

NTTデータ数理システム学生研究奨励賞

社会実装に向けた遅延率と優先状況に基づく 適応的・確率的な交通信号制御

東海大学 情報理工学部
コンピュータ応用工学科 中村研究室
川崎勝紀

研究背景

現在、日本では交通渋滞による経済と環境への悪影響が深刻なものとなっている。

経済損失・配送能力の低下・雇用損失

CO2排出・CO2排出量増加



関連研究

様々な先行研究により交通最適化での交通渋滞・その悪影響を緩和ができることを示唆。

しかし、導入時・運用時・悪影響と社会実装への課題が多い…



本研究の目的

本研究では既存手法の改善を行い、その手法の性質・制約を用いた

遅延率と優先状況に基づく適応的・確率的な交通信号制御

を提案する。

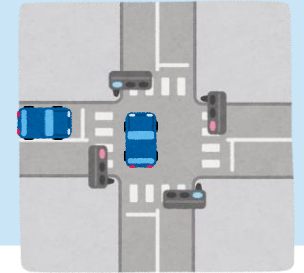


既存手法の改善・評価

- ① 高度な通信技術が必要
- ② 交通ネットワークに混乱を招く

- ① 一方向の送信のみ
- ② 優先権の拒否

優先したいけどできない
優先権の干渉



提案手法の適用・評価

- ③ ハイパーパラメータがある
→ 結果が調整の精度に依存

確率的な
優先権の付与

問題の性質のみで
安定した好成績



結論

本手法だけでは、
適切に設定された閾値を用いた手法ほどには
良い交通最適化にはならなかった

この手法の改善には、
よりマップの現状状況の把握
・正確な確率モデルの構築が必要

1. 研究背景

2. 関連研究と本研究の位置づけ

3. 先行研究の手法

4. 既存手法の改善と評価

5. 提案手法とその評価

6. 結論

1. 研究背景

現在、日本は交通渋滞による経済と環境への悪影響は深刻なものになっている。

経済



全国での年間渋滞損失は約38.1億人時間、貨幣価値換算すると約12兆円にも上る [1]

2024年4月から施行された「働き方改革関連法」による労働時間・残業時間の制限強化
→ トラック運転者の稼働時間減少による全国の配送能力の低下 (2024年問題) [2]

SDGs目標 8. 働きがいも経済成長も [3], 9. 産業と技術革新の基盤をつくろう [4],
11. 住み続けられるまちづくりを [5] に向けての経済施策 [6][7]

環境



2022年の運輸部門（自動車、船舶等）のCO2排出量19,180万トン [8]

交通渋滞が原因となるCO2排出量の増加 [9]

SDGs目標13. 気候変動に具体的な対策を [10] に向けてCO2排出量削減施策 [11]

出典：国連広報センター, https://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/sdgs_logo/

1. 研究背景

交通渋滞の経済と環境への悪影響は[交通流の改善・車両スループット向上](#)による軽減が可能。

経済

- | | |
|----|---|
| 研究 | Hartgen [12] :
複数の都市の経済データと交通データを用いて渋滞とGDP成長・雇用創出の関係を分析
→ 渋滞を緩和することで地域ごとに6~30%の地域総生産(GRP)の向上を期待 |
| 実例 | 沖縄TDM施策 [6][7] :
公共交通機関の整備, 自転車・ライドシェアの促進などTDM(交通需要管理) [13] を実施
→ 物流コストの削減, 生産性向上, 観光・自転車産業の発展 |

環境

- | | |
|----|---|
| 研究 | Barth and Boriboonsomsin [14] :
実際の交通データと燃料消費データを用いて, 渋滞によるCO2排出への影響を評価
→ 公共交通機関・交通管理技術が交通流の改善・CO2排出量の減少に寄与 |
| 実例 | ETCの普及 [11] :
ETCの導入により交通渋滞の緩和, 約220万トンのCO2排出量の削減が見込まれる |

1. 研究背景

問題



現在の日本は交通渋滞による

悪影響が深刻化…

- (経) 経済損失, 配達能力低下, 雇用成長の抑制
- (環) CO2排出量の増加

解決



交通流の円滑化を促す施策で

渋滞による悪影響が緩和

- (経) 沖縄TDM施策: 物流コスト削減・地域活性化
- (環) ETCの普及: CO2排出量の削減

この問題を解決するカギは…

- ・ 解決事例では交通流を円滑化することによる渋滞による悪影響の改善・緩和を行った
- ・ 論文によって交通流を円滑化ことが(a)経済・(b)環境に対して好影響を及ぼすことを示唆
 - (経) Hartgen: 渋滞の改善による地域総生産(GRP)の向上
 - (環) Barth, Boriboonsomsin: 公共交通機関・交通管理機関によるCO2削減

交通流の改善・車両スループットの向上による渋滞の緩和

⇒ 交通最適化 を用いた改善



1. 研究背景

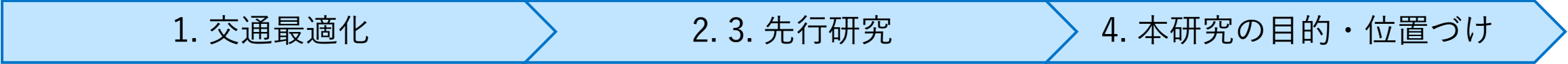


2. 関連研究と本研究の位置づけ

1. 交通最適化

2. 3. 先行研究

4. 本研究の目的・位置づけ



3. 先行研究の手法



4. 既存手法の改善と評価



5. 提案手法とその評価



6. 結論



2. 1. 交通最適化

交通最適化 [15][16]

都市や道路ネットワークでの交通流を効率よく管理・調整をする技術・手法の総称。

現実世界のデータを収集し、予測・適切な施策の設計・行動変容を促す ⇒ 渋滞・混雑の解消 [15]

目的

交通流の円滑化

- ・車両がスムーズに移動できるように
- ・渋滞、停滞を減らす

移動時間の短縮に

安全性の向上

- ・道路や交差点での混雑を減らす
- ・不規則な交通を減らす

交通事故のリスク↓

環境への配慮

- ・燃料消費を抑えて、CO2排出量の削減
- ・交通による騒音の減少

環境負荷↓

本研究の目的

2024年問題 [2] の解決に向け、
交通最適化を用いて配送車(その他、公共交通機関・行政車両)の移動をスムーズに

2. 1. 交通最適化

交通最適化の分野では、大きく分けて動的経路案内 (DRG) と 交通信号制御 (TSC) に関する研究が行われている [17].

動的経路案内 (Dynamic Route Guidance - DRG)

リアルタイムでの交通データを用いて最適な経路を提案、混雑の緩和や交通流の最適化を目的とするシステム [18]

⇒ 各車両に対する最適化を行うことで、交通網全体の問題改善を行う

交通信号制御 (Traffic Signal Control - TSC)

交通流の管理と最適化を目的とし、信号機のタイミングを調整することで、混雑を緩和し全体的な交通の効率を向上させる手法 [19]

⇒ 交通網全体に対して最適化を行い、各車両にはその恩恵を与える

本研究では交通網全体を考慮して最適化を行いたい

⇒ 交通信号制御を用いて交通流の改善・車両スループットの向上を行う

2. 2. 交通信号制御に関する先行研究

Hanら [20]

問題・目標 信号交差点での公共交通機関（バス）の交通効率の向上と一般車両への影響の軽減

解決手法 複数の交差点でのトランジット信号優先(TSP) [21] を効率的に機能させるため、3段階（①バスの交通効率の最大化、②バスの待ち時間の最小化、③一般車両への影響の最小化）での信号スケジュール最適化モデルの提案.

- ・ 現在の状況への臨機応変な対応ができない(例：秦野市台風10号の被害 [22] による渋滞)

Kimら [23]

問題・目標 交通流の改善・交通渋滞の緩和による交通効率・安全性の向上

解決手法 ITS (高度道路交通システム) [24] であるカメラやセンサ [25] を用いたリアルタイムで計測された交通状況に基づく優先度指標(研究にて提案)を用いた交通信号制御の手法提案.

- ・ 全ての道路への導入が難しく汎用性に乏しい

どちらの研究も 対象の道路・交差点に適した手法

2.3. 対象の道路・交差点を持たない先行研究

特定の道路・交差点を対象としない先行研究を以下に示す。

新川・河野 [26]

問題・目標 交通信号制御による交通渋滞を改善。それによるCO2排出量を削減

解決手法 佐藤ら [27] の優先権制御（優先権を持った車両が交通信号制御において優遇される；後述にて詳細を説明）を「大型車両も優先権の付与の対象・大型車両の多く通るレーンも付与条件に追加」の2点を改良した手法の提案。

横関 [28]

問題・目標 配送車の配送速度の向上・安定化

解決手法 佐藤ら [27] の優先権制御を配送車を対象に遅延率（現在における各車両の遅延具合の指標；後述にて詳細を説明）を優先度指標として条件である閾値に基づいて優先権の付与・剥奪を行うよう改良した手法の提案。

- [高度な通信技術を持つ自動運転車両が必要](#)
- [全体的な交通状況が考慮できず、交通ネットワークに対して混乱を引き起こす可能性がある](#)
- [ハイパーパラメータの調整が必須](#)

2. 4. 本研究の目的・位置づけ

先行研究の課題

交通信号制御 (TSC)

Han [20], Kim [23]

- ① トランジット信号優先やカメラ, センサなどの高度な通信制御システムが必要

新川・河野 [26], 佐藤ら [27], 横関 [28]

- ② 高度な通信技術を持つ自動運転車両が必要
- ③ 全体的な交通状況が考慮できず, 交通ネットワークに混乱を引き起こす可能性
- ④ ハイパーパラメータの調整が必須

社会実装のために解決すべき課題

解決のアイデア

①・②：導入時

高度な情報通信技術を必要としない
一方向の送信 (4. 1.)

③：悪影響

一時的に優先権を使用しない
優先権の拒否 (4. 2.)

④：運用時

ハイパーパラメータに依存しない
確率的な優先権の付与 (5. 1.)

2. 4. 本研究の目的・位置づけ

先行研究の課題

- ① 高度な通信制御システムが必要
- ② 高度な通信技術を持つ自動運転車両が必要
- ③ 交通ネットワークに混乱を引き起こす可能性
- ④ ハイパーパラメータの調整が必須

解決のアイデア

- ①・②：一方向の送信のみを必要とした処理
- ③：混乱を避けるための優先権の拒否できる時間
- ④：パラメータに依存しない
確率的な優先権の付与

解決のアイデアを用いてより良い交通最適化を

本研究の目的

信号機同士の間隔を共有し、交通ネットワーク全体のリアルタイムの交通状況を取得・考慮した
ハイパーパラメータの調整に対応・汎用性の高い手法



本研究では、横関 [28] の手法を基にその手法の性質・制約を用いた

遅延率と優先状況に基づく適応的・確率的な交通信号制御

を提案する



1. 研究背景



2. 関連研究と本研究の位置づけ



3. 先行研究の手法

1. 優先権制御 (佐藤ら[27])

2. 遅延率 (横関[28])

4. 既存手法の改善と評価



5. 提案手法とその評価



6. 結論



3. 1. 優先権制御

Green Wave [29]

幹線道路に並んでいる信号機の青信号になるタイミングを車の走行速度を考慮してずらすことで、車が信号機を連続して通過できるシステム

- ⇒ Green Waveの出口付近や対向車線で渋滞が発生しやすい
佐藤ら [27] は動的に必要な箇所に必要な時だけGreen Waveを発生させることを思案



優先権制御：佐藤ら [27]

優先権を持った車両が信号機に近づくと青信号に切り替わるシステム。



- ⇒ 車両が優先権を持つ間、その車両に対して疑似的なGreen Waveが発生

3. 2. 遅延率

横関 [28] は2024年問題 [2] の解決に向けて配送車の効率的な運送・配送能力の向上を目的とした。

優先権付与条件 (佐藤ら[27])

各信号機に並んでいる信号待ち車両数を基に、最も並んでいる車列の自動運転車に対して優先権を付与。

この手法では大幅に遅れが生じている車が適切に優先されない可能性
⇒ 遅延状況を定量的に評価できる指標が必要



遅延率 (横関[28])

各配送車の状況によって算出された最短稼働時間 t_{best} と出発地から現在地までにかかった実際稼働時間 t_{cur} から求められる値。(次ページにて説明)

対象の配送車の遅延状況を定量的に評価できる指標。

これに基づいて各配送車に対して優先権の操作を行う

3. 2. 遅延率

遅延率 (横関[28])

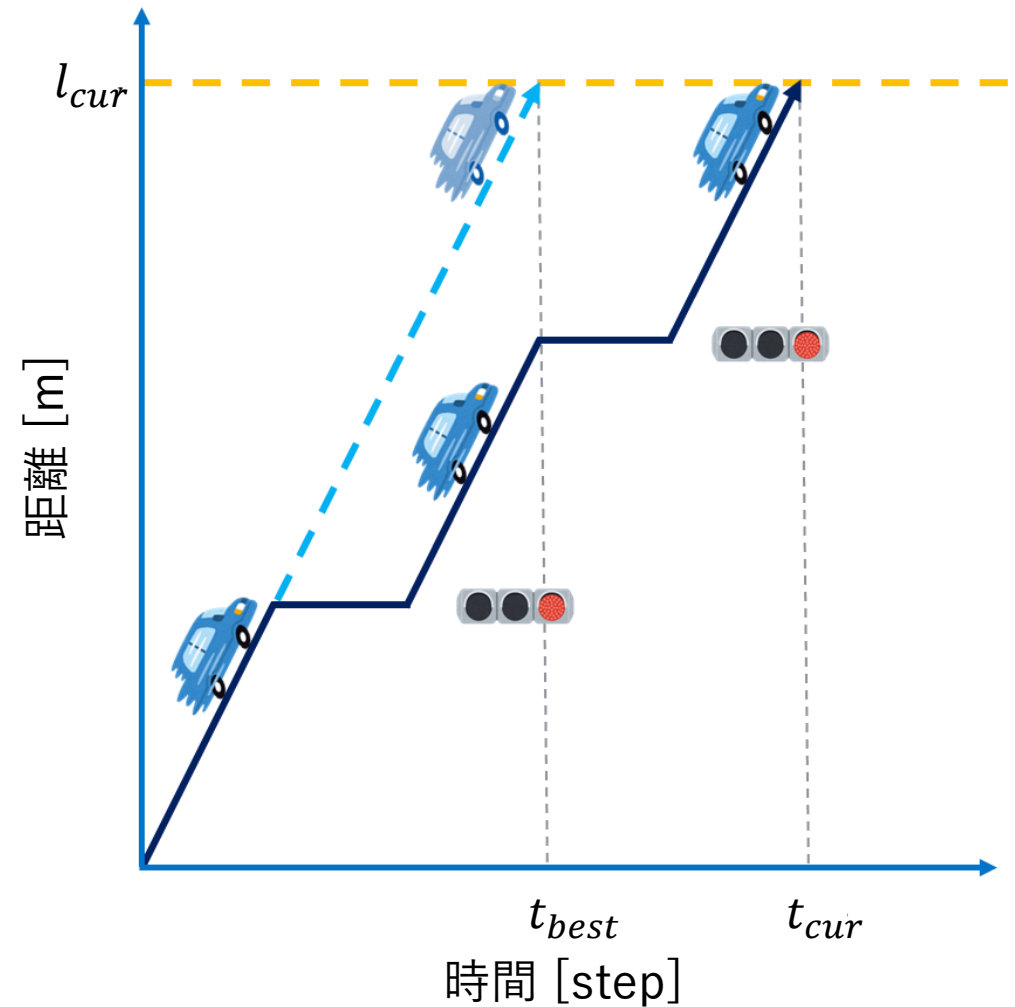
遅延率 λ は以下のように求める.

$$\lambda = \frac{t_{cur} - t_{best}}{t_{best}} \quad (1)$$

ここで, $t_{best} = \frac{l_{cur}}{v_{max}}$ である.

λ	: 遅延率
t_{cur}	: 実際稼働時間
t_{best}	: 最短稼働時間
l_{cur}	: 実際走行距離
v_{max}	: 車両最高速度

l_{cur} は稼働中に計測し続ける, v_{max} はパラメータとして与えられているものとする.



3. 2. 遅延率

横関 [28] は「配送効率の向上」と「一般車両への影響の最小化」にはトレードオフの関係があると考えた。

配送車に対して常に優先権を付与する場合、最も早く目的地に到着できる
⇒ 全体的な交通流に悪影響を及ぼす恐れ

- ①遅延率が高い配送車に対して優先権を付与
- ②優先権により遅延率が下がった問題がない状態なら優先権を剥奪

これを2つの閾値を設けて再現

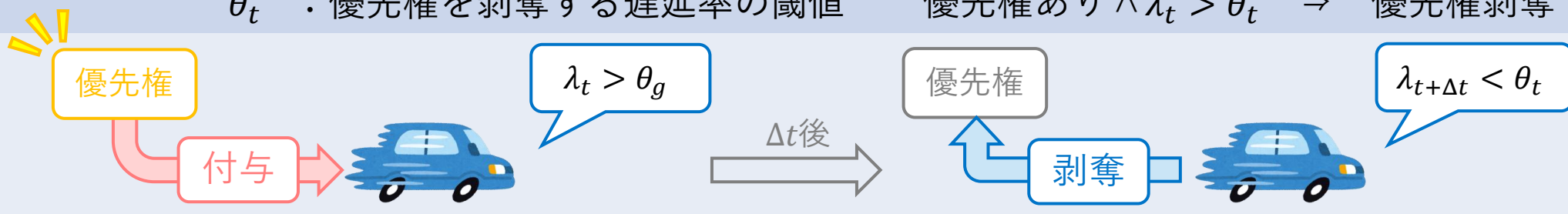
遅延率に対する優先権付与・剥奪の閾値 (横関[28])

θ_g : 優先権を付与する遅延率の閾値

優先権なし $\wedge \lambda_t > \theta_g \Rightarrow$ 優先権付与

θ_t : 優先権を剥奪する遅延率の閾値

優先権あり $\wedge \lambda_t > \theta_t \Rightarrow$ 優先権剥奪



1. 研究背景



2. 関連研究と本研究の位置づけ



3. 先行研究の手法



4. 既存手法の改善と評価

1. 優先権制御 (一方向の送信)

2. 優先権の拒否

3. 改善された手法の評価

5. 提案手法とその評価



6. 結論



4. 既存手法の改善と評価

本セクションでは、①・②の課題に対しての解決アイデアを適用とその評価をする。

先行研究の課題

佐藤ら, 新川・河野, 横関 [26][27][28]
社会実装のために解決すべき課題

① 高度な通信技術を持つ
自動運転車両が必要

② 全体的な交通状況が考慮できず,
交通ネットワークに混乱を引き起こす

③ ハイパーパラメータの調整が必須

解決のアイデア

①: 導入時

高度な情報通信技術を必要としない
一方向の送信 (4. 1.)

②: 悪影響

一時的に優先権を使用しない
優先権の拒否 (4. 2.)

③: 運用時

ハイパーパラメータに依存しない
確率的な優先権の付与 (5. 1.)

4. 1. 優先権制御（一方向の送信）

本研究における関連研究 [26][27][28] からの変更点を以下に示す。

優先権制御を用いた関連研究 [26][27][28]

関連研究 [26][27][28] では以下のような通信方式の実現が前提となっている。

優先車両 → 信号機 : 優先権の保有状況・通行状況の情報を送信

信号機 → 優先車両 : 優先権の付与・剥奪の情報を送信

優先車両 ↔ 信号機間の双方通信が可能なのが前提

⇒ 各優先車両に対して高い情報通信技術が求められる

導入・普及のハードルが低い

社会実装に向けた導入時問題の解決

PTPS [30] のデバイスを参考に、優先車両から信号機への一方向の送信だけを前提とする。

優先車両 → 信号機 : 通行状況(走行距離, 稼働時間 or 稼働開始時刻)の情報を送信

信号機 : 優先車両から与えられた情報を基に遅延率を算出
遅延率を用いて判断し, 青信号に切り替える(以下, 優先権の行使)

4. 2. 優先権の拒否

現実世界では、優先権が行使された交差点は優先車両と同じ車列にいる一般車両が通れるだけの青信号である時間が一定時間必要である。

⇒ 信号の切り替わりがあまりにも激しく、交通流が混乱するのを避けられる

社会実装のための制約

本研究では、社会実装に向けて以下のような制約を設ける。

優先権の拒否

優先車両によって優先権が行使された交差点は、一定時間の優先権を申請を拒否する時間を設ける。
(以下、一定拒否時間)

制約による新たな現象

優先権の干渉

一定拒否時間内である交差点に対して新たな優先車両が優先権の申請を試みた場合、その申請が拒否され優先権を行使できない状態

⇒ 最も優先したい車両に対しても優先権が行使できない = 遅延率が下がらない

4. 3. 改善された手法の評価実験：実験 1

実験目的

横関 [28] では、社会実装への課題が解決されていない

課題・解決アイデア

- ① 高度な通信技術を持つ車両が必要
→ (4. 1.) 一方向の送信のみの処理
- ② 交通ネットワークに混乱を招く
→ (4. 2.) 優先権の拒否

考えられる影響

(4. 2.) 優先権の拒否
優先権の拒否によって優先をしたいが
できない時間が生まれる
優先権の干渉 = 遅延率の減少抑制

解決のアイデアを適用した際の影響に興味がある

横関 [28] の手法に対して社会実装への課題を解決アイデアを適用した場合、
優先権の干渉による影響はあるのか・その影響で遅延率の減少が抑制されるのか
を検証したい。

4.3.1. マルチエージェントシミュレーション

本研究では一般車両・優先車両の相互作用を考慮するために、[マルチエージェントシミュレーション](#)を用いる。

Multi Agent Simulation – MAS

複数 (マルチ) のエージェント (人や生物など) に同時進行的に各々のルールをもと、お互いに干渉(相互作用)を受けながら実行させるシミュレーション(仮想実験) [31]

[相互に影響する複数のエージェントによる集団現象を再現するための手法](#) [32]

これを用いることにより、複雑な社会現象を説明するモデルの構築・そのメカニズムや性質を理解して振る舞いの予測が可能に [33]

⇒ [イベントにおける人の流れを予測したスムーズな誘導策の計画](#)
[市街地などのインフラ整備に寄与](#)

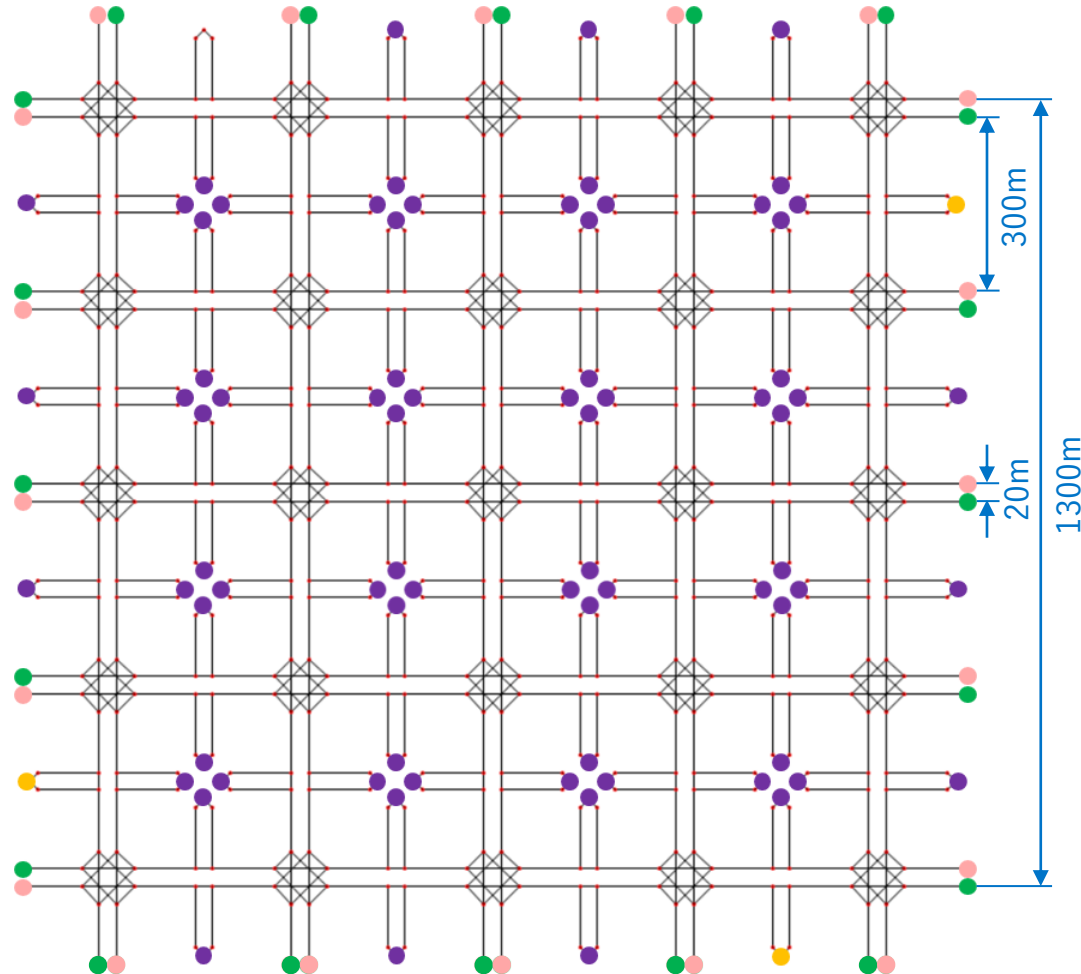
本研究では、MASソフトウェアをS4 (エスクワトロ) を用いる。

S⁴ Simulation System (エスクワトロ) [34]

現実世界をコンピュータ上にモデリングし、様々なビジネス課題や社会課題に対して、施策の効果の検証や効率化を図るための汎用シミュレーションパッケージ

4.3.2. 実験環境

本研究では，以下のような碁盤の目状のマップを対象マップとする。



図の丸印は以下を示す。

ノードカラー	役割	対象車両
● (緑)	流入ノード(出発地点)	一般車両
● (赤)	流出ノード(到着地点)	一般車両
● (紫)	配送候補地(経由地点)	優先車両
● (黄)	デポ(出発・到着地点)	優先車両

信号サイクルタイムを以下に示す。(単位：step)

	● (緑) : 緑	● (黄) : 黄	● (赤) : 赤
通常時	65	5	70
優先時	20	5	25

初期設定はすべての交差点が縦方向が青信号

※ 優先後は優先前の残り時間は考慮せずリセットされる

4. 3. 2. 実験環境★

車両モデル情報を以下に示す。

車種	最高速度	半径	エッジ人口密度上限	生成頻度	行動パターン
一般車両	11.111 [m/s] ≒ 40 [km/h]	2.2 [m]	0.01 [台/m ²]	30	① 流入ノードから生成, 出発 ② 流出ノードに到着次第, 削除
優先車両				120	① デポから生成, 出発 ② 5つの配送先に配達する 配達の際には20step停止する ③ デポに戻り稼働終了, 削除

本研究の車両モデルのパラメータは生成頻度以外はNTTデータ数理システムからのサンプルプログラム[35]に基づく。
エッジ人口密度上限は最低車間距離に関するパラメータである(本研究では速度計算にエッジ密度モデル[36]を用いる)。
生成頻度はエージェント生成のパラメータであり, それぞれの値を平均とした指数分布に従い各エージェントは生成される。
本研究での生成頻度の設定は「優先権なし」時に「混雑度(一般車両数)」を維持できる程度とする。

車両のルート選択手法を以下に示す。

一般車両・優先車両ともに直近のルート選択には, `sfmAgentBase.selectNextNode(G, p = None)` [36]を用いている。ルート選択には信号待ち時間の考慮はせず, 距離のみでの選択を行う。

優先車両はランダムな5つの経由地点(配達先)を持つ。この経由地点はランダムに選択されるため, 経由地点の通過する順番を [Ant Colony Optimization – ACO](#) [37] を用いて出発してから稼働終了までの距離を最短になるよう決定している。

4. 3. 2. 実験環境

実験環境を以下に示す。

OS	: Windows 10 Home
CPU	: Intel(R) Core(TM) i5-1035G1 CPU @ 1.00GHz 1.19GHz
メモリ	: 8.00 GB
ソフトウェア	: S4 Simulation System Version 6.4.0 [34] Python 3.12.5 [38]

特殊なグラフ作成を行うため、グラフ作成はPythonを用いる。



4.3.3. 実験1：実験設計

実験1

混雑度・優先車両割合を組み合わせた複数の混雑状況パターンを用いて閾値 θ を変更し実行評価指標「平均遅延率」と「平均信号待ち時間」への影響を調査する。

実験の試行回数は一般車両・優先車両の台数問わず100回ずつ行う

混雑状況パターン

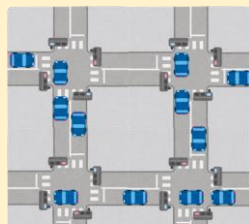
● パターン作成



混雑



通常



閑散

※実際の実行画面は付録に示す

パラメータ	変域(ステップ)
混雑度(一般車両数)	{50, 100, 150} [台]
優先車両割合	{5, 10} [%] (切捨)

※優先車両数は上乗せ

閾値 θ

● 変更・実行

変域	優先権
$+\infty$	なし
100 90 └ 20 10	$\lambda_t^{(i)} > \theta$ の場合に 行使
$-\infty$	常時

評価指標

● 調査・評価

平均遅延率

優先車両の稼働終了時の遅延率の平均

値が小さいほど良好

平均信号待ち時間

一般車両が到着するまでの信号待ち時間の平均

値が小さいほど良好

4.3.3. 実験1：実験設計

評価指標

本研究における評価指標を以下に示す。

平均遅延率（優先車両）

優先権制御による優先車両に対する影響を考慮するための評価指標（横関[28]）。

各優先車両の稼働が終了した際の遅延率（最終遅延率）の平均を表す。

以下の式によってこの評価指標は求められる。

$$\lambda_{AVG} = \frac{t_{sum} - t_{best}}{t_{best}}$$

この時、 $t_{best} = \frac{l_{sum}}{v_{max}}$ である。

t_{sum} は全優先車両の総稼働時間、 l_{sum} は全優先車両の総走行距離を示す。

平均信号待ち時間（一般車両）

優先権制御による一般車両に対する影響を考慮するための評価指標（用いた研究[39][40]）。

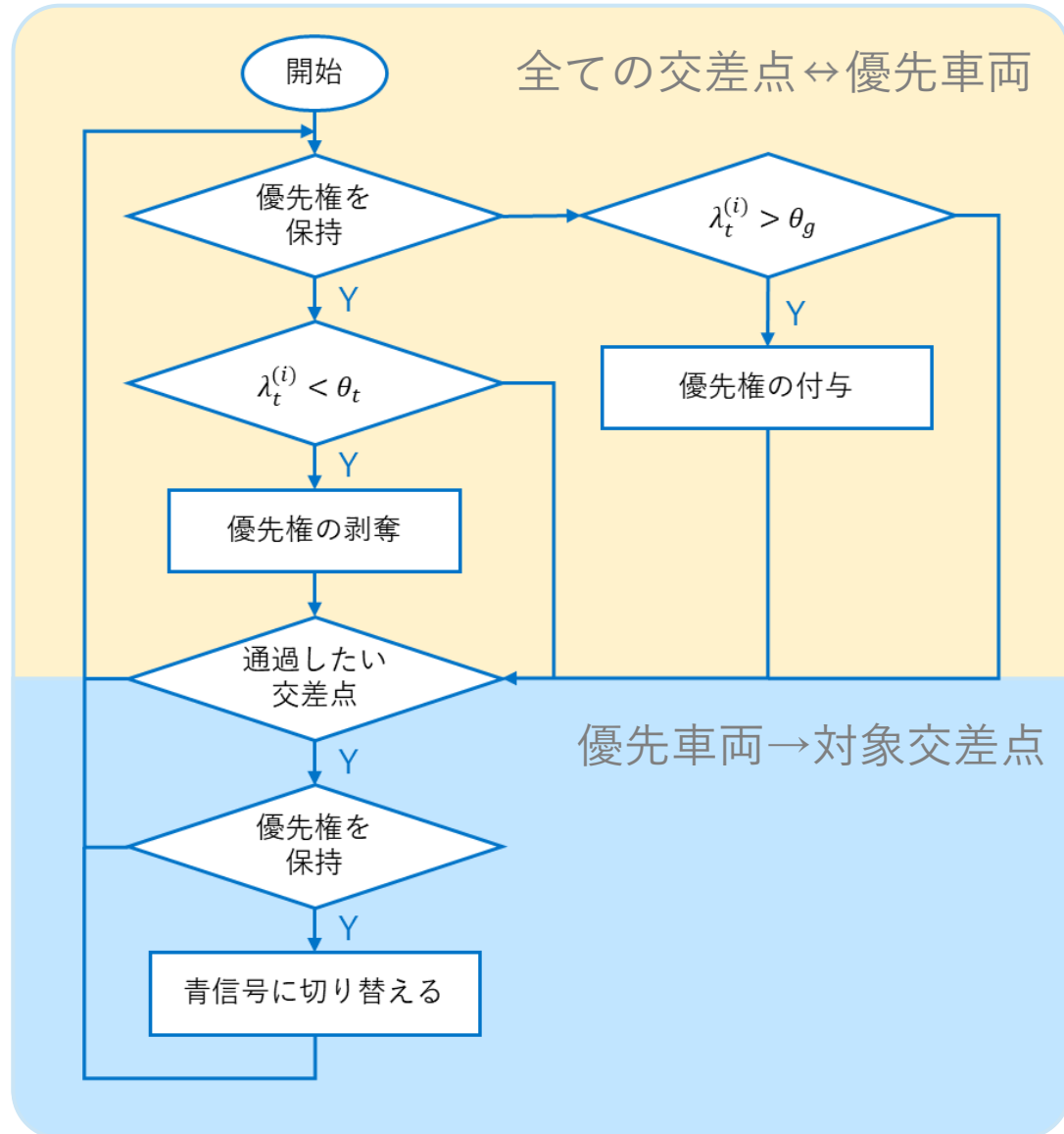
各一般車両が出発してから到着するまでの間に赤信号により待たされた時間の平均を示す。

信号待ち時間は優先権行使の操作関係なく、

単純な信号切り替えによる信号待ち時間
優先権行使による切り替えでの信号待ち時間

どちらでも信号待ち時間として加算される。

4.3.3. 実験1：実験設計



先行研究

先行研究 [26][27][28] での優先権の付与・剥奪に関するフローチャートである。(例：横関 [28])

本研究の前提・本研究の提案手法
を再現するために変更が必須

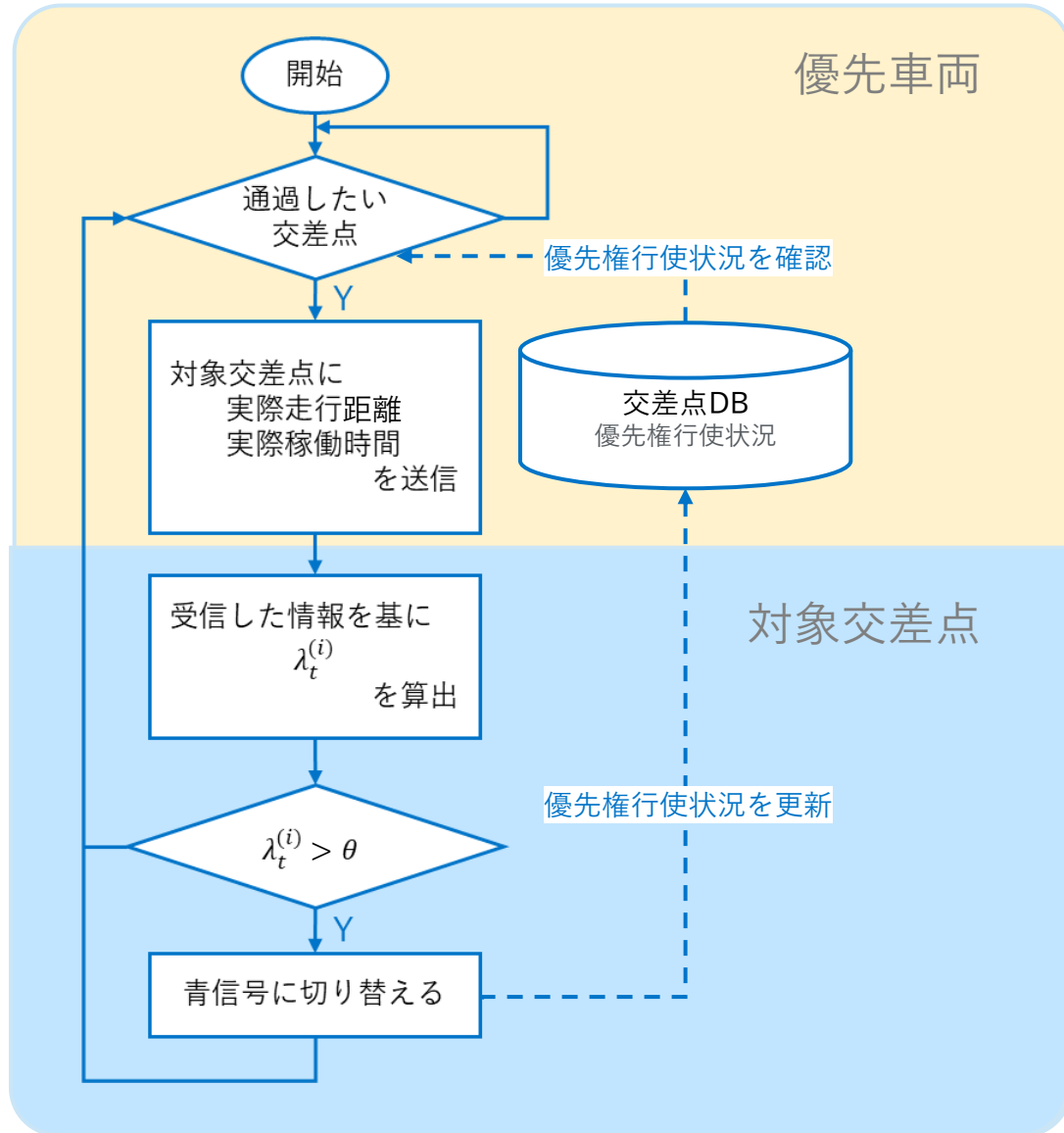
変更

本研究での前提：

- ・ 優先車から対象交差点への一方的な送信のみ
→ 優先権の付与・剥奪から優先権の行使に
- ・ 優先権を用いた交差点は一定時間、操作を拒否
→ 優先権の拒否

次ページにて変更

4.3.3. 実験1：実験設計



本研究

本研究の提案手法における

「優先権の行使」・「優先権の拒否」
を再現するために変更を加えたものである。

閾値の設定の変更

横関 [28] : 閾値 θ_g, θ_t

本研究 : 閾値 θ

→ 優先権の行使を再現

交差点データベース(DB)の導入

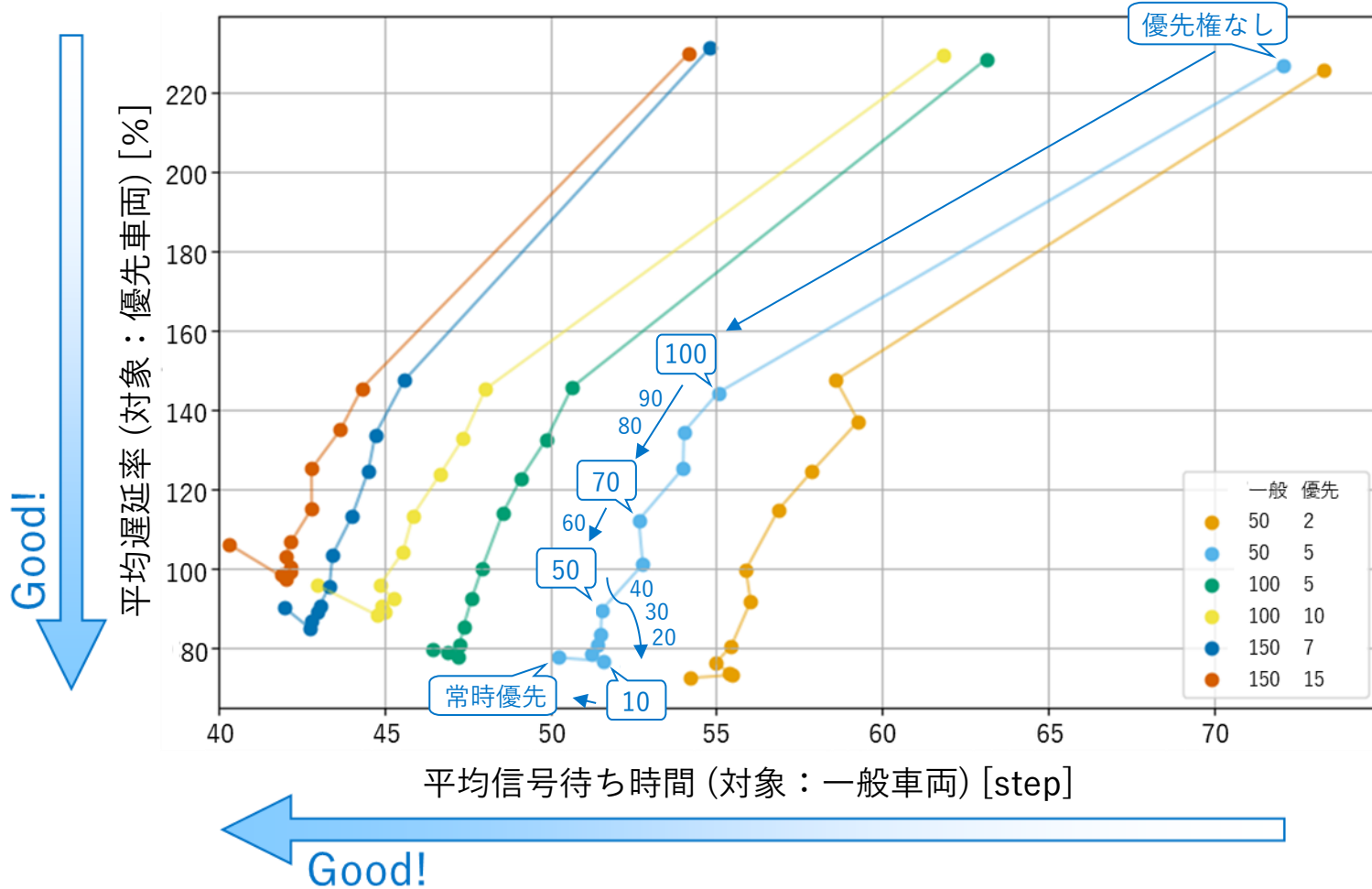
優先権行使時刻を更新することで、一定拒否
時間内は優先車両からの受信を拒否できる。

→ 優先権の拒否の再現

⇒ 優先権に関する操作を簡易化が可能

4.3.4. 実験1：実験結果

実験結果のグラフを以下に示す。



グラフの見方

散布図

混雑状況パターンごとに閾値を変更した変化を表す。

散布図の上端から

inf, 100, 90, ..., 20, 10, -inf

と閾値を緩和させている。

優先車両割合

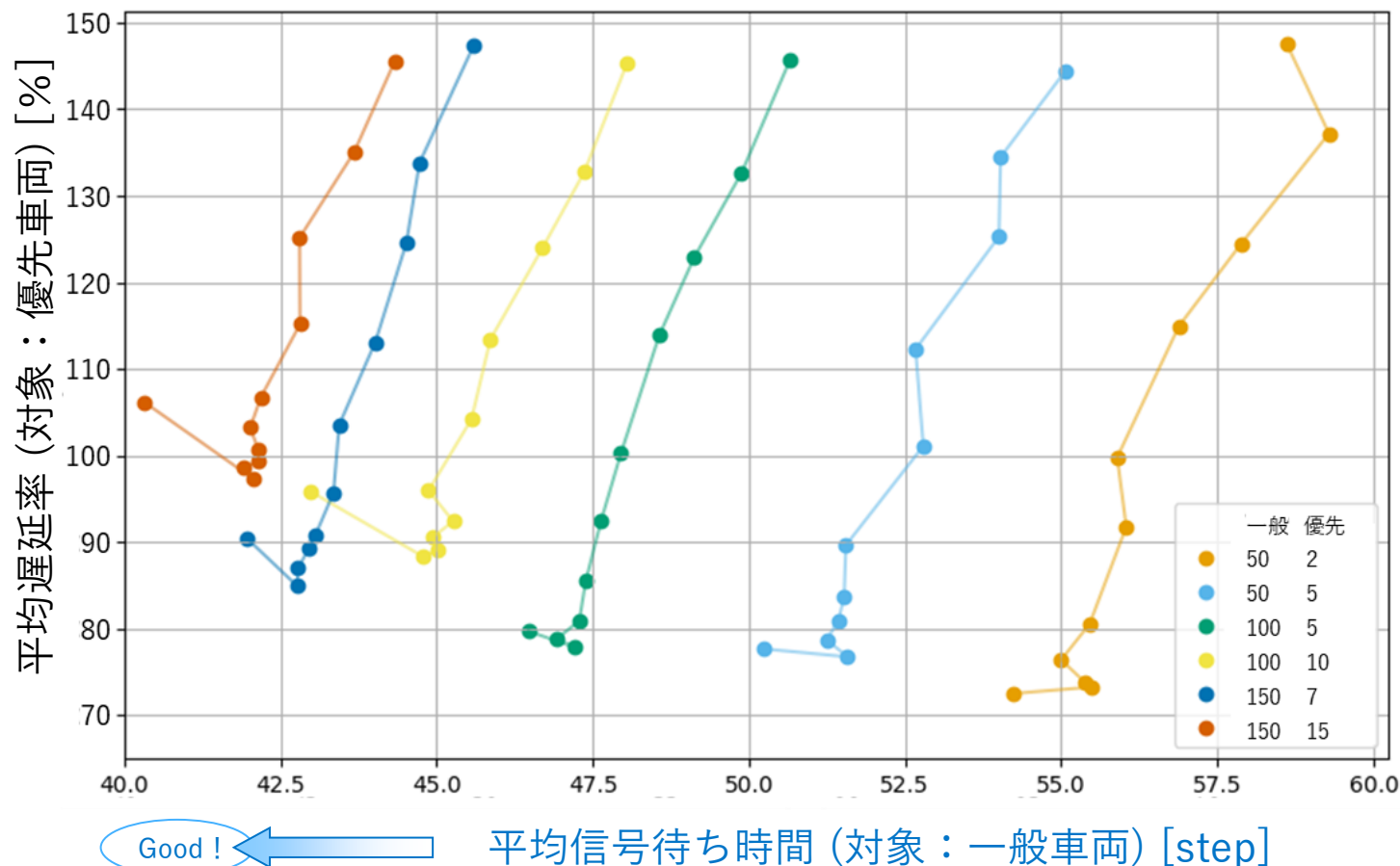
理解の促進のため、

レジェンドは優先車両割合から優先車両数へと置換している。

4.3.4. 実験1：実験結果

平均信号待ち時間による影響について着目して調査する。

※ グラフの比較を容易にするためにinf(優先権なし)は非表示



平均信号待ち時間

一般車両数・優先車両数

- ・一般車両が増える
→ 平均信号待ち時間 (減)
- ・優先車両数が増える
→ 平均信号待ち時間 (減)

増加

車両数の増加が寄与

閾値(優先権行使の条件)

- ・どのパターンにおいても
閾値を緩和する毎に平均遅延率 (減)

緩和

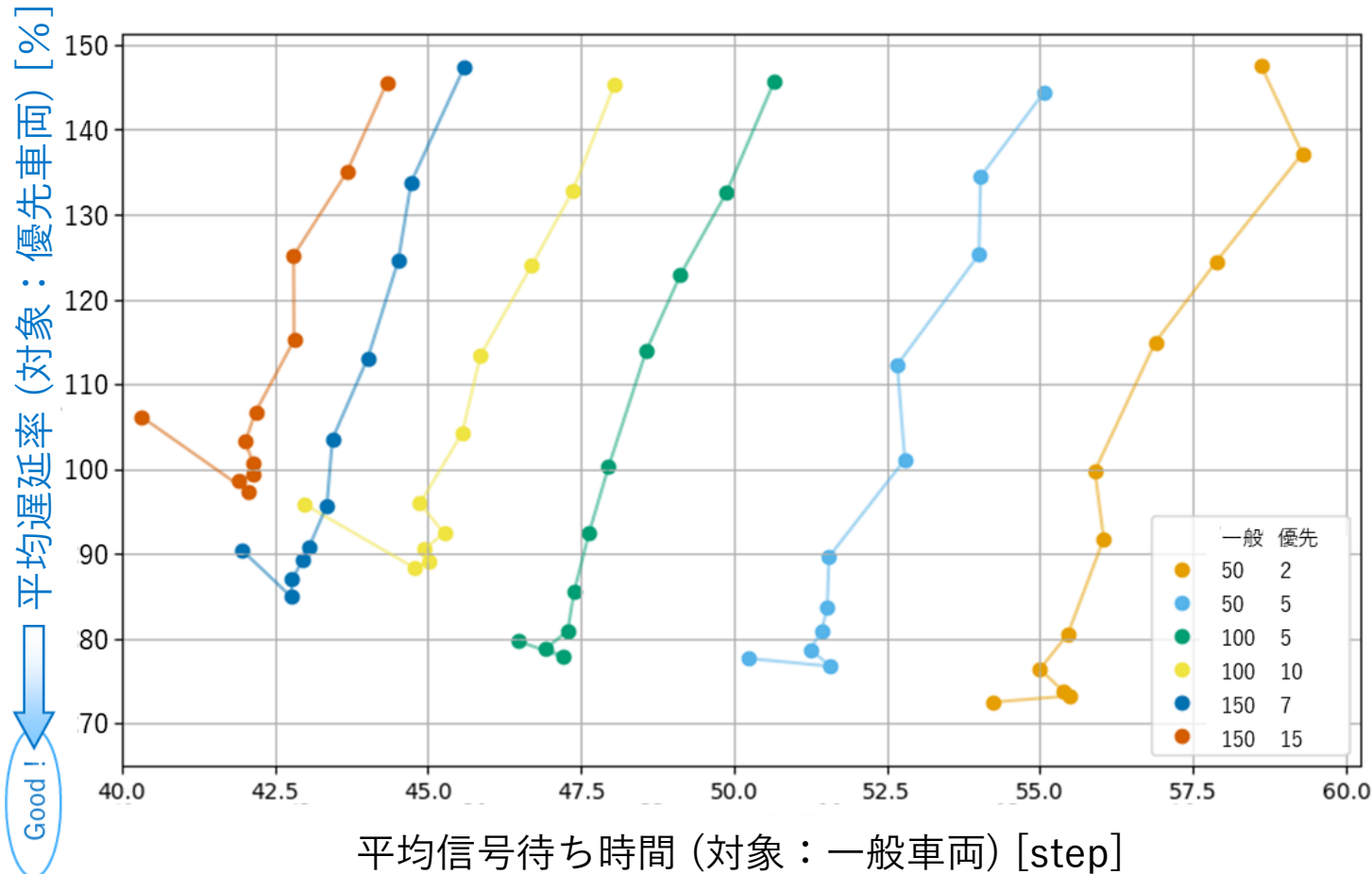
閾値 -inf (常時優先) が
最も効果的

閾値の緩和が寄与

4.3.4. 実験1：実験結果

平均遅延率による影響について着目して調査する。

※ グラフの比較を容易にするためにinf(優先権なし)は非表示



平均遅延率

閾値(優先権行使の条件)

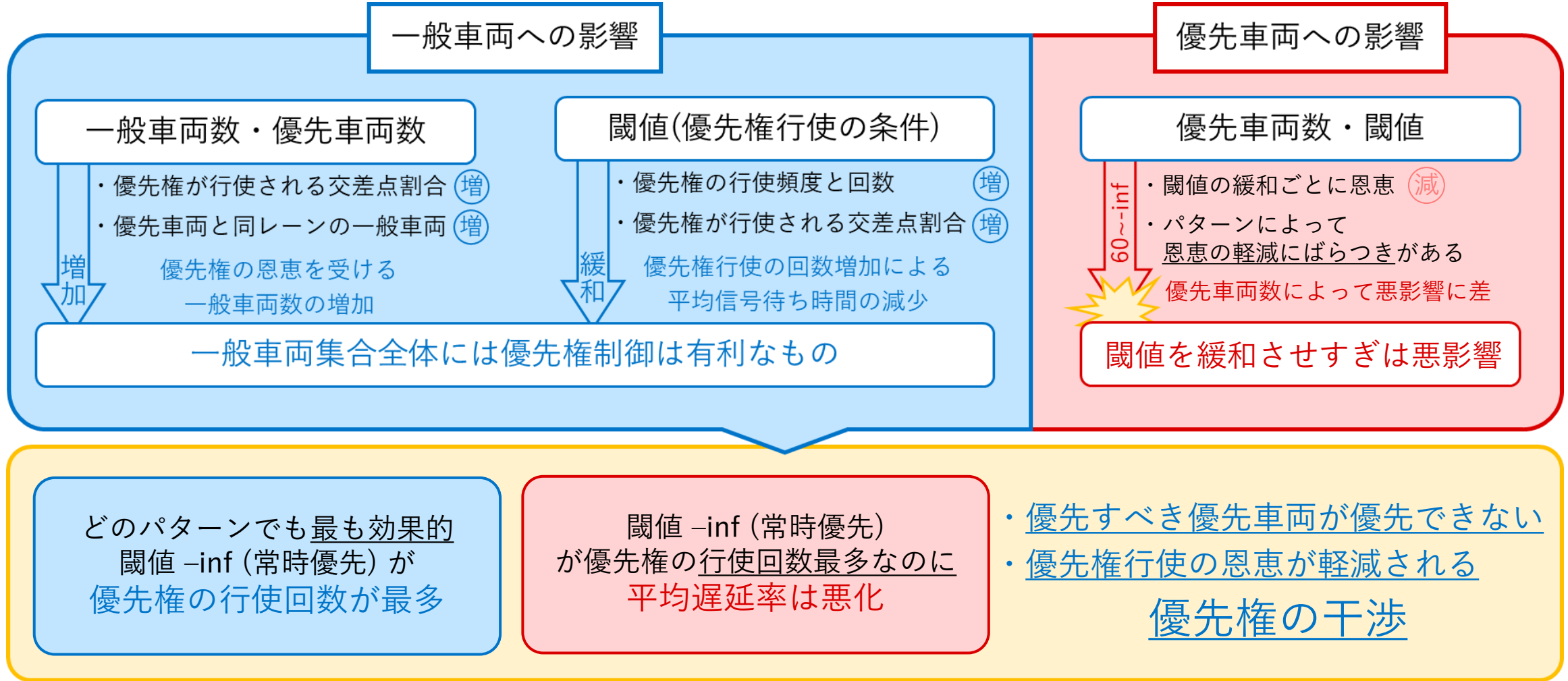
- ・ 閾値100~60の緩和はパターン問わず平均遅延率の減少が見られる
- 一般車両数・優先車両数問わず
閾値の緩和は効果的

平均遅延率減少

- ・ 閾値60~は優先車両数の増加ごとに
→ 平均遅延率の下がり幅 (減)
- 平均遅延率減少の下限 (増)
- 優先車両数が増加するごとに
閾値を緩和する恩恵が軽度になる
- 閾値 -inf (常時優先) が顕著

平均遅延率減少が滞る

4.3.5. 実験1：実験考察



⇒ 同方向上に連なって走る緊急車両(警察・消防・救急)は閾値 -inf (常時優先) でも影響なし

1. 研究背景

2. 関連研究と本研究の位置づけ

3. 先行研究の手法

4. 既存手法の改善と評価

5. 提案手法とその評価

1. 提案手法

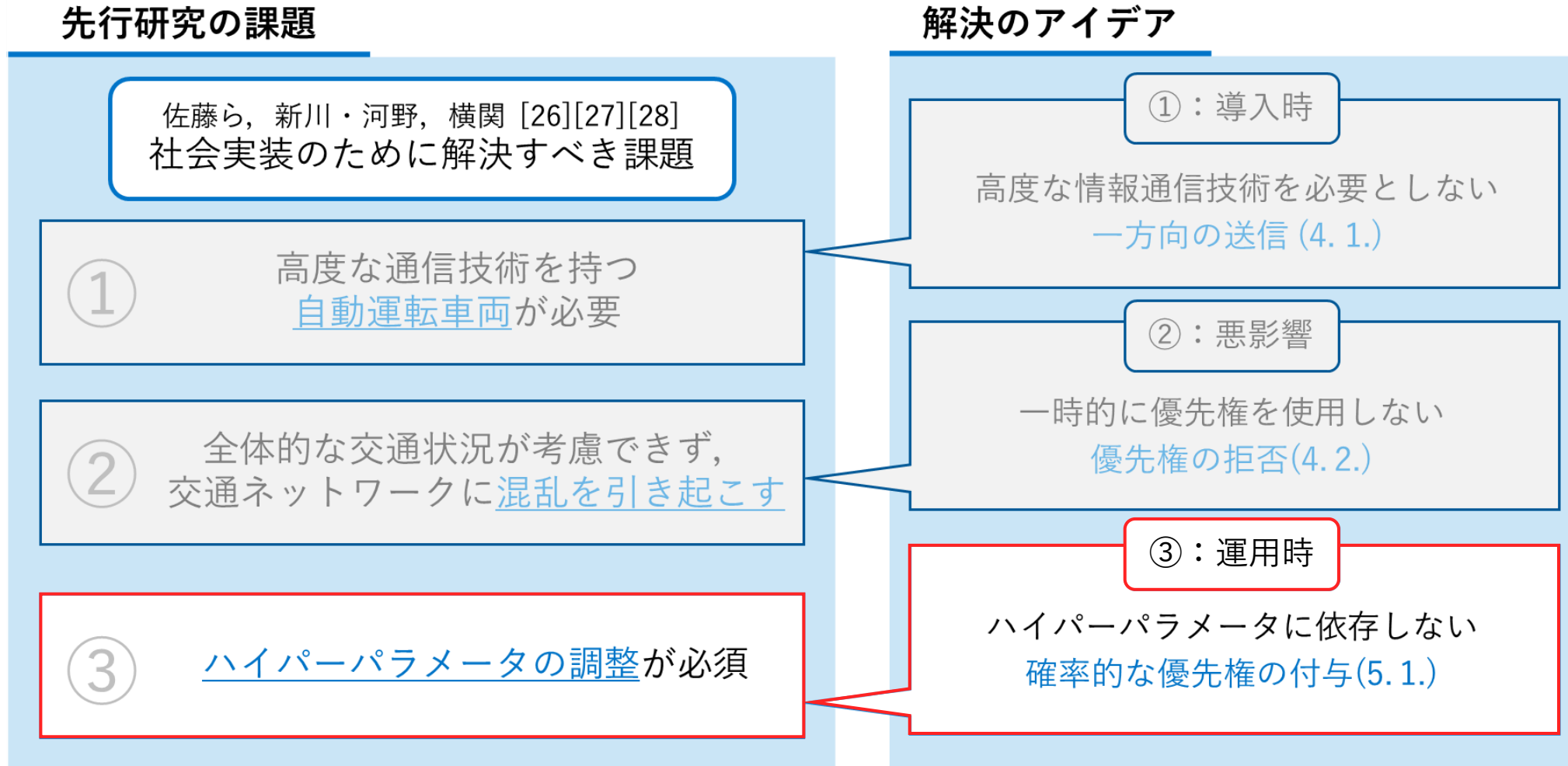
2. 提案手法の位置づけ

3. 提案手法の評価

6. 結論

5. 提案手法とその評価

本セクションでは、③の課題に対しての解決アイデアを適用とその評価をする。



5. 1. 提案手法

干渉の原因

優先権の干渉は優先車両の活動範囲である対象マップに対して、優先権の行使が過剰に行われた場合に、起こる可能性が高くなる。

⇒ 一定期間における優先権の行使回数の上限が存在する

優先権の行使回数が定まるのならば…

その限度まで優先権の行使回数を最大化

優先度の高い(遅延率の高い)優先車両を相対的に優先権の行使回数を増やす

⇒ 優先権を最大限に活用

提案手法

本研究では、「遅延率の高い優先車両を優先的に優先権が行使できる・優先権の干渉を起こさず優先権の行使回数を最大化」を理想とし、

遅延率と優先権の利用状況(優先状況)に基づいた確率的な優先権の行使

を提案する。

5. 1. 提案手法

優先権受諾確率 $P_{accept}^{(i)}$

優先車両集合 I において遅延率に基づく各優先車両の優先度の評価手法として遅延率の合計からの割合が考えられる。それを参考に優先車両 i の優先権受諾確率 $P_{accept}^{(i)}$ を求めると以下のとおりである。

$$P_{accept}^{(i)} = \frac{\lambda_i}{\sum_{j \in I} \lambda_j} (i \in I) \quad (2)$$

⇒ 優先車両数が増えるほど受諾確率が大きく減少する・遅延率が大きくても確率が低い

優先車両集合 I の大きさに依存をしない・遅延率の大きい優先車両をより優先権を行使できる条件手法として以下の $P_{accept}^{(i)}$ を提案する。

$$P_{accept}^{(i)} = \frac{\lambda_i}{\max_{j \in I}(\lambda_j)} (i \in I) \quad (3)$$

⇒ 優先車両集合 I 内の最大遅延率 $\max_{j \in I}(\lambda_j)$ なので優先車両集合 I の大きさに依存しない
遅延率が最も大きい優先車両は確率 1で優先権が行使される

5. 1. 提案手法

優先権拒否確率 $P_{reject}^{(i)}$

優先権受諾確率 $P_{accept}^{(i)}$ だけでは、現在の交差点 N 箇所における優先権が行使され一定拒否時間中の交差点の割合は考慮されていない。

⇒ 遅延率が小さい優先車両も優先権を行使しても問題がない可能性がある

優先権の行使回数の猶予を示す評価指標が必要

優先権の行使による交差点の一定拒否時間内に優先権の行使が $n - 1$ 回行われた場合、次の n 回目の優先権申請が拒否される(その交差点が一定拒否時間内である)優先権拒否確率 $P_{reject}^{(n)}$ は以下のように示せる。

$$P_{reject}^{(n)} = 1 - \prod_{i=1}^{n-1} \frac{N - (i + 1)}{N - i} \quad (4)$$

この式を n 回目について着目すると

$$P_{reject}^{(n)} = 1 - \frac{N - n}{N} = \frac{n}{N} \quad (5)$$

この値が高いほど一定拒否時間中の交差点の割合が高いため、優先権の行使を控えるべきである

5. 1. 提案手法

優先権行使確率 $P^{(i,n)}$ と優先権の行使条件式

上記に示した優先権受諾確率 $P_{accept}^{(i)}$ と優先権拒否確率 $P_{reject}^{(n)}$ を用いた優先権行使確率 $P^{(i,n)}$ と乱数 $rand$ を比較し、その結果に基づいて優先権を行使するかを判断する。

⇒ 優先権受諾確率 $P_{accept}^{(i)}$ が高いほど優先車両 i は優先度が高い

優先権拒否確率 $P_{reject}^{(n)}$ が低いほど対象マップにおいて優先権行使回数の猶予がある

これを考慮して優先車両 i の優先権行使確率 $P^{(i,n)}$ を以下に示す。

$$P^{(i,n)} = \frac{P_{accept}^{(i)}}{P_{reject}^{(n)}} = \frac{\lambda_i \times N}{\max_{j \in I}(\lambda_j) \times n} \quad (6)$$

優先権行使確率 $P^{(i,n)}$ と乱数 $rand$ を用いた優先権の行使条件式を以下に示す

$if rand < P^{(i,n)}$ then 優先車両 i の申請先交差点の優先権を行使

ここで $rand$ は区間 $[0, 1]$ の一様乱数とする。

5. 2. 提案手法の位置づけ

以下に先行研究との手法の比較を示す。

優先権制御手法	優先権付与条件	優先権剥奪条件
新川・河野 [26]	一定時間ごとに <ul style="list-style-type: none"> ・ <u>最も信号待ち車列の長い車列</u> ・ <u>大型車両が多く通るレーン</u> の優先車両に対して優先権を付与	優先権を付与されてから <u>任意の一定時間後</u> に優先権を剥奪
横関 [28]	優先権を保有していないときに $\lambda_t^{(i)} > \theta_g$ の優先車両 i に優先権を付与	優先権を保有しているときに $\lambda_t^{(i)} < \theta_t$ の優先車両 i に優先権を剥奪
本研究	通過したい交差点に対して優先権の申請 $rand < \frac{\lambda_i \times N}{\max_{j \in I}(\lambda_j) \times n}$ を満たしたとき、対象交差点のみ優先権を付与(優先権の行使)	

5. 3. 提案手法の評価実験：実験 2

実験目的

優先権の干渉により平均遅延率の減少抑制

課題・解決アイデア

③ ハイパーパラメータの調整が必要
→ (5. 1.)
遅延率と優先状況に基づいた
適応的・確率的な交通信号制御

用いるメリット

ハイパーパラメータを一つも用いない
マップ全体の運用状況に基づいて適応的
な判断ができる

評価

提案手法が上手く効くのかに興味がある

実験 1 で用いられた横関 [28] の手法と本研究の提案手法とで比較をし、

本研究の提案手法は優先権制御において汎用性が高く・適応的なアプローチである

ことを実証したい。

5.3.1. 実験2：実験設計

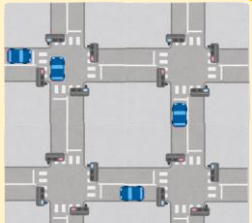
実験2

実験1同様に、複数の混雑パターンを用いて本研究の提案手法の実行評価指標に基づいて実験1と比較・評価，様々なグラフを用いて多角的に優先権制御自体の評価

実験の試行回数は一般車両・優先車両の台数問わず100回ずつ行う

混雑状況パターン

● パターン作成



混雑



通常



閑散

※実際の実行画面は付録に示す

パラメータ	変域(ステップ)
混雑度(一般車両数)	{50, 100, 150} [台]
優先車両割合	{5, 10} [%] (切捨)

※優先車両数は上乗せ

評価指標

● 調査

平均遅延率

優先車両の稼働終了時の遅延率の平均

値が小さいほど良好

平均信号待ち時間

一般車両が到着するまでの信号待ち時間の平均

値が小さいほど良好

比較・評価

● 比較・評価

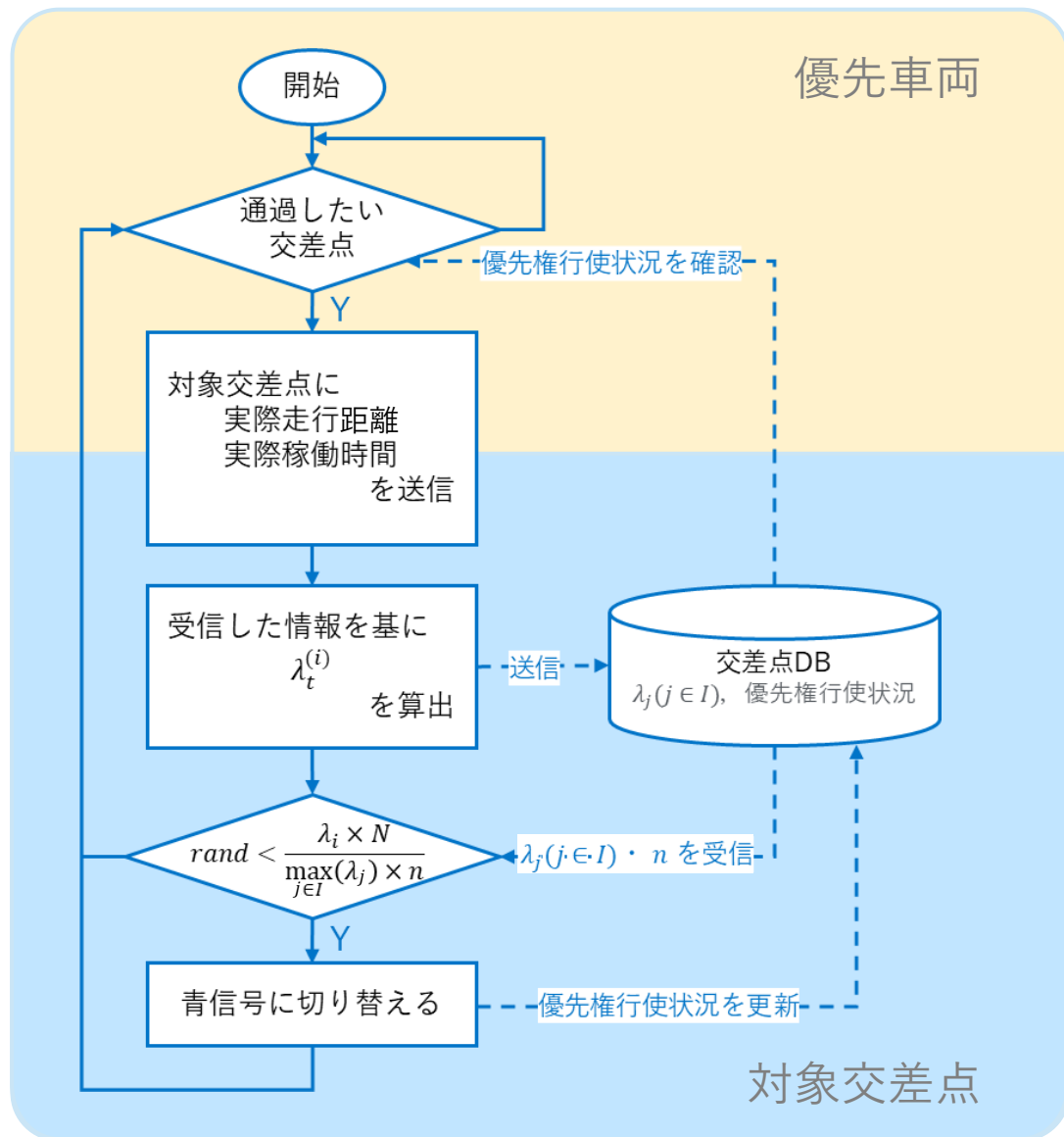
先行研究との比較

実験1の結果と比較，閾値・確率比較結果を基に評価

シード値を固定

一つの混雑状況に着目，実験1, 2, 優先権なしを多角的に比較し評価

5.3.1. 実験2：実験設計



提案手法

実験1 で用いた手法に対して、
遅延率と優先状況に基づく
適応的・確率的な交通信号制御
を行えるように変更を加えたものである。

交差点データベース(DB)

各優先車両の申請時の遅延率と優先権行使状況の二つの情報を共有する

優先権の行使条件

優先権の行使条件を交差点データベースの情報を用いて演算を行う。

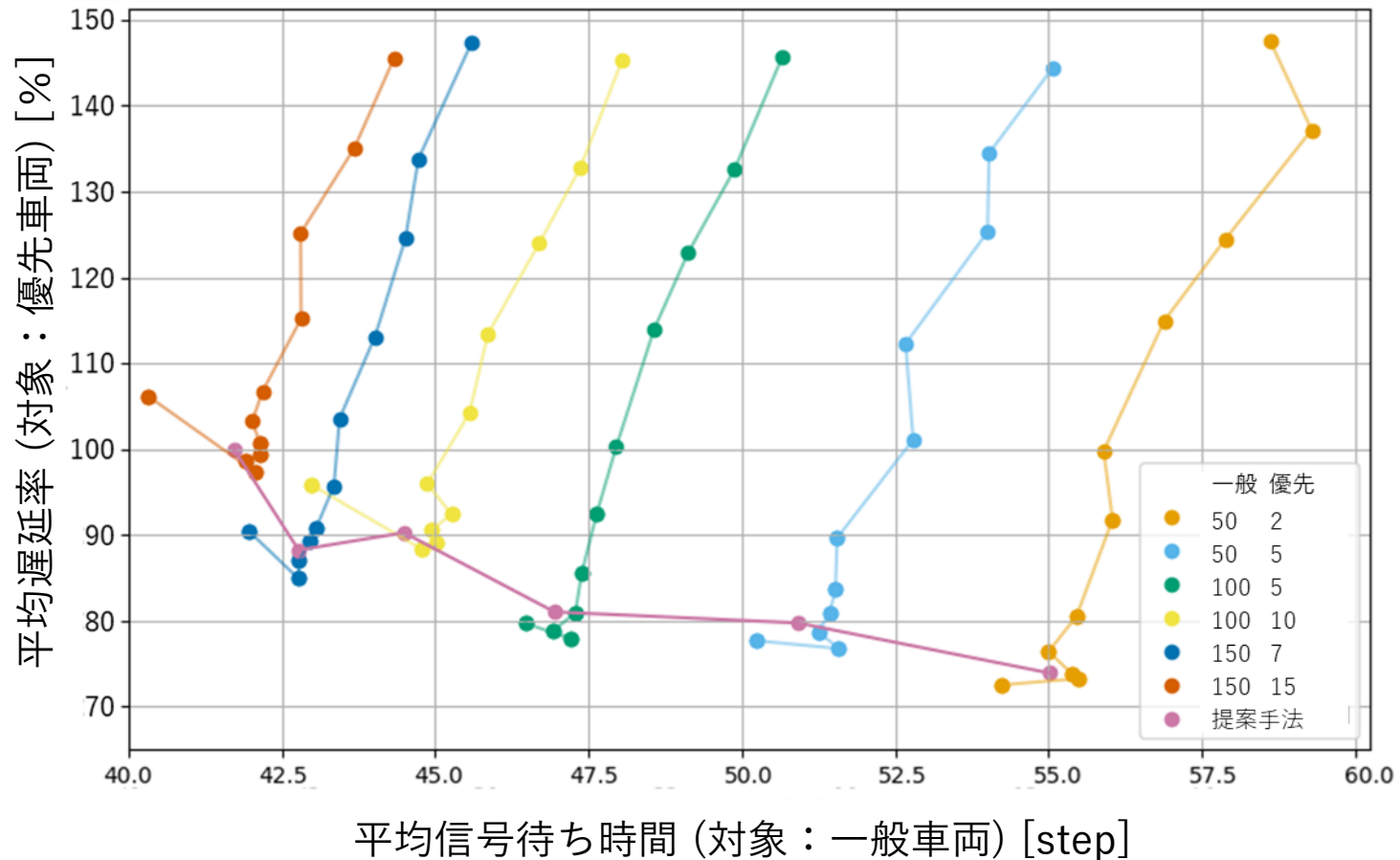
DBに情報を共有，マップ全体の現在情報を用いることで
効果

ハイパーパラメータに依存しない
より適応的な判断が可能に

5.3.2. 実験2：実験結果

実験1の結果と比較し、評価する。

※ グラフの比較を容易にするためにinf(優先権なし)は非表示



散布図 (遅延率・待ち時間)

全混雑状況パターンで**好成績**

一般車両

- 平均信号待ち時間
ほとんどが閾値-infの次に並ぶ

優先車両

- 平均遅延率
好成績群の中だと中央
特筆して良いわけではない

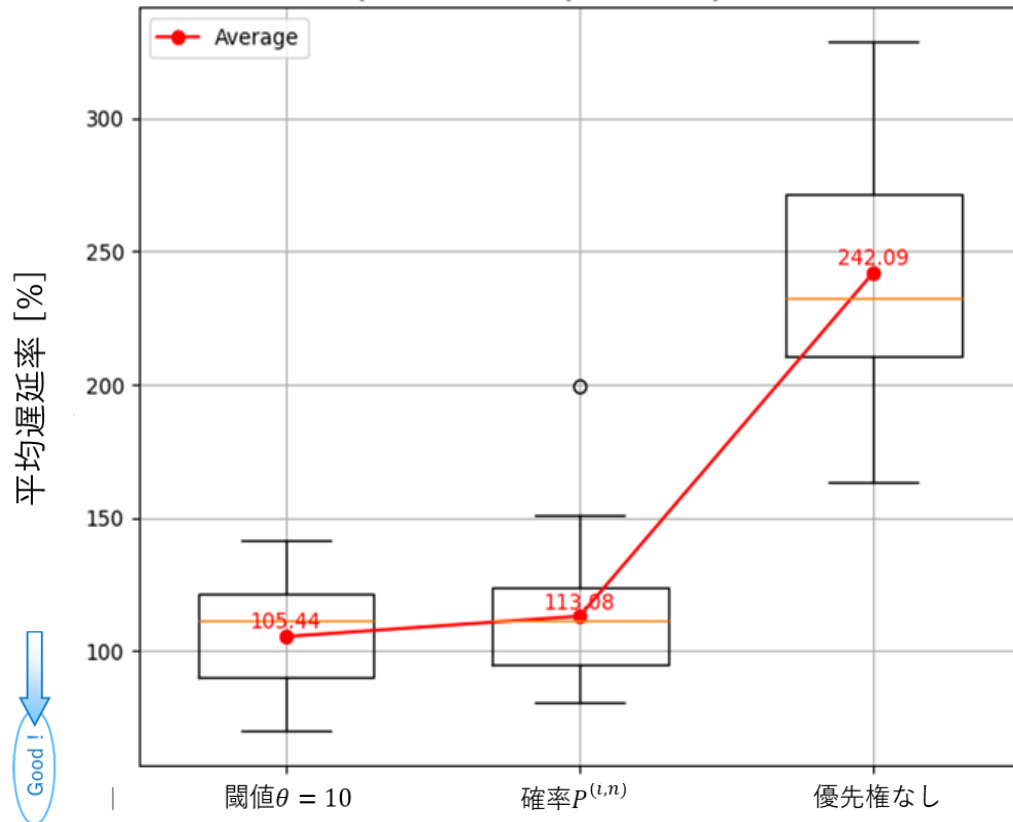
パレート解

- 一般優先共に突出した成績ではない(好成績群の中央にいる)
パレート解ではない

適切なチューニングには**劣る**

5.3.2. 実験2：実験結果

シミュレーションのシード値を固定し、横関 [28] の手法と本手法、優先権なしとで比較を行う。
この実験はそれぞれ1回ずつ行った結果である。



混雑状況パターン

各手法の優先権の干渉や行使の回数による影響を考察したいため、以下の通りの混雑状況とする。

一般車両数：150 [台]

優先車両数：15 [台] (優先車両割合：1 [%])

平均遅延率 (対象：優先車両)

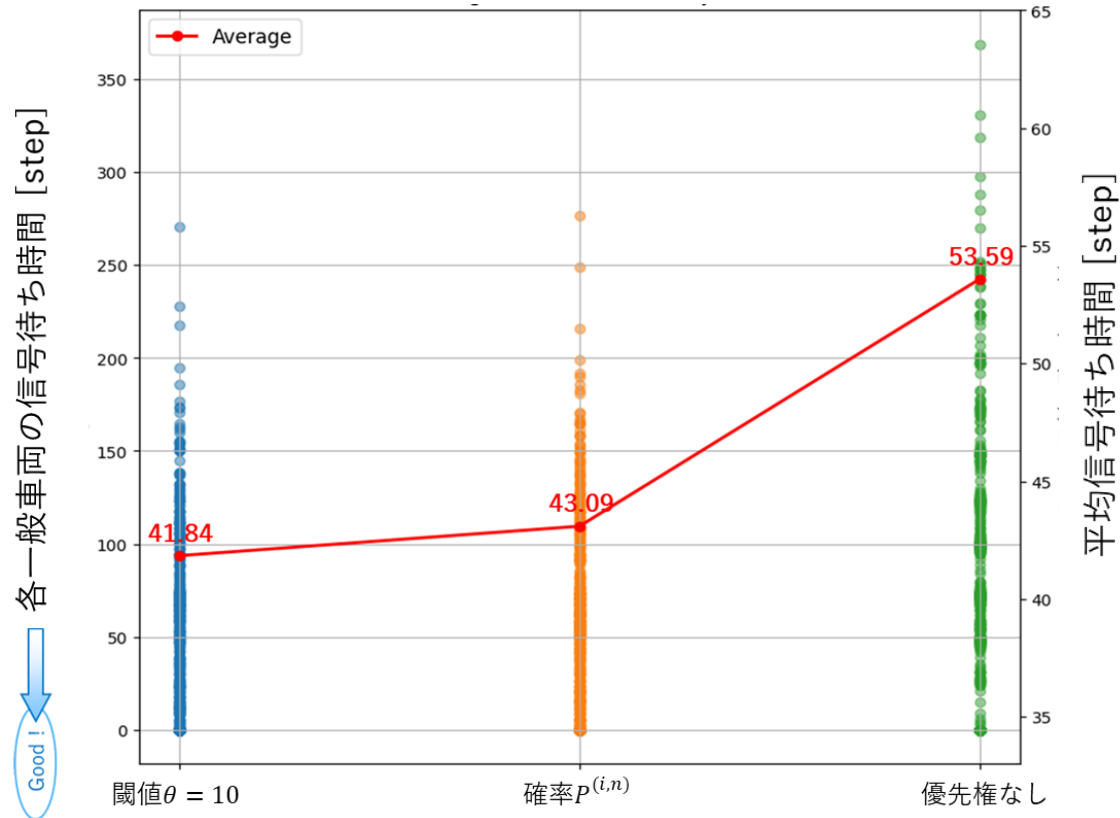
・ 確率 $P^{(i,n)}$ は閾値 $\theta = 10$ と比較して範囲・中央値は近似しているが全体的に遅延率が高い

特定の優先車両の遅延率が悪化

5.3.2. 実験2：実験結果

各手法における一般車両の待ち時間に着目したデータを示す。

散布図の目盛りは左，折れ線グラフの目盛りは右である。（単位は同じだが視認性を上げるためである）



信号待ち時間 (対象：一般車両)

・ 確率 $P^{(i,n)}$ vs 優先権なし

確率 $P^{(i,n)}$ は比較して、

平均信号待ち時間の大幅な減少が見られ、各一般車両の待ち時間についても バラつきが小さく・値が小さいほうへと密集している。

・ 確率 $P^{(i,n)}$ vs 閾値 $\theta = 10$

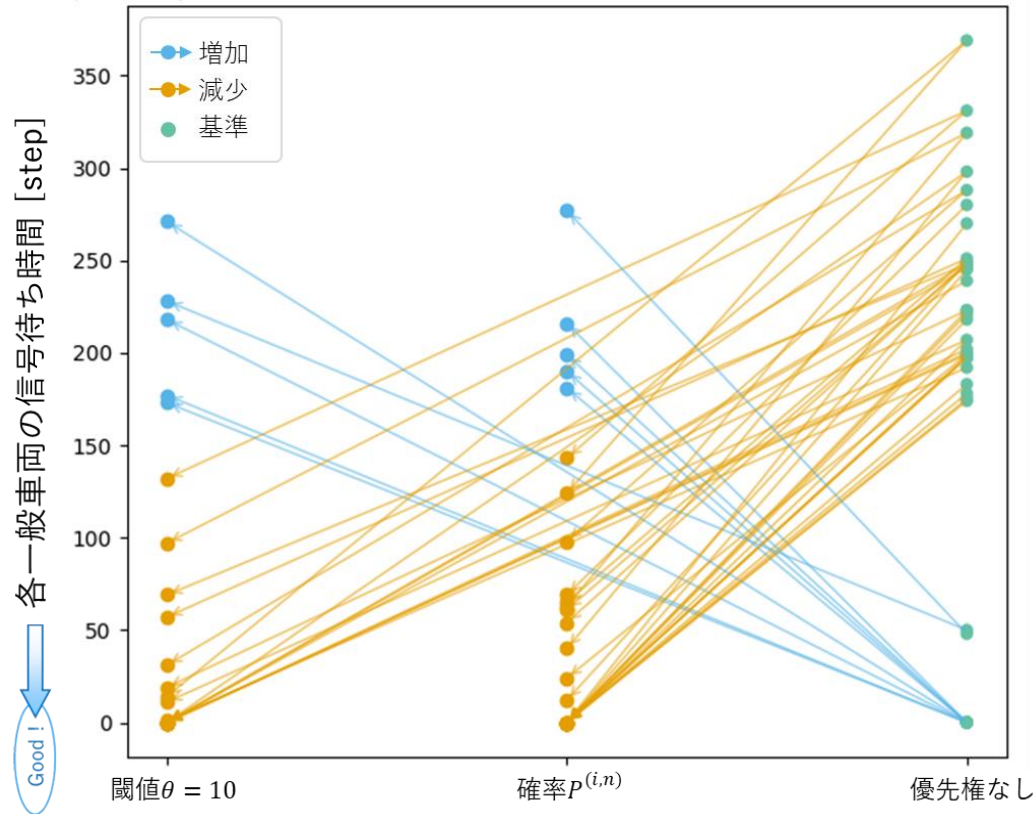
確率 $P^{(i,n)}$ は比較して、

平均信号待ち時間が多少劣り，各一般車両の待ち時間についても バラつきが大きい。

5.3.2. 実験2：実験結果

各手法における一般車両の信号待ち時間の变化に着目したデータを示す。

優先権制御方式による信号待ち時間の变化量



手法	平均信号待ち時間	増加割合	減少割合	不動割合	増加平均	減少平均
閾値 $\theta = 10$	41.84	0.3688	0.4672	0.1641	57.30	78.02
確率 $P^{(i,n)}$	43.09	0.3757	0.4455	0.1788	57.76	79.63

信号待ち時間 (対象：一般車両)

左のグラフは、優先権なしを基準としたとき変化量の大きい上位50台の一般車両の変化を示している。

- ・ (グラフ) 確率 $P^{(i,n)}$ は閾値 $\theta = 10$ と比較して、各一般車両の信号待ち時間のバラつきが大きい

- ・ (表) 確率 $P^{(i,n)}$ は閾値 $\theta = 10$ と比較して、増加平均は変わらず・減少平均は増えているが、減少割合が減っている。

減少の恩恵 (大) 恩恵を受ける車両 (減)

5.3.3. 実験2：実験考察

全混雑状況パターンで好成績

一般車両

- ・平均信号待ち時間

ほとんどが閾値infの次に並ぶ

優先車両

- ・平均遅延率
好成績群の中だと中央

特筆して良いわけではない

パレート解

- ・一般優先共に突出した成績ではない(好成績群の中央にいる)

パレート解ではない

適切なチューニングには劣る

一般車両

- ・一回の優先権行使による一般車両への恩恵は比較して大きい
表の減少平均が比較して高いため、
信号待ち時間が減少した車両の中ではより減少している。
- ・信号待ち時間の散布図は比較してバラつきが大きい
優先権なしの分布から優先権行使の総数が減っているのではと予想。

一回の優先権の行使の効率は良いが
優先権の行使回数の減少が悪影響になっている？

優先車両

- ・全体的に遅延率が悪化(範囲が広く・値が高く)
同じシード値なので、優先権が行使できなかったと予想。

閾値で行使して問題がなかった交差点が
確率によって行使を制限された？

1. 研究背景

2. 関連研究と本研究の位置づけ

3. 先行研究の手法

4. 既存手法の改善と評価

5. 提案手法とその評価

6. 結論

6. 結論

本研究の目的



横関 [28] の手法を基に問題の特徴を用いた

交通状況を考慮した遅延率に基づく適応的な交通信号制御

を提案する



実験結果

本研究では、

- ・遅延率を用いた割合による優先順位の決定
- ・優先権制御における「優先権の拒否」という現実問題に不可欠な制約

を用いて、確率モデルを構築し交通状況を考慮した優先権制御を提案することができた。

また、実験結果としてもハイパーパラメータに依存しない、汎用性が高い・安定した交通最適化手法を提案できた。

今後の課題

実験結果

本手法だけでは、
適切に設定された閾値を用いた手法ほどには良い交通最適化にはならなかった

問題 : 優先権の効力は高いが、優先権の行使の回数が減少

課題 : より正確な対象マップの現在状況の把握・正確な確率モデルの構築

今後の展望

- ・ 各交差点における優先権の行使回数を用いた確率モデルの追加
- ・ マップ特性を生かしたルールの構築 (行使されやすい交差点・されにくい交差点の区別等)
→ 優先権が行使されにくい交差点は行使の確率を高く
- ・ ITS (高度道路交通システム) を用いた正確な交通状況 (車両数・速度等) の考慮
→ 一般車両への恩恵向上による全体交通流の円滑化

参考文献 (1/5)

- [1] 国土交通省. "効果的な渋滞対策の推進". <https://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-perform/h18/07.pdf>. 2006.
- [2] 厚生労働省. "建設業・ドライバー・医師等の時間外労働の上限規制（旧時間外労働の上限規制の適用猶予事業・業務）". https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/koyou_roudou/roudoukijun/gyosyu/topics/01.html. 2024.
- [3] EduTown SDGs. "SDGs目標8.働き買いも経済成長も". https://www.unicef.or.jp/kodomo/sdgs/17goals/8-economic_growth/. (参照: 2024/11/19).
- [4] EduTown SDGs. "SDGs目標9.産業と技術革新の基盤を作ろう". <https://www.unicef.or.jp/kodomo/sdgs/17goals/9-industry/>. (参照: 2024/11/19).
- [5] EduTown SDGs. "SDGs目標11.住み続けられる街づくりを". <https://www.unicef.or.jp/kodomo/sdgs/17goals/11-cities/>. (参照: 2024/11/19).
- [6] 参議院. "那覇都市圏の渋滞問題をめぐる現状と課題". https://www.sangiin.go.jp/japanese/annai/chousa/rippou_chousa/backnumber/2018pdf/20180801137.pdf. 2018.
- [7] 沖縄県公式ホームページ. "沖縄県内におけるTDM施策の取組紹介". <https://www.pref.okinawa.lg.jp/machizukuri/dorokotsu/1012558/1012583/1012770.html>. 2024.
- [8] 国土交通省. "運輸部門における二酸化炭素排出量". https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/environment/sosei_environment_tk_000007.html. 2024.

参考文献 (2/5)

[9] 国土交通省. "道路分野におけるカーボンニュートラルへの貢献".

<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001470072.pdf>. 2024.

[10] EduTown SDGs. "SDGs目標13. 気候変動に具体的な対策を". <https://sdgs.edutown.jp/info/goals/goals-13.html>. (参照: 2024/10/22).

[11] 警察庁. "道路交通流対策について". <https://www.env.go.jp/council/06earth/y0620-5b/900425023.pdf>. 2018.

[12] Hartgen, David T., and M. Gregory Fields. "Gridlock and growth: The effect of traffic congestion on regional economic performance". No. 371. 2009.

[13] 東京都環境局. "交通需要マネジメント(TDM)とは".

<https://www.kankyo1.metro.tokyo.lg.jp/archive/vehicle/management/tdm.html>. 2018.

[14] Barth, Matthew, and Kanok Boriboonsomsin. "Real-world carbon dioxide impacts of traffic congestion". *Transportation Research Record*, 2058(1), 163-171, 2008.

[15] 株式会社NTTドコモ. "ドコモがめざす交通最適化された世界をご紹介します".

https://www.rd.ntt/_assets/pdf/forum/2021/C01_j.pdf. 2021.

[16] 株式会社NTTドコモ. "MaaS時代の交通最適化:アクチュエーションxセンシング".

<https://www.docomo.ne.jp/binary/pdf/corporate/technology/rd/openhouse/openhouse2020/E/E-43.pdf>. 2020.

参考文献 (3/5)

- [17] Li, Xd, et al. "Design of a multi-route optimal simulation system for urban traffic controls". Computer Engineering & Science, 10, 126-130, 2010.
- [18] Qun, Chen. "Dynamic route guidance method based on particle swarm optimization algorithm". 2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, Vol. 1. IEEE, 2009.
- [19] Park, Jiho, et al. "Traffic Signal Control for Large-Scale Urban Traffic Networks: Real-World Experiments using Vision-based Sensors". 2024 IEEE 18th International Conference on Control & Automation (ICCA). IEEE, 2024.
- [20] Han, Yohee, Minji Kim, and Youngchan Kim. "Progression control model to enhance performance of transit signal priority". IEEE Access, 10, 14397-14408, 2022.
- [21] Dai, G., Wang, H., and Wang, W. "Signal optimization and coordination for bus progression based on MAXBAND". KSCE Journal of Civil Engineering, April 2015.
- [22] 秦野市. "台風10号の被害状況". <https://www.city.hadano.kanagawa.jp/www/contents/1725500277185/index.html>. 2024.
- [23] Kim, Minjung, et al. "Optimal Traffic Signal Control Using Priority Metric Based on Real-Time Measured Traffic Information". Sustainability, 15(9), 7637, 2023.
- [24] 国土交通省. "ITSとは?". <https://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01its/about.html>. (参照: 2024/11/19).

参考文献 (4/5)

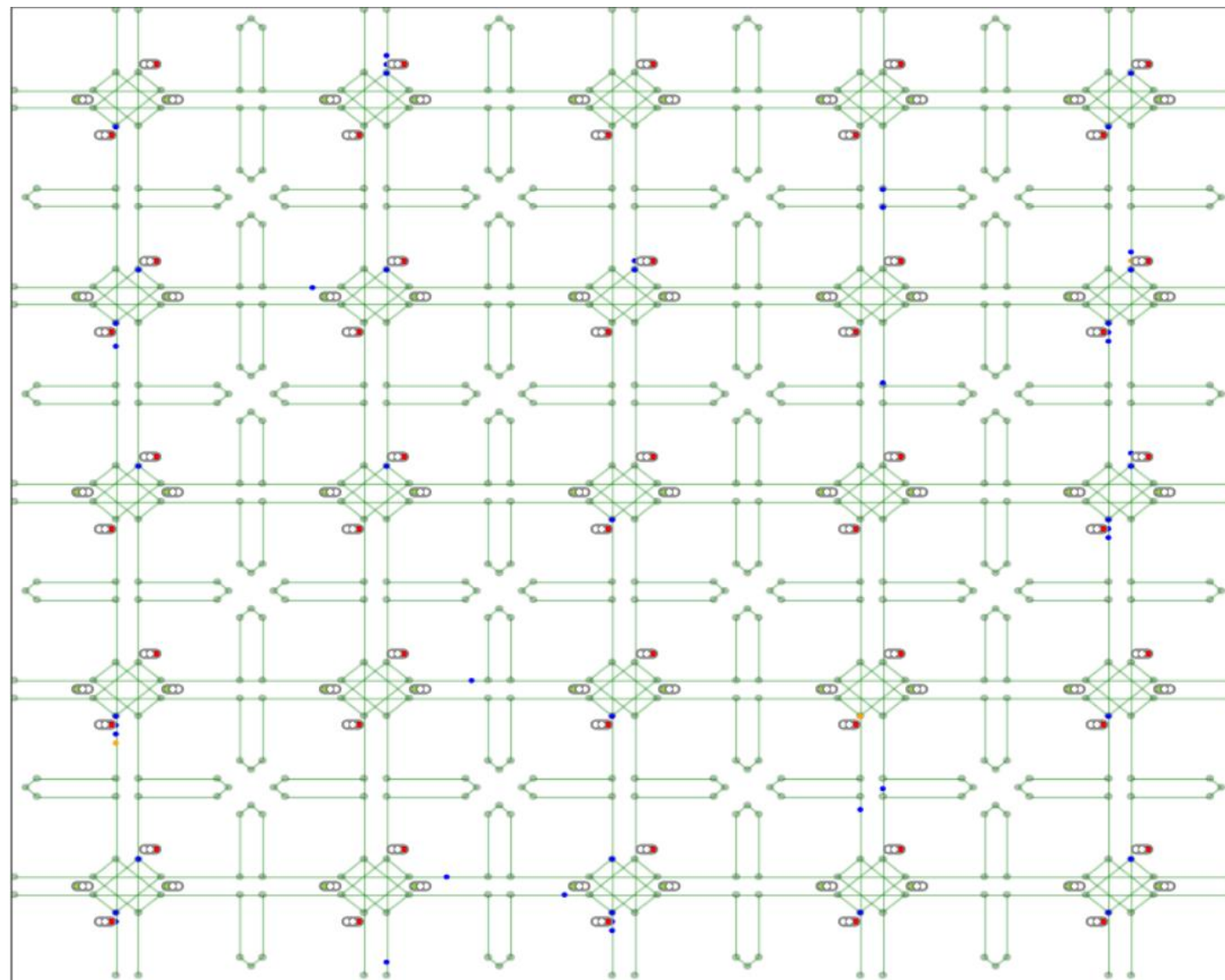
- [25] SONY. "交通(ITS)". <https://www.sony-semicon.com/ja/application/its/index.html>. (参照: 2024/11/19).
- [26] 新川, 河野. "優先権制御を用いた車両種別による交通信号システムの性能検証". 第86回全国大会講演論文集, 2024(1), 237-238, 2024.
- [27] 佐藤, イヴァン, 下原. "IoTを活かした新しい交通信号システムの提案". https://mas.kke.co.jp/wp-content/uploads/2019/03/01_sato_paper.pdf. 構造計画研究所, 2019.
- [28] 横関. "物流における遅延率に基づく適応的な信号制御の評価". 東海大学情報理工学部コンピュータ応用工学科卒業研究, 2024.
- [29] 徐, et al. "GreenSwirl: 交通渋滞の緩和を目指した信号制御および経路案内方式の提案と性能評価". 情報処理学会論文誌, 57(1), 66-78, 2016.
- [30] 国土交通省. "PTPS (公共車両優先システム)". <https://www.mlit.go.jp/jidosha/anzen/01transit/ptps.html>. (参照: 2024/10/22).
- [31] MAS COMMUNITY –構造計画研究所-. "マルチエージェント・シミュレーションとは?". <https://mas.kke.co.jp/about/>. (参照: 2024/10/22).
- [32] 佐藤, et al. "マルチエージェントシミュレータを用いたリアルタイム人流予測". 人工知能学会論文誌, 35(2), 1-10, 2020.

参考文献 (5/5)

- [33] MSIISM by NTTデータ数理システム. "マルチエージェントシミュレーションによる「人流」研究事例". <https://www.msiism.jp/article/cslab-people-flow-simulation.html>. (参照: 2024/11/16).
- [34] NTTデータ数理システム. "S4 Simulation System". <https://www.msi.co.jp/solution/s4/top.html>. (参照: 2024/11/10).
- [35] MSIISM by NTTデータ数理システム. "交通シミュレーションによる渋滞予測などの適用事例(サンプルプログラムあり)". <https://www.msiism.jp/article/s4cs-traffic.html>. (参照: 2024/11/20).
- [36] NTTデータ数理システム. "psim言語リファレンスマニュアル". <https://www.msi.co.jp/solution/s4/docs/lang-ref.html>. (参照: 2024/11/16).
- [37] Dorigo, M. "Ant system: Optimizing the cost of paths". Proceedings of the European Conference on Artificial Life, 252-259, Springer, 1991.
- [38] Python. <https://www.python.org/>. (参照: 2024/11/17).
- [39] Miao, Lei, and Dallas Leitner. "Adaptive traffic light control with quality-of-service provisioning for connected and automated vehicles at isolated intersections". IEEE Access, 9, 39897-39909, 2021.
- [40] Liang, Xiaoyuan, et al. "Deep reinforcement learning network for traffic light cycle control". IEEE Transactions on Vehicular Technology, 68(2), 1243-1253, 2019.

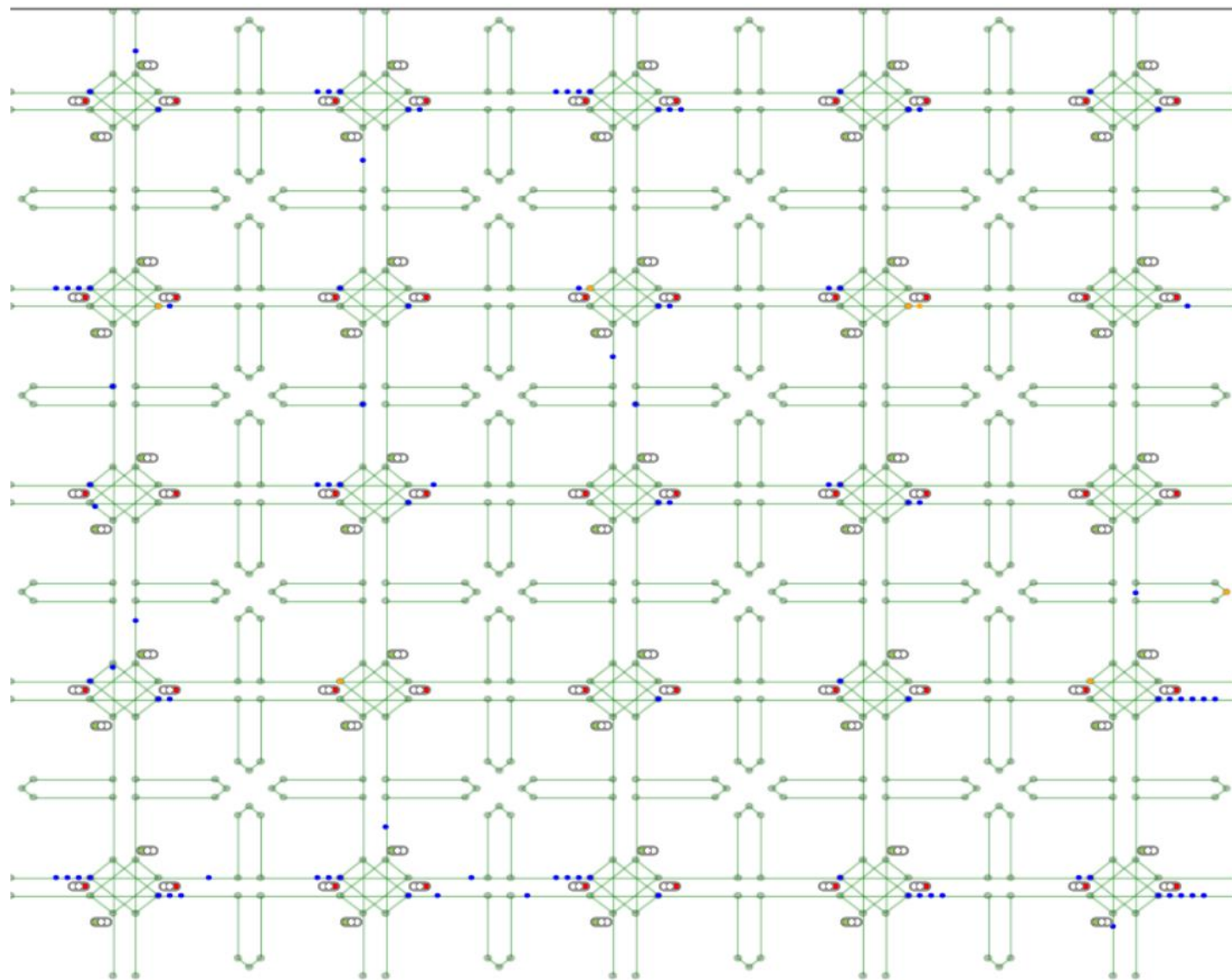
混雑状況パターン (閑散)

- : 一般車両
- : 優先車両



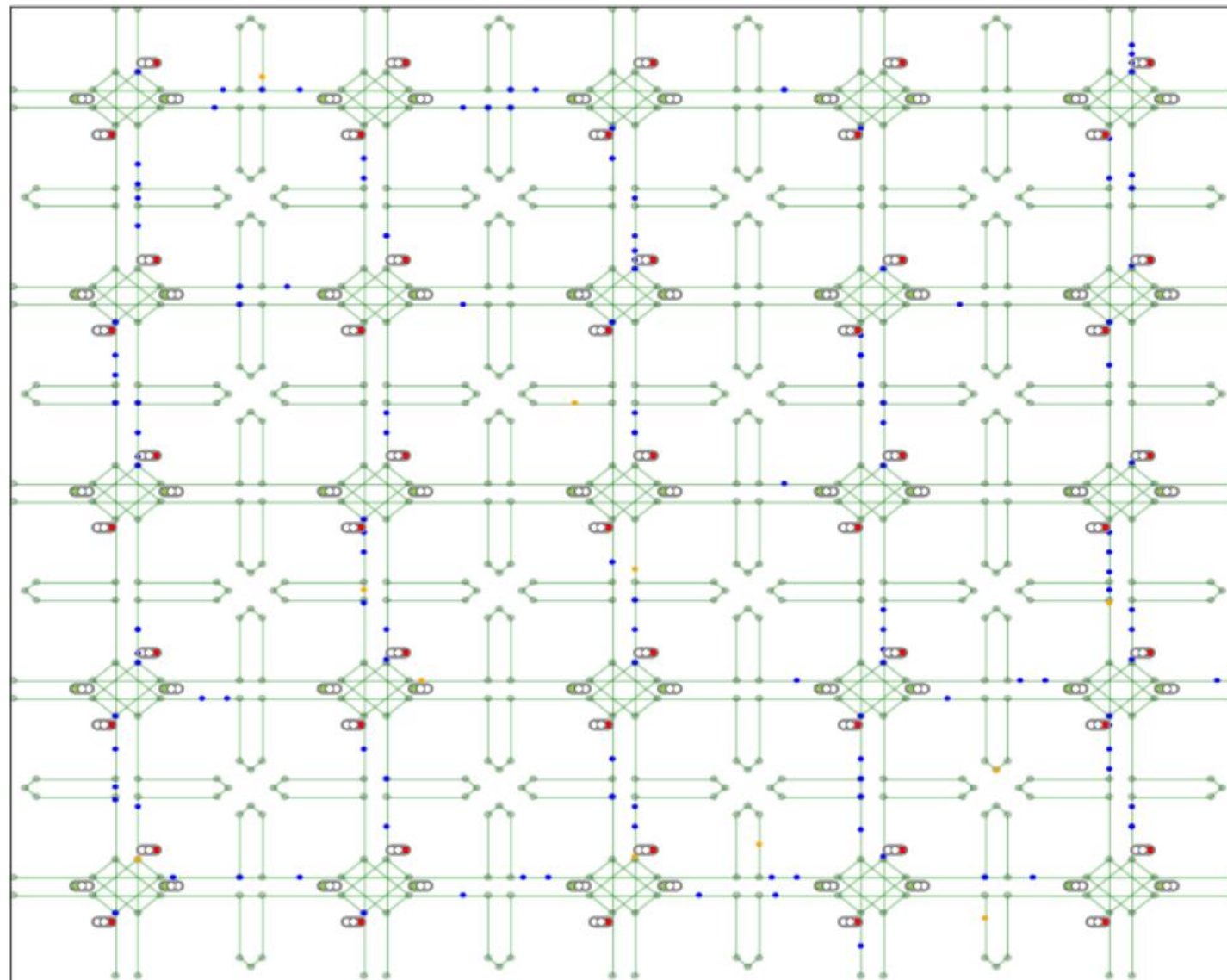
混雑状況パターン (通常)

- : 一般車両
- : 優先車両



混雑状況パターン (混雑)

- : 一般車両
- : 優先車両



S⁴ Simulation Systemの貸し出しとサポートをしてくださった株式会社NTTデータ数理システム様に心より感謝申し上げます。

お陰様で**S⁴ Simulation System**の導入と本研究を円滑に行うことができました。