



# 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             | <a href="https://hdl.handle.net/2115/58668">https://hdl.handle.net/2115/58668</a>                                         |
| Rights(URL)         | <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.1/jp/</a> |
| Type                | doctoral thesis                                                                                                           |
| File Information    | Shogo_Mizutaka_abstract.pdf, 論文内容の要旨                                                                                      |



## 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称    博士（工学）    氏名   水高 将吾

### 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。例えば電力網の場合、局所的な停電の復旧のために通常とは異なる経路から電力供給を行い、この過剰電力供給が電力網の負荷を増大させ、更なる過負荷故障（停電）が起こることがある。このような過負荷故障の連鎖により大規模停電が起こる。また、企業間取引ネットワークにおいて或る企業が倒産すると、倒産企業の負債、すなわち企業間取引ネットワークにおける負荷がネットワーク内で再分配されることによって、更なる連鎖倒産が引き起こされる。ネットワーク上のこのような過負荷故障カスケードは様々な複雑系でみられる現象であるため、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。現実ネットワークの大半がスケールフリー・ネットワークであることを考慮すると、この結果は非常に大きな意味を持つ。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。研究の結果、従来の理論とは逆に、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する。

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する。

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、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する。

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、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る。電力網における総電力量や、インターネットの総トラフィック量など、現実のネットワークにかかる負荷は年々増加傾向にある。このような総負荷量の増加の効果を取り入れた際の過負荷故障のパーコレーション問題を調べた。その結果、過負荷故障パーコレーションに対してスケールフリー・ネットワークは脆弱であることが明らかになった。また、総負荷量の意味でのネットワークの頑強性と、過負荷によるノード削除率の意味でのネットワークの頑強性とを区別して考える必要があることを明らかにした。

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調べている。そのため、まず過負荷故障カスケード・プロセスが過負荷故障パーコレーション過程の連鎖であることに着目し、カスケード・プロセスをモデル化した。このモデルを解析的に扱うことで、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た。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(ノード数)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た。従来のネットワーク研究におけるネットワーク・サイズは、単なるモデル・パラメータの一つであり、自由な値を取ることができる。しかしながら、現実のネットワークのノード数は  $10^{12}$  から  $10^2$  まで様々ではあるものの、同一種類のネットワークはおよそ同じサイズをもち、決して自由な値を取れるわけではない。本研究では、ネットワーク・サイズと構造の安定性の関係を、第 6 章で扱った過負荷故障カスケード・モデルを基礎に議論した。その結果、ネットワーク・サイズの増大がネットワークを不安定化させる場合とネットワークが無限に成長できる場合があることを明らかにした。

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。