

# 無信号交差点における最適合流制御方法の検討

田代 むつみ<sup>1</sup>・野崎 泰誠<sup>2</sup>・三輪 富生<sup>3</sup>・森川 高行<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 名古屋大学特任講師 未来社会創造機構 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail:mutsumi@civil.nagoya-u.ac.jp

<sup>2</sup>学生会員 名古屋大学大学院 土木工学専攻

<sup>3</sup>正会員 名古屋大学准教授 未来材料・システム研究所

E-mail:miwa@nagoya-u.jp

<sup>4</sup>正会員 名古屋大学教授 未来社会創造機構

E-mail:morikawa@nagoya-u.jp

本研究では、各車両から収集したリアルタイムの交通情報を元に、無信号交差点において車両同士が協調してコンフリクトを回避するための、合流制御方法の検討を行った。マイクロシミュレーションにより、全車両の現在の交通挙動を表現すると同時に、交差点における2台の車両のコンフリクトを事前に予測し、コンフリクト回避のための制御方法を求めた。制御の影響は周辺にも及ぶため、予め定めた最適化エリア内を走行する全車両の旅行時間の和が最小となる場合を、最適制御として選出した。シミュレーションの結果、より混雑した交通環境ほどコンフリクトの回数は増加し、合流制御の効果が高くなることが分かった。一方で、交差点周辺の交通流のみが最適となるように制御を行うと、その外側では交通流が逆に悪化する可能性もあることを明らかにした。

**Key Words :** *merging control, autonomous vehicle, conflict, microsimulation, travel time*

## 1. はじめに

近年、安全運転支援や自動走行システムの開発が急速に進められおり、車車間や路車間で情報を共有する取組みが始まっている。さらには、より広域な交通情報を、高精度な3次元地図上に重畳するデータベースの構築も進められており、より高度な交通マネジメントへの活用が期待されている。将来的には、交通に関するあらゆる情報がリアルタイムに管理されるようになり、信号が無くても、全ての車両が衝突したり止まることなく移動することができるであろう。本研究では、来たるべき全車自動運転時代における、信号に代わる新たな合流調停手法の検討を目的とする。

車車間通信による合流支援に関しては、これまでも多くの研究が行われている。例えば、Uno et al.<sup>1)</sup>は、高速道路のランプからの合流時に、車車間通信により本線上に仮想車両を置き、それと車間距離制御を行うことで合流を制御するアルゴリズムを提案した。Dresner and Stone<sup>2)</sup>の研究では、各車両が交差点通過予定時刻において交差点セルを予約し、予約済みの場合は減速により到着時刻を調整することで、合流時のコンフリクトを回避するア

ルゴリズムを提案した。このような将来位置を予約する手法は、車両台数が増えてきた場合に処理が難しくなると同時に、必ずしも最適解にはならない点が指摘されており、旅行時間などによる最適化のアプローチ<sup>3),4)</sup>や、同時発生する複数のコンフリクトにも対応したアルゴリズムも提案されている<sup>5)</sup>。

これらの既往研究では、各車両は「道路の優先順位」や「車両の位置関係」に基づく、既存の交通ルールに従うことが大前提とされている。無信号交差点であれば、優先側の車両を停めてまで、非優先側の車両が合流することはない。非優先側の車両は、合流が不可能であれば、減速または一時停止をして待つことになる。このため、非優先側で大量の車両が合流を待つようなシーンでは、ドライバーの判断による譲り合いや、誘導員による交通整理などが無い限り、極めて非効率な交通流になる可能性がある。自動運転時代において、車両同士の調停をどのように行い、交通流全体をいかに最適化するかは、大きな課題である。

著者らは既往研究<sup>6)</sup>において、無信号交差点における自動運転車の合流制御について、マイクロシミュレーションにより効果分析を行った。ここでは、いずれかの車両

が合流できず交差点で待たされる状態を「コンフリクト」として定義し、将来の交通流を予測することで、コンフリクト発生 の事前予測、およびコンフリクト回避のための車両の制御方法を決定した。この結果、例えば混雑したリンクの車両を先に行かせたり、直進車両が予め車線変更をしてスムーズな合流を促すなど、道路の優先関係に縛られない協調行動を行うことで、コンフリクト回避だけでなく、周辺車両も含めた交通流の改善に効果が期待されることが確認された。一方で、事前に最適と判断された制御方法を適用しても、必ずしも交通流が改善されない場合があることも分かった。

本研究では、効果的な合流制御を実現するための、各種条件の検討を目的とする。具体的には、コンフリクトをどれくらい前から予測すればよいか（先読み時間）、また制御によりどれくらい先までの／どれくらいのエリアの交通を最適にすればよいか（最適化の範囲）に着目し、交通量や交差点形状による影響も検討する。そして、本手法を実際の交通ネットワークに適用する際の課題について考察する。

## 2. セル・オートマトンによる交通シミュレーションの概要

合流調停の効果検討のためには、個々の車両の挙動を表現するマイクロシミュレーションが必要である。本研究では、セル・オートマトンのNaSchモデル<sup>7)</sup>を参考に、信号の無い交差点での合流および車線変更を含む交通シミュレーションを作成した。

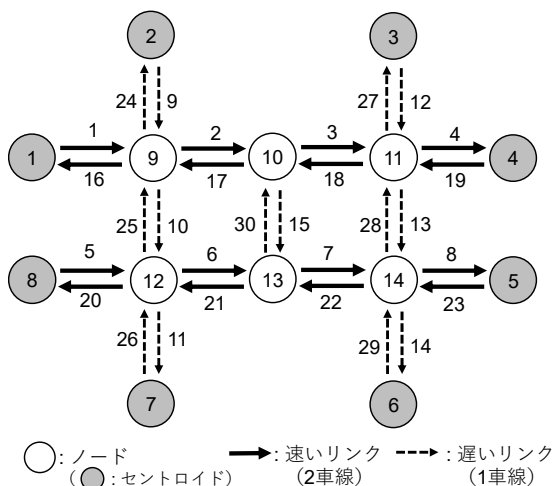


図-1 道路ネットワーク

### (1) 道路ネットワーク

解析領域として、図-1に示す道路ネットワークを考えた。リンク長は全て300mとし、横方向のリンクは全て

片側2車線、縦方向のリンクは片側1車線とした。車両の大きさの違いは考えないものとし、1つのセルに対して1車両のみ配置可能とし、各セルは長さ7.5mとした（1リンクは40セル相当）。また、シミュレーション上の1タイムステップは、実時間で1秒とした。

各リンクの最大速度は、横方向のリンクの方が縦方向のリンクよりも大きいとし、それぞれ最大速度を3セル/秒、2セル/秒とした（81 km/h, 54 km/hに相当）。そして、合流調停が行われない場合は、車線数が多く速度が速い横方向のリンクの方が、優先順位が高いとした。

### (2) ローカルルール

セル・オートマトンでは、各車両の行動を決定するローカルルールが必要となる。本研究では、車両発生ルール、速度ルール、車線変更ルール、リンク移行ルールの4種類を以下の通り与えた。

#### a) 車両発生ルール

本研究では、図-1に示す道路ネットワークにおいて、端点に位置するノードをセントロイドとし、すべてのセントロイド間で交通需要を発生させた。車線数の違いを考慮し、横方向（ノード1, 4, 5, 8からの発生）は縦方向（ノード2, 3, 6, 7からの発生）の2倍の車両が発生するとし、表-1の3パターンを設定した。車両は30分間発生させ、10分間のウォーミングアップ時間の後に、10分間制御を行い、その後全ての車両が目的地に到着するまでシミュレーションを続けた。

表-1 車両発生台数のパターン（10分間あたりの発生台数）

	縦方向	横方向	ネットワーク全体
パターン1	6	12	504
パターン2	9	18	756
パターン3	12	24	1008

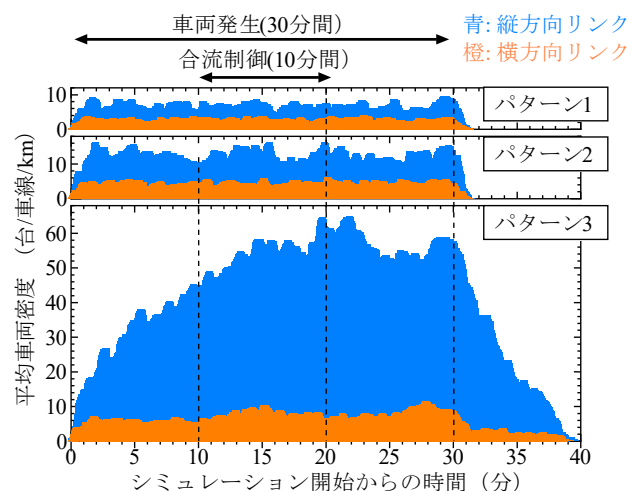


図-2 車両発生パターン毎のネットワーク全体の車両密度

図-2に、各車両発生パターンにおける、横／縦方向リンクの平均車両密度を示す。車線数が少ない縦方向リンク

クの方が混雑しており、またパターン 3 では、車両発生終了後もネットワーク上に車両が長く残存していることから、より混雑した状態にあることが分かる。

各車両は、起終点間で利用可能な経路からランダムに 1 本の経路を選択することとし、シードを指定することで、5 回の試行を行った。

#### b) 速度ルール

速度の変化は、以下のアルゴリズムによって行う。

```

IF ( $v \geq gap$ )
   $v = gap - p_{noise}$ 
ELSEIF ( $v < v_{max}$ ) THEN
   $v = v + 1 - p_{noise}$ 
ELSE
   $v = v - p_{noise}$ 
ENDIF

```

ここに、 $v$  は車両の速度、 $gap$  は同一車線上の前方車両との距離（前方ギャップ）、 $v_{max}$  は現在のリンクにおける最大速度である。 $p_{noise}$  は確率  $p$ （乱数）で 1 となる値で、実際の交通行動における不確実性、すなわち前方ギャップが十分あっても減速する「ランダムブレーキ効果」を表現している。本研究では、問題をよりシンプルに考えるため、全車両は自動運転であることを想定し、常に  $p_{noise} = 0$  としてシミュレーションを実施した。

#### c) 車線変更ルール

車線変更は真横のセルに移動するものとし、速度更新・前方移動の前に、以下のアルゴリズムで行う。

```

IF (隣の車線のセルが空いている)
  IF ( $gap < v$  AND  $gap_o > gap$ )
    THEN  $w1 = 1$ 
    ELSE  $w1 = 0$ 
   $w2 = \max[v - gap_o, 0]$ 
   $w3 = \max[v_{max} - gap_b, 0]$ 
   $w4 = \max\left[\frac{d^* - d}{v_{max}}, 0\right]$ 
   $w5 = \max[d^{**} - d, 0]$ 
IF (交差点を直進予定)
  IF ( $w1 > w2$  AND  $w1 > w3$ ) THEN 車線変更
ELSEIF (交差点を右折/左折予定)
  IF ( $w1 + w4 > w2$  AND  $w1 + w4 > w3$ )
  IF ( $w5 = 0$ ) THEN 車線変更
  ELSEIF ( $w5 > 0$  AND 右端/左端車線にいない)
    THEN 右端/左端車線に車線変更

```

ここに、 $gap_o$  は隣の車線の前方車両とのギャップ、 $gap_b$  は隣の車線の後方車両とのギャップ、 $d$  は前方交差点までのセル数で、 $w1 \sim w5$  は車線変更を決定する重み

である。

複数車線から成るリンクを走行中、次に右折/左折の予定であれば、リンク終端では右端/左端車線に存在する必要がある（直進時は、車線位置の制限無し）。このようなリンク移行のための車線変更の緊急度が、リンク終端に近づくほど増すことを、 $w4$  により表現している。一方で、右折/左折のため右端/左端車線に一度入った後は、交差点に近づくほど、不要の車線変更を避けその車線を維持することが望ましい。本研究ではこの効果を、 $w5$  を新たに導入することにより表現した。 $d^*, d^{**}$  はセル数により与えられるパラメータであり、本研究では、交差点の約 200m 前からこれらの効果が発揮されるように、 $d^{**} = d^* = 26$  と設定した。

#### d) リンク移行ルール

信号の無い交差点では、リンクの優先順位および自車と走行軌跡が重なる他車両との位置関係を考慮して、安全なリンク移行を行う必要がある。本研究では、無信号交差点で自車と走行軌跡が重なる他車両の交差点到着時間が 3 秒以上、かつ、移行先リンクの 1 つ目のセルに他車両が存在しない場合に、リンク移行が可能とした。また、優先リンクから優先リンクへの直進以外の場合は、車両は交差点直前のセルで必ず一時停止を行うものとした。

リンク移行は速度更新と同様、全車両を移動させない状態で車両番号順にリンク移行の可否を判断する。このため、同一時間ステップにおいて、複数の車両が同一セルに移行可能と判断されることがある。この場合は、リンクの優先度も考慮した上で、直進、左折、右折の順に順位を与え、最も優先順位が高い車両のみリンク移行を行うものとした。

### 3. 合流調停アルゴリズム

上記のリンク移行ルールに従うと、優先リンクからの直進と左折以外では、周辺他車両の影響によりリンク移行がスムーズに行えず、交差点手前で一時停止が続く場合も発生する。このように、他車の影響で合流が妨げられる状態を、本研究では合流時のコンフリクトとして定義する。そして、コンフリクトのため合流できない車両（車両 A）と、コンフリクトの原因となる車両（車両 B）の 2 車両を抽出し、それぞれがコンフリクト回避のために、道路の優先関係に縛られることなく、予めとるべき行動を決定することを、合流調停と定義する。

図-3 に、本研究が提案する合流調停アルゴリズムの構造図を示す。全車両の予定経路と現在位置、車両速度は調停サーバー上に集約されていることを想定し、2 章で作成した交通シミュレーションにより、現在の交通流を

表現する。合流時のコンフリクトを、加減速や車線変更により回避するためには、対象車両が交差点に到着する以前に調停を開始する必要がある。そこで本研究では、現在の交通流に先んじて、将来の交通流を先読みするシミュレーションを並行して行い、合流時のコンフリクトの予測を行う。コンフリクトの発生が予測された場合には、現在の状態に一度戻り、2台の対象車両に対して、各種制御を行った場合の将来の交通流を、別途シミュレーションで再現する。そして、全制御パターンの中から最適となる制御方法を選定する。その後、再び現在の状態に戻り、最適制御を対象2車両に適用し、新たなコンフリクトが予測されるまで、同様のシミュレーションを繰り返す。

本研究では簡単のため、合流調停を行う交差点は、1つのシミュレーション中に任意の1箇所のみとした。また、ひとつのコンフリクトが抽出された場合、それに対する制御が終了するまでは、他のコンフリクトは考慮しないものとした。

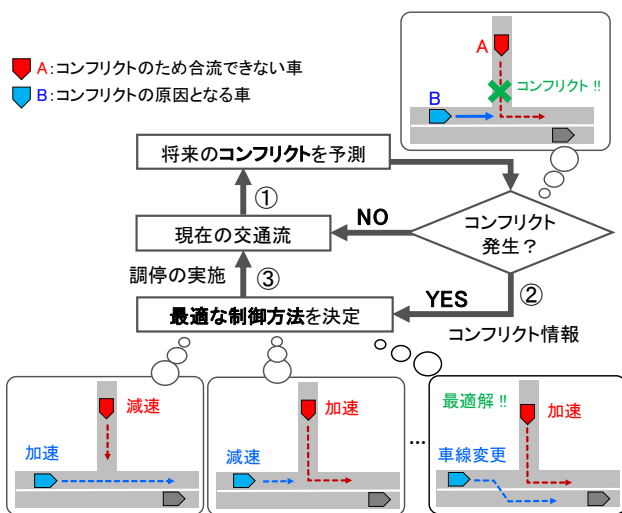


図-3 合流調停アルゴリズムの構造

以下では、コンフリクト予測と最適制御方法の選定について、それぞれのルールを示す。

(1) 将来のコンフリクト予測と制御対象車両の抽出

将来予測では、現在の状態を初期値として、全車両の挙動をシミュレーションする。予測は、現在の時刻から $\alpha$ 秒先まで行くとし、この間にコンフリクトが発生すれば、その時点でシミュレーションを中断する。そして合流を妨げられた車両Aと妨げた車両Bを抽出し、コンフリクト発生時の状態（リンク番号、車線番号、セル番号、速度）を記憶する。一方、 $\alpha$ 秒の間にコンフリクトが発生しなければ、再び現在の状態に戻り、通常のローカルルールに基づき、次のタイムステップにおける車両挙動を算出する。

(2) 最適合流制御方法の選定

コンフリクト回避のために、ある特定の車両の運転行動を制御すると、その周辺車両にも影響が及ぶことが予想される。そこで本研究では、2台の制御対象車両に対して、複数パターンで強制的に運転制御を行い、各パターンにおける将来の交通流を予測することで、周辺車両も含めた交通流全体としての最適制御方法の選定を行う。

制御方法として本研究では、車線変更(L)、加速(A)、速度維持(M)、減速(D)、停止(S)の5種類に加え、制御を行わない場合(N) (2章の通常のローカルルールに従った場合)も比較対象とした。そして、これら6種類の制御を組み合わせ、表-2に示す計26種類の制御パターンでシミュレーションを実施した。制御はコンフリクト回避を目的としているため、2車両の制御内容が同じになる組み合わせ(例:車両Aも車両Bも加速制御)は対象外としている。また、車線変更によるコンフリクト回避は、コンフリクトの原因となる車両Bのみ適用した。

制御は、対象交差点に直結するリンク内のみで行われるとし、1つの制御が行われている間は、他のコンフリクトの検出や制御は行わないものとした。そして、2台の制御対象車両のうち、いずれか1台が対象交差点を通過した時点で、制御を終了するものとした。制御終了後もシミュレーションを継続し、ネットワーク全体の交通流を予測した。そして、「現在から $\beta$ 分先までの間に、最適化エリア内に存在する車両が走行した距離(セル数)の総和が最大となる」制御パターンを、最適な制御方法として選定した。

表-2 2車両の合流調停における制御パターン

		車両 A				
		加速 (A)	速度維持 (M)	減速 (D)	一時停止 (S)	制御無し (N)
車両 B	車線変更 (L)	A-L	M-L	D-L	S-L	N-L
	加速 (A)	—	M-A	D-A	S-A	N-A
	速度維持 (M)	A-M	—	D-M	S-M	N-M
	減速 (D)	A-D	M-D	—	S-D	N-D
	一時停止 (S)	A-S	M-S	D-S	—	N-S
	制御無し (N)	A-N	M-N	D-N	S-N	N-N

制御中の、車線変更、加速、速度維持、減速、停止は、具体的には以下のローカルルールに従って行った。

a) 制御時の車線変更ルール

車線変更によるコンフリクト回避は、コンフリクトの原因となる車両Bが以下の全ての条件を満たす時のみ、適用される。

- ① 制御開始時に複数車線から成るリンクを走行中
  - ② 制御開始時にコンフリクト発生時の車線を走行中
  - ③ 制御による車線変更が予定経路を妨げない
- ②は、コンフリクトが発生すると予想される車線を、

制御開始時に車両 B が走行している場合のみ車線変更を行い、それ以外の場合は、コンフリクト発生時以外の車線を維持することを意味する。③は、例えば、左折予定の車両がコンフリクト発生時に左端車線にいる場合など、リンク移行のために存在すべき車線上でコンフリクトが発生した場合は、車線変更制御は適用されないことを意味する。なお、制御による車線変更では、周辺ギャップに関係なく、隣のセルが空いた時点で直ちに移動するとした。また、前方への移動処理は、加速制御のルールに従い行うとした。

**b) 制御時の速度ルール**

速度変更による制御は、以下のローカルルールで行う。本研究では全車両自動運転であることを想定し、制御時も  $p_{noise} = 0$  としてシミュレーションを実施した。また、速度制御中であっても、前方ギャップが不十分の場合は、衝突回避のために減速して前方車両の直後まで移動するものとした。

**【加速制御】**

通常の交通状態における速度ローカルルールと同様、最大速度を上限として加速

**【速度維持制御】**

一定速度  $v^*$  を維持 (本研究では  $v^* = v_{max} - 1$  と設定)

**【減速制御】**

前方交差点までのセル数  $d$  が 4 以内 (30m 以内) に到達した時点から、速度 1 を下限として減速 (停止はしない)。

**【一時停止制御】**

減速制御と同様、 $d \leq 4$  から速度 1 を下限として減速した後、もう 1 台の制御対象車両が交差点を通過するまで、交差点直前のセル ( $d = 1$ ) で速度=0 で留まり続ける。制御終了後は、通常速度ルールに従って、走行を再開する。

**3. シミュレーションによる合流制御の効果検討**

**(1) 最適合流制御の評価方法**

合流制御の効果検討では、始めに、合流制御を行わない場合 (通常のローカルルールに従って全車両が走行する場合) についてシミュレーションを実施する。これを以下では「制御無し」と呼ぶ。

続いて、同じ車両発生条件の元で、あらかじめ指定した 1 箇所の交差点を対象に、コンフリクトの抽出および合流制御を行う。本論文では、図 4 に示す様に、T 字路交差点としてノード 10、十字路交差点としてノード 11 を制御対象とした。以下ではそれぞれの交差点における制御を、「T 字路制御」「十字路制御」と呼ぶ。

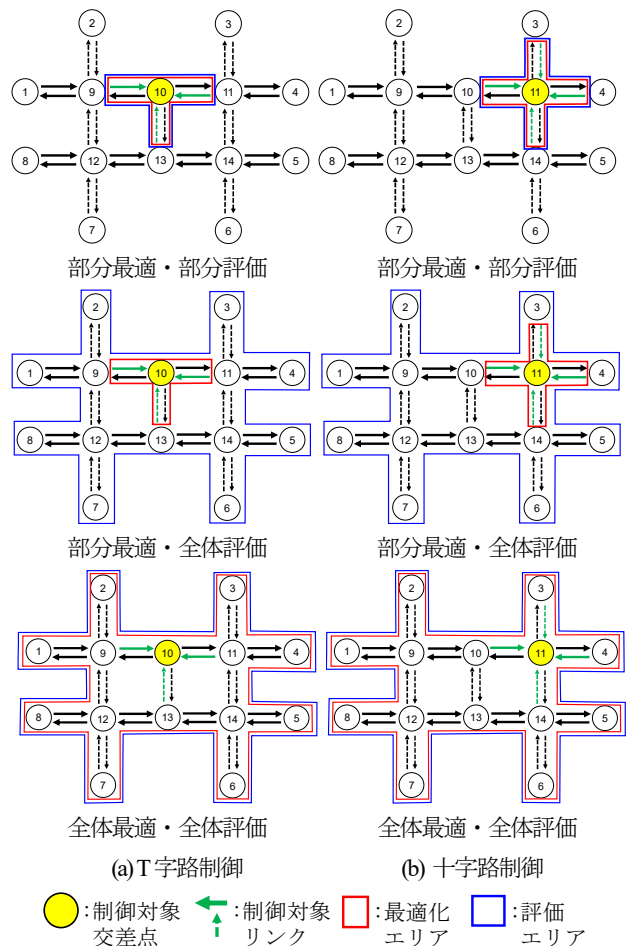


図 4 制御対象交差点と最適化/評価エリア

コンフリクトの予測は、現在の状態を初期値として、現在の時刻から  $\alpha$  秒先まで行う。本研究では、この先読み時間  $\alpha$  の影響を調べるために、 $\alpha=5, 10, 20$  秒の 3 ケースにおけるシミュレーションを実施した。一方、最適合流制御方法の選定では、表 2 に示す全 26 種類の制御パターンを順に実施し、それぞれ現在から  $\beta$  分先までの間に、最適化エリア内に存在する車両が走行した距離 (セル数) の総和が最大となるパターンを最適解として選出する。この最適化の時間範囲  $\beta$  の影響を調べるため、本研究では  $\beta=1, 3, 5$  分の 3 ケースにおけるシミュレーションを実施した。また、最適化の空間範囲の影響も調べるため、最適化エリアを、図 4 に示す様に、制御対象交差点に直結するリンク内のみとした場合と、道路ネットワーク全体とした場合を想定し比較した。以下ではそれぞれ「部分最適」、「全体最適」と呼ぶ。

最後に、「T 字路制御」または「十字路制御」のシミュレーション結果を「制御無し」の場合と比較することで、制御により交通流が実際にどの程度改善されたかを評価する。本研究では、評価エリアについても、図 4 に示す様に、制御対象交差点に直結するリンク内のみとした場合と、道路ネットワーク全体とした場合を想定し、それぞれ「部分評価」、「全体評価」とした。そして、

評価エリア内を走行した全車両について、エリア流入から流出までの旅行時間を求め、その総和（以下では「エリア内総旅行時間」と呼ぶ）を評価項目とした。

(2) 結果と考察

シミュレーションは全ケースにおいて、車両発生パターン（出発時刻・走行経路）を与える乱数シード値を1〜5まで増やしながら計5回試行した。以下では、その平均値を示す。

はじめに、10分間の制御中に発生したコンフリクト回数について、図-5に示す。コンフリクト回数は、評価方法の影響は受けなため、ここでは「部分最適」「全体最適」の2種類に分けて結果を示す。コンフリクト回数は、T字路に比べて十字路の方が3倍以上多く、交通量の増加に伴い増加することが分かった。一方、十字路制御では交通量が多くなると、逆にコンフリクト回数が減少する様子も確認された。これは、非常に混雑した状況下では、制御により1回のコンフリクトが解消するまでに時間を要するためと考えられる。

最適化の空間範囲（部分最適/全体最適）や、コンフリクトの先読み時間 $\alpha$ については、コンフリクトの発生回数にあまり影響を与えないことが確認された。最適化の時間範囲 $\beta$ については、最も短い場合（ $\beta=1$ 分のケース）でコンフリクト回数が少なくなっており、混雑状況下で制御が連続的に効果を発していないことが分かる。

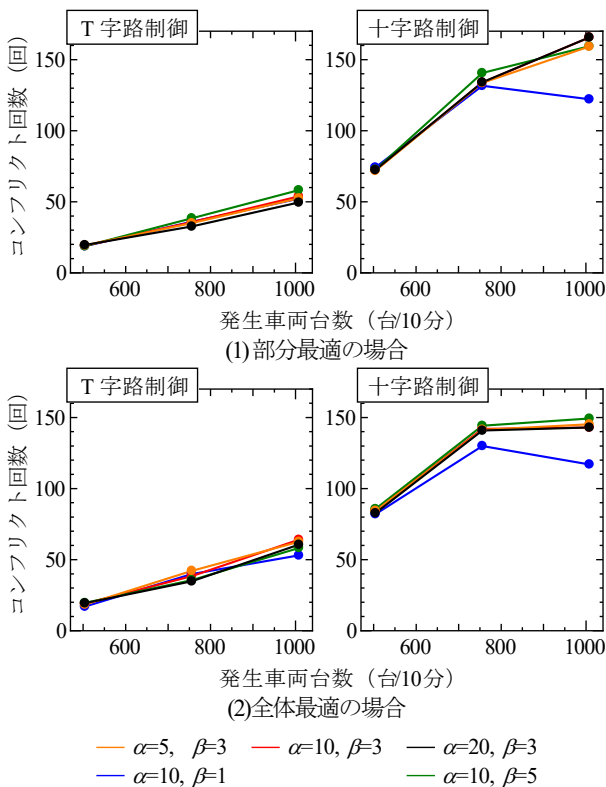


図-5 コンフリクト回数

続いて、制御の効果について、エリア内総旅行時間により評価を行った。本研究では、以下の式で「総旅行時間の変化割合」を求め、この値が1より小さいほど、制御による旅行時間削減効果が高いとした。

$$\text{総旅行時間の変化割合} = \frac{\text{制御実施時のエリア内総旅行時間}}{\text{制御無しのエリア内総旅行時間}} \quad (1)$$

結果を図-6に示す。「部分最適・部分評価」と「部分最適・全体評価」は同じシミュレーション結果を用いて、最後の評価のみ別途行ったものである。

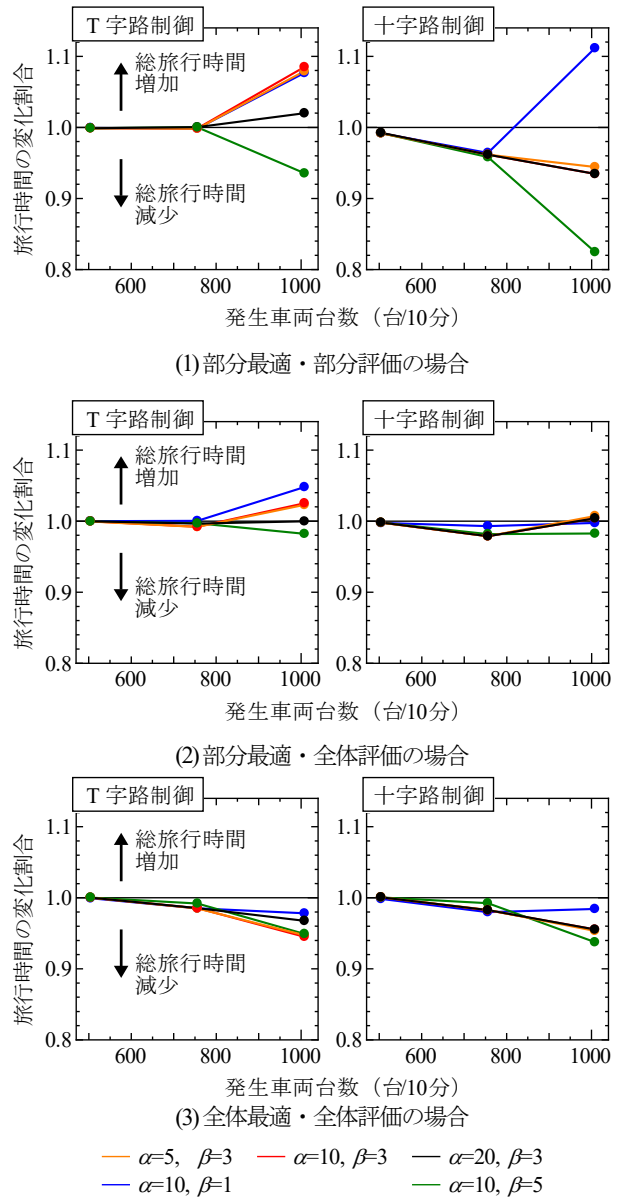


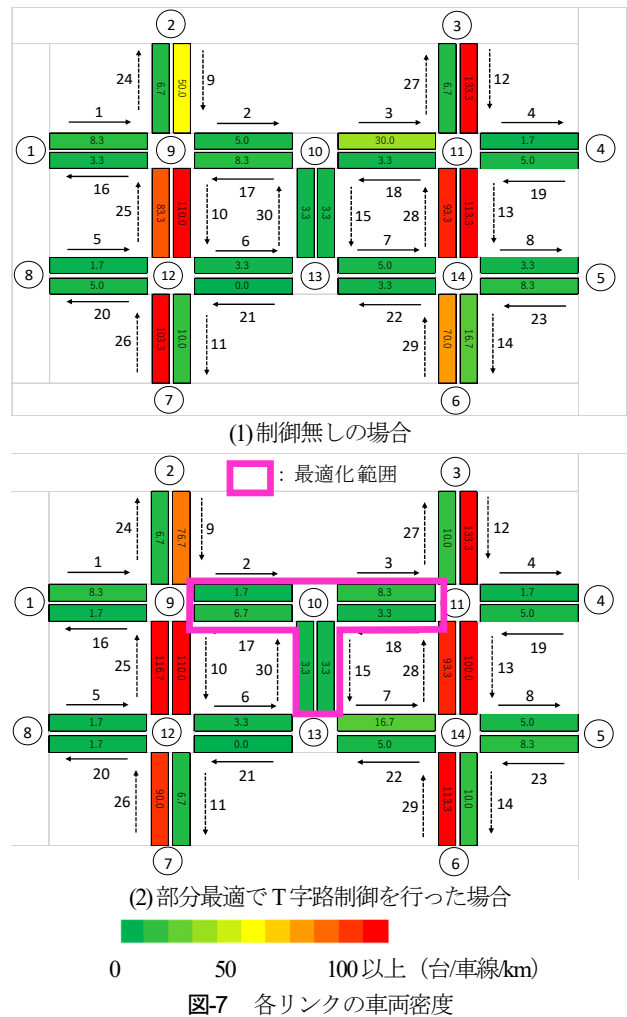
図-6 旅行時間の変化割合

「部分最適・部分評価」と「部分最適・全体評価」を比較すると、同じシミュレーション結果であるにも関わらず、部分評価に比べて全体評価の方が、総旅行時間が増加する傾向が見られた。この原因を調べるため、一例として、T字路交差点で部分最適による制御を行った場合の、各リンクの車両密度を図-7に示す。比較のため、図中には制御無しの場合の結果も示す（いずれも、車両発生台数=1008台/10分、シード値=5、 $\alpha=10$ 秒、 $\beta=1$ 分、シミュレーション開始20分後の結果）。部分最適では、対象交差点の周辺リンクのみ最適化するため、このエリア内では確かに交通流が改善されるが、最適化エリアの外側では逆に混雑してしまい、結果としてネットワーク全体では旅行時間が増加してしまう場合があることが確認された。

一方、図-6の「全体最適・全体評価」では、T字路制御、十字路制御ともに、交通量が多いほど、制御による総旅行時間が減少し、交通流改善に効果が発揮されることが分かった。今回の解析ケースでは、道路ネットワーク全体の総旅行時間を最大6%削減できた。

以上から、合流制御を行う場合には、制御対象交差点の周辺だけでなく、あらかじめ道路ネットワーク全体が最適となるように制御方法を決めることが理想である。しかし、膨大なネットワークに全体最適を適用するのは、計算コストの面で非現実的であるため、複数交差点で部分最適を同時に行う、または全体最適の制御パターンを経験的に部分制御に落とし込むなどの対策が必要となる。

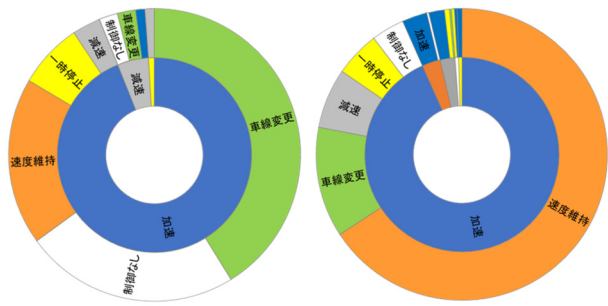
再び図-6に戻り、最も合流制御が効果的な「全体最適・全体評価」の結果に着目して考察を行う。コンフリクトの先読み時間 $\alpha$ については、今回調べた範囲内では、旅行時間にあまり影響を与えないことが確認された。よって、コンフリクトは余り早くから先読みする必要はなく、交差点近傍まで車両が来てから制御を開始しても間に合うと考えられる。一方、最適化の時間範囲 $\beta$ については、特に交通量が多い場合に短くすると、制御による旅行時間削減効果が小さくなってしまふ。コンフリクトが頻繁に起きる状況下であっても、より先の交通流まで最適となるように制御を行うことが望ましい。



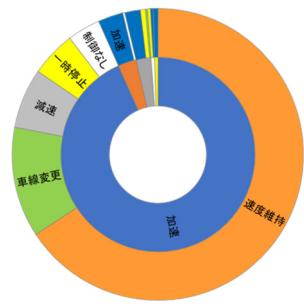
最後に、「全体最適」の結果、表-2に示す計26種類の中から最適制御として選出された制御パターンを、図-8, 9に示す（いずれも、 $\alpha=5$ 秒、 $\beta=3$ 分の結果）。各ケースで発生するコンフリクト回数が異なるため、制御パターンの割合として示す。図の内円は、コンフリクトのため合流できない車両Aに対する制御結果、外円はコンフリクトの原因となる車両Bに対する制御結果である。

車両の位置関係や速度、進行方向などに応じて最適となる制御方法は異なるが、T字路制御においては「車両A=加速、車両B=車線変更」、十字路制御においては「車両A=加速、車両B=速度維持」が主要な制御パターンとして選出されている。また、車両A, Bの両方を制御するパターンが大半を占めており、コンフリクト解消のためには、コンフリクトの原因となる車両Bにもあらかじめ協力してもらう必要があることが分かる。

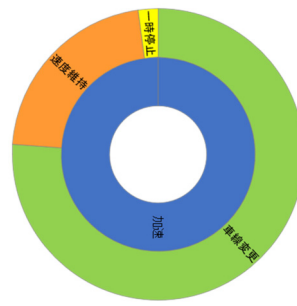
交通量が増加するほど、周辺車両による行動が制約されるため、制御パターンが多様化することも確認された。また、「全体最適（図-9）」の方が「部分最適（図-8）」よりも制御パターンの種類は少なく、特に交通量が少ない場合には、よりシンプルに問題を取り扱うことができる可能性がある。



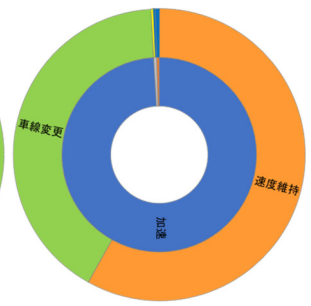
T字路制御 (504台)



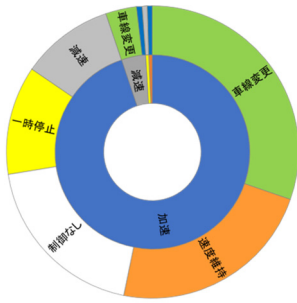
十字路制御 (504台)



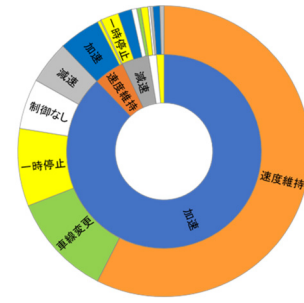
T字路制御 (504台)



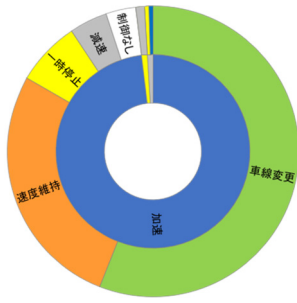
十字路制御 (504台)



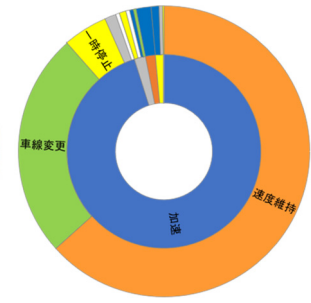
T字路制御 (756台)



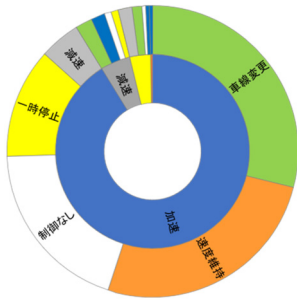
十字路制御 (756台)



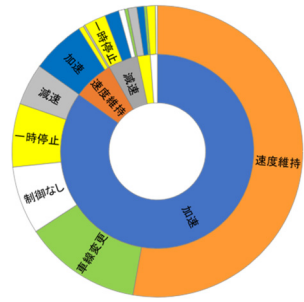
T字路制御 (756台)



十字路制御 (756台)



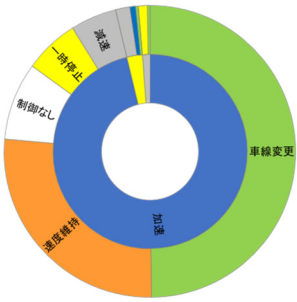
T字路制御 (1008台)



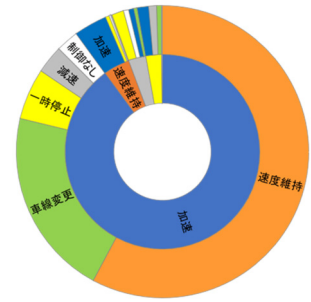
十字路制御 (1008台)

■ : 車線変更 ■ : 速度維持 ■ : 一時停止  
■ : 加速 ■ : 減速 ■ : 制御なし  
 (内円: 車両Aの制御方法 外円: 車両Bの制御方法)

図-8 各リンクの車両密度 (部分最適)



T字路制御 (1008台)



十字路制御 (1008台)

■ : 車線変更 ■ : 速度維持 ■ : 一時停止  
■ : 加速 ■ : 減速 ■ : 制御なし  
 (内円: 車両Aの制御方法 外円: 車両Bの制御方法)

図-9 各リンクの車両密度 (全体最適)

#### 4. 結論

本研究では、無信号交差点におけるコンフリクト回避のための合流制御方法について、ミクロシミュレーションにより効果検討した。複数交差点から成る道路ネットワークを想定し、ある1つの交差点のみで制御を行う際に、交差点に直結するリンクのみの交通流を最適化する場合(部分最適)と、道路ネットワーク全体の交通流を最適化する場合(全体最適)で、制御による効果はどのように異なるかを比較した。

この結果、「部分最適」による合流制御では、制御エリアの内側の交通流は確かに改善されるが、交通量が多くなると、エリアの外側が逆に混雑してしまうこともあり、制御を行っていない下流側の交差点でコンフリクトを増やす可能性があることを確認した。一方、「全体最

適」の場合は、合流制御を行うことで、ネットワーク全体の交通流改善に効果があることが分かった。また、交通量が多く制御が連続的に行われる状況ほど、近い将来の交通流だけを最適化するのではなく、より先も見据えた制御パターンの選定が重要であることも分かった。

全体最適は理想的ではあるが、ネットワークの規模によっては非現実的である。このため、複数の交差点において部分最適を同時に行う、または全体最適による制御パターンを経験的に部分制御に落とし込むなどの対策が課題となる。

また、今回は合流制御の効果を検討する上で、無信号交差点で制御が行われない場合との比較を行ったが、信号制御との比較検討も必要と考える。さらには、1つの交差点で同時多発的に発生するコンフリクトにも対応できるような、コンフリクトの検知および制御方法の検討



も行っていきたい。

**謝辞**：本研究は国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）の研究成果展開事業「センター・オブ・イノベーション（COI）プログラム」，およびJSPS科研費26630240の助成を受け行われた

#### 参考文献

- 1) Uno, A., Sakaguchi, T. and Tagawa, S. : A merging control algorithm based on inter-vehicle communication, Proceeding of IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems, pp. 783-787, 1999.
- 2) Dresner, K. and Stone, P.: Multiagent traffic management: A reservation-based intersection control mechanism, Proceedings of 3rd International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, pp.530-537, 2004.
- 3) Li, L. and Wang, F.-Y.: Cooperative driving at bling crossings using intervehicle communication, in IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 55, No. 6, pp. 1712-1274, 2006.
- 4) Lee, J. and Park, B.: Development and evaluation of a cooperative vehicle intersection control algorithm under the connected vehicles environment, IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems, Vol. 13, No. 1, pp.81-90, 2012.
- 5) Kamal, M. A., Imura, J., Hayakawa, T., Ohata, A. and Aihara, A.: A vehicle-intersection coordination scheme for smooth flows of traffic without using traffic lights, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 16, No.3, pp. 1136-1147, 2015.
- 6) Tashiro, M., Motoyama, H., Ichioka, Y., Miwa, T. and Morikawa, T.: Simulation analysis on optimal merging control of connected vehicles for minimizing travel time, International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, (DOI 10.1007/s13177-018-0172-8), 2018.
- 7) Nagel, K. and Schreckenberg, M.: A Cellular automaton model for freeway traffic, Journal of Physics I France, Vol. 2, pp.2221-2229,1992.

(2019. 3. 10 受付)