

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K11917

研究課題名(和文) 多層ネットワーク理論の深化とネットワークのロバスト性向上手法への展開

研究課題名(英文) Improving the robustness of networks through deepening the theory of multilayer networks

研究代表者

津川 翔 (Tsugawa, Sho)

筑波大学・システム情報系・助教

研究者番号：40632732

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本プロジェクトは、将来インターネットなどの多層構造を有するネットワークのロバスト性を向上させるための有望な手法を明らかにすることを目的としている。本研究では、攻撃に対する多層ネットワークの頑健性を向上させるための有望なリンク付加戦略を明らかにした。さらに、有害情報やウィルスの拡散に対して頑健な多層ネットワークを構築するための基礎技術として、シードノード選択手法およびリンク削除戦略の有効性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

将来社会ではインターネットと交通網や電力網など他のネットワークが相互に連携することで、様々な社会アプリケーションを実現することが期待されている。一方で、複数のネットワークが互いに依存し合うような多層構造を有するネットワークは、悪意あるユーザからの攻撃や、災害などに起因するノードの故障に対して脆弱であることが指摘されていた。本研究結果は、多層構造を有する将来ネットワークの頑健性を向上させ、安定的な社会基盤を構築するための技術に貢献する。

研究成果の概要(英文)：This project aims to establish promising methods for improving the robustness of multilayer networks, which include the future Internet. In this project, we found effective link addition strategies for improving the robustness of multilayer networks against targeted attacks. Moreover, we clarified the effectiveness of several seed node selection methods and link deletion strategies for improving the robustness of multilayer networks against the spread of virus and unwanted information.

研究分野：ネットワーク科学

キーワード：多層ネットワーク ロバスト性 中心性 影響最大化

### 1. 研究開始当初の背景

将来社会ではインターネットと交通網や電力網など他のネットワークが相互に連携することで、様々な社会アプリケーションを実現することが期待されている。内閣府の提唱する Society 5.0 のコンセプトにおける典型的なアプリケーションの例として、エネルギーや物流、交通の最適化、緊急時の避難誘導などが挙げられている。これらは、様々な種類の膨大なセンサ群から収集した大規模データを解析し、その結果を交通網や電力網の制御にフィードバックすることで実現される。データの収集と解析結果のフィードバックを支える基盤がインターネットであり、今後インターネットを安定運用することへの社会的期待はますます大きくなっていく。

一方、複数のネットワークが互いに依存し合うような多層構造を有するネットワークは、悪意あるユーザからの攻撃や、災害などに起因するノードの故障に対して脆弱であることが 2010 年の Nature 誌に掲載された論文 (Buldyrev et al. 2010) 以降、多くの研究で指摘されている。図 1 は通信網と電力網という相互に依存する多層ネットワークにおける連鎖的な故障を単純化して説明した例である。このように、相互に依存するネットワーク間のインタラクションによって、ネットワーク全体で故障の連鎖が発生してしまう。

そのため、将来社会におけるインターネットのロバスト性を向上させ、安定的な運用を実現するためには、もはやインターネットを独立した通信網として捉えるだけでは不十分であり、他のネットワークとの相互作用の影響を考慮することが不可欠である。ネットワーク科学の分野では、相互に依存する複数のネットワークにおける故障の連鎖が発生するメカニズムの解明を目指した多層ネットワーク理論の研究が進んでいるが、未だ故障の連鎖を止めるための対策手法の確立には至っていない状況であった。

### 2. 研究の目的

本研究は、多層構造を有するネットワークを安定化し、ロバスト性を向上させるための有望な手法を明らかにすることを目的としている。特にネットワークを不安定化させる脅威として、ノードに対する攻撃や故障による一部のノードの停止と、ネットワーク上でのウイルスや有害情報の拡散を想定し、それらへの対策技術を開発することを目指す。

### 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するため、以下の 3 つの研究課題に取り組んだ。以降では、それら 3 つの研究手法について説明する。

#### (1) 攻撃に対する多層ネットワークの頑健性を向上させるためのリンク付加戦略

攻撃や故障によって多層ネットワークの一部のノードが故障すると、ネットワーク全体としての接続性が著しく低下する問題が知られている。この問題の解決策として、多層ネットワークに対して少数のリンクを付加する方法を検討した。多くのリンクを付加すればするほど、多層ネットワークは攻撃や故障に対して頑健になるが、現実にはネットワークにリンクを付加するためのコストがかかる。そこで、少数のリンク付加で効率的に多層ネットワークのロバスト性を向上させるためのリンク付加戦略を検討した。

多層ネットワークの中でも相互依存ネットワークと多重ネットワークの二種類を対象とし、ネットワーク生成モデルを用いて様々な構造的特徴を有する多層ネットワークを生成した。生成したネットワークに対して、様々なリンク付加戦略に基づきリンクを付加した。ネットワーク攻撃シミュレーションを実施し、攻撃を受けた後のネットワークの接続性を評価した。これにより、どのリンク付加戦略が効率的に多層ネットワークのロバスト性を向上させるのに有効であるかを調査した。

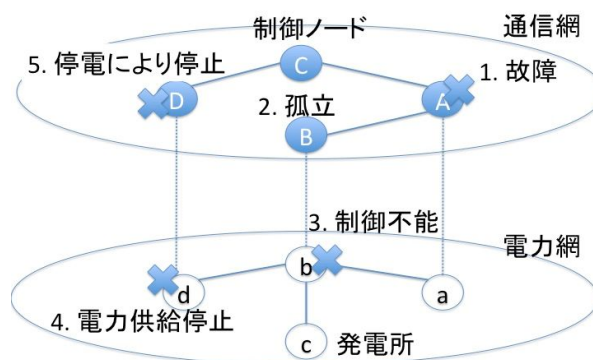


図 1. 相互依存する電力網と通信網における故障の連鎖の例:通信網におけるノード A の故障によりノード B が孤立する。ノード B に依存した電力網のノード b は制御信号を受け取れず制御不能になる。ノード b が制御不能になったことで、ノード d への電力供給が停止し、通信網におけるノード D も停止する。

## (2) 有害情報やウィルスの拡散に頑健な多層ネットワークの構築手法

本研究課題では、多層ネットワーク上でのウイルスや有害な情報の拡散を抑制する手法を検討した。まず、有害な情報やウイルスが拡散されてから、それを打ち消す訂正情報やワクチンを配布することで、有害情報やウイルスの影響を抑制する問題を定式化した。訂正情報やワクチンの配布元となるシードノードの決定手法を考案し、その有効性を多層ネットワーク上の情報やウイルスの拡散シミュレーションによって評価した。

さらに、ネットワークにおける少数のリンクを切断することで、ネットワーク上でのウイルスや有害情報の拡散をどの程度抑制することができるかを評価した。ここでのリンク切断とは、有害情報やウイルスの拡散をブロックすることに相当する（図2）。拡散への影響力の大きなリンクを特定して、そのリンクを通じた拡散をブロックすることで、ウイルスや有害情報拡散の被害をどの程度低減できるかを評価した。評価にあたっては情報拡散の実データを用いて、現実的な情報拡散を模擬した実験を行った。

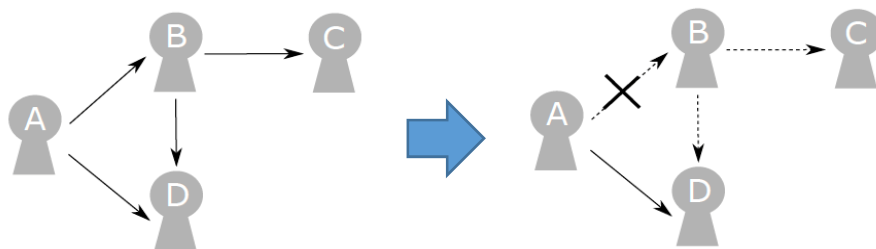


図2. リンク削除による情報拡散抑制のイメージ

## (3) ロバスト性向上手法の基盤となる不完全なネットワークからの重要ノードの特定

研究課題 (1) および (2) の両方において、ネットワークにおける重要ノードを特定することは重要である。ここでの重要ノードとは攻撃を受けた際に、ネットワークの接続性を大きく低下させてしまうノードや、大規模な情報拡散やウイルス拡散のきっかけとなるノードのことである。

重要ノードを特定するためには、通常、ネットワーク全体の構造を利用する必要があるが、本研究では、将来の大規模ネットワークにおいて重要ノードを特定することを想定し、ネットワークの一部の構造のみから重要ノードを特定する手法を検討した。ネットワークの一部のノードの接続関係を取得するネットワークサンプリング戦略を用いて、大規模ネットワークの部分ネットワークを取得する実験を行なった。サンプリングによって取得した部分ネットワークから全体の重要ノードをどの程度発見できるかを評価した。

## 4. 研究成果

本章では、3章で述べた3つの研究課題に対応した研究成果とそのインパクト、および将来展望について述べる。

### (1) 多層ネットワークの頑健性を向上させるためのリンク付加戦略の有効性の解明

本研究課題では、ノードの度数に基づくリンク付加手法によって効率的に相互依存ネットワークと多重ネットワークのロバスト性を向上させることができることを示した（図3）。

これまでにも、リンク付加戦略が単層ネットワークのロバスト性を向上させるのにどの程度有効であるかは知られていた。一方で、多層ネットワークへの攻撃に対してリンク付加がどの程度有用であるかは十分明らかにされていなかった。本研究により、多層構造を有するネットワークにおいてもリンク付加がネットワークのロバスト性を向上させるのに有用であることが示された。こ

れは、攻撃に対して頑健な多層構造を有する将来ネットワーク構築のための有用な知見であると考えられる。

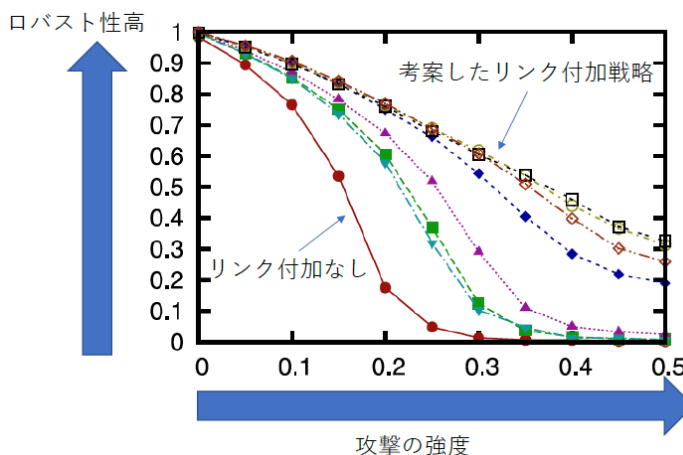


図3. リンク付加によるロバスト性向上効果

(2) ネットワーク上での有害情報やウイルスの拡散を抑制するためのシードノード決定手法およびリンク切断戦略の有効性の解明

本研究課題では第一に、多層ネットワーク上での拡散を抑制するためのシードノード決定手法の有効性を明らかにした。ネットワークのコミュニティをまたがるノードおよび高次数のノードを訂正情報を発信するシードノードとすることで有害情報の拡散を効率的に抑えられることを明らかにした。さらに、多層ネットワークのレイヤー間の相関の強さが、拡散の抑制効果に大きな影響を与えるということも示した。これまでは単一の層のネットワーク、すなわち有害な情報の拡散されるチャンネルが1種類の場合における、有害情報の拡散抑制手法が研究されてきた。本研究では、それを多層ネットワーク、すなわち複数のチャンネルで有害情報が拡散される状況に拡張した。多層ネットワークにおいても、適切にシードノードを選択することで、効率的に有害な情報の拡散を抑制できることを明らかにした。

第二に、ネットワーク上での拡散を抑制するためのリンク切断の限界を明らかにした。従来研究では、ネットワーク中の少数のリンクを切断することで、モデルで生成した情報拡散の規模を大きく抑制できることが示されていた。本研究では、モデルで生成した情報拡散ではなく、実際の情報拡散の履歴を用いて、リンク切断の効果を検証した。その結果、リンク切断による実際の情報拡散を抑制する効果は限定的であることが示唆された。現実の情報拡散を抑制するのに有望なリンク切断手法を明らかにすることは今後の重要な課題である。

(3) 不完全なネットワークからの重要ノード特定手法

本研究課題では、ランダムウォークなどバイアスのあるサンプリング方式を用いることで、一部の限られたノードの情報のみから、大規模なネットワークにおいても効率的に重要ノードを特定できることを示した。従来研究の多くは、ネットワークにおける重要ノード特定の際に、ネットワーク全体の構造を用いることを前提としていた。それに対して本研究では、ランダムウォークなどバイアスのあるサンプリング方式を用いることで、ネットワーク全体の10~20%程度の情報だけでも、十分に影響力の強い重要ノードを特定できるという実用上も好ましい性質を発見した。この知見は、大規模な将来ネットワークのロバスト性向上のためにも有用であると考える。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Tsugawa Sho, Ohsaki Hiroyuki	4. 巻 8
2. 論文標題 Benefits of Bias in Crawl-Based Network Sampling for Identifying Key Node Set	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 75370 ~ 75380
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2020.2988910	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Otsuka Momoko, Tsugawa Sho	4. 巻 14
2. 論文標題 Robustness of network attack strategies against node sampling and link errors	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PLOS ONE	6. 最初と最後の頁 e0221885
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1371/journal.pone.0221885	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Kazawa Yui, Tsugawa Sho	4. 巻 545
2. 論文標題 Effectiveness of link-addition strategies for improving the robustness of both multiplex and interdependent networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physica A: Statistical Mechanics and its Applications	6. 最初と最後の頁 123586
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physa.2019.123586	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 S. Tsugawa, and Y. Onoue	4. 巻 11
2. 論文標題 On the Benefits of Knowledge about Attacker's Strategy for Improving the Robustness of Networks via Link Addition	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 336--341
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2022XBL0040	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計17件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 S. Furukawa, and S. Tsugawa
2. 発表標題 Limitations of link deletion for suppressing real information diffusion on social media
3. 学会等名 The 2021 IEEE/ACM International Conference on Advances in Social Networks Analysis and Mining (ASONAM 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Nagase, and S. Tsugawa
2. 発表標題 Effectiveness of a data-based influence maximization algorithm using information diffusion cascades
3. 学会等名 The 45th Annual IEEE International Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 津川 翔
2. 発表標題 ネットワーク科学に基づくソーシャルネットワーク上の情報拡散のモデル化と制御
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 脇坂 悠生, 松尾 涼太郎, 津川 翔, 大崎 博之
2. 発表標題 未知のネットワーク上の影響最大化における幅優先探索の有効性
3. 学会等名 電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 脇坂 悠生, 松尾 涼太郎, 津川 翔, 大崎 博之
2. 発表標題 影響最大化問題における幅優先探索によるノードサンプリングの有効性に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永瀬 拓也, 津川 翔
2. 発表標題 データに基づく影響最大化アルゴリズムの評価
3. 学会等名 電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Wakisaka, K. Yamashita, S. Tsugawa, and H. Ohsaki
2. 発表標題 On the effectiveness of random node sampling in influence maximization on unknown graph
3. 学会等名 The 44th Annual IEEE International Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Tsugawa
2. 発表標題 An introduction of social network analysis techniques for socially aware networking
3. 学会等名 2020 International Conference on Emerging Technologies for Communications (ICETC 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古川 菜, 津川 翔
2. 発表標題 ソーシャルネットワークに対するリンク削除が Twitter 上の情報拡散に与える影響に関する一考察
3. 学会等名 電子情報通信学会 コミュニケーションクオリティ研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 脇坂 悠生, 山下 量之, 津川 翔, 大崎 博之
2. 発表標題 未知のグラフ上の影響最大化問題における最適サンプルノード数に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤田 結海, 津川 翔
2. 発表標題 多層ネットワークにおける訂正情報の拡散による誤情報拡散抑制効果の検証
3. 学会等名 電子情報通信学会 通信行動工学研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 M. Uehara, and S. Tsugawa
2. 発表標題 Analysis of the evolution of the influence of central nodes in a Twitter social network
3. 学会等名 The 43rd Annual IEEE International Computers, Software, and Applications Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Y. Wakisaka, K. Yamashita, S. Tsugawa, and H. Ohsaki
2. 発表標題 A Study on the Effectiveness of Random Node Sampling in Influence Maximization on Complex Networks
3. 学会等名 The 14th International Conference on Future Internet Technologies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 尾上 洋一, 津川 翔
2. 発表標題 攻撃戦略の予測がリンク付加によるネットワークのロバスト性向上に与える効果の分析
3. 学会等名 電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 津川 翔, 大塚 桃子
2. 発表標題 ノードサンプリングおよびリンク誤りがネットワーク攻撃戦略の有効性に与える影響の評価
3. 学会等名 電子情報通信学会コミュニケーションクオリティ研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永瀬 拓也, 津川 翔
2. 発表標題 データに基づく影響最大化アルゴリズムのTwitterデータを用いた評価
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 脇坂 悠生, 山下 量之, 津川 翔, 大崎 博之
2. 発表標題 グラフ上の影響伝搬におけるランダムサンプリングの効率性に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------