

定常状態の交通流における渋滞伝播の分析

加地大^{1,2}

¹ 東京工業大学大学院社会理工学研究科

² 日本学術振興会

概要

本研究では、道路網を模したネットワーク内の渋滞の伝播に関する考察を行った。交通流の性質を考慮したネットワーク上で歩行者や車を想定した object をネットワーク内部で移動させることで、ネットワーク内部の流れの様子を調べた。今回は初期条件として定常流を想定し、ネットワーク内のある箇所有意図的に渋滞を発生させ、その渋滞が他の道にどのように影響を与えるかを分析した。この分析により渋滞の伝播にはいくつかのパターンが確認され、道内部の初期密度と関係があることを明らかにした。

Analysis of Propagation of Traffic Jam under Steady Flow

Masaru Kaji^{1,2}

¹ Graduate School of Decision Science and Technology, Tokyo Institute of Technology

² Japan Society for the Promotion of Science

Abstract

In this study, we analyzed the propagation of a jam in a network on a road. We analyzed the state of the flow in the network by moving the objects assumed as driving cars or pedestrians on the network. In this analysis, we assumed that the flow of the initial condition as the steady flow state, and we intentionally happened traffic jam in an edge, and discussed how the traffic jam affected the other edges. From the result, we confirmed that there were some propagation patterns, and we clarified that there was a relation between initial average density in each edge and propagation patterns.

1 はじめに

現代社会における渋滞は未だ解決されていない社会問題の1つである。この渋滞問題は、駅の通勤ラッシュや緊急避難時のような歩行者交通流における渋滞と、高速道路などで確認できる自動車交通流の渋滞が挙げられる。これらの渋滞の原因となるものとして、歩行者交通流ならば歩行速度の遅い人や幅の狭い出口付近が律速となり、一方の自動車交通流ではサグやジャンクション、そして突発的な交通事故などが渋滞の原因となりうる。また、ある臨界密度を超えた交通流においては非効率な流れになること

が、実験で確認されており [1-2]、場合によっては渋滞が発生しうることが確認されている [1]。また、渋滞となった箇所は徐々に後方の歩行者や車を巻き込み一つのクラスターを形成し、進行方向とは逆方向に伝播する stop-and-go wave と呼ばれるクラスターの波が存在する。

渋滞のクラスターの波は一般的に直線道路上で観測できるが、実際の道路構造はネットワーク上に広がっており、渋滞の波は他の道へも伝播し、やがて消えていくと予想される。この渋滞の波が他の道にどのように影響を与えるのかは新たな疑問点となる。実際に道路網を模したネットワークを設定し、その

内部の流量に関して考察を行った論文が存在する [3-4]。[3] ではネットワーク内の定常流の線形安定性について、[4] では格子ネットワークにおけるマクロな視点での密度と流量に関する流量図をそれぞれ示していた。これらの研究は、渋滞が発生したとき、他の道が影響を受けるかどうかについて、道内部の初期密度や道路基本図の非線形性の観点で定量的に議論が行われていたが、本研究では、発生した渋滞が他のどの道にいつ渋滞の波の影響が出るかに焦点をあてて話を進める。そのために、具体的にネットワークを可視化し、発生した渋滞がネットワーク内部でどのように拡散、もしくは解消されるかを分析する。そこで本研究では、交通流の性質を考慮した関数を用いてネットワーク内における渋滞の発生を分析することができるモデル [5] を基に仮想的な交通ネットワークを定義し、議論を行う。

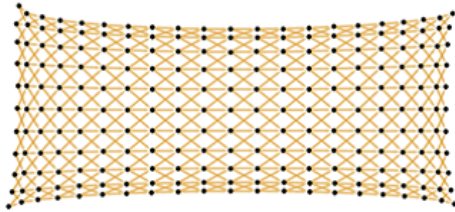


図 1: シミュレーションで使われるグラフの展開図。一番左側の列の頂点と一番右側の列の頂点は同等である。同様に一番上の列の頂点と一番下の列の頂点は同等である。すなわち、このグラフはトーラス状の構造をとる。このネットワーク内部で object を左から右に向かって移動させる。

2 モデル

本研究では、先行研究 [5] を基に渋滞の性質を考慮したグラフ理論を使用してネットワーク内の渋滞の伝播の様子を分析する。本研究におけるグラフ G は、頂点集合 V 、弧集合 $E \subset V \times V$ からなる有向グラフを想定する。また、今回のグラフ G は頂点の数 200 の 3-正則有向グラフを想定する。すなわち、入次数、出次数を全ての頂点において 3 とする。さらに、グラフ内の様子を可視化しやすくするために、このグラフの頂点を縦に 10 列、横に 20 列並べ、右の列の隣接する 3 つの頂点にそれぞれ有向辺をつなぐ。一番右の列の頂点は一番左の列の頂点と接続し、周期構造をもつグラフにする。また、今回の実験では端側の道の性質の影響をなくすために一番上の列の頂

点と一番下の列の頂点を接続し、トーラス構造となるように設定して、全体として左から右に object を流すように設計する。このトーラス状のグラフの展開図を図 1 に示す。このグラフ内で仮想的に object を移動させることで車や歩行者の動きを再現する。

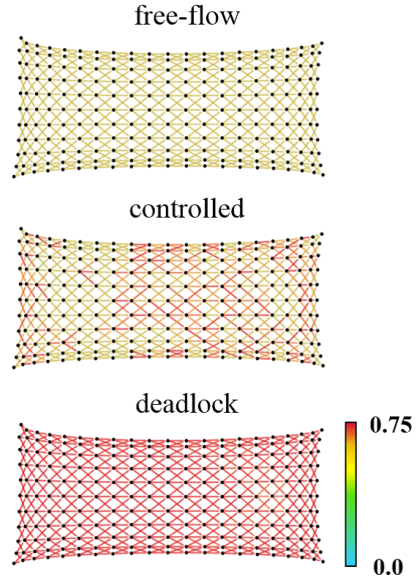


図 2: free-flow phase ($\bar{\rho} = 0.40, \rho_{op} = 0.50$), controlled phase ($\bar{\rho} = 0.50, \rho_{op} = 0.50$), deadlock ($\bar{\rho} = 0.74, \rho_{op} = 0.50$) の様子。また、カラースケールは右下に表示した。

次に、辺の内部を流れる object に関するルールを設定する。ある頂点 i と頂点 j をつなぐ弧を $e_{ij} \in E(i, j \in V)$ として、辺 e_{ij} の内部に object を充填し、辺 e_{ij} の内部にある object の密度を $\rho_{ij} \in \mathcal{R}$ とする。また、辺 e_{ij} に流入する object の量を $F_{in}(e_{ij})$ 、 e_{ij} から流出する object の量を $F_{out}(e_{ij})$ とする ($F_{in}, F_{out} \in \mathcal{R}, 0 \leq F_{in}, F_{out} \leq 1$)。先行研究 [5] では頂点の内部に object を充填させて議論を行っていたが、本研究では辺を中心に考えるものとする。これはより現実的な道路を想定するためである。次に、流出量 $F_{out}(e_{ij})$ は以下の関数をもとに決定される。

$$F_{out}(e_{ij}) = \min(\rho_{ij}, 1 - \rho_{ij})$$

辺内部に object が大量に流入するとき、その辺内部は非効率な流れになるので、辺内の密度がある値 ρ_{cl} を超えると流入を防ぎ流出だけ行われるように定義し、辺内部の密度が ρ_{op} より小さくなると再び入口を開放する。その辺に流入するはずであった object

は、代わりに別のルートを通るものとする。また、object の流出の各辺の配分に関する定義は、今回は F_{out} を閉鎖されていない辺に均等に配分して流出するものとする。辺 e_{ij} に流入する object の合計を $F_{in}(e_{ij})$ として、辺 e_{ij} 内の object の密度の時間変化を

$$\frac{d\rho_{ij}}{dt} = F_{in}(e_{ij}) - F_{out}(e_{ij})$$

で表す。また、微小時間変化は $dt = 0.0001$ とする。

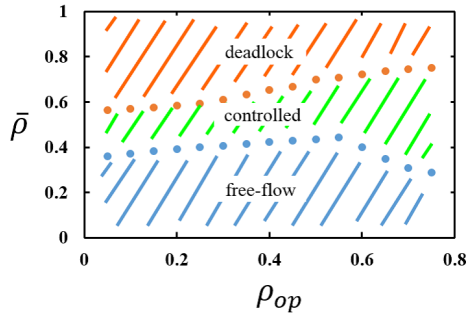


図3: 本実験における相図。縦軸は初期平均密度 $\bar{\rho}$ 、横軸は開放密度 ρ_{op} であり、図の結果は $t = 100$ のときのネットワーク内部の状態を反映したものである。

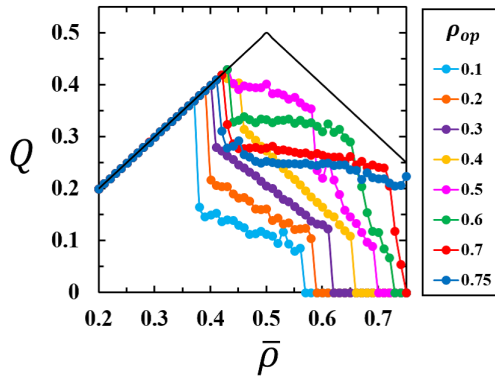


図4: 本実験における巨視的流量図。Q はネットワーク内部の全ての辺から流出する F_{out} の量の合計値を表している。

3 結果と考察

今回行う実験は、ネットワーク内の辺を全て一定の均等な密度 ρ にした定常状態を初期条件として、ある時刻に、ある1つのルートの密度を閉鎖状態 (ρ_{cl})

にして意図的に渋滞を発生させる (図1の右中央部分で発生させる)。この閉鎖状態になったルートが他のルートにどのように影響を与えるかを分析する。今回は簡単のため $\rho_{cl} = 0.75$ に固定して実験を行う。

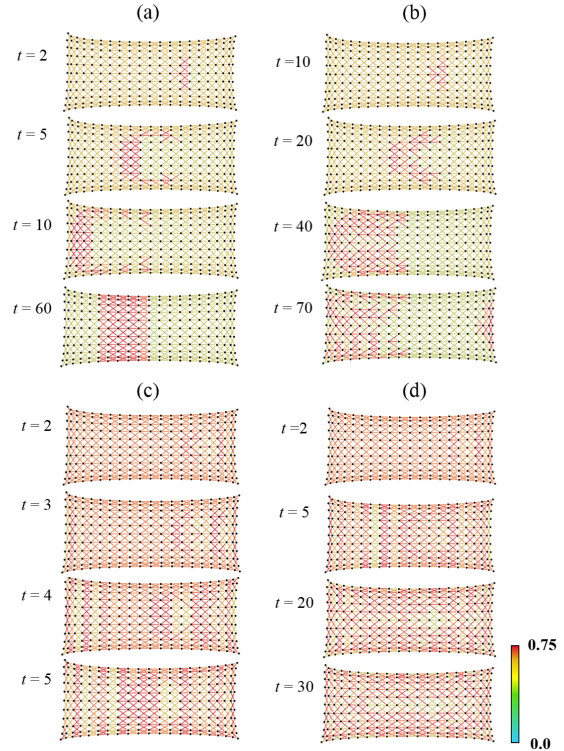


図5: 渋滞の時間変化の様子。(a) は $\bar{\rho} \leq 0.5$ 、かつ ρ_{op} が比較的小さいとき ($\bar{\rho} = 0.45$, $\rho_{op} = 0.35$)、(b) は $\bar{\rho} \leq 0.5$ 、かつ ρ_{op} が比較的大きいとき ($\bar{\rho} = 0.45$, $\rho_{op} = 0.60$)、(c) は $\bar{\rho} > 0.5$ 、かつ ρ_{op} が比較的小さいとき ($\bar{\rho} = 0.60$, $\rho_{op} = 0.45$)、(d) は $\bar{\rho} > 0.5$ 、かつ ρ_{op} が比較的大きいとき ($\bar{\rho} = 0.60$, $\rho_{op} = 0.60$) にそれぞれ確認できた。

渋滞を発生させた時刻を $t=0$ としてその後 $t = 100$ まで計算を行い、ネットワーク内部の様子を分析した。その結果、ネットワーク内部の初期の平均密度 $\bar{\rho}$ と開放密度 ρ_{op} の値を変化させることによって、ネットワーク内の渋滞の様子は free-flow phase、controlled phase、deadlock に大きく分けられた (図2)。free-flow phase では、初期で渋滞が発生した箇所から少しずつ他の辺に object が分散し、徐々に均一な流れの状態に戻る。一方、controlled phase は渋滞が起こっている辺が局所的に残り、渋滞した状態の辺が移動したりしなかったりする状態である。この状態における詳しい分析は後で述べる。deadlock の特徴は、ネットワーク内における全ての辺が閉鎖

状態となり、全体の流量が0となることが挙げられる。初期の平均密度 $\bar{\rho}$ と開放密度 ρ_{op} とそのときに陥るネットワークの状態の関係を図3にまとめた。また、この系における巨視的流量図を図4に示した。この図から $\rho_{op} < 0.5$ のときは ρ_{op} が大きいほど効率的な流れになるが、 $\rho_{op} \geq 0.5$ の領域では ρ_{op} が大きいときほど非効率的な流れになることが分かった。また、全体的に $\rho_{op} < 0.5$ のときより $\rho_{op} \geq 0.5$ のときの方が効率的な流れとなる傾向にあることが分かった。

続いて、controlled phase についてより詳しく分析する。この状態のとき $\bar{\rho}$ と ρ_{op} の値を変化させることで、図5のように4つのパターンに分類することができた。図5(a)は渋滞した辺が進行方向とは逆方向(左)に向かって伝播していき、やがて一塊の大きな波となって移動する。図5(b)は渋滞状態が後方に局所的に広がっては行くものの、渋滞前方部分が滞り残り続けるパターンである。また、図5(c)は渋滞が進行方向(右方向)にも影響を与え、進行方向とは逆に伝播した渋滞の波とぶつかり大きな波となって次第に左方向に伝播する波が複数現れる現象が確認できた。さらに、図5(b)と(c)の性質を合わせたようなパターンも確認できた(図5(d))。一般的に、 $\bar{\rho} \leq 0.5$ 、かつ ρ_{op} が比較的小さいとき(a)のパターンとなり ρ_{op} を次第に大きくしていき、 $\rho_{op} = 0.59$ あたりになると徐々に(b)のパターンの性質を帯びた現象が確認できた。また $\bar{\rho} > 0.5$ 、かつ ρ_{op} が比較的小さいときに(c)のパターンとなり、およそ $\rho_{op} = 0.55$ より大きいとき、(d)の現象が観測できた。

ここで、渋滞が伝播するメカニズムについて考える。図6の①の部分で渋滞が発生し道が閉鎖されたとき、隣の②の辺に object の流入の負担がかかり、②の辺も次第に効率の悪い流れとなり渋滞状態となる。これにより①と②は共に閉鎖状態となり、頂点Aを通る object はなくなる。結果として今度は③の辺が非効率的な流れとなり渋滞状態となり、これを繰り返すことで粒子の進行方向とは逆の方向に渋滞が伝播することになる。図5、特に(a)における渋滞は、このメカニズムが基本的な渋滞の伝播のパターンとして後方部分に渋滞が伝わっていく。図5(b)の現象は、 ρ_{op} の値が大きいためやすく開放されることになるが、またすぐに非効率的な流れとなってしまうので、なかなか渋滞状態が解消されることはなくなる部分が出てしまう。図5(c)は、渋滞が発生した辺の流出量が小さくなってしまいうため(前

方の辺に流入する量) < (その辺から流出する量) になり次第に前方の辺の密度が小さくなってしまふ。これによりその辺の流出の効率性が上がり、もう一つ前方の辺に大量の object が流入することになる。この結果、その辺では渋滞が起こることになる。これを前方方面で繰り返されることで結果的に渋滞が進行方向にも伝播することになる。一方、図5(d)では、始めのうちは(c)のパターンの性質に近い動きをとり、次第に(b)のように局所的に渋滞が滞った状態となる。

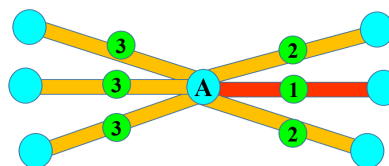


図6: 渋滞が伝播する順番を表した図。

4 結論と今後の課題

道路網を模したネットワーク上で、交通流の性質を考慮したモデルを用いてグラフ内部の渋滞状況に関する分析を行った。この分析によりネットワーク内部は free-flow phase、controlled phase、deadlock という3つの相に分けることができ、さらに controlled phase では渋滞の広がり方に特徴をもつパターンを4種類に分類することができた。今回は初期条件として均一な密度空間を想定したが、不均一な密度空間における渋滞の伝播に関する分析も今後行いたい。

5 謝辞

本研究は JSPS 特別研究員奨励費 16J03284 の助成を受けたものです。また、本研究を進めるにあたって、指導教員である猪原健弘教授に議論や助言を頂いたことをこの場を借りて感謝致します。

参考文献

- [1] Y. Sugiyama *et al.*, New J. Phys. **10.3** 033001 (2008).
- [2] D. Helbing *et al.*, Phys. Rev. E **75.4** 046109 (2007).
- [3] 島田他, 第21回交通流と自己駆動粒子系シンポジウム論文集, **10** (2015).
- [4] 吉岡他, 第21回交通流と自己駆動粒子系シンポジウム論文集, **17** (2015).
- [5] T. Ezaki *et al.*, J. Stat. Mech. **2015.06** P06013 (2015).