

2.6.8 ネットワーク科学

(1) 研究開発領域の定義

ネットワークは頂点および頂点間をつなぐ辺で構成される幾何学的構造であるが、実世界にはネットワークやその動的な変化、ネットワーク上のダイナミクスでモデル化できるものが多々ある。さらに、実世界に存在するさまざまな大規模で複雑なネットワークには特徴的な性質がみられることも少なくない。それらを適切に利用すれば、現象の予測や効率的な制御・設計等に反映できる可能性が高い。ネットワーク科学は、現実のネットワークに関する普遍的な数理的性質の発見とその原理の解明という新たな知識を創出するとともに、それらを用いた社会分析、現象の予測、ネットワークの制御・設計等の技術の高度化を行う学際領域である。

(2) キーワード

複雑ネットワーク、情報ネットワーク、社会的ネットワーク、生物学的ネットワーク、自己組織化

(3) 研究開発領域の概要

[本領域の意義]

研究開発領域「ネットワーク科学 (Network Science)」は、自然界や社会において特にネットワークが関係する現象について、普遍的な性質や特性の発見、原理やメカニズムの解明に加え、それらを用いた社会分析、現象の予測、ネットワークの制御・設計等の技術の創出・高度化も目指すものであり、情報科学・社会科学・生命科学・経済学・工学など極めて幅広い分野にわたって応用可能な学際領域である。

実世界にはネットワークでモデル化できるものが多々ある。インターネットなどさまざまな情報ネットワークをはじめ、WWWのハイパーリンクでつながれたページ全体の接続関係、論文の被引用関係、人間関係、サプライチェーン、電力ネットワーク、生物の神経回路網、脳機能ネットワーク、生体内のタンパク質相互作用、食物連鎖、言語における単語間の関係など、幅広い分野において、ネットワーク構造を見いだすことができる。ネットワーク科学は、静的なつながりの構造だけでなく、ネットワークの動的な変化も対象としている。実際、人々の検索、購買、移動、SNSなどによるレコメンドや評判を伝えるコミュニケーション、合意形成などの行動などはネットワークの構造の動的な変化としてとらえることもできる。また、ネットワーク上での動的な活動として、COVID-19などの感染症の流行、コンピューターウイルスの拡散、うわさやデマの伝搬などがある。このように、情報科学・社会科学・経済学・生命科学など幅広い分野において、ネットワークが関わる対象は多い。

現実存在するネットワークを分析することの重要性は古くから認識されていたが、実際のデータを収集・蓄積するためのリソースやコストが極めて大きい、もしくは現実的に不可能であったため、分析されるものはごく一部にとどまっていた。しかし、20世紀末に始まる、特にインターネットに代表される情報ネットワークの急速で著しい発展と、計算能力の大幅な向上、アルゴリズムの発展により、大規模で包括的なビッグデータを収集して分析することが可能となり、さらにそこから新たな知見が見いだされてきた。また、それらを活用して性能を向上する方法・方式の設計が実際に可能となってきた。この動きをさらに発展させ、現実のネットワークが持つ本質的で普遍的な数理的性質の発見とその原理の解明を進めると同時に、それらを活用した実用的にも有効な現象予測や、ネットワークの制御・設計等の技術の創出・高度化を行うことがネットワーク科学の意義であり、通信・ネットワーク区分の研究開発を支える基礎研究として極めて重要な領域である。

[研究開発の動向]

ネットワークの重要性は古くから認識され、離散数学の分野ではグラフ理論において、一般的なネットワーク構造の数理的性質に関する研究が積み重ねられてきた。また現実の現象を扱う分野では、20世紀初頭から社会ネットワーク分析など社会科学、電話網の設計・制御などの工学などの多くの分野で扱われてきた。し

しかし現実には存在するネットワークの性質について調べることは長らく困難であった。それは、実際のデータを収集・蓄積するためのリソースやコストが極めて大きい、あるいは、現実的に不可能であったためである。

しかし、20世紀末に始まる、特にインターネットの急速で著しい発展、WWWやSNSの普及、携帯電話やスマートフォンの普及により、大規模で包括的なビッグデータを取得することが可能となった。実際、公共や民間のデータベース、オンライン取引、ソーシャルメディアでのやりとり、インターネット検索、IoT機器のセンシングデータなどが比較的容易に収集できるようになった。また計算能力の大幅な向上とさまざまなアルゴリズムの発展により、これまでは不可能・困難だった大規模なデータが扱えるようになってきた。特に深層学習のアルゴリズムの進展により、構造化データだけでなく、テキスト・画像・映像など非構造化データの分析も可能となってきた。このような状況の変化によって、これまでは不可能・困難だった分析が可能となり、そこから新たな知見が数多く見いだされてきた。さらに、それらを活用して現象の予測や、性能を向上させる方法や方式の設計が実際に可能となってきた。このような背景から、20世紀の終わり頃からネットワーク科学の研究が急激に大きく進展してきた。そこでは、現実のネットワークが持つ本質的で普遍的な数理的性質の発見とその原理の解明を進めると同時に、それらを活用した実用的にも有効な現象予測や、ネットワークに関するさまざまな制御・設計等の技術を創出・高度化することが目指されている。

ネットワーク科学の研究が進む大きな契機となったのは、1998年のワッツとストロガッツの論文¹⁾、および1999年のバラバシとアルバートの論文²⁾である。前者では、現実のネットワークが持つスモールワールド性とそれを説明するモデルが述べられている。スモールワールド性とは、ネットワークの平均頂点間距離が小さく、かつ局所的に密（クラスタ係数が大きい）であることを意味する。後者では、次数分布がべき乗則にしたがうというスケールフリー性とそれを説明するモデルが述べられている。これらの論文がきっかけとなり、現実のネットワークの中にはスケールフリー性やスモールワールド性という性質を持つものも少なくないということが広く知られることになった。また、多くの研究者たちの興味を集めたのは、単純なランダムネットワークではこれらの性質を再現することはできず、自明でない何らかの生成原理が背後にあるということであった。極めて巨大なネットワークを扱うために統計物理学的なアプローチが導入されたこともあり、物理学者たちの参入も招いて大きく発展した。この後10年ほどの間、さまざまな性質の発見や、それらを説明する生成モデルに関する研究が活発に行われた。

ネットワークの構造に関する研究の台頭にあわせて、ネットワーク上のさまざまな現象に関する研究も活発化した。感染症の伝搬の研究は古くから行われていたが、現在は人間がグローバルに移動するため、地理的な距離よりも誰と誰が接触したかということを表すネットワーク上での伝搬を考える必要がある。また、コンピュータウイルスはまさに情報ネットワーク上で伝搬する。このようなネットワーク上の伝搬にはネットワークの構造が強く影響しているが、現実のネットワークが有するさまざまな性質を考慮した分析が行われた。スケールフリー性を持つネットワーク上のSISモデル（コンタクトプロセス）^{3)・4)}やSIRモデル⁵⁾をはじめ、さまざまなバリエーションが調べられている。このように従来からネットワーク科学の分野でも行われていた感染流行の解析は、2020年にはじまる新型コロナウイルス感染症（COVID-19）の世界的流行によって再度活発化している。ただし、今回は感染流行の解析のみならず、Network medicine（ネットワーク科学を応用した医学）の研究も活発化してきている。

ネットワーク上のランダムウォークも重要な研究対象となっている⁶⁾。ランダムウォークは単純な数理モデルではあるが、その解析を通じて明らかにされた知見は、Peer-to-Peer ネットワークにおけるスケーラブルな情報探索⁷⁾や、PageRankなどのランキングアルゴリズムの設計等にも役立てられている。

情報ネットワークや電力ネットワークにおいては、一つの組織がネットワークの大部分を設計・制御していた時代から、インターネットなど、個々のネットワークが相互接続して形成されて全体を管理する主体がないネットワークの時代に移るにつれ、多くの新たな課題が生まれてきた。例えば、次数の大きい一部のノードを選択的に破壊することで多数の小さな連結成分に分断されてしまうこと⁸⁾や、数個のノード停止で故障が連鎖的に波及するカスケード故障が起こりうること⁹⁾、ネットワークの可制御性の観点から、ネットワークに制御

を加えるノード数がネットワーク構造の性質で変わること¹⁰⁾などがわかり、新たなネットワーク設計・制御法に生かされている。例えば、文献10)は3000以上の論文から引用され、ネットワーク制御における分析の基礎となっている。

SNSの爆発的普及とマーケティングとの関わりが深まるにともなって、インフルエンサーやコミュニティの抽出の研究も進んだ。ネットワークからコミュニティを抽出する研究において、例えばHITS (Hyperlink-Induced Topic Search) アルゴリズム¹¹⁾では、オーソリティーノードは重要な情報を持つノード、ハブノードはオーソリティーにナビゲートするノードと位置付け、ハブノードとオーソリティーノードからなる二部グラフ構造を抽出するという考え方を導入した。他にも多くのコミュニティ抽出に関する研究があるが、抽出されたコミュニティの構造から効率的にインフルエンサーを発見するアルゴリズムの設計に関する研究もある¹²⁾。これらはネットワークの性質の解明だけでなく、それを利用した新たな技術の開発にもつながるものである。

経済学においても、ネットワークを意識した研究が進んだ。特にサプライチェーンに関する研究は古くから行われているが、そのネットワーク構造を実際のデータを用いてスケールフリー性など新たな観点で調べる研究も行われている¹³⁾。ゲーム理論におけるネットワーク上の進化ゲームは、生態系の種と種間の競争や種内の競争のモデルでもあるが、スケールフリー性を持つネットワーク上の進化ゲーム¹⁴⁾も扱われている。金融市場における取引関係はネットワークとしてモデル化することができるが、リーマンショックのように一部の破綻が連鎖的に広がって世界金融危機を引き起こす現象をネットワーク上の伝搬としてとらえることができる¹⁵⁾。その性質にはネットワークの構造が大きく影響する。

生命科学においてもさまざまなところにネットワークでモデル化できるものが見られるため、ネットワーク科学の研究の黎明期から、代謝ネットワークなどが研究されてきた。近年は、fMRIなどによる脳活動の計測によって得られた膨大なデータを処理することで、コネクトームと呼ばれる脳領域間の接続関係、つまりある種の脳内ネットワークの構造を調べる研究も進みつつある¹⁶⁾。

研究分野を俯瞰するという行為を、ネットワーク分析の観点から行う研究も始まっている。例えば、論文の被引用関係に基づくネットワークの分析を通じて特定の科学分野を俯瞰し、その分野の進歩やそのメカニズムを解明することを目指す研究もある¹⁷⁾。

以上のように、当初は現実のネットワークの構造の特徴的な性質の発見や、それらの性質を説明できるネットワーク生成モデルの研究が中心であったが、極めて強力なモデル化能力を持つネットワークという概念を軸として、さまざまな分野において、ネットワークの性質の発見とその原理の解明、それらを活用した現象予測やネットワークの制御・設計に関する技術の研究・開発が急速に進展している。

(4) 注目動向

[新展開・技術トピックス]

COVID-19に関連した研究開発

2020年にはじまるCOVID-19の世界的流行により、従来からネットワーク科学の分野で行われていた感染流行の解析や、Network medicine (ネットワーク科学を応用した医学)の研究が活発化している。

ネットワーク科学の分野以外でも、数理モデル (SIRモデルなど) を活用した感染流行の解析は行われているが、そこではそれぞれの人の接触が均一であることを仮定している。ネットワーク科学の分野では複雑な感染流行の特性を明らかにするために、人々の接触頻度の違いをネットワークで表現した数理モデル (Network SIRモデルなど) による解析が従来から行われていた。COVID-19の世界的流行によって感染拡大の予測が重要視されたこともあり、より現実に近いネットワーク科学の分野のアプローチが注目され、感染流行に関する研究が再び活発になっている。例えば、中国の湖北省におけるCOVID-19の感染流行を解析し、感染流行を予測する方法が開発されている¹⁸⁾。

また、Network medicineに関する研究成果として、バラバシらの研究チームがCOVID-19に有効な治

療薬を発見するためのフレームワーク¹⁹⁾を開発し、実際にそのフレームワークを用いて発見された有効な治療薬のリストを公開している。このような背景を踏まえて、Network medicineの研究も注目されている。

脳コネクトームの分析

fMRIなどによる脳活動の計測によって得られた膨大なデータを処理することでコネクトームと呼ばれる脳領域間の接続関係の情報が取得できる。コネクトームはある種の脳内ネットワークの構造を表しているものと言える。機械学習などの大量のデータを処理できるアルゴリズムの発展によって取得可能な脳コネクトームの幅が広がったことや、Human Connectome Projectなどによる脳コネクトーム情報が研究者間で幅広く共有されたことにより、コネクトームを通じた脳内ネットワークの分析¹⁶⁾が活発に行われている。このような脳コネクトームを通じて得られた脳に関する知見は、さまざまな疾患の早期発見や治療法の確立に役立つものとして期待されている。

Science of Science

従来から、論文の被引用関係に基づくネットワークの分析を通じて、特定の科学分野における中心的な役割を果たしている研究者の解明等が行われてきた。そのような科学分野の分析を一般化し、科学の進歩やその背後にあるメカニズムを解明しようとする取り組みがバラバシらの研究チームにより Science of Science と命名され、利用可能なデジタルデータの急激な増加などの社会的背景を受けて、近年研究が活発化している¹⁷⁾。このような Science of Science の研究を通じて得られた知見は、研究者自身の研究活動（研究課題の選択など）に役立つだけでなく、科学のさらなる発展を促進させるものとして期待されている。

Blockchain Network

BitcoinやEthereumをはじめとするブロックチェーンのネットワークは信頼できる第三者に依存することなくコミュニティで協調して信頼を維持するソーシャルネットワーク基盤であり、実稼働する大規模ネットワークであることから、多くの研究者により分析・解明が進められている。

文献20)は、2009年から2020年までの約10年間にわたるBitcoinにおけるユーザーグラフ・ネットワークの変化を分析し、複雑ネットワークの性質を共有していることを示した。Bitcoinのネットワークを解析した文献21)では、スモールワールド性、preferential attachmentの性質（スケールフリー性）などが確認され、将来の悪意ある攻撃の検出などに対する示唆を与えている。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

Stanford Network Analysis Project

Stanford Network Analysis Project (SNAP)²²⁾は、スタンフォード大のレスコヴェツが中心となり、社会的ネットワークや通信ネットワーク、論文引用ネットワーク、Web ネットワークなどのデータセットが公開されている。これらのデータセットは、ネットワーク科学に関連する理論的な研究の実証に用いられるだけでなく、ネットワークに関するさまざまなアルゴリズムの評価にも活用されている。SNAPで公開されているデータセットは、ライブラリを通じてC++やPythonで使うことができる。レスコヴェツはNetSciX 2022で基調講演を行っており、同プロジェクトがネットワーク科学分野において重要な位置付けとなっている。

Complex Systems Society

Complex Systems Society (CSS)²³⁾は、複雑系システム科学の発展を促進する学会として2004年に欧州で発足した。CSSは基礎から応用にわたる複雑系システムの研究、欧州各国の関連研究者間の相互の交流を促進し、教育支援等を行うことを目的としている。ネットワーク科学の知見を生かした研究開発プロジェクトも含まれ、応用研究も活発である。

ネットワーク科学に関連する国際会議

国際会議 Complex Networks はネットワーク科学分野の主要なカンファレンスとして年に1回、冬季に開催されている。国際会議 NetSci はネットワーク科学ソサエティのフラグシップカンファレンスとして年に1回、夏季に開催されている。NetSciXはNetSciの姉妹カンファレンスであり、年に1回、冬に開催されている。本国際会議は、ネットワーク科学に関係する最も規模の大きなものであり、研究発表だけでなく、スクール形式の講演も行われている。

ネットワーク科学に関する国内の活動

電子情報通信学会 NOLTA ソサイエティでは、複雑コミュニケーションサイエンス研究会 (CSS) が運営されている。情報通信、神経系や生物システム、人間のソーシャルコミュニケーションなどを対象として、普遍的特質を明らかにするサイエンスの創出、およびそのための分野横断的な情報共有を行う場を提供することを目的としている。おおむね年4回の研究会を実施している。

また、同学会の通信ソサイエティでは、情報ネットワークに関わる基盤技術およびそのシステム・ネットワーク全体を対象として分野横断的な情報共有を行う場を提供することを目的として情報ネットワーク (IN) 研究会が運営されている。同研究会は、情報ネットワークを対象にしてネットワーク科学的なアプローチも視野に入れて学術的基盤を構築することを目指した電子情報通信学会・通信ソサイエティ・情報ネットワーク科学研究会 (NetSci 研究会) を2019年に統合した。上記の複雑コミュニケーションサイエンス研究会とも連携しており、おおむね年7回の研究会を実施している。

統計数理研究所の統計思考院公募型人材育成事業が主催する関連研究会として、ネットワーク科学研究会がある。若手研究者が中心となり、分野横断的な情報共有を行う場を提供することを目的としている。2017年よりおおむね年1回の研究会を実施している。

情報処理学会では、ネットワーク生態学研究会が行われており、ネットワーク科学に関する国内研究者を中心とした研究グループが参加している。おおむね年1回のシンポジウムを開催している。

(5) 科学技術的課題

データの共有・分析・活用のための基盤技術

現在はさまざまな組織や機関において膨大なデータが収集・蓄積されており、それらの公開も進んでいる。実際、オープンデータとして公開されているものも少なくない。特にネットワーク科学に関係するデータセットは上記のSNAPからも公開されている。

一方、企業、教育機関、医療、ヘルスケア分野におけるデータや、SNS利用履歴や通信履歴などには個人情報を含むものも多く、データを収集・蓄積する組織や機関を越えた利用は極めて困難である。そのため、分析されているデータはごく一部に限られており、まだ解明されていない性質などが多々あると思われる。これらが広く共有されて分析されれば、新たな知見が発見され、分野や組織を横断してその成果を活用できるようになる可能性が高い。そのような環境を構築するためにも、個人情報などを秘匿したまま分析する技術の進展などが必要不可欠である。

ネットワーク科学の応用研究

これまでのネットワーク科学は基礎研究に重きが置かれ、ネットワークの性質の解明や現象の説明が中心であった。実用的にも有用な現象予測や工学的な制御・設計法の創出・高度化につなげていくことが極めて重要であるが、日本における動きは鈍い。一方、海外ではネットワーク科学の応用として、多数の自律動作する UAV (Unmanned Aerial Vehicle) によるセンシングネットワークの制御²⁴⁾ や、先に挙げた Blockchain Network における攻撃の検出方法等の応用研究が進んでいる。後者の Blockchain Network の研究は長期にわたるデータ収集と蓄積により進められたものである。ネットワーク科学の有用な応用を誘発するには、後

述のようにデータの共有・分析・活用のためのプラットフォーム等の整備やその活用等を通して、分野融合的に明確なメリットを学术界・産業界が共有し、コラボレーションを活発に進めることが重要と考えられる。

(6) その他の課題

データの共有・分析・活用のためのプラットフォーム

現在、GAFAM (Google, Amazon, Facebook, Apple, Microsoft) のみならず、中国もクラウドやIoTで生まれる膨大なデータの収集・蓄積を行っている。これらのビッグデータは、AI技術の高度化のみならず、さまざまな分野で活用されている。しかし、これらのデータは一般に公開されていないため、部外者はそれらを主体的に分析できず、その分析から得られる莫大な知見を得ることができない。したがって、それらを利用した有効な活用も先導的に行うことができない。日本が主体的・先導的に研究開発を進めるためにも、ビッグデータの共有・分析・活用のための基盤技術の研究開発と同時に、データを収集・蓄積して共有・分析・活用するためのプラットフォーム・インフラの整備、および法の整備が喫緊の課題である。

人材育成

ネットワーク科学が学問領域として発展するためには、文理横断型の学際的方法論を身に着けるための教育が必要である。例えば、情報科学の知識・スキルを持った経済学者・社会学者や、逆に経済学・社会科学の素養を持った情報科学の研究者の育成が必要である。

さらに、国内では小規模なものにとどまるネットワーク科学のコミュニティの支援や、次世代を担う博士人材の支援のための制度も必要である。

学際的研究の支援

ネットワーク科学は特に学際的研究領域であるため、既存の研究領域のなかでは適切に評価されないリスクがあり、それが特に国内における本領域への挑戦が躊躇される一因になっている。学際的研究領域にリスクをとって挑戦できる仕組みが必要である。

米国や欧州では、国や大学をまたぐ研究プロジェクトが活発に行われているのに対し、日本ではそれぞれのコミュニティが小さく、連携して大きな研究プロジェクトの実現につながっていない。そのような研究プロジェクトの促進のためにも、上記の仕組み等を活用してコミュニティが連携できる環境を整備することが重要である。

学术界と産業界のコラボレーションも重要であるが、特に国内では活発に進んでいるとは言えない。上記にも挙げたデータの共有・分析・活用のためのプラットフォームの整備を協働で進めるためにも、コラボレーションの促進策が必要である。

(7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考にした根拠など
日本	基礎研究	◎	↗	米国物理学会の論文誌や NetSci での発表が活発に行われている。ネットワーク科学研究会等にも多くの研究者が参加しており、活発な議論が行われている。
	応用研究・開発	○	→	基礎研究で得られた知見を通信ネットワークや社会的ネットワークに応用する試みが行われている。ただし、米国や欧州に比べると応用研究はあまり活発ではない。

米国	基礎研究	◎	↗	ノートルダム大学のバラバシ、ミシガン大学のニューマン、ニューヨーク州立大学の増田といった基礎的な分野をけん引する研究者が多く存在し、世界の基礎研究をリードしている。
	応用研究・開発	◎	↗	33の大学や機関が加盟する Network Medicine Alliance によって、ネットワーク科学を応用した医学 (Network medicine) の研究が近年も活発に行われている。
欧州	基礎研究	◎	↗	ネットワーク科学に関連する欧州の研究機関が参加する Complex Systems Society が設立されており、各国の大学の連携を促進している。この Society では若手の育成のためのコミュニティー (Young Researchers of the Complex Systems Society) の活動も行われており、長い視点で見た研究の発展も目指している。
	応用研究・開発	○	↗	Complex Systems Society には、ネットワーク科学の知見を生かした研究開発プロジェクトも含まれており、応用研究も活発である。特に、フランスの Aramis Lab. は、ネットワーク科学者と脳科学者が一緒になり、脳疾患の理解と新たな治療方法の確立を目指している。
中国	基礎研究	◎	↗	ここ数年の論文数は米国に次ぐ世界第2位であり、香港城市大学のチェン (G.Chen) や復旦大学のチャン (Z.Zhang) を中心に基礎研究が活発に行われている。
	応用研究・開発	△	→	基礎研究で得られた知見を活用する応用研究に関して目立った活動は確認できない。
韓国	基礎研究	○	→	韓国内における研究者人口はあまり多くないが、KAIST (Korea Advanced Institute of Science and Technology) のジョン (H. Jeong) や、ソウル大学校のカーン (B. Kahng)、高麗大学校のコ (K. Goh) を中心に、基礎的な研究が行われている。
	応用研究・開発	△	→	基礎研究で得られた知見を活用する応用研究に関して目立った活動は確認できない。

(註1) フェーズ

基礎研究フェーズ：大学・国研などでの基礎研究の範囲

応用研究・開発フェーズ：技術開発（プロトタイプの開発含む）の範囲

(註2) 現状

◎：特に顕著な活動・成果が見えている

×：活動・成果がほとんど見えていない

○：顕著な活動・成果が見えている

—：評価できない（公表する際には、表示しない）

△：顕著な活動・成果が見えていない

(註3) 近年（ここ1～2年）の研究開発水準の変化

↗：上昇傾向 →：現状維持 ↘：下降傾向

参考文献

- 1) Duncan J. Watts and Steven H. Strogatz, "Collective dynamics of 'small world' networks," *Nature* 393, no. 6684 (1998) : 440-442., <https://doi.org/10.1038/30918>.
- 2) Albert-László Barabási, and Réka Albert, "Emergence of Scaling in Random Networks," *Science* 286, no. 5439 (1999) : 509-512., <https://doi.org/10.1126/science.286.5439.509>.
- 3) Romualdo Pastor-Satorras and Alessandro Vespignani, "Epidemic Spreading in Scale-Free Networks," *Physical Review Letters* 86, no. 14 (2001) : 3200-3203., <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.86.3200>.
- 4) Romualdo Pastor-Satorras and Alessandro Vespignani, "Immunization of complex networks," *Physical Review E* 65, no. 3 (2002) : 036104., <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.65.036104>.
- 5) Yamir Moreno, Romualdo Pastor-Satorras and Alessandro Vespignani, "Epidemic outbreaks in complex heterogeneous networks," *European Physical Journal B - Condensed Matter and*

- Complex Systems* 26, no. 4 (2002) : 521-529., <https://doi.org/10.1140/epjb/e20020122>.
- 6) Naoki Masuda, Mason A. Porter and Renaud Lambiotte, “Random walks and diffusion on networks,” *Physics Reports* 716-717 (2017) : 1-58., <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2017.07.007>.
- 7) Qin Lv, et al., “Search and replication in unstructured peer-to-peer networks,” in *Proceedings of the 16th international conference on Supercomputing* (New York: Association for Computing Machinery, 2002), 84-95., <https://doi.org/10.1145/514191.514206>.
- 8) Réka Albert, Hawoong Jeong and Albert-László Barabási, “Error and attack tolerance of complex networks,” *Nature* 406, no. 6794 (2000) : 378-382., <https://doi.org/10.1038/35019019>.
- 9) Adilson E. Motter and Ying-Cheng Lai, “Cascade-based attacks on complex networks,” *Physical Review E* 66, no. 6 (2002) : 065102., <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.66.065102>.
- 10) Yang-Yu Liu, Jean-Jacques Slotine and Albert-László Barabási, “Controllability of complex networks,” *Nature* 473, no. 7346 (2011) : 167-173., <https://doi.org/10.1038/nature10011>.
- 11) Jon M. Kleinberg, “Authoritative sources in a hyperlinked environment,” *Journal of the ACM* 46, no. 5 (1999) : 604-632., <https://doi.org/10.1145/324133.324140>.
- 12) Jia-Lin He, Yan Fu and Duan-Bing Chen, “A Novel Top-k Strategy for Influence Maximization in Complex Networks with Community Structure,” *PLoS One* 10, no. 12 (2015) : e0145283., <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0145283>.
- 13) 鬼頭朋見「実世界サプライチェーンの構造的頑健性：複雑ネットワーク・アプローチ」『情報処理学会論文誌』6巻2号(2014) : 174-181.
- 14) Francisco C. Santos and Jorge M. Pacheco, “Scale-Free Networks Provide a Unifying Framework for the Emergence of Cooperation,” *Physical Review Letters* 95, no. 9 (2005) : 098104., <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.95.098104>.
- 15) Prasanna Gai and Sujit Kapadia, “Contagion in financial networks,” in *Proceedings of the Royal Society A* 466, no. 2120 (2010) : 2401-2423., <https://doi.org/10.1098/rspa.2009.0410>.
- 16) Maria Giulia Preti and Dimitri Van De Ville, “Decoupling of brain function from structure reveals regional behavioral specialization in humans,” *Nature Communications* 10 (2019) : 4747., <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12765-7>.
- 17) Santo Fortunato, et al., “Science of science,” *Science* 359, no. 6379 (2018) : eaao0185., <https://doi.org/10.1126/science.aao0185>.
- 18) Bastian Prasse, et al., “Network-inference-based prediction of the COVID-19 epidemic outbreak in the Chinese province Hubei,” *Applied Network Science* 5 (2020) : 35., <https://doi.org/10.1007/s41109-020-00274-2>.
- 19) Deisy Morselli Gysi, et al., “Network medicine framework for identifying drug-repurposing opportunities for COVID-19,” *PNAS* 118, no. 19 (2021) : e2025581118., <https://doi.org/10.1073/pnas.2025581118>.
- 20) Pranav Nerurkar, et al., “Dissecting bitcoin blockchain: Empirical analysis of bitcoin network (2009-2020),” *Journal of Network and Computer Applications* 177 (2021) : 102940., <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102940>.
- 21) Bishenghui Tao, et al., “Complex Network Analysis of the Bitcoin Transaction Network,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs* 69, no. 3 (2022) : 1009-1013., <https://doi.org/10.1109/TCSII.2021.3127952>.

- 22) Jure Leskovec, “Stanford Network Analysis Project (SNAP),” Stanford University, <http://snap.stanford.edu/>, (2023年2月27日アクセス) .
- 23) Complex Systems Society (CSS), <https://cssociety.org/>, (2023年2月27日アクセス) .
- 24) Soon-Jo Chung, et al., “A Survey on Aerial Swarm Robotics,” *IEEE Transactions on Robotics* 34, no. 4 (2018) : 837-855., <https://doi.org/10.1109/TRO.2018.2857475>.

2.6

俯瞰区分と研究開発領域
通信・ネットワーク