

津波避難時の旅行時間情報伝播モデルを用いた 道路交通ネットワークのスループット低下要因分析

坂井勝哉¹・口井雅之²・井料隆雅³

¹正会員 台湾大学 土木工学部 (台湾 10617 台北市大安区羅斯福路四段一号)

E-mail: katsuyasakai@ntu.edu.tw

²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: 188t110t@stu.kobe-u.ac.jp

³正会員 神戸大学 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: iryo@kobe-u.ac.jp

災害時のドライバー間で行われる旅行時間情報伝播モデルを用いた分析では、情報伝播速度が遅すぎても早すぎても、道路交通ネットワークのスループットが低下することが知られている。本研究では、情報伝播速度の違いによりスループットが低下する原因について説明する。さらに、周回経路を含まないネットワークを対象に、リンクとノードをグルーピングすることで、スループットが低下する非効率なネットワーク箇所を特定する手法を提案する。災害時の情報伝播モデルを組み込んだ交通シミュレーションを用いて検証され、その結果、スループット低下要因を考慮した情報提供戦略を構築する必要性が示唆された。

Key Words : *Network Analysis, Evacuation, Throughput, Information Propagation, Information Paradox*

1. はじめに

災害時には交通ネットワーク容量が低下するだけでなく、平常時よりも大きな交通需要が生まれ、深刻な交通渋滞が問題となる。Hara et al.¹⁾は東日本大震災の石巻市における津波からの避難でグリッドロックが発生し、非効率な交通状態であったことを報告している。清田ら²⁾はタクシープローブデータを分析し、東日本大震災後の東京首都圏において、道路ネットワーク容量が著しく低下するグリッドロック現象が数時間にわたり発生したことを示した。避難時の渋滞は生命にかかわる問題であり、その対策を事前に考えておく重要度は高く、解決すべき重要課題の1つである。

グリッドロックの明確な定義はないが、広義には、道路渋滞によって広範囲に滞留する車両が原因で道路ネットワークの容量が著しく低下し、極端な混雑が発生する現象をさす³⁾。このことは、本来の道路ネットワークの容量が十分に有効活用できていない問題であり、道路ネットワークを最大限に活用することが望ましい。

平常時の交通であれば、総旅行時間を最小化するような戦略を立てて経路誘導などの交通制御を行うことが社会にとって望ましい。しかし、災害時に交通制御を適切に行って総旅行時間を最小化することは、事前に正確な交通ネットワーク容量と需要パターンを把握していなければならない、時々刻々変化する状況を把握することは相当困難である。災害時のように、将来の不確実性が大きい状況下では、その場その場で最適な戦略をとることが現実的である。これは、道路ネットワーク運用の観点から考えれば、時々刻々のスループットを増加させることに相当するだろう。

道路ネットワークのスループットを巨視的に捉える指標としては、Daganzo⁴⁾により提案されたMacroscopic Fundamental Diagram (MFD)がよく知られている。MFDとは、ネットワークレベルで集計した車両存在台数とネットワークスループットを関係づける凸型の関数である。MFDを用いた代表的な制御として、流入制御や交通需要調整が挙げられ、その有効性は理論的にまた数値計算により示されている^{3), 4)}。しかし、道路ネット

ワーク上の空間的な渋滞分布（渋滞パターン）とMFDの関係は明らかでなく、交通需要が動的に変化する場合や密度に偏りがある場合についてはその有効性は不明である⁵⁾。特に災害時には、避難方向に合わせて、対向車線を反転して道路容量を増加させるcontraflow制御や道路旅行時間情報の提供による制御手法が使われる⁶⁾。contraflow制御のように道路容量を増加させる制御は、Akamatsu and Heydecker^{7), 8)}で示されているように、容量を増加させる道路によっては、逆にネットワークのスループットが低下してしまうcapacity paradoxを発生させる可能性がある。そのため、道路ネットワーク上の渋滞パターンとMFDの関係把握は必要不可欠であろう。

佐津川・和田^{5), 9)}は渋滞パターンを所与として、動的利用者均衡（DUE）配分の逆問題を解くことにより、渋滞パターンとネットワークのスループットを直接的に関係づける分析を行っている。この研究では、DUE配分を想定しており、日常繰り返される行動の結果収束する状態についての議論を行っている。またドライバーは道路ネットワークの完全な情報を常に有すると仮定している。

災害時は非日常であり、ドライバーは日々の経験から交通状態を学習できないため、災害後の交通行動においてDUE配分は仮定するのは不適切であろう^{10), 11)}。また、災害時は過去の経験が有用でなく、さらに外部からの情報提供が限定される場合があるので、ドライバーは経路選択に必要な情報が不足しがちである¹²⁾。そのため、災害時の配分問題では、ドライバーが情報を得るプロセス、すなわち情報伝播の形態を考慮した上で、ドライバーの認知旅行時間に基づくDUO配分を考えることが妥当である。

Takayasu et al.¹²⁾は、東日本大震災直後の避難時にドライバーがどのように交通混雑情報を収集したかに関するインタビュー調査を実施し、ベイズ学習を模した情報伝播モデルを構築した。口井ら¹³⁾は、Takayasu et al.¹²⁾で提案された情報伝播モデルを組み込み、ドライバーの認知旅行時間に基づくDUO配分で交通シミュレーションを行い、情報伝播速度がグリッドロック発生頻度に及ぼす影響を分析した。その結果、情報伝播速度が遅過ぎる場合だけでなく、早過ぎる場合にもグリッドロックが発生しやすくなる結果を得た。すなわち、情報伝播を促進し過ぎると、逆にネットワークのスループットが低下する現象である“情報パラドクス”が生じることを示した。災害時の避難において、情報パラドクスが発生することは、他の既存研究¹⁴⁾においても報告されているが、その発生メカニズムは未だ明らかにされていない。

そこで、本研究では、多起点多終点構造を有する周回経路を含まないネットワークを対象として、情報不足と

情報過剰によりネットワークのスループットが低下するメカニズムを説明する。情報過剰でスループットが低下する“情報パラドクス”については、Akamatsu and Heydecker^{7), 8)}のcapacity paradoxの発生原理を援用して説明する。さらに、道路ネットワーク上のリンクとノードを渋滞・非渋滞でグルーピングすることで、情報不足と情報パラドクスによりスループットが低下するネットワーク構造を特定する手法を提案する。提案手法の妥当性は、災害時の情報伝播モデルを組み込んだ交通シミュレーションを用いて検証する。

本稿の構成は以下のとおりである。続く第2章では、リンクとノードのグルーピング手法を述べ、情報不足と情報パラドクスによりネットワークのスループットが低下するメカニズムを説明する。第3章では、交通シミュレーションを用いた数値計算により、分析手法の妥当性を確認する。最後に、第4章で本研究のまとめと今後の課題を述べる。

2. 分析手法

(1) 想定する対象ネットワーク

本研究では、周回経路を含まないネットワーク、すなわち上流ノードと下流ノードが明確に区別できるネットワークを対象とする。図-1で示すように、下流ノードからは上流ノードへ戻ることができないリンク構造を仮定する。避難時の交通需要は、危険地帯から安全地帯へと方向性があることから、この仮定は妥当といえよう。渋滞表現はポイントキューモデルを用いる。OD需要パターンは、多起点多終点を想定する。

(2) リンクとノードのグルーピング

縮約ネットワークとは、Akamatsu and Heydecker (2003)で記述されているように、少なくとも1本の自由流リンクで接続している複数のノードをひとつのノード群とし、自由流リンクを削除したネットワーク表現である。本研究では、縮約ネットワークの考え方を参考にして、各リンクとノードを下記のルールに基づいて分類する。

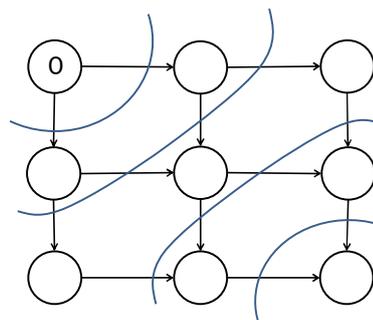


図-1 周回経路を含まないネットワークの例

まず、リンクを以下の3種類に分類する.

- L_{free} : リンク容量非飽和リンク
- L_{sat} : リンク容量を超える流入がある過飽和リンク
- L_{unsat} : L_{free} のうち、起点から L_{sat} を少なくとも1回通らなければ到達できない非飽和リンク

次に、ノードを以下の3種類に分類する.

- N_{free} : ノードへ到着する全てのリンクが L_{free}
- N_{sat} : ノードへ到着する全てのリンクが L_{sat} または L_{unsat}
- N_{unsat} : ノードへ到着する一部のリンクが L_{sat} または L_{unsat}

以上のようにリンクとノードを分類すれば、ネットワークのスループットが低下する原因は第2.3節と第2.4節で示す2種類が考えられる.

(3) 情報不足によるスループットの低下

災害直後に、道路の混雑状況や旅行時間情報がドライバーに提供されない場合には、自由流旅行時間が最小の経路をドライバーは選択するだろう. その例を図-2に示す. この時、目的地ノードは、2.2節で述べた N_{unsat} になる. これは、容量が余っている経路があるにも関わらず、自由流旅行時間が最短の経路へ過剰に配分されていることから、非効率な配分であることがわかる. スループットを増加させるためには、まず最短経路に容量と同じだけ配分し、他に容量が余っている経路へ順々に配分していくことが望ましい.

ただし、この配分方法は、総旅行時間の観点からは最も良い配分とは限らない. すなわち、 N_{unsat} が必ずしも非効率とは限らない(スループット増加の観点からは良くないが、旅行時間短縮の観点からは良い). しかしながら、需要に不確実性がある災害時にはスループットを増加させることが現実的であるといえよう.

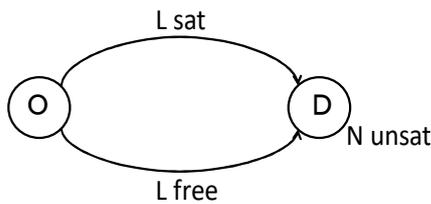


図-2 情報不足によるスループット低下

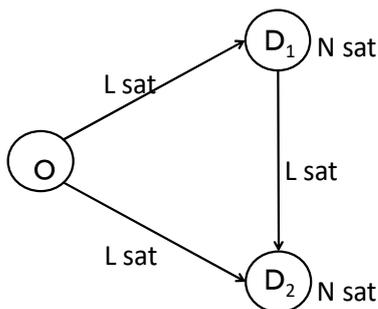


図-3 情報過剰によるスループット低下

(4) 情報パラドックスによるスループットの低下

本節で述べるスループットの低下は、前節とは対照的に、旅行時間情報がドライバー間で伝播しすぎた場合に発生するものである. その例を図-3に示す. この時、目的地ノード同士が N_{sat} と N_{sat} であり、それらが L_{sat} で接続されている. これは、迂回路に十分な容量がないため、迂回をしたとしても効率性が上がらず、逆に、他のODペアの通行を阻害している状態である. この現象は、Akamatsu and Heydecker^{7), 8)}で分析されているDUEにおけるcapacity paradoxと同じメカニズムである.

なお、飽和ネットワークでネットワークを記述した場合に、ODパターンが多起点1終点のパターンになる場合には、このパラドックスは生じない⁹⁾. したがって、避難のように、安全な任意の終点へ移動する場合にはこのパラドックスは生じない.

3. 数値計算

本章では、津波避難時の情報伝播モデルを組み込んだマイクロ交通シミュレーションを用いて、提案手法の妥当性を確認する. Takayasu et al.¹²⁾により提案された情報伝播モデルを用いる. 本モデルは、東日本大震災後の避難行動に関するアンケート調査を基に構築されており、災害時のドライバー間の情報伝播を再現できる. このモデルでは、全てのドライバーは道路ネットワーク上の全てのリンクに対して、主観的な旅行時間分布を独立に保持する. 主観的な旅行時間分布はドライバーが実際にそのリンクを経験した場合と、情報ネットワークで繋がっている他ドライバーとの情報交換をする場合に更新される. 人間の学習過程を模したベイズ学習を用いて主観的な旅行時間分布を更新する点に特徴がある. 情報伝播モデルを考える上での重要なパラメータとして、ドライバー間のつながりを表現する情報ネットワークとドライバーの情報交換の頻度を表す情報伝播速度がある. 今回の数値計算では、情報ネットワークの形状はすべてのドライバーが相互に繋がっているとす完全ネットワークに固定し、情報伝播速度のみを変化させる. 情報伝播速度は1秒あたりに情報交換を行うドライバーのペア数 γ [pair/sec]で表現し、 $\gamma = 0, 1, 10, 100, 1000$ を数値計算で用いる.

交通シミュレータは福田ら¹⁶⁾が開発したシミュレータを用いる. 本シミュレータでは、車両は離散的なものとして扱われ、出発地、目的地、出発時刻はそれぞれ外生的に与えられる. 情報伝播による影響を経路選択に反映させるため、各ドライバーは逐次的に選択経路を変更する. 具体的には、ドライバーはノードに到着するたびに、その時点で持ち合わせている自身の主観的な旅行時間分布

の平均値をリンク旅行時間として、目的地までの経路旅行時間が最短となる経路を選択する。各リンクは流出容量（最小ヘッドウェイ）を持ち、待ち行列はポイントキューモデルで表現される。どのリンクでもFirst in First out (FIFO) 原理が適用される。合流比は1:1と設定している。

(1) シンプルネットワーク

本節では、図-4のシンプルネットワークの場合におけるシミュレーション結果を述べる。起点ノードを1とし、終点ノードは2, 4, 5とする。それぞれのOD需要を1000 [veh/hour]とする。

図-5は、異なる情報伝播速度において、ネットワークのスループットが安定した時間帯のリンク・ノード状態を示している。黒色リンクは L_{free} を、ピンク色リンクは L_{unsat} を、赤色リンクは L_{sat} をそれぞれ表現している。また、青色ノードは N_{free} を、黄色ノードは N_{unsat} を、赤色ノードは N_{sat} をそれぞれ示している。リンクラベルはリンクの状態を示しており、カッコ内の第1数字は、リンクが飽和か非飽和かを示す。飽和なら1、非飽和なら0で表現される。カッコ内の第2数字は外生的に与えられ、シミュレーションを通して不変なリンク容量[veh/hour]を示す。ノード内の数字は、そのノードが目的地である車両のスループット[veh/hour]を示す。情報伝播がない場合($\gamma = 0$)は、すべてのドライバーは自由流旅行時間に基づく最短経路を選択する。自由流旅行時間は全リンクで等しいとしているので、リンク2に待ち行列が発生する。この時、終点ノード4, 5は黄色ノード N_{unsat} になり、非効率であるといえる。情報伝播速度 $\gamma = 10$ の時は、終点ノード4, 5の黄色ノードが赤色ノードに変わり、効率

的な状態が実現される。実際に、情報伝播なしの場合に比べて、情報伝播速度 $\gamma = 10$ の場合は、ネットワークのスループットの改善が見られる。情報伝播速度が $\gamma = 1000$ の時には、赤色のノード4と赤色のノード2が赤色リンクで繋がれ、情報パラドクスが発生する。実際に、情報伝播速度 $\gamma = 10$ の場合に比べて、情報伝播速度 $\gamma = 1000$ の場合はネットワークのスループットの低下が観測された。

図-6は異なる情報伝播速度における、起点出発の累積数 $I(t)$ と終点到着の累積数 $O(t)$ を示す。シミュレーションの序盤は、情報不足 ($\gamma = 0, 1$) と情報パラドクス ($\gamma = 1000$) により、情報伝播速度 ($\gamma = 10$) が最もネットワーク性能が良い。しかし、車両のインプットが完了し、ネットワーク容量に余裕が出てきてからは情報伝播速度が速い方が容量の空いている経路を選択するドライバーが増えるため、トリップ完了時刻は情報伝播速度が速いほど早くなった。

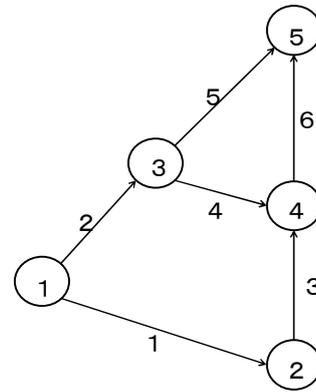


図-4 シンプルネットワーク

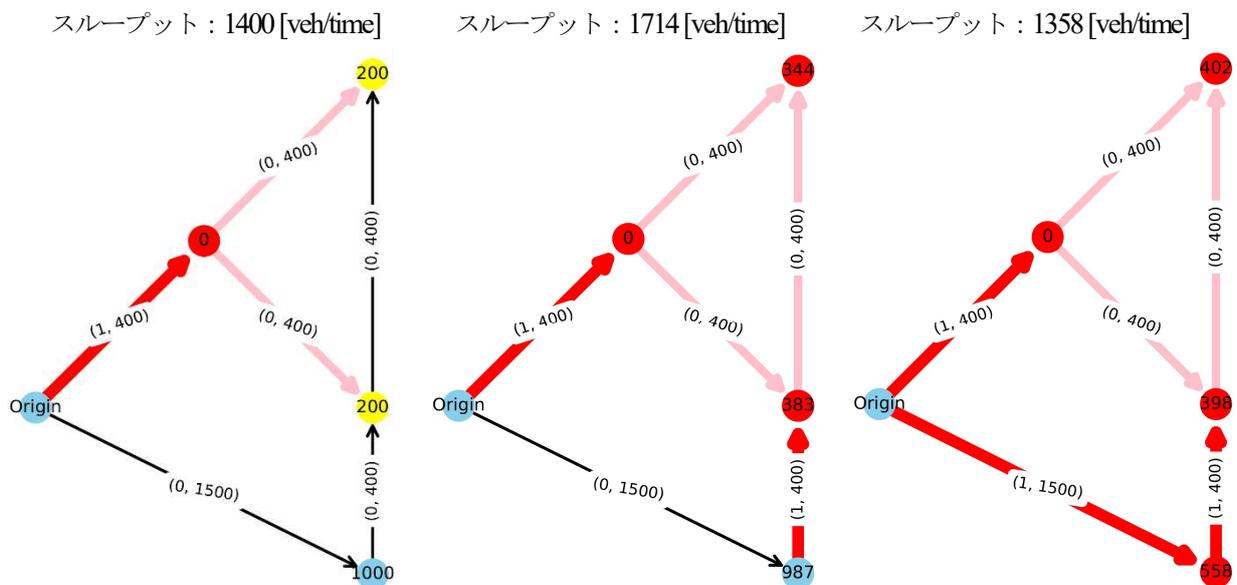


図-5 シンプルネットワークシミュレーション結果 (左: $\gamma=0$, 中央: $\gamma=10$, 右: $\gamma=1000$)

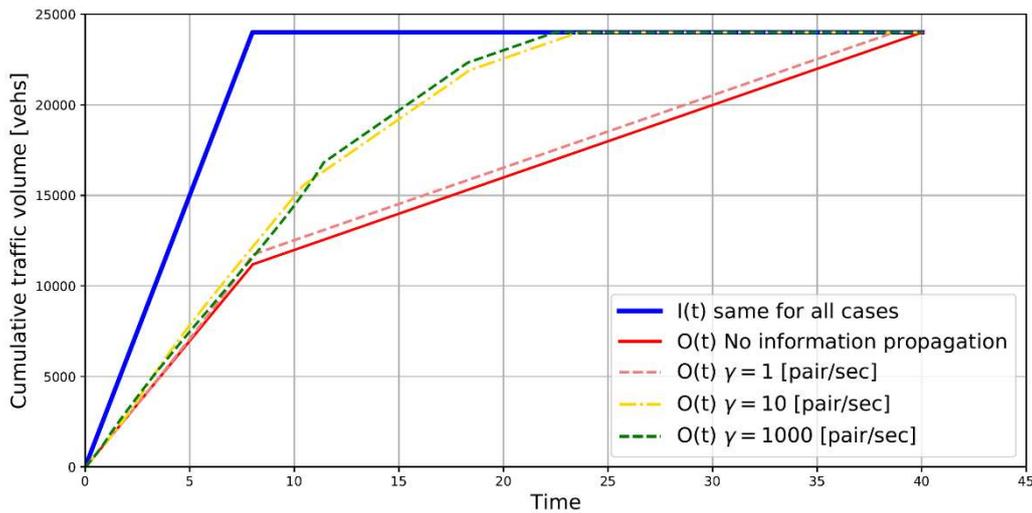


図-6 シンプルネットワークシミュレーション結果 (累積曲線)

(2) Sioux Fallsネットワーク

本節では、Sioux Fallsネットワーク¹⁷⁾を用いて数値計算を行う。提案手法は周回経路を含まないネットワークを対象にしているため、双方向リンクで構成されるオリジナルのSioux Fallsネットワークから片方向のリンクを除外して周回経路含まないネットワークを作成した。ネットワーク中心に位置する3起点から外周沿いに存在する8終点へ避難するODパターンを設定する。起点ノードと終点ノード（ノード内にスループットの数字が書かれているノード）はそれぞれ図-7に示されている。それぞれのODペアには等しく1000[veh/hour]の需要を設定する。

図-7は、異なる情報伝播速度において、ネットワークのスループットが安定した時間帯のリンク・ノード状態を示している。リンクとノードの色が示す意味はシンプルネットワークの場合と同じである。シンプルネットワークの場合の結果と同様に、情報伝播がない場合（図-7(左)）は、黄色ノードが現れ、ネットワークの容量が十分に利用されていないことがわかる。情報伝播速度を上げていくと、例えば $\gamma = 100$ の場合は、黄色ノードの数は減少するが、逆に赤色の N_{set} ノードが赤色の L_{set} リンクで繋がるため、情報パラドックスが生じる。

図-8は異なる情報伝播速度における、起点出発の累積台数 $I(t)$ と終点到着の累積台数 $O(t)$ を示す。Sioux Fallsネットワークの場合においても、情報パラドックスは生じているが、パラドックスを発生させるネットワーク箇所がシンプルネットワークに比べて小さいため、ネットワーク全体のスループットへの影響は軽微である。それゆえ、図-8では、避難開始からTime = 7までの期間は、情報伝播速度が速いほど、スループットが良い。しかし、Time = 7以降は情報伝播速度 $\gamma = 100$ の場合が $\gamma = 1000$ の場合を追い越し、避難完了時間が最

も早い結果となった。 $\gamma = 1000$ の場合は、瞬時に情報が伝播されるためドライバーの選択経路が集中し、ハンチング現象によりネットワークのスループットが低下した。対して、 $\gamma = 100$ の場合は適度にドライバーの選択経路が分散し、スループットが落ちなかったため、 $\gamma = 1000$ の場合よりも結果が良くなったと考えられる。

4. おわりに

本研究では、災害時にドライバーが経路選択に必要な情報が不足する場合と情報が普及しすぎる場合にネットワークのスループットが低下する現象を周回経路を含まないネットワークを対象に分析した。具体的には、道路ネットワーク上のリンク・ノードを分類して、非効率なネットワーク状態を特定する手法を提案した。さらに、災害時の情報伝播モデルを組み込んだ交通シミュレーションを用いて数値計算を行い、提案手法の有効性を検証した。その結果、シンプルネットワークにおいては、提案手法の有効性と情報パラドックスによるスループットの低下が確認された。一方で、Sioux Fallsネットワークの場合においては、本手法により非効率なネットワーク構造は特定できたものの、情報パラドックスによるスループットの低下は確認されなかった。これは、情報パラドックスを生じさせるネットワーク部分以外がスループットに及ぼす影響やハンチング現象によるスループットの低下の方がより大きくネットワーク全体のスループットに影響を及ぼしたためであると考えられる。これらの結果は、情報不足、情報パラドックス、ハンチングのそれぞれがスループットに及ぼす影響の大小を考慮しながら、適切な情報提供戦略の構築が必要不可欠であることを示している。今後、ネットワーク状態に基づいた情報提供戦略を構築する。

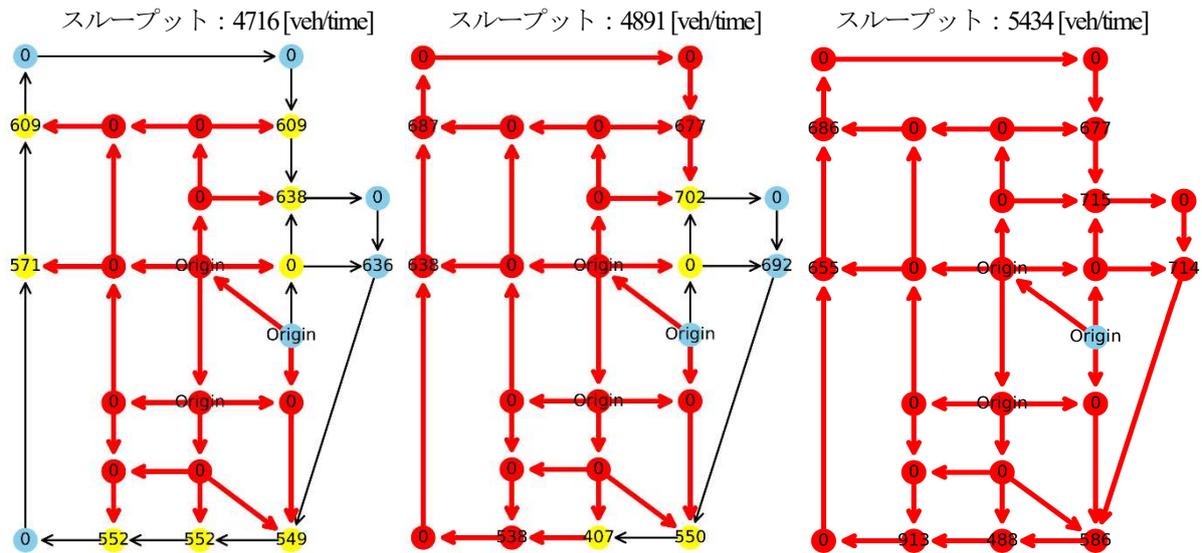


図-7 Sioux Fallsネットワークシミュレーション結果 (左: $\gamma=0$, 中央: $\gamma=100$, Time=3, 右: $\gamma=100$, Time=4)

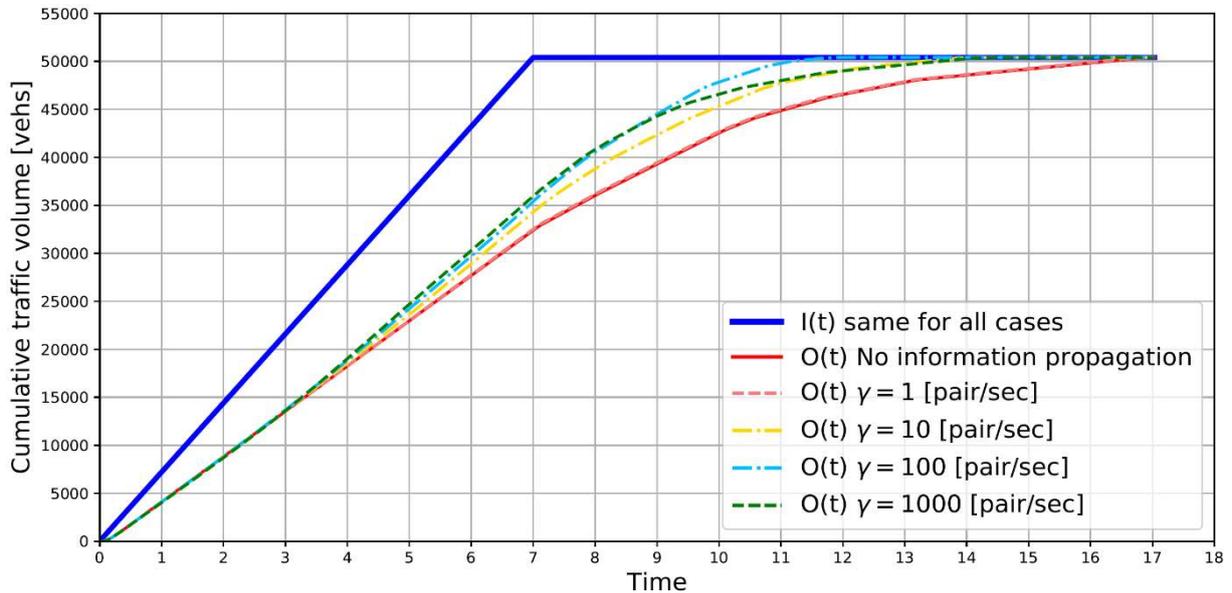


図-8 Sioux Fallsネットワークシミュレーション結果 (累積曲線)

謝辞：本研究は国土交通省「ETC2.0データの活用と評価を通じた次世代ETCの基本設計提案」（代表：井料隆雅），JSPS科研費 17H01297「巨大災害時の広域交通ネットワークの運用に関する数理モデル研究」（代表：朝倉康夫）の一部として実施したものである。

参考文献

- 1) Hara, Y., Kuwahara, M.: Traffic Monitoring immediately after a major natural disaster as revealed by probe data – A case in Ishinomaki after the Great East Japan Earthquake, Transportation Research Part A: Policy and Practice, Vol. 75, pp.1-15, 2015.
- 2) 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, 2012.
- 3) Mahmassani, H. S., Saberi, M., and Zockaie, A.: Urban network gridlock: theory, characteristics, and dynamics, Transportation Research Part C, Vol.36, No.1, pp.480-497, 2013.
- 4) Daganzo, C.: Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches, Transportation Research Part B, Vol.41, No.1, pp.49-62, 2007.
- 5) 佐津川功季, 和田健太郎: 多起点 1 終点ネットワークにおける巨視的な交通性能解析, 交通工学研究発表会論文集, Vol.35, pp.299-306, 2015.
- 6) Murray-Tuite, P., Wolshon, B.: Evacuation transportation modeling: An overview of research, development, and practice, Transportation Research Part C, Vol.27, pp.25-45, 2013.
- 7) Akamatsu, T., and Heydecker, B.: Detecting dynamic traffic assignment capacity paradoxes in saturated networks,

- Transportation Science, Vol.37, No.2, pp.123–138, 2003.
- 8) Akamatsu, T., and Heydecker, B.: Detecting dynamic traffic assignment capacity paradoxes: Analysis of non-saturated networks, Working Paper, 2003.
 - 9) Wada, K., Satsukawa, K., Smith, M., and Akamatsu, T.: Network throughput under dynamic user equilibrium: Queue spillback, paradox and traffic control, Transportation Research Part B: Methodological, Vol.126, pp.391 – 413, 2019.
 - 10) Lindell, M., and , Prater, C.: Critical behavioral assumptions in evacuation time estimate analysis for private vehicles: examples from hurricane research and planning, Journal of Urban Planning and Development, Vol.133, No.1, pp.18 – 29, 2007.
 - 11) Pel, A.J., B. M. . H. S.: A review on travel behaviour modelling in dynamic traffic simulation models for evacuations, Transportation, Vol.39, pp.97 – 123, 2012.
 - 12) Takayasu, A., Kuwahara, M., Hara, Y., Kuchii, M., and Iryo, T.: The impacts of information provision on post-disaster traffic state, The Transportation Research Board (TRB) 98th Annual Meeting, 2019.
 - 13) 口井雅之, 井料隆雅, 高安杏奈, 桑原雅夫: 情報伝播における社会ネットワークの形状がグリッドロック発生に与える影響, 土木計画学研究発表会, Vol. 57, CD-ROM, 2018.
 - 14) Pel, A.: Transportation modelling for regional evacuations, Civil Engineering. Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2011.
 - 15) Shepard, F. P. and Inman, D. L. : Nearshore water circulation related to bottom topography and wave refraction, *Trans. AGU.*, Vol.31, No.2, 1950.
 - 16) Fukuda, K., Ishihara, M., and Iryo, T.: Dynamic user equilibrium assignment by markov chain including queue spillback, 7th International Symposium on Transport Network Reliability, 2018.
 - 17) LeBlanc, L. J., Morlok, E. K., and Pierskalla, W. P.: An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem, Transportation Research, Vol.9, No.5, pp.309 – 318, 1975.

ANALYSIS ON NETWORK THROUGHPUT REDUCTION WITH TRAVEL TIME INFORMATION PROPAGATION MODEL OF TSUNAMI EVACUATION

Katsuya SAKAI, Masayuki KUCHII and Takamasa IRYO