

相互依存ネットワークの カスケード故障に対する脆弱性

杉下 佳辰¹・朝倉 康夫²

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

インフラストラクチャーのような相互依存関係が存在するネットワーク状のシステムにおいては、ひとつのネットワーク内の局所的な故障が複数のネットワークに渡って連鎖的な故障を引き起こし、大規模な故障に発展する現象（カスケード故障）が発生する恐れがある。本研究では、相互依存性の度合いがネットワークのカスケード故障に対する脆弱性に与える影響を調べた。数値計算を用いた分析の結果、単体の場合に頑強なネットワークでも、相互依存性によって脆弱性が大きく増大する可能性があることを確認した。また、依存性の度合いが比較的小さい場合でも、脆弱性が大きく増大する可能性が示唆された。依存性の度合いが小さくても脆弱性は大きく増大する可能性があり、ネットワークの脆弱性評価の際は相互依存性を考慮に入れることが必要不可欠である。

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

1. 序論

現代社会は、インターネットなどの通信網、水、ガス、電力の供給網、道路、鉄道、航空等を含む交通網と多種多様なシステムによって成り立つ。ネットワークとして表現可能なこれらのシステムは、相互に依存しあって機能しており、我々の生活をより豊かなものとしている¹⁾。ところが、近年、このような複雑な相互依存性を持ったシステムに潜む危険性が指摘されている。Helbing²⁾はこのようなシステムにおいて、相互依存性が強まれば強まるほど、また相互依存関係が複雑になればなるほど、不安定かつ制御不能な状態に陥る危険性が高まることを指摘している。相互依存性の存在により、ひとつのシステムで発生した障害が別のシステムまで波及する危険性が生まれる。また、依存性の度合いが強いほど障害が波及する危険性は高まる。さらに、依存関係が複雑になるほど、障害の波及の仕方も複雑になるため、波及を食い止めることが難しくなる。

システム間の相互依存性が、多大な社会的損失をもたらした典型的な例としては、2003年9月28日に発生したイタリア大停電が挙げられる。この停電においては、電力供給システムと通信システムとの相互依存性の存在により、深刻な被害がもたらされたことが指摘されている

³⁾ この場合の相互依存性とは、電力供給システムは通信システムによる監視・制御（SCADA）を受けて正常に機能する一方で、通信システムは電力供給システムによる電力供給を受けて機能するという双方向の依存性を指す¹⁾。Bacher et al.⁴⁾によれば、イタリア大停電の原因はスイスの山奥でたった1本の送電線が悪天候による強風で倒れた木によって破損したことだという。1本の送電線の破損により、もともとその送電線を流れていた電流は経路を変更する。この経路変更によって迂回してきた電流を処理することができなくなった部分で新たな障害が発生する。そして、この障害により、電流の流れ方が変わって更なる障害を生む。これが電力供給システムの内部で発生する連鎖的な障害の波及である。しかし、この障害の波及は電力供給システムの内部のみに留まらない。電力供給システムで発生した連鎖障害は通信システムにまで波及する。これは先述の通り、通信システムが電力供給システムから電力供給を受けて機能するという依存性を有することから生じるものである。電力供給の停止により、通信システムも機能することができずに障害が発生する。通信システムの障害によって、電力供給システムを正常に監視・制御することができなくなり、電力供給システムの障害をさらに深刻化させる。このように、電力供給システムと通信システムの相互依存性が

障害の波及を深刻化させ、結果として大規模な停電へと発展したということになる。

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はカスケード故障 (cascading failure) と呼ばれる。たった一本の送電線の破損から極めて深刻な停電へと発展したイタリア大停電は相互依存ネットワークで発生したカスケード故障の典型例である。相互依存ネットワークにおいてはカスケード故障の波及がより深刻となる可能性がある。また、依存性の度合いが脆弱性に大きく影響するものと考えられる。

そこで本研究では、相互依存ネットワークの依存性の度合いがカスケード故障に対する脆弱性に与える影響を分析するモデルを提案する。提案したモデルを用いた数値計算による分析によって、頑健なネットワークが別のネットワークと弱い依存性を持つことで脆弱性が大きく増大する可能性があることを示す。

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) カスケード故障

第1章で記述した通り、カスケード故障とは、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である。このような連鎖的な障害は、ネットワーク上に何らかの影響が伝搬するメカニズム (ネットワーク上の物量の流れ、依存性など) が存在することが原因である。波及メカニズムが何も存在しなければ、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。

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 Lai⁵⁾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。Cruciti et al.⁶⁾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。このモデルでは、ノードの負荷が容量を超えた場合、そのノードの持つリンクの効率性を低下させている。流れは最も効率的な経路を通ると仮定する。効率性が低下すると、最も効率的な経路が変化し、ネットワーク上のフローの流れ方が時々刻々と変わっていくことになる。このモデルは、終局状態において、Latora and Marchioni⁷⁾が提案するネットワークの効率性の低下分をネットワークが受けた損害として評価するモデルである。Buzna et al.⁸⁾は、より動的なカスケード故障モデルを提案している。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である。また、各ノードの状態の

回復もモデルに組み込まれており、回復の程度を表すパラメータがある閾値を超えた場合に状態悪化の波及が小規模に収まることを確認している。このモデルを応用した研究として、Buzna et al.⁹⁾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を議論している。複数のシナリオでいくつかの回復策の有効性について検証しており、ネットワークトポロジー、回復策実行の遅れ、回復するノードの配置等について考察している。Simonsen et al.¹⁰⁾は、Motter and Lai⁵⁾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。Simonsen et al.¹⁰⁾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、Motter¹¹⁾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。

b) 相互依存ネットワークとカスケード故障

b)節では、相互依存性を有するシステムで発生するカスケード故障に関する既往研究について整理する。Rinaldi et al.¹⁾は、図-1 のようにインフラストラクチャーの相互依存関係の一例を挙げている。第1章で記述した2003年のイタリア大停電において停電をより深刻化させたとされる電力供給システムと通信システム間の電力供給および監視・制御という相互依存関係も図-1の中

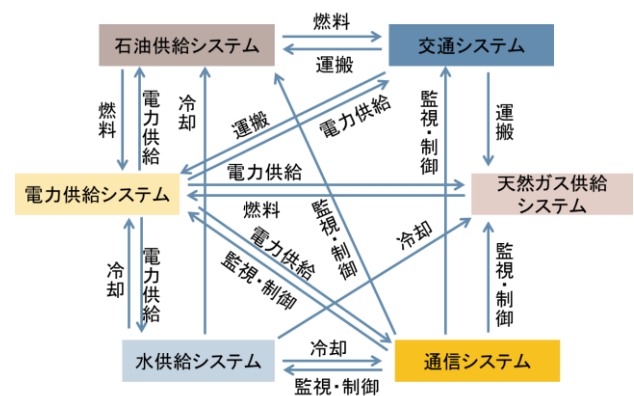


図-1 インフラストラクチャーの相互依存性 (Rinaldi et al.¹⁾)

に表されている。

Buldyrev et al.³⁾は、相互に依存しあふたつのネットワーク上で発生するカスケード故障をモデル化している。ノード数の等しいふたつのネットワークにおいて、両者のノード間に 1 対 1 の相互依存関係が存在する状況を想定し、あるノードが故障すると、そのノードに依存するノードも故障すると仮定する。さらに最大連結成分から外れたノードが機能停止するという仮定を置く。ネットワークの連結成分とは、任意のノード間に少なくともひとつの経路が存在するような部分グラフのことであり、最大連結成分とは連結成分のうちノード数が最大のものを指す。このような仮定の下でどちらかのネットワークで障害が発生した場合、最大連結成分から外れたノードが故障し、相互依存性によって連鎖的な障害が波及することになる。Buldyrev et al.³⁾は、このモデルを用いて、相互依存ネットワークの場合は孤立した単体のネットワークよりも、より脆く、かつ唐突に壊滅的な損害をもたらされることを示した。Vespignani¹²⁾も同様に、相互依存ネットワークにおいては、故障を予測したり、制御することが困難であると指摘している。Gao et al.¹³⁾は、Buldyrev et al.³⁾のネットワークを発展させる形で相互依存関係を有するふたつ以上のネットワークの脆弱性を分析している。Huang et al.¹⁴⁾は、ランダムな障害でなく、選択的攻撃に対する相互依存ネットワークの脆弱性について分析した。その結果、高次数ノード（ハブ）を防御するという単体のスケールフリーネットワークに対して有効な策が、相互依存ネットワークに対しては有効性が大きく低下することを示し、相互依存ネットワークを防御することが難しいことを示唆した。

(2) 本研究の位置づけ

本研究の目的は、依存性の度合いを考慮した相互依存ネットワークの脆弱性を評価するモデルを提案し、数値計算により依存性の度合いが脆弱性に及ぼす影響を分析することである。

(1)節b)項で整理した相互依存ネットワークのカスケード故障に関する既往研究は、いずれも相互依存関係として完全相互依存関係を仮定している。完全相互依存関係とは、あるノードが故障した場合に、そのノードに依存するノードも必ず故障する関係を指す。しかし、システム間の依存関係は必ずしも完全相互依存関係とは限らない。たとえば、停電時に発動して電力供給を行うUPS（無停電電源装置）のような何らかのバックアップ機能が存在する場合には、依存先のシステムが故障してもその影響を受けずに済む可能性等が考えられる。本研究ではこのような依存性の度合いについて着目し、依存性の度合いが相互依存ネットワークに及ぼす影響を分析する。

3. 相互依存ネットワークのカスケード故障に対する脆弱性評価手法

(1) 相互依存ネットワーク

本研究における相互依存ネットワークがどのようなものであるか説明する。本研究が扱う相互依存ネットワークは以下の性質を持つものである（図-2参照）。

- ノード数の等しいふたつのネットワーク（ネットワークAとネットワークB）において、ノード間に1対1の相互依存関係が存在する
- あるノードの障害は、依存性の度合いを表すある確率でそのノードに依存するノードへと波及する
- ふたつのネットワークの内部には独立にフローが流れ、異なるネットワークの間をフローが流れることはない

図-2の青色実線はネットワークAのフローが流れるリンクであり、赤色実線はネットワークBのフローが流れるリンクである。図-2の通り、それぞれのネットワークのフローは独立に流れている。ネットワーク間に示された青色、赤色の点線矢印はそれぞれ、ネットワークAのネットワークBに対する依存性とネットワークBのネットワークAに対する依存性を示す。図-2の通り、ネットワークAのノードとネットワークBのノードに1対1の相互依存関係が存在する。

(2) カスケード故障モデル

相互依存ネットワークの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Aの隣接行列

B_t : t タイムステップのネットワークBの隣接行列

V_A : ネットワークAの全ノード集合

V_B : ネットワークBの全ノード集合

v_i^A : ネットワークAの*i*番目のノード

v_i^B : ネットワークBの*i*番目のノード

$L_i^A(t)$: t タイムステップでネットワークAの*i*番目のノードにかかる負荷

$L_i^B(t)$: t タイムステップでネットワークBの*i*番目のノードにかかる負荷

C_i^A : ネットワークAの*i*番目のノードの容量

C_i^B : ネットワークBの*i*番目のノードの容量

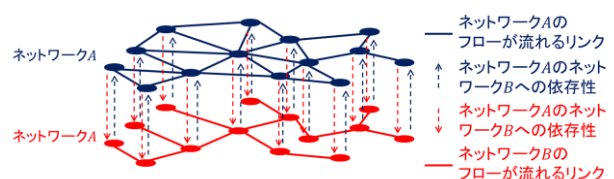


図-2 相互依存ネットワーク

- α^A : ネットワークAの耐久性パラメータ (平常時状態におけるネットワークAの各ノードの負荷に対する容量の余裕)
 - α^B : ネットワークBの耐久性パラメータ (平常時状態におけるネットワークBの各ノードの負荷に対する容量の余裕)
 - $\sigma_t(v_j^A, v_h^A)$: t タイムステップでのネットワークAの j 番目のノードから h 番目のノードへの最短経路数
 - $\sigma_t(v_j^B, v_h^B)$: t タイムステップでのネットワークBの j 番目のノードから h 番目のノードへの最短経路数
 - $\sigma_t(v_j^A, v_h^A | v_i^A)$: t タイムステップでのネットワークAの j 番目のノードから h 番目のノードへの最短経路のうち i 番目のノードを通過する数
 - $\sigma_t(v_j^B, v_h^B | v_i^B)$: t タイムステップでのネットワークBの j 番目のノードから h 番目のノードへの最短経路のうち i 番目のノードを通過する数
 - P_A : ネットワークAのネットワークBに対する依存性の度合い
 - P_B : ネットワークBのネットワークAに対する依存性の度合い
- 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最短経路を通過して流れる
- 負荷が容量を超えたノードは過負荷故障する
- リンクは故障せず、ノードのみが故障する
- 一度故障したノードは二度と正常にならない
- ネットワーク間で物量は流れず、ふたつのネットワークのノード間に1対1の相互依存関係のみが存在する
- ネットワークBの i 番目のノードが故障すると確率 P_A (ネットワークAのネットワークBへの依存性の度合い) でネットワークAの i 番目のノードが故障する
- ネットワークAの i 番目のノードが故障すると確率 P_B (ネットワークBのネットワークAへの依存性の度合い) でネットワークBの i 番目のノードが故障する

モデルは図-3のようにa) 平常状態, b) 局所的故障, c) 連鎖的な故障, d) 終局状態の4つに分けられる。それぞれの詳細について説明する。

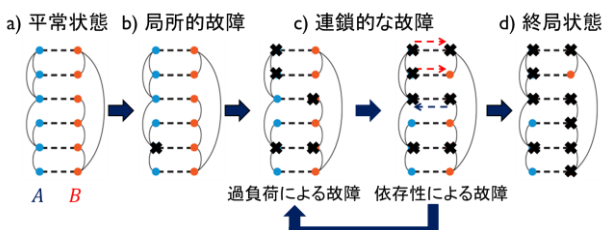


図-3 相互依存ネットワークのカスケード故障

a) 平常状態

平常状態のふたつのネットワーク A_0, B_0 が存在する時、それぞれのネットワークにおける各ノードにかかる負荷と各ノードの容量を定義する。

まず、平常状態のネットワーク A_0 においてノード v_i^A にかかる負荷 $L_i^A(0)$ 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、ノード v_i^A を通る流れの量は媒介中心性を用いて以下のように定義できる。

$$L_i^A(0) = \sum_{v_j^A, v_h^A \in V_A} \frac{\sigma_0(v_j^A, v_h^A | v_i^A)}{\sigma_0(v_j^A, v_h^A)} \quad (1)$$

ネットワーク B_0 についても同様に計算する。

$$L_i^B(0) = \sum_{v_j^B, v_h^B \in V_B} \frac{\sigma_0(v_j^B, v_h^B | v_i^B)}{\sigma_0(v_j^B, v_h^B)} \quad (2)$$

次に、ネットワークAにおけるノード v_i^A の容量 C_i^A の定義について説明する。ノードの容量は平常時にそのノードにかかる負荷 $L_i^A(0)$ に比例するものとする。すなわち、ノード v_i^A の容量 C_i^A は、平常時にノード v_i^A にかかる負荷 $L_i^A(0)$ と、平常時の負荷に対する容量の余裕を表すパラメータ α^A を用いて、以下のように表せる。なお、上述の仮定通り、ここで確定した容量は以降のタイムステップで不変である。

$$C_i^A = (1 + \alpha^A)L_i^A(0) \quad (3)$$

ネットワークBについても同様に計算する。

$$C_i^B = (1 + \alpha^B)L_i^B(0) \quad (4)$$

本研究では、このパラメータ α^A および α^B を耐久性パラメータと呼ぶことにする。耐久性パラメータが大きいということは平常時にかかる負荷に対して十分大きな余裕をもってネットワークが設計されていることを意味する。すなわち、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、カスケード故障が発生しにくいネットワークであることを意味する。

b) 局所的故障

平常状態のネットワーク A_0, B_0 が存在するとき、どちらか一方のネットワークのノードで障害が発生したとする。ここではネットワークAのノード v_q^A において障害が発生したとして説明する。ノード v_q^A が故障することは、ノード v_q^A と繋がるリンクも全て機能停止することと同等である。ノード v_q^A が故障し、ノード v_q^A が持つリンクも機能停止することは、隣接行列 A_0 の q 行目と q 列目の成分が全て0に更新することで表現できる。

なお、複数のノードが一斉に故障する状況も同様に扱うことができ、それぞれの隣接行列の当該成分を0として更新すればよい。

c) 連鎖的な故障

連鎖的な故障は、1) 過負荷による故障、2) 依存性に

よる故障のふたつの種類に分けることができる。

まず、1) 過負荷による故障について説明する。ネットワーク A において、局所的故障が発生し、ノードがリンクと共に機能停止すると、特定のノード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過して流れると仮定しているため、平常時に故障したノード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ノードでは、ノードにかかる負荷が変化する。そこで、各ノードにかかる負荷を再計算する。

$$L_i^A(t) = \sum_{v_j^A, v_h^A \in V_A} \frac{\sigma_t(v_j^A, v_h^A | v_i^A)}{\sigma_t(v_j^A, v_h^A)} \quad (5)$$

ネットワーク A において、負荷を再計算すると、負荷が容量を超えてしまうようなノード v_o^A が新たに現れる可能性がある。先述した仮定の通り、負荷が容量を超えてしまったノード v_o^A は過負荷によって故障するものと考え、そのノード v_o^A の持つリンクも機能停止する。これは、ネットワーク A の隣接行列の o 行目と o 列目の成分を全て 0 として更新することで表現できる。

次に、2) 依存性による故障について説明する。ノード v_i^A が故障したとき、ノード v_i^A に依存するノード v_i^B も確率 P_B で故障すると考える。この確率 P_B はネットワーク B のネットワーク A への依存性の度合いを表すパラメータである。依存性によってノード v_i^B が故障することはネットワーク B の隣接行列の i 行目と i 列目の成分を全て 0 として更新することで表現できる。

以上のように、ネットワーク A で発生した障害が依存性によってネットワーク B にも波及するとネットワーク B でもフローが変化し、ネットワーク A に対する式(5)と同様に、

$$L_i^B(t) = \sum_{v_j^B, v_h^B \in V_B} \frac{\sigma_t(v_j^B, v_h^B | v_i^B)}{\sigma_t(v_j^B, v_h^B)} \quad (6)$$

のようにネットワーク B での負荷が再計算され、過負荷故障が発生する。するとネットワーク B での過負荷故障が依存性によってさらにネットワーク A に波及する。このように、連鎖的故障のプロセスは、1) 過負荷による故障、2) 依存性による故障の両者が図-3のように繰り返し発生する過程を指す。

d) 終局状態

連鎖的な故障は、故障していない全てのノード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。すなわち、局所的故障後に以下の条件が初めて成り立つ状態が終局状態である。

$$L_i^A(t) \leq C_i^A \quad \forall v_i^A \in V_A \quad (7)$$

$$L_i^B(t) \leq C_i^B \quad \forall v_i^B \in V_B \quad (8)$$

(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。本研究では、ネットワークの効率性⁷⁾がどの程度の割合で低下したかを損害として評価する。

以下に記号表記をまとめる。

E_N^A : 平常状態のネットワーク A の効率性

E_N^B : 平常状態のネットワーク B の効率性

E_U^A : 終局状態のネットワーク A の効率性

E_U^B : 終局状態のネットワーク B の効率性

D_A : ネットワーク A が受けた損害の評価指標

D_B : ネットワーク B が受けた損害の評価指標

本研究では、平常状態と比較して、終局状態においてどの程度のノードペアが往来不可能になってしまったかで損害を評価する。すなわち、損害の評価指標は以下のようなになる。

$$D_A = \frac{E_N^A - E_U^A}{E_N^A} \quad (0 \leq D_A \leq 1) \quad (9)$$

$$D_B = \frac{E_N^B - E_U^B}{E_N^B} \quad (0 \leq D_B \leq 1) \quad (10)$$

損害の評価指標 D_A と D_B は定義式からわかる通り、 0 から 1 の値を通り、 1 に近づくほど損害が大きいことを意味する。

なお、Latora and Marchiori⁷⁾が提案するネットワーク G の効率性 $E(G)$ は、

$$E(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}} \quad (11)$$

として定義される。ここで、 N はネットワーク G のノード数で d_{ij} はノード i からノード j までの最短距離である。式(11)はネットワーク G 内の全てのノードペア間の最短距離の逆数の和を取り、全ノードペア数で割っている。すなわち、ネットワークの効率性は、ノードペア間の最短距離の逆数の平均として定義されるものである。ノードペア間に経路がひとつも存在しない場合には、そのノードペア間の最短距離は無限大と考える。すなわち、カスケード故障によってネットワークが破壊されていくと、経路が存在しなくなって最短距離が無限大となるノードペア数が増え、ネットワークの効率性が低下していくことになる。本研究ではこのネットワークの効率性の低下の割合を損害として評価していることになる。

4. 数値計算結果と考察

第4章では第3章で示したモデルを用いた数値計算により、単体の場合に頑健なネットワークが別のネットワークへの依存性を有することによって脆弱性が大きく増大する可能性があることを示す。

(1) モデルへの入力条件

モデルへの入力条件を表-1にまとめる。本研究ではスモールワールドネットワーク（以下、SW）¹⁵とスケールフリーネットワーク（以下、SF）¹⁶のふたつのネットワークに相互依存関係が存在する状況を想定する。SFは単体の場合にランダム障害に対して頑健なことが知られている¹⁷。その一方で、SWは相対的にはランダム障害に対して脆弱なネットワークである。このように単体の場合に頑健性の異なるネットワーク間に相互依存性が存在する場合、その依存性の度合いの変化によって脆弱性がどのように変化するかについて分析する。なお、相互依存関係は対称的な相互依存関係と非対称的な相互依存関係に大別できる。対称的な相互依存関係とは、ふたつのネットワークが同じ度合いで依存しあっている場合であり、非対称的な相互依存関係とはふたつのネットワークが異なる度合いで依存しあっている場合である。本研究が第3章で提案するモデルは、依存性の度合いを表す P_A と P_B というふたつのパラメータを調整することで、対称・非対称に依らず、任意の依存関係を表現することができる。すなわち、 $P_A = P_B$ であれば対称的な相互依存関係となり、 $P_A \neq P_B$ であれば非対称的な相互依存関係を表す。また、 $P_A = P_B = 0.0$ とした場合には両者のネットワークが完全非相互依存（独立）関係であることを表し、 $P_A = P_B = 1.0$ とした場合には完全相互依存関係を表す。ここでは対称的な相互依存関係（ $P_A = P_B$ ）を想定し、完全非相互依存（独立）関係（ $P_A = P_B = 0.0$ ）から完全相互依存関係（ $P_A = P_B = 1.0$ ）まで、 $P_A = P_B$ を保ったまま0.1刻みで値を変化させて分析する。ここではランダム障害に対する脆弱性を分析する。各ノードの局所的障害によって生じる損害を全ノードに渡って求め、その平均値をランダム障害によってもたらされる損害と考える。表-1で示した条件の入力を50回繰り返し、出力される損害の評価指標 D_A および D_B の平均値を求めてプロットする。

(2) 数値計算結果

表-1で示した条件をモデルに入力して得られる出力結果を図-4（耐久性パラメータ $\alpha^A = \alpha^B = 0.5$ ）および

表-1 モデルへの入力条件

パラメータ名	値・条件
ネットワークA	スモールワールドネットワーク
ネットワークB	スケールフリーネットワーク
耐久性パラメータ	$\alpha^A = \alpha^B = 0.5, 0.2$
ネットワークAの依存性の度合い	$P_A = P_B = 0.0 \sim 1.0$ (0.1刻み)
局所的故障	スモールワールドネットワークでランダム障害が発生

図-5（耐久性パラメータ $\alpha^A = \alpha^B = 0.2$ ）に示す。図-4および図-5の横軸は相互依存性の度合い（ $P_A = P_B$ ）を表し、縦軸はネットワークAおよびネットワークBが受けた損害の評価指標 D_A および D_B の値を表す。どちらも0.0~1.0の値を取る。横軸の相互依存性の度合いは1.0に近づくほど依存性の度合いが強まることを意味し、損害を表す縦軸は1.0に近づくほど損害が大きいことを意味する。

$P_A = P_B = 0.0$ は完全非相互依存（独立）関係を表すため、図-4の $P_A = P_B = 0.0$ の赤丸でプロットした点は、SWが独立した単体のネットワークとして存在する場合にランダム障害による損害を表す。このときSFはSWと独立に存在しているため、SWの障害の影響を全く受けずに損害が0.0となっている。この状態から $P_A = P_B = 1.0$ となるまで、 $P_A = P_B$ の値を0.1ずつ増加させる。

図-4を見ると、耐久性パラメータ $\alpha^A = \alpha^B = 0.5$ の場合は、完全非相互依存（独立）関係（ $P_A = P_B = 0.0$ ）でのSWが受ける損害は0.1程度と比較的小さく、相互

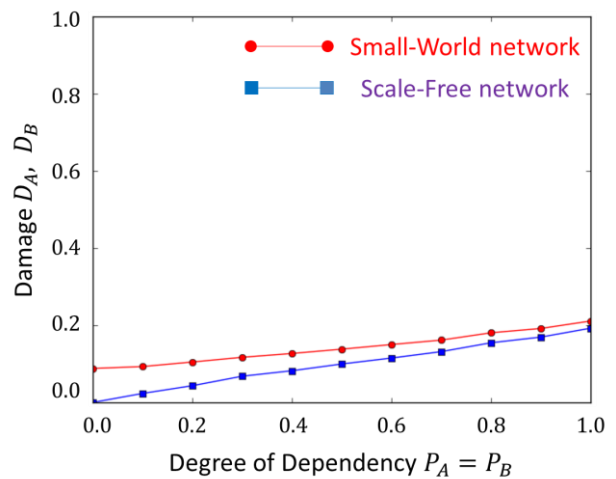


図-4 数値計算結果 ($\alpha^A = \alpha^B = 0.5$)

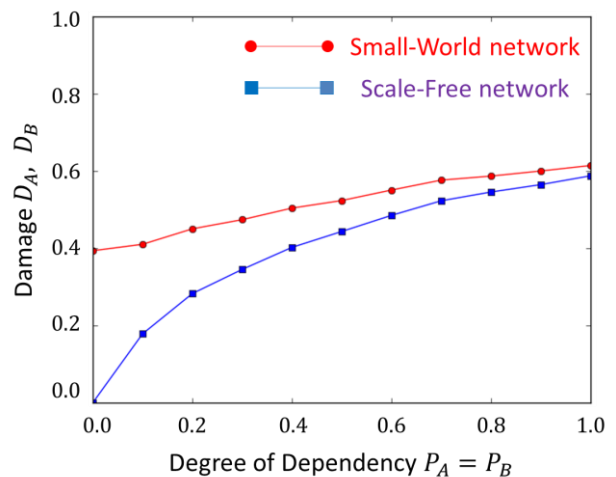


図-5 数値計算結果 ($\alpha^A = \alpha^B = 0.2$)

依存性の度合い $P_A = P_B$ を徐々に増大させていっても損害 D_A および D_B の値はそこまで大きくならず、完全相互依存関係 ($P_A = P_B = 1.0$) でも0.2程度である。これより、耐久性パラメータがある程度大きい場合には、どこかで障害が発生して迂回する物量が生じてそれを処理することができるため、カスケード故障は波及しにくく、相互依存性の度合いが強まったとしてもその影響を受けにくく、損害を抑制できると考えられる。

一方で、図-5を見ると、耐久性パラメータ $\alpha^A = \alpha^B = 0.2$ の場合には、完全非相互依存（独立）関係 ($P_A = P_B = 0.0$) でのSWが受ける損害は0.4程度と比較的大きな損害が生じている。このときSWと独立関係にあるSFはSWの障害の影響を受けずに損害が当然ながら0.0となっているが、相互依存性の度合い $P_A = P_B$ が増加していくにつれてSFが受ける損害も増大していることがわかる。そして相互依存性の度合い $P_A = P_B = 1.0$ となって完全相互依存関係となったときに損害 D_A および D_B の値は0.6程度まで増加している。このことから、耐久性パラメータがある程度小さくなってしまい、片方のネットワークの脆弱性が増大すると、そのネットワークに依存するもう一つのネットワークの脆弱性も増大するといえる。とりわけ、相互依存性の度合いが $P_A = P_B = 0.1$ 程度になっただけでもSFの脆弱性は増加し、その曲線の傾きは大きくなっている。すなわち、依存性の度合いが比較的小さくても、その依存性によってネットワークの脆弱性は大きく変わり得る可能性を示唆している。

5. 結論

(1) 本研究の成果

第2章で整理した通り、相互依存ネットワークのカスケード故障に関するこれまでの既往研究では、完全相互依存関係を想定するものばかりであり、依存性の度合いが脆弱性に与える影響は明らかにされていなかった。そこで本研究では、依存性の度合いを表すパラメータをモデルに組み込み、そのパラメータを調整することで完全相互非依存（独立）関係から完全相互依存関係に至るまで相互依存関係の対称・非対称性を問わない依存関係を持つネットワークのカスケード故障に対する脆弱性を分析できるモデルを第3章で提案した。

第4章では、第3章で提案したモデルを対称的な相互依存関係を持つスケールフリーネットワーク（SF）とスモールワールドネットワーク（SW）に対して適用した。SWにおいて局所的なランダム障害が発生することを想定し、完全非相互依存（独立）関係 ($P_A = P_B = 0.0$) から相互依存性の度合い $P_A = P_B$ を徐々に増加させて分

析を行った。その結果、耐久性パラメータが比較的大きい ($\alpha^A = \alpha^B = 0.5$) 場合には、SWにおけるカスケード故障は波及しにくく、相互依存性の度合いが増大しても両者のネットワークが受ける損害 D_A および D_B の値はそこまで大きなものとならない。その一方で、耐久性パラメータが比較的小さくなった ($\alpha^A = \alpha^B = 0.2$) 場合には、SWにおけるカスケード故障は波及しやすくなり、相互依存性の度合いが増大するとその影響を受けてランダム障害に対して頑健なはずのSFが受ける損害も大きくなることが確認された。さらに依存性の度合いが比較的小さい ($P_A = P_B = 0.1$ 程度) 場合でも、脆弱性が増加することが確認された。このことから、依存性の度合いが比較的小さくても、その依存性によってネットワークの脆弱性は大きく変わり得る可能性を示唆された。

(2) 今後の課題

今後、検討すべき主な課題や方向性を挙げる。第一に、フローの流れ方である。本研究ではフローの流れ方は「タイムステップごとに経路が存在するノードペアで単位量の流れが最短経路を通過して流れると考えたが、フローの混雑、フローの速さの考慮など、より複雑な流れを考慮できるモデルへと発展させることは今後の本研究のひとつの方向性である。第二に、ネットワーク間の相互依存関係のあり方である。本研究では、図-2の通りふたつのネットワークのノード間に1対1の相互依存関係を想定しているが、1対多、もしくは多対多の相互依存関係も考えられる。相互依存関係のあり方による脆弱性への影響の分析も今後の課題である。第三に、カスケード故障に対する防御策である。相互依存ネットワークにおいてはカスケード故障の波及を抑制することがより難しくなることが指摘されているが、相互依存ネットワークに対して有効な損害軽減策を考える必要がある。

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) Helbing D. : Globally networked risks and how to respond, *Nature*, Vol.497, No.7447, pp.51-59, 2013.
- 3) 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.
- 4) Bacher, R. and Näf, U. : Report on the blackout in Italy on 28 September 2003, *Swiss Federal Office of Energy (SFOE)*, 2003.
- 5) Motter, A. E. and Lai, Y. C. : Cascade-based attacks on complex networks, *Physical Review E*, Vol. 66, p. 065102, 2002.

- 6) Crucitti, P., Latora, V. and Marchiori, M.: Model for cascading failures in complex networks, *Physical Review E*, Vol. 69, No. 4, p. 045104, 2004.
- 7) Latora, V. and Marchiori, M. : Efficient behavior of small-world networks, *Physical Review Letters*, Vol. 87, p. 198701, 2001.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) Motter, A. E. : Cascade control and defense in complex networks, *Physical Review Letters*, Vol. 93, No. 9, p. 098701, 2004.
- 12) Vespignani A. : Complex networks: The fragility of interdependency, *Nature*, Vol.464, No.7291, pp.984-985, 2010.
- 13) Gao, J., Buldyrev, S. V., Havlin, S., and Stanley, H. E.: Robustness of a network of networks, *Physical Review Letters*, 107(19), 195701, 2011.
- 14) Huang, X., Gao, J., Buldyrev, S. V., Havlin, S., and Stanley, H. E.: Robustness of interdependent networks under targeted attack, *Physical Review E*, 83, 065101, 2011.
- 15) Watts, D. J. and Strogatz, H. S. : Collective dynamics of ‘small-world’ networks, *Nature*, Vol. 393, No. 6684, pp. 440-442, 1998.
- 16) Barabási, A. L. and Albert, R. : Emergence of scaling in random networks, *Science*, Vol. 286, No. 5439, pp. 509-512, 1999.
- 17) Albert, R., Jeong, H., and Barabási, A. L. : Error and attack tolerance of complex networks, *Nature*, Vol. 406, No. 6794, pp. 378-382, 2000.

(? 受付)

VULNERABILITY OF INTERDEPENDENT NETWORKS AGAINST CASCADING FAILURE

Kashin SUGISHITA 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 system. In the mutual interdependent infrastructures, failures in one system can spread out across multiple systems because of interdependency. Most infrastructures can be represented as networks and such kind of events can be called as cascading failure in interdependent networks. In this study, the influence of the degree of dependency on the vulnerability of interdependent networks is investigated. The numerical results imply that even if the network itself is robust against cascading failure, the vulnerability can be increased when the network has weak interdependency with another network. It is necessary for the assessment of the vulnerability of interdependent networks against cascading failure to consider features of interdependency.