

ノード・リンク意図的除去による グリッドロックの回避

杉下 佳辰¹・坂井 勝哉²・井料 隆雅³・朝倉 康夫⁴

¹学生会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 博士後期課程（日本学術振興会特別研究員 DC2）（〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-M1-20）

E-mail: k.sugishita@plan.cv.titech.ac.jp

²正会員 神戸大学 大学院工学研究科市民工学専攻 研究員（〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1）

E-mail: k.sakai@port.kobe-u.ac.jp

³正会員 神戸大学 大学院工学研究科市民工学専攻 教授（〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1）

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

⁴正会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 教授（〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1-M1-20）

E-mail: asakura@plan.cv.titech.ac.jp

ネットワーク科学においてカスケード故障と呼ばれる現象に関する研究が進展してきた。カスケード故障とはネットワーク状のシステムにおいて局所的な障害がきっかけとなり、連鎖的な障害がシステム全体へと波及して壊滅的な損害をもたらす現象を指す。これまでは主に、停電や通信障害を背景としてカスケード故障に関する研究が行われてきた。しかし、カスケード故障の概念は、交通ネットワークで発生する現象に対しても応用できる可能性がある。そこで本研究では、1) グリッドロックがカスケード故障として捉えられることを示し、2) カスケード故障に対する防御策である Motter(2004)が提案したノード・リンクの意図的除去(IRs: Intentional Removals)のグリッドロックの回避策としての応用可能性を示す。

Key Words: cascading failure, gridlock, network science, risk management

1. 序論

交通システムにおいて発生する現象の中で、生起確率が非常に小さいものの、発生した場合にシステム全体へと甚大な影響をもたらす現象のひとつとしてグリッドロックが挙げられる。グリッドロックの定義は既往研究ごとに異なるが、ボトルネックから待ち行列が延伸することにより、ネットワーク全体の流率が低下する現象を指す。例えば、Daganzo¹⁾は、システム内部の車両台数が最適車両台数を越えた場合に流出量が低下した状態の均衡点に向かうプロセスを *gridlock process* と表現しており、その均衡点を *gridlock* と表現している。Mahmassani et al.²⁾はネットワーク全体もしくは一部の流出量が *minimal-flow* もしくは *zero-flow* となった状態を *gridlock* と表現している。清田ら³⁾は平均旅行速度が歩行速度並みの時速 5km/h 未満の状態が 2 時間以上にわたって継続するリンクをグリッドロック箇所と定義し、2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災によって首都圏で発生した渋滞現

象について分析している。ここでは、上述の定義に基づく大規模なグリッドロックの発生を確認している。大島・大口⁴⁾はシングルグリッド状のネットワークにおいてボトルネック交差点を先頭にして延伸した渋滞車列がグリッドを一周し、ボトルネック交差点の交通容量をさらに低下させる現象をグリッドロック現象と定義している。本研究では、ボトルネックを先頭にして延伸した待ち行列がグリッドを一周し、そのグリッド上に存在する全ての車両が動けなくなる状態をグリッドロックと定義する。ネットワーク内部を障害が波及し、システム全体が機能不全に陥るような現象は交通ネットワークにおけるグリッドロックに限らない。

交通工学とは別に、ネットワーク科学においてカスケード故障 (*cascading failure*) と呼ばれる現象に関する研究が進展している。カスケード故障とは、ネットワーク状のシステムにおいて、局所的な障害がトリガーとなり、連鎖的な障害がドミノ倒しの様にシステム内部を波及し、最終的にシステム全体が壊滅的な損害を被る現象を指す⁵⁾。

カスケード故障としてよく挙げられる事例のひとつが 2003 年のイタリア大停電である。この停電はイタリアのサルディーニャ以外の全域を巻き込んだ大規模かつ深刻な停電であるが、その原因は、イタリアの隣国であるスイスの山奥で、嵐による倒木によって送電線が木と接触したことであるとされている⁶⁾。ネットワーク科学において、この事例のような、電力ネットワークにおける停電や、通信ネットワークにおける通信障害のような大規模な機能不全が、小さな障害を原因として発生し得ることを説明するカスケード故障モデルに関する研究が行われてきた^{7, 8)}。また、このような連鎖的障害による影響を軽減し、システムを防護するための方策に関する研究も進展してきた。

交通ネットワークにおけるグリッドロックと停電や通信障害を背景とするネットワーク科学におけるカスケード故障は、ある局所的に発生した事象による影響がネットワーク内部を波及し、ネットワーク全体へ大きな影響をもたらすという点で同じである。しかし、流れが高速な電力ネットワークや通信ネットワークではネットワークトポロジーを考慮することが特に重要となるが、交通ネットワークではネットワークトポロジーに加えてリンクの性質や混雑状況に応じた経路再配分等のより複雑な現象も考慮する必要があると考えられる。

以上の背景を踏まえて、ネットワーク科学に基づくカスケード故障に対する防御策を交通ネットワークにおけるグリッドロックの回避策として応用することを最終的な目的とし、その第一歩として本研究では、1) グリッドロックがカスケード故障と同様に説明できることを示し、2) カスケード故障に対する防御策である Motter⁹⁾が提案したノード・リンクの意図的除去(IRs: Intentional Removals)をグリッドロックの回避策としてそのまま適用した場合の結果について分析する。このことは、交通ネットワーク特有の性質を整理することや、逆に交通ネットワークで得られる知見をネットワーク科学に応用できる可能性を期待したものである。

2. カスケード故障としてのグリッドロック

本章では、交通ネットワークにおけるグリッドロックがカスケード故障として捉えられることを示す。

(1) 対象ネットワークと仮定

本研究では図-1 に示すようなシンプルなネットワークを対象として、グリッドロックに陥るプロセスをカスケード故障として説明する。

まず、供給側に関する仮定について説明する。対象とするネットワークは図-1 のような、6 ノード (v_1 ,

v_2, v_3, v_4, v_5, v_6)、9 リンク ($e_{13}, e_{15}, e_{21}, e_{24}, e_{32}, e_{36}, e_{41}, e_{53}, e_{62}$) から構成される有向重み付きネットワークである。全てのリンクについて三角形の Fundamental Diagram (FD) を仮定し、全リンクの距離も等しいことを仮定する。ここで、容量は q_{max} 、ジャム密度は k_j 、臨界密度は k_c とする。また、大島・大口⁴⁾と同様に、各ノードにおいて、渋滞流状態において内側のリンクの流入可能量の流出量に占める割合を m ($0 < m < 1$) と仮定する (例えば、ノード v_3 については、リンク e_{13} に対して m 、リンク e_{53} に対して $1 - m$ を割り当てる)。本研究ではこの割合 m を合流比と呼ぶことにする。

次に、需要に関する仮定について説明する。本研究では、図-2 に示すような OD 表を与える。そして、ネットワーク科学におけるカスケード故障研究と同様に、図-2 で示した OD 需要を各 OD 間の距離の最短経路に配分することを仮定する。図-2 の OD 表の a について、 $0 < 3a \leq q_{max}$ の成立を仮定する。これは平常状態において、全てのリンクが自由流状態にあり、渋滞が発生していないことを保証するための条件である。

最後に、このネットワークがグリッドロック状態に陥るための条件を仮定する。本研究では、ある時刻から一定時間 T_{BN} において、リンク e_{32} の容量が q_{max} から q_{BN} へと低下することを仮定する。なお、 T_{BN} はボトルネック交差点を先頭とする渋滞車列の延伸がグリッドを一周するのにかかる時間よりも長いとする。グリッドロックのトリガーとなるリンク e_{32} の渋滞発生条件として、

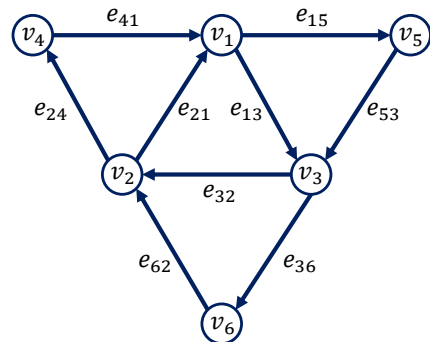


図-1 対象とするネットワーク

OD	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6
v_1	0	0	0	0	0	0
v_2	0	0	0	0	0	0
v_3	0	0	0	0	0	0
v_4	0	a	a	0	0	0
v_5	a	a	0	0	0	0
v_6	a	0	a	0	0	0

図-2 OD表

$q_{BN} < 3a$ の成立を仮定する. さらに, 大島・大口⁴⁾が整理しているシングルグリッドネットワークのグリッドロックの発生条件により, 合流比については $0 < m < 1/3$ の成立を仮定する.

(2) カスケード故障としてのグリッドロック

(1) で述べた仮定の下, グリッドロックが交通ネットワークのカスケード故障として捉えられることを示す. カスケード故障は 1) 平常状態, 2) 局所的故障の発生 (トリガー), 3) 連鎖的障害の波及, 4) 終局状態の大きく分けて4つのプロセスで説明することができる.

a) 平常状態

$0 < 3a \leq q_{max}$ の成立を仮定しているため, 初期状態ではどのリンクでも渋滞が発生しないことが保障されており, 交通ネットワークは問題なく機能している.

b) 局所的障害

ここで, ある時刻から一定時間 T_{BN} において, リンク e_{32} の容量が q_{max} から q_{BN} へと低下することを仮定する. このとき, $q_{BN} < 3a$ の成立を仮定しているため, リンク e_{32} で渋滞が発生し, 上流へと延伸していく. 本研究においては, この容量低下がカスケード故障のトリガーとなる.

c) 連鎖的障害の波及

リンク e_{32} の容量低下がトリガーとなり, 渋滞が上流ノード v_3 に向かって延伸する. そして, ノード v_3 に到達した後, リンク e_{13} およびリンク e_{53} の上流リンクへと延伸していく. さらにノード v_1 に渋滞が到達した後, リンク e_{41} およびリンク e_{21} の上流リンクへと延伸していく. そして, ノード v_2 に渋滞が到達する. これが1週目の渋滞状態の伝播である. これにより, ボトルネック交通容量が更に低下するため, 2週目の渋滞伝播が発生する. リンク e_{32} の状態は更に変化し, 流率が低下した状態へと移る. 具体的には, 図-3のように2週目の渋滞状態の伝播が発生した後のリンク e_{32} の流率 q_{32}^2 は以下のようになる⁴⁾.

$$q_{32}^2 = m^3 / \{(1/2)^3(1 - m)^3\} q_{BN} \quad (1)$$

ここで, 合流比については $0 < m < 1/3$ を仮定しているため, $0 < m^3 / \{(1/2)^3(1 - m)^3\} < 1$ となり, 必ず $q_{32}^2 < q_{BN}$ となる. 3週目以降の渋滞伝播を同様に考えると, n 週目の渋滞状態の伝播後のリンク e_{32} の流率 q_{32}^n は以下のようになる.

$$q_{32}^n = [m^3 / \{(1/2)^3(1 - m)^3\}]^{n-1} q_{BN} \quad (2)$$

6リンク ($e_{13}, e_{21}, e_{32}, e_{41}, e_{53}, e_{62}$) の流率が同様に低下していく. これが, 本研究におけるカスケード故障の連鎖的障害の波及のプロセスである.

d) 終局状態

上記a)-c)で説明した通り, 交通ネットワーク状態が徐々に悪化し, 時間を無限大に取った極限状態では, 6リン

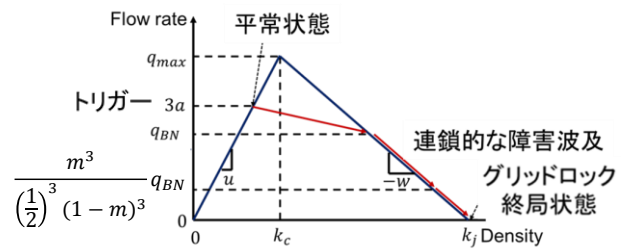


図-3 リンク e_{32} の状態変化

ク ($e_{13}, e_{21}, e_{32}, e_{41}, e_{53}, e_{62}$) の流率が全てゼロとなり, 需要を全く捌けないグリッドロック状態に陥ってしまう. これが本研究におけるカスケード故障の終局状態である.

以上の通り, グリッドロックは 1) 平常状態, 2) 局所的障害, 3) 連鎖的障害の波及, 4) 終局状態の4つのカスケード故障のプロセスとして説明することができる.

3. 意図的除去によるリスクマネジメント

第2章では, グリッドロックが交通ネットワークのカスケード故障として捉えられることを示した. これを踏まえて, ネットワーク科学におけるカスケード故障に対する防御策である IRs (Intentional Removals) をグリッドロックの回避策へと応用する.

(1) Intentional Removals (IRs)

本節では, Motter⁹⁾が提案したカスケード故障に対する防御策である Intentional Removals (以下, IRs と表記する) について述べる. この方策はカスケード故障に対する代表的な防御策のひとつである¹⁰⁾. カスケード故障に対する防御策は, 事前防御と事後防御に大別できる. 事前防御は, トリガー発生前に, ネットワーク構造を変化させたり, 容量を増大させるなどしてカスケード故障を予防する方策である. 一方で, 事後防御はトリガー発生後に何らかの方策を打つことで連鎖的障害の波及を抑制し, ネットワークを防護する方策である. IRs は事後防御に分類される. 以下, 詳細を述べる.

ネットワークにおける重要ノードおよびリンクに対して攻撃が加わった場合, もしくは障害が発生した場合, 深刻なカスケード故障に発展する危険性がある. IRs は, このような深刻なカスケード故障の発生を回避し, ネットワーク全体にもたらされる損害を軽減することを狙いとする方策である. トリガー発生直後のネットワーク状態を観測できるという設定の下で, 1) 負荷 (流れの量) が容量を大きく超えるリンク, または 2) 負荷が小さなノードの意図的な除去を行う. これらのふたつの方策は独立に提案されており, 両者ともに最終的にネットワー

ク全体にもたらされる損害が軽減されることが数値実験によって示されている。

(2) グリッドロックの回避策

本節では IRs に基づく 3 つのグリッドロックの回避策について述べる：a) リンク除去、b) ノード除去、c) ノード・リンク混合除去。

a) リンク除去

Motter⁹⁾は、トリガー発生直後のネットワーク状態において、容量が負荷を大きく超えるリンクを除去する方策を提案している。この方策を応用し、本研究では、トリガー発生直後の状態において、容量（最大流率）が潜在的需要を大きく超えるリンク（以後、過負荷リンクと呼ぶことにする）を、容量低下の発生時間 T_{BN} の間、除去する方策を考える。リンクの除去は、そのリンクの上流端で流入制御を行うことに相当する。なお、リンクの除去により、経路が存在しなくなった OD ペアについては、当該ノード上で出発を T_{BN} だけ待機させる。以下の式

(3) で定義されるように、リンク ij の潜在的需要 x_{ij} とリンク ij の容量 q_{max}^{ij} の比を計算し、この比が最大のリンクを除去することになる。

$$x_{ij}/q_{max}^{ij} = (\sum_{k \in K_{rs}} \sum_{r \in \Omega} \delta_{ij,k}^{rs} f_k^{rs}) / q_{max}^{ij} \quad (3)$$

ここで、 f_k^{rs} は OD ペア rs 間第 k 経路の経路交通量、 $\delta_{ij,k}^{rs}$ は OD ペア rs 間第 k 経路がリンク ij を含むとき 1 となり、そうでないとき 0 を取るもので、 Ω は全 OD ペア集合、 K_{rs} は OD ペア rs 間の全経路集合である。

グリッドロック回避のために複数リンクの除去が必要な場合は、リンク特定と除去の作業を繰り返し行う。

b) ノード除去

Motter⁹⁾は、トリガー発生直後のネットワーク状態において、負荷が小さなノードを除去する方策を提案している。この方策を応用し、本研究では、以下の 2 ステップの手順を踏んで除去するノードを特定する。なお、Motter⁹⁾の研究におけるノード除去は、その名の通り、ノードをネットワークから取り除くことを意味している。また、当該ノードと繋がる全てのリンクも同様にネットワークから除去される。一方で、本研究におけるノード除去とは、そのノードの発生・集中需要の出発を T_{BN} だけ当該ノード上で待機させ、かつ、そのノードと繋がる全リンクの上流端で流入制御を行うことに相当する。

まず、式(4)で定義されるように、ノード i を通過する潜在的需要 d_i を計算し、この値が最小となるノードを特定する。なお、ノード i の発生需要および集中需要は除くことに注意する。

$$d_i = \sum_{k \in K_{rs}} \sum_{r \in \Omega} \delta_{i,k}^{rs} f_k^{rs}, r \neq i, s \neq i \quad (4)$$

ここで、 $\delta_{i,k}^{rs}$ は OD ペア rs 間第 k 経路がノード i を含むとき 1 となり、そうでないとき 0 を取る。

次に、 d_i が最小となるノードが複数存在する場合は、式(5)のようにノード i の過負荷リンク ol への潜在的需要の発生量 x_{ol}^i を計算し、1 ステップで特定された候補の中で、この値が最大となるノードを特定する。

$$x_{ol}^i = \sum_{k \in K_{is}} \sum_{s \in V} \delta_{ol,k}^{is} f_k^{is}, s \neq i \quad (5)$$

ここで、 $\delta_{ol,k}^{is}$ は OD ペア is 間第 k 経路が過負荷リンク ol を含むとき 1 となり、そうでないとき 0 を取る。

リンク除去と同様に、グリッドロック回避のために複数ノードの除去が必要な場合は、ノード特定と除去の作業を繰り返し行う。

c) ノード・リンク混合除去

Motter⁹⁾は、ノード除去とリンク除去を独立な方策として提案しているが、本研究では、複数の除去が必要な場合にノードとリンクを混合させて除去する方策を提案する。ノード除去はリンク除去を含んでおり、一般的にその影響はより大きなものとなるため、最初に考える策としてはリンク除去が優先されるべき状況が多いと考えられる（ただし、リンク除去により、多くの OD 間で経路が存在しなくなってしまう場合が存在するため、リンク除去による影響の大きさはネットワークトポロジーに依存すると考えられる）。一方で、グリッドロックを回避するためにはノード除去がやむを得ない状況も考えられる。そのため、ノードとリンクを合わせて除去する方策を考える必要が出てくると考えられる。除去するノードとリンクのそれぞれの特定方法は a), b) で述べた方法を用いる。

(3) 適用結果

(2)で説明したグリッドロックの回避策を適用した結果を示し、その効果を分析する。設定条件としては、第 2 章(1)で示したものと同一条件を用いる。この条件の下では、第 2 章(2)で説明した通り、ネットワークは最終的に交通需要を全く捌けないグリッドロック状態に陥ってしまう。本節ではこの条件の下で、ネットワークがグリッドロック状態に陥ることを回避することを狙いとする。

a) リンク除去

リンク除去による効果について分析する。除去すべきリンクを特定するため、トリガー発生直後において、式

(3) を用いて潜在的需要と容量の比を全てのリンクに対して計算すると以下の通りになる。

- $x_{32}/q_{max}^{32} = 3a/q_{BN}$
- $x_{13}/q_{max}^{13} = x_{21}/q_{max}^{21} = 3a/q_{max}$
- $x_{41}/q_{max}^{41} = x_{53}/q_{max}^{53} = x_{62}/q_{max}^{62} = 2a/q_{max}$
- $x_{15}/q_{max}^{15} = x_{24}/q_{max}^{24} = x_{36}/q_{max}^{36} = 0$

これより、過負荷リンクとしてリンク e_{32} が特定される。ここで、 $5a \leq q_{max}$ が成立する場合は、リンク e_{32} の除去によってグリッドロックを回避できる。一方で、この条件が成立しない場合 ($3a \leq q_{max} < 5a$) が成立す

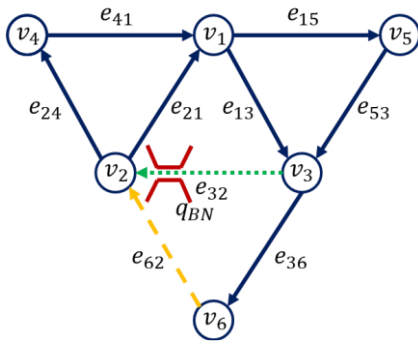


図-4 リンク除去

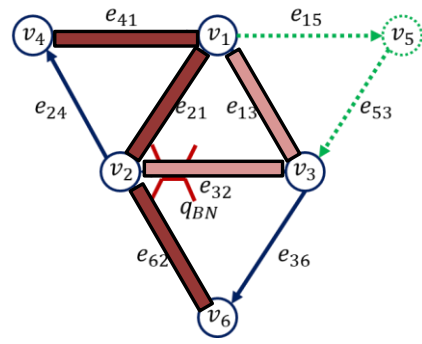


図-5 ノード除去

る場合) は更なるリンク除去が必要となる。

$3a \leq q_{max} < 5a$ が成立する場合、次に除去するリンクを特定するため、リンク e_{32} を除去した状態で、式 (3) を用いて潜在的需要と容量の比を計算する。その結果は以下の通りになる。

- $x_{62}/q_{max}^{62} = 5a/q_{max}$
- $x_{13}/q_{max}^{13} = x_{21}/q_{max}^{21} = x_{36}/q_{max}^{36} = 3a/q_{max}$
- $x_{41}/q_{max}^{41} = x_{53}/q_{max}^{53} = 2a/q_{max}$
- $x_{15}/q_{max}^{15} = x_{24}/q_{max}^{24} = 0$

これより、比が最大となる過負荷リンクとしてリンク e_{62} が特定される。リンク e_{62} を除去することでグリッドロックを回避することができる (図-4)。しかしながら、リンク e_{32} と e_{62} を除去したことにより、ノード v_5 と v_6 から発生する全需要とノード v_4 から v_2 への経路が存在しなくなるため、 $5a$ の需要が各ノードで出発を T_{BN} だけ待機する必要が生じる。

b) ノード除去

ノード除去による効果について分析する。まず、式 (4) を用いて各ノードを通過する潜在的需要を計算すると以下の通りになる。

- $d_1 = d_2 = d_3 = 3a$
- $d_4 = d_5 = d_6 = 0$

これより、値が最小となるノード v_4, v_5, v_6 が除去すべきノードの候補として特定される。

次に、この状態における過負荷リンクであるリンク e_{32} への潜在的需要の発生量を式(5)を用いて計算する。結果は以下の通りである。

- $x_{32}^5 = 2a$
- $x_{32}^4 = a$
- $x_{32}^6 = 0$

これより、過負荷リンクへの発生需要が最大であるノード v_5 が除去すべきノードとして特定される。ここで、 $a \leq q_{BN} < 3a$ が成立する場合は、ノード v_5 から発生していた $2a$ の需要の出発を T_{BN} だけ待機させることで、グリッドロックを回避することができる。一方で、 $0 < q_{BN} < a$ の場合は、リンク e_{32} から渋滞が発生し、リン

ク $e_{32}, e_{13}, e_{41}, e_{21}, e_{62}$ で渋滞が発生するもの (図-5)、ノード v_2 で合流する流れは存在せず、第 2 章で述べたような 2 週目の渋滞伝播は起こらないため、グリッドロックは回避できる。

c) ノード・リンク混合除去

まず、除去すべきリンクを特定するため、トリガー発生直後において、式 (3) を用いて潜在的需要と容量の比を全てのリンクに対して計算すると、a) で示した通り、リンク e_{32} が特定される。そして、 $5a \leq q_{max}$ が成立する場合は、リンク e_{32} の除去によってグリッドロックを回避できる。その一方で、 $3a \leq q_{max} < 5a$ が成立する場合は更なる除去が必要となる。

そこで、次にノード除去を考える。リンク e_{32} が除去された状態で式 (4) を用いて各ノードを通過する潜在的需要を計算すると以下の通りになる。

- $d_1 = d_2 = d_3 = d_6 = 3a$
- $d_4 = d_5 = 0$

これより、値が最小となるノード v_4, v_5 が除去すべきノードの候補として特定される。

次に、この状態における過負荷リンクである e_{62} への潜在的需要の発生量を式(5)を用いて計算すると結果は以下の通りになる。

- $x_{62}^5 = 2a$
- $x_{62}^4 = a$

これより、過負荷リンクへの発生需要が最大であるノード v_5 から発生していた $2a$ の需要の出発を T_{BN} だけ待機させることで、グリッドロックを回避できる (図-6)。

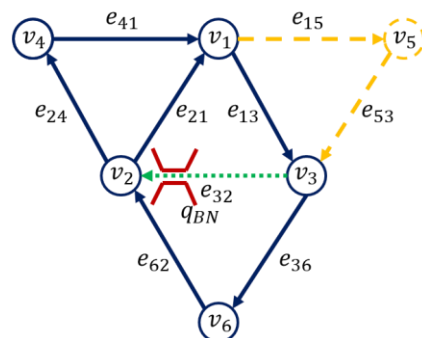


図-6 ノード・リンク混合除去

(4) 考察

ネットワーク科学における IRs は、交通ネットワークに対して適用した場合、リンクへの流入制御とノードでの出発の待機を組み合わせた制御として捉えることができる。そして(3)で示した通り、これらの制御によってたしかにグリッドロックは回避することができる。しかし、トリガーとなる容量低下の発生に対して流入制御によるリンク閉鎖を行うことは交通ネットワークの処理能力を失わせることになる。そして、ノードでの出発の待機を行うことは、その状態の交通ネットワークが本来有しているはずの処理能力を十分に生かし切れない可能性がある。このため、ネットワーク科学における IRs をそのまま適用するのではなく、交通ネットワークが本来有している処理能力をできるだけ低下させず、かつ、その処理能力を十分に発揮できるグリッドロック回避のための制御へと応用していく必要があるといえる。

4. 結論

(1) 本研究の成果

本研究では、ネットワーク科学におけるカスケード故障に関する研究の知見を、交通ネットワーク上で発生するグリッドロックとそのリスクマネジメント策へと応用した。具体的には、グリッドロックがカスケード故障として説明できることを示し、その上で、カスケード故障に対する防御策のひとつであるノード・リンクの意図的除去 (IRs: Intentional Removals)⁹⁾をグリッドロックの回避策として適用した。そして、ネットワーク科学における IRs は、交通ネットワークに適用した場合には、リンクへの流入制御 (リンク閉鎖) とノード上での出発の待機を組み合わせた制御として捉えられることを示した。そして、IRs をそのまま交通ネットワークへと適用のではなく、交通ネットワークが本来有している処理能力をできるだけ低下させず、かつ、その処理能力を十分に発揮できるグリッドロック回避のための制御へと応用していく必要があることを示した。

(2) 今後の課題

経路変更という交通ネットワーク特有の影響を考慮した上で、グリッドロックに対するリスクマネジメントとしてノード・リンク除去が効果的であるか、分析する必

要がある。ネットワーク科学におけるカスケード故障研究では、ノードに容量が設定されており、その容量を負荷が上回った場合にノードが破壊されるようなモデルが多く使われているが⁷⁾、交通ネットワークにおいては渋滞の延伸を考える必要があることから、ネットワークトポロジーによる影響の考え方が異なる。例えば、ネットワークからリンクを除去して、ツリー型のネットワークとすれば、どこかのリンクの容量が低下した場合、渋滞が発生することはあっても、流率が完全にゼロとなるグリッドロック状態に陥ることはない。ネットワーク科学におけるカスケード故障研究ではこのような考え方はしない。ノード・リンクの除去により、ツリー型ネットワークのような明白なものを除いたネットワークトポロジーへの修正により、グリッドロックを回避できるか否かを明らかにすることは今後の課題である。

参考文献

- 1) Daganzo, C. F.: Urban gridlock: Macroscopic modeling and mitigation approaches. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(1), 49-62, 2007.
- 2) Mahmassani, H. S., Saberi, M., Zockaie, A.: Urban network gridlock: Theory, characteristics, and dynamics. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 36, 480-497, 2013.
- 3) 清田裕太郎, 岩倉成志, 野中康弘: 東日本大震災時のグリッドロック現象に基づく都区道路のボトルネック箇所の考察, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 70(5), I_1059-I_1066, 2014.
- 4) 大島大輔, 大口敬: シングルグリッドネットワークにおけるグリッドロック現象の発生条件. 土木学会論文集 D3 (土木計画学), 70(5), I_629-I_635, 2014.
- 5) Barabási, A. L.: *Network science*. Cambridge university press. 2016.
- 6) Buldyrev, S. V., Parshani, R., Paul, G., Stanley, H. E., Havlin, S.: Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. *Nature*, 464(7291), 1025, 2010.
- 7) Motter, A. E., Lai, Y. C.: Cascade-based attacks on complex networks. *Physical Review E*, 66(6), 065102, 2002.
- 8) Crucitti, P., Latora, V., Marchiori, M.: Model for cascading failures in complex networks. *Physical Review E*, 69(4), 045104, 2004.
- 9) Motter, A. E.: Cascade control and defense in complex networks. *Physical Review Letters*, 93(9), 098701, 2004.
- 10) Barrat, A., Barthelemy, M., Vespignani, A.: *Dynamical processes on complex networks*. Cambridge university press. 2008.

(2018.4.27 受付)

INTENTIONAL REMOVALS OF NODES AND LINKS TO AVOID GRIDLOCK

Kashin SUGISHITA, Katsuya SAKAI, Takamasa IRYO and Yasuo ASAKURA

Researches about cascading failure have been developed in network science for about 15 years. Cascading failure is a phenomenon where a small shock or error in a local part of networked systems triggers propagation of failures, leading to catastrophic damage on the whole system. Previous studies in network science have been focused on power outage, communication disturbance or financial crisis. However, there is a possibility that we can apply concepts in network science into transportation fields. Based on this idea, this study aims 1) to show that gridlock can be captured as cascading failure in transportation networks and 2) to propose a strategy to avoid gridlock which is developed by a strategy against cascading failure proposed by Motter (2004).