表 6-3 システム物理条件変更時の合流改善効果の検証シナリオの諸条件

		Day2 システム導入 システム物理条件変更シナリオ
交通流		疑似東池袋交通流
自動運転車両混在率		20%
支援システムの 諸条件	合流支援システム	Day2
	センシングエリア /通信エリア	240m/130m, 210m/120m, 180m/110m, 150m/90m, 130m/80m
	本線車情報の伝達時間	0s, 0.4s, 0.8, 1.3s
	本線車位置情報の誤差	0m, ±1m
	本線車速度情報の誤差	-6~6km/h, -12~12km/h, -12~0km/h

評価点評価と見送り評価を別々に実施した場合、それぞれの評価によってコンセプト成立性があるシステム物理条件の範囲が異なる可能性がある。評価点評価の対象台数に対して見送り評価の対象台数は小さいため評価点評価のみでコンセプト成立性があるシステム物理条件の範囲を検証する方法が考えられる。しかし、システム物理条件の組み合わせによっては見送り評価の対象台数が増加しコンセプト成立性の検証に影響を持つ場合もありうる。したがって、評価点評価と見送り評価を統合した検証を行うことが望ましい。そこで、見送り評価の対象となる合流自動運転車両についても合流評価点による評価を実施することとした。具体的には、2回以上見送りとなる合流自動運転車両について、合流評価が余裕のない合流と同等になるよう合流評価点から一律 101 点を差し引く補正を行った。これにより、見送り評価の対象となる合流自動運転車両を考慮した上で、コンセプト成立性の評価を実施できるようになる。なお、2回以上見送りとなる合流自動運転車両の合流評価点の補正方法については暫定的なものであり、本事業以降の検討において精査が望まれる。

評価点評価と見送り評価を統合したことにより、0節で算出したコンセプト成立性の基準値が変動すると考えられる。そのため、0節と同様の手順で評価点評価と見送り評価を統合した場合のコンセプト成立性の基準値を算出した。図 6-10 に支援システムなしシナリオにおける、合流自動運転車両に占める余裕のない合流と 2 回以上見送りの台数割合分布を示す。

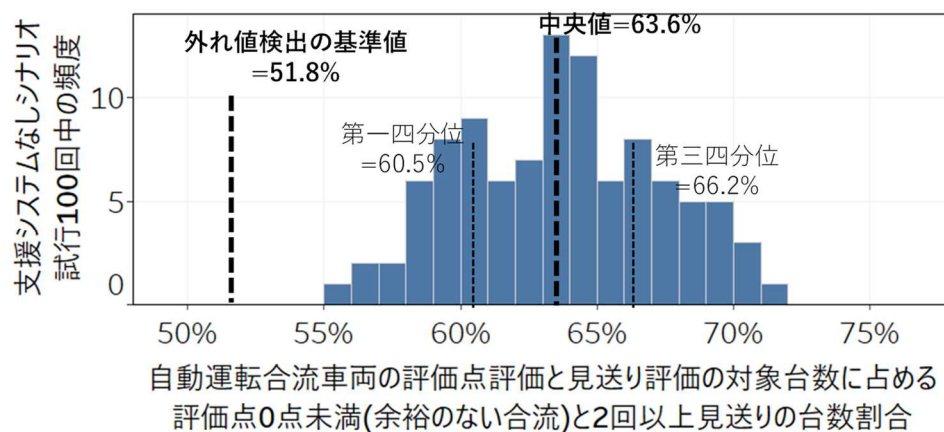


図 6-10 支援システムなしシナリオにおける合流自動運転車両に占める
 余裕のない合流と 2 回以上見送りの台数割合分布 [自動運転車両混在率 20%・疑似東池袋交通流]

余裕のない合流と 2 回以上見送りの台数割合 B の合流支援システム導入に伴う改善率が、以下の基準を満たすとき当該の合流支援システムはコンセプト成立性があると考えられる。ここで、以下式の B_{target} は合流支援導入シナリオにおける余裕のない合流と 2 回以上見送りの台数割合を、 B_{base} は支援システムなしシナリオ 100 回試行における余裕のない合流と 2 回以上見送りの台数の割合の中央値を表す。なお、 $B_{base} = 63.6\%$ である。

$$\text{合流支援システム導入に伴う } B \text{ の改善率} = 1 - \frac{B_{target}}{B_{base}} < 18.6\% = 1 - \frac{51.8\%}{63.6\%}$$

6.3.3. 分析結果

（1） 本線車位置情報の誤差

本線車位置情報の誤差は、誤差がある場合とない場合の2パターンとシナリオ数が少なく合流評価結果への影響の有無を検証しやすいため、はじめに本線車位置情報の誤差について検証した。図 6-11 に本線車位置情報の誤差による合流評価結果への影響を示す。本線車位置情報の誤差の有無による合流評価結果への違いはほとんど見られなかった。本線車位置情報の誤差が $-1\sim+1\text{m}$ の範囲の一様分布で与えられる場合は、Day2 システム導入時の合流評価結果およびコンセプト成立性には影響がないと考え、その他のシステム物理条件について検証を行った。以降の検証では、理想的なシステム物理条件のDay2 システム導入シナリオについても再度実行したため、図 6-11 の2段目の結果と以降の分析結果で結果が異なる点に留意されたい。

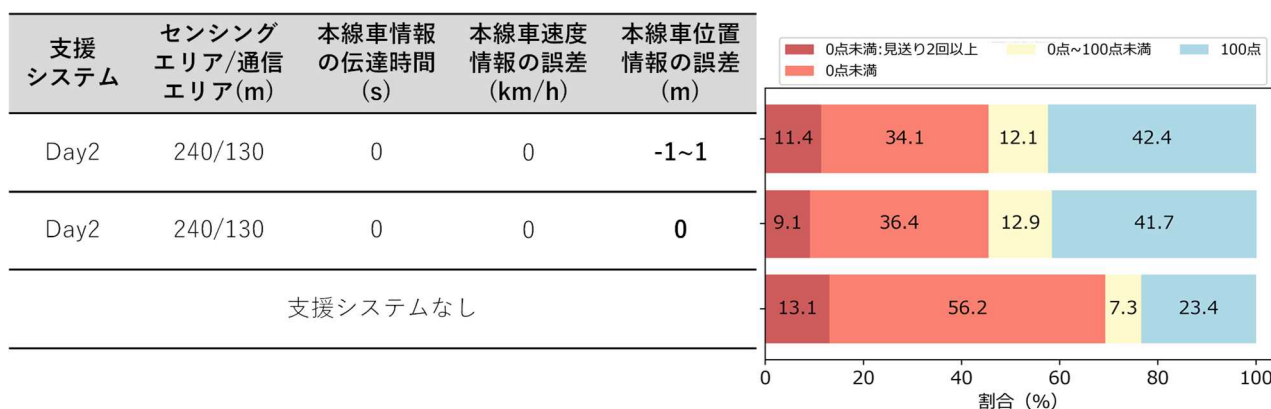


図 6-11 本線車位置情報の誤差による合流自動運転車両の合流評価結果への影響
 [自動運転車両混在率 20%・疑似東池袋交通流]

（2） センシングエリア・通信エリアの長さ

図 6-12 にセンシングエリア・通信エリアの長さの変動による合流評価結果への影響を示す。センシングエリア・通信エリアの長さが長くなるほど、余裕のない合流や見送り2回以上の合流の割合が減少することが明らかになった。

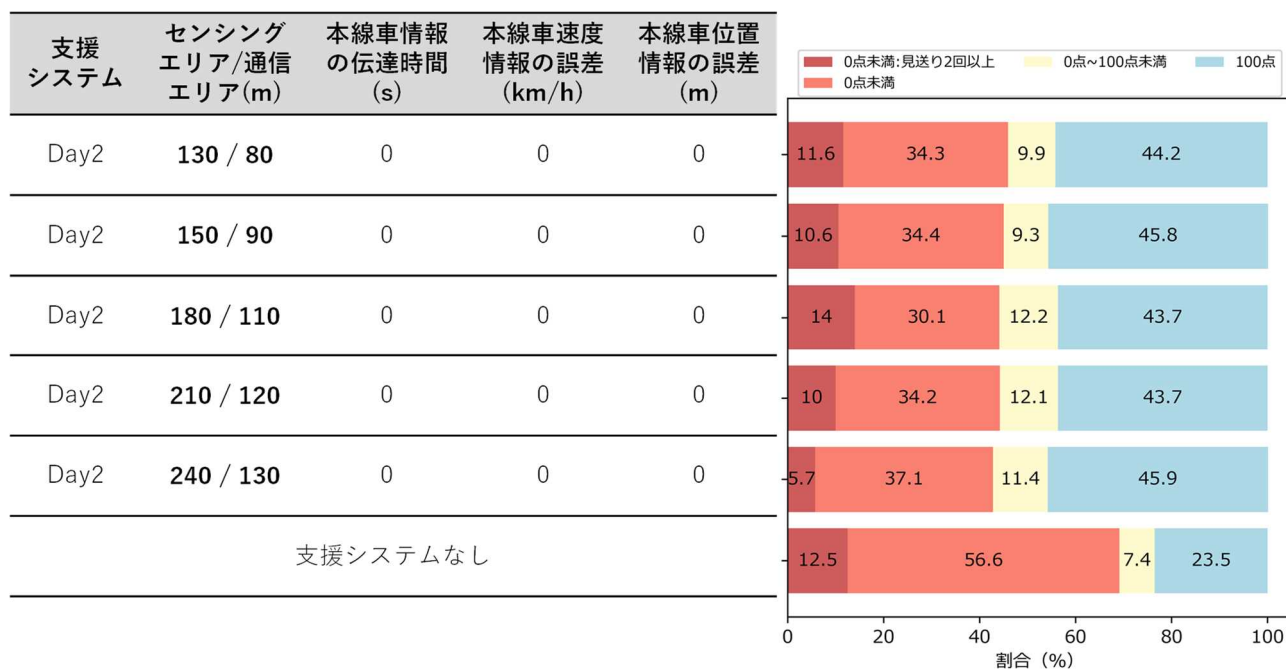


図 6-12 センシングエリア・通信エリアの長さによる合流自動運転車両の合流評価結果への影響
 [自動運転車両混在率 20%・疑似東池袋交通流]

（3） 本線車情報の伝達時間

図 6-13 に本線車情報の伝達時間の変動による合流評価結果への影響を示す。伝達時間が長くなるほど、余裕のない合流や見送り 2 回以上の合流の割合が増加することが明らかになった。特に見送り 2 回以上となる合流の割合が増加しており、条件変更に伴う変動幅はセンシングエリア・通信エリアの長さ に比べて大きい。

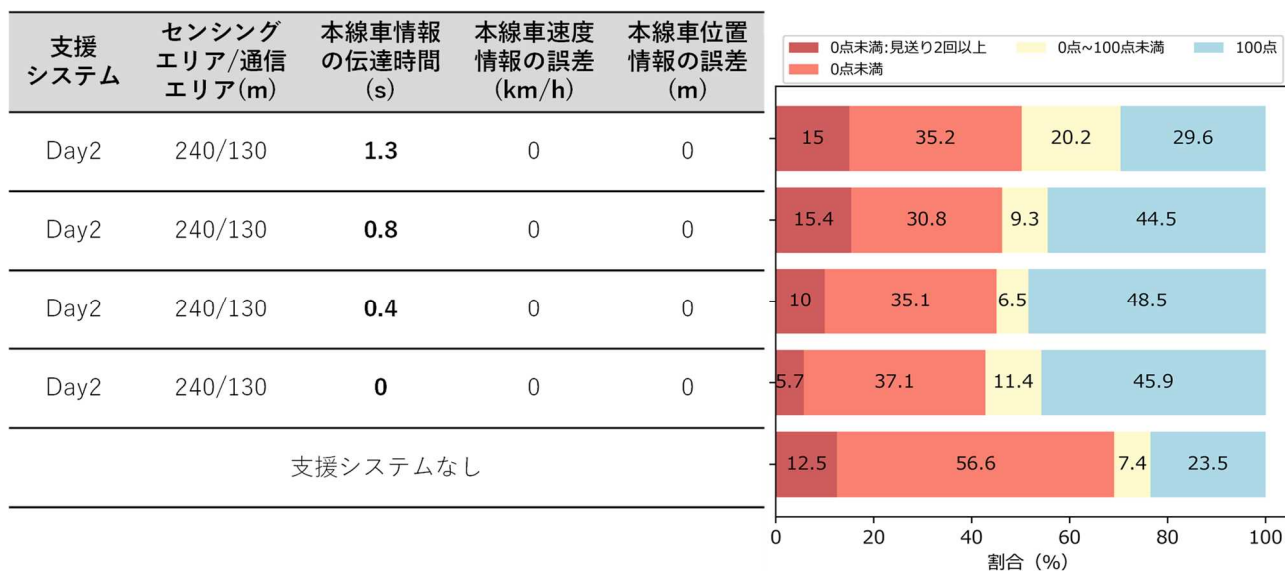


図 6-13 本線車情報の伝達時間による合流自動運転車両の合流評価結果への影響
 [自動運転車両混在率 20%・疑似東池袋交通流]

（4） 本線車速度情報の誤差

図 6-14 に本線車速度情報の誤差による合流評価結果への影響を示す。速度情報の誤差により合流評価結果は変動しているが、誤差が増大すると合流評価結果が悪化するという傾向は見られなかった。本線車情報の伝達時間が 0 秒であり、かつセンシングエリア・通信エリアの長さが 240m/130m という条件においては、むしろ－6～6km/h の速度情報誤差があることで合流が改善するケースが少数ではあるが確認された。

本検証は「Day2 システムによる本線車情報提供を受けて、合流自動運転車両が 0.1 秒ごとに行動選択を繰り返す」という前提条件のもと実施したものである。そのため、例えば－6km/h の誤差をもつ速度情報受信した 0.1 秒後に+6km/h の誤差をもつ速度情報を受信する、といったように正負が逆の情報を交互に受信するような状況がありうる。このような場合において、同じ合流自動運転車両に対する情報提供回数が増加するほど正負の誤差の影響は相殺されると想定される。このため、本線車速度情報の誤差による影響が小さかったと考えられる。また、速度情報誤差があることで合流自動運転車両がより厳しい本線車状況を想定して、より余裕を持って合流できるような速度調整を行った結果、場合によっては合流評価が改善するケースも確認され、本線車速度情報の誤差があると合流評価が悪化するという顕著な結果とはならなかった。

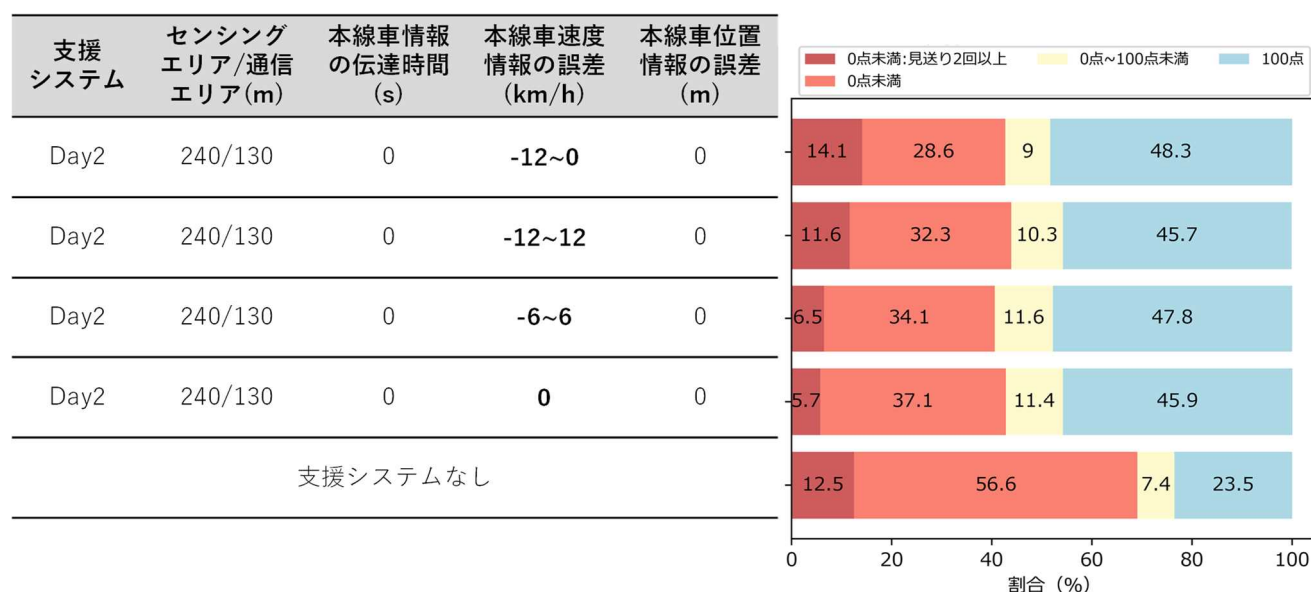


図 6-14 本線車速度情報の誤差による合流評価結果への影響
 [自動運転車両混在率 20%・疑似東池袋交通流]

（5） システム物理条件組み合わせ別の成立性評価

システム物理条件の総当り組み合わせ別に、余裕のない合流と2回以上見送りの台数割合の改善率を算出した結果を、表6-4に示す。なお、改善率は支援システムなしシナリオ100回試行の中央値に対するものとした。改善率が基準値18.6%を上回りコンセプト成立性があると考えられるのは、表中のシステム物理条件の組み合わせのうち黄色線囲み内の組み合わせである。

本線車情報の伝達時間による影響が顕著で、伝達時間の平均が1.3秒になると改善率が大きく低下しコンセプト成立性は確認できなかった。また、伝達時間が0.8秒でも本線車速度情報の誤差が負に偏る場合やセンシングエリア/通信エリアが短くかつ速度情報誤差が大きい場合は改善率が低く、コンセプト成立性が確認できなかった。伝達時間が短く速度情報誤差が小さい場合には、センシングエリア/通信エリアの長さによらずコンセプト成立性はあると考えられるが、センシングエリア/通信エリアがそれぞれ180m/110m以上確保されたシナリオにおいて改善率がより高くなる傾向が確認された。

なお、本結果は「Day2 システムによる本線車情報提供を受けて、合流自動運転車両が0.1秒ごとに行動選択を繰り返す」という前提条件のもと得られたものである。実際には、自動運転車両が行動選択を行う時間間隔は0.1秒よりも長くなることが想定される。その場合は、一回の情報提供によって行動する時間が長くなるため、速度情報誤差や伝達時間が合流評価に与える影響が大きくなると考えられる。このため、本検証の評価結果は、本線車速度情報の誤差や本線車情報の伝達時間の影響を過小に評価している可能性がある点に留意されたい。

Day2 システムを社会実装する際のシステム物理条件をより精緻に検証するためには、Day2 システムの支援内容や支援情報を受けた自動運転車両の挙動について追加の検討を行った後、改めてシステム物理条件組み合わせ別の成立性評価を行うことが望ましい。

表 6-4 Day2 システムのコンセプト成立性境界条件

[自動運転車両混在率 20%・疑似東池袋交通流]

本線車情報の 伝達時間† (s)	本線車速度 情報の誤差* (km/h)	センシングエリア(m)/通信エリア(m)				
		130/80	150/90	180/110	210/120	240/130
1.3	-12~0	-11.53%	-12.79%	-10.17%	-9.23%	-9.70%
	-12~+12	4.26%	11.38%	15.68%	16.08%	17.70%
	-6~+6	7.12%	13.03%	21.46%	18.05%	14.12%
	0	8.49%	11.90%	17.40%	17.75%	20.45%
0.8	-12~0	2.65%	10.07%	16.84%	18.29%	15.55%
	-12~+12	16.61%	18.32%	26.67%	29.13%	28.18%
	-6~+6	19.75%	24.29%	29.28%	28.25%	31.31%
	0	20.44%	23.64%	30.30%	26.62%	26.67%
0.4	-12~0	18.96%	23.39%	25.49%	22.20%	28.32%
	-12~+12	24.26%	21.49%	27.74%	29.21%	29.05%
	-6~+6	22.48%	24.92%	27.93%	27.25%	31.12%
	0	27.36%	26.93%	26.25%	28.36%	28.61%
0	-12~0	22.83%	25.21%	29.21%	26.52%	32.20%
	-12~+12	23.49%	24.88%	24.78%	24.17%	30.27%
	-6~+6	27.56%	26.16%	30.94%	32.79%	35.68%
	0	27.19%	28.74%	30.05%	29.97%	32.11%

成立性なし

成立性あり

† 当該値を平均値、標準偏差を0.2とする正規分布 * 当該範囲を95%区間とする正規分布

6.4. 交通流条件変更時の合流改善効果の検証

6.4.1. 分析内容

Day2 システムは合流自動運転車両に本線車情報を提供し、合流部侵入前の事前の速度調整を促し余裕のある本線車間への合流の実現を目指すものである。余裕のある本線車間への合流を支援するものであるため、本線交通流の条件(粗密)によって合流支援効果が変動することが想定される。本節では、交通流条件として飽和度を変動させた際のシミュレーション結果を比較することで、交通流条件変更時の合流改善効果を検証する。

本線交通流が疎である場合は合流支援システムがなくとも余裕のある合流が達成されと考えられる。反対に密である場合は余裕を持って合流できる本線車間がそもそも存在しないため合流支援システムによる合流改善効果は低減することが予想される。したがって、本線交通流の粗密が中程度のときに最も合流改善効果が大きくなることが予想される。

6.4.2. 分析条件

各シナリオの諸条件は表 6-5 のとおりである。支援システムなしシナリオと Day2 システム導入シナリオを飽和度ごとにそれぞれ実施し、Day2 システム導入に伴う余裕のない合流の改善度合いを評価する。

表 6-5 Day2 システムの交通流条件変更時の合流改善効果検証シナリオの諸条件

項目		支援システム なし	Day2 システム 導入
交通流		飽和度低，中，高，特高	
自動運転車両混在率		20%	
支援システムの 諸条件	合流支援システム	なし	Day2
	センシングエリア /通信エリア	－	240m/130m
	本線車情報の 伝達時間	－	0s
	本線車位置情報の 誤差	－	誤差なし
	本線車速度情報の 誤差	－	誤差なし

6.4.3. 分析結果

(1) 合流改善効果の検証

合流自動運転車両の合流評価点平均値を検証シナリオごとに集計した結果を図 6-15 に示す。支援システムなしシナリオでは、飽和度が高くなるほど平均合流評価点は低下し、飽和度中以上では合流評価

点の平均値は0点未満となった。Day2 システム導入シナリオでも、飽和度が高くなるほど平均合流評価点は低下しているが、飽和度低から高前の交通流において合流評価点は0点以上となった。Day2 システム導入による平均合流評価点の改善効果は飽和度中において最も大きく約69点の改善が見られた。合流改善効果としては、飽和度中で最も高く、次いで飽和度低、飽和度高の順に合流改善効果が高いといえる。飽和度特高については、Day2 システムを導入しても平均合流評価点は0点未満のままであり合流評価点の改善も他の飽和度と比べ最も低い。

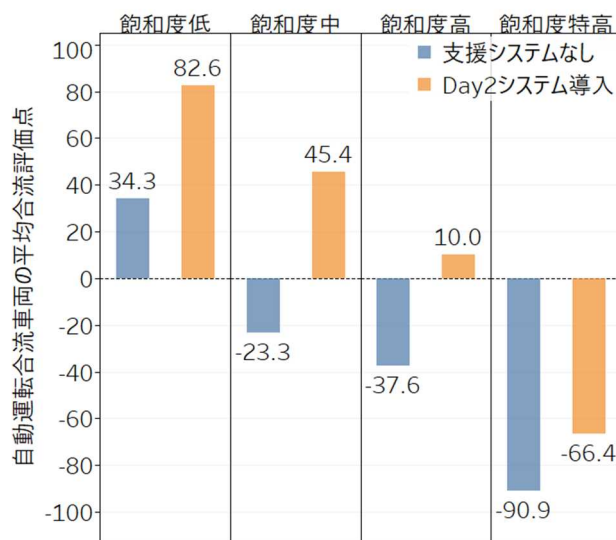


図 6-15 Day2 システムの合流条件変更時の合流改善効果検証シナリオにおける
 合流自動運転車両の平均合流評価点〔自動運転車両混在率 20%〕

（2） コンセプト成立性の検証

合流自動運転車両を対象に、評価結果分類ごとに車両台数割合を集計した結果を図 6-16 に示す。飽和度が異なると評価対象外の割合も異なるため、合流自動運転車両のうち評価対象外を除いた台数に対する割合を示している。支援システムなしシナリオ・Day2 システム導入シナリオともに、飽和度低において合流評価が最もよい。飽和度飽和度が高くなるにつれて、余裕のない合流や2回以上見送りとなる割合が増加し合流評価は悪化していくことが明らかとなった。

余裕のない合流の台数割合の変化量は飽和度低 25.2%減、飽和度中 29.1%減、飽和度高 18.7%、飽和度特高 5.5%となった。「余裕のない合流となる合流自動運転車両をどれだけ多く改善させられたか」という観点では、飽和度中における効果が最も高いという結果となった。しかしながら、「余裕のない合流となる合流自動運転車両の発生をどれだけ抑えられたか」という観点から見ると、飽和度中ではDay2 システム導入後も余裕のない合流となる合流自動運転車両は25.2%程度残っており、依然として改善の余地があるといえる。飽和度中以上になるとの交通流量が増加することで本線車両が複数台連なった車群が形成され始め、結果として6.2.3 項（1）で示したようなDay2 システムでは余裕のない合流を解消できないようなケースが増加していると考えられる。

余裕のない合流の改善率について比較すると、飽和度低 80.0%、飽和度中 53.6%、飽和度高 33.1%、飽和度特高 10.1%となり、「余裕のない合流となる合流自動運転車両の発生をどれだけ抑えられたか」という観点では、飽和度低における効果が最も高いという結果となった。Day2 システムのコンセプト成立性検証のときに用いた基準値 21.3%を適応すれば、飽和度低・中・高においては、コンセプト成立性の基準を満たす結果となった。

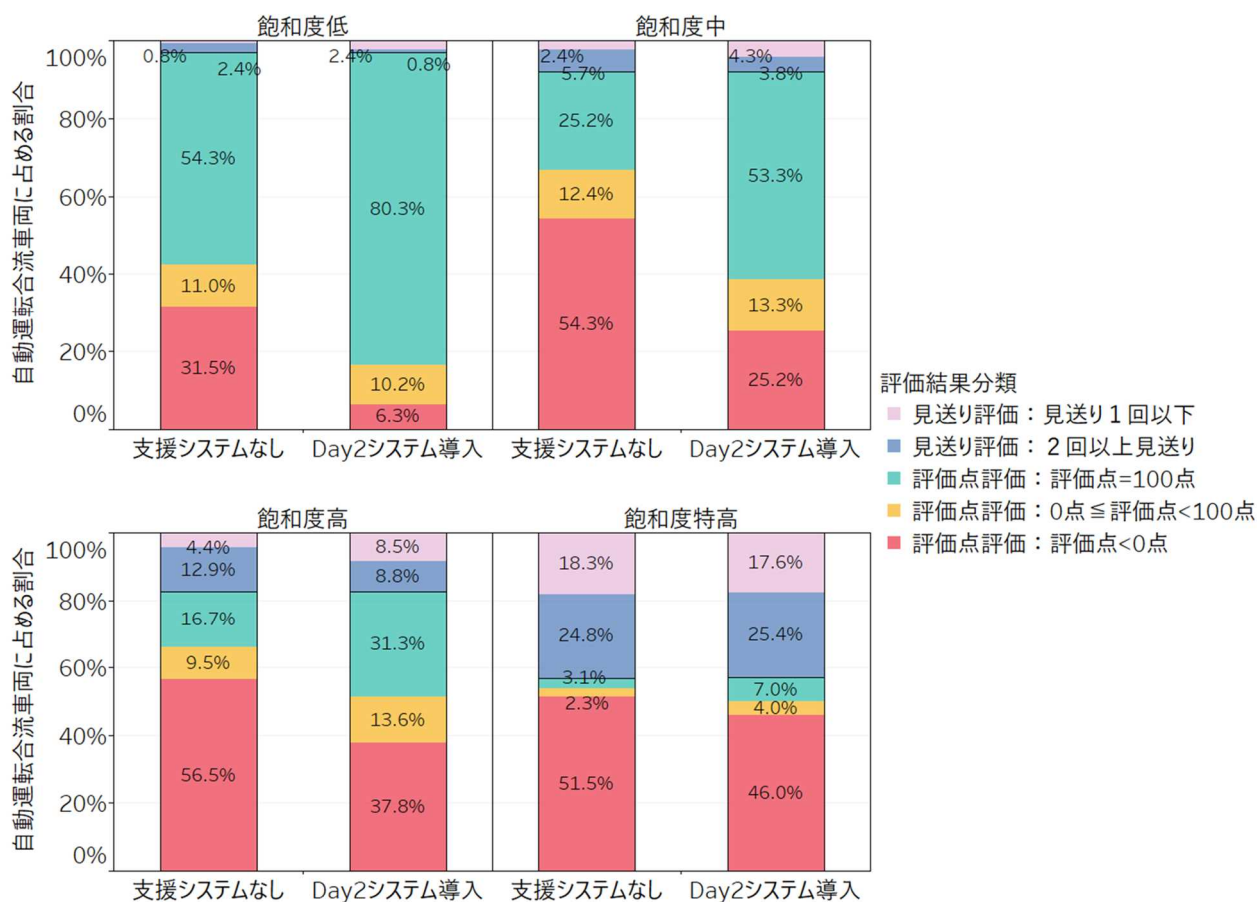


図 6-16 Day2 システムの交通流条件変更時の合流改善効果検証シナリオにおける自動運転車両に占める各評価結果分類の台数割合（評価対象外を除外）〔自動運転車両混在率 20%〕

7. Day3 システムの検証

本章では、合流自動運転車両への情報提供による本線隙間狙い支援に加えて本線自動運転車両への情報提供による本線車協調支援を行う Day3 システムについて、そのコンセプト成立性の検証を行う。

Day3 システムは Day2 システムの拡張という位置付けにあるため、Day2 システムを超える合流改善効果が期待される。また、Day2 システムの合流改善効果が低減する条件下においても合流改善効果を維持できることが期待される。したがって、Day2 システムの合流改善効果が低減する交通流条件を対象として Day3 システムのコンセプト成立性の検証を行う。

0 節では Day2 システムの合流改善効果が低減する交通流条件について検証し、飽和度中をピークに飽和度が高くなるにつれて合流改善効果が低減することを明らかにした。Day2 システムの合流改善効果が最も小さいのは飽和度特高であったが、5.4.2 項で述べた通り合流挙動モデルが飽和度特高における一般ドライバーの運転挙動を表現できていない可能性がある。したがって、次点で合流改善効果が小さい飽和度高を対象とした。

7.1. 自動運転車両混在率変更時の合流への影響の検証

7.1.1. 検証内容

本節では、Day3 システムの検証に先立ち、支援システムがない状態を対象に自動運転車両混在率を変更したときの合流への影響を検証する。

自動運転車両混在率を変更させる目的について説明する。Day3 システムは、合流自動運転車両に加え本線自動運転車両にも情報提供を行うものである。Day3 システムの合流支援が発動する条件は、合流自動運転車両と本線自動運転車両が遭遇することであるため、合流自動運転車両だけに情報提供を行う Day2 システムに比べて合流支援の発動頻度が低くなることが想定される。また、合流自動運転車両と本線自動運転車両が遭遇したとしても、本線の状況によっては本線自動運転車両に何らの速度調整を要求しないため、発動確率は一層低くなることが懸念される。これに加えて、1.2 節のロードマップでも示した通り Day3 システムは自動運転車両混在率（普及率）30%以上の社会を想定したシステムである。このことと上記の懸念を考慮した検証を行うため、自動運転車両混在率が 20%と 30%の場合の両方を対象とした。

本事業のシミュレーションにおいては、自動運転車両は前方車両との車間時間を 2 秒確保するように走行するモデルを採用した。そのため、自動運転車両混在率が上昇することで本線車間が変化することが想定され、合流が改善する可能性や交通流が滞ることで反対に合流が悪化する可能性が考えられる。本節はこの点を検証し、自動運転車両混在率の変化が合流に与える影響を明らかにすることを目的としたものである。

7.1.2. 検証条件

表 7-1 に検証シナリオの諸条件を示す。本節では、支援システムがない状態を対象に、自動運転車両混在率を変化させたシナリオを比較し、自動運転車両混在率が合流に与える影響について検証する。

表 7-1 自動運転車両混在率変更時の合流への影響検証シナリオの諸条件

項目		自動運転車両 混在率 0%	自動運転車両 混在率 20%	自動運転車両 混在率 30%
交通流		飽和度高		
自動運転車両混在率		0%	20%	20%
支援システムの 諸条件	合流支援システム	なし		
	センシングエリア /通信エリア	-		
	本線車情報の伝達時間	-		
	本線車位置情報の誤差	-		
	本線車速度情報の誤差	-		

7.1.3. 検証結果

図 7-1 に検証シナリオ別に評価点評価対象の合流車両における平均合流評価点を示す。自動運転車両混在率の増加に伴い、平均合流評価点が悪化することが明らかになった。自動運転車両は前方車両との車間時間を 2 秒に維持するがその影響で交通流に何らかの影響が生じ、平均合流評価点が悪化したと考えられる。

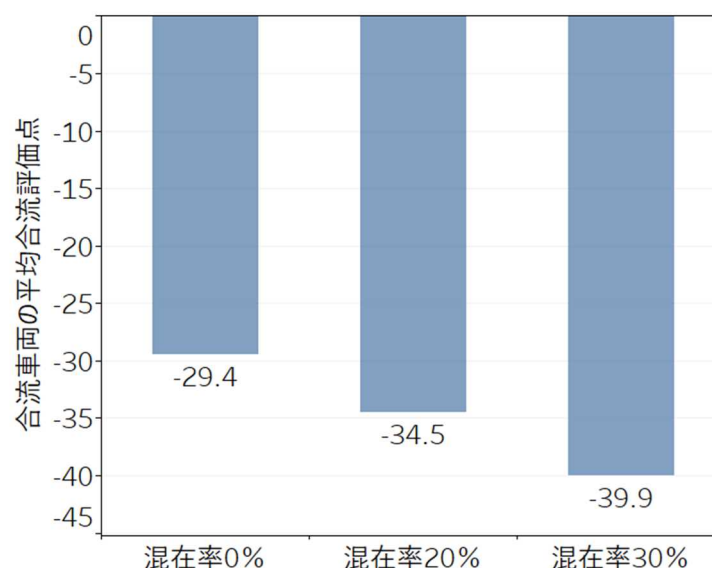


図 7-1 自動運転車両混在率変更時の合流への影響検証シナリオにおける
 合流車両の平均合流評価点 [疑似東池袋交通流]

図 7-2 に検証シナリオ別の評価結果分類の台数割合を示す。自動運転車両混在率の増加に伴い評価点 0 点未満の余裕のない合流画像化することが明らかとなった。平均合流評価点の結果と同様に、自動運転車両混在率の増加に伴い合流評価を悪化させるような本線交通流の変化があったと考えられる。

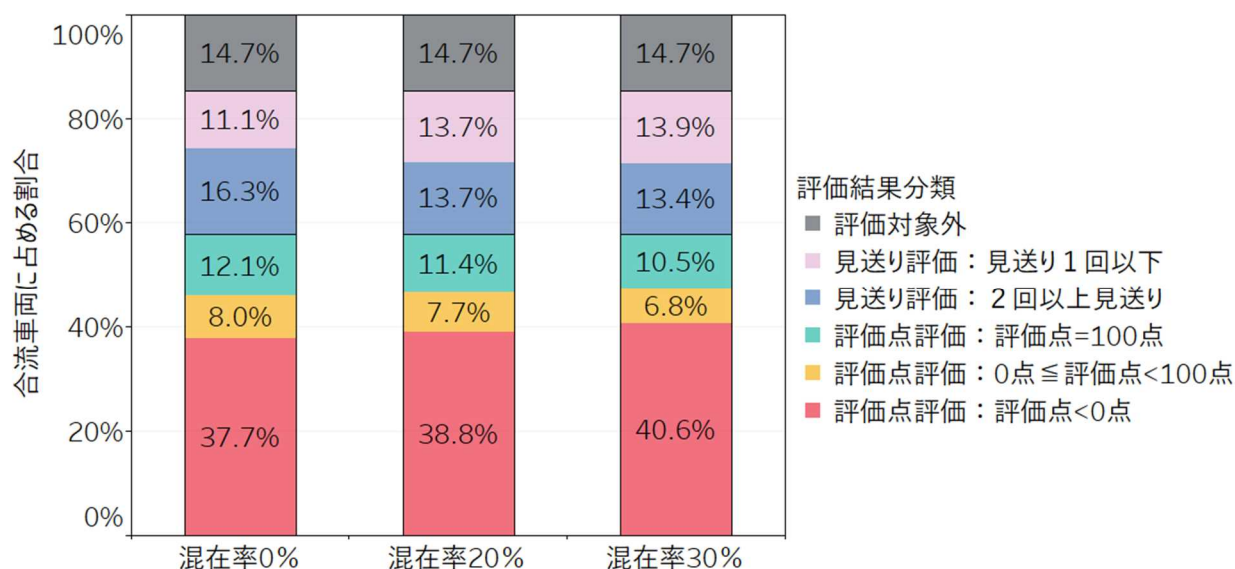


図 7-2 自動運転車両混在率変更時の合流への影響検証シナリオにおける
 合流車両に示める各評価結果分類の台数割合 [疑似東池袋交通流]

上記のような結果となった原因は、自動運転車両が 20%または 30%と混在するに伴い緩衝材となる広い車間が減少したことによって、本線の車両が密で平均速度が 40km/h 以下となる状態が長期化したことであると考えられる。このような状態の一例を図 7-3 に示す。本線の車両が密で平均速度が 40km/h 以下となる状態のある時点と、そこから 30 秒後の時点と、さらに 15 秒後の時点の 3 時点について、自動運転車両混在率 0%シナリオと 30%シナリオのシミュレーション画像を上下で比較している。30 秒後の時点で、混在率 0%シナリオの方には上流部に広い車間ができており、これが緩衝材となり本線の車両が密で平均速度が 40km/h 以下となる状態が途切れる。対して混在率 30%シナリオの方は、自動運転車両が 2 秒車間を維持する影響で広い車間がなくなっている。そのため、本線上流の車両が前方の走行速度が遅い車両群に巻き込まれるかたちで本線の車両が密で平均速度が 40km/h 以下となる状態が長期化している。さらに 15 秒後の時点においても、上流部で本線の車両が密で平均速度が 40km/h 以下となる状態が継続している。本事業のシミュレーション環境および自動運転車両混在率 0%、20%、30%について実施した検証の範囲内においては、上記のように、自動運転車両が混在することで広い車間が減少し、その影響によって本線の車両が密で平均速度が 40km/h 以下となる状態が長期化するようになったことが確認された。

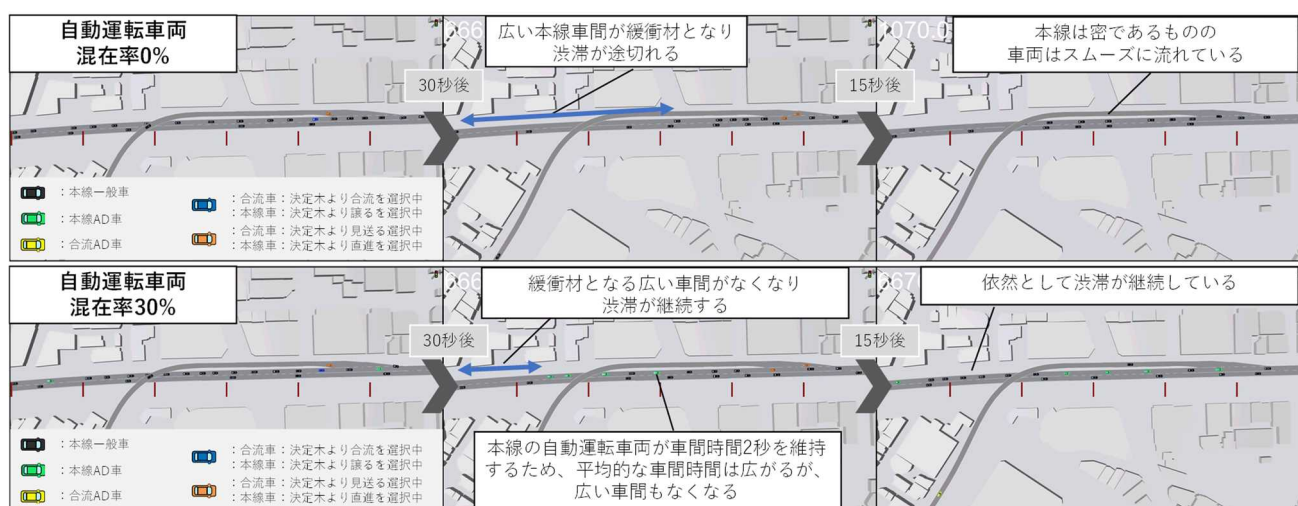


図 7-3 自動運転車両の混在に伴う

「本線の車両が密で平均速度が 40km/h 以下となる状態」の長期化の例

ここまで、自動運転車両混在率変更時の合流への影響を検証してきた。自動運転車両混在率 0%、20%、30%について実施した検証の範囲内においては、自動運転車両の混在によって合流が改善するという傾向は確認されず、反対に本線の車両が密で平均速度が 40km/h 以下となる状態が長期化した結果として合流評価がわずかに悪化する結果となった。

7.2. コンセプト成立性の検証

7.2.1. 検証内容

本節では、Day3 システムのコンセプト成立性の検証として、シミュレーションの実施及び Day2 システムから Day3 システムへの変更に伴う合流改善効果の評価を行う。Day3 システムは、合流車両への本線隙間狙い支援に加え、本線車両に対しても合流車線の情報を配信し、合流部進入までに合流しやすい車間を確保させる本線車協調支援を行うものである。したがって、特に、本線交通流が比較的密な状態において、Day3 システム導入による合流改善効果が期待される。

7.2.2. 検証条件

支援システムなしシナリオ・Day2 システム導入シナリオ・Day3 システム導入シナリオのそれぞれについて自動運転車両混在率 20%・30%の飽和度高交通流におけるシミュレーションを実施し、各シナリオの余裕のない合流となった自動運転車両の割合を比較分析することで Day2 システムのコンセプト成立性を検証する。各シナリオの諸条件は表 7-2、表 7-3 のとおりである。

表 7-2 Day3 システムのコンセプト成立性検証シナリオの諸条件（自動運転車両混在率 20%）

項目		支援システム なし	Day2 システム 導入	Day3 システム 導入
交通流		飽和度高		
自動運転車両混在率		20%		
支援システムの 諸条件	合流支援システム	なし	Day2	Day3
	センシングエリア /通信エリア	－	240m/130m	240m/130m
	本線車情報の 伝達時間	－	0s	0s
	本線車位置情報の 誤差	－	誤差なし	誤差なし
	本線車速度情報の 誤差	－	誤差なし	誤差なし

表 7-3 Day3 システムのコンセプト成立性検証シナリオの諸条件（自動運転車両混在率 30%）

項目		支援システム なし	Day2 システム 導入	Day3 システム 導入
交通流		飽和度高		
自動運転車両混在率		30%		
支援システムの 諸条件	合流支援システム	なし	Day2	Day3
	センシングエリア /通信エリア	－	240m/130m	240m/130m
	本線車情報の 伝達時間	－	0s	0s
	本線車位置情報の 誤差	－	誤差なし	誤差なし
	本線車速度情報の 誤差	－	誤差なし	誤差なし

7.2.3. 検証結果

ここでは、Day2 システムの検証と同様に、以下の観点から Day3 システムの導入による効果を検証する。

- ・ 合流支援を受けた自動運転車両の挙動の検証
- ・ 合流評価点に基づく合流改善効果の検証
- ・ 余裕のない合流の割合に基づくコンセプト成立性の検証

（1） 合流支援を受けた合流自動運転車両の挙動の検証

代表的な合流自動運転車両の例を挙げ、合流支援を受けたことで合流自動運転車両の挙動や合流がどのように変化したのかを検証する。

● Day2 システムから Day3 システムへ変更しても余裕のない合流が解消しなかった例

図 7-4 に Day2 システムから Day3 システムへ変更しても余裕のない合流が解消しなかった合流自動運転車両の例を示す。Day3 システムの導入に伴い本線後方の自動運転車両は、自身の前方車両との車間時間が 2.5 秒になるように調節し、合流自動運転車両は拡大した 2.5 秒車間に合流したが、評価点の改善幅としては 10 点程度で合流評価も余裕のない合流のままであった。2 秒から 2.5 秒に車間が広がっても評価点の改善は微々たるもので余裕のない合流を解消するほどではない、という可能性が示唆される。

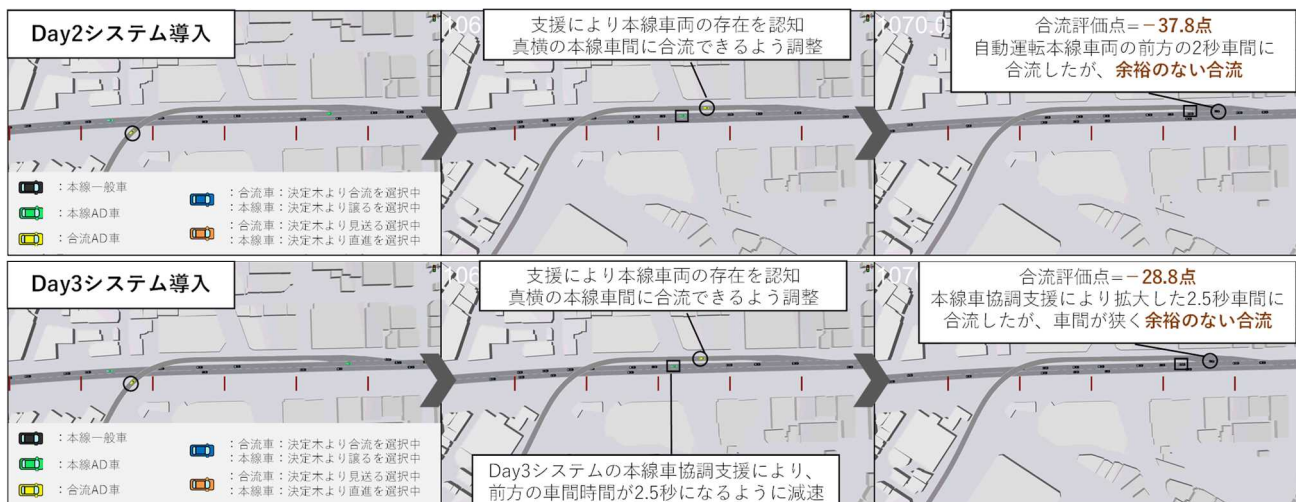


図 7-4 Day2 システムから Day3 システムへ変更しても余裕のない合流が解消しなかった例

● Day2 システムから Day3 システムへの変更に伴い余裕のない合流が改善した例

図 7-5 に Day2 システムから Day3 システムへの変更に伴い余裕のない合流が改善した合流自動運転車両の例を示す。Day3 システムの導入に伴い本線後方の自動運転車両は、自身の前方車両との車間時間が 2.5 秒になるように減速し、合流自動運転車両は事前に加速した上で拡大した 2.5 秒車間に合流した。車間時間 2.5 秒は余裕のある広さではないものの、相対速度が小さくなった影響で評価点は約 50 点改善し、余裕のない合流が解消された。このように、Day3 システムによる本線車協調支援によって本線後方車両との相対速度が小さくなり合流評価が改善するケースも少数ながら確認された。



図 7-5 Day2 システムから Day3 システムへの変更に伴い余裕のない合流が解消した例

（2） 合流改善効果の検証

合流評価点マップ上に合流自動運転車両の合流時の相対速度と車間距離をプロットした図を図 7-6 に示す。支援システムなしシナリオの車間距離 10m 以下の自動運転車両群が減少し、Day2 システム導入シナリオの車間距離 30m 付近の自動運転車両が増加した。この傾向は、自動運転車両混在率の違いによらず同様である。Day2 システムの導入により、合流評価点 0 点未満の余裕のない合流の一部が改善したことが示唆される。

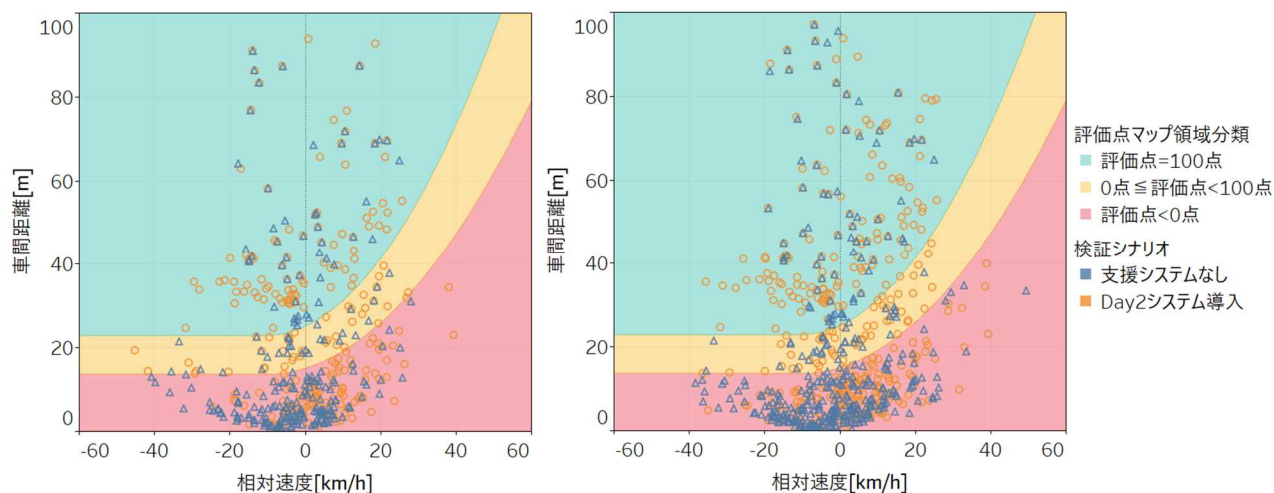


図 7-6 合流評価点マップ上の合流自動運転車両の分布支援システムなしと Day2 システムの比較
(自動運転車両混在率 左：20%、左：30%) [飽和度高交通流]

Day2 システム導入シナリオと Day3 システム導入シナリオについて、合流評価点マップ上の合流自動運転車両分布を比較した図を図 7-7 に示す。全体の傾向としては自動運転車両混在率の違いによる差はなく、Day2 システム導入シナリオの車間距離 10m 以下の自動運転車両群が減少し、Day3 システム導入シナリオの車間距離 15m 付近の自動運転車両が増加する結果が確認された。Day2 システムから Day3 システムに変更したことにより、一部の合流自動運転車両において合流時車間距離が若干広がったことが示唆される。しかしながら、支援システムなしシナリオと Day2 システム導入シナリオの比較において見られたような大きな差は見られなかった。

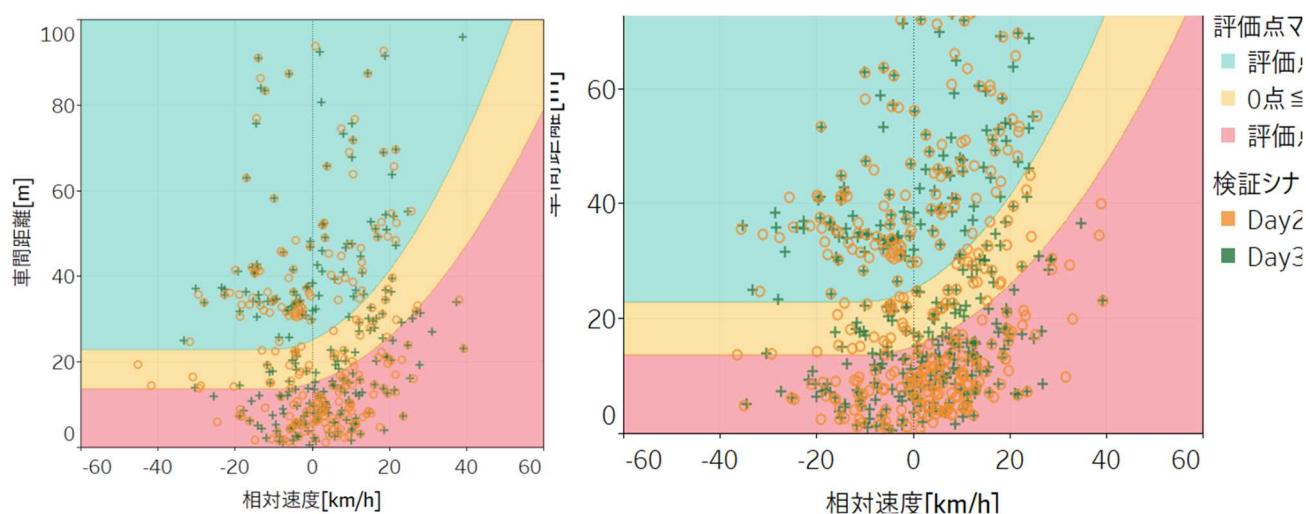


図 7-7 合流評価点マップ上の合流自動運転車両分布の Day2 システムと Day3 システムの比較
 （自動運転車両混在率 左：20%、左：30%） [自動運転車両混在率 20%・飽和度高交通流]

評価点評価の対象となる合流自動運転車両について、支援システムなしシナリオの合流評価点と Day2 システム導入シナリオの合流評価点を比較した図を図 7-8 に示す。Day2 システムの導入により合流評価点が改善した合流自動運転車両が多く、評価点 0 点未満の余裕のない合流から評価点 100 点の余裕のある合流に改善した車両も確認された。自動運転車両混在率の違いによらず同様の傾向が確認された。

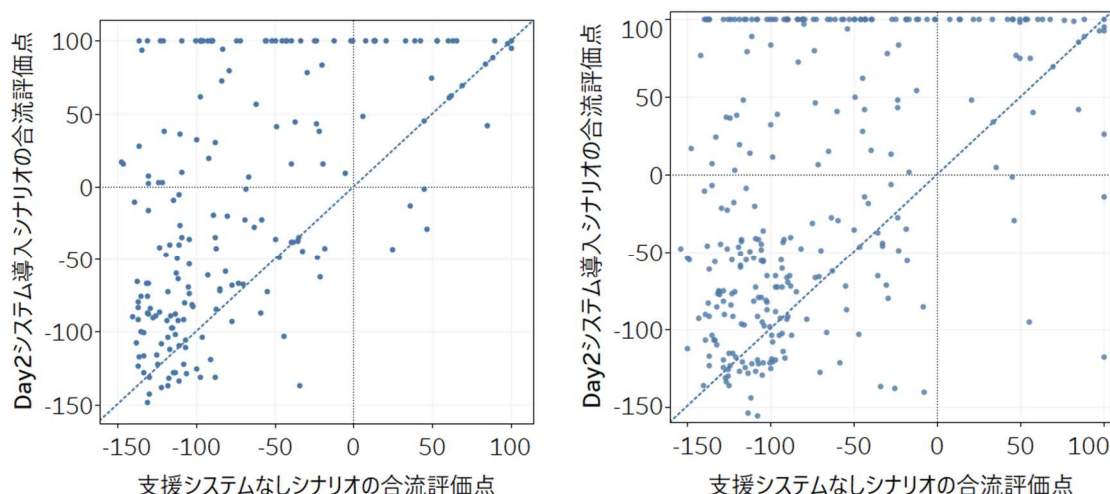


図 7-8 合流自動運転車両別の合流評価点の支援システムなしシナリオと Day2 システム導入シナリオの比較（自動運転車両混在率 左：20%、左：30%）〔飽和度高交通流〕

評価点評価の対象となる合流自動運転車両について、支援システムなしシナリオの合流評価点と Day2 システム導入シナリオの合流評価点を比較した図を図 7-9 に示す。自動運転車両混在率の違いによらず同様の傾向が確認された。Day2 システムから Day3 システムに変更したことで、合流評価点が改善した合流自動運転車両が一定数確認された。

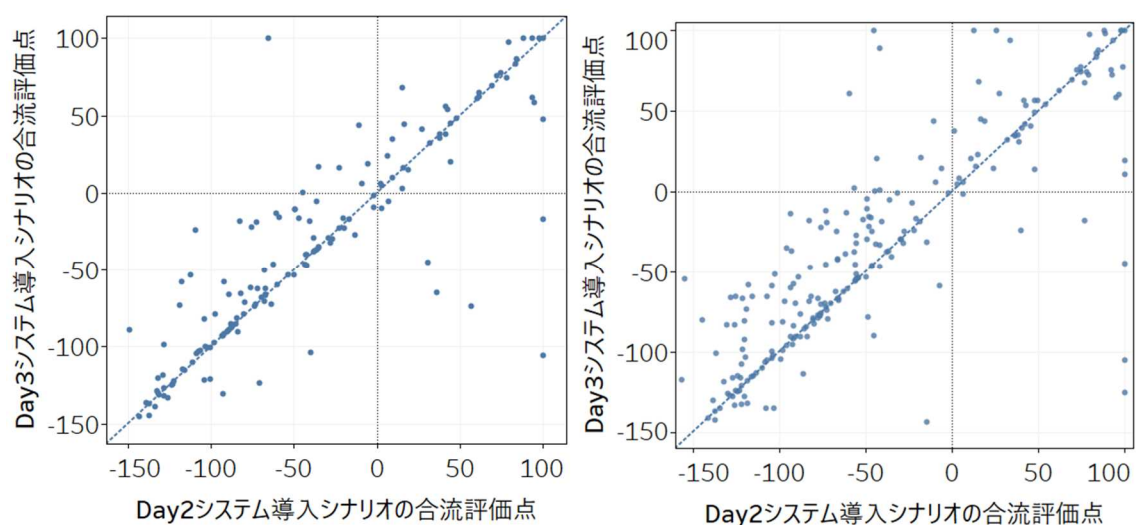


図 7-9 合流自動運転車両別の合流評価点の Day2 システム導入シナリオと Day3 システム導入シナリオの比較（自動運転車両混在率 左：20%、左：30%）〔飽和度高交通流〕

図 7-8 と図 7-9 に示した、合流評価点のシナリオ間比較について、合流自動運転車両ごとの評価点変化量を集計した結果を図 7-10 と図 7-11 に示す。支援なしシナリオに対する Day2 システム導入シナリオの評価点変化量は全体的に正の領域に広く分布しており、100 点以上改善している車両も一定数確認された。対して、Day2 システム導入シナリオに対する Day3 システム導入シナリオの評価点変化量は全体的に正の方向に分布しているものの評価点改善の幅は大きくはなく、60 点未満の改善に留まる車両が大多数であった。自動運転車両混在率が 30 の場合も同様に 60 点未満の改善に留まる車両が大多数であり、自動運転車両混在率の上昇によって一台ごとの合流評価点の改善量が増大するとはいえない。一方で、合流評価点改善台数は少量ながら増加していることが確認された。

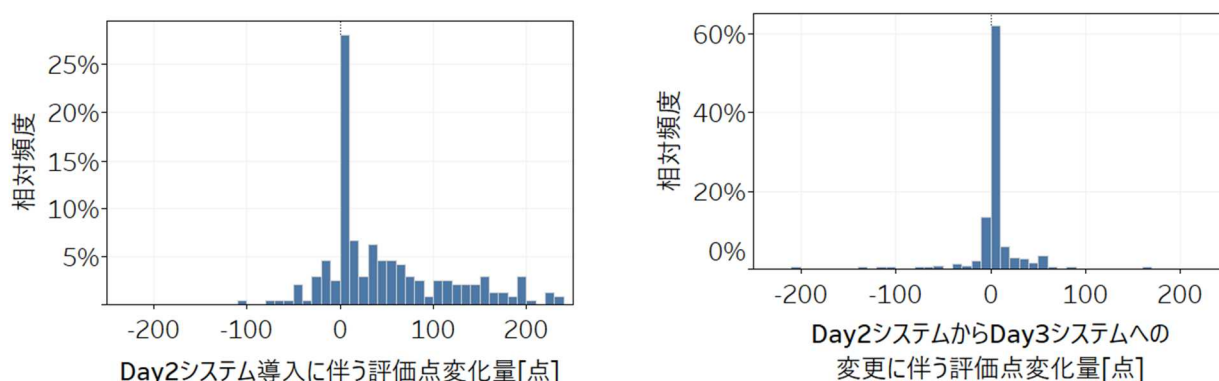


図 7-10 合流自動運転車両の合流評価点変化量 [自動運転車両混在率 20%・飽和度高交通流]
(左：支援なしに対する Day2 システム、右：Day2 システムに対する Day3 システム)

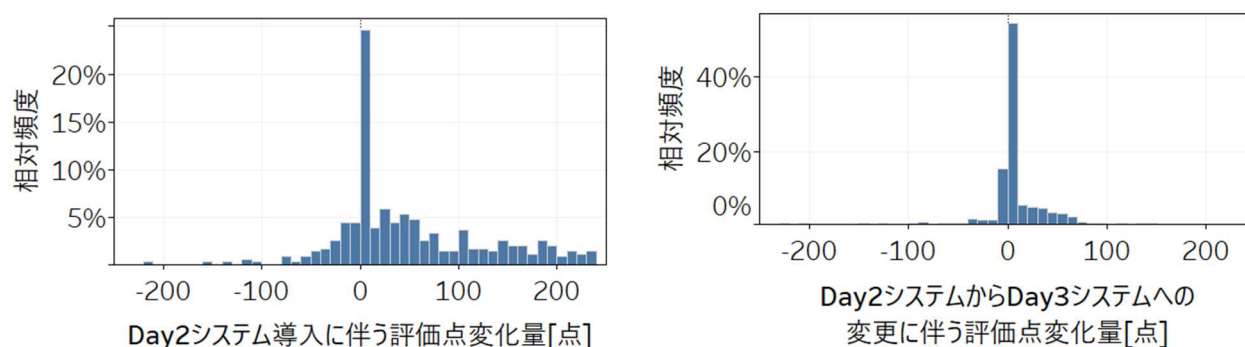


図 7-11 合流自動運転車両の合流評価点変化量 [自動運転車両混在率 30%・飽和度高交通流]
(左：支援なしに対する Day2 システム、右：Day2 システムに対する Day3 システム)

合流自動運転車両の合流評価点平均値を検証シナリオごとに集計した結果を図 7-12 に示す。自動運転車両混在率 20%の場合においては、支援システムなしシナリオでは多くの合流自動運転車両が評価点 0 点未満の余裕のない合流となっており、合流評価点の平均値は-37.1 点となった。対して Day2 システム導入シナリオでは、合流評価点が 0 点以上となる合流自動運転車両が増加し、合流評価点の平均値は 10.5 点となった。Day2 システムの導入により、平均合流評価点はおおよそ 48 点改善する結果となった。Day3 システム導入シナリオの平均合流評価点は 12.6 点であり、Day2 システム導入シナリオと比較する

と平均合流評価点の差は2.1点と小さい。自動運転車両混在率が30%の場合は、Day3 システム導入シナリオと Day2 システム導入シナリオの平均合流評価点の差は5.4点となり、自動運転車両混在率20%の場合と比べて大きな差となった。これは、自動運転車両混在率の上昇に伴い、本線の自動運転車両に対して本線車強調支援を実施するケースの発生頻度が増加した影響によると考えられる。

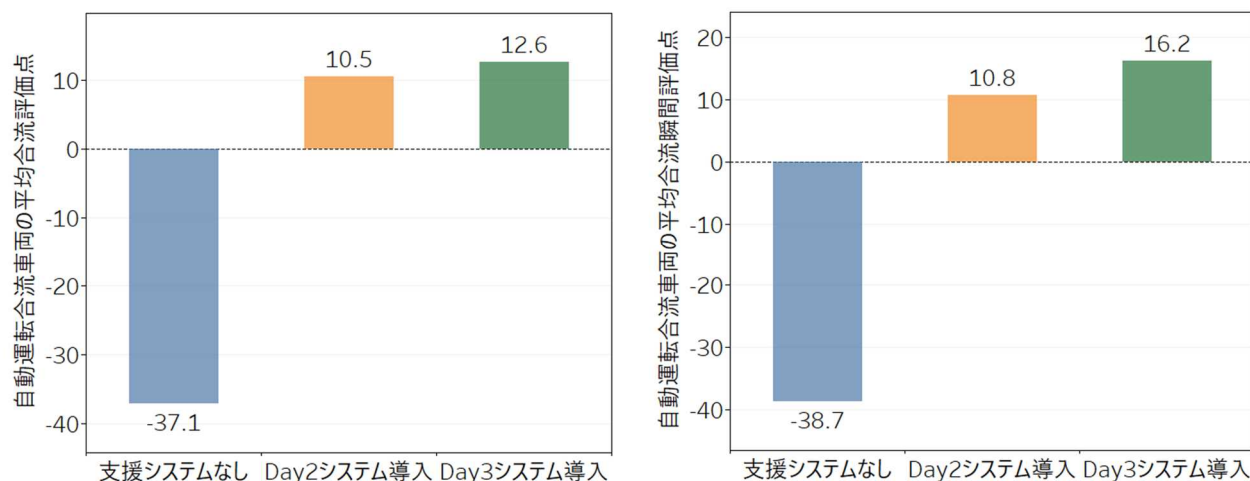


図 7-12 合流自動運転車両の平均合流評価点（自動運転車両混在率 左：20%、右：30%）
 [飽和度高交通流]

合流自動運転車両について、検証シナリオ間の合流評価点マップ上の車両分布・検証シナリオ間の車両別評価点・検証シナリオ間の車両別評価点の3つの観点から比較分析を行った。いずれの結果からも Day3 システムは Day2 システムと比較して合流改善効果はあるもののその効果は限定的であると考えられる。

（3） コンセプト成立性の検証

自動運転車両混在率 20%・飽和度高の交通流における Day3 システムのコンセプト成立性検証結果を図 7-13 に示す。Day3 システム導入シナリオは、支援システムなしシナリオと比較すると、余裕のない合流の発生割合がおよそ 17.5%減少しており、余裕のある合流の発生頻度が増加している。一方で Day2 システム導入シナリオと比較すると差は小さく、余裕のない合流の発生割合は同じである。

先述の通り Day2 システムから Day3 システムに変更しても合流評価点 0 点未満の余裕のない合流の発生頻度は変わらない。したがって、5.5 節の前提条件における本事業の検証範囲内においては Day3 システムへの変更に伴う余裕のない合流の解消は限定的であった。合流車両への本線隙間狙い支援を行う Day2 システムの導入にはコンセプト成立性があると考えられることから、Day3 システムを構成する合流車両への本線隙間狙い支援と本線車両への本線車協調支援のうち、本線車協調支援については合流改善効果があるものの余裕のない合流を解消するに至らなかったと考えられる。なお、本結果は 5.5 節の前提条件におけるものであり、Day3 システムにおける本線車協調支援において確保する車間距離を 2.5 秒とし、自動運転車両混在率 20%・飽和度高の交通流において検証した範囲において導かれたものである。自動運転車両混在率 30%・飽和度高の交通流において Day3 システムのコンセプト成立性の検証については後述する。

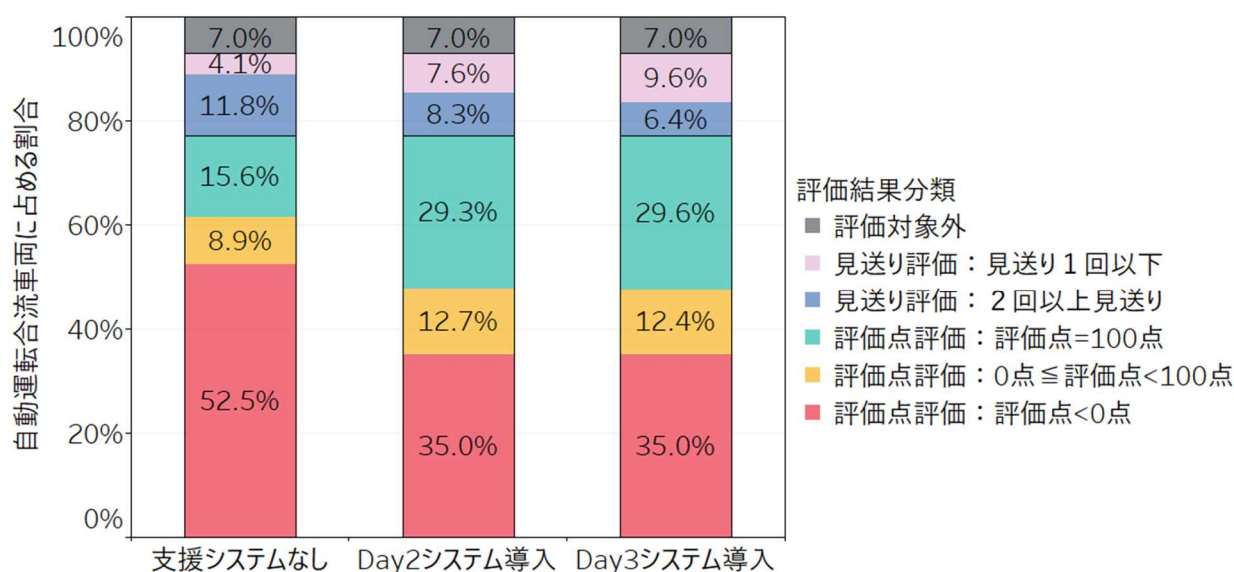


図 7-13 Day3 システムのコンセプト成立性検証シナリオにおける

合流自動運転車両に占める各評価結果分類の台数割合 [自動運転車両混在率 20%・飽和度高交通流]

図 7-14 に、自動運転車両混在率 30%・飽和度高の交通流における Day3 システムのコンセプト成立性検証結果を示す。自動運転車両混在率 30%の交通流においても、Day2 システムから Day3 システムに変更したことによる、評価点評価対象台数に占める評価点 0 点未満の台数割合の改善率は 0.3%と非常に小さく、シミュレーションの推計幅 (21.3%) 未満となった。自動運転車両混在率 30%・飽和度高の交通流においても Day3 システムへの変更に伴う余裕のない合流の改善効果は限定的であった。繰り返しになるが、本結果は Day3 システムにおける本線車協調支援において確保する車間時間を 2.5 秒としている

等、5.5 節の前提条件において得られたものである。車間時間をより広く確保する場合等の多様な条件におけるコンセプト成立性については、さらなる検証が求められる。

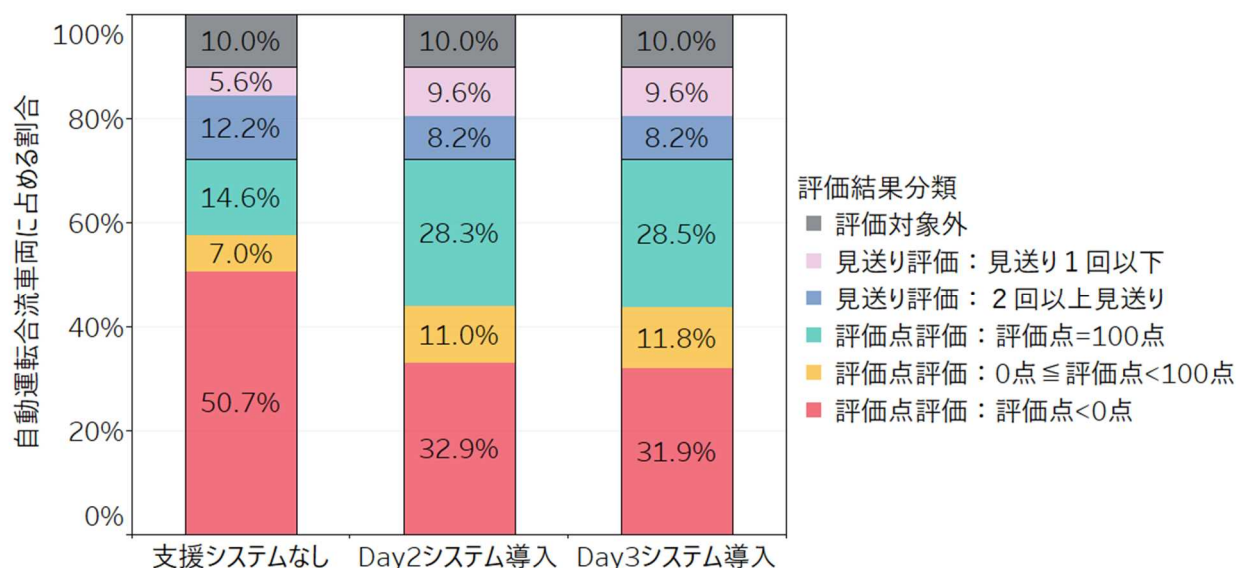


図 7-14 Day3 システムのコンセプト成立性検証シナリオにおける
 合流自動運転車両に占める各評価結果分類の台数割合 [自動運転車両混在率 30%・飽和度高交通流]

8. 実交通流を想定した合流支援システムの1日の導入効果推計

6章と7章では、それぞれDay2システムとDay3システムについて実験的な条件設定で検証を行った。本章では、1日24時間分の現実的な交通流を再現し、首都高速5号池袋線下り東池袋入口における1日・日中・夜間それぞれの時間帯について、合流支援システムの導入効果を推計する。

8.1. 推計内容

首都東池袋入口における1日分の現実的な交通流を再現した1日東池袋交通流を用いて、支援システムなし・Day2システム導入・Day3システム導入の3つのシナリオについてシミュレーションを実施し、その結果から合流支援システムの導入効果を推計する。

8.2. 推計条件

表8-1に合流支援システムの導入効果推計シナリオの諸条件を示す。交通流条件として用いる1日東池袋交通流はトラカンデータに準拠し、1日5分間隔の飽和度変化を再現した交通流である。合流自動運転車両混在率は20%とし、Day2システム・Day3システムのシステム物理条件は最も条件の良い理想的なものとした。なお、日中は7:00～19:00、夜間は19:00～7:00の時間帯とした。

表 8-1 合流支援システムの1日の導入効果推計の諸条件

項目		支援システム なし	Day2 システム 導入	Day3 システム 導入
交通流		1日東池袋交通流		
自動運転車両混在率		20%		
支援システムの 諸条件	合流支援システム	なし	Day2	Day3
	センシングエリア /通信エリア	－	240m/130m	240m/130m
	本線車情報の 伝達時間	－	0s	0s
	本線車位置情報の 誤差	－	誤差なし	誤差なし
	本線車速度情報の 誤差	－	誤差なし	誤差なし

8.3. 推計結果

8.3.1. 1日の合流改善効果推計結果

図 8-1 にシナリオ間比較における合流自動運転車両の合流評価点の変化量分布を示す。また、図 8-2 に合流車両の合流評価点の変化量分布を示す。支援なしシナリオに対する Day2 システム導入シナリオの評価点変化量は正の領域に広く分布しており、100 点を超える改善が見られる車両が一定数確認された。Day2 システム導入シナリオに対する Day3 システム導入シナリオの評価点変化量の分布は正の領域により多く分布しているものの評価点の変化量は 50 点未満と比較的小さいことがわかる。結果の傾向は、0 節で確認されたものと同様であった。合流車両の合流評価点の変化量分布を見ると、一般車両の分布は正負に大きな偏りがなく、大多数が 0 点付近に分布していることが確認できる。このことから、支援システムによる一般合流車両への波及効果はほぼないと考えられる。

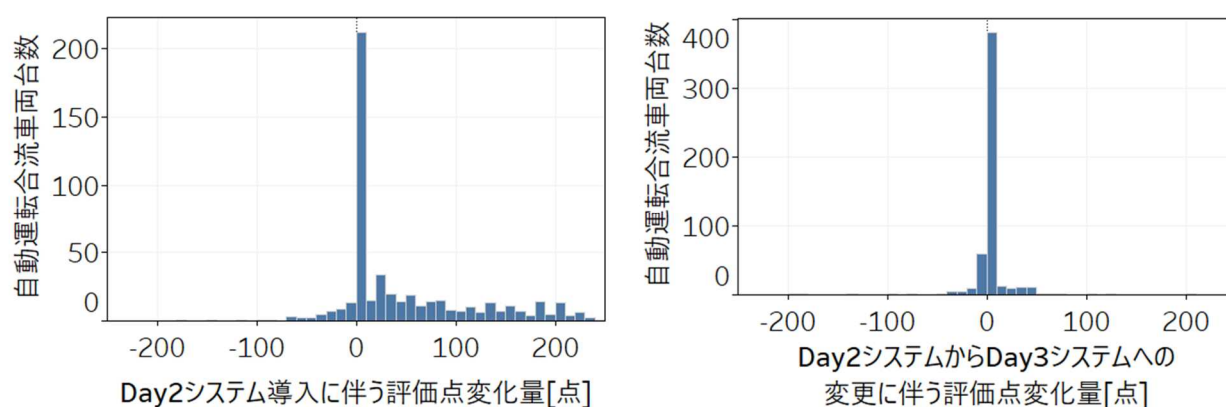


図 8-1 合流自動運転車両の合流評価点変化量 [自動運転車両混在率 20%・1 日東池袋交通流]
 (左：支援なしに対する Day2 システム、右：Day2 システムに対する Day3 システム)

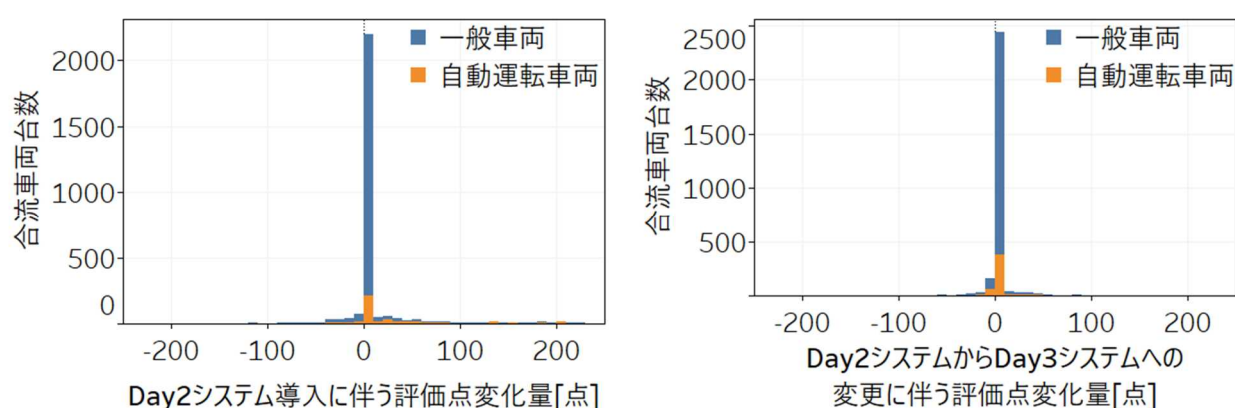


図 8-2 合流車両の合流評価点変化量 [自動運転車両混在率 20%・1 日東池袋交通流]
 (左：支援なしに対する Day2 システム、右：Day2 システムに対する Day3 システム)

図 8-3 に効果推計シナリオにおける合流自動運転車両および一般車両を対象とした1日の平均合流評価点を示す。合流自動運転車両については、支援システムなしシナリオのみ平均合流評価点が0点未満となっており、合流支援システム導入の導入により約47点の合流評価点改善が見られた。Day2システム導入シナリオとDay3システム導入シナリオの間に大きな差は見られない。一般車両については、支援システム導入に伴う変化がほぼないことが確認された。図 8-2 の結果と同様に、支援システムの導入に伴う一般合流車両への波及効果はほぼないと言える。

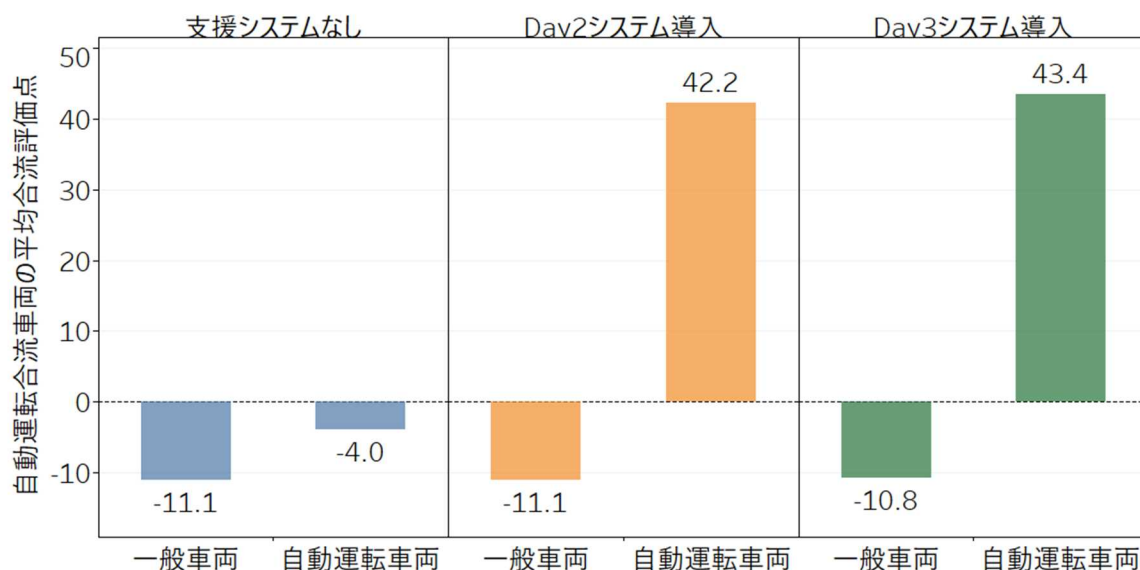


図 8-3 効果推計シナリオの平均合流評価点 [自動運転車両混在率 20%・1 日東池袋交通流]

図 8-4 に効果推計シナリオにおける合流自動運転車両を対象とした合流評価結果分類の1日の台数を示す。支援システムなしシナリオでは余裕のない合流となる合流自動運転車両は一日あたり 270 台であったが、Day2 システムの導入により一日あたり 148 台(122 台減)、Day3 システムの導入により一日あたり 140 台(130 台減)に減少した。なお、合流支援システム導入後は合流自動運転車両の約 48%で余裕のある合流が実現されるものの、合流自動運転車両の約 23%は依然として余裕のない合流であるという結果となった。

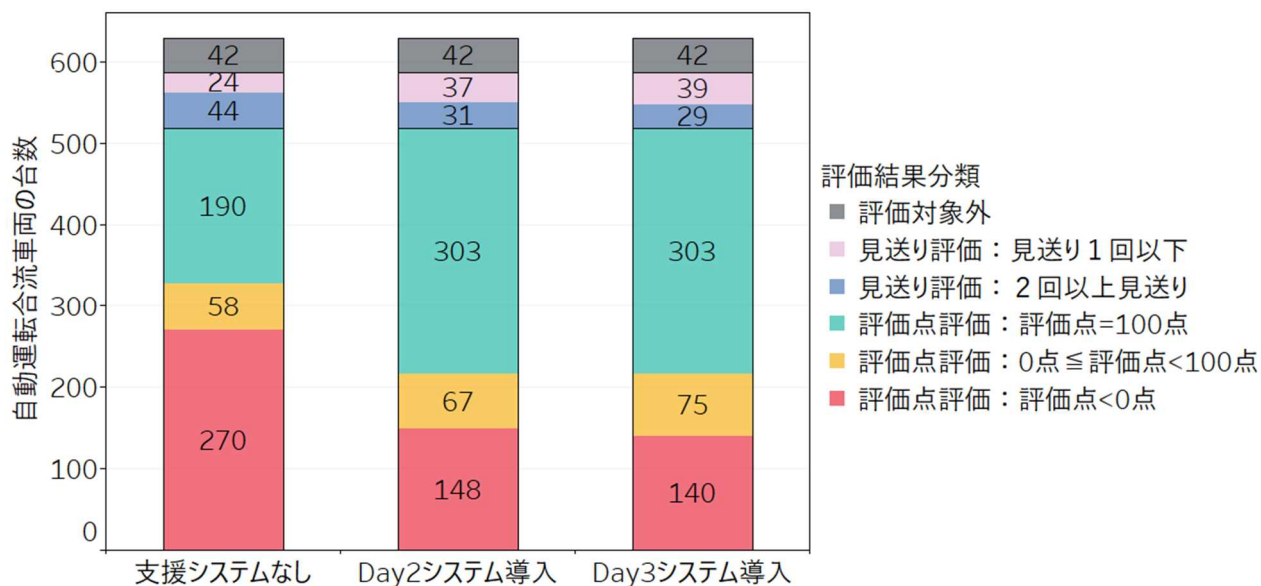


図 8-4 効果推計シナリオの合流自動運転車両にしめる各評価結果分類の台数
 [自動運転車両混在率 20%・1 日東池袋交通流]

図 8-5 に効果推計シナリオにおける合流車両を対象とした合流評価結果分類の1日の台数を示す。支援システムなしシナリオでは余裕のない合流となる合流車両は一日あたり1562台であった。余裕のない合流となる合流車両台数は、Day2システムの導入により一日あたり124台、Day3システムの導入により一日あたり136台減少した。台数の減少量は自動運転車両の結果で見られた減少量とほとんど同じであり、自動運転車両以外の一般合流車両への波及効果はほぼないことが示唆された。

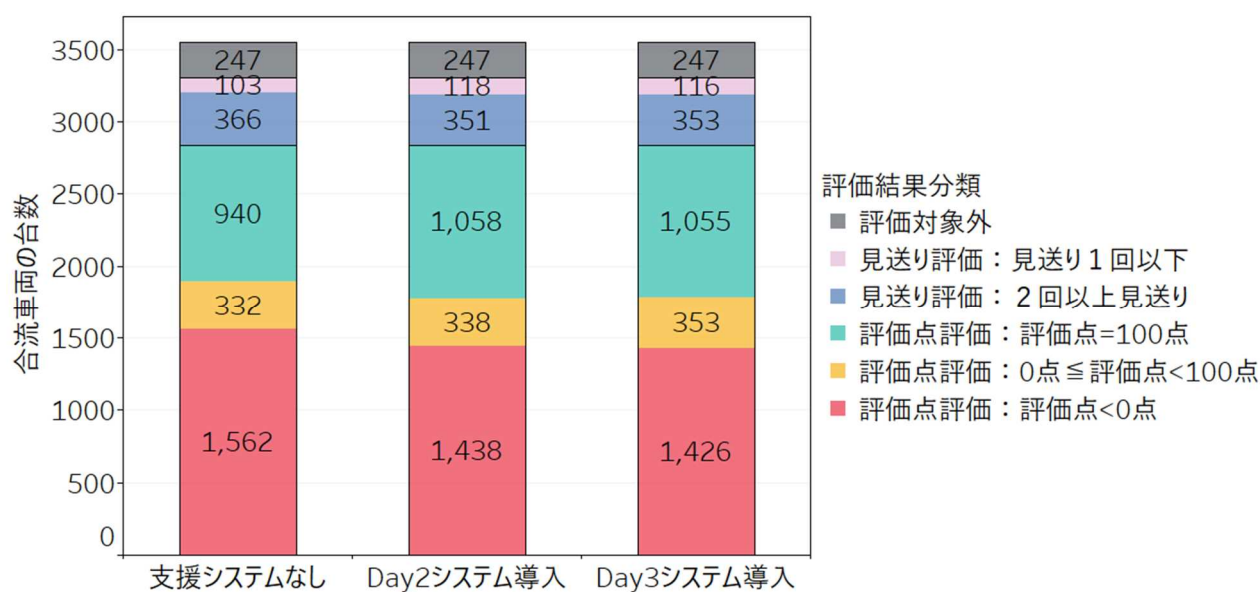


図 8-5 効果推計シナリオの合流車両にしめる各評価結果分類の台数
 [自動運転車両混在率 20%・1 日東池袋交通流]

8.3.1. 日中の合流改善効果推計結果

図 8-6 に効果推計シナリオにおける合流自動運転車両を対象とした日中の平均合流評価点を示す。支援システムなしシナリオのみ平均合流評価点が 0 点未満となっており、合流支援システム導入の導入により約 48 点の合流評価点改善が見られた。Day2 システム導入シナリオと Day3 システム導入シナリオの間に大きな差は見られない。日中は、飽和度中・高の時間帯が長いため、0 節で検証した飽和度中・高に近い結果となった。

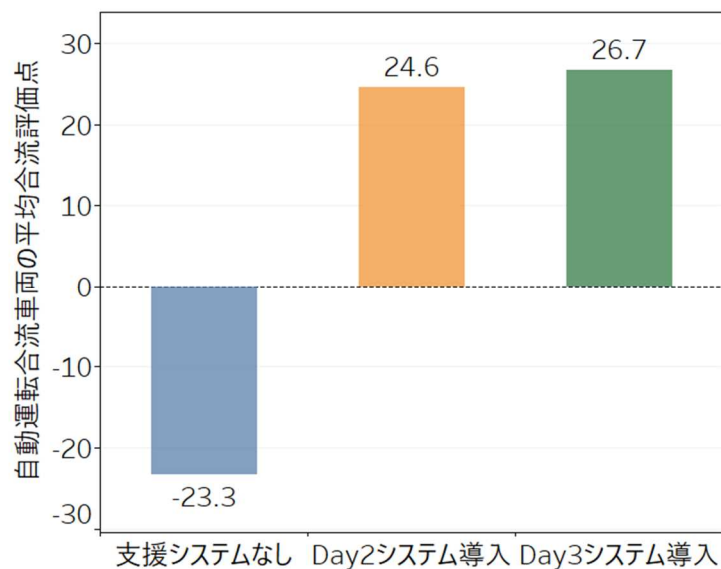


図 8-6 効果推計シナリオの平均合流評価点（日中）

図 8-7 に効果推計シナリオにおける合流自動運転車両を対象とした合流評価結果分類の日中の台数を示す。日中の時間帯において、支援システムなしシナリオでは余裕のない合流となる合流自動運転車両は 221 台であったが、Day2 システムの導入により 135 台(86 台減)、Day3 システムの導入により一日あたり 127 台(94 台減)に減少した。一日あたりの余裕のない合流の改善台数のうち、およそ 7 割が日中の時間帯に集中していることが確認された。

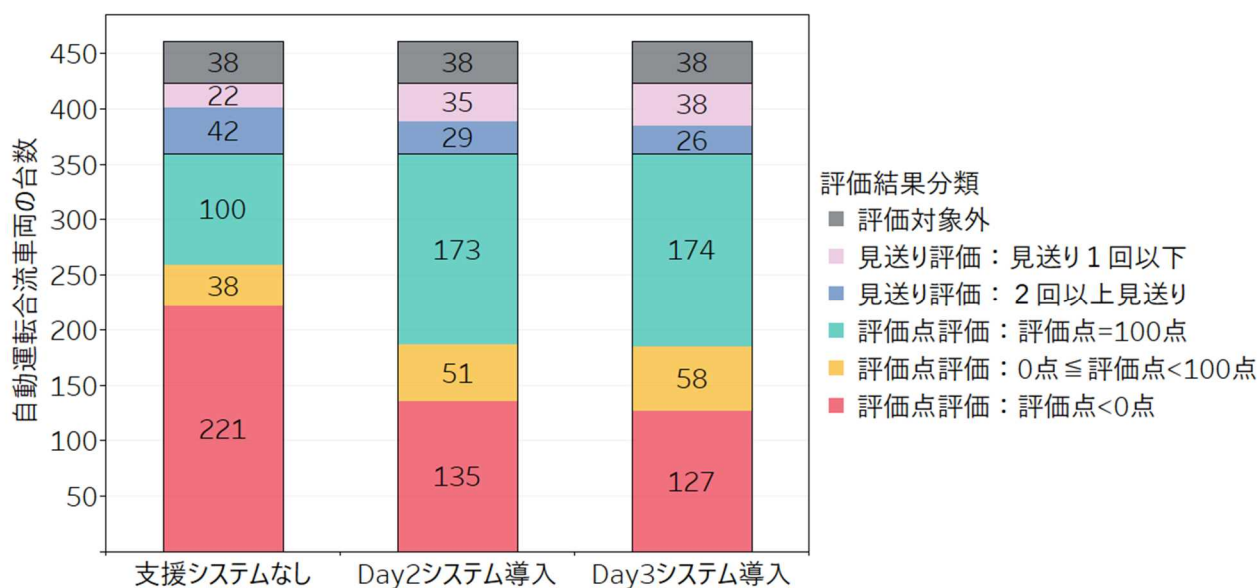


図 8-7 効果推計シナリオの合流自動運転車両にしめる各評価結果分類の台数（日中）

図 8-8 に効果推計シナリオにおける合流車両を対象とした合流評価結果分類の日中の台数を示す。日中の時間帯において、支援システムなしシナリオでは余裕のない合流となる合流車両は 1231 台であった。余裕のない合流となる合流車両台数は、Day2 システムの導入により 85 台、Day3 システムの導入により 96 台減少した。自動運転車両以外の一般合流車両への波及効果がほとんど見られない点については 1 日の支援効果と同様である。

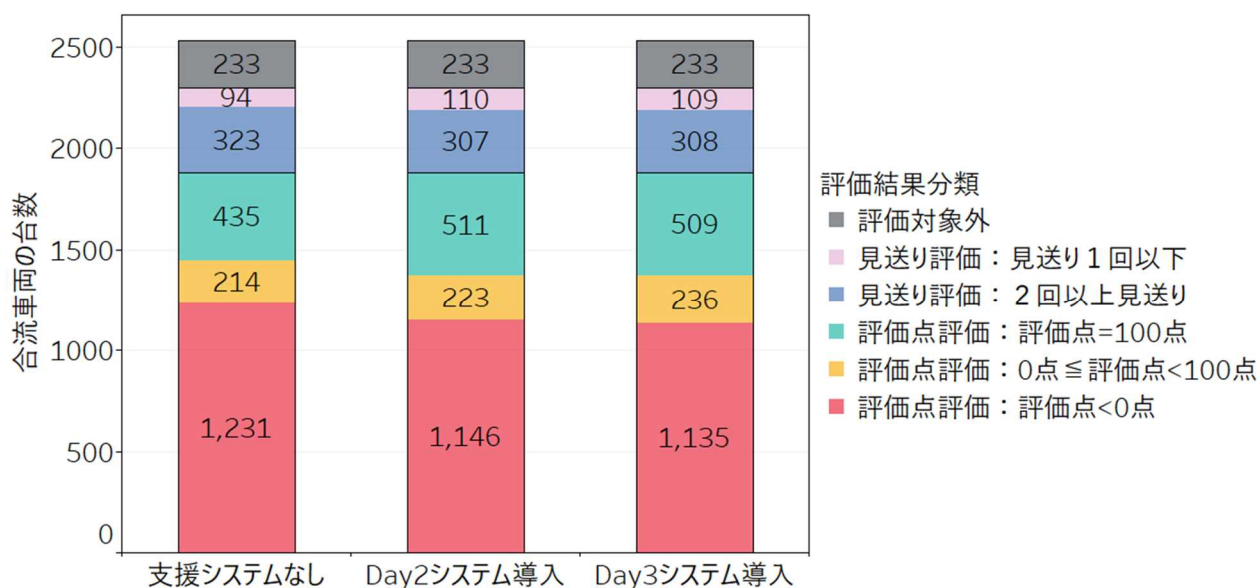


図 8-8 効果推計シナリオの合流車両にしめる各評価結果分類の台数（日中）

8.3.2. 夜間の合流改善効果推計結果

図 8-9 に効果推計シナリオにおける合流自動運転車両を対象とした日中の平均合流評価点を示す。合流支援システム導入の導入により約 42 点の合流評価点改善が見られた。Day2 システム導入シナリオと Day3 システム導入シナリオの間に大きな差は見られず、どちらも平均 80 点以上と比較的余裕のある合流が多いことがうかがえる。夜間は、飽和度低の時間帯がほとんどであるため、このような結果になったと考えられる。

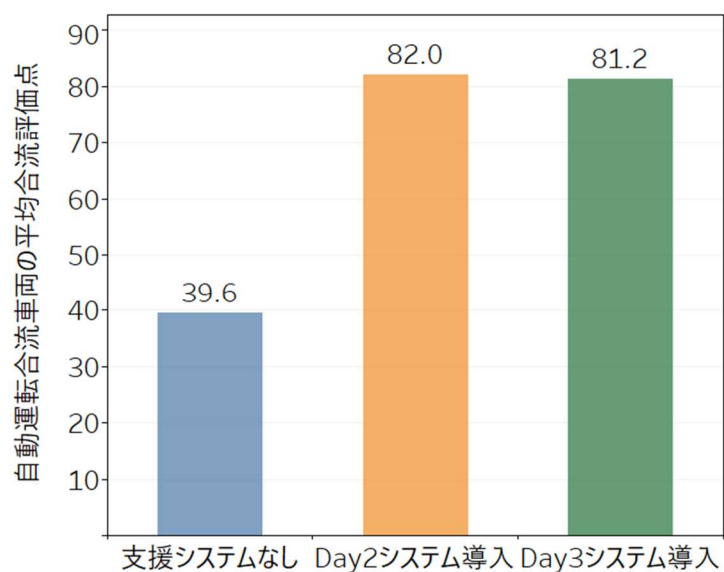


図 8-9 効果推計シナリオの平均合流評価点（夜間）

図 8-10 に効果推計シナリオにおける合流自動運転車両を対象とした合流評価結果分類の夜間の台数を示す。夜間の時間帯において、支援システムなしシナリオでは余裕のない合流となる合流自動運転車両は 49 台であった。Day2 システム・Day3 システムの導入によりそれぞれ同僚の 13 台(16 台減)に減少した。飽和度低が多い時間帯のため合流自動運転車両への本線隙間狙い支援による効果が出やすく、支援システムを導入することで、合流自動運転車両の約 78%で余裕のある合流が実現される結果となった。

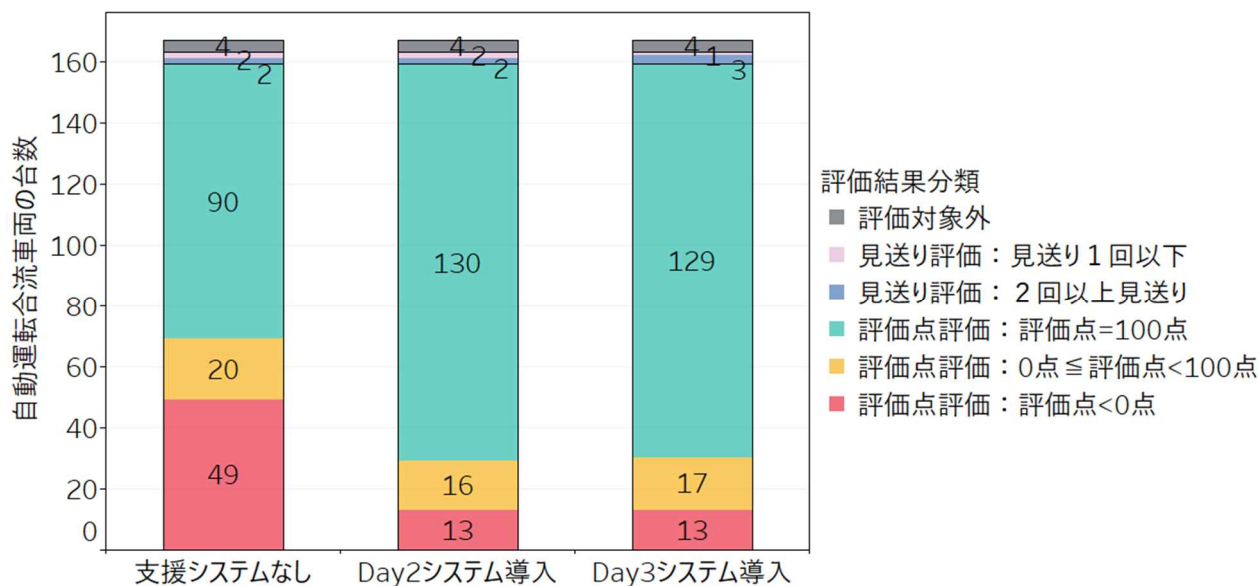


図 8-10 効果推計シナリオの合流自動運転車両にしめる各評価結果分類の台数（夜間）

図 8-11 に効果推計シナリオにおける合流車両を対象とした合流評価結果分類の夜間の台数を示す。夜間の時間帯において、支援システムなしシナリオでは余裕のない合流となる合流車両は 331 台であった。余裕のない合流となる合流車両台数は、Day2 システムの導入により 39 台、Day3 システムの導入により 40 台減少した。自動運転車両以外の一般合流車両への波及効果がほとんど見られない点については 1 日の支援効果と同様である。

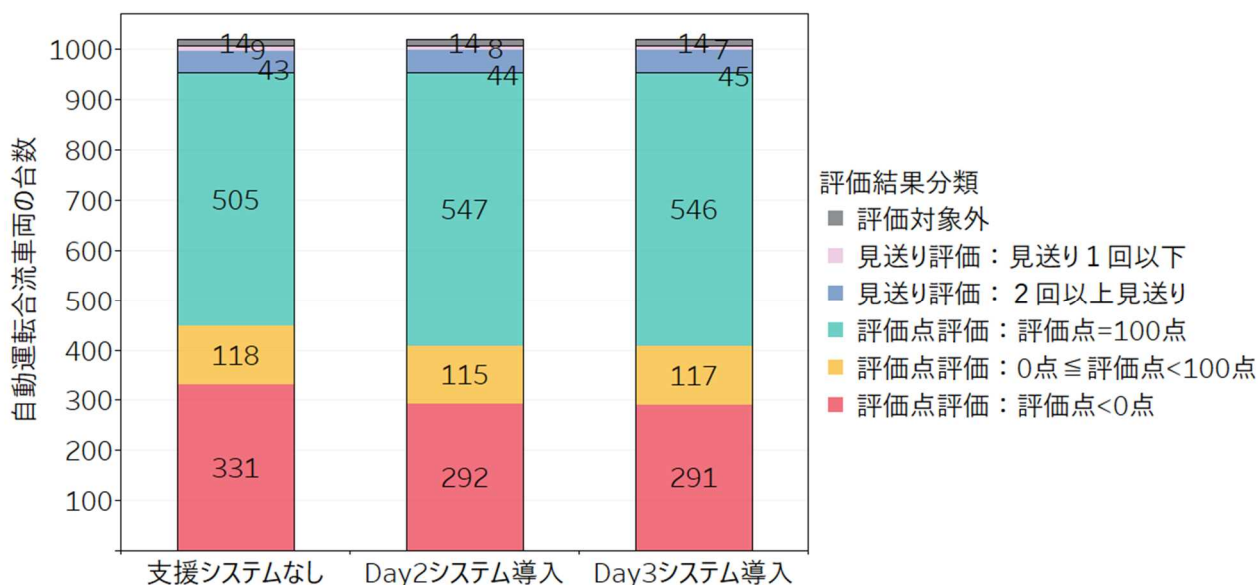


図 8-11 効果推計シナリオの合流車両に施める各評価結果分類の台数（夜間）

9. 合流支援システム検証のための分析結果のまとめと考察

9.1. 合流支援システムの効果に関する分析結果と課題

本事業では、4章のように合流支援システム検証のためのシミュレーション環境を構築し、5章の条件のもと、合流自動運転車両への本線隙間狙い支援を行う Day2 システムと、それに加えて本線の自動運転車両への本線車協調支援を行う Day3 システムについて検証を行った(6～8章)。東池袋入り口を対象とした本事業の検証範囲内・前提条件における検証結果を表 9-1 にまとめる。

5.5 節をはじめとした前提条件における合流支援システムの検証の結果、理想的なシステム物理条件の Day2 システムを導入すると余裕のない合流がおよそ半減し、本事業内で暫定的に定義したコンセプト成立性の基準を満たしたことから、Day2 システムのコンセプトの有効性を確認できた。システム物理条件を様々に変化させたところ、本線情報の伝達時間が 0.8 秒程度までであれば速度情報誤差やセンシングエリア・通信エリアの条件が多少悪くとも余裕のない合流の改善が見られ Day2 システムのコンセプトの有効性を確認できた。また、渋滞を除けば、首都高速 5 号池袋線下り東池袋入口で実際に発生しうる交通流条件の範囲内(飽和度低～高)において、理想的なシステム物理条件下で Day2 システムのコンセプトの有効性を確認できた。

一方で、飽和度高の密な交通流において行った Day3 システムの検証では、Day2 システムよりも合流評価点が改善する車両が確認され、合流改善効果があることが確認された。余裕のない合流の改善効果は Day2 システムと同程度であり、交通量や本線車協調支援で本線自動運転車両が維持する前方車両と車間時間を限定した本事業の検証範囲内においては、Day2 システムに対する Day3 システムの有効性を確認するには至らなかった。Day3 システムの有効性を確認するためにはより多様な条件における追加検証が必要であり、Day3 システムの合流改善効果を向上させるためには、本線車協調支援で本線自動運転車両が維持する前方車両と車間時間をより長くするなどの検討課題が残る。

なお、本事業の検証範囲外においても同様の結果を保証するものではなく、合流支援システムについてより頑健な結論を得ようとする場合は、本事業の検証範囲外における検証も必要になると考える。また、本事業の検証範囲外における検証として、例えば東池袋入口以外の箇所について合流支援システムの効果を検証する際には、当該箇所の特性を反映したシミュレーション環境の構築から始める必要があると考える。

表 9-1 本事業の検証範囲内における結論

実施項目	実施内容	結論
	Day2 システムの コンセプト成立 性検証	✓ Day2 システムの導入により、過半数の合流自動運転車両において評価点の改善が見られたことから、Day2 システムの合流改善効果が確認された →合流部での横並び回避の効果が高い、と考えられる ✓ Day2 システムの導入により余裕のない合流がおよそ半減し、コンセプトの有効性が確認された →余裕のない合流の改善率は、本事業で暫定的に定義したコンセプト成立性の基準を満たしたため
	システム物理条件変更時の合流改善効果の検証	✓ 本線車位置情報の誤差以外の物理条件については条件がよいほど余裕のない合流が減少する ✓ 特に本線車情報の伝達時間の影響が大きく伝達時間が 0.8s 程度以下の範囲において、Day2 システムの有効性が確認された →余裕のない合流の改善率は、本事業で暫定的に定義したコンセプト成立性の基準を満たしたため
	交通流条件変更時の合流改善効果の検証	✓ 飽和度低～高の交通流において合流自動運転車両の評価点向上・余裕のない合流の改善が見られ、Day2 システムの有効性が確認された →余裕のない合流の改善率は、本事業で暫定的に定義したコンセプト成立性の基準を満たしたため ✓ 飽和度低においては、Day2 システムにより余裕のない合流の発生頻度を合流自動運転車両の 5%程度に抑制
Day3 システム	Day3 システムの コンセプト成立 性検証	✓ 限られた条件下で Day3 の検証を行ってみたところ、支援のない状況に導入することで Day2 システムと同程度の合流改善効果・余裕のない合流の改善が確認された →ただし本事業では Day3 を構成する条件を網羅するに至っていないため、有効性を確認するためにはより多様な条件における追加検証が必要であり、併せて Day3 システムのさらなる効果拡大に向けた検討も求められる

9.2. 合流支援システムの今後の方向性に関する一考察

5.5節の前提条件を始めとした本事業の検証範囲内における合流支援システムの検証の結果、Day2システムについては、本事業で暫定的に定義したコンセプト成立性の基準を満たすほどの合流改善効果が確認された。しかしながら、Day2システムを導入したとしても余裕のない合流が一定数残ることが確認され、合流改善効果をより向上させるには支援システム・支援アルゴリズムの検討が必要であると考えられる。また、Day3システムについては、Day2システムと同程度の合流改善効果が確認されたもののDay2システムを大きく上回る効果は確認されず、順調な合流を実現するには本線車協調支援による車間時間の確保等についての検討課題が残る。これらの課題を踏まえ、合流支援システムの今後の方向性に関する一考察を述べる。

Day2・Day3システムの合流支援のコンセプトは、「Day2Day3システムによる合流自動運転車両への本線隙間狙い支援によって到達可能な本線車間（合流可能車間）の範囲内に、Day3システムによる本線の自動運転車両への本線車協調支援により広い車間を創出することにより、余裕のある合流を実現すること」であるといえる。したがって、支援効果を向上するためのアプローチとして次の2つが考えられる。以降では以下2つのアプローチについて考察する。

① 合流可能車間の選択肢の拡大

本線隙間狙い支援によって合流自動運転車両が到達可能な本線車間の範囲を拡大する

② 合流可能車間の車間時間の拡大

本線車協調支援により本線の自動運転車両が確保する前方車との車間時間を拡大する

9.2.1. 合流可能車間の選択肢拡大

本アプローチには、合流自動運転車両への本線隙間狙い支援の高度化が対応する。

本事業における本線隙間狙い支援は、本線車情報を受け取った合流自動運転車両が、1秒間加減速したときの合流起点(合流可能上流端点)到達予測時刻に基づいた $\pm 0.2G$ の範囲内の加減速選択を、0.1秒ごとに前の加減速選択とは独立に行うこととしている。これは、本線車情報を受け取った合流自動運転車両が限定的な行動選択肢の中から逐次的に行動を決定しているといえ、合流可能車間の選択肢は限られる。

本線車隙間狙い支援の高度化の方向性として、行動選択肢を拡充した走行計画の策定が考えられる。走行計画とは、たとえば「本線車群の前に合流するために数秒間強く加速したあと、本線車速度に合わせるために少し減速する」といったものである。本線車情報を受け取った時点から合流する時点までに取りうる加減速度とその継続時間の組み合わせの中から最適な走行計画を選択することで、より良い本線車隙間狙い支援が実現され则认为られる。このとき選択可能な加減速の幅を広げることで合流可能車間の選択肢は増えるが、不自然な急加減速の繰り返しや他の走行車両の妨害にならないよう事前のシステム検証が必要であると考えられる。



図 9-1 合流可能車間の選択肢拡大のイメージ

9.2.2. 合流可能車間の車間時間拡大

本アプローチには、本線の自動運転車両への本線車協調支援により確保する車間時間の拡大が対応する。

本事業における本線車協調支援では、本線の自動運転車両は2.5秒の車間を空けることとしたが、検証結果は2.5秒では余裕のない合流を解消するには不十分であるというものであった。したがって、単純に車間時間を2.5秒より長く取ることによって合流改善効果の向上が見込まれる。

一方で、自動運転車両混在率0%、20%、30%について実施した7.1節の検証で見られたように、本線の自動運転車両が一般車の平均よりも長い車間時間を維持することで、本線の車両が密で平均速度が40km/h以下となるような状態等を吸収する緩衝材となりうる広い車間の消失が起きる可能性があるため、闇雲に車間時間を長く取るとは避けるべきであると考えられる。図9-2に示すイメージのように上流部に広い車間がある場合であれば、本線の自動運転車両が広い車間を確保することで上流部の広い車間を合流部に移動させるような形となり、本線交通流を乱すことなく合流可能車間の車間時間を確保することができると考えられる。上記を一案として、合流可能車間の車間時間を拡大する方策について今後の検討が必要であるとする。

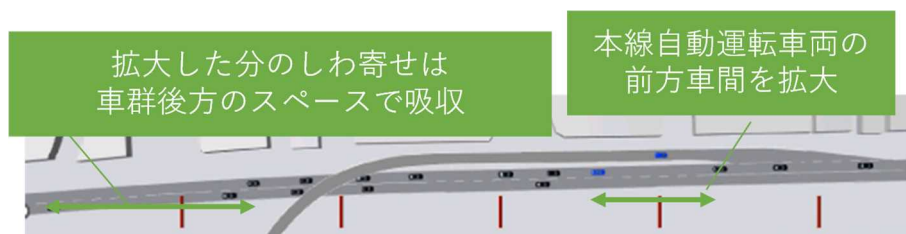


図 9-2 合流可能車間の車間時間拡大のイメージ

9.3. 合流支援シミュレーション環境の一般化に向けた課題

本事業において構築した合流支援シミュレーション環境は、一般的な合流部を対象としたものではなく、5.5節の前提条件のもと構築した限定的なものである。合流支援シミュレーション環境の一般化に向けた主な拡張要素として、道路線形と車種の2つが挙げられる。本節では、これら2つの拡張要素について課題を整理する。

9.3.1. 道路線形

本事業では、2.1節の通り、合流車線長と本線交通量の観点から首都高速5号池袋線下り東池袋入口を対象とした。道路線形の特徴が異なれば合流支援システムの効果も異なると考えられるため、より多様な条件下における合流支援システムの検証を行うためには、東池袋入口とは異なる特徴を持つ分析対象箇所を選定し、検証を行うことが望ましい。

東池袋入口以外の分析対象箇所選定に際し、合流車線長・本線の交通量の他に、合流車線上流部に位置する料金所から合流部までの距離についても加味することが望ましい。これは、2.1節で述べたように、料金所から合流部までの距離によって、合流支援システムの支援方法は大きく影響を受けるためである。分析対象箇所選定の方法について、例えば、合流車線長・本線の交通量・料金所から合流部までの距離の3要素で合流部を分類し、分類ごとにそれぞれ代表箇所を選定するという方法が考えられる。

また、道路線形の特徴が異なれば合流発生時の車両挙動も異なると考えられるため、東池袋入口以外の分析対象箇所について合流支援シミュレーションを用いた検証を行う場合、当該箇所における軌跡データを取得し合流発生時の車両挙動モデルを新規に構築する必要があると考えられる。

9.3.2. 車種

5.4.1項で述べた通り、本事業では、取得されたデータ量の都合からシミュレーション環境上で発生する車両はすべて普通車とし、大型車や二輪車は考慮しないこととした。一方で、図5-16で示したように、実交通流には大型車や二輪車も存在しており、普通車とは加減速の幅や車長が異なる。本線を走行している車両の加減速の幅や車長は合流支援システムの効果に影響すると考えられるため、これらの車両が混在した交通流を対象とした合流支援システムの検証も必要であると考えられる。その際、車種の違いによる合流挙動の違いを表現するために、大型車・二輪車について十分なサンプル数となるよう軌跡データを取得し、合流発生時の車両挙動モデルを新規構築する必要があると考えられる。

参考文献

1. 中川敏正、関谷浩孝、中田諒、花守輝明、藤村亮太. 東京臨海部実証実験による合流支援情報提供システム（DAY1 システム）の検証. 出版地不明：交通工学論文集 第8巻 第1号 pp.39-48, 2022.
2. -. 合流支援情報提供システム（DAY2 システム）の車両検知センサの計測精度に関する基礎検討. 出版地不明：交通工学論文集 第8巻 第1号 pp.49-58, 2022.
3. 石神孝裕、稲原宏、井上紳一、加藤昌樹、小嶋文、佐野薫、須永大介、高砂子浩司、平見憲司、福本大輔. 改訂新版読んで学ぶ交通工学・交通計画. 2022.

以上