

# 情報伝播の遅延が 交通混雑に与える影響

井料 隆雅<sup>1</sup>・古田 昌弥<sup>2</sup>・口井 雅之<sup>3</sup>・桑原 雅夫<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 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: iryo@kobe-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 中日本高速道路株式会社 (〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦2-18-19)  
E-mail:m.furuta.ad@c-nexco.jp

<sup>3</sup>非会員 神戸大学工学部市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)  
E-mail:1334222t@stu.kobe-u.ac.jp

<sup>4</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:kuwahara@plan.civil.tohoku.ac.jp

災害時やイベントなど非日常的な状況においては、ドライバーは過去の経験をもとにした選択行動をとることができない。また、適正な情報提供ツールが使用可能とも限らない。このような場合には道路上の交通混雑に関する情報はドライバー間で伝播することが予想されるが、情報交換の頻度には制約があり、場合によって非常に遅くなることもありうる。情報交換の頻度が低いことにより発生する情報伝播の遅延が、最終的に道路ネットワークの混雑にどのように影響するかを示す。特に、災害時のアプリケーションを意識し、グリッドロックに関する分析を数値計算により行った。結果として、情報交換の頻度が高いとグリッドロックは一般には発生しづらいが、全OD交通量が低いときには、逆の傾向にもなりうるということが観測された。

*Key Words* : information transmission, gridlock

## 1. はじめに

交通混雑は交通システム上での人々の交通行動の結果として発生するものであり、交通行動のメカニズムの差異は交通混雑の巨視的な特徴に影響を与える。そして、交通行動を解析する際には、その選択肢の良しあしを判断するために必要な情報が、人々にどのようにいきわたっているかを考えることが欠かせない。もし、情報が事前に人々に広くいきわたっていると仮定できるのであればこのことはあまり問題にはならない。しかし、もしそうでなければ、すなわち、もし、災害などの何らかの事情により事前に情報が十分にいきわたっていないのであれば、情報伝播のプロセスが交通行動にどう影響するかを検討しなくてはならない。

情報伝播の態様にはさまざまなものが考えられるが、重要なもののひとつとして、交通行動を行う主体のあいだで情報を交換しあう、というものがある。交通行動の解析において情報伝播を考慮しなくてはならない状況が発生するのは、往々にして外部からの情報提供（たとえば交通渋滞に関する情報提供など）が限定される状況であると考えられる。そのような状況であれば、人々のあ

いだで交換される情報が情報源として卓越すると考えるのは自然であるといえよう。

人々のあいだでの情報交換が、他の情報源に卓越する状況においては、正しい情報が即時に人々のあいだに伝播するとは限らない。想定する情報伝播の態様によってさまざまな状況が発生しうるということが既存研究で示されている。Iryo et al.<sup>1)</sup>は、各個人が一度しか選択肢を選択できない状況 (Non-recurrent な交通行動) においては、情報伝播の速度が遅いことだけでなく、早すぎることも、効用の高い選択肢を選ぶことを阻害することを示している。日常的な(Recurrent な)行動を想定したときの情報伝播メカニズムと Day-to-day ダイナミクスの関係については、Iryo<sup>2)</sup>による分析がある。この分析では、多くの場合において、一般的な情報伝播メカニズムが交通システムを均衡状態に導くことを示している。しかし、想定する状況によっては情報伝播メカニズムの差が交通システムの巨視的な挙動に影響を与えることがあることも示されている。古田ら<sup>3)</sup>は、人々のあいだで交換される情報はあくまでも主観的なものであり、その情報に対して個々人は異なる信念を持つとしている。ベイズ学習を模した信念のレベルの更新モデルを提案し、その動学および均衡状

態の特性（複数均衡解の存在）を分析している。これらの既存研究の結果は、異なる情報伝播のメカニズムが異なる結果を生むことを示しており、情報伝播メカニズムを考慮することの重要性をよく示しているといえる。

情報伝播メカニズムを考慮した個々人の交通行動のモデルを交通システム全体を記述するモデルに組み込むことによって、情報伝播メカニズムの差異が交通システムの混雑にどのような影響を与えるかを解析できる。「交通システムの混雑」とひとくちにいてもその程度や態様にはさまざまなものがある。本稿では、情報が不足する状況として典型的である災害時の分析を意識し、特に「グリッドロック」を分析の評価対象とした。災害等により交通容量が著しく不足する場合にグリッドロックが発生することは、例えば東日本大震災後の東京の事例<sup>9)</sup>のようによく知られたことである。グリッドロックは Daganzo による理論解析<sup>6)</sup>がよく知られているが、交通行動の差異による影響についてはまだ詳しくは解析されていない。Mahmassani et al. は交通流シミュレーションを用いて、経路選択行動の特性とグリッドロックの発生のしやすさの関係について数値的に分析を行っている<sup>7)</sup>。その結果、adaptive driver の存在がグリッドロックを緩和ないしは解消することが示されている。ここで、adaptive driver とは、「交通状況の変化に応じて経路選択を更新するドライバー」を示している。この結果は、ドライバーに正確な交通情報を外生的に提供することが、グリッドロックを防止することに有効であることを示唆している。

Mahmassani et al. の研究は、情報提供がグリッドロックに与える影響の知見を提供するものの、交通混雑情報の取得および伝播のメカニズムの影響については特に考慮されていない。災害時に完全な情報を利用者に提供することはおそらく多大な困難が伴う。特に、平時にあまり混雑しない交通システムにおいては、利用者が情報提供サービスを使う習慣がないことが考えられる。あるいはそのようなシステムが、平時におけるメリットがないために存在しないことすら想定される。この場合には、ドライバーは正確な情報ではなく、混雑に対する自分自身の信念のみを所持し、その信念に従って経路を選択せざるを得ない。

本研究では、交通混雑に関する情報が外生的には提供されない道路ネットワークにおける利用者の情報伝播メカニズムとして

- ドライバーは自身が通過したリンクの混雑について正確な情報を知ることができる。
- ドライバーは目の前のリンクが先詰まっていることを目視することにより、そのリンクに混雑があることを知ることができる。
- ドライバーは他の利用者より情報を得ることがで

きる。ただし、このための情報交換の頻度は一定の程度に制限されるため、この情報交換によって常に最新の情報が得られるとは限らない。

- ドライバーは得た情報を基に経路選択を行う。経路選択は新しい情報を入手するごとに逐次的に更新される。

を考え、これらの特性がグリッドロックの発生にどう影響するかを評価する。これらの仮定の下では、経験や目視が混雑に関する正確な情報のソースとなるものの、それは利用者の集団全体においては局所的にしか提供されない。その集団全体への伝播には個々の利用者間での情報交換を要し、それが情報伝播に遅延をもたらす。このメカニズムを交通流シミュレータ（本研究では、福田ら<sup>8)</sup>で使用したものをを用いる）と結合し、情報伝播に関する条件を複数設定し、それがグリッドロックの発生に与える影響を数値的に評価する。

本稿の構成は以下の通りである。第 1 章で研究の背景と目的を説明した。第 2 章で情報収集と伝播のメカニズムのモデルと、それを前提とした経路選択行動モデルを提案する。第 3 章で交通流シミュレータの概要を、数値計算で用いるテストネットワークの諸元とあわせて説明する。第 4 章で結果を示し、第 5 章で考察と今後の課題を示す。

## 2. 情報の収集と伝播、および経路選択行動のモデリング

### (1) 情報の種類とその収集

すべてのドライバーは、利用する道路ネットワークについて「ネットワークの各リンクが遅れているか否か」という情報に関する信念を常時保持する。個々のドライバーは互いに独立に信念を保持し、その内容は異なるドライバー間で異なりうる。信念は、混雑のレベルについて「混んでいる」「すいている」の 2 水準が、また、情報源について「自分で直接経験した」「他人から情報を得た」の 2 種類が設定される。前者を信念の「水準フラグ」、後者を「経験フラグ」とし、

- 混んでいる＝水準フラグが 1 に設定されている
  - 直接経験＝経験フラグが 1 に設定されている
- と設定されている。それ以外の場合（すいている、他人から得た）にはそれぞれ 0 に設定されている。

情報は「あるドライバーがあるリンクを通過したとき」、または「あるドライバーがあるノードに位置したとき」、そのノードから出るリンクが先詰まっているときに収集される。前者による情報収集を「通過」、後者によるものを「目視」と称してそれぞれ区別する。具体的には、

1. 通過の場合：あるリンクから流出するときに、そのリンクを通過するのにかかった旅行時間が
  - A) 自由流旅行時間の  $a$  倍以上であれば、そのリンクの水準フラグを 1 にする。
  - B) A) があてはまらなければ、そのリンクの水準フラグを 0 にする。
2. 目視の場合：あるリンクから流出するとき（出発時を含む）に、そのリンクの下流側ノードから出ている別のリンク（通常は複数本ある）について、
  - A) そのリンクに存在する車両の台数がリンクの最大収容可能台数の 80% 以上であれば、そのリンクの水準フラグを 1 にする。
  - B) A) があてはまらないときは何もしない。

と定式化されるプロセスで情報が収集される。ここで  $a$  は全ドライバーに共通のパラメータであり、「混雑係数」と名付ける。数値計算の際には 2 ないし 5 を  $a$  の値として用いる。いずれの場合も、情報収集対象のリンクの経験フラグは 1 に設定される。2 のプロセスは、下流側リンクの渋滞列がノード上から見えれば、その道路を通らなくても混雑があることが一目でわかるであろうという考えに依拠して設定されている。このとき、渋滞列が見えないことは、そのリンクがすいていることを必ずしも意味しない（ノードから見えない下流側に渋滞があるかもしれない）と考えるのが自然であろう。このため、2 の B) では、特に情報の更新を行わないようにしている。

## (2) 情報伝播

(1) で示したプロセスによって個々のドライバーが収集した情報は、ある 1 人のドライバーから別の 1 人のドライバーへ伝達されることにより伝播する。このメカニズムを以下のように定式化する：

1. 各タイムステップ (1 秒) ごとに、ドライバーのペアがランダムに  $\gamma$  個選ばれる。各ペアにはそれぞれ情報の「送り手」と「受け手」が 1 人ずついる。
2. 送り手は、自身もっている全リンクの情報のうち、水準フラグのみを受け手に送る。
3. 受け手は、個々のリンクについて、以下のルールで情報を更新する
  - A) 自身の経験フラグが 0 であれば、相手から受け取った水準フラグの値で、自身の水準フラグの値を上書きする。
  - B) A) でなければ何もしない。

数値計算時には、 $\gamma$  の値として、1, 10, 100 (ペア/秒) の三種類の値を用いる。3 の A) と B) は、ドライバーは自身が経験したことについては、他人の経験にくらべてより強い信念を持ち、他人から矛盾する情報を受けても信念が更新されることはない、という考え方に基づいて設定されている。

## (3) 経路選択

各ドライバーは、自身が持つ信念に従って経路選択を逐次行う。具体的には、各ドライバーは、各ノード（出発地を含む）に到着した際に、その時点で持ち合わせている信念から

1. 信念が 1 のリンクについては、自由流旅行時間の  $a$  倍のリンク旅行時間
2. 信念が 0 のリンクについては、自由流旅行時間と等しいリンク旅行時間

のルールに従ってネットワーク上の全リンクの旅行時間を構築する。このリンク旅行時間に従って、現在いるノードから目的地のノードまでの最短経路（旅行時間を最小にする経路）を計算し、その経路を選択するように次に流入すべきリンクを選択する。

ドライバーがとる選択行動は経路選択のみとする。出発時刻は所与のものとして各ドライバーに付与される。混雑の状況にかかわらず、与えられた出発時刻が変更されることはない。

## 3. 交通流シミュレータとテストネットワーク

### (1) 交通流シミュレータ

福田ら<sup>8)</sup>が用いた交通流シミュレータをそのまま用いる。この交通流シミュレータでは、車両は離散的なものとして管理され、それぞれに出発地、到着地、出発時刻と経路が設定される。経路は 2(3) 節で設定したルールに従って逐次更新される。

各リンクは流出容量（最小ヘッドウェイ）と最大収容可能台数をパラメータとして持ち、リンク内存在台数を変数として持つ。存在台数が最大収容可能台数を超えたとき、車両はそのリンクに流入することができず、存在台数が最大収容可能台数を割るまで上流リンク内で待機する。どのリンクでも First in First out (FIFO) 原理が適用される。すなわち、車両はリンクへの流入順と同じ順番でそのリンクから流出する。

### (2) テストネットワーク

LeBranc et al. による Sioux Falls ネットワーク<sup>9)</sup>を用いる。幾何構造と自由流旅行時間についてはオリジナルのものをそのまま用いる。容量および最大収容可能台数については福田ら<sup>8)</sup>と同じ値を設定している。最大収容可能台数は、車両の走行速度を一律 40 km/h に設定してリンク長を算出し、1 km あたり 100 台車両が存在できると仮定して設定している。OD 交通量はオリジナルのものと同様のパターンを用いるものの、台数についてはオリジナルの OD 交通量に OD ペアによらない一定の割合をかけることにより増減させている。これにより、大小さまざ



まな合計 OD 交通量を設定することができる。出発時刻は、OD にかかわらずすべての車両が同一の 10 分間のあいだに出発しきるように、等分に流出間隔を設定する。

存在台数が 0 でないリンクから車が流出できない状況が一定時間継続したら、グリッドロックが発生したとみなし、その時点で計算を終了する。情報伝播に含まれるランダム性によって経路選択にもランダム性が発生するため、合計 OD 交通量が同一であっても、グリッドロックの発生も確率的になる。ある合計 OD 交通量におけるシミュレーションを 100 回実行したときのグリッドロックの発生回数を計算し、それをグリッドロックの発生のしやすさの指標として持ちいる。全 OD 交通量としては、8,875 台から 22,041 台のあいだの複数の値を用いる。

#### 4. 計算結果

各条件におけるグリッドロックの発生回数（100 回実行あたりの回数）を図-1（混雑係数  $a=2$  のとき）と図-2（ $a=5$  のとき）に示す。いずれのケースにおいても、全 OD 交通量が多いとグリッドロックの発生回数が増える傾向がある。また、情報交換の回数（ $\gamma$ ）が多いほど、グリッドロックが（100 回中 1 回でも）発生し始める全 OD 交通量と、グリッドロックが必ず発生する全 OD 交通量の差が大きくなる。

混雑係数  $a$  の影響は、 $\gamma$  がより大きい 2 つのケース、すなわち  $\gamma$  が 10 および 100 のときにあらわれている。これらの場合には、混雑係数  $a$  が 2 のときには、どの交通量でも  $\gamma=1$  のときにくらべてグリッドロックの発生回数は少ないかせいぜい同程度である。しかし、 $a$  が 5 のときは、少ない全 OD 交通量の区間において、 $\gamma=1$  のときにくらべてグリッドロックの発生回数が増えている。

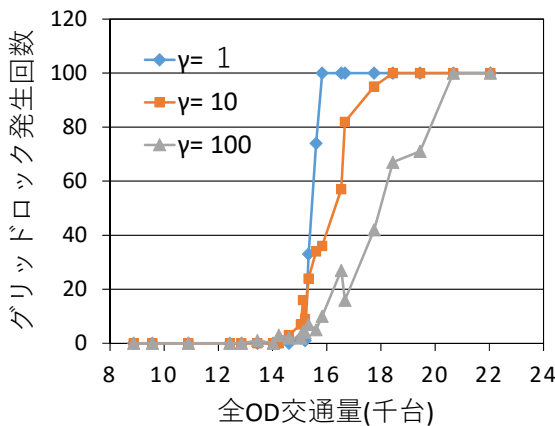


図-1 グリッドロック発生回数（混雑係数  $a=2$ ）

全 OD 交通量が多い区間では  $\gamma=1$  のほうがグリッドロックの発生回数が多い。

グリッドロックの発生状況の例を図-3と図-4に示す。

図-3は  $a=2, \gamma=1$ , 全 OD 交通量=22,041 台、図-4は  $a=5, \gamma=100$  全 OD 交通量=13,441 台である。いずれのケースでも、同一ノードペアを結ぶ各方向のリンクがペアとなってグリッドロックするケースがみられる（図-5）。とくに交通量が少ないケースではそのような状況のみでグリッドロックしているケースが多いことが観測された。

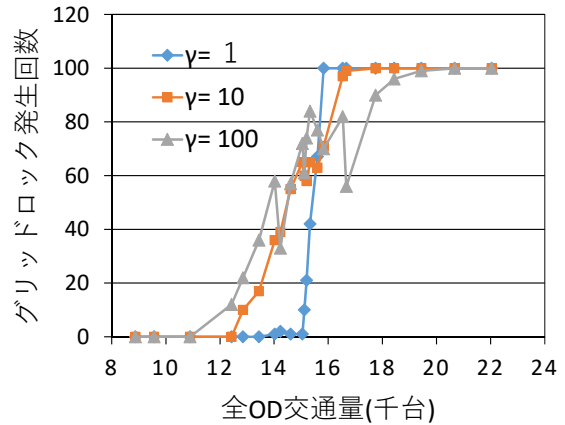


図-2 グリッドロック発生回数（混雑係数  $a=5$ ）

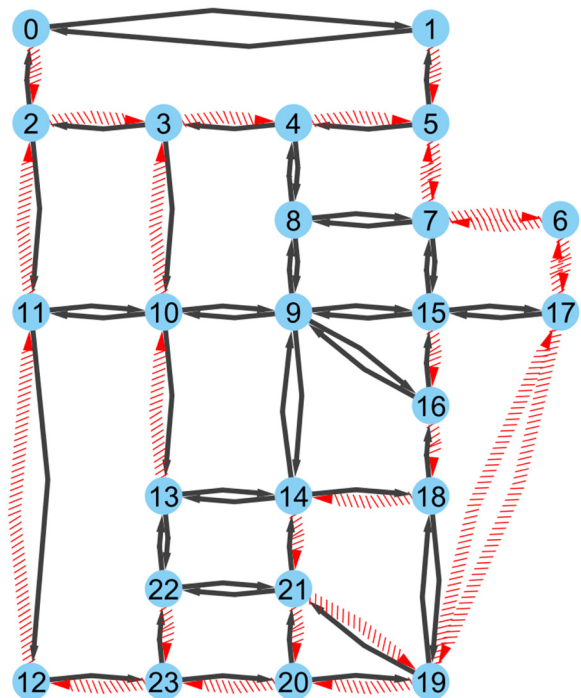


図-3  $a=2, \gamma=1$ , 全 OD 交通量=22,041 台のときのグリッドロックの発生状況。赤点線のリンクで流出交通量が 0 台に制約されている。

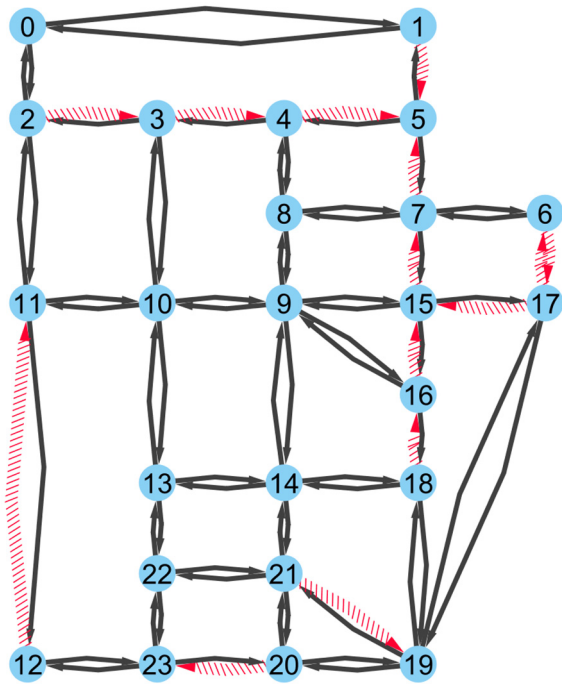


図-4  $a=5, \gamma=100$ , 全 OD 交通量=13,441 台のときのグリッドロックの発生状況。赤点線のリンクで流出交通量が 0 台に制約されている。

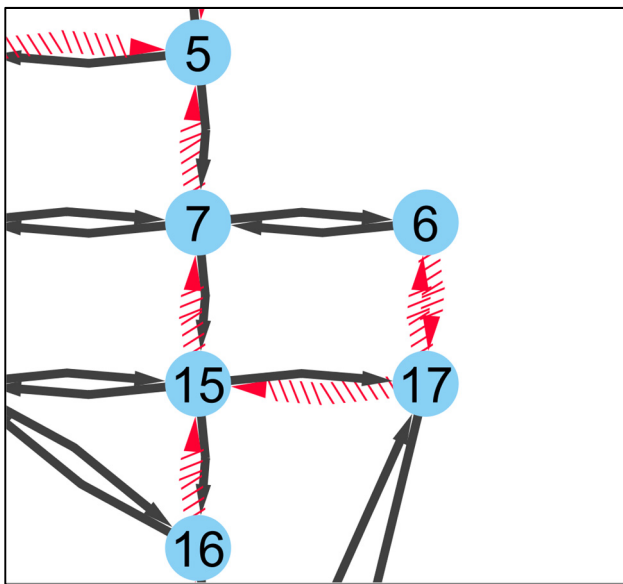


図-5 ノードペア間を往復する 2 本のリンクで発生するグリッドロックの例 (図-4 の拡大)。

## 5. 考察と今後の課題

OD 交通量が多いときにおいて、情報交換頻度が大きいほどグリッドロックが発生しづらいという結果は、Mahmassani et al.<sup>7)</sup>の結果と直感的には整合するものといえよう。この場合には、より新しい情報がドライバーに供給されることにより、ドライバーが効率的にグリッド

ロックが発生しそうな箇所を避け、結果としてその発生を抑制しているのであろうと推測することができる。この観点からいえば、情報伝播を促進することがグリッドロック回避に有効であると考えられる。

一方、混雑係数  $a$  が 5 のときに限られるが、合計 OD 交通量が小さいときには、情報交換頻度が小さいほどグリッドロックが発生しづらいという結果となった。このことは、新しい情報を取得したドライバーが経路を変えることを原因としていることが推測できる。特に、図-5 の例は、あるノードで情報を更新した結果、今来た道に戻る経路選択が発生することが原因であることを示唆する。グリッドロックの発生にはネットワークにループが存在し、そのループ全域にわたって渋滞が発生している必要がある。図-5 の例は「もっとも小さいループ」であり、ループのサイズが小さいことよりもグリッドロックを起こしやすいと考えることができる。「今来た道に戻る経路選択」は情報の更新がない限り発生しえないので、このパターンのグリッドロックは、情報更新頻度が大きいほど発生しやすいと考えられる。

ただし、実際の道路ネットワークにおいて、ほかの道はグリッドロックしていないのに、このような「来た道に戻ろうとする」ことによるグリッドロックが発生することはあまり現実的とはいえないだろう。実際には、遠くでおそらく起きているであろう混雑やグリッドロックを避けるために現状で混雑の激しい道路を選ぼうとするよりも、とりあえず、あいている道路に移動し、より混雑が少ないかもしれない他の経路を試すと考えるのが自然である。このような行動は、例えば、経路選択における時間割引率が大きいと考えたり、あるいは、混雑が不明な場所に対して可能な探索行動をとる、などのメカニズムによって説明することができよう。これらのようなより複雑なメカニズムが、情報伝播の速度に加えて、グリッドロックの発生に影響していることが考えられる。

今後の課題について述べる。今回はごく限られたケースの計算のみを行っており、計算アプローチをひきつづきとするのであれば、より多様なケースにおける計算が必要となろう。混雑の情報を 2 水準に限っているのは単純すぎる仮定であり改善を要する。この場合にもっとも影響を受けるのは情報伝播に関するモデリングである。2 水準より複雑な情報がどのように伝播されるかの記述は必ずしも簡単とはいえない。行動原理についても、情報が不確かな場合において逐次的な最短経路探索の課程は単純すぎるといえよう。先述のような時間割引率や探索行動の考慮も必要となろう。計算アプローチに加えて、理論アプローチによる現象の理解も理論研究としては求められることはいままでのない。グリッドロック自体がもともと複雑な現象であるため理論アプローチは容易ではなく、挑戦的な課題であるといえるだろう。

謝辞：本研究は科学研究費補助金（基盤研究(S)「移動体観測に基づく交通ネットワークの動的リスクマネジメント（課題番号 26220906）」、代表：桑原雅夫）の助成によりなされた。この場を借りて感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) Iryo, T., Yamabe, K. and Asakura, Y.: Dynamics of information generation and transmissions through a social network in non-recurrent transport behaviour, *Transportation Research Part C*, Vol. 20, No.1, pp. 236-251, 2012.
- 2) Iryo, T.: Day-to-day dynamical model incorporating an explicit description of individuals' information collection behaviour, *Transportation Research Part B*, 92A, pp.88-103, 2016.
- 3) 古田昌弥, 井料隆雅, 原祐輔, 桑原雅夫：個々人の情報伝達行動を考慮した避難タイミング決定動学モデル, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol. 51, CD-ROM, 2015.
- 4) 井料隆雅, 古田昌弥：ベイズ学習的な情報伝播メカニズムがもたらす情報分布の複数均衡解, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol., 53, CD-ROM, 2016.
- 5) 清田裕太郎, 岩倉成志, 野中康弘：東日本大震災時の都区内道路のグリッドロック現象に関する基礎的考察, 土木計画学研究・講演集, Vol. 46, CD-ROM, 2012.
- 6) Daganzo, C. F.: Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches, *Transportation Research Part B*, Vol. 41, No. 1, pp.49-62, 2007.
- 7) Mahmassani, H. S., Saberi, M., and Zockaie K. A.: Urban network gridlock: theory, characteristics, and dynamics, *Transportation Research Part C*, Vol. 36, pp.480-497, 2013.
- 8) 福田和輝, 石原雅晃, 井料隆雅：渋滞の延伸を考慮したマルコフ連鎖による動的利用者均衡配分, 土木計画学研究発表会, Vol. 53, CD-ROM, 2016.
- 9) LeBlanc, L., Morlok, E., and Pierskalla, W.: An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem. *Transportation Research*, Vol. 9, No. 5, pp. 309-318, 1975.

(2017. 4.28 受付)

## EFFECT OF DELAY OF INFORMATION PROPAGATION ON TRAFFIC CONGESTION

Takamasa IRYO, Masaya FURUTA, Masayuki KUCHII and Masao KUWAHARA