

学位論文題名

複雑ネットワークにおける重みの分布と構造に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、巨視的数のノードが複雑にリンクすることで構成される複雑ネットワークの様々な統計的性質が、物理学の手法を用いることにより解明されるようになってきた。これらの研究により、社会学、情報科学、生命科学など、多様な分野に現れる異種の複雑ネットワーク間に多くの共通した性質があることが明らかになっている。そのため、複雑ネットワークは複雑系に潜む統一的な法則性を理解する手がかりを与えるものとして、現在精力的に研究されている。現実世界に存在する多くのネットワークは、中に含まれるノードまたはリンクが等価ではなく、何らかの「重み」を有する重み付きネットワークとなっている。従って、ネットワーク構造やダイナミクスがこの重みによってどのような影響を受けるかを理解することは極めて重要である。実際、これまでに重み付きネットワークを特徴付けるための様々な統計量が提案されてきた。しかし、これらの統計量は、その定義が重みのないネットワークに対する統計量を単に重みを強調するように拡張されたものであるため、統計解析結果は大きな重みに支配されてしまう。また、重みの空間分布とネットワーク・トポロジーとの相関を明らかにすることも難しい。しかしながら、中小企業間の弱いリンクで構成される企業取引ネットワークが経済全体を支えているように、重みの小さいリンクが作るネットワークの部分構造の統計的性質が重要になる場合や、大きな重みをもつ強いリンクをことさら強調することでネットワーク全体の性質が正しく理解できる場合がある。さらに、重みの空間分布に応じてネットワーク・トポロジーを制御し、ネットワークの機能を強化することも応用上重要である。このため、重み付きネットワークの性質を理解し、これを応用に結び付けるには、注目する重みの大きさに応じた系統的な解析や重みの空間分布とトポロジーとの相関解析が必要となる。

本論文では、重み付き複雑ネットワークの大域的性質を着目する重みの大きさに応じて解析するための新しい手法であるメタウェイト解析法と、重みの空間分布とネットワーク・トポロジーの相関を定量的に特徴付けるためのマルチフラクタル解析法を提案する。また、これらの方法を多くのネットワーク・モデルや現実ネットワークに適用することで、解析法の有用性を実証する。本論文は全6章で構成され、各章の概要は以下の通りである。

第1章は緒論であり、本論文の主題である複雑ネットワークにおける重みの分布と統計的性質に関する研究の背景と問題点を概説する。

第2章では、これまでの研究によって明らかにされた複雑ネットワークの基本的性質について詳しく説明する。また、本論文の主題である重み付きネットワークに対する従来の解析方法やその問題点を述べ、改めて本研究の目的について述べる。

第3章では、重みの大きさに応じた統計量の解析を可能にするメタウェイト解析法の提案とその有用性の例証を行う。この解析方法では、各リンクの重みを q 乗したメタウェイトという量を導入し、この実数パラメータ q を変化させることによって特定の重みリンクから構成されるネットワークの部分構造を詳細に分析することを行う。本研究では、まずメタ強度分布についての議論を行った。メタ強度とは、1つのノードに接続しているリンクのメタウェイトの総和である。研究の結果、メタ強度分布がべき則に従う際、一般的には無限個のメタ強度指数によって重み付きネット

ワークが特徴付けられることが明らかになった。特に、重みの分布とネットワーク・トポロジーが独立なネットワークに対しては、たった3つの指数だけが独立であることを解析的に明らかにした。また、重みごとのリンク密度を表すメタクラスター係数や、次数(一つのノードが有するリンク数) どちらの相関を評価するためのメタ隣接頂点次数を導入し、これらを現実のネットワークに対して計算・評価することでメタウェイト解析の有用性を示した。さらに、メタウェイトを利用したコミュニティ構造の抽出法を提案した。これにより、トポロジーと重みの重要度の割合を必要に応じて調節したうえでコミュニティを抽出することが可能になった。

第4章では、重みの空間分布とネットワーク・トポロジーの相関を特徴付けるためのマルチフラクタル解析法の確立を行う。従来のマルチフラクタル解析では系を小さな箱で最小被覆し、その箱内の測度に対する解析を行ってきた。しかし、複雑ネットワークにおいては、互いに重複することなく一定の大きさのサブグラフで被覆することは不可能であるため、重複を許すという条件下で測度を定義しなおす必要がある。この拡張された方法を用いることによって、本論文では2種類の重みに対するマルチフラクタル解析を行った。まず、ネットワーク上の流れを考える際に重要となる媒介中心性という量を重みとして考え、この量に対するマルチフラクタル解析を行った。その結果、ネットワークがフラクタルであれば、スケールフリー性(次数分布がベキ則に従う性質)の有無に依らず媒介中心性分布はマルチフラクタル性を示すことが明らかになった。また、ネットワーク内のノード密度分布のマルチフラクタル解析を行ったところ、スケールフリー・フラクタル・ネットワークのノード密度はマルチフラクタル分布する可能性があることが明らかになった。このことは、ネットワーク自身が、単一のフラクタル次元で特徴付けられるユニフラクタル構造を取るのではなく、無限個の指数の組を必要とするマルチフラクタル構造を呈することを示している。

第5章では、Local World Evolving Network (LWEN) モデルの次数分布を解析的に導出し、スケールフリー転移の有無などに関する詳細な研究を行う。前章までに明らかにしたように、スケールフリー性は重み付き複雑ネットワークの統計的性質と密接に関係している。本論文では、スケールフリー性がどのようなメカニズムによって現れるかについても議論した。代表的なスケールフリー性の起源として知られる優先選択則成長において、ローカルワールド性(LW性:新規参入ノードがネットワーク情報の一部しか知り得ないという性質)がスケールフリー性の獲得に強い影響を与えることは以前から指摘されていた。しかし、LWサイズの変化とともに現れると期待されていたスケールフリー性への転移の詳細に関しては殆ど明らかにされていない。また、現実ネットワークにおいてLWの効果がどのように発現しているかを示す実証的研究も行われていなかった。本研究で行ったLWENモデルに対する解析計算の結果、LWサイズが大きくなるにつれて、ネットワークは非スケールフリーからスケールフリーへとクロスオーバーすることが示された。また、このクロスオーバー・サイズと平均次数の関係を明らかにした。さらに、北海道大学病院医療情報部より提供された処方データを基に医薬品処方相関ネットワークを作成し、現実のネットワークにおけるLW性の発現に関する実証的研究を行った。新たな統計量を導入してこのネットワークを解析したところ、医薬品処方相関ネットワークのLWとコミュニティ構造との間には強い相関があることが明らかになった。

第6章は結論である。メタウェイト解析の導入、マルチフラクタル解析の確立、およびこれらの手法を用いることで得られた重み付き複雑ネットワークの統計的性質に関する知見をまとめると共に今後の課題について述べる。

学位論文審査の要旨

主査	教授	矢久保	考介
副査	教授	郷原	一寿
副査	教授	西口	規彦
副査	教授	古川	正志 (情報科学研究科)
副査	准教授	根本	幸児 (理学研究院)

学位論文題名

複雑ネットワークにおける重みの分布と構造に関する研究

近年、巨視的数のノードが複雑にリンクすることで構成される複雑ネットワークの様々な統計的性質が、物理学の手法を用いることにより解明されるようになってきた。これらの研究により、多様な分野に現れる異種の複雑ネットワーク間に多くの共通した性質が見られることが明らかになっている。また、現実世界に存在する多くのネットワークは、中に含まれるノードまたはリンクが等価ではなく、何らかの「重み」を有する重み付きネットワークとなっている。従って、ネットワーク構造やダイナミクスがこの重みによってどのような影響を受けるかを理解することは極めて重要である。実際、これまでに重み付きネットワークを特徴付けるための様々な統計量が提案されてきた。しかし、これらの統計量は、その定義が重みのないネットワークに対する統計量を単に重みを強調するように拡張されたものであるため、統計解析結果は大きな重みに支配されてしまう。また、重みの空間分布とネットワーク・トポロジーとの相関を明らかにすることも難しい。このため、重み付きネットワークの性質を理解し、これを応用に結び付けるには、注目する重みの大きさに応じた系統的な解析や重みの空間分布とトポロジーとの相関解析が必要となる。

本論文で申請者は、着目する重みの大きさに応じて重み付き複雑ネットワークの大域的性質を解析するための新しい手法であるメタウエイト解析法と、重みの空間分布とネットワーク・トポロジーの相関を定量的に特徴付けるためのマルチフラクタル解析法を提案している。また、これらの方法を多くのネットワーク・モデルや現実ネットワークに適用することで、解析法の有用性を実証した。

本研究の結果、以下の事実が明らかになった。(1) メタウエイト解析法を用いることで従来の解析法では明らかにできない多くの統計的性質が抽出できる。(2) 一般にスケールフリー性を有する重み付きネットワークのメタ強度分布は無数個の指数によって特徴づけられるが、重みの分布とトポロジーが独立な場合には三つの独立な指数のみで特徴付けられる。(3) 複雑ネットワークに対するマルチフラクタル解析法を確立した。(4) ネットワークのスケールフリー性の有無にかかわらず媒介中心性の空間分布はマルチフラクタルになる。(5) スケールフリー・フラクタル・ネットワークのノード密度分布はマルチフラクタルになる可能性がある。

本論文は以下のように構成されている。第1章は緒論であり、本論文の主題である複雑ネット

ワークにおける重みの分布と統計的性質に関する研究の背景と問題点を概説している。第2章では、これまでの研究によって明らかにされた複雑ネットワークの基本的性質について詳しく説明し、本論文の目的について述べている。第3章では、重みの大きさに応じた統計量の解析を可能にするメタウェイト解析法の提案とその有用性の例証を行っている。この解析方法では、各リンクの重みを q 乗したメタウェイトという量を導入し、この実数パラメータ q を変化させることによって特定の重みのリンクから構成されるネットワークの部分構造を詳細に分析することを行っている。また、重み付きネットワークのスケールフリー性を特徴付けるメタ強度分布、重みの大きさに応じたクラスター係数、次数相関を記述するメタ隣接頂点次数などを導入することによって、メタウェイト解析の有用性を示している。第4章では、重みの空間分布を特徴付けるためのマルチフラクタル解析法の確立とこれを用いたネットワーク解析を行っている。従来のマルチフラクタル解析を複雑ネットワークに単純に適用した際に生じる問題点を、サブグラフ被覆に伴う規格化の拡張により回避している。また、この拡張されたマルチフラクタル解析法をネットワーク上の2種類の物理量分布に対して適用することで、これらの物理量の分布がマルチフラクタル性を有するための条件を考察している。第5章では、Local World Evolving Network モデルの次数分布を解析的に導出し、スケールフリー転移の有無などに関する詳細な研究を行っている。また現実ネットワークにおけるローカルワールド性とコミュニティ構造に関する実証的研究も行っている。第6章は本論文の結論と今後の課題が述べられている。

これを要するに著者は、重み付き複雑ネットワークのより詳細な統計的性質を解析するための新しい手法を提案しその有用性を実証することで、複雑ネットワークに対する深い理解と新たな知見を得たものであり、応用物理学に対して貢献するところ大なるものがある。

よって、著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。