

カスケード故障に対する 損害軽減策の提案

杉下 佳辰¹・日下部 貴彦²・朝倉 康夫³

¹学生会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 (〒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 東京大学 空間情報科学研究センター
(〒277-8568 千葉県柏市柏の葉5-1-5 東京大学柏キャンパス 総合研究棟461号室)
E-mail: t.kusakabe@csis.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東京工業大学 環境・社会理工学院 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1-M1-20)
E-mail: asakura@plan.cv.titech.ac.jp

局所的な障害が要因となり、連鎖的な障害がシステム全体へと波及していく現象をカスケード故障 (cascading failure) と呼ぶ。本研究では、ネットワーク状のシステムにおいて連鎖的なリンク障害が発生した場合に、最終的にネットワークにもたらされる損害を効果的に軽減する方策を提案する。具体的には、リンクの連鎖障害の要因となる局所的障害が発生した直後に、Collective-Influence (CI) と呼ばれる指標値の低いノードを意図的に除去する方策を提案する。CIはネットワーク内の影響力の高いノード集合を特定するために用いることができるとされるが、リンクの連鎖障害を効果的に妨げる意図的ノード除去の損害軽減策にも応用できることを示す。さらに、リンク障害が波及しやすい脆弱なネットワークに対しても、提案策によって大きな損害軽減効果が得られることを示す。

Key Words : cascading failure, vulnerability, network topology, complex networks

1. 序論

現代社会は、通信システム、電力供給システム、交通システムなどの様々なインフラストラクチャーによって支えられているが、これらのシステムは互いに依存しあって機能しているがゆえに、ひとつのシステムで発生した障害が別のシステムへと波及する危険性も認識されている^{1,2)}。Helbing³⁾は、インフラストラクチャーのような相互に依存関係が存在するシステムでは、依存関係の複雑性が増大し、依存の度合いが強まるほど、システム全体が不安定かつ制御不能な状態に陥る危険性が高まると指摘している。システム間の依存性が現実社会に莫大な損害をもたらした代表的な例として、2003年に発生したイタリア大停電が挙げられる。Buldyrev et al.⁴⁾によれば、相互依存関係にある電力供給網と通信網において、電力供給網で発生した小さな障害が要因となり、通信網を巻き込んだ連鎖的な障害を発生させ、深刻な停電へと拡大したという。

局所的な障害が要因となり、連鎖的な障害がシステム全体へと波及していく現象をカスケード故障 (cascading

failure) と呼ぶ。ライフラインに代表される社会基盤システムはネットワークとして表現され、ネットワーク上に何らかの物理的な流れが存在する場合が多い。ノードやリンクで流れを処理する能力 (容量) には限界があるのが一般的である。カスケード故障は、このようなネットワークであれば生じ得る現象である。すなわち、平常時には、流れが容量以下に収まり、適切に処理され、システムとしての機能を果たすが、ネットワーク内で障害が発生した場合には、その障害を避けて迂回する流れが発生するために、迂回してきた流れが容量を超えてしまった部分で更なる障害が発生する。この障害によって更に流れが変化し、新たな障害を生むという連鎖的な障害が発生する可能性がある。この現象がカスケード故障である。

近年、現実中存在する多様なネットワークが、いくつかの共通する性質を持つことが明らかとなりつつある。例えば、スモールワールド性⁵⁾、スケールフリー性⁶⁾などの性質である。ネットワークの性質を調べる学問としてネットワーク科学が存在するが、ネットワークの重要な性質のひとつとしてネットワークの頑健性が挙げられる。

ネットワークは、その繋がり方（トポロジー）だけを見ても大きく性質が異なり、繋がり方がネットワークの頑健性に大きく影響することが明らかとされつつある⁷⁾。さらに、繋がり方はカスケード故障の波及のし易さにも大きく影響し、条件次第では、ノード数が数千、数万の大規模なネットワークであっても、たったひとつのノードの障害がネットワーク全体に壊滅的な損害をもたらすことが確認されている⁸⁾。

カスケード故障によってもたらされる壊滅的な損害を回避するための損害軽減策はふたつに大別できる。ひとつ目は、カスケード故障に備えてあらかじめネットワークの頑健性を高めておく方策（事前方策）であり、ふたつ目は、カスケード故障の進展が始まった際にその波及を抑制する方策（事後方策）である。本研究では、後者の事後方策に着目する。

本研究の目的は、連鎖的なリンク障害がネットワークを波及していく場合に、その連鎖障害の拡大を妨げ、最終的にネットワークにもたらされる損害を軽減する事後方策を提案することである。提案策をモデル化し、数値計算によって損害軽減の効果を定量化して考察する。

2. 既往研究の整理と本研究の位置づけ

(1) 既往研究の整理

a) ネットワーク構造と頑健性

ネットワークの頑健性について議論する際の最も単純な考え方として、ノードやリンクを取り除いたときのネットワーク構造の変化について分析するものがある。Albert et al.⁷⁾は、ネットワーク上でランダムに発生するノードの除去（故障）に対する耐久性（耐障害性、フォールトトレランス）および、次数の高いノードの選択的な除去（攻撃）に対する耐久性（耐攻撃性）について調べている。その結果、次数分布がべき則に従うスケールフリーネットワークの場合には、耐障害性が極めて高いことが示された。これは少数のハブの存在により、ランダムな障害が発生しても少数のハブがネットワークの連結性を保持するためである。しかし、その一方で、ハブを選択的に取り除いた場合には、ネットワークが容易に分断されてしまう脆弱性も併せ持ち、耐攻撃性は極めて低いことが確認されている。スケールフリーネットワークのこの性質は"robust yet fragile" nature として知られている⁹⁾。

ネットワークへの効果的な攻撃戦略についても研究されている。Holme et al.¹⁰⁾はノードを選択して逐次的に除去する際に、初期状態のネットワークの次数中心性と媒介中心性の高いノードから除去する戦略、およびノードを除去して次数中心性と媒介中心性を再計算しながら値の高いノードを除去していく戦略の効果について調べて

いる。Albert et al.⁷⁾以降、ネットワークの耐攻撃性に関して議論する際には、次数中心性や媒介中心性に基づいた攻撃戦略に対する頑健性を評価するものが多かった。しかし、Morone and Makse¹¹⁾によって、このような中心性指標を用いた場合よりも、ノードの周辺の局所的なトポロジーから定義されるCollective-Influence (CI)と呼ばれる指標値の高いノードに対して攻撃を行った場合、より少ないノードの除去でネットワークが破壊されてしまう可能性があることが分かった。さらに、CIの高いノード集合の中には、これまで非重要と考えられていた低次数ノードが比較的多く含まれることが明らかとなった。CIは本研究が提案する損害軽減策で用いる指標であり、第3章で詳細を説明する。

b) カスケード故障

カスケード故障とは、ある故障が要因となり、システム全体を連鎖的な障害が波及していく現象を指す。ネットワーク上の物量の流れの変化のように、障害の影響が波及する何らかのメカニズムが存在しなければ、ネットワークの一部で発生した障害が他の部位へと影響を与えることはなく、連鎖的な障害も発生しない。前項a)では、このようなメカニズムを考えず、ネットワークからノードまたはリンクを逐次的に取り除き、ネットワーク構造の変化を分析した研究について整理した。影響が伝搬するメカニズムが存在する場合には、ひとつのノードやリンクを取り除いただけで、その影響が他の部位へと伝搬され、連鎖的な障害が発生する可能性があり、前項a)で整理した研究で示されていたものとは異なったネットワーク構造の変化が生じる。これまでにネットワーク上で発生するカスケード故障の波及メカニズムを記述するモデルがいくつか提案されている。Motter and Lai⁸⁾は、ノードにかかる負荷とノードの容量を定義し、負荷が容量を超えて発生する過負荷故障によってノードが連鎖的に故障するモデルを提案した。Crucitti et al.¹²⁾は、リンクの効率性の低下を反映させたカスケード故障モデルを提案している。Buzna et al.¹³⁾は、各ノードの状態が時間の関数として表され、ノードの状態の悪化がリンクを通じて波及していくモデルを提案している。また、Buzna et al.¹⁴⁾は、ノードの状態の悪化が波及していく現象に対する回復策の有効性についても議論している。Simonsen et al.¹⁵⁾は、Motter and Lai⁸⁾によって提案された過負荷故障モデルを、より動的なモデルへと拡張している。時々刻々と変化するフローの考慮により、ノードは一斉には故障せず、負荷が容量を超えたノードが次々と故障し、フローの流れ方も時々刻々と変化することになる。このモデルを用いて、Simonsen et al.¹⁵⁾は、フローの定常状態が新たな定常状態へ移る際の過渡現象がネットワークのカスケード故障に対する脆弱性を高めるという結果を得ている。過渡現象とは、ある定常状態から別の定常状態に変

化するとき、いずれの状態とも異なる非定常状態となる現象である。また、Motter¹⁰は、局所的故障直後の媒介中心性の低いノードの意図的除去によってカスケード故障の進展を抑制する策を提案している。媒介中心性が低いノードは、ネットワーク上の流れの媒介への貢献が小さい一方で、流れを発生・集中させて他のノードへ負荷をかけているノードであるといえる。これらのノードを局所的故障の発生直後に意図的に除去することによって、ネットワークにかかる負荷を軽減し、媒介中心性が高いノードが故障することを回避しようとする方策である。

(2) 本研究の位置づけ

本研究では、局所的なリンク障害が連鎖的なリンク障害を生み、ネットワーク全体へと波及していくようなカスケード故障に対して、損害を軽減する方策を提案する。具体的には、局所的なリンク障害が発生した場合に、Collective-Influenceと呼ばれる指標を用いてノードを特定して意図的に除去し、ネットワークにかかる負荷を軽減させることによって、カスケード故障の波及を抑制する方策である。この方策は、Motter¹⁰が提案する媒介中心性を用いたノード特定・意図的除去による損害軽減策を発展させたものであるといえる。Morone and Makse¹¹によれば、Collective-Influence (CI)はネットワーク内で強い影響力を持つノード集合 (influencerやsuper-spreaderとも呼ばれる) の特定に用いることができるとされているが、本研究では、CIをカスケード故障に対する損害軽減のためのノード集合の特定に応用する。リンク障害が波及するカスケード故障に対して、CIを用いた損害軽減策の有効性を検証する点で従来研究と異なる。

3. 提案策のモデル化

(1) カスケード故障モデル

本研究では、Motter and Lai⁹が提案するカスケード故障モデルである過負荷故障モデルを基に、リンクの障害の波及をモデル化して用いることにする。このモデルについて全体像を説明した後、詳細を説明する。

本研究で用いるモデルの全体像は以下のようなになる。まず、リンクに対して負荷と容量を定義する。この場合の負荷とは、リンクが処理する流れの量を意味する。平常時においては、全てのリンクが正常に機能していると考えられる。平常時にかかる負荷に対して、リンクはある一定の割合の余裕を持って設計されていると考えて容量を定義する。この状態からあるリンクで障害が発生したとする。このとき、当該リンクを通過していた流れは別の経路を流れることになる。換言すれば、負荷が再分配される。そして再分配された負荷を処理しきれなくなった

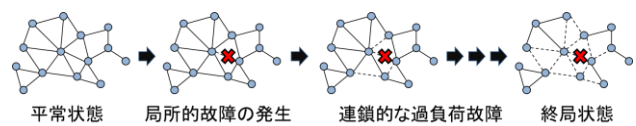


図-1 カスケード故障モデルの概念図

リンクが新たに過負荷によって故障する。この新たな故障によって、さらにネットワーク上の流れが変化し、負荷が再分配され、別のリンクで過負荷故障が発生し、これが繰り返されるというモデルである。負荷の再分配とリンクの過負荷故障が連鎖的に発生するが、リンクが故障すると、特定のノードペア間の流れの往来が不可能となり、当該ノードペア間の流れの分だけ流れの総量が減少する。そのため、全てのリンクが故障するまで連鎖故障が続くとは限らず、故障していない全てのリンクで負荷が容量を下回るような状態で故障の連鎖が停止することになり、これが終局状態となる。全体像をまとめると図-1のようになる。

それでは、本研究で用いるカスケード故障モデルの詳細について記述する。以下に記号表記をまとめる。

- A_t : t タイムステップのネットワークの隣接行列
- a_{ij}^t : 隣接行列 A_t の (i, j) 成分
- V : 全ノード集合
- E : 全リンク集合
- E_f : 局所的な故障が発生するリンク集合
- $L_{ij}(t)$: t タイムステップでリンク ij にかかる負荷
- C_{ij} : リンク ij の容量
- α : 耐久性パラメータ (平常時状態における各リンクの負荷に対する容量の余裕)
- $\sigma_t(h, k)$: t タイムステップでのノード h からノード k への最短経路数
- $\sigma_t(h, k|ij)$: t タイムステップでのノード h からノード k への最短経路のうちリンク ij を通過する数

以下の仮定をおく。

- いずれかの経路に含まれる全てのノードペア間を単位量の物量が流れる
- 任意のノードペア間の流れは最短経路のみを通る
- リンクの容量は不変である
- 負荷が容量を超えたリンクは過負荷故障する
- ノードは故障せず、リンクのみが故障する
- 一度故障したリンクは二度と正常にならない

a) 平常状態

あるネットワーク A_0 が存在する時、各リンクにかかる負荷と各リンクの容量を定義する。まず、平常状態においてリンク ij にかかる負荷 $L_{ij}(0)$ について説明する。フローについては上述した仮定通り、タイムステップごとに、経路が存在する全てのノードペアで単位量の物量が最短経路を通過して交換されるとする。このように仮定

するとリンク ij を通る流れの量はリンクの媒介中心性¹⁷⁾を用いて以下のように定義できる.

$$L_{ij}(0) = \sum_{h,k \in V} \frac{\sigma_0(h,k|ij)}{\sigma_0(h,k)} \quad (1)$$

次に、リンク ij の容量 C_{ij} の定義について説明する. リンクの容量は平常時にそのリンクにかかる負荷に比例するものとする. すなわち、リンク ij の容量 C_{ij} は、平常時にリンク ij にかかる負荷 $L_{ij}(0)$ と、平常時の負荷に対する容量の余裕を表す耐久性パラメータ α を用いて、以下のように表せる.

$$C_{ij} = (1 + \alpha)L_{ij}(0) \quad (2)$$

耐久性パラメータ α が大きいネットワークの場合、たとえ障害が発生して流れが変化したとしても新たに迂回してきた流れを処理できるため、カスケード障害が発生しにくいといえる. なお、平常時において式(2)のように確定された各リンクの容量は、それ以降どのタイムステップでも不変であると仮定している.

b) 局所的故障の発生

あるリンク pq において何らかの原因で障害が発生した場合を考える. リンク pq が故障することは、隣接行列の (p, q) 成分および (q, p) 成分を0とすることで表現できるため、式(3)のように隣接行列 A_1 へと更新する. なお、局所的故障はある一つのリンクの故障だけでなく、複数のリンクが一斉に故障する状況もある. その場合には局所的故障が発生する全てのリンクに対して隣接行列の成分を0として更新する.

$$a_{pq}^1 = a_{qp}^1 = 0 \quad \forall pq \in E_f \quad (3)$$

c) 連鎖的な過負荷故障

局所的故障が発生し、リンクが機能停止すると、特定のノードペア間の最短経路が変化し、フローの流れ方が変わる. 流れはどのタイムステップにおいても常に最短経路を通って流れると仮定しているため、平常時に故障したリンクを通過していた流れは、局所的故障が発生した後の状態において新たに最短となる経路を通過して流れることになる. これによって、迂回してきた流れを処理するリンクでは、リンクにかかる負荷が変化する. そこで、各リンクにかかる負荷を再計算する.

$$L_{ij}(t) = \sum_{h,k \in V} \frac{\sigma_t(h,k|ij)}{\sigma_t(h,k)} \quad (4)$$

負荷を再計算すると、負荷が容量を超えてしまうようなリンクが新たに現れる可能性がある. 負荷が容量を超えてしまったリンク uv は過負荷によって故障するものと仮定しており、これは先ほどと同様に、隣接行列の (u, v) 成分および (v, u) 成分を0とすることで表現できるため、以下のように隣接行列を更新する.

$$L_{uv}(t) > C_{uv} \Rightarrow a_{uv}^t = a_{vu}^t = 0 \quad (5)$$

この過負荷故障は、更なる最短経路の変化を生む. フローの流れ方が変わると、また新たに過負荷故障するノ

ードが出てくるといったように、連鎖的に故障が発生する.

d) 終局状態

連鎖的な故障は、全てのリンクにかかる負荷が容量以下に収まった時点で停止する. この状態が終局状態である.

$$L_{ij}(t) \leq C_{ij} \quad \forall ij \in E \quad (6)$$

(2) 損害の評価指標

終局状態においてネットワークが受けた損害を定量的に評価する. 以下に記号表記をまとめる.

G_N : 平常状態の最大連結成分のノード数

G_U : 終局状態の最大連結成分のノード数

S : ネットワークが受けた損害の評価指標

最大連結成分とは、(非)連結ネットワークに含まれるサブネットワークのうち、ノード数が最大のものを指す. 本研究では、多くの既往研究^{7,8,12)}と同様、平常状態、および終局状態のネットワークの最大連結成分のノード数を用いて以下のように定義される評価指標 S を損害の評価指標とする.

$$S = \frac{G_U}{G_N} \quad (0 \leq S \leq 1) \quad (7)$$

終局状態における最大連結成分の大きさ G_U が小さいほどネットワークが細かく分解され、損害が大きいといえるため、評価指標 S の値が0に近いほど大きな損害を表すことに注意する.

(3) 提案する損害軽減策

a) コンセプト

本研究では、連鎖的なリンク障害が波及し始めた際に、ある特定のノード集合を意図的に除去する方策を提案する. 局所的なリンク故障が発生した直後に、あえて特定のノード集合を除去することによって、それらのノードから発生する流れおよび集中する流れを取り除き、流れの総量を減らすことによって、リンクにかかる負荷を軽減する方策である. ノードの除去自体はネットワークに対して損害をもたらすものの、適切にノードを選択して除去することにより、ネットワーク全体に最終的にもたらされる損害を軽減させることを狙いとした方策である. しかし、ここで問題となるのは、意図的に除去するノード集合をどのように特定するかということである. 不適切なノードを除去してしまうと、ネットワークにより大きな損害をもたらして逆効果となる可能性がある. そこで本研究では、Collective-Influence (CI)と呼ばれる指標を応用して除去するノード集合を特定する方策を提案する. CIはネットワーク内の影響力の高いノード集合を特定するための指標として用いることができるとされており、CIの値が高いノードを逐次的に除去していくとネッ

トワークが効率的に分断されることが確認されている¹¹⁾。本研究では、これを応用し、CIの低いノード集合を特定して除去することにより、ネットワークをできる限り分断させないようにしながら、流れの総量を減らしてリンク障害の波及を妨げることを考える。

以上をまとめると、本研究が提案する損害軽減策は、局所的障害の発生直後に全てのノードに対してCollective-Influenceを計算し、その値の低いノードを特定して除去することで、流れの総量を減らしてリンク障害の波及を妨げ、最終的にネットワーク全体にもたらされる損害を軽減する策である。

b) モデル化

本研究が提案する損害軽減策は、局所的障害の発生直後かつ連鎖的なリンク障害の進展前に実行する。すなわち、(1)節のカスケード故障モデルの中で、図-2に示すタイミングで実行する方策である。

新たに用いる記号を以下に示す(図-3参照)。

- r : Collective-Influenceを定義する際に設定する球の半径
- $CI_r(i)$: ノード*i*の半径*r*でのCollective-Influence
- k_i : ノード*i*の次数
- $Ball(i, r)$: ノード*i*を中心とし、半径*r*の球で表される部分グラフ
- $\partial Ball(i, r)$: ノード*i*を中心とする半径*r*の球の球面上に存在するノード集合
- f : 除去率(損害軽減策として意図的に除去するノードの割合)
- V_{IRS} : 意図的に除去するノード集合

損害軽減策に関する仮定は以下の通りである。

- 局所的なリンク障害の発生を即座に検知し、その状態のネットワークトポロジーを観察できる
- 局所的故障の発生直後かつリンクの連鎖故障の進展前に損害軽減策を実行できる

(1)節で記述したカスケード故障モデルの中に、局所的故障の直後の損害軽減策の実行が組み込まれることになる。ここでは損害軽減策実行のモデル化について説明する。新たな仮定として、局所的故障の発生直後のネットワークトポロジーを観察できること、および局所的故障の発生直後かつ連鎖的なリンク障害の進展前に提案策を実行できることを仮定する。

損害軽減策の実行のため、局所的障害が発生した直後

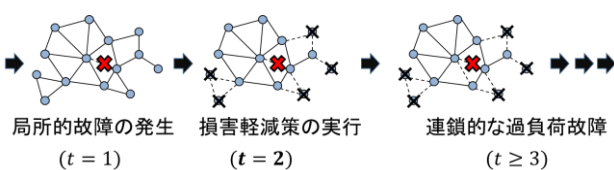


図-2 提案する損害軽減策の実行

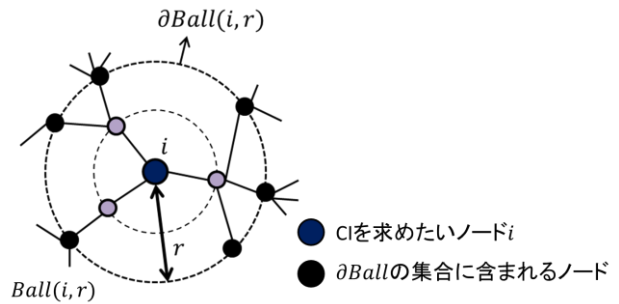


図-3 Collective-Influenceの定義のための部分グラフ

の隣接行列 A_1 で表されるネットワークにおいて、全てのノードのCollective-Influence (CI) を計算する。CI は以下のように定義される¹¹⁾。

$$CI_r(i) = (k_i - 1) \sum_{j \in \partial Ball(i, r)} (k_j - 1) \quad (8)$$

ここで、 $CI_r(i)$ とは、半径*r*におけるノード*i*のCollective-Influenceであり、 k_i はノード*i*の次数、 $\partial Ball(i, r)$ はノード*i*を中心とし、半径*r*で表される部分グラフの球面上に存在するノード集合である(図-3参照)。この定義からわかる通り、ノード*i*のCIは、ノード*i*自身の次数のみならず、頂点間距離*r*だけ離れたノードの次数も用いて定義される。そのため、たとえノード*i*自身の次数が小さく、次数中心性が小さい場合であっても、頂点間距離*r*だけ離れた位置に、次数の大きなノードが存在する場合には、CIの値が大きくなるということである。すなわち、あるノードのCIはネットワークの局所的なトポロジーによって決まる。これは媒介中心性や近接中心性、情報中心性のようにネットワーク全体のトポロジーからノードの中心性が定義される指標とは大きく異なる特徴である。さらに、この特徴は、計算時間にも影響するものであり、ネットワークの局所的なトポロジーから計算されるCIは、より少ない計算時間で求めることができる。Brandes¹⁸⁾によれば、媒介中心性の計算オーダーはノード数を*N*、リンク数を*M*とした場合に $O(NM)$ 程度である一方で、Kovács and Barabási¹⁹⁾によると、Collective-Influenceの計算オーダーは $O(N \log N)$ まで下げることができるという。

本研究が提案する損害軽減策は、CIの値が小さなノードから順に、除去するノードの数が全ノード数に対して一定の割合となるまでノードを意図的に除去していくという策である。この割合*f*を除去率と呼ぶことにする。

ノード*i*の意図的除去は、以下のように隣接行列 A_1 から、*i*行目と*i*列目の成分を全て0として新たな隣接行列 A_2 へと更新することで表現できる。

$$a_{ii}^2 = a_{ii}^1 = 0 \quad \forall i \in V_{IRS} \quad \forall l \in V \quad (9)$$

意図的ノード除去を実行した後、連鎖的なリンクの過負荷故障が発生する。リンクの連鎖故障のモデル化は、(1)節のc)で記述した通りであり、連鎖故障の停止および終局状態への収束も(1)節のd)で記述した通りである。

4. 数値計算

第4章では本研究が提案する方策の有効性について、数値計算結果を示して考察する。(1)で結果の表現方法について記述し、(2)で第3章のモデルをカスケード故障に対して脆弱であると考えられるネットワークへと適用した場合の数値計算結果を示し、提案策の有効性について考察する。

(1) 結果の表現方法

(1)節では第3章で説明したモデルの出力として得られる結果の表現方法について記述する。

図-4の横軸は除去率 f を、縦軸は評価指標値 S (式(7)参照)を表す。どちらも0.0から1.0までの値を取る。評価指標値 S は、0.0に近づくほど損害が大きいことに注意する。図-4の実線赤丸で示した点は、除去率 f の値が0.0の場合、つまり意図的ノード除去による損害軽減策を全く実行しない場合に、最終的にネットワークが受ける損害を表す。図-4の f^* は損害を最大限に軽減できる最適な除去率である。その一方で、除去率 f が必要以上に大きい場合には、軽減策を実行しない場合の実線赤丸で示した損害よりも大きな損害をもたらす、逆効果となる可能性がある。

(2) 数値計算結果と考察

(2)節ではモデルをリンクの連鎖故障が波及しやすいと考えられる脆弱なネットワークへと適用し、提案策の損害軽減効果の有効性について考察する。

本研究では、Barabási and Albert⁹が提案するモデルを用いてノード数100のスケールフリーネットワークを生成し、適用対象とする。スケールフリーネットワークは、次数分布がべき則に従うネットワークであり、大多数の低次数ノードと少数の次数が極めて高いノード (ハブ) を有するネットワークである。ハブの存在により、多くのノードペア間がハブを介して小さな頂点間距離で繋がることができる。しかし、その一方で、ハブに繋がる特定のリンクを多くの流れが通ることになり、そのリンク

で障害が発生した場合には、迂回する流れが大量に発生し、深刻なカスケード故障を引き起こす可能性があると考えられる。スケールフリーネットワークは、提案策が大きな損害をもたらすカスケード故障に対しても効果的に損害を軽減するかについて調べるには適切なネットワークであると考えられる。なお、Barabási and Albert⁹が提案するモデルは、確率的にネットワークを生成するため、ネットワークを生成し、これを隣接行列 A_0 として入力し、出力として評価指標値 S を求めるという操作を100回行い、平均値を求めてプロットする。

表-1にモデルへの入力条件をまとめる。耐久性パラメータ α は0.05とし、平常時におけるリンクの容量にほとんど余裕がなく、障害が波及しやすいネットワークとして設計されている状況を想定する。局所的故障としては媒介中心性最大リンクが何らかの理由で故障した場合を想定する。媒介中心性が大きなリンクは、多くの流れが当該リンクを通過しており、重要なリンクであるといえる。そのようなリンクで障害が発生すれば、当該リンクを避けて迂回する流れが大量に発生すると考えられ、深刻なリンクの連鎖故障が発生すると考えられる。除去率は0.0から1.0へと0.05刻みで変化させる。さらに、提案策はCollective-Influenceによって除去するノード集合を特定するものであるが、Collective-Influenceを求める際に必要となる半径 r についても考察するため、半径 r を1~5と変化させて損害軽減効果に与える影響を分析する。

表-1で示した入力条件によって、出力として得られる結果を図-5に示す。

表-1 モデルへの入力条件

パラメータ名	値・条件
隣接行列 A_0	スケールフリーネットワーク
耐久性パラメータ α	0.05
局所的故障	媒介中心性最大リンク
除去率 f	0.0~1.0
CIの半径 r	1/2/3/4/5

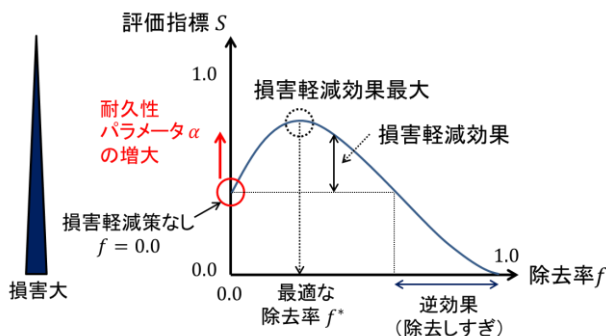


図-4 結果の表現方法

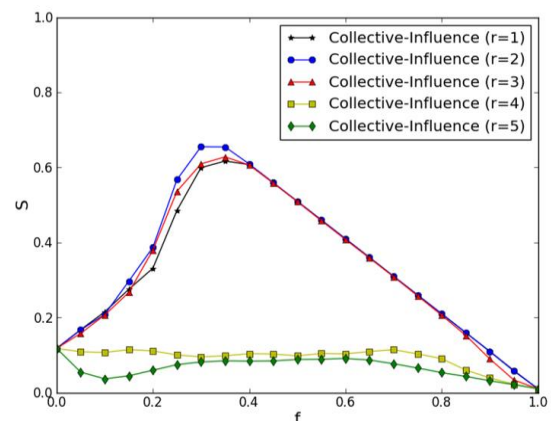


図-5 数値計算結果

耐久性パラメータ α が0.05と極めて小さく、そのような状況で媒介中心性最大リンクが故障した場合、大量の迂回する流れが発生し、その流れを捌ききれないリンクが連鎖的に故障すると考えられる。実際、図-5からわかる通り、損害軽減策を全く実行しない場合、換言すれば、意図的ノード除去を全く実行しない場合（除去率 $f = 0.0$ ）、損害の評価指標値は $S = 0.12$ 程度となっており、大きな損害がもたらされていることがわかる。この状態から意図的ノード除去の除去率 f を増加させていく。図-5で示す通り、Collective-Influenceの半径 r が1, 2, 3の場合には、除去率 f の増加とともに、評価指標値 S も増大していく。この3つの曲線はほぼ等しい値をとっているものの、 r が2の場合に最も大きく S を増大させており、 $f = 0.3$ で $S = 0.65$ 程度のピークを迎えている。すなわち、媒介中心性最大リンクの故障が発生した直後に、全ノードの30%を意図的に除去することによって、 $S = 0.12$ から $S = 0.65$ まで増大させる（終局状態の最大連結成分を大きくさせる）ことができている。同様に、 r が1や3の場合にも大きな損害軽減効果が確認できる。しかし、 r が4となった途端に、損害軽減効果は急激に低下している。 r が5の時も同様である。このように、意図的に除去するノード集合の特定のための半径 r の設定条件が損害軽減効果に大きく影響することが示されるとともに、適切な半径 r を設定し、ノード集合を特定・意図的に除去することにより、たとえネットワーク自体が脆弱であったとしても、リンクの連鎖障害の波及を効果的に妨げ、損害を大きく軽減できることが示された。

5. 結論

(1) 本研究の成果

本研究では、連鎖的なリンク障害の波及を妨げ、最終的にネットワークにもたらされる損害を軽減することを狙いとした損害軽減策を提案した。提案策は、局所的故障の発生直後かつ連鎖的なリンク障害の進展前に、Collective-Influence (CI)と呼ばれる指標値の低いノード集合を特定し、意図的に除去することで、ネットワーク上の流れの総量を減らし、リンクの連鎖障害の拡大を妨げる事後方策に分類されるものである。第3章でリンク障害の波及を妨げる損害軽減策のモデル化を行い、第4章では第3章のモデルをカスケード故障に対して脆弱であると考えられるネットワークへと適用した場合の数値計算結果を示し、考察を行った。

数値計算では、特定のリンク障害が要因となって更なるリンク障害が波及しやすい脆弱性を有すると考えられるスケールフリーネットワークを適用対象のネットワークとした。さらに、平常時でもリンクの容量にほとんど

余裕がないネットワークとして設計されている状態を想定し、耐久性パラメータ α を0.05と非常に小さく設定した。このような条件下で媒介中心性が最大のリンクで障害が発生すると、損害軽減策を全く実行しない場合には、ネットワーク全体に大きな損害を与えるが、局所的障害の発生直後にCollective-Influenceと呼ばれる指標を用いて特定したノード集合を意図的に除去する本研究が提案する損害軽減策の実行によって、最終的にネットワークにもたらされる損害を大きく軽減できることを示した。また、ノードのCollective-Influenceを計算するために必要なパラメータである半径 r が損害軽減効果に及ぼす影響についても数値計算を行って考察した。その結果、半径 r が損害軽減効果に大きな影響を及ぼし、半径 r がある値を超えると損害軽減効果が急激に低下することを確認した。

(2) 今後の課題

本研究の数値計算条件下では、損害軽減効果を最大化する条件は、Collective-Influenceの半径を $r = 2$ 、意図的ノードの除去率を $f = 0.3$ とする条件であったが、このような最適条件は現時点では試行錯誤的に求めるしかない。Morone and Makse¹¹⁾およびKovács and Barabási¹⁹⁾によれば、CIの高いノードを除去してネットワークを破壊することを考えた場合の最適な半径 r を考える際も、やはり試行錯誤的に求めるしかないとされている。最適な半径 r はネットワークの種類や規模、局所的故障ノード集合、耐久性パラメータ α 等に依存すると考えられるが、現時点でその関係性を明らかにすることはできていない。半径 r の明確な設定の方法は今後の課題としたい。

また、意図的に除去するノード集合の特定に関して、本研究ではCollective-Influenceの低いノード集合を特定したが、その他の中心性指標を用いて特定する方法も考えられる。Motter¹⁰⁾は、媒介中心性を用いてノード集合を特定・除去する方策を提案しているが、このような方策を用いた場合との損害軽減効果の比較も今後の課題とする。

参考文献

- 1) Rinaldi, S. M., James, P. P., and Terrence, K. K. : Identifying, understanding, and analyzing critical infrastructure interdependencies, *Control Systems, IEEE*, Vol. 21, No. 6, pp. 11-25, 2001.
- 2) Vespignani A. : Complex networks: The fragility of interdependency, *Nature*, Vol.464, No.7291, pp.984-985, 2010.
- 3) Helbing D. : Globally networked risks and how to respond, *Nature*, Vol.497, No.7447, pp.51-59, 2013.
- 4) Buldyrev, S. V., Roni, P., Gerald, P., Stanley, H. E., and Havlin, S. : Catastrophic cascade of failures in interdependent networks, *Nature*, Vol.464, No. 7291, pp.1025-1028, 2010.

- 5) Watts, D. J. and Strogatz, H. S. : Collective dynamics of ‘small-world’ networks, *Nature*, Vol. 393, No. 6684, pp. 440-442, 1998.
- 6) Barabási, A. L. and Albert, R. : Emergence of scaling in random networks, *Science*, Vol. 286, No. 5439, pp. 509-512, 1999.
- 7) Albert, R., Jeong, H., and Barabási, A. L. : Error and attack tolerance of complex networks, *Nature*, Vol. 406, No. 6794, pp. 378-382, 2000.
- 8) Motter, A. E. and Lai, Y. C.: Cascade-based attacks on complex networks, *Physical Review E*, Vol. 66, p. 065102, 2002.
- 9) Doyle, J. C., Alderson, D. L., Li, L., Low, S., Roughan, M., Shalunov, S. Tanaka, R., and Willinger, W. : The “robust yet fragile” nature of the Internet, *Proceedings of the National Academy of Science of the United State of America*, Vol. 102, No. 41, pp. 14497-14502, 2005.
- 10) Holme, P., Kim, B. J., Yoon, C. Y., and Han, S. K. : Attack vulnerability of complex networks, *Physical Review E*, Vol. 65, No. 5, p. 056109, 2002.
- 11) Morone, F. and Makse, H. A. : Influence maximization in complex networks through optimal percolation, *Nature*, Vol. 524, No. 7563, pp. 65-68, 2015.
- 12) Crucitti, P., Latora, V. and Marchiori, M.: Model for cascading failures in complex networks, *Physical Review E*, Vol. 69, No. 4, p. 045104, 2004.
- 13) Buzna, L., Peters, K., and Helbing, D. : Modelling the dynamics of disaster spreading in networks, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 363, No. 1, pp. 132-140, 2006.
- 14) Buzna, L., Peters, K., Ammoser, H., Kuhnert, C., and Helbing, D. : Efficient response to cascading disaster spreading, *Physical Review E*, Vol. 75, No. 5, p. 056107, 2007.
- 15) Simonsen, I., Buzna, L., Peters, K., Bornholdt, S. and Helbing, D. : Transient Dynamics Increasing Network Vulnerability to Cascading Failures, *Physical Review Letters*, Vol. 100, pp. 218701-218705, 2008.
- 16) Motter, A. E. : Cascade control and defense in complex networks, *Physical Review Letters*, Vol. 93, No. 9, p. 098701, 2004.
- 17) Brandes, U. :On variants of shortest-path betweenness centrality and their generic computation, *Social Networks*, Vol. 30, pp. 136-145, 2008.
- 18) Brandes, U. : A faster algorithm for betweenness centrality, *Journal of Mathematical Sociology*, Vol. 25, pp. 163-177, 2001.
- 19) Kovács, I. A. and Barabási, A. L. : Network science : Destruction perfected, *Nature*, Vol. 524, No. 7563, pp. 38-39, 2010.

(? 受付)

MITIGATION STRATEGY AGAINST CASCADING FAILURE

Kashin SUGISHITA, Takahiko KUSAKABE and Yasuo ASAKURA

Cascading failure is a phenomenon where a local failure triggers a global propagation of failures, leading to severe damage to the whole network. This study focuses on successive failures of links and proposes a mitigation strategy. We propose a developed strategy called Intentional Removals (IRs) of nodes. Our strategy is based on the concept of specifying nodes with low collective-influence and removing them intentionally right after a local failure in order to prevent the propagation of failures of links. We apply our model to a network which is considered to be fragile against cascading failure. The numerical result shows our strategy can mitigate damage greatly even if the network itself is extremely vulnerable.