

令和 3 年 5 月 14 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C)（特設分野研究）

研究期間：2018～2020

課題番号：18KT0059

研究課題名（和文）複雑ネットワーク理論に基づく人工物システムの頑健性評価と強化

研究課題名（英文）Evaluating and enhancing the robustness of artificial systems based on complex network theory

研究代表者

長谷川 雄央（Hasegawa, Takehisa）

茨城大学・理工学研究科（理学野）・准教授

研究者番号：10528425

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）：ネットワークの故障に対する頑健性について研究することで、以下の結果が得られた。(1) 強い正次数相関構造を持つネットワークにおいて、ランダム故障過程は特殊な相転移を示す。一方で、別の強い正相関ネットワークでは平均場クラスの転移を示す。(2) 強い負次数相関構造は臨界特性を変える。(3) 全ての階層ネットワークは故障に対して非常に脆弱である。(4) ランダム故障過程で残る巨大連結成分は負次数相関構造である。(5) Erdos-Renyiランダムネットワークが巨大連結成分を形成する臨界点近傍で、巨大連結成分は長距離の負次数相関構造を示す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で展開した解析手法と得られた結果は複雑ネットワーク分野で初めて明らかとなったものや従来の予想を覆すものであり、この分野の今後の発展に貢献するものと考えられる。また、本研究を通じて、複雑ネットワークの解析から人工物システムの頑健性を正確に評価するために必要な知見をいくつか得ることができた。今後、応用を意識した定量的な研究を行うための基礎を与えたと考えられる。

研究成果の概要（英文）：We have studied the robustness of networks against failures and have obtained the following main results. (1) Percolation on a strongly-assortative network exhibits unusual phase transition. On the other hand, percolation on another strongly-assortative network exhibits an ordinary mean-field type transition. (2) A strongly-negative correlated structure changes critical properties on networks. (3) All hierarchical networks are highly vulnerable to random failure. (4) The giant connected component formed by the random failure process is always disassortative. (5) Near the critical point of Erdos-Renyi random networks, the long-range negative degree correlations emerges in the giant connected component.

研究分野：複雑ネットワーク

キーワード：複雑ネットワーク ネットワーク科学 パーコレーション モンテカルロシミュレーション

1. 研究開始当初の背景

人工物を構成要素とする人工物システムは、構成要素が不特定多数の人の介在により結合された結果、巨大で複雑なネットワークを構成する。インターネットはそのような人工物ネットワークの典型である。また、道路網や航空網、電力網などのインフラもネットワークを構成する。さらに、人間の経済活動・社会活動を対象に含めると、企業間の取引や携帯電話のやり取りも抽象的な人工物ネットワークとみなすことができる。このような人工物ネットワークは様々なリスクにさらされている。インターネットのルータの突然の故障、災害による道路の封鎖、高圧線の断線、企業の倒産などである。要素間関係が複雑に結合しているため、一部の構成要素の被害がシステム全体に多大な影響を及ぼすことがある。人工物システムの種々のリスクに対する安全性を理解するには、ネットワークの大域的な繋がりの維持に注目することが必要となる。

複雑ネットワークの分野では、システムの頑健性を論じるために、離散要素(頂点)とそれらの間の結合(辺)のみに着目したネットワークを考える。不測の事態もしくは意図的な攻撃によりネットワークの一部の頂点が機能不全な故障状態にあるとしよう。故障状態の頂点が多いと、残された頂点の集まりはバラバラに分断され、大域的な繋がりは失われる。大域的な繋がりは巨大連結成分の有無によって判断する。種々の故障・脅威に対してネットワークがどの程度まで巨大連結成分を維持できるかによって、システムの頑健性が評価できる。先行研究 [Cohen et al (2001) PRL] はランダムネットワークを使った解析によって、次数の非一様性がネットワークを(ランダムな故障に対して)非常に頑健にすることを明らかにし、大きなインパクトを与えた。複雑ネットワーク理論に基づいた知見が工学などの応用分野へ還元されるために、ネットワークの複雑な構造が頑健性に及ぼす影響のさらなる理解やより現実的な設定の数値実験・検証が求められており、現在も盛んに研究されている。

2. 研究の目的

複雑ネットワークの理論的枠組みから種々の脅威に対する人工物システムの頑健性を評価し、その機構の理解を深め、人工物システムの強化の指針を得ることを本研究の目的とした。具体的には以下の課題を軸に取り組んだ。

(1) ネットワークの高次の構造が頑健性に及ぼす影響：ネットワークのランダム故障の理論はランダムネットワークに基づいている。局所的な性質(次数の非一様性、クラスター性、弱い次数相関性)を考慮するように理論が拡張され、各々の性質が頑健性に及ぼす影響が議論されている。一方、解析が一層困難な、より高次の構造が及ぼす影響についての知見は限られている。本研究が目にするのは強い次数相関構造と階層構造である。強い次数相関構造や階層構造が入ったネットワークの頑健性を、パーコレーションモデルの解析を通じて調べる。

(2) 巨大連結成分の構造：ネットワークのランダム故障問題を論じるとき、巨大連結成分の有無はよく調べられているが、その巨大連結成分がどのような構造的特徴を有するかに関しては、(数値実験による事例報告はあれど)理論による見通しがほとんどない。巨大連結成分の統計的性質を計算する新しい手法を導入、展開し、巨大連結成分が持つ構造的特徴を明らかにする。

(3) バックボーンを持つ普遍パターンの起源：人工物システムはしばしば辺に重みがついた重み付きネットワークになる。重み付きネットワークは密であることも多く、ネットワークの重要部分だけを抽出する方法がさまざまに提案されている。その一つに link salience なる指標を使った Grady らの方法がある [Grady et al (2012) Nature Comm.] link salience に基づいて重要部分を抽出したとき、抽出されたネットワーク(バックボーン)にはある種の普遍パターンが見られることも同時に報告されていた。様々な設定における数値実験により、普遍パターンの起源について調査する。

その他、ネットワークの構造とダイナミクスに関連する諸問題について、研究代表者(長谷川)、研究分担者(谷澤、水高)がそれぞれに調査を行った。

3. 研究の方法

(1)と(2)に関わる研究では、パーコレーションモデルを用いる。ランダム故障の問題はネットワーク上の(サイト)パーコレーションモデルと結びついている。パーコレーションは、ネットワークの各頂点を独立にある確率 p で残し、そうでなければネットワークから取り除くという確率過程である。 p の値が大きければ(故障する確率が小さければ)残された頂点で巨大連結成分は維持されるが、 p の値が小さければ(故障する確率が大きければ)有限連結成分の集まりに分断さ

れる。巨大連結成分が現れる p の値 (臨界点) の大小によって、ランダム故障に対するネットワークの頑健性が評価される。

(1) に関する研究では、強い次数相関構造を持つネットワーク (三種類) と階層的に構成されるネットワーク上のパーコレーションを扱った。いくつかの解けるモデルについては、母関数解析などを施した。それ以外については数値実験 (モンテカルロシミュレーション) を用いた。有限サイズ効果が強いことが予想されたので、サイズ依存性の検証・有限サイズスケール解析が行われた。(2) に関する研究では、近年の [Tishby et al (2018) PRE] の手法を基に、パーコレーションが形成する巨大連結成分の統計的性質を計算する手法を開発、展開した。

(3) の研究で重要となる量は link salience である。ある辺の link salience は、各頂点を始点とした最短路木を頂点の数だけ用意したときにその辺が最短路木に使用される割合で定義される。様々な設定の下で重み付けされた人工的なネットワークについて [Grady et al (2012) Nature Comm.] のアルゴリズムを適用して、link salience の分布を調べるといった数値実験を行った。

4 . 研究成果

本研究で得られた成果は以下の通りである。

(1) (i) 強い相関構造がもたらす相転移の変容 (谷澤、長谷川、水高): ネットワークが強い正の次数相関構造を持つとき、通常のパーコレーションが示す転移とは異なる、新奇のパーコレーション転移が現れると報告されていた [Noh (2008) PRE] [Valdez et al (2011) EPL]。谷澤は強い正の次数相関を持つネットワーク上のパーコレーションの数値実験を行い、その転移の性質を、特にネットワークの玉ねぎ構造との関連という観点から詳細に検討した。水高と長谷川は別のアルゴリズムで強い正の次数相関構造を持つネットワークを生成し、大規模シミュレーションを行なった。有限サイズ効果を注意深く扱ったところ、ネットワークのサイズが十分に大きければ、平均場クラスの二次転移が見られることを明らかにした。それぞれの研究成果を複数の国際会議と日本物理学会で発表した。現在論文を準備中である。また、水高と長谷川は強い負の次数相関構造を持つネットワークを考案した。考案したネットワークは臨界特性を導出することが可能である。解析を進めた結果、強い負の次数相関構造は臨界特性を変えることを明らかにした。研究成果は日本物理学会で発表したのち、EPL 誌に出版された。

(1) (ii) 階層構造がもたらすネットワークの脆弱化 (長谷川): 複雑ネットワーク分野で広く認められている (ランダムネットワークの解析に基づいた) 予想に反して、階層ネットワークは次数の非一様性にかかわらずランダム故障に対して非常に脆弱になることが報告されていた [Hasegawa & Nemoto (2013) PRE]。階層ネットワークは再帰的なルールによって作られる。今回、故障に対して非常に脆弱なネットワークが作られる生成ルールの条件を見出し、多くの階層ネットワークの例についてパーコレーションモデルを母関数解析によって計算し、見出した条件が正しいことを確認した。研究成果を統計物理の国際会議にて発表した。

(2) 巨大連結成分の構造 (水高、長谷川): まず一般的な次数分布に従うランダムネットワーク上のサイトパーコレーション過程で形成される巨大連結成分の次数相関係数を母関数を使って定式化した。得られた式を解析したところ、臨界点近傍の巨大連結成分では、元のネットワークの次数分布によらず (次数分布の異質性が強い場合を除けば) 次数相関係数が負であるような、負の次数相関構造が常に現れるという強い結果が得られた。負の次数相関構造は、巨大連結成分の次数相関関数の定式化からも確認できた。さらに、最も基本的なランダムグラフである Erdos-Renyi ランダムグラフの巨大連結成分の次数相関関数を任意の長さだけ離れた二つの頂点の次数の同時確率として一般的に導出した。得られた式から、臨界点近傍の巨大連結成分に見られた負の次数相関構造は長距離に及び、その相関が続く長さは臨界点に至って発散することを明らかにした。また、局所的にクラスター性があるようなネットワークにも理論を拡張し、クラスター性がある場合においても臨界点近傍で負の次数相関構造が現れることを、フラクタル性との関連づけとともに議論した。これらの一連の研究成果を複数の国際会議と国内学会にて発表した。また、PRE 誌に 2 本、J. Phys: Complexity 誌に 1 本の論文が出版された。

(3) 重み付きネットワークにおけるバックボーンの特徴 (長谷川): 現実の重み付きネットワークの link salience の分布は広く bimodal 性を示すことが Grady らによって報告されていた。bimodal 性の起源を知るため、2 つの数値実験を行った。一つ目の実験では、重みが大小 2 種の値しかとれないシンプルなモデルを考え、辺の配分を変えたときにどのような状況で bimodal 性が出現するのかを確認した。二つ目の実験では、次数の分布にばらつきがあるネットワークを準備して、重みが両端頂点の次数の積の定数乗に相関するモデルを考え、相関の指数によって link salience 分布はどのように変化するのかを調べた。また、biased random walk を利用して、重み付けにノイズを入れた場合、link salience 分布の bimodal 性はどの程度維持されるのかも議論した。その結果、重み分布に偏りがあることと重みが両端の頂点の次数に強く相関することによって、link salience 分布は bimodal 形になることが明らかとなった。研究成果を日本物理学会、

ネットワーク科学の国内研究会で発表した。

(4) その他関連研究として、以下のような研究成果が得られた。(i) 長谷川は複雑ネットワーク上に広がる情報・イノベーションの拡散(情報カスケード)のメカニズムについて調べた。従来の情報カスケードモデルを拡張し、情報発信源の周辺とそれ以外の状況をわけて扱えるようなものとし、解析計算と数値計算の双方から、情報発信源周辺の状況がシステム全体に及ぼす影響を調査した。その成果は複数の国内学会・研究会で発表された。現在論文準備中である。(ii) 長谷川は電力網における観測ユニットの観測可能性にネットワークのクラスター性が及ぼす影響について調べた。平均次数が小さい場合にクラスター性は観測可能性に影響を与えるが、その影響は小さいものであることを示した。その結果は *Physica A* 誌に出版された。(iii) 谷澤は多変数時系列データ解析の結果を複雑ネットワークとして可視化し、ネットワーク科学の知見からデータマイニングを行う方法について研究を行なった。その一連の成果は複数の国際会議で発表された。(iv) 水高は自己組織化臨界ダイナミクスによるネットワーク形成の単純モデルを提案した。そのモデルの解析からネットワークのフラクタル性に新たな視点を与えた。その成果は *JPSJ* 誌に出版された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Mizutaka Shogo, Hasegawa Takehisa	4. 巻 128
2. 論文標題 Percolation on a maximally disassortative network	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 EPL (Europhysics Letters)	6. 最初と最後の頁 46003 ~ 46003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1209/0295-5075/128/46003	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 Mizutaka Shogo, Hasegawa Takehisa	4. 巻 98
2. 論文標題 Disassortativity of percolating clusters in random networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 062314-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.98.062314	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 Mizutaka Shogo	4. 巻 88
2. 論文標題 Simple Model of Fractal Networks Formed by Self-Organized Critical Dynamics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 014002 ~ 014002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7566/JPSJ.88.014002	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 Hasegawa Takehisa, Mizutaka Shogo	4. 巻 101
2. 論文標題 Structure of percolating clusters in random clustered networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 062310-1 ~ 12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevE.101.062310	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 Mizutaka Shogo, Hasegawa Takehisa	4. 巻 1
2. 論文標題 Emergence of long-range correlations in random networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Complexity	6. 最初と最後の頁 035007 ~ 035007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2632-072X/abb4c5	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 Hasegawa Takehisa, Iwase Yuta	4. 巻 573
2. 論文標題 Observability transitions in clustered networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physica A: Statistical Mechanics and its Applications	6. 最初と最後の頁 125970 ~ 125970
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physa.2021.125970	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 -

〔学会発表〕 計32件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 12件)

1. 発表者名 水高 将吾
2. 発表標題 複雑ネットワークの構造的性質 ~ 次数相関、フラクタル性とその連関 ~
3. 学会等名 量子・古典における複雑系の物理と普遍性 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Toshihiro Tanizawa
2. 発表標題 Percolation transition on scale-free networks with strong degree assortativity
3. 学会等名 NetSciX-Tokyo (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomomichi Nakamura and Toshihiro Tanizawa
2. 発表標題 Constructing networks for multivariate nonlinear and nonstationary time series
3. 学会等名 NetSciX-Tokyo (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shogo Mizutaka and Takehisa Hasegawa
2. 発表標題 Long-range degree correlations of fractal clusters in random networks
3. 学会等名 COMPLEX NETWORKS 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川雄央, 能川知昭
2. 発表標題 Inevitable Fragility of Hierarchical Networks against Random Node Failures
3. 学会等名 ネットワーク科学セミナー2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水高将吾, 長谷川雄央
2. 発表標題 Negative degree correlations of percolating clusters in random networks
3. 学会等名 ネットワーク科学セミナー2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西岡伸二, 長谷川雄央
2. 発表標題 情報発信源からの近さを考慮した情報カスケードモデルの解析
3. 学会等名 ネットワーク科学セミナー2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shogo Mizutaka
2. 発表標題 Intrinsic long-range degree correlation of random nwtwroks near criticality
3. 学会等名 Roles of Heterogeneity in Non-equilibrium collective dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takehisa Hasegawa and Tomoaki Nogawa
2. 発表標題 Inevitable Fragility of Hierarchical Networks against Random Node Failures
3. 学会等名 StatPhys 27 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shogo Mizutaka and Takehisa Hasegawa
2. 発表標題 Degree correlations of percolating clusters in random networks
3. 学会等名 StatPhys 27 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshihiro Tanizawa
2. 発表標題 Percolation on scale-free networks with assortative degree correlation
3. 学会等名 NetSci2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshihiro Tanizawa
2. 発表標題 The GitHub Project, Network Science in Your Pocket
3. 学会等名 NetSciEd2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shogo Mizutaka and Takehisa Hasegawa
2. 発表標題 Negative degree correlations of percolating clusters in random networks
3. 学会等名 CCEGN2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川雄央, 岩瀬優太, 五十嵐有美, 尾畑伸明
2. 発表標題 configuration modelにおける連結成分の統計的性質について
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 水高将吾, 長谷川雄央
2. 発表標題 最大負次数相関がパーコレーションの臨界特性に与える影響
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshihiro Tanizawa
2. 発表標題 Constructing directed networks from multivariate time series using linear modeling technique
3. 学会等名 CompleNet'19 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shogo Mizutaka
2. 発表標題 Degree correlations of percolating clusters in uncorrelated random networks
3. 学会等名 The 4th Workshop on Self-Organization and Robustness of Evolving Many-Body Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Toshihiro Tanizawa
2. 発表標題 Percolation transition on scale-free networks with assortative degree correlation
3. 学会等名 Complex Networks 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷川雄央, 水高将吾
2. 発表標題 ランダムネットワークにおける最大連結成分の統計
3. 学会等名 ランダム系と量子系の出会い
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水高将吾
2. 発表標題 パーコレーティングクラスターの次数相関の解析
3. 学会等名 ネットワーク科学セミナー
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩瀬優太, 長谷川雄央, 水高将吾
2. 発表標題 ランダムウォークで重み付けられたネットワークのバックボーン
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷川雄央, 水高将吾
2. 発表標題 クラスター性のあるネットワークの連結成分の統計的性質
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水高将吾, 長谷川雄央
2. 発表標題 パーコレーション問題における最大連結成分の負次数相関性
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 谷澤俊弘
2. 発表標題 強次数相関ネットワーク上のパーコレーション転移における臨界現象について
3. 学会等名 日本物理学会2018年秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩瀬優太, 長谷川雄央, 水高将吾
2. 発表標題 ランダムウォークで重み付けられたネットワークのバックボーン
3. 学会等名 ネットワーク科学セミナー2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 水高将吾, 長谷川雄央
2. 発表標題 隣接次数相関ネットワーク上のパーコレーション問題再訪
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西岡伸二, 長谷川雄央
2. 発表標題 ネットワーク上の拡張Wattsモデルのカスケード現象II
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水高将吾, 長谷川雄央
2. 発表標題 ランダムグラフにおける長距離次数相関
3. 学会等名 ネットワーク科学セミナー2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西岡伸二, 長谷川雄央
2. 発表標題 拡張Wattsモデルにおけるカスケードダイナミクスのseed割合依存性
3. 学会等名 ネットワーク科学セミナー2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西岡伸二, 長谷川雄央
2. 発表標題 ネットワーク上の拡張Wattsモデルのカスケード現象
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 水高将吾, 長谷川雄央
2. 発表標題 巨大連結成分の統計的性質: 次数相関
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 谷澤俊弘, 中村知道, 稲垣滋, 糟谷直宏
2. 発表標題 プラズマ乱流時系列データのネットワーク表現
3. 学会等名 第37回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 林幸雄, 谷澤俊弘, 鬼頭朋美, 岡本洋	4. 発行年 2019年
2. 出版社 近代科学社	5. 総ページ数 192
3. 書名 Pythonと複雑ネットワーク分析	

1. 著者名 【著】Albert-Laszlo Barabasi、【監訳】池田 裕一、井上 寛康、谷澤 俊弘	4. 発行年 2019年
2. 出版社 共立出版	5. 総ページ数 496
3. 書名 ネットワーク科学	

〔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
研究分担者	谷澤 俊弘 (Tanizawa Toshihiro) (60311106)	高知工業高等専門学校・ソーシャルデザイン工学科・教授 (56401)	
研究分担者	水高 将吾 (Mizutaka Shogo) (70771062)	北陸先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・助教 (13302)	

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