



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	過負荷故障に対する複雑ネットワークの安定性に関する理論的研究 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	水高, 将吾
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第11877号
Issue Date	2015-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/58668
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/
Type	doctoral thesis
File Information	Shogo_Mizutaka_review.pdf, 審査の要旨



学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称 博士 (工学) 氏名 水高 将吾

審査担当者 主 査 教 授 矢久保 考介
 副 査 教 授 折原 宏
 副 査 教 授 根本 幸児 (大学院理学研究院)

学位論文題名

過負荷故障に対する複雑ネットワークの安定性に関する理論的研究
(Study on stability of complex networks against overload failures)

従来の自然科学や工学は、ユークリッド距離が定義された系をその主な研究対象としてきた。しかしながら近年、要素間のトポロジカルな繋がり方が意味をもつネットワークと呼ばれる系に高い関心が集まっている。構成要素 (ノード) と要素間の関係 (エッジ) が定義されれば、系の種類を問わずネットワークと考えることができるため、多岐に渡る複雑系をネットワークとみなすことが可能である。ネットワークという概念の一般性ゆえ、複雑ネットワークの性質の解明は、自然界や社会における複雑さの中に潜む統一的な法則性を理解する手掛かりを与える。そのため、各ノードに繋がるエッジ数 (次数) 分布や次数間の相関などの複雑ネットワークの構造や、拡散や同期などのネットワーク上のダイナミクスに関する研究が 2000 年以降盛んに行われている。特に、部分的に損傷したネットワークがその機能をどの程度維持し得るかを明らかにする研究には多大なエネルギーが注がれている。これは、様々なネットワークの機能維持を前提とした現代社会において、大規模なネットワーク機能障害は社会を混乱に陥れるため、損傷に対するネットワークの安定性や頑強性を解明することが急務の課題となっているためである。ネットワーク上の損傷はネットワーク上を伝播することがある。過負荷故障カスケードと呼ばれるこの現象は様々な複雑系でみられるため、このプロセスに対するネットワークの頑強性を解明することは極めて重要である。従来の過負荷故障カスケードの問題に関する理論的研究では、各ノードにかかる平均負荷が耐性を超えることによって過負荷故障が起こると仮定している。このような仮定の下で、次数分布がベキ関数となるスケールフリー・ネットワークは過負荷故障カスケードに対して脆弱であるという結論が得られている。しかしながら、実際のネットワーク上の負荷は時間的に揺らいでおり、過負荷故障は揺らいでいる負荷の瞬間的な最大値がノードの耐性を超えることによって起こる。平均負荷による過負荷故障確率と負荷揺らぎに起因する過負荷故障確率とでは、その統計的性質が大きく異なる可能性があるため、これまでの過負荷故障カスケードの理論は大幅に変更されなくてはならない。本論文で申請者は、負荷の揺らぎを考慮した過負荷故障カスケード・モデルを提案し、過負荷故障カスケードに対するスケールフリー・ネットワークの頑強性を定量的に評価している。本研究の結果、従来の理論とは反対に、スケールフリー・ネットワークは過負荷故障カスケードに対して頑強であることが明らかとなった。また、この解析で用いたモデルと手法を利用することで、従来はモデル・パラメータとして扱われてきたネットワークのノード数が実際にはどのような要因で決定されているのかを議論している。

本論文は全 8 章で構成され、各章の概要は以下の通りである。第 1 章は序論であり、本論文の主

題である過負荷故障に対する複雑ネットワークの安定性に関する研究の背景及び問題点を概説している。第2章では、これまでの研究で明らかにされている複雑ネットワークの構造的性質について詳しく説明している。第3章では、複雑ネットワークの頑強性とネットワーク上のパーコレーション問題について述べられており、ネットワークの頑強性の評価方法及び従来研究で得られている知見を詳しく説明している。第4章では、ネットワーク上の過負荷故障カスケードに関する先行研究をまとめられ、問題点を浮き彫りにした上で本論文の目的を改めて述べている。第5章では、過負荷故障によってノードを一斉削除した場合のパーコレーション問題が扱われ、過負荷故障に対するネットワークの頑強性が論じられており、過負荷故障パーコレーションに対してスケールフリー・ネットワークが脆弱であることを明らかにしている。第6章では、過負荷故障カスケードに対するスケールフリー・ネットワークの頑強性について論じられている。平均負荷に基づいて過負荷故障カスケードを議論していた従来研究に対し、本研究では負荷揺らぎ効果を考慮した過負荷故障カスケードに対するネットワークの頑強性を理論的に調べており、ネットワークのスケールフリー性が強くなると過負荷故障カスケードに対する頑強性が増大することを明らかにしている。本研究で得られた結果は、従来の平均負荷に基づく過負荷故障カスケード理論とは正反対の結果である。第7章では、ネットワーク・サイズが何によって決まっているのかというネットワーク研究の基本的命題を世界で初めて議論している。第8章は結論である。過負荷故障パーコレーション問題、過負荷故障カスケード問題、及びネットワークの大きさと構造安定性の関係に関して得られた知見をまとめるとともに、今後の課題について述べている。

これを要するに著者は、我々の身の周りに遍在する複雑ネットワークの過負荷故障に対する頑強性とネットワーク構造との関係を物理学的視点から理論説明することで、安定かつ堅牢な社会システムのデザインや自然界における複雑系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。