

2021 年度 成果報告書

戦略的イノベーション創造プログラム（S I P）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

2022 年 5 月

株式会社構造計画研究所

目次

1.	はじめに	1
1.1.	事業目的	1
1.2.	事業概要	1
1.3.	本報告書の構成	2
2.	目標合流挙動の良否の整理	2
3.	シミュレーション環境構築	3
3.1.	シミュレーションの概要	3
3.2.	シミュレーション内の車両挙動	3
3.3.	シミュレーションパラメータ	5
3.4.	交通流の発生モデル	6
3.5.	モデルの再現性	8
4.	シミュレーション実施・結果分析	10
4.1.	DAY2 システム効果有無の分析	10
4.1.1.	合流の改善効果の分析	11
4.1.2.	支援により改善しなかった車両の要因分析	13
4.1.3.	周囲の交通流への影響分析	18
4.1.4.	Day2 システム効果有無の分析まとめ	24
4.2.	DAY2 システムの許容可能な条件評価	24
4.2.1.	各システム条件についての個別分析	24
4.2.2.	各システム条件についての組み合わせ分析	32
4.2.3.	Day2 システムの許容可能な条件評価まとめ	35
5.	今後の課題	36
6.	参考文献	37

1. はじめに

1.1. 事業目的

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・合流ができること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。

- ・ 第一段階：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：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、実証実験実施が行われ、その実証結果を踏まえて、Day2 システム、さらなる Day3 システムへと開発を進めることが予定されている。

本事業の目的は、Day2 システムの導入による交通流改善効果をシミュレーションにて導出し、Day2 システムの成立性を確認することである。具体的には、Day2 システムによる路車間通信での支援が成立するために必要な条件を調査し、システム成立時の効果および許容されるセンサ等ハードウェアの誤差についての整理を行う。

1.2. 事業概要

Day2 システムの成立性を検証するためのシミュレーション環境を構築する。構築にあたっては、ベースとして過去に構造計画研究所にて構築した合流挙動を精緻に再現するシミュレーションモデルを用いる。このモデルは首都高速道路・高速5号池袋線の東池袋出入口を対象としたものであり、以降、東池袋モデルと呼ぶ。東池袋モデルに、Day2 システムにおける路上インフラ相当の機能、および路車間通信への車両の反応を組み込む。このシミュレーション環境は、Day2 システムの通信エリアや配信誤差などの諸条件、道路条件や交通量など、様々なパラメータを可変値として設定できるよう構築する。

このシミュレーションモデルを用いて、システムの諸条件、交通量などの条件を変化させた際の支援効果を測定する。シミュレーション結果の解析から、支援効果の大小を決定づける条件

や、支援が逆効果となる条件などについて整理、理解し、システムが有効であるかどうかの判断材料を提供する。

1.3. 本報告書の構成

第2章では、Day2 システムの成立性の評価を行うために合流挙動の良否を示す指標を定義する。第3章では、Day2 システムの効果検証を行うためのシミュレーション環境について記述する。第4章ではシミュレーションの実施・分析結果を示す。第5章で今後の課題を示す。

2. 目標合流挙動の良否の整理

Day2 システムの成立性の評価を行うためには、合流挙動の良否を示す指標が必要となる。代表的な合流挙動の再現シミュレーション動画を参照しつつ検討会関係者と議論を行い、指標として図1に示す合流の評価点を定義した。合流時の最も近い本線車両に対する車間時間と相対速度をもとに決定し、相対速度が小さく車間時間が大きいほど安全かつ効率的な合流であるとしている。余裕のある合流が可能な領域を評価点 100 点とし、その領域から離れるほど評価点が低下する。衝突の危険性などを考慮しつつ、評価点が 0 点未満の領域を余裕のない合流と定義した。なお評価点の上限は 100 点であり、下限となる点数は存在しない。

この指標は最終的な Day2 システムの効果の評価に用いるほか、シミュレーション環境構築の章で説明する Day2 システムのアルゴリズムにも用いる。

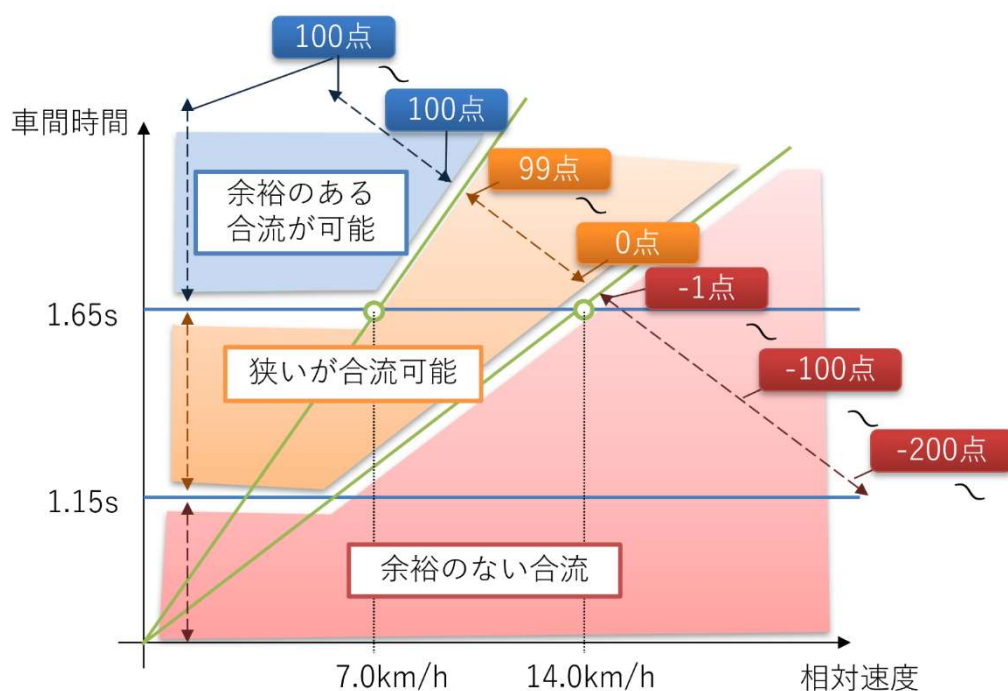


図 1. 合流の評価点

3. シミュレーション環境構築

3.1. シミュレーションの概要

Day2 システムの効果検証を行うため、Day2 システムを模擬するシミュレーション環境が必要となる。そこで構造計画研究所が所有する合流挙動を再現するシミュレーションモデル上に Day2 システムを模擬する機能を追加することで、シミュレーション環境を構築した。対象地を首都高速道路・高速 5 号池袋線の東池袋出入口とし、この地点の交通流を模擬する既存シミュレータに Day2 システムに相当する機能を組み込んでいる。対象地の道路線形を図 2 に示す。

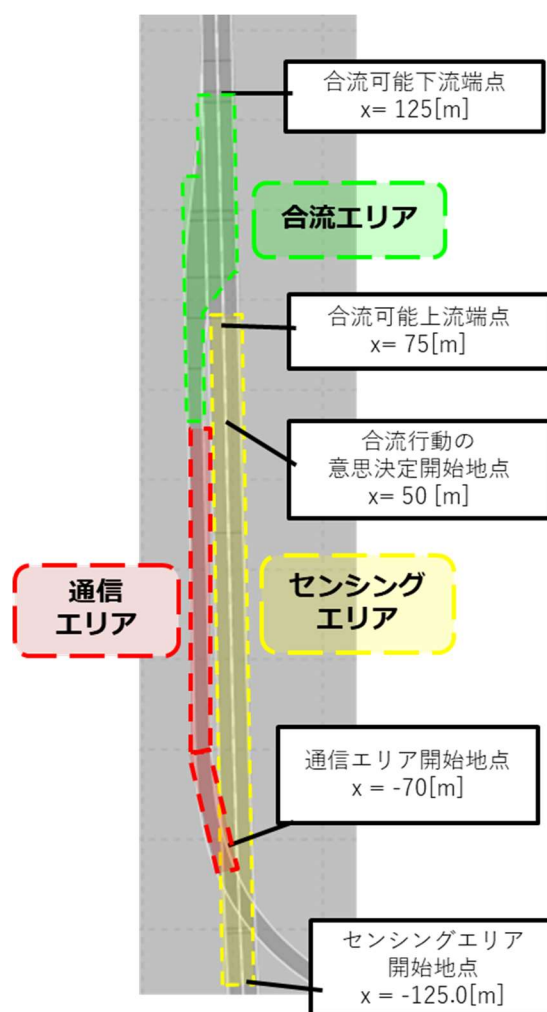


図 2. 対象地の道路線形

3.2. シミュレーション内の車両挙動

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の挙動を図 3 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 秒間行ったら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 3 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。

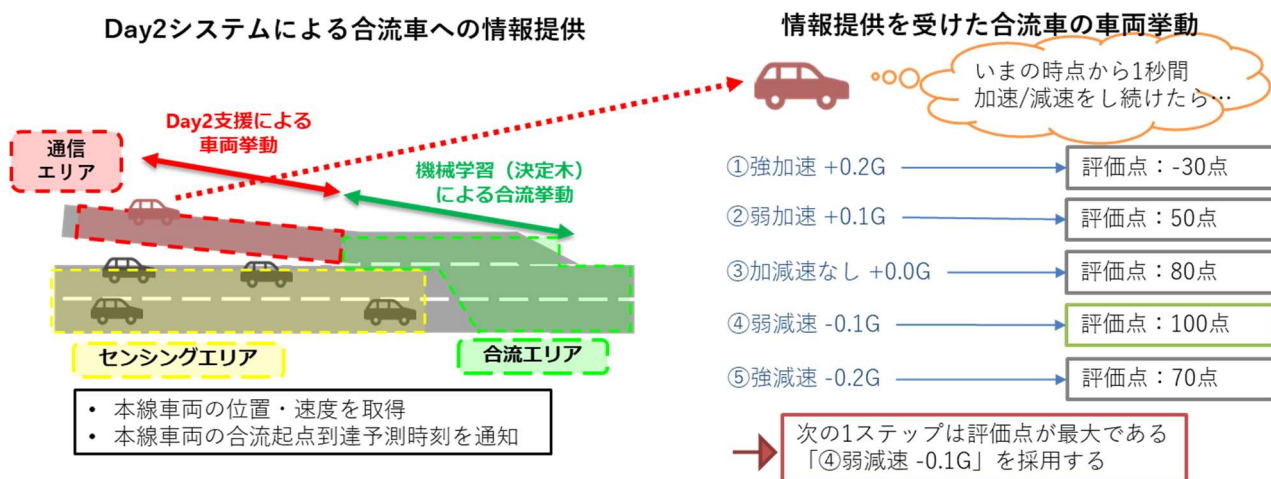


図 3. Day2 システムによる情報提供とそれを受けた合流車の車両挙動

合流部の車両挙動の概略を図 4 に示す。車両同士の相互作用を含めた現実的な車両挙動を再現するため、路上カメラから取得した実際の車両走行を捉えた動画ログデータを基に、機械学習などを活用して学習した車両挙動を組み込んで、高い再現性を確保している。

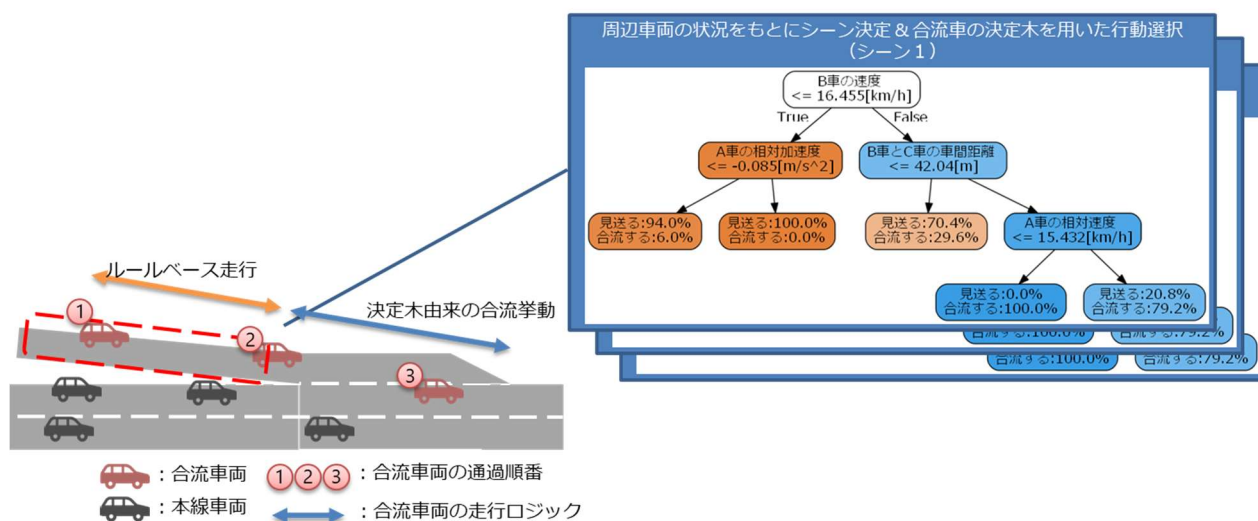
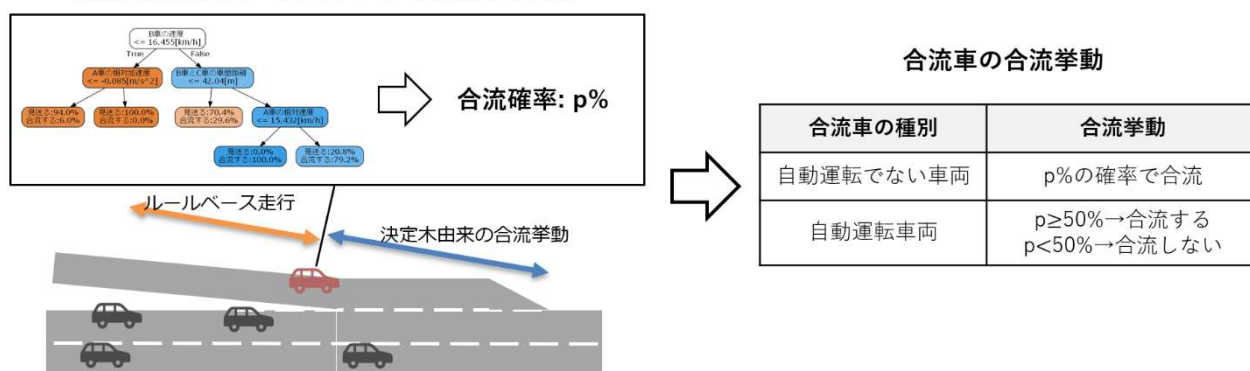


図 4. 合流部の車両挙動の概略

合流部の車両挙動の詳細を図5に示す。合流車は合流行動の意思決定開始地点に到達した瞬間、実データから学習して構築した機械学習の決定木と呼ばれるモデルにより、合流確率を計算する。この際、自動運転車と自動運転でない車両とで、合流の挙動が若干異なる。自動運転でない車両の場合は、たとえば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、合流確率が 50% 以上であった場合は必ず現在の車間への合流を選択し、 50% 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。



なお、自動運転車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、法定速度を遵守する走行挙動ではない点についても留意が必要である。

様々なシナリオにおける Day2 システムの支援効果を評価するため、様々なパラメータを変更できるようにシミュレータを構築している。変更可能なパラメータを表 1 に示す。まず交通条件としては、自動運転車混在率を変更できる。なお、Day2 システムの支援を受けることができるのは自動運転車のみであり、自動運転車は合流車線にのみ発生することに留意する。さらに、Day2 システムに関わるパラメータとして、支援の有無のほか、センシングエリアの範囲、通信エリアの範囲、センサの情報提供遅延、センサの配信情報誤差といった諸条件を変更することができる。ここでセンサの配信情報誤差は、位置の誤差と速度の誤差の 2 種類をそれぞれ設定することができる。

表 1. シミュレーションパラメータ

大項目	小項目	パラメータ例	
交通条件	自動運転車混在率	0%, 20%, 30% ※自動運転車は合流車線にのみ発生	
Day2 システムの 諸条件	Day2 システムの 支援の有無	支援あり、支援なし	
	センシングエリア の範囲	200m, 180m, 160m, 140m (合流地点から上流方向の範囲)	
	通信エリアの範囲	120m, 100m, 80m, 60m, 40m (合流地点から上流方向の範囲)	
	情報提供遅延	平均	0s, 0.4s, 0.8s, 1.3s
		標準偏差	0s, 0.2s
	配信情報の誤差	前後位置	・ 誤差なし ・ $\pm 1\text{m}$ (一様分布)
		走行速度	・ 誤差なし, ・ 最大 $\pm 12\text{km/h}$ の正規分布

3.4. 交通流の発生モデル

シミュレーションで発生させる車両の走行速度分布は、カメラで取得した対象地の実際の交通データをもとにしている。取得した時間帯ごとのデータを通常走行時間帯と低速走行時間帯に分類し、今回のシミュレーションでは通常走行時間帯のデータのみを使用している（図 6）。通常走行時間帯のデータは速度分布の最頻値が $60\text{km/h} \sim 70\text{km/h}$ 程度となっている。通常走行時間帯に分類されたデータの詳細を表 2 に示す。低速走行時間帯を除外しているのは、Day2 システムの支援効果が見込めないと考えたためである。

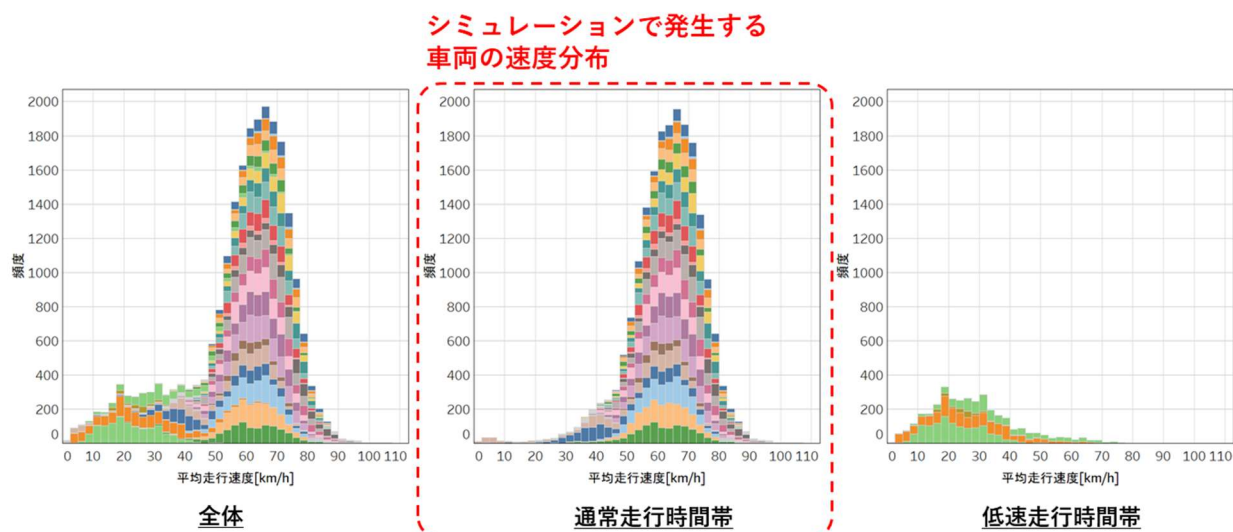


図 6. 実データより取得した車両の走行速度分布

表 2. 通常走行時間帯のデータ

通常走行時間帯			
データ取得 開始時刻	データ取得 時間[分]	走行台数	1分間あたりの 走行台数
20190803_1343	20.0	839	41.9
20190803_1408	2.0	87	43.5
20190803_1426	15.0	698	46.5
20190803_1446	18.0	816	45.3
20190803_1511	13.0	650	50.0
20190805_1014	23.5	976	41.5
20190805_1038	24.0	985	41.0
20190805_1211	24.5	1128	46.0
20190805_1235	24.5	1066	43.5
20190805_1405	6.0	247	41.4
20190806_0811	35.0	1118	31.9
20190806_1027	35.0	1466	41.9
20190806_1111	35.0	1277	36.5
20190806_1211	35.0	1476	42.1
20190807_1554	30.0	1346	44.8
20190807_1654	32.0	1508	47.1
20190807_1826	10.0	439	43.9
20190808_1154	32.5	1284	39.5
20190808_1254	28.0	1235	44.1
20190808_1354	30.0	1363	45.4
20190808_2054	30.0	1315	43.8
20190809_1354	30.0	1238	41.2
合計	533.2	22557	42.3

3.5. モデルの再現性

モデルの再現性を示すため、支援なし・自動運転車なしのシナリオでシミュレーションを実行した結果を実軌跡データと比較したものを図7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、東池袋の交通流および合流シーンの特徴を表現可能である。

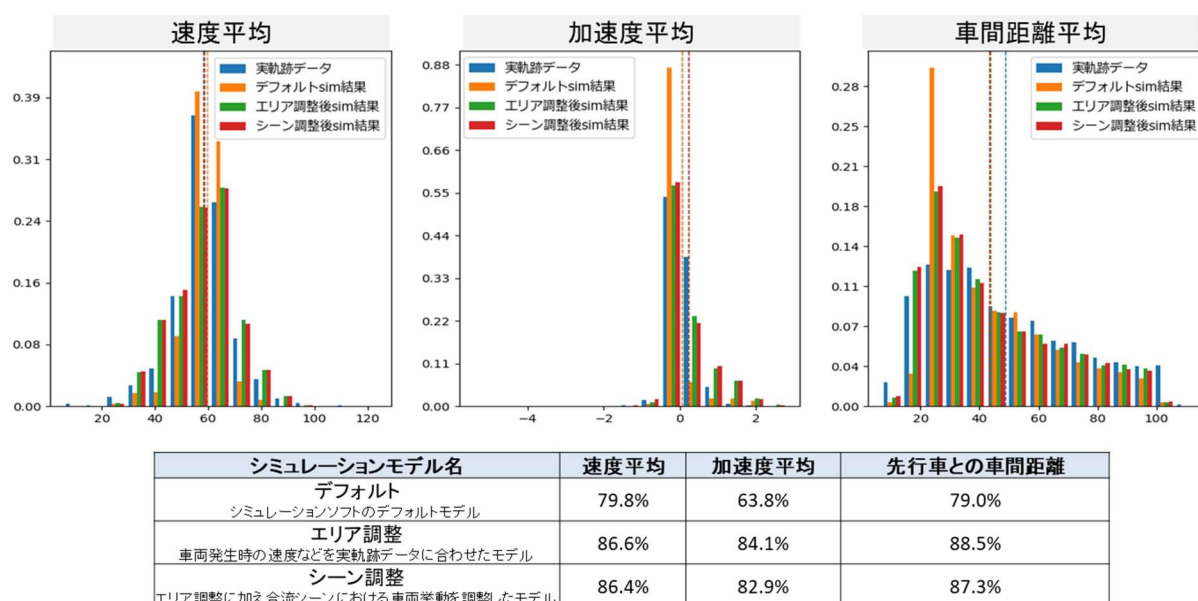


図7. モデルの再現性

カメラで交通流の実データを取得した地点は合流部付近であるが、シミュレーション内ではその交通流をセンシングエリア上流で発生させていることに留意が必要である。つまりこの間の交通流はデータとしては取得できていないためシミュレーションのデフォルトの追従モデルで代用しており、この点は次年度以降の課題となる（図8）。

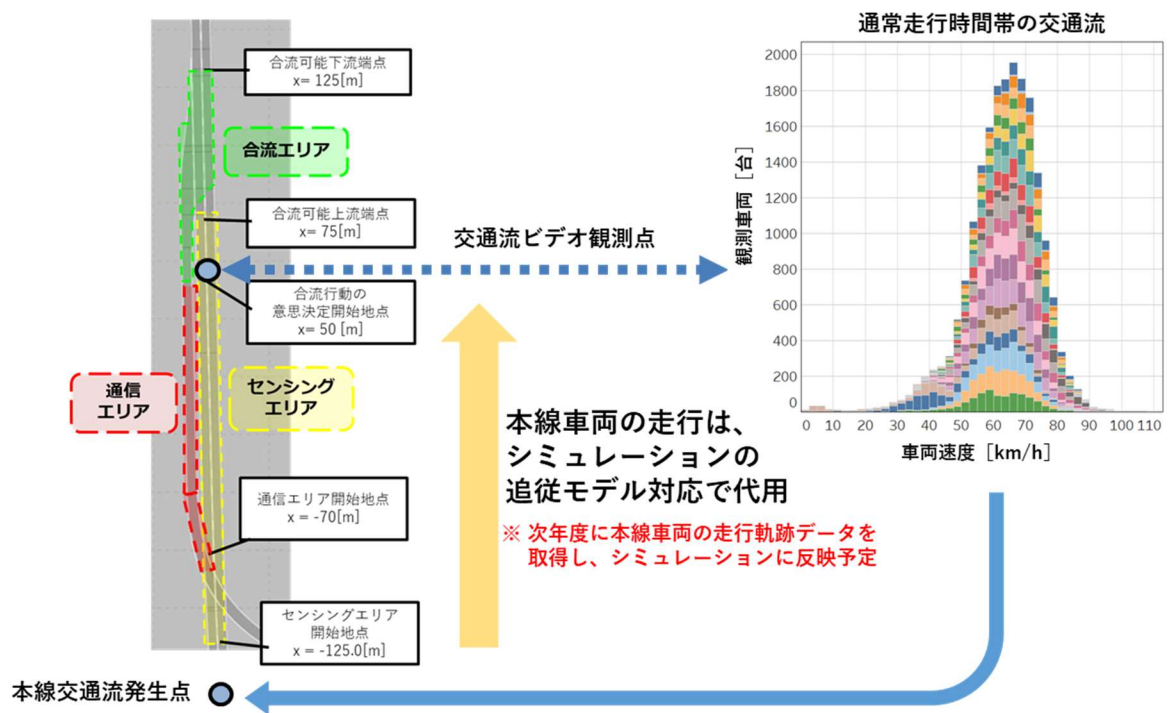


図 8. データ取得地点とシミュレーション内の交通流発生地点

4. シミュレーション実施・結果分析

前章までで構築した環境を用いてシミュレーション実施・結果分析を行い、Day2 システムの評価を行う。4.1 節では Day2 システムの効果有無検証として、Day2 システムの諸条件が理想的な状態のときの効果を検証する。4.2 節では Day2 システムの許容可能な条件評価として、Day2 システムの諸条件を変化させたときに支援効果に与える影響を検証し、Day2 システムが成立するために必要な条件の整理を行う。

4.1. Day2 システム効果有無の分析

本節では、Day2 システムの諸条件が理想的な状態のときの効果を検証する。ここで、Day2 システムの諸条件が理想的な状態として、以下のパラメータ設定とする。

表 3. 理想シナリオのパラメータ設定

パラメータ種別	設定値
センシングエリアの長さ	合流可能上流端点から上流方向に 200m
通信エリアの長さ	合流行動の意思決定開始地点から上流方向に 120m
情報提供遅延	なし
配信情報誤差	なし

以降、このシナリオ設定を「理想シナリオ」と呼ぶ。ここで、センシングエリアおよび通信エリアの理想的な条件における長さは、図 9 に示す考え方により最も支援が難しいシナリオでも支援が成立する長さとしている。センシングエリアの長さは、合流車が通信エリアに進入時に本線の後方から高速の車両が進入してきた場合、それを検知したうえで合流時に十分な車間を確保できるような長さとしている。通信エリアの長さは、通信エリア進入時に真横に本線車両がいた際、加速することで合流時に十分な車間が確保できるような長さとしている。

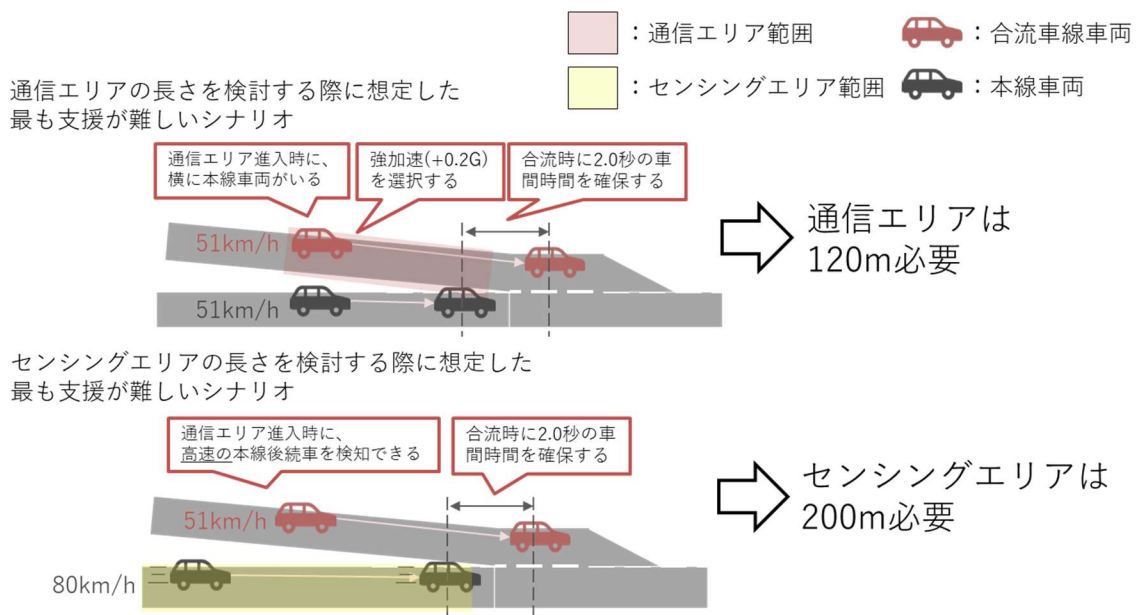


図 9. 理想シナリオにおけるセンシングエリアおよび通信エリアの長さ設定

4.1.1. 合流の改善効果の分析

支援の前後で合流の良さを示す評価点の台数分布を比較することにより、合流の改善効果を分析する。以下の3つのシナリオにおいて、評価点の分布を計算した。

- 支援がなく、自動運転車が存在しないシナリオ
- 支援がなく、自動運転車混在率が20%のシナリオ
- 支援があり、自動運転車混在率が20%のシナリオ

それぞれのシナリオにおける評価点分布を図示したのが図10である。なお、自動運転車のみを対象として集計しており、自動運転車が発生しないシナリオにおいては他のシナリオで自動運転車である車両を対象として集計している。

支援のあるシナリオでは支援のないシナリオに比べ、余裕のない合流（評価点が0点未満）の車両が28台（27%）減少し、余裕のある合流のできる（評価点が100点）の車両が6台（5%）増加している。したがって、支援によって全体として評価点が向上し、余裕のある合流が実現されやすくなっていることが分かる。

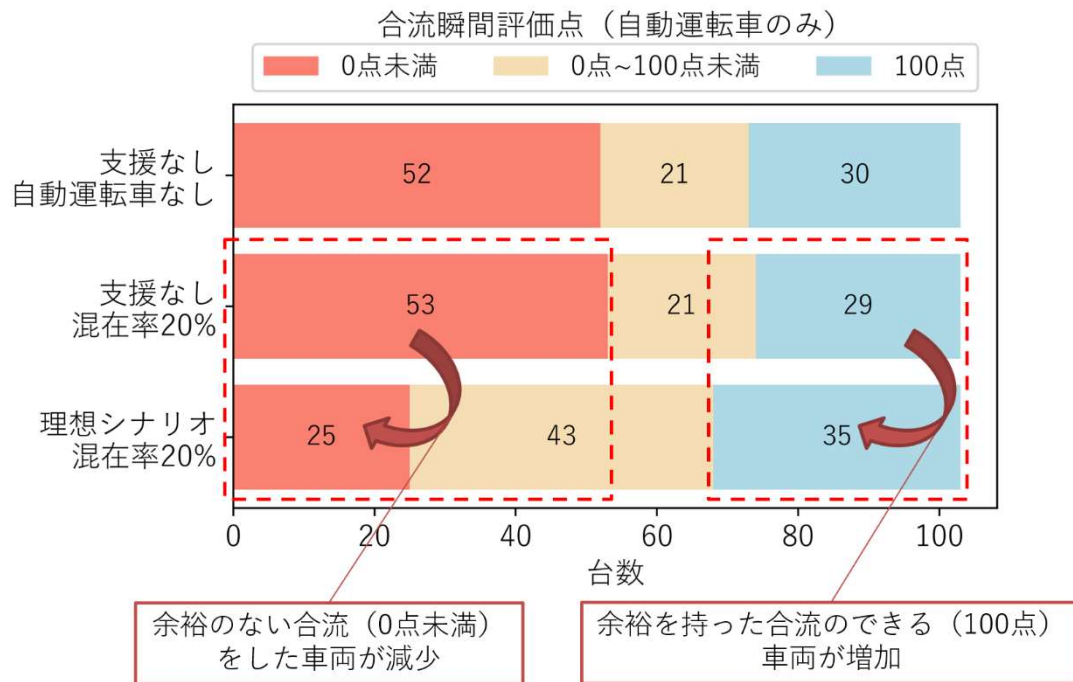


図 10. 自動運転車混在率が 20%のときの評価点分布（台数）

続いて、自動運転車混在率が 30%のときに同様の分析を行った。自動運転車混在率が 20%のときと 30%のときのそれぞれについて、評価点分布を割合で示したものがそれぞれ図 11 と図 12 である。いずれの場合でも、支援によって評価点分布が改善し、余裕のある合流が実現されやすくなっていることが分かる。

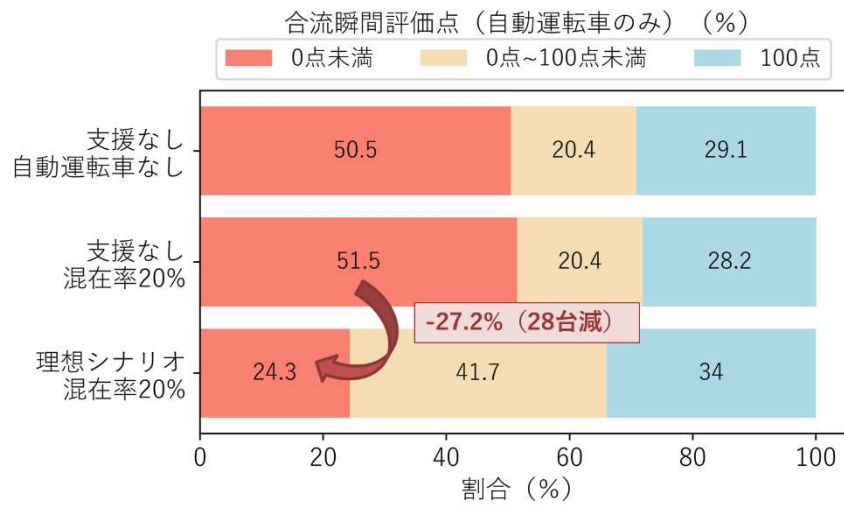


図 11. 自動運転車混在率が 20%のときの評価点分布（割合）

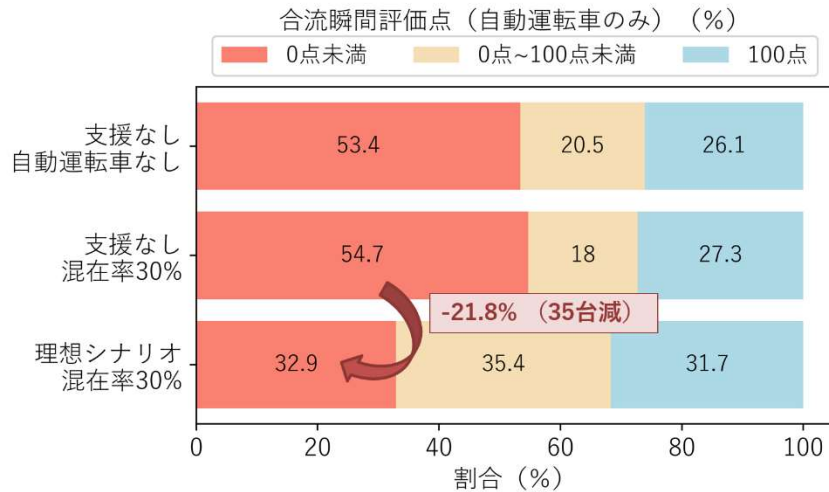


図 12. 自動運転車混在率が 30%のときの評価点分布（割合）

4.1.2. 支援により改善しなかった車両の要因分析

前項の分析において、自動運転車混在率が 20%で Day2 システムによる支援を行ったシナリオでは、依然として余裕のない合流（評価点が 0 点未満である）車両が 25 台存在した。これらの車両についてシミュレーション動画を参照し、評価点が改善しなかった要因を考察した。その結果として、要因を以下のように分類した。

1. 本線の車間が密な状況であることが要因の車両：14 台
2. 合流挙動モデルに改善の余地がある車両：4 台
3. 評価点のロジックに検討の余地がある車両：7 台

本線の車間が密 14件	合流挙動モデル (決定木) 4件	評価点ロジック 7件
----------------	------------------------	---------------

図 13. 支援により改善しなかった車両の要因内訳

1. 本線の車間が密な状況であることが要因で評価点が向上しなかった車両は、余裕のある合流ができる広い車間が存在しなかったため支援の余地がなく、やむを得ず狭い車間に合流した車両である。例として、車両 ID830 の車両挙動を図 14 に示す。ここで、図の横軸は車両の位置を示し、上のグラフは速度の変化、下のグラフは加速度の変化を示す。図の橙色の帯の部分通信エリアの範囲を示し、緑色の帯の部分合流エリアの範囲を示す。通信エリア内でわずかに減速しているが、大きな加減速はなく合流していることが分かる。動画を確認すると、本線の密な交通流のうちで狭い車間に合流している（図 15）。結果として合流時の本線車との車間時間が非常に小さくなり、評価点としては 0 点未満となっている。合流評価点マップにおける位置を図 16 に示す。このような合流は Day2 システムによる改善は難しいと考えられるが、本線車両に対して車間を空けるよう指示のできる Day3 システムであれば改善できる可能性がある。

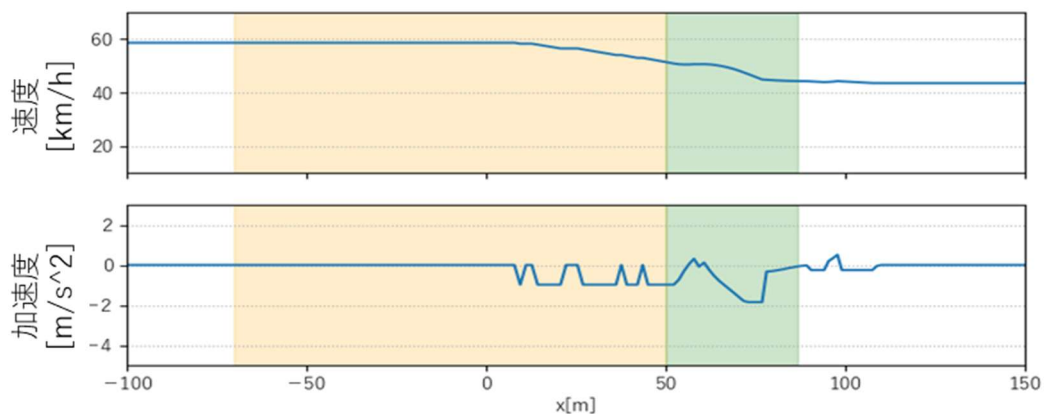


図 14. 車両 ID830 の車両挙動

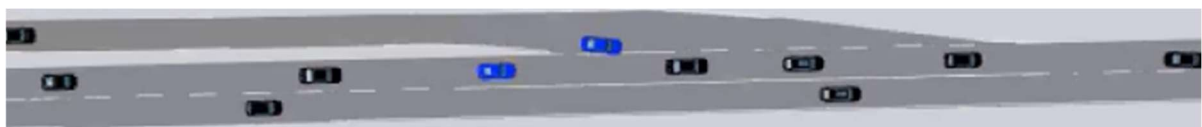


図 15. 車両 ID830 の合流時の状況

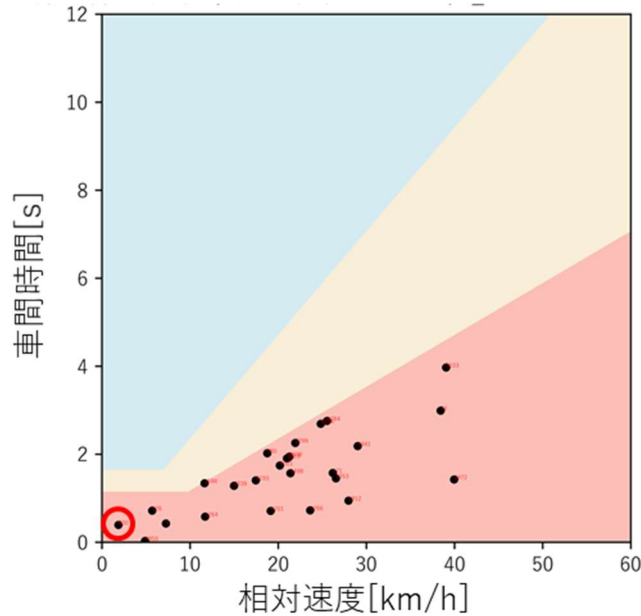


図 16. 車両 ID830 の合流評価点マップにおける位置

2. 合流挙動モデルに改善の余地のある車両とは、合流部進入時点で十分に車間に余裕があるにもかかわらず、見送りを選択し合流できなかった車両である。例として車両 ID2472 の車両挙動を図 17 に示す。通信エリア内（橙色の帯）ではほとんど加減速をしておらず、この時点で支援の必要がないほど前後の本線車両との車間が空いていたことが分かる。しかしながら合流部（緑色の帯）では大きく減速しており、動画を確認すると後方の車両を見送ってから合流している（図 18）。そのため、本線車両との相対速度が大きくなり、評価点が 0 点未満となっている。合流評価点マップにおける位置を図 19 に示す。このような挙動が起こる要因は、合流挙動の決定木モデルが有限のサンプルから学習し構築されている点にある。サンプルからは取得できない状況が存在し得るほか、モデルそのものにも統計的な誤差が存在し得る。その結果、決定木モデルはあらゆる状況に対して適切な判断ができるわけではなく、稀に不自然な挙動を起こしてしまう場合がある。

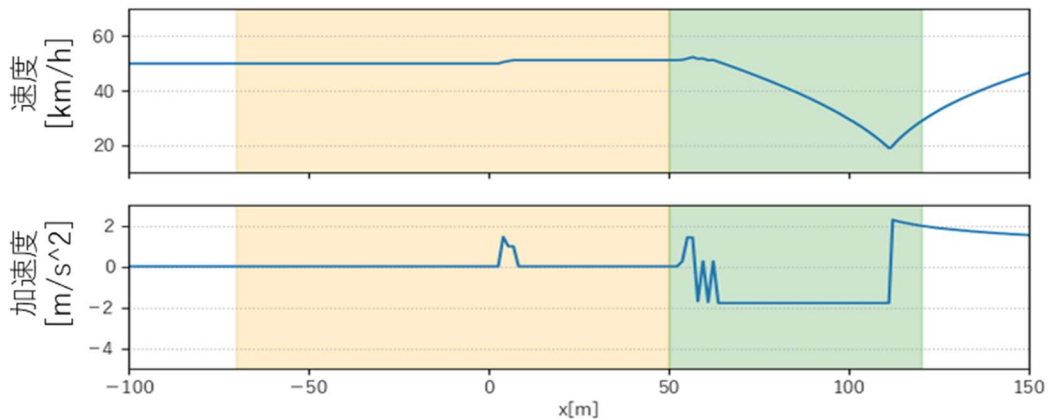


図 17. 車両 ID2472 の車両挙動



図 18. 車両 ID2472 の合流時の状況（この状況で見送りを選択）

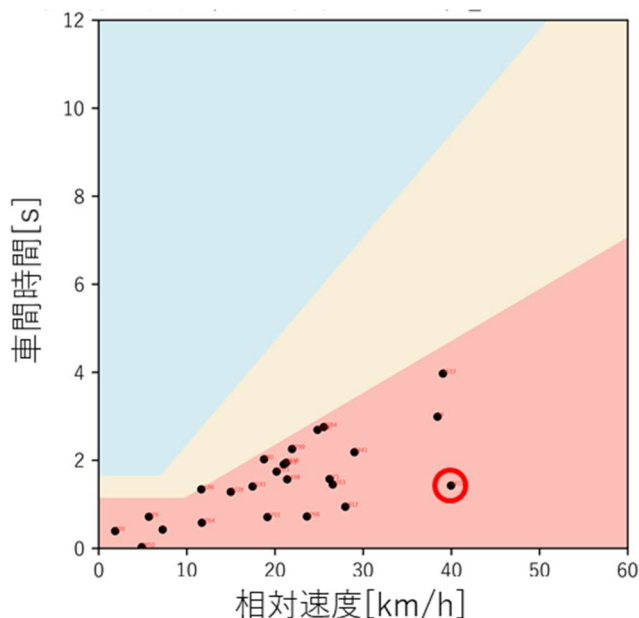


図 19. 車両 ID2472 の合流評価点マップにおける位置

3. 評価点のロジックに検討の余地がある車両とは、評価点としては 0 点未満となっているものの、直感的には安全な合流をしていると考えられる車両である。例として車両 ID5234 の挙動を図 20 に示す。この車両は通信エリア内で加速してから合流している。動画を見ると、本線の後方から高速の車両が来ており、その車両から逃げるように加速し車間を確保して合流していることが分かる。合流評価点マップにおける位置を図 22 に示す。車間時間は 2 秒以上確保しているものの、本線後方車が高速であるがゆえに相対速度が大きくなっており、そのために評価点が 0 点未満となっていることが分かる。しかしながら、動画を見る限りは直感的には安全な合流であるようにも感じられる合流であり、評価点マップに改善の余地があると考えられる。

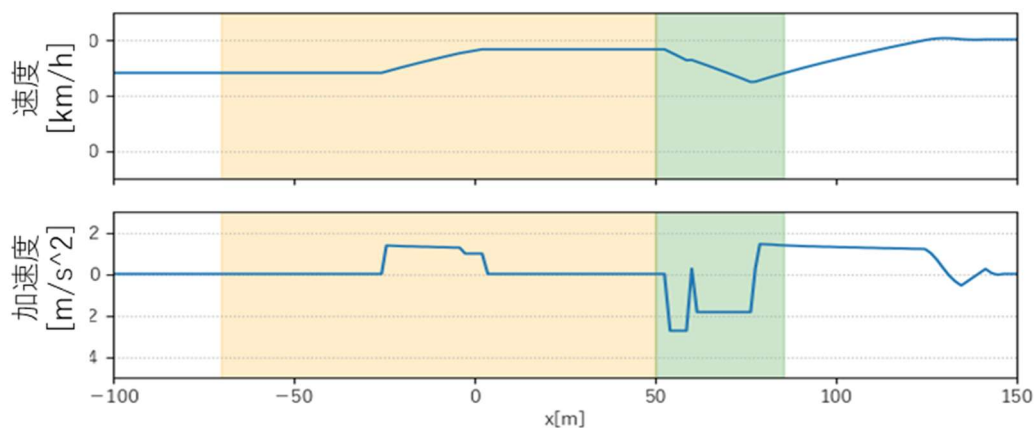


図 20. 車両 ID5234 の車両挙動



図 21. 車両 ID5234 の合流時の状況

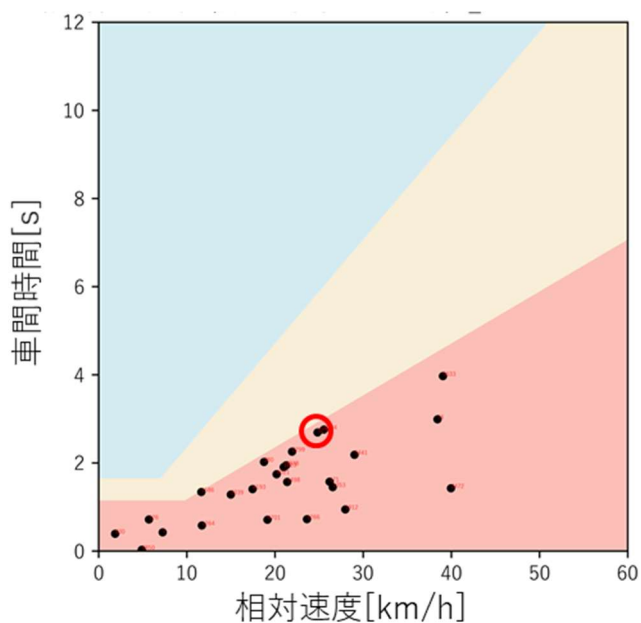


図 22. 車両 ID5234 の合流評価点マップにおける位置

まとめると、Day2 システムにより改善しなかった車両の半数弱は車両挙動モデルや評価モデルに問題があり、評価点による Day2 システムの効果の評価は過小評価となっている可能性がある。一方、残りの半数強は本線の車間が密な状況であることに起因し、Day2 システムによる支援は難しいと考えられる。これらの車両は Day3 システム以上の支援により改善される可能性がある。

4.1.3. 周囲の交通流への影響分析

前項までは、支援を直接受けた車両の挙動を分析した。本項では、支援を受けていない車両を含む周囲の交通流への影響を分析する。

まず、支援を受けていない合流車両の評価点の変化を分析した。自動運転車混在率が20%時と30%時のそれぞれについて、自動運転車以外（支援を受けていない車両）の評価点分布を図示したものが図23と図24である。支援の有無で評価点分布に変化は見られず、支援を受けていない車両の合流に与える影響は確認されなかった。

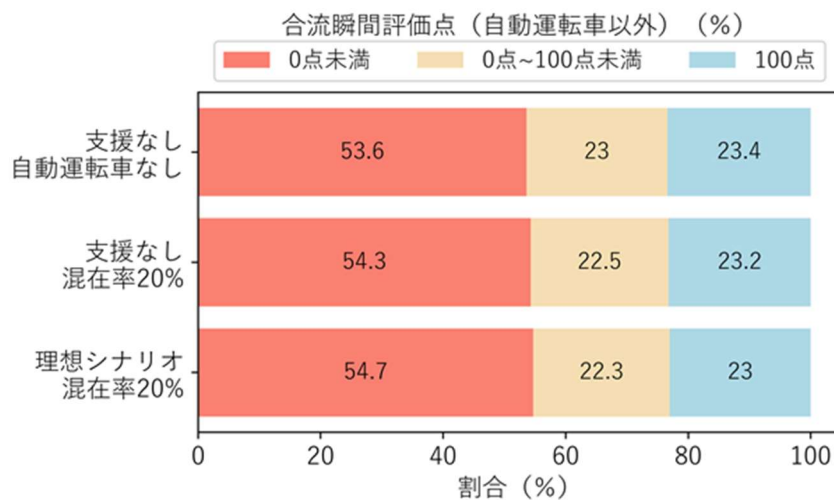


図 23. 自動運転車以外の評価点分布（自動運転車混在率 20%）

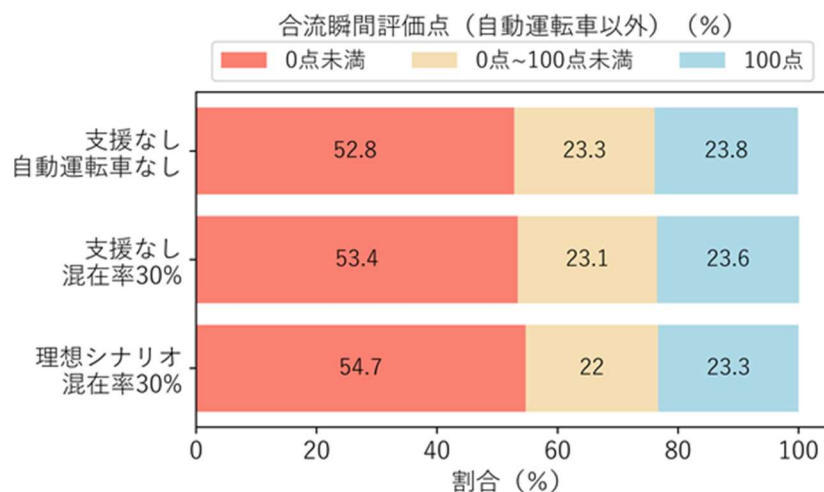


図 24. 自動運転車以外の評価点分布（自動運転車混在率 30%）

続いて、支援を受けた車両の本線後方車両の挙動の変化を分析した。具体的には、自動運転車に対する本線後方車（図25）について、最低速度と最低加速度の分布を支援の前後で比較した。



図 25. 自動運転車に対する本線後方車

結果を図 26 と図 27 に示す。いずれも自動運転車混在率 20%のシナリオで実施している。シナリオごとにサンプル数が異なるのは、本線後方車を認識できる距離の閾値が存在するためである。いずれも支援の前後で分布変化は見られず、本線後方車に与える影響は確認されなかった。

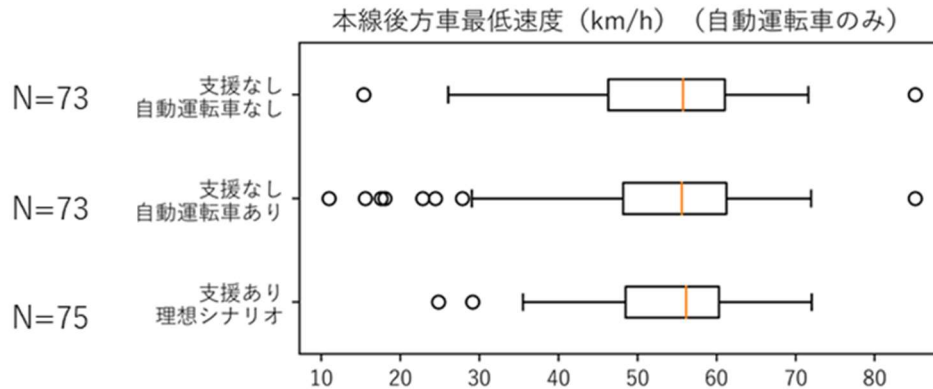


図 26. 本線後方車最低速度の分布

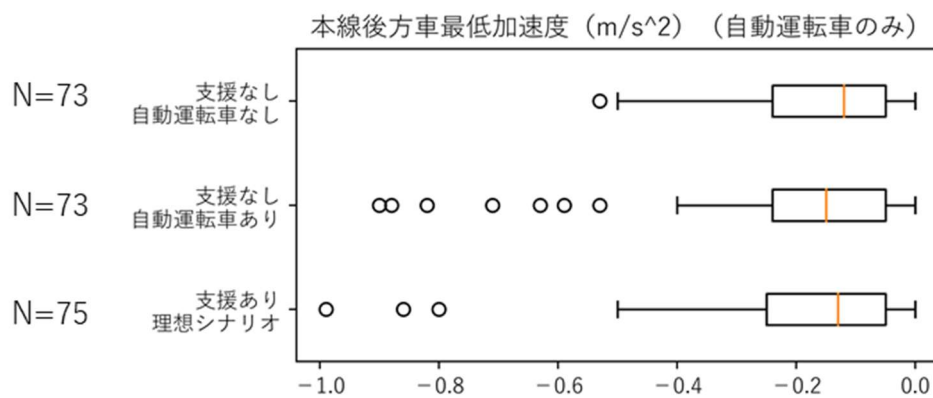


図 27. 本線後方車最低加速度の分布

最後に、交通流全体に与える影響の分析として、合流車線・本線・追越車線のそれぞれについて、速度・加速度・車間距離の分布を比較した。結果を図 28～図 36 に示す。支援の有無や自動運転車混在率などのシナリオに関わらず、分布形に変化は見られず、支援による交通流への影響は確認できなかった。

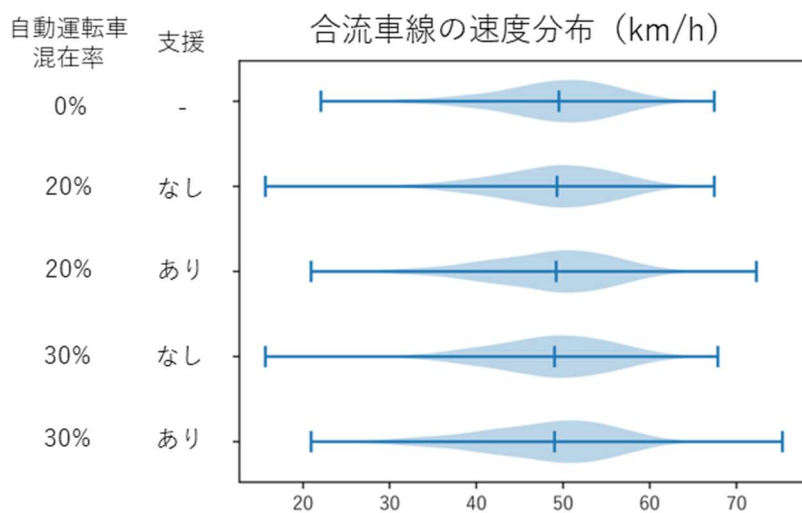


図 28. 合流車線の速度分布

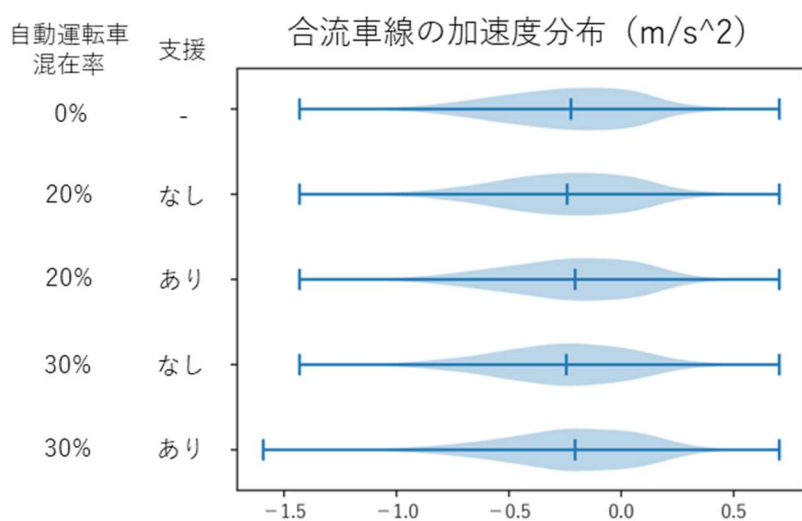


図 29. 合流車線の加速度分布

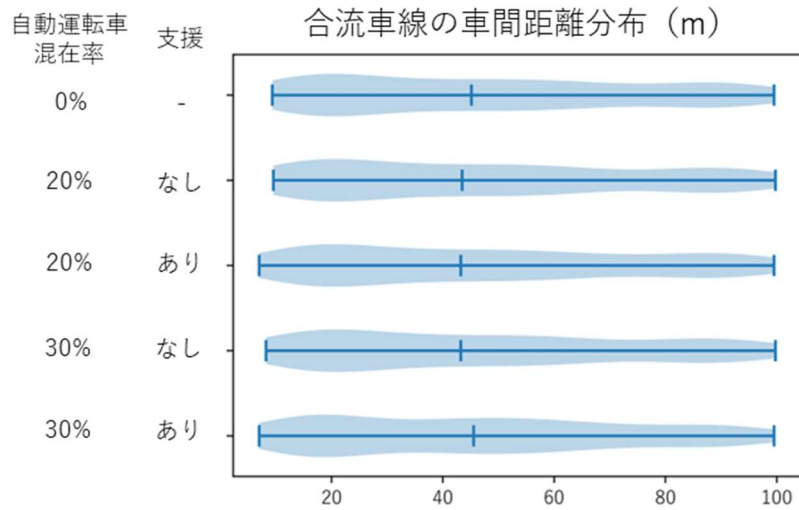


図 30. 合流車線の車間距離分布

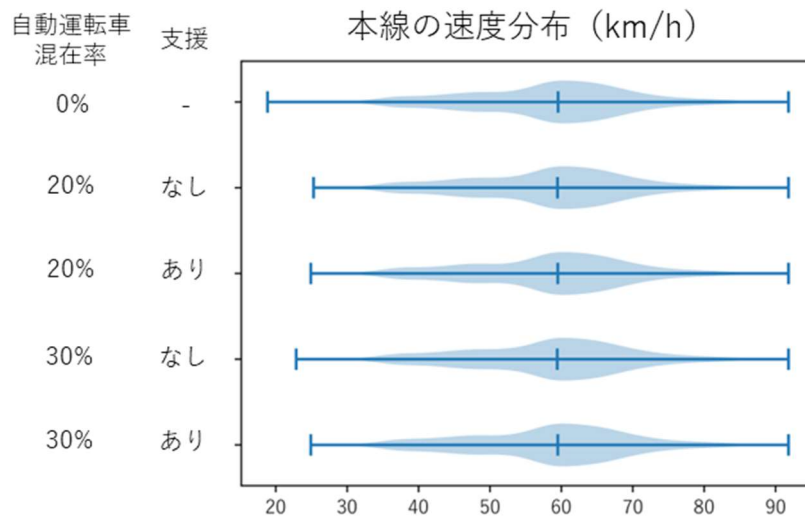


図 31. 本線の速度分布

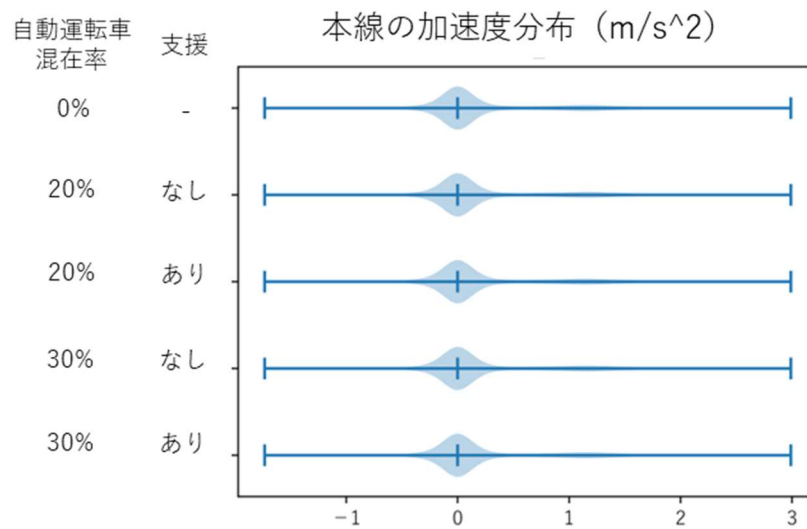


図 32. 本線の加速度分布

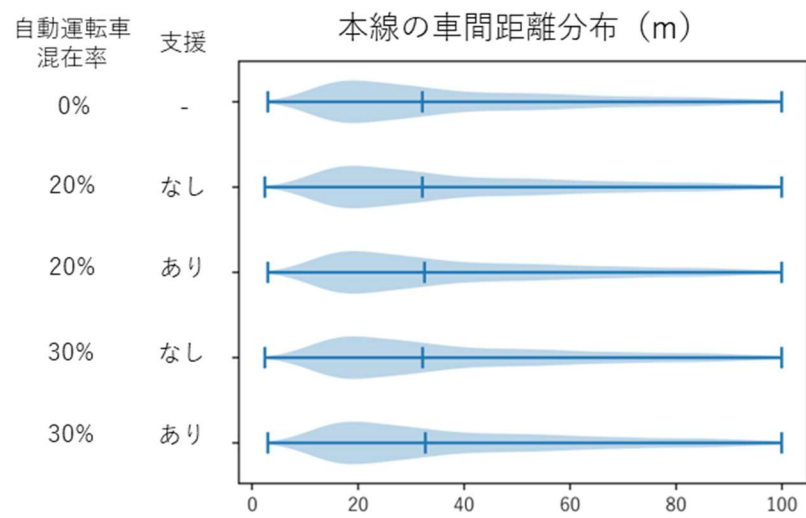


図 33. 本線の車間距離分布

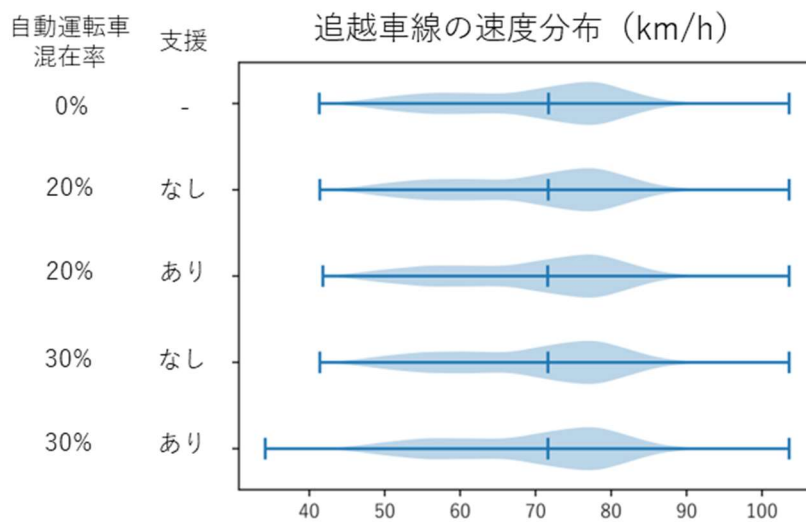


図 34. 追越車線の速度分布

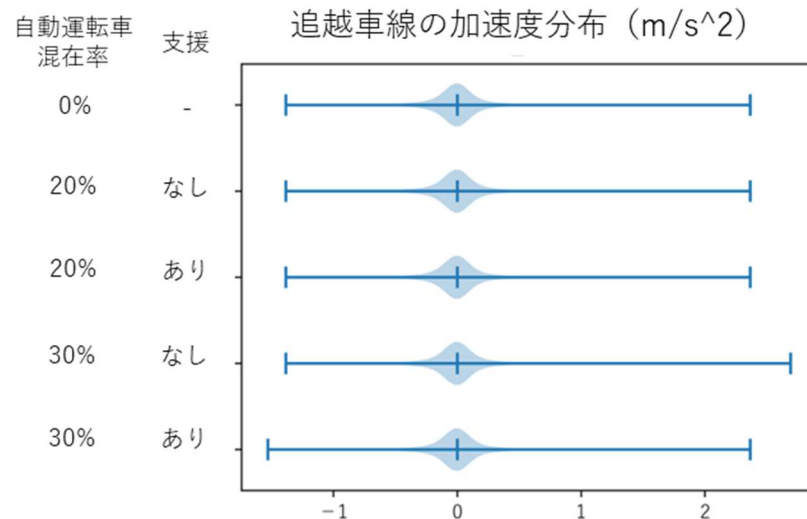


図 35. 追越車線の加速度分布

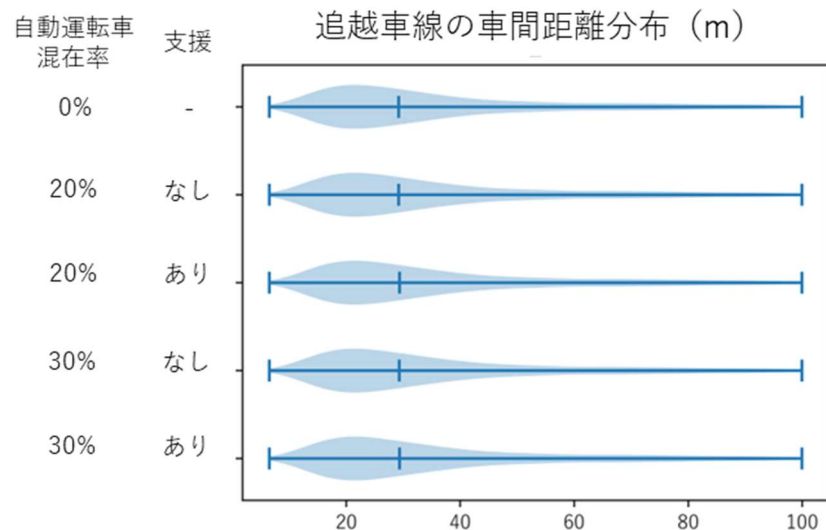


図 36. 追越車線の車間距離分布

以上、支援による周囲の交通流への影響分析として、合流への影響、本線後方車への影響、交通流全体への影響を分析したが、周囲の交通流に与える影響は確認されなかった。周囲の交通流に与える影響が小さい理由としては、下記の2点が挙げられる。第一に、今回のシミュレーションは通常走行時間帯の交通データを使用しており、車間が十分離れていることである。合流車同士の平均車間時間は約 3.5s である。第二に、自動運転車の速度は実際の速度データを基にしており、法定速度を遵守する設定とはなっていないことである。法定速度を遵守させる設定とした場合、周囲に影響を及ぼす可能性がある。

4.1.4. Day2 システム効果有無の分析まとめ

本節では、Day2 システムの諸条件が理想的な状態のときの効果を検証した。

まず、合流の改善効果としては、より安全かつ効率的な合流が増加することが示された。合流の良さを示す評価点の分析により、余裕のある合流ができる車両が約 5%増加し、余裕のない合流となった車両が約 27%減少した。

次に、支援によっても合流が改善しなかった車両についてシミュレーション動画を参照し、その要因を考察した。その結果、本線の車間が密な状態のときは Day2 システムによる支援効果が得られにくい傾向があることが示された。これらの車両については、Day3 システムによって改善される可能性がある。

最後に、支援を受けていない車両を含む周囲の交通流への影響を分析した。その結果、支援による周囲の交通流に対する影響は見られなかった。

4.2. Day2 システムの許容可能な条件評価

本節では、Day2 システムの諸条件を変化させたときに支援効果に与える影響を検証する。ここで変化させるシステム条件とは、センシングエリア、通信エリア、情報提供遅延、配信情報誤差のことである。なお、自動運転車混在率は 20%で固定して分析を行う。

4.2.1 節では各システム条件についての個別分析として、各システム条件についてそれぞれ個別に条件を変化させたとき、Day2 システムの効果に与える影響を分析する。4.2.2 節では各システム条件についての組み合わせ分析として、各システム条件を組み合わせると同時に変化させたとき、Day2 システムの効果に与える影響を分析する。

4.2.1. 各システム条件についての個別分析

本項では、各システム条件についてそれぞれ個別に条件を変化させたとき、Day2 システムの効果に与える影響を分析する。具体的には、センシングエリア、通信エリア、情報提供遅延、配信情報誤差のそれぞれについて、理想シナリオの条件からそのパラメータだけを動かしたとき、支援効果に与える影響を検証する。

まず、通信エリアの範囲を理想シナリオの 120m から 40m まで短縮したとき、支援効果に与える影響を分析した。結果を図 37 に示す。通信エリアが短くなるにつれ、評価点が 0 点未満の車両が増加し、支援効果が減少することが分かる。

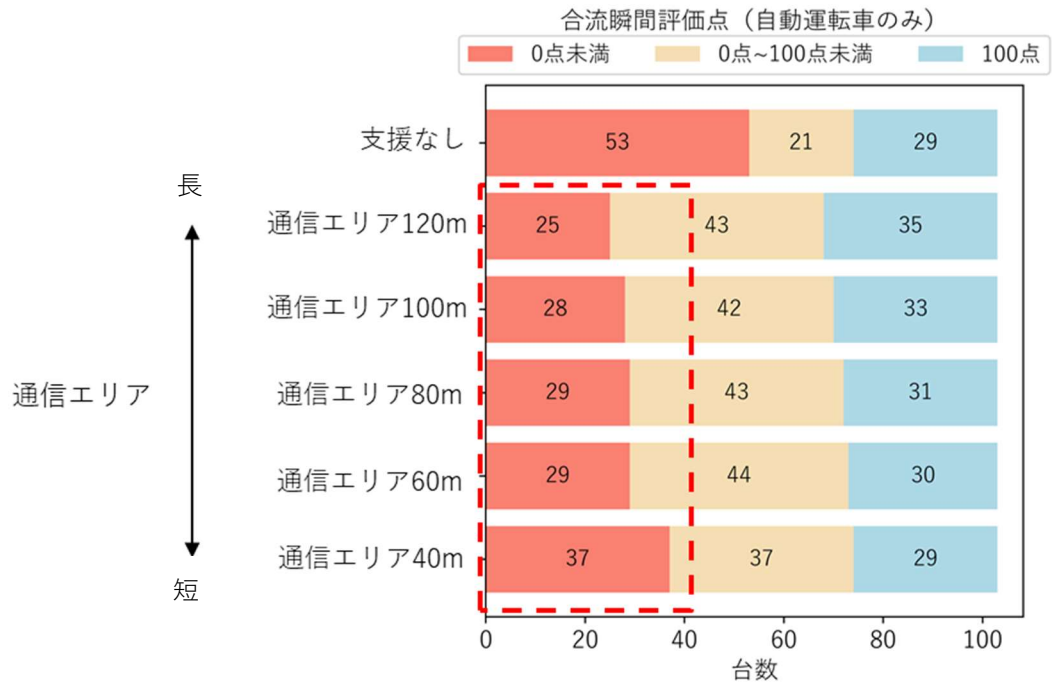


図 37. 通信エリアの影響分析

続いて、センシングエリアの範囲を理想シナリオの 200m から 140m まで短縮したとき、支援効果に与える影響を分析した。結果を図 38 に示す。この範囲においては、センシングエリアを変化させることによる、支援効果への影響はほとんど見られない。

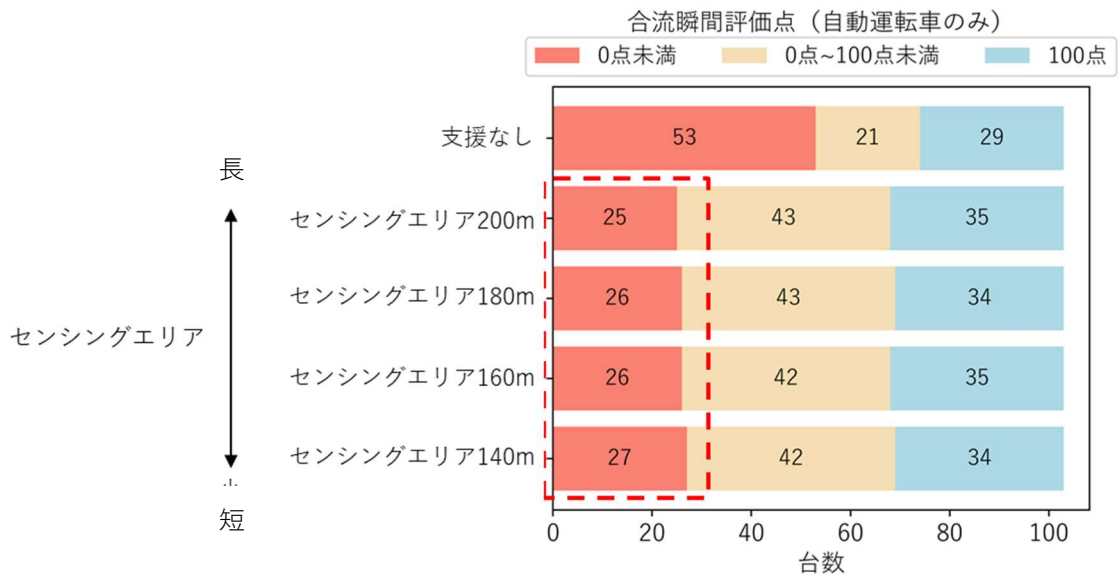


図 38. センシングエリアの影響分析

ここで、通信エリアおよびセンシングエリアの影響について考察する。通信エリアを短くすると支援効果が減少したのは、通信エリアが短くなるほど支援により車間を確保することが難しく

なるためと考えられる。一方、センシングエリアを長く設定するメリットとしては、高速の本線後続車を検知できることである。センシングエリアを長くしても支援効果に影響がない理由としては、そのように高速の本線後続車がいる状況が多くないためと考えられる。なお、今回の検討はあくまでセンシングエリアが 200m から 140m の範囲で行っており、エリアをさらに短くした場合には支援効果に影響が出る可能性は存在する。

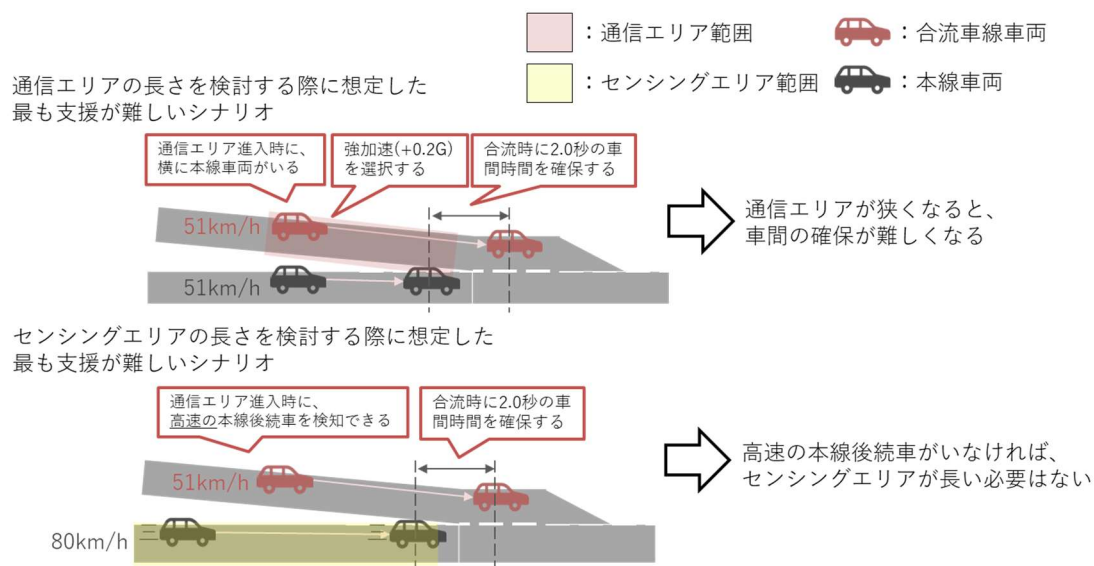


図 39. 通信エリアおよびセンシングエリアの影響

続いて、情報提供遅延が支援効果に与える影響を分析する。既往研究によると、Day1 システムの情報提供遅延は実績値で平均 0.8s、標準偏差 0.2s 程度である¹。この値を参考に、遅延のない理想シナリオと、平均 0.4s, 0.8s, 1.3s の遅延を発生させたそれぞれのシナリオについて、支援効果を分析した。なお、遅延が発生するシナリオについては、同時に 0.2s の標準偏差を与えている。結果を図 40 に示す。情報提供遅延が大きくなるほど、支援効果が減少することが分かる。とくに、遅延が 1.3s になると、評価点の分布が支援のないシナリオにかなり近くなり、支援の効果が打ち消されてしまっている。

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, 交通工学論文集 第 8 巻 第 1 号 pp.39-48, 2022.

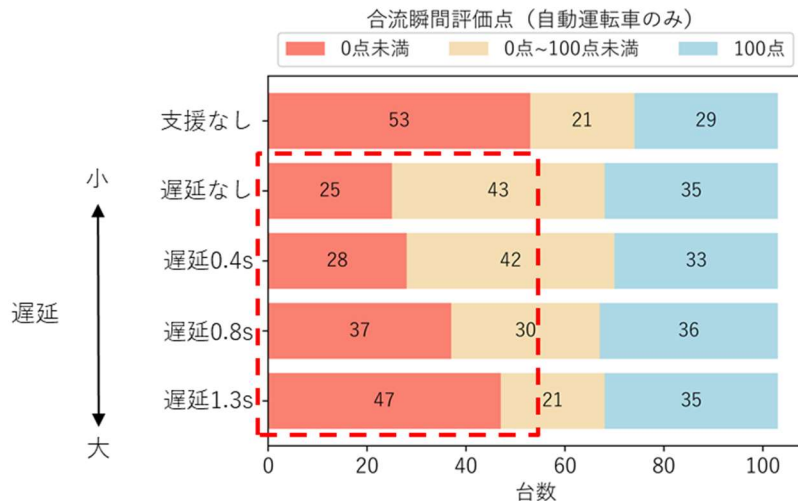
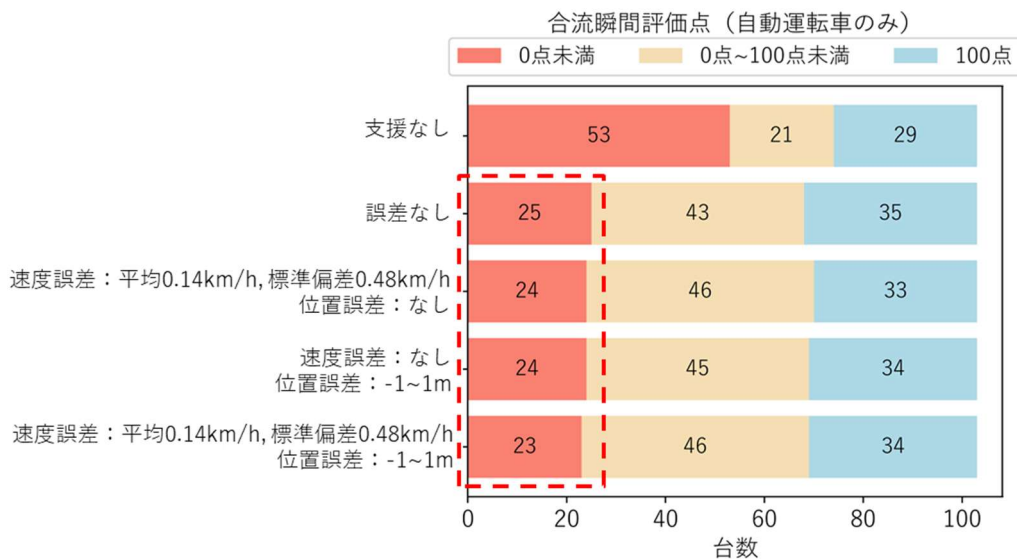


図 40. 情報提供遅延の影響分析

続いて、配信情報誤差（速度および位置）の影響分析を行った。既往研究によると、前後位置の誤差は $\pm 1\text{m}$ 程度、速度の誤差は理想的には平均 0.14km/h 程度である²。この値を参考に、速度誤差としては、誤差なしのシナリオと平均 0.14km/h ・標準偏差 0.48km/h の正規分布の誤差を与えるシナリオの2通りを検討する。位置誤差としては、誤差なしのシナリオと $\pm 1\text{m}$ の一様分布を与えるシナリオの2通りを検討する。以上、速度誤差と位置誤差についてそれぞれ2通りのシナリオを掛け合わせ、4通りのシナリオについて評価点の分布を図示したのが図 41 である。この程度の誤差では、支援効果にはほとんど影響がないことが分かる。



² 中川 敏正, 関谷 浩孝, 中田 諒, 花守 輝明, 藤村 亮太: 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, 交通工学論文集 第8巻 第1号 pp.49-58, 2022.

図 41. 配信情報誤差の影響分析

追加的な分析として、さらに大きな速度の配信情報誤差を与えた分析を行った。実道上での実験では、平均で-4.5km/h、最小で-11.6km/h の速度誤差分布を得ている（図 42）²。これを参考に、改めて以下の 3 パターンの速度誤差分布を与えたときの影響分析を行った。

- 95%信頼区間が-6~+6km/h である正規分布
- 95%信頼区間が-12~+12km/h である正規分布
- 95%信頼区間が-12~0km/h である正規分布

与える速度誤差分布を図 43 に示す。また、それぞれのシナリオにおいては、同時に位置誤差として±1m の一様分布を与えるものとする。

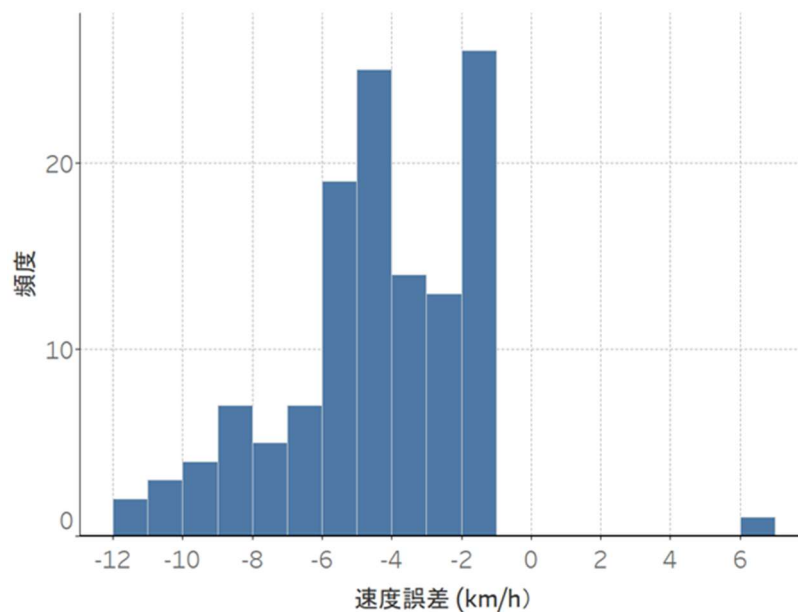


図 42. 実道上の実験から得られた速度誤差分布

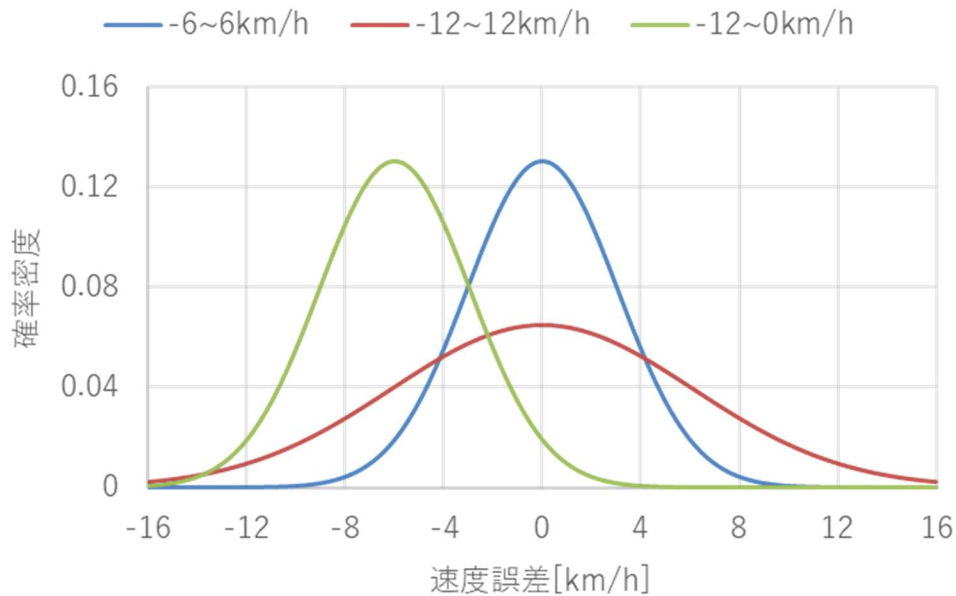


図 43. シナリオとして与える速度誤差分布

結果を図 44 に示す。負に偏った速度誤差（-12~0km/h）を与えたとき、評価点の分布は悪化している。一方、平均 0km/h の速度誤差（速度誤差-6~+6km/h および-12~+12km/h）を与えたとき、大きな変化はなく、わずかに評価点の分布が改善する傾向が見られた。

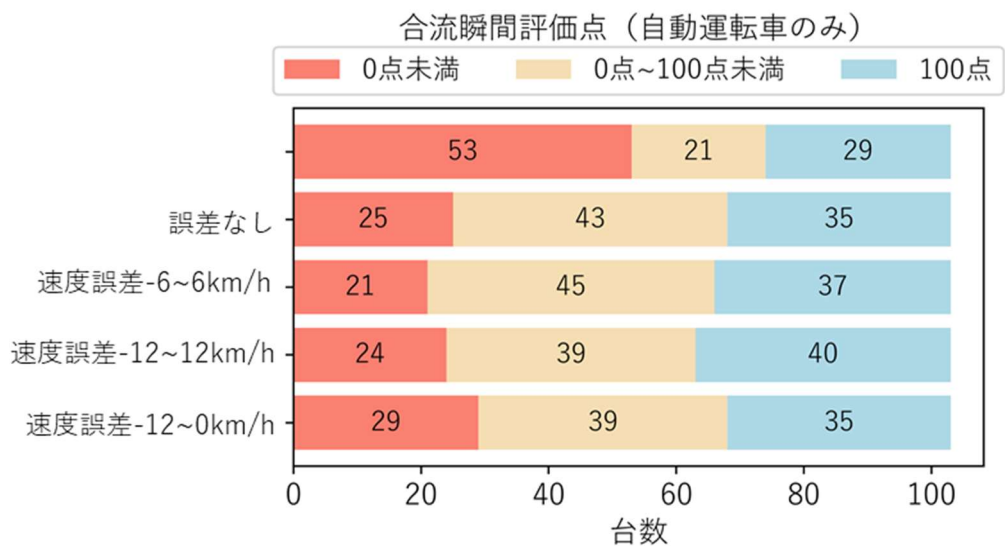


図 44. さらに大きな速度の配信情報誤差を与えたときの影響分析

ここで、平均 0km/h の速度誤差分布を与えたときの車両挙動の変化を検証し、評価点の分布に大きな変化がなく、わずかに改善する要因について考察する。速度誤差-12~+12km/h と誤差なしのシナリオについて、評価点分布を比較したのが図 45 である。多くの車両は 45 度線上に存在

し、挙動に変化がない。その一方で、誤差がある場合のみ評価点 100 点の車両が複数台みられる。

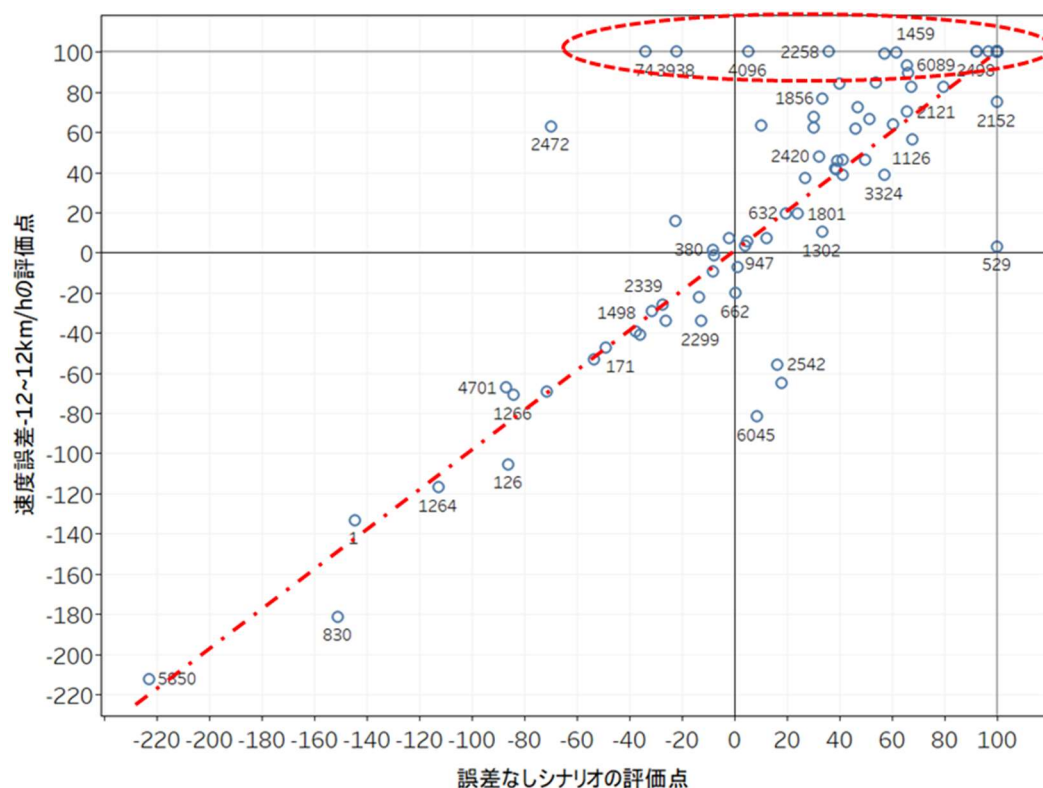


図 45. 誤差なしシナリオと速度誤差-12~+12km/h シナリオの評価点分布比較

誤差の有無によって挙動がほとんど変わらない車両の例として、車両 ID6284 の車両挙動を分析する。速度誤差がないシナリオと速度誤差があるシナリオ（-6~+6km/h）のそれぞれについて、速度変化と加速度の変化をグラフ化したものが図 46 である。速度誤差があるシナリオでは加速度が細かく変動しているものの、マクロな速度変化としては誤差がないシナリオと大差ないことが分かる。これは、本線の車両情報を 100ms という細かい周期で取得し行動を変更していることにより、情報に誤差があったとしてもマクロな挙動としては平均値に収束しているものと解釈できる。情報取得・行動変更の頻度をより粗くした場合には、誤差があるシナリオでも挙動が変化する可能性がある。

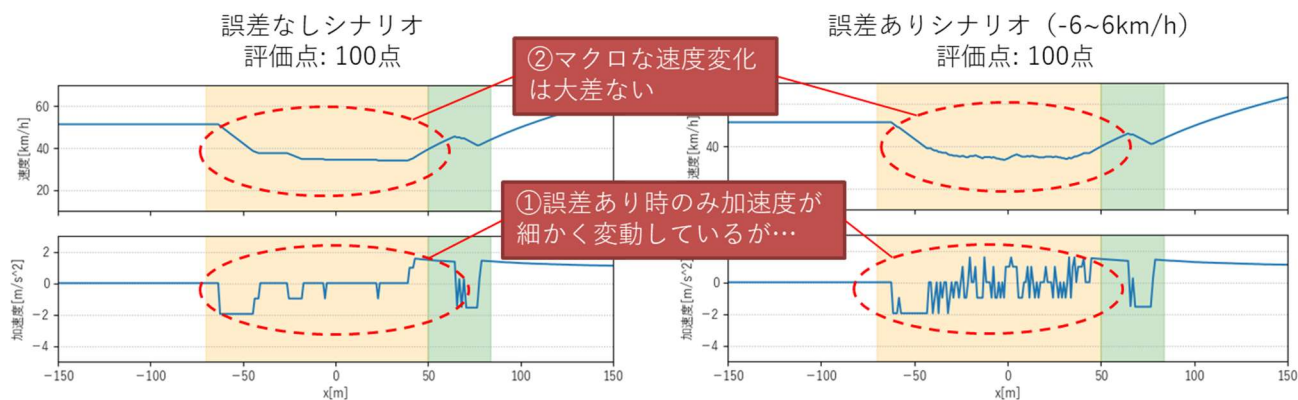


図 46. 車両 ID6284 の速度誤差がない場合とある場合の車両挙動

一方で、速度誤差があるときに評価点が改善した車両として、車両 ID2498 の挙動を分析する。速度誤差がないシナリオと速度誤差があるシナリオ（-6~+6km/h）のそれぞれについて、速度変化と加速度の変化をグラフ化したものが図 47 である。誤差のないシナリオでは、通信エリア内（橙色の帯の範囲）でほぼ加減速をせずそのまま合流した結果、評価点は 92.1 点となっている。一方、誤差のあるシナリオでは、通信エリア内でわずかに加速している。動画を確認すると、後方から本線車が迫っており、加速することでその車両とより距離をとっている（図 48）。その結果として評価点が 100 点となり、わずかに評価点が向上している。

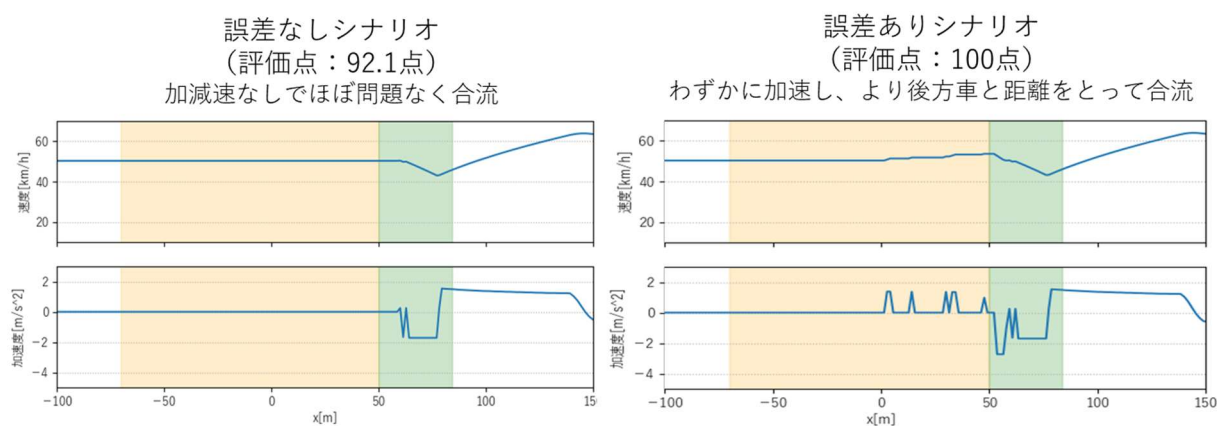


図 47. 車両 ID2498 の速度誤差がない場合とある場合の車両挙動



図 48. 車両 ID2498 の合流時の状況（誤差ありシナリオ）

このように、速度誤差がある場合のほうが結果的によい合流となる要因を説明したものが図 49 である。速度誤差がない場合は、後方に本線車がいるとき、合流車はその正確な位置を認識できているものと解釈できる。そのため、車間時間・相対速度を勘案して評価点が 100 点以上の状態

となっていれば、合流車は Day2 システムからの支援を受けても挙動の変化を行わない。ただ、いざ合流する瞬間に何らかの要因でわずかなズレが発生し、結果的に評価点が 100 点を下回ることがあり得る。一方、速度誤差がある場合は、後方の本線車の位置を認識する際、その位置が取得タイミングごとに揺れ動くものと解釈できる。そのため、たとえ合流車にとって本線後方車との正確な位置関係が評価点 100 点と認識されるべき場合であっても、本線後方車が近くにいと誤認した瞬間には車間が十分でないと判断し、加速することがあり得る。その結果、より車間に余裕を持つことができ、より確実に合流時の評価点が 100 点となる。

このように、速度誤差があるときに評価点が改善する要因としては、速度誤差があるがゆえに余分に車間をとろうとする挙動が発生するためだと考えられる。これも、情報の取得・行動変更の頻度が 100ms と十分短い周期でとられていることが大きく影響していると考えられ、より粗い周期に設定した場合には異なる挙動となる可能性がある。



図 49. 速度誤差があるとき評価点が改善する要因

4.2.2. 各システム条件についての組み合わせ分析

前項では、各システム条件についてそれぞれ個別に条件を変化させたとき、Day2 システムの効果に与える影響を分析した。本項では、各システム条件を組み合わせると同時に変化させたとき、Day2 システムの効果に与える影響を分析する。具体的には、理想状態から下記のシステム条件を変化させたときの Day2 システムの支援効果を分析する。

- ・ センシングエリア／通信エリアと情報提供遅延の組み合わせ
- ・ センシングエリア／通信エリアと配信情報誤差の組み合わせ
- ・ 情報提供遅延と配信情報誤差の組み合わせ
- ・ センシングエリア／通信エリア、情報提供遅延、配信情報誤差の組み合わせ

分析の観点としては、主に余裕のない合流（評価点 0 点未満）となった車両数に着目することとする。

まずは、センシングエリア／通信エリアと情報提供遅延の組み合わせについて分析を行った。実施シナリオは以下の 2×2 シナリオとした。

- ・ (センシングエリア, 通信エリア) : (140m, 60m) or (140m, 40m)
- ・ 情報提供遅延 : 平均 0.4s or 0.8s (標準偏差 0.2s)

なお、同時に軽微な配信情報誤差として、平均 0.14km/h、標準偏差 0.48km/h の速度誤差、 $\pm 1\text{m}$ （一様分布）の位置誤差を与えている。

結果を図 50 に示す。条件を個別に変化させたときに比べ、評価点が悪化している。とくに遅延が 0.8s のとき支援効果が大きく減少していることが分かる。

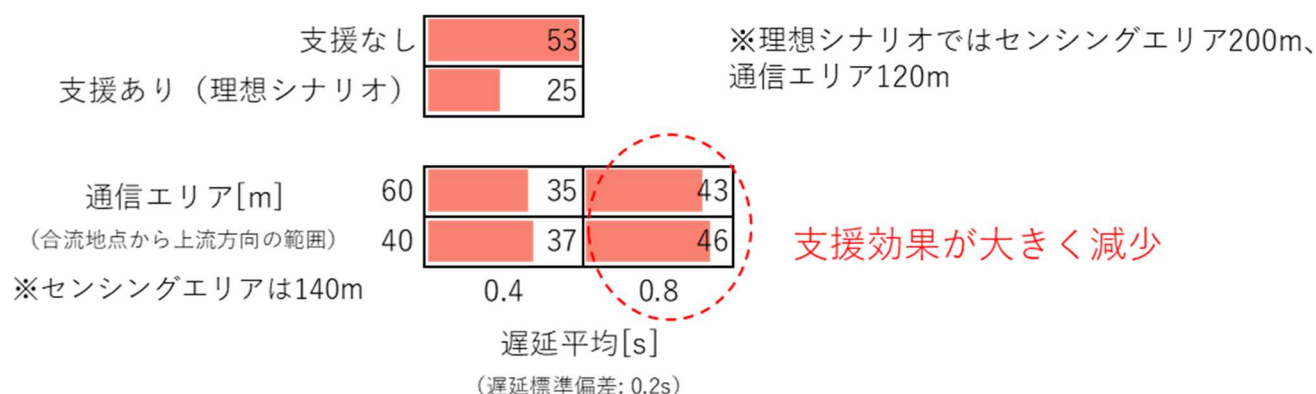


図 50. 余裕のない合流となった車両台数（センシングエリア／通信エリアと情報提供遅延の組み合わせ分析）

続いて、センシングエリア／通信エリアと配信情報誤差の組み合わせについて分析を行った。実施シナリオは以下の 4×3 シナリオとした。

- （センシングエリア，通信エリア）：(200m, 120m) or (180m, 100m) or (160m, 80m) or (140m, 60m)
- 速度の配信情報誤差：-6~+6km/h or -12~0km/h or -12~+12km/h（当該区間が 95%に入る正規分布）

同時に $\pm 1\text{m}$ （一様分布）の位置の配信情報誤差を与えている。

結果を図 51 に示す。センシングエリア／通信エリアが短くなるほど評価点が悪化していることや、負に偏った速度誤差を与えたとき、評価点の分布はやや悪化することが分かる。また、平均 0km/h の速度誤差を与えたとき、わずかに評価点が改善している。



図 51. 余裕のない合流となった車両台数（センシングエリア／通信エリアと配信情報誤差の組み合わせ分析）

続いて、情報提供遅延と配信情報誤差の組み合わせについて分析を行った。実施シナリオは以下の 2×3 シナリオとした。

- ・ 情報提供遅延：平均 0.4s or 0.8s（標準偏差 0.2s）
- ・ 速度の配信情報誤差：-6~+6km/h or -12~0km/h or -12~+12km/h（当該区間が 95%に入る正規分布）

同時に±1m（一様分布）の位置の配信情報誤差を与えている。

結果を図 52 に示す。負に偏った速度誤差を与えたとき、評価点の分布は悪化する。とくに遅延 0.8s、速度誤差 -12~0km/h のとき支援効果が大きく減少している。平均 0km/h の速度誤差を与えたときは評価点の分布は改善しており、とくに遅延が大きいとき改善幅が大きい。

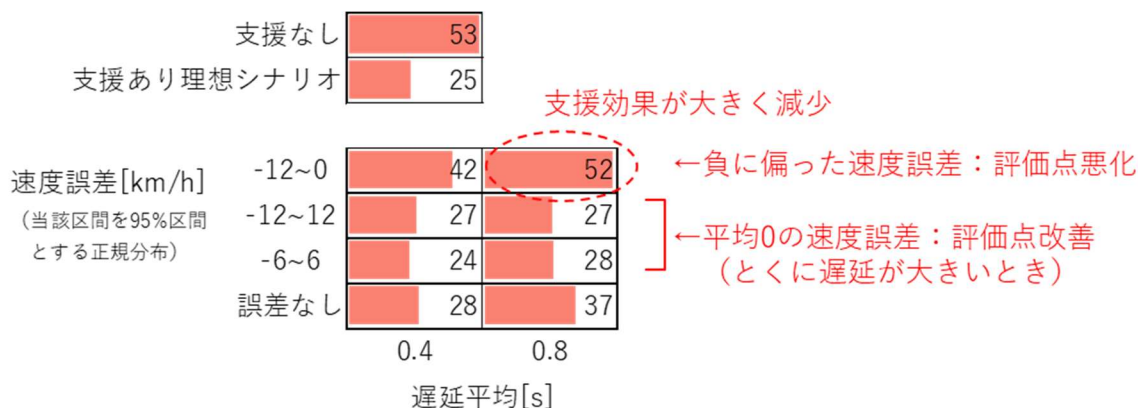


図 52. 余裕のない合流となった車両台数（情報提供遅延と配信情報誤差の組み合わせ分析）

最後に、センシングエリア／通信エリア、情報提供遅延、配信情報誤差の組み合わせについて分析を行った。実施シナリオは以下の 2×3 シナリオとした。

- ・ （センシングエリア，通信エリア，遅延）：(140m, 40m, 0.4s) or (140m, 60m, 0.8s)
- ・ 速度の配信情報誤差：-6~+6km/h, -12~0km/h, -12~+12km/h（当該区間が 95%に入る正規分布）

同時に±1m（一様分布）の位置の配信情報誤差を与えている。

結果を図 53 に示す。負に偏った速度誤差を与えたとき、評価点分布が悪化し支援効果が大きく減少している。平均 0 の速度誤差を与えたときは、遅延 0.8s のときのみ評価点が改善している。

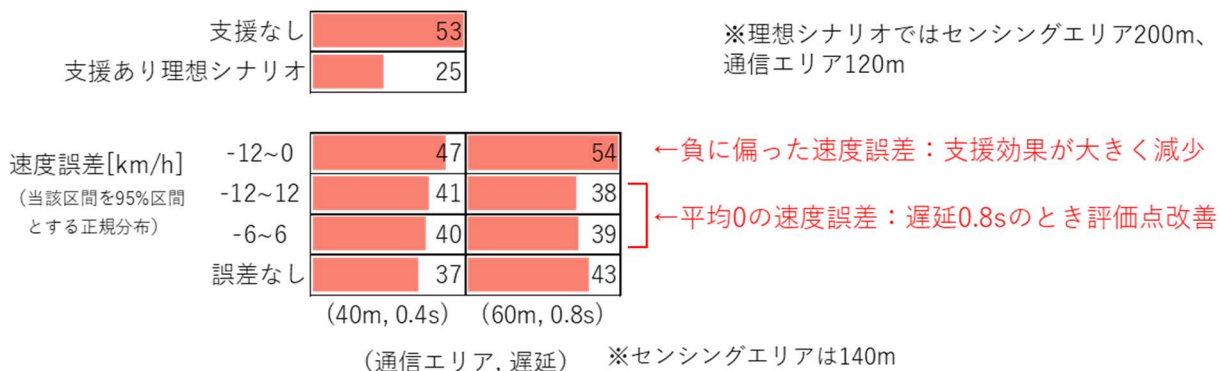


図 53. 余裕のない合流となった車両台数（センシングエリア／通信エリア、情報提供遅延、配信情報誤差の組み合わせ分析）

4.2.3.Day2 システムの許容可能な条件評価まとめ

4.2.1 節では、各システム条件についてそれぞれ個別に条件を変化させたとき、Day2 システムの効果に与える影響を分析し、以下の結果を得た。

- センシングエリアの長短による、支援効果に影響は見られなかった。なお、合流地点から上流方向に最大 200m~最小 140m の範囲で検証した結果であることに留意し、より小さい値に設定したときに影響が出る可能性は存在する。
- 通信エリアの長短は、短くなるほど支援効果が小さくなる。合流地点から上流方向に最大 120m~最小 40m の範囲で検証した結果、この範囲では支援効果を打ち消すには至らない。
- センサの情報提供遅延は、大きくなるほど支援効果が小さくなる。とくに遅延が 1.3s 程度になると支援の効果をほぼ打ち消す程度の影響となる。
- センサの配信情報誤差（位置）は、支援効果に影響を与えにくい。なお、 $\pm 1\text{m}$ の誤差分布を与えて検証した結果であることに留意する。
- センサの配信情報誤差（速度）は、誤差分布の偏りにより支援効果に与える影響が異なる。平均 0km/h の誤差分布であれば支援効果に大きな影響を与えず、条件によっては逆に合流を改善する場合もある。負に偏った誤差分布であれば支援効果が小さくなるが、 $-12\sim 0\text{km/h}$ 程度の誤差分布であれば支援効果を打ち消すには至らない。

4.2.2 節では、各システム条件を組み合わせると同時に変化させたとき、Day2 システムの効果に与える影響を分析した。4.2.1 節の結果と合わせ、Day2 システムの成立条件を図 54 のようにまとめた。ここではシステム成立の定義を、余裕のない合流となった車両が通常時から 20%以上減少することとしている。この定義は絶対的なものではなく、あくまで仮置きしたものである。このように定義したとき、システムが成立しない条件として以下が挙げられる。

- 情報提供遅延が 1.3s 以上のとき
- 情報提供遅延が 0.8s 以上かつ、速度の配信情報誤差が $-12\sim 0\text{km/h}$ を 95%区間とする正規分布よりも大きいとき
- 情報提供遅延が 0.8s 以上かつ、通信エリアの広さが合流地点から上流方向に 60m 以下のとき
- 情報提供遅延が 0.4s 以上かつ、通信エリアの広さが合流地点から上流方向に 40m 以下かつ、速度の配信情報誤差が速度の配信情報誤差が $-12\sim 0\text{km/h}$ を 95%信頼区間とする正規分布よりも大きいとき

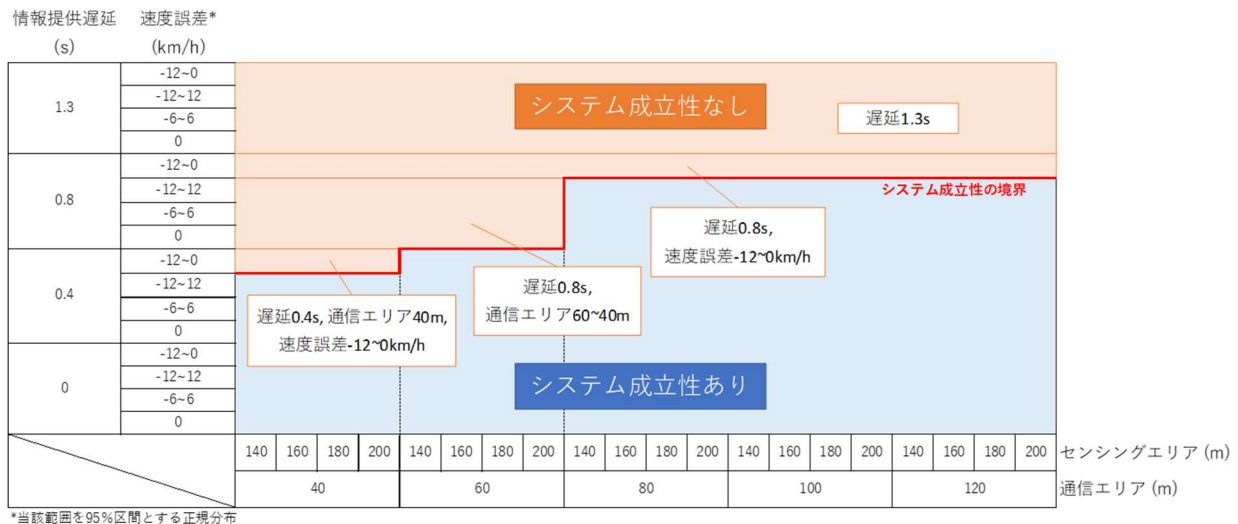


図 54. Day2 システムの成立条件

5. 今後の課題

今後の課題として、以下の4点が挙げられる。

1. 評価点の考え方の再整理
2. 本線上流部の車両挙動の再現性を向上したうえでの評価
3. 飽和交通時の評価
4. Day3 システムコンセプト検証

1点目は、評価点の考え方の再整理である。本分析ではDay2システムによる支援効果の評価にあたり、2章で示した合流挙動の良否の指標としての評価点を用いた。しかしながら、この評価点はいくまでも仮評価のために設定したものである。4.1.3項で示したように、この評価点で「余裕のない合流」と分類された車両の中には直感的には安全な合流をしていると考えられる車両が存在しており、評価の直感的な納得性という意味でも課題が存在している。評価点の考え方を再整理し、学術的妥当性を含めて検証していくことが今後の課題となる。

2点目は、本線上流部の車両挙動の再現性を向上したうえでの評価である。Day2システムによる成立性を確認するためには、合流エリアにおける挙動のみならず、本線上流部における本線車両の挙動が反映されたシミュレーションモデルを採用することが望ましいが、本分析では、本線上流部の交通流はシミュレータのデフォルトの挙動を採用している。この部分について改めて実交通のログデータを取得し、走行挙動の再現を行ったモデルを構築したうえでDay2システム成立性の検討を行うことで、評価の信頼性を高めることができる。

3点目は、飽和交通時に着目した評価である。本分析では実際の交通データから通常走行時間帯を抽出し、その全体の交通流についての評価を行っているため、Day2システムによる支援効果が特に期待される本線の交通流が密である状態の評価は一部にとどまっている。本線の交通流が密な時間帯（飽和交通時）の交通流に着目してシミュレーションを行うことで、そのような交通状況におけるDay2システムの効果を評価する。

4 点目は、Day3 システムのコンセプト検証である。本分析では、合流車だけに情報提供支援を行う Day2 システムを対象としていた。一方、Day3 システムでは本線車に対しても情報提供と協調支援を行うことで、Day2 システムでは支援できない交通状況に対しても支援が可能となることが期待される。Day3 システムを表現するシミュレーションを行うことで、その効果を検証する。

6. 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, 交通工学論文集 第 8 巻 第 1 号 pp.39-48, 2022.
- [2] 中川 敏正, 関谷 浩孝, 中田 諒, 花守 輝明, 藤村 亮太: 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, 交通工学論文集 第 8 巻 第 1 号 pp.49-58, 2022.

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。