

# 大規模道路網を対象とした 混雑に適應する信号制御方策の評価

松原 大雅<sup>1</sup>・井料 隆雅<sup>2</sup>

<sup>1</sup>学生会員 神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

E-mail: 190t134t@stu.kobe-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 東北大学大学院情報科学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

E-mail: iryo@tohoku.ac.jp

本論文では、動的な交通流シミュレータを用いて大規模交通ネットワーク流を対象とした信号制御の実装と性能評価を行う。交通信号の制御には混雑状況に応じてスプリット調整を行う適応的な制御方策を適用する。混雑適応型の信号制御方策には多くのものが提案されているが、大都市圏のように複雑かつ大規模な道路網に適用した際の性能に関する知見は不足している。多くの車両が走行する大規模な道路網では、交通流の変化に伴い、経路変更による交通ネットワーク流の大きな変動が起こりうる。本研究では、このような交通状態の変動を計算する *day-to-day dynamics* に基づいた交通量配分と、混雑に適應する信号制御方策を実装し、実在する大規模な道路網を模したデータを用いて性能評価を行うことで、実際の交通流に対する信号制御の有効性および課題を明らかにする。

**Key Words:** *traffic signal control, large road networks, dynamic traffic assignment, day-to-day dynamics*

## 1. はじめに

大規模な交通ネットワーク流の制御によって、大域的に交通混雑を減少させることは経済的、環境的な観点で重要である。交通混雑は、ボトルネックでの先詰まりをきっかけに後方、そして道路網全体へと広がっていく。通常、道路網におけるボトルネックは、交差点のような交通容量が絞られる地点で発生する。交差点のうち、交通量が多く、混雑が発生しやすい箇所には、原則として交通信号が設置されている。交通信号は安全性確保の役割に加え、パラメータ（サイクル、オフセット、スプリット）を調整することにより、交差点に流入する各道路の交通容量などを決定することができる。交通状況に合わせて適切に信号を制御すれば、交差点周辺、ひいては道路網全体に対する混雑解消の効果が見込める。

交通信号制御は、(1) 非飽和時制御と過飽和時制御、(2) 固定制御と適応制御、(3) 集中制御と分散制御、と分類できる<sup>1)</sup>。(1) について、交通流の混雑緩和を目指す信号制御のうち、実際の交通流率が交通容量を超えていない状況を想定したものを非飽和時制御、超えて混雑が発生している状況を想定したものを過飽和時制御と呼ぶ。(2) については、前者が過去の交通データな

どを基に、あらかじめ信号設定を決定しておく方式であるのに対し、後者はリアルタイムの交通状況に合わせて、信号設定を変化させていく方式である。(3) について、集中制御とは対象地域内の交通信号を中央集権的に制御する方式である。この方式のうち、世界的に導入されている代表的な制御システムとしては、SCATS<sup>2)</sup>、SCOOT<sup>3)</sup>などがある。集中制御は、広域の交通情報を一括で処理する必要があるため、大規模な地域に対してリアルタイムに適用する際には、データ通信や計算コストが膨大になることが予想される。一方で、分散制御とは、個々の信号機が自身の周辺で局所的に観測される情報のみに基づいて、大域的に交通ネットワーク流の安定化を目指す制御方式である。制御対象地域が大規模になった場合でも、データ通信や計算コストは変わらないため、大規模道路網に適用しやすいという利点がある。

いずれの制御方策も、適用時にはドライバーの経路選択行動による影響に注意しなければならない。Smith<sup>4)</sup>は、交通状況に応じたドライバーの経路変更を考慮しない信号制御方策がネットワーク容量やスループットを最大化できないことを指摘し、*P<sub>0</sub> Policy* と呼ばれるネットワーク容量の最大化および、利用者均衡状態への収束可能性を示した信号制御方策を提案している。ドライバーの経

路選択の変動に伴う交通状態の変化は、現実のように多くの車両が走行する複雑かつ大規模な道路網において特に大きくなると考えられる。そのため、実世界に適用する信号制御方策は、近視眼的な混雑状況だけではなく、その後変化するであろう経路選択行動に対しても、適応的に機能するのかどうかを検証する必要がある。しかし、これまで提案されてきた混雑適応型の信号制御方策は、簡易ネットワークでの理論証明および、小規模ネットワークでの性能検証に留まっており、実世界のように複雑かつ大規模なネットワークにおける性能についての知見は不足している。

本研究では、交通混雑緩和のために既往研究で提案されてきた適応的な分散型信号制御方策の大規模な道路網における有効性を検証する。具体的には、実在する大規模な道路網を模したネットワークデータを用いて信号制御を伴う交通流シミュレーションを実行することで性能評価を行う。交通流シミュレーションは、ドライバーが過去の実績を基に経路選択を行うことで利用者均衡状態への収束を試みる *day-to-day dynamics* に基づいた動的な交通量配分計算によって実行する。ここで、本研究で行うシミュレーションは、時間の進展とともに逐次交通流を更新する *within-day dynamics* に基づいた計算手法とは異なることに注意されたい。*day-to-day dynamics* に基づいた交通流シミュレーションでは、1日の全時間帯で、時間帯ごとの OD 交通量を基に交通流を計算し、その結果に基づいて一部のドライバーが経路変更を行う。この計算を繰り返すことにより、現実の行動規範に基づいた交通流の再現を目指すシミュレーションとなっている。信号制御のパラメータは、繰り返し計算の中で交通流の計算結果に基づいて調整される。すなわち、本研究における信号制御方策の評価は、完全に感応的な信号を想定したものではなく、例えば多段定周期信号<sup>1)</sup>のように、時間帯別の交通状況に合わせて、いくつかの設定パターンを与える信号のパラメータを日々少しずつ調整することを想定したものとなっている。

本論文の構成は以下のとおりである。第 2 章では、本研究で実行する交通流シミュレーションの概要を述べる。第 3 章では、実装した信号制御方策について説明する。第 4 章では、関西圏道路ネットワークデータを用いた数値計算を行う。第 5 章では、結論を述べる。

## 2. 交通流シミュレーション

本研究では、時々刻々と変化する交通状況に適応する 2 つの動的モデル（ドライバーの経路選択行動と交通信号の制御）を組み合わせた交通流シミュレーションによって、道路網全体の交通性能を評価する。本章では、本

研究の交通流シミュレーションに用いる FastDUE<sup>9)</sup>の概要を紹介する。

FastDUE は、大規模道路ネットワークへの適用を意図して開発された高速並列計算によって実行される動的な交通流シミュレータである。主な特徴は、*day-to-day dynamics* で記述したドライバーの経路選択行動によって動的な交通量配分を行うことである。これにより、現実の行動規範（Wardrop の第一原理）に即した利用者均衡状態に近い交通状況を再現する。本研究で行う、信号制御も含めた計算手順の概要を下記に示す。

- Step1: 道路ネットワークの初期状態（車両が存在しない状態）を仮定する。（ $day = 0$ ）
- Step2: 全車両から配分車両を一定数選択する。
- Step3: 現在の各リンクの旅行時間を基に、Step2 で選択した車両の経路を最短経路探索によって決定（更新）する。
- Step4: 各リンクを通過する全車両の旅行時間を更新する。
- Step5: 信号制御によって、交差点流入リンクの交通容量を更新する。
- Step6:  $day \geq$  指定日数であれば、計算を終了する。そうでない場合は、 $day \leftarrow day + 1$  として Step2 に戻る。

Step3 における経路選択の際には、車両ごとに並列して最短経路探索を行うことにより高速化を実現している。この際に、リンクコストの認知誤差を正規分布で与える確率的な経路選択を行うことで、現実のドライバーの行動を模した実装となっている<sup>6)</sup>。Step4 のリンク旅行時間更新の際にも、リンクごとに並列して計算を行うことで大規模な道路ネットワークに対しても適用可能な計算速度を実現している。本研究では、過大な渋滞が発生しないことを前提として、動的なリンクコストの計算には待ち行列の空間的延伸を考慮しないポイントキューモデルを用いている。そのため、待ち行列がリンクをはみ出していないかどうかについては、計算終了後に確認しなくてはならない。Step5 について、本研究における信号制御は、現実の信号機のように時間帯ごとに現示を切り替える実装ではなく、交差点流入リンクの飽和交通流率と信号のスプリットに基づいた交通容量の更新という形で実装している。

本研究で実装する *day-to-day dynamics* の計算手順は、ドライバーが過去の混雑状況に基づいてより良い経路を選択するという点においては、Liu and Smith (2015)<sup>7)</sup>で提案された Restricted Proportional Adjustment Process (RPAP) と同様である。ただ、交通流とスプリットの調整方法には多少の相違点がある。RPAP では、交通流の経路変更が経路コストの差に比例した量で行われているが、本研究では、ドライバーが再度確率的に最短経路探索をし直

す *Perturbed best response dynamics* と同様の方法を用いている。スプリットの調整に関して、RPAP では、方策によって決定される評価値の差に比例した量で交換が行われるのに対し、本研究では、事前に定めた一定の値で交換を行う。なお、RPAP では、交通流、スプリットともに交換される量は小さな値で行われることを仮定している。そのため、本研究においても、ドライバーの経路変更は全車両の 5%、スプリット調整はサイクル長の 1% 以下と、小さな値で行うように実装した。

### 3. 信号制御方策

本研究で評価対象とした複数の信号制御方策について、その概要を説明する。この章で説明する制御方策は、いずれも、図-1 のような、1 ノード、4 リンクで構成される、右左折直進専用レーンが設けられた十字型の交差点を対象としている。図-1 では便宜的に、同方向からの右左折直進を分離しない 2 パターンの信号現示を仮定している。ここで「ムーブメント」とは、図-1 でレーンごとの矢印によって示されているように、交差点を介したリンク間の移動のことを指し、「ステージ」とは、ある交差点において同じ青現示が与えられるムーブメント群のことを指す。

分散型の信号制御はステージごとの「プレッシャー」と呼ばれる評価値を用いて行うものが多い。Max Pressure (MP) 制御はその代表的な例である。MP 制御の基本的なアルゴリズムを下記に示す：

Step1: 任意の方策に基づき、時間帯  $t$  において、信号有り交差点ノード  $n$  を介するステージ  $a$  のムーブメント  $m_{ij} \in M_{n,a}$  の重み  $w_{ij}(t)$  を計算する。

Step2: 各交差点  $n$  のステージ  $a$  において、以下の式で  $p_{n,a}(t)$  を計算する：

$$p_{n,a}(t) = \sum_{m_{ij} \in M_{n,a}} \max(w_{ij}(t), 0). \quad (1)$$

Step3: 各交差点ノード  $n$  において、以下の式でプレッシャーが最大となるステージを選択し、次の時間帯  $t + 1$  における青現示を与える：

$$a^*(t + 1) \leftarrow \operatorname{argmax}_{a \in S_n} p_{n,a}(t). \quad (2)$$

このようなアルゴリズムの形式で提案された代表的な信号制御方策として、Back Pressure (BP) Policy が挙げられる。BP Policy は、元々、Tassiulas and Ephremides<sup>8)</sup>によって提案された通信ネットワークにおけるパケットの負荷分散を行う制御方策である。交通信号への適用は、Wongpiromsam<sup>9)</sup>や Varaiya<sup>10)</sup>によって提案された。BP Policy の最大のメリットは、分散型の信号制御の下で、交差点における待ち行列が有限解に収束することを保証する点

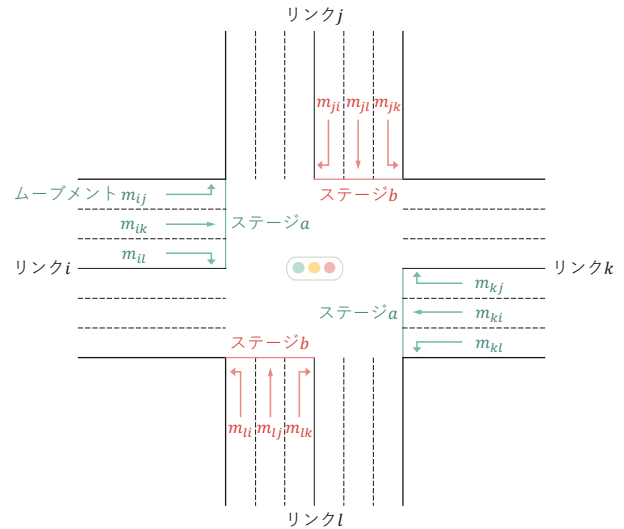


図-1 交差点の例

にある。このメリットは、交通信号に適用された場合にも保持される。しかし、BP Policy では通常、混雑に対して適応的に行われるドライバーの経路変更を考慮していない。すなわち、利用者均衡への収束を意図していないため、ドライバーの経路変更による交通混雑の悪化が起こる可能性がある。それに対し、道路ネットワークにおける利用者均衡への収束を意図した方策として、Smithによって提案された  $P_0$  Policy<sup>4)</sup>がある。 $P_0$  Policy は簡易ネットワークあるいは、限定的な条件の下で、ネットワーク容量の最大化や利用者均衡への収束可能性が示されている。本研究では、これらの分散型信号制御方策の大規模道路ネットワークにおける有効性を、第 2 章で説明した *day-to-day dynamics* のフレームワークに基づいて検証した。

MP 制御アルゴリズムは、現実におけるリアルタイム制御、すなわち *within-day* の時間軸上で制御を行うが、本研究で用いるシミュレーションでは、*day-to-day* の時間軸上で信号パラメータを調整するようになっている。このため、本研究では MP 制御のうち Step3 の処理を *day-to-day* の調整に適するように修正する。本来のアルゴリズムは、式 (2) で示されるとおり、青現示のサイクルを考慮せずに時間帯ごとに青現示とするステージを選択する制御方式である。この部分について、本研究では、第 2 章で説明したように、プレッシャーの大小に基づいてスプリットを交換する方式に変更した。この変更によって、各ステージのスプリットはプレッシャーが等しくなるように調整されるようになる。本来の MP 制御の場合も各ステージのプレッシャーが等しくなるように調整が行われるはずであることを考慮すれば、この変更は妥当といえよう。以下では、本研究で検証を行った 4 種類の BP Policy および、2 種類の  $P_0$  Policy について説明する。

(1) Back Pressure Policy

BP Policy の特徴は、交差点に接続する上流リンクと下流リンクそれぞれで計算された混雑指標の差を重みとすることである。上流だけではなく下流の混雑を考慮することで、実質的に下流への流入制御を行うことが可能な方策となっている。本研究では、BP Policy のうち、a) 標準的な BP、b) 右左折直進率を必要としない BP、c) 待ち行列の上限を考慮する BP、d) 旅行時間ベースの BP の評価を行った。

a) 標準的な BP

標準的な BP<sup>10)</sup>における式 (1) の重み $w_{ij}(t)$ の計算式を式 (3) に示す：

$$w_{ij}(t) = s_i \cdot \left( Q_{ij}(t) - \sum_{k \in O_m} r_{jk} \cdot Q_{jk}(t) \right) \quad (3)$$

- $s_i$  : (上流) リンク*i*の飽和交通流率
- $Q_{ij}(t)$  : 時刻*t*におけるリンク*i*から*j*に移動する車両の待ち行列台数
- $r_{jk}$  : リンク*j*から*k*への移動を選択する確率 (下流リンクの右左折直進率)
- $O_m$  : 下流接続ノード*m*の流出リンク集合。

式 (3) を MP 制御に適用した場合、ポイントキューモデルにおいて、交差点への車両の確率的到着を仮定した際に待ち行列の有限解への収束が保証されている。そのため、待ち行列台数の上限が十分大きい場合には、渋滞が延伸することなく、スループットを最大化できる。

b) 右左折直進率を必要としない BP

前項で説明した標準的な BP をより実務的な状況に適するように拡張した方策を説明する。標準的な BP では、レーン (ムーブメント) ごとに待ち行列台数を観測する必要があることや、右左折直進率を正確に推定することが求められることから、現実での実装が難しいという問題点がある。そこで、実道路網への適用を容易にするために、右左折直進率を必要としない BP が提案されている<sup>11)</sup>。重みの計算式を式 (4) に示す：

$$w_{ij}(t) = s_i \cdot d_{ij}(t) \cdot (Q_i(t) - Q_j(t)) \quad (4)$$

$$d_{ij} = \min(Q_{ij}(t)/s_i, 1)$$

- $s_i$  : (上流) リンク*i*の飽和交通流率
- $Q_i(t)$  : 時刻*t*におけるリンク*i*の待ち行列台数。

ムーブメントの存在を示すバイアス量 $d_{ij}$ を導入することで、右左折直進率を考慮しない方策に修正されている。さらに、レーンごとではなくリンクごとの待ち行列台数によって方策を実行できるように拡張されているため、現実の道路網への実装が比較的容易になっている。この方策も式 (3) の方策と同様に、ポイントキューモデルにおける待ち行列の有限解への収束を保証する。

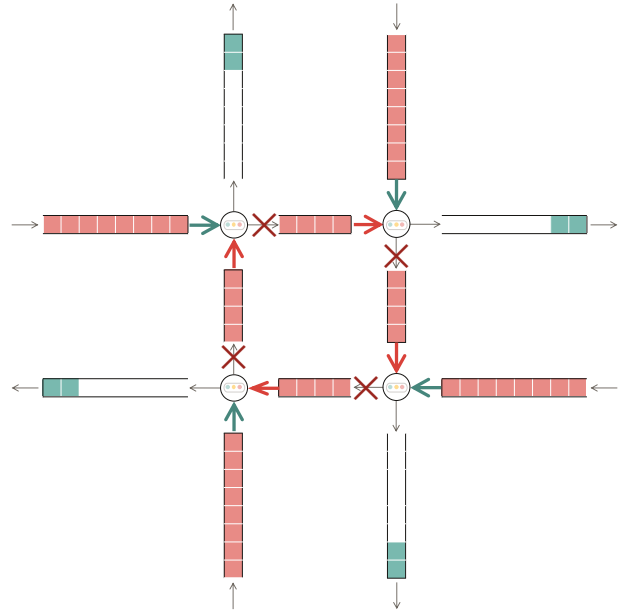


図-2 work-conservative でない例 (円は信号付き交差点を表している。赤と青の矢印は、BP 適用時の赤現示と青現示を示す)

c) 待ち行列の上限を考慮する BP

先述のとおり、BP は道路ネットワークの安定化の観点で望ましい性質を持っている。しかし、上記で紹介した BP はいくつかの限定的な状況において、むしろ混雑を悪化させてしまうことが問題点として指摘されている<sup>10)12)13)14)</sup>。その中でも特に致命的なものとして work-conservative でないという問題が挙げられる。「work-conservative でない」とは、信号制御によって、あるステージに青現示 (追加スプリット) が与えられたにもかかわらず、そのステージにおいて、車両の移動が発生しない状況を指す。図-2 は、work-conservative でない信号が隣接することによってグリッドロックが引き起こされた最悪のケースを示している。work-conservative でない状況は、BP Policy が待ち行列の台数でプレッシャーを計算していることに起因する。待ち行列台数の絶対量を混雑指標とした場合、リンクの待ち行列の飽和度 (実際の待ち行列台数/待ち行列の上限) を考慮できない。そのため、図-2 のように、上流リンクが長く待ち行列の上限が大きい場合や、下流リンクが短く待ち行列の上限が小さい場合、それらのリンクが属するステージのプレッシャーは過小評価される傾向がある。このような状況を回避するために、提案された方策が Capacity-Aware Back Pressure (CABP)<sup>14)</sup>である。式 (5) に重みの計算式を示す：

$$w_{ij}(t) = s_i \cdot d_{ij}(t) \cdot (W_i(t) - W_j(t))$$

$$W_i(t) = \min \left( 1, \frac{\frac{Q_i(t)}{C_i} + \left(2 - \frac{C_i}{C_\infty}\right) \left(\frac{Q_i(t)}{C_i}\right)^m}{1 + \left(\frac{Q_i(t)}{C_i}\right)^{m-1}} \right) \quad (5)$$

- $s_i$  : (上流) リンク  $i$  の飽和交通流率  
 $d_{ij}(t)$  : リンク  $i$  から  $j$  に向かう車両の存在指標  
 $W_i(t)$  : 時刻  $t$  におけるリンク  $i$  の混雑指標  
 $Q_i(t)$  : 時刻  $t$  におけるリンク  $i$  の待ち行列台数  
 $C_i$  : リンク  $i$  の待ち行列台数の上限  
 $C_\infty, m$  : パラメータ.

$d_{ij}$  はリンク  $i$  から  $j$  への移動車両が存在すれば 1, しなければ 0 とする. 式 (5) は, 待ち行列台数をその上限によって正規化することでリンク待ち行列の飽和度を考慮した方策である. また, リンク待ち行列の上限に対する凸関数を用いることによって, 待ち行列がリンクを超えて延伸しにくくなるように設計されている. 待ち行列の収束性に関しては混雑指標  $W_i$  が待ち行列台数と線形関係にある場合に保証される. 式 (5) は, リンク待ち行列の上限が無限大のときに混雑指標  $W_i(t)$  が待ち行列台数と線形関係になる性質を持つため, 従来の BP の利点を保ちつつ適切に拡張された方策ということができよう.

#### e) 旅行時間ベースの BP

旅行時間ベースの BP<sup>15)</sup> について説明する. この方策の特筆すべき利点は, 待ち行列台数を混雑指標とする従来の BP が抱えていたラストパケット問題を回避できることである. 従来の BP では, あるステージに対する交通流率が 0 になった時に, 他のステージに対する交通流率が交通流率 0 のステージよりも長い待ち行列を形成し続けるほど大きい場合, 交通流率 0 のステージに残った待ち行列が解消されない. このように, 車両 1 台 1 台が経験する混雑度合いが考慮されないことで一部の車両の遅れ時間が過大になる問題をラストパケット問題と呼ぶ. 旅行時間ベース BP では, 従来の BP における待ち行列台数ベースの混雑指標を旅行時間ベースに変更することにより, ラストパケット問題を回避できる. 重みの計算式を式 (6) に示す:

$$w_{ij}(t) = s_i \cdot \left( \frac{tt_i(t)}{fftt_i} - \sum_{(j,k) \in O_m} r_{ij} \cdot \frac{tt_j(t)}{fftt_j} \right) \quad (6)$$

- $s_i$  : (上流) リンク  $i$  の飽和交通流率  
 $tt_i(t)$  : 時刻  $t$  において, 実際にリンク  $i$  を通過した車両が経験した旅行時間  
 $fftt_i$  : リンク  $i$  の自由流旅行時間  
 $r_{ij}$  : リンク  $j$  から  $k$  への移動を選択する確率 (下流リンクの右左折直進率).

この制御方策も前項の CABP と同様に, 正規化された旅行時間を用いることにより, work-conservative であることが示されている. しかし, これらの問題点が回避できることは保証されているものの, 旅行時間ベース BP 自体の理論的な安定性証明は行われていない. ただ, 数値計算や, 現実の道路網で行われた実証実験においては, 一定の性能が示されている.

#### (2) $P_0$ Policy

信号制御方策  $P_0$  Policy について説明する. この方策の注目点は, 近視眼的な交通状態だけではなく, その交通状態によって起こるであろうドライバーの経路選択を考慮していることである.  $P_0$  Policy の重み計算式を式 (7) に示す:

$$w_{ij} = s_i b_i(t) \quad (7)$$

- $s_i$  : (上流) リンク  $i$  の飽和交通流率  
 $b_i(t)$  : リンク  $i$  におけるボトルネックでの遅れ時間.

Smith<sup>4)</sup> は,  $P_0$  を初めて提案したときに, 非常に簡易なネットワーク (1 起点 1 終点 1 交差点) において, ドライバーが経験する経路コストが交通量に対して単調増加になる仮定を適用した上で, 利用者均衡への収束性と容量の最大化を証明した. その後, 動的な交通流モデルに適用した Liu and Smith<sup>7)</sup> では,  $P_0$  がネットワークスループットを最大化するようなドライバーの経路選択行動を促す方策であることを強調している.  $P_0$  は, リンク  $i$  の交通量  $x_i$  および赤時間割合  $r_i$  を用いることで,

$$s_1 b_1(x_1 + s_1 r_1) = s_2 b_2(x_2 + s_2 r_2) \quad (8)$$

の式によって, 赤時間コスト  $s_i b_i(x_i + s_i r_i)$  を基に赤時間を決定する方策だと捉えることもできる. 飽和交通流率  $s_2$  が大きい場合は,  $P_0$  は, 各リンクの赤時間割合を適切に選択することで, ボトルネック遅れ時間である  $b_2(x_2 + s_2 r_2)$  が小さくなるように制御を行う. すなわち,  $P_0$  は, 飽和交通流率の大きなリンクを使用するように経路変更を促して混雑を軽減する方策だといえる.

$P_0$  は, 待ち行列理論におけるリトルの公式を用いて式 (9) のように変形することもできる<sup>16)</sup>:

$$w_{ij} = \frac{Q_i(t)}{g_i(t)} \quad (9)$$

- $Q_i(t)$  : 時刻  $t$  におけるリンク  $i$  の待ち行列台数  
 $g_i(t)$  : 時刻  $t$  におけるリンク  $i$  に与えられたスプリット.

この変形により, 待ち行列台数とスプリットの情報のみに基づいて方策を実行することが可能となる. 本研究での  $P_0$  Policy の実装にあたっては, 式 (7) と式 (9) で示される重み計算式を用いた.

#### 4. 数値計算

関西圏の道路網における平時の交通需要を想定した交通流シミュレーションを行った. 以下では, 使用データをはじめとするシミュレーションの設定を説明したのち, 数値計算の結果と考察を述べる.

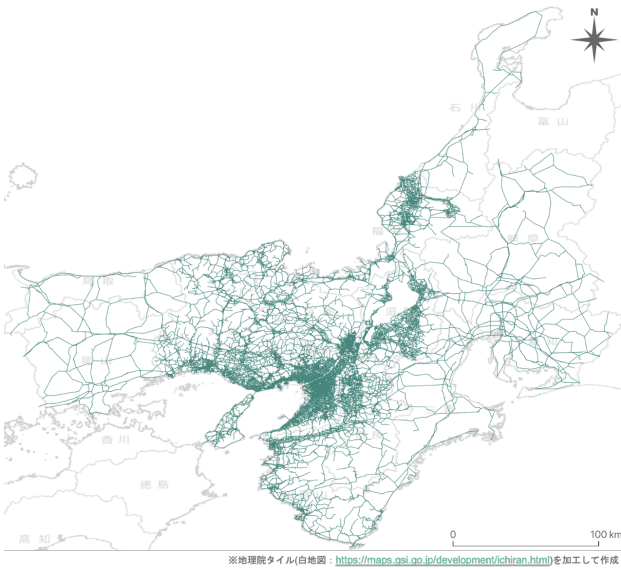


図-3a 全域

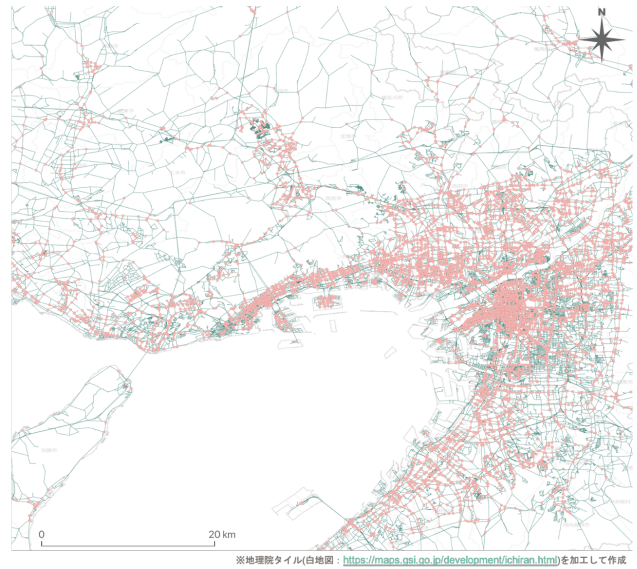


図-3b 関西主要都市圏（大阪-神戸市間周辺）

図-3 関西圏道路ネットワーク

(1) シミュレーションの使用データと設定

シミュレーションで使用したデータについて説明する。図-3に、関西圏の道路網を再現するネットワークデータを示す。ネットワークデータには、デジタル道路地図（DRM: Digital Road Map）を用いた。リンク数は 310,584、ノード数は 127,324 である。なお、DRM は、上下方向が分離された道路を表現する際に、交差点内に井桁構造のループリンク群が存在する場合がある。このような構造が存在するネットワークデータでシミュレーションを実行すると、交差点内に車両が滞留する可能性がある。この現象は現実世界では通常起こり得ない。そのため、交差点内で形成されるループリンク群を 1 ノードに集約する処理を行うことで、ネットワークデータを修正した。また、シミュレーションの計算負荷を減らすために、交差点を介さない一続きのリンク群のうち、容量や道路種別が同じもの 1 リンクにまとめる簡略化処理を行っている。上記のリンク数、ノード数、および図-3 で示すネットワーク構造はこれらの処理後のデータに基づいている。交通需要データには、日常活動需要シミュレータ ASTRO（Activity Scheduler To Reproduce Observed behavioral data with trip-chain condition）<sup>17)</sup>によって作成した時間帯別 OD 交通量データを用いた。ASTRO は、大規模交通調査データを用いて、個人の 1 日の活動・トリップスケジュールを作成するアクティビティシミュレータである。これにより生成された 1 日の OD 交通量は、普通車・大型車を合わせて 8,144,701 台である。FastDUE では、一連の車両群を 1 つの「パケット」にまとめて計算できる。本研究では、車両 10 台を 1 パケット（大型車は 5 台を 1 パケット）にまとめて計算を行った。OD 交通量の日内変動（1 時間ごと）は図-4 のとおりである。

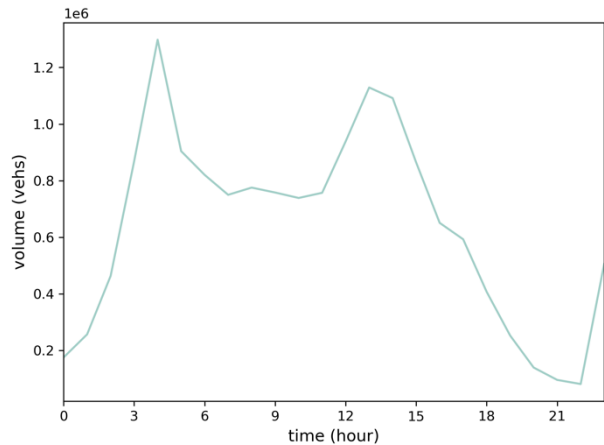


図-4 1 日の時間帯別 OD 交通量

交通信号の設定について説明する。本研究では、関西圏の道路網に存在する 14,149 箇所の交通信号を制御対象とした。信号の位置特定には、Overpass API<sup>18)</sup>を用いて Open Street Map（OSM）から取得したデータを使用した。具体的には、API を用いて取得した OSM の交通信号ノードに対して、マンハッタン距離 50m 以下に交差点ノードが存在する場合、そのノードを信号存在ノードとして制御対象とした。図-3b に信号存在ノードの一部を示している。信号の設定に関しては、第 2 章でも述べたとおりサイクルやオフセットは考慮せずにスプリットのみを考慮する。ロスタイムはサイクル長の 2.5% とし、各ステージの最低青時間はサイクル長の 1% とした。ステージの構築に関しては、右左折直進を分離せず、同一リンクから流入するムーブメントは同一ステージに分類した。三叉路、四叉路では、ネットワークデータの座標情報を基に、上下方向を表すリンクを同一ステージに分類して

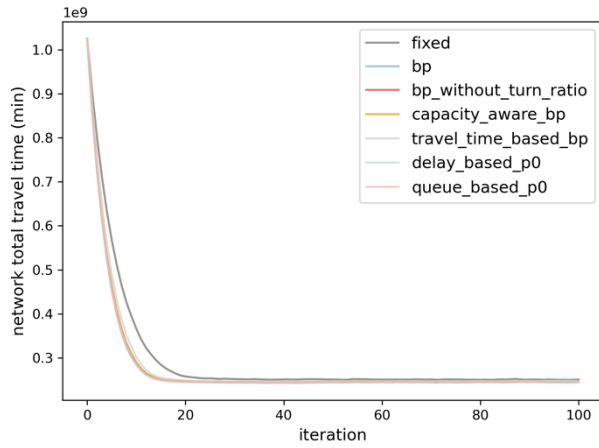


図-5 総旅行時間の変動 (0~100日目)

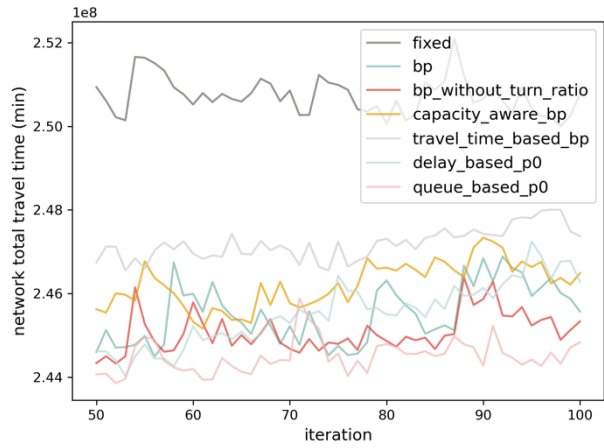


図-6 総旅行時間の変動 (50~100日目)

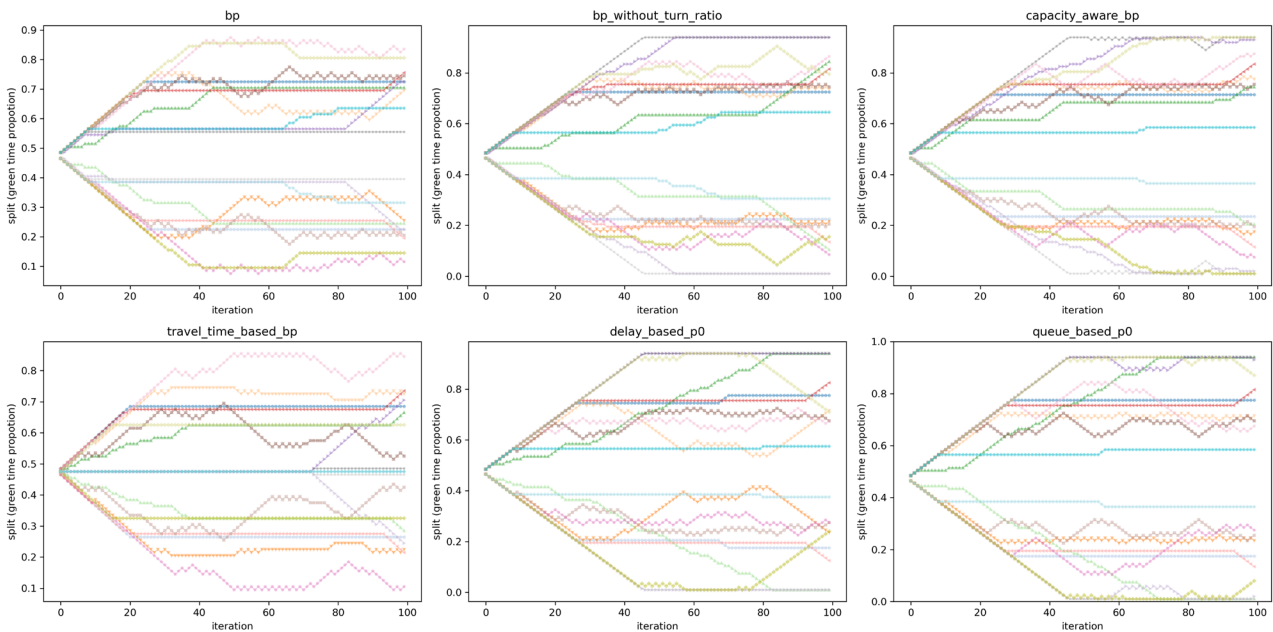


図-7 スプリットの調整過程 (同一の信号に属するステージは同じマーカーで示している)

いるが、それ以上の多叉路では上下方向の判断が困難なため、流入リンクごとにステージ分類を行っている。1日内を1時間ごとに分割し、時間帯ごとに異なるスプリットの値を設定し調整するように制御を行った。その他、シミュレーションの実行方法、信号の制御方法は、第2章と第3章で説明したとおりである。

(2) 計算結果

計算は、100日(イテレーション)分行った。図-5に0~100日目、図-6に50~100日目のday-to-dayの繰り返し計算による総旅行時間の変動を示す。以降の図中において、fixedは各ステージのスプリットが等しく保たれた固定制御を示し、bpは式(3)、bp\_without\_turn\_ratioは式(4)、capacity\_aware\_bpは式(5)、travel\_time\_based\_bpは式(6)、delay\_based\_p0は式(7)、queue\_based\_p0は

式(9)の重み計算式を用いる方策を示す。図-5から、総旅行時間の収束が固定制御に比べて10日ほど早いことが確認できる。イテレーション後半の結果を示す図-6からも、総旅行時間が固定制御時よりも小さい値に収まっていることがわかる。このことから、いずれの方策も固定制御と比べて、ネットワーク全体の混雑を減少させるように機能しているといえる。各方策の性能を比較すると、他の制御方策に比べてqueue\_based\_p0はほぼすべてのイテレーションにおいて総旅行時間が小さく、travel\_time\_based\_bpは大きい。その他の方策に関しては、capacity\_aware\_bpのみ若干総旅行時間が大きくなっているがあまり差はないといえる。queue\_based\_p0の結果に関しては、ドライバーの経路選択を考慮して利用者均衡への収束を促すP0Policyの性質が効果的に機能していると考えられる。queue\_based\_p0と理論上同じ方策といえ

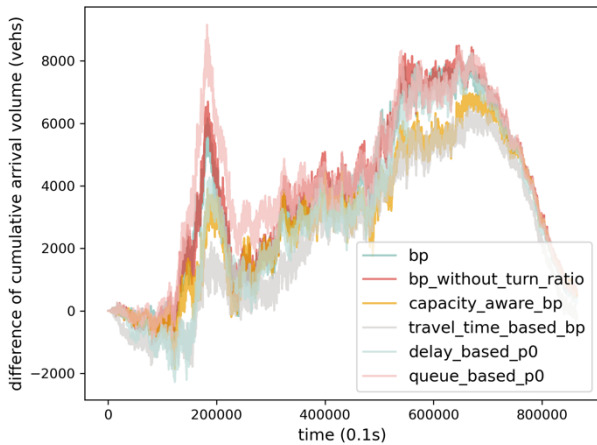


図-8 累積到着交通量の固定制御時との差 (100日目の結果)

る `delay_based_p0` の結果は異なっているが、これは信号が混雑状況を認知するタイミングの差に起因すると考えられる。現実において、待ち行列は(可能な場合)リアルタイムで観測されるが、遅れ時間はリンクを流出する際に初めて観測される。本研究でもこれらの状況を想定した実装を行っている。そのため、`delay_based_p0` は `queue_based_p0` と比較して混雑状況の認知がやや遅れる。おそらく、このことが原因で `delay_based_p0` の性能が若干悪化していると考えられる。他の制御方策と比較して総旅行時間が平均的に大きかった `travel_time_based_bp` の性能に関しては、第3章で説明したように、方策自体の理論保証が不足していることが原因だと考えられる。`bp` と `bp_without_turn_ratio` の総旅行時間に関しては、イテレーションで差はあるものの平均的にはほとんど差がないといえる。この結果は、右左折直進率やレーンごとの待ち行列の観測を伴わなくても `BPPolicy` が十分性能を発揮できることを示しているといえよう。ドライバーの経路変更に対する制御性能に関しても、図-6で大きなハンチングを起こしていないことから、`BP Policy` は `P0 Policy` 同様、適切に機能していると考えられる。

図-7に各方策によるスプリットの調整過程を示す。これらのグラフは、任意に選択した10箇所の同一信号における14時台のスプリットの日間変動を可視化している。いずれのグラフにおいても同じ信号の同じステージは同じ色で示した。どの方策を適用した場合でも、基本的にはスプリットがいずれかの値に収束していることがわかる。しかし、一部収束がみられないものや方策ごとに収束点異なるものも見受けられる。一部信号において収束がみられない理由は、ドライバーの経路変更による混雑状況の日間変動が大きいため、各ステージのプレッシャーが等しくならないからだと考えられる。

図-8に、各方策適用時における0.1秒ごとの累積到着交通量を、固定制御時との差をとって可視化したグラフを示す。図-8も含め、以降では、図-5で示される総旅行

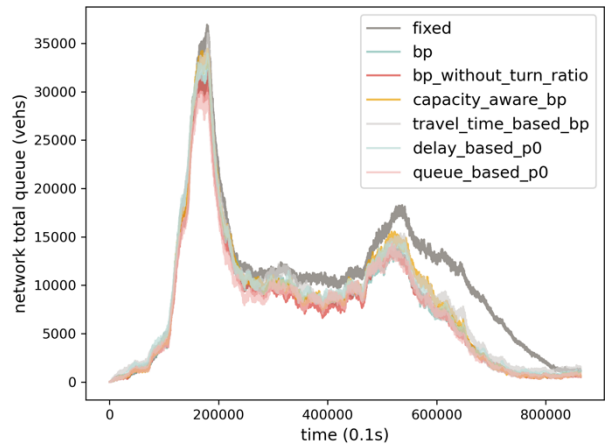


図-9 ネットワーク上の総待ち行列台数 (100日目の結果)

時間が十分安定したと考えられる100日目の結果を用いて評価を行う。いずれの方策も固定制御時と比較して良好なスループットを実現している。特に、5時頃と15~19時頃に顕著な差が表れており、図-4で示したOD交通量のピークから少し遅れた時刻にピークを迎えていることがわかる。このことから、道路網に車両が多く存在する時間帯に信号制御の効果が大きくなると考えられる。なお、混雑状況はイテレーションで変動するため、図-8は必ずしも方策の優劣を示すわけではないことに注意されたい。図-9に、日内における0.1秒ごとのネットワーク上の総待ち行列台数を示す。固定制御時と比較すると、制御方策適用時はほぼすべての時刻で待ち行列台数を少なく保っている。特に、OD交通量が減少し始める14時頃以降において固定制御時との大きな差がある。このことから、本研究で適用した制御方策は、交通需要のピーク後における混雑解消効果が特に大きいと考えられる。この傾向については、図-8において、14時頃以降の累積到着交通量が固定制御時と比較して大きな差を示していることから、同様のことがいえる。

表-1に、固定制御および制御方策適用時におけるリンク混雑状況を示す。混雑リンク数とは、車両の平均旅行時間が自由流旅行時間を上回ったリンクの数を示す。待ち行列超過リンク数とは、日内のうち一度でも待ち行列台数が滞留可能台数を越えたリンクの数を示す。いずれの方策も、混雑リンク数や待ち行列超過リンク数が固定制御時よりも多いため、ネットワークの混雑を悪化させているように見える。しかし、ネットワーク全体では、図-5、図-6、図-8、図-9で示したとおり、制御方策適用時には、固定制御時と比較して混雑が小さくなっている。これらのことから、各制御方策は、車両を比較的混雑の少ないリンクに分散させることにより致命的なボトルネックを生まないように制御していると考えられる。このような制御は、各方策が `P0 Policy` のように、ネットワーク全体の混雑を減少させるような車両の経路変更を促し



表-1 制御方策ごとのリンク混雑状況

制御方策	混雑 リンク数	待ち行列超過 リンク数
fixed	63,931	10,738
bp	67,297	11,058
bp_without_turn_ratio	67,580	11,195
capacity_aware_bp	67,844	11,145
travel_time_based_bp	67,997	11,294
delay_based_p0	68,094	11,536
queue_based_p0	67,037	11,098

ていると捉えることができる。しかし、いずれの制御方策もポイントキューモデルを仮定しているため、待ち行列が滞留可能台数を超えるリンクをむしろ増加させてしまっていることが問題点として挙げられる。この問題点は、待ち行列の空間的延伸を考慮するフィジカルキューモデルを適用した場合、あるいは現実の道路網に適用された場合には、ネットワーク全体の混雑状況が悪化することを示唆している。リンクの待ち行列の上限を考慮して制御する `capacity_aware_bp` の結果でさえも待ち行列超過リンク数が多いことから、ポイントキューモデルを前提とした信号制御方策は、混雑の空間的な拡大を助長してしまう可能性があると考えられる。これらの結果から、本研究では、評価対象とした信号制御方策いずれについても、渋滞の延伸を考慮しなくてよい状況下においてのみ、その有効性を示したというべきであろう。

## 5. 結論

本研究では、混雑に適応する分散型の信号制御方策の大規模道路網における性能評価を行った。信号制御方策について得られた知見は大きく 3 点ある。1 点目は、各信号制御方策において、限られた条件下や簡易ネットワークで証明されてきた理論と同様の結果が大規模ネットワークに対してもいえるということである。関西圏の道路網のような大規模な地域で分散的に適用した場合でも、ネットワークスループットの向上、総旅行時間の減少、待ち行列延伸の抑制といった効果を有していることを示した。2 点目は、本研究で取り上げた信号制御方策は、交通需要が集中する時間帯や交通需要のピーク後において、特に大きな効果を発揮するということである。これは、時間帯別に変化する需要に対しても効率的に制御できることや、過飽和時の深刻な混雑を回避できる可能性を示しており、非常に望ましい性質といえる。3 点目は、いずれの方策もスプリットの収束点を見つけることができない場合があるということである。このような信号交差点の特徴を分析することは、今後の課題である。

今回行った `day-to-day dynamics` に基づく交通流・信号制

御シミュレーションは、日ごとの交通状況がおおよそ安定している地域における交通信号の効果的な設定に寄与できると考えられる。実務において、仮にリアルタイムでの信号制御が困難な場合でも、対象地域の道路網や交通需要に関するデータセットが揃っていれば、一定の混雑緩和効果を見込める信号設定が可能である。ただ、近年の情報通信技術の発展を考慮すると、`within-day dynamics` に基づいたシミュレーションを実行することによって、リアルタイムで感応的に実行される制御方策の性能を評価することも重要である。

今後の課題を 3 点挙げる。1 点目は、上述したように、安定的に制御できなかった一部の信号交差点周辺の交通状況を分析することで、各方策の特徴を改めて整理することである。実規模ネットワークでの分析は、簡易ネットワークでの理論検証だけではわからなかった特徴の把握、ひいてはより良い方策の構築へとつながる可能性があるため、さらに詳細な分析を行うべきだと考える。2 点目は、より詳細な検証を行うためのシミュレーションの機能拡張である。本研究のシミュレーションにおいて、信号のサイクル長やオフセットを考慮していなかった点や、ステージの構築を流入リンクごとに行っていた点は、現実の信号機と比較してやや簡略化されすぎているため、実現象との不整合性を生じさせる可能性がある。そのため、信号機をより現実的な形式で実装することが望まれる。さらに、このような拡張に伴って、現示のサイクルを考慮可能な `BP19` や、スプリットに加えサイクル長も同時に決定する方策 `20` など、詳細な信号設定を考慮する方策の検証を行うことも必要であろう。3 点目は、空間的な渋滞の延伸を考慮した交通流シミュレーションによる信号制御方策の評価を行うことである。本研究で適用した信号制御方策は、ポイントキューモデルを仮定したもものとなっている。そのため、渋滞が交差点を超えて延伸するような場合には、第 4 章でも述べたとおり、既往研究で証明されてきた望ましい性質を失ってしまう可能性が高い。この問題に対処するためには、フィジカルキューモデルを前提とした信号制御方策の構築や、別種類の交通流制御と信号制御を組み合わせることが必要だと考えられる。例えば、本研究で取り上げた `P0 Policy` は、渋滞の空間的延伸に対応するために、混雑料金と組み合わせた場合の拡張が行われており、その有用性も示されている `21`。このような別種類の交通流制御と組み合わせた信号制御方策の性能検証も、本研究と同様に行うべきである。これらの課題に対する拡張については、別の機会に改めて報告したい。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金（基盤研究 (A) 「MaaS+CV 時代の次世代交通システムに向けたインフラと制度の設計」、課題番号 20H00265、代表：井料隆

雅), 科学研究費補助金(基盤研究(A)「ポスト・ビッグデータ時代に向けた次世代交通システムの動的マネジメント手法の構築」, 課題番号 16H02368, 代表: 井料隆雅)の一環として実施された。本研究で用いた交通流シミュレータ FastDUE は, 「ポスト「京」で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究開発(文部科学省)」の重点課題(3)「地震・津波による複合災害の統合予測システムの構築」のサブ課題 B「統合的予測のための社会科学シミュレーションの開発」で開発したものである。

#### 参考文献

- 1) 交通工学研究会:改訂 交通信号の手引き,交通工学研究会, 2006.
- 2) Sims, A. G. and Dobinson, K. W.: The sydney coordinated adaptive traffic (scat) system philosophy and benefits, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.29, No.2, pp.130–137, 1980.
- 3) Robertson, D. I. and Bretherton, R. D.: Optimizing networks of traffic signals in real time—the scoot method, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.40, No.1, pp.11–15, 1991.
- 4) Smith, M.: Traffic control and route-choice; a simple example, Transportation Research Part B: Methodological, Vol.13, No.4, pp.289 – 294, 1979.
- 5) Iryo, T, Urata, J., Fukuda, K., Peque, G. Jr. Petprakob, W., and Wijerathne, L., Fast calculation of dynamic traffic assignment by parallelised network loading algorithm, ISTS and IWTDCS 2018, Matsuyama, Japan, 2018.
- 6) Sheffi, Y. and Powell, W. B.: An algorithm for the equilibrium assignment problem with random link times, Networks, Vol.12, No.2, pp.191–207, 1982.
- 7) Liu, R. and Smith, M.: Route choice and traffic signal control: A study of the stability and instability of a new dynamical model of route choice and traffic signal control, Transportation Research Part B: Methodological, Vol.77, 07 2015.
- 8) Tassioulas, L. and Ephremides, A.: Stability properties of constrained queueing systems and scheduling policies for maximum throughput in multihop radio networks, 29th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 2130–2132 vol.4, 1990.
- 9) Wongpiromsarn, T., Uthaicharoenpong, T., Wang, Y., Frazzoli, E., and Wang, D.: Distributed traffic signal control for maximum network throughput, 2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, pp. 588–595, 2012.
- 10) Varaiya, P.: Max pressure control of a network of signalized intersections, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.36, pp.177 – 195, 2013.
- 11) Gregoire, J., Frazzoli, E., de La Fortelle, A., and Wongpiromsarn, T.: Back-pressure traffic signal control with unknown routing rates, IFAC Proceedings Volumes, Vol.47, No.3, pp.11332 – 11337, 2014, 19th IFAC World Congress.
- 12) Smith, M. J., Liu, R., and Mounce, R.: Traffic control and route choice; capacity maximization and stability, Transportation Research Procedia, Vol.7, pp.556 – 577, 2015, 21st International Symposium on Transportation and Traffic Theory Kobe, Japan, 5-7 August, 2015.
- 13) Smith, M. J., Iryo, T., Mounce, R., Rinaldi, M., and Viti, F.: Traffic control which maximises network throughput: Some simple examples, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.107, pp.211 – 228, 2019.
- 14) Gregoire, J., Frazzoli, E., de La Fortelle, A., and Wongpiromsarn, T.: Capacity-aware backpressure traffic signal control, IEEE Transactions on Control of Network Systems, Vol.2, 09 2015.
- 15) Mercader, P., Uwayid, W., and Haddad, J.: Max-pressure traffic controller based on travel times: An experimental analysis, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.110, pp.275 – 290, 2020.
- 16) Smith, M.: A local traffic control policy which maximizes the overall travel capacity of an urban road network, Traffic Engineering and Control, Vol.21, 06 1980.
- 17) 佐々木泰, 浦田淳司, 井料隆雅. 災害復旧期における日常活動需要計算のためのアクティビティシミュレータの構築. 第 60 回土木計画学研究発表会・講演集 (CD-ROM), 2019.
- 18) “JA:Overpass API - OpenStreetMap Wiki”, [https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Overpass\\_API](https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Overpass_API), (2020/9/19 閲覧)
- 19) Le, T., Kovács, P., Walton, N., Vu, H. L., Andrew, L. L., and Hoogendoorn, S. S.: Decentralized signal control for urban road networks, Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Vol.58, pp.431 – 450, 2015, Special Issue: Advanced Road Traffic Control.
- 20) Nilsson, G. and Como, G.: On generalized proportional allocation policies for traffic signal control, IFAC-PapersOnLine, Vol.50, No.1, pp.9643 – 9648, 2017, 20th IFAC World Congress.
- 21) Smith, M., Huang, W., Viti, F., Tampère, C. M., and Lo, H. K.: Quasi-dynamic traffic assignment with spatial queueing, control and blocking back, Transportation Research Part B: Methodological, Vol.122, pp.140 – 166, 2019.

## EVALUATION OF CONGESTION-ADAPTIVE SIGNAL CONTROL POLICIES FOR A LARGE-SCALE ROAD NETWORK

Taiga MATSUBARA and Takamasa IRYO