

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	キャビティ法によるマルチレイヤーネットワークの耐性解析
Title(English)	Cavity-based robustness analysis on multilayer networks
著者(和文)	渡辺駿介
Author(English)	Shunsuke Watanabe
出典(和文)	学位:博士(理学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10367号, 授与年月日:2016年12月31日, 学位の種別:課程博士, 審査員:樺島 祥介,渡邊 澄夫,高安 美佐子,青西 亨,石井 秀明
Citation(English)	Degree:., Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10367号, Conferred date:2016/12/31, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	論文要旨
Type(English)	Summary

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻： Department of	知能システム科学	専攻	申請学位 (専攻分野)： Academic Degree Requested	博士 (理学) Doctor of
学生氏名： Student's Name	渡辺駿介		指導教員 (主)： Academic Advisor(main)	樺島祥介
			指導教員 (副)： Academic Advisor(sub)	

要旨 (和文 2000 字程度)

Thesis Summary (approx.2000 Japanese Characters)

現代の世界は、複雑かつ巨大なシステムが支えている。電力や水を供給するインフラストラクチャや交通網、油田発掘のような人工的なシステムから、タンパク質の反応や生態系における捕食—被補食などの自然由来のシステムまで、システムの種類は多様であるが、いずれも多数の構成要素とそれらの相互作用が存在する。これらに共通する特徴は、各構成要素は時間発展により生成や消滅を繰り返しているにもかかわらず、システム全体としてはその機能を保持している点である。グラフやネットワークは、構成要素の個性に目を瞑り、その相互作用に着目することで、複雑なシステムを最もシンプルに記述するための1つの手段である。この手段は粗視的である点是否めないが、システムの構造的性質や振る舞いの本質を浮き彫りにすることが可能となるため、極めて有用な概念と考えられている。一方で、システム間の相互作用を考量する事によって、単一ネットワークでは捉える事ができない新たな現象を研究しようとする試みが、近年流行している。このモデルはマルチレイヤーネットワークとよばれる。特に、マルチレイヤーネットワークの故障に対する耐性の数理的解析は、多くの研究者から注目を浴び、マルチレイヤーネットワークが複雑ネットワーク科学のパラダイムであるという認識を浸透させる前駆となった。

一方で、単一ネットワークに関する数理的耐性解析において現在主流の手法は母関数法と言われる手法である。この手法は平均場近似によって成立しているが、ミクロな観点における議論を通常省略してしまうため、導出過程が暗黙的である。マルチレイヤーネットワークによるモデル化の場合は、レイヤー内およびレイヤー間における次数相関や、ノードの活性状態の伝播に関するレイヤー間での相関、時間発展する現象等、遥かに複雑な状況が想定される。そのため、モデル上で再現できる現象と、解析のための方法論との間における対応関係が明確であり、かつ上述した複雑な状況にも柔軟に対応できる手法が望まれる。

本論文では、マルチレイヤーネットワークの代表的なクラスである、相互依存ネットワークと対立ネットワークという2つのモデルの耐性について議論する。前者は互いのシステムがノードレベルで相互に依存的であり、後者はノードレベルで相互に対立的である。両方のモデルにおいて、系の耐性は残存する結合したノードの最大部分集合 (GC, 相互依存ネットワークでは MCGC とも言う) の大きさによって、定量的

に議論する事が出来る。手段としては統計力学におけるスピングラス理論で発展してきた Cavity 法の考え方に着目し、対象モデルに対する解析手法を提案する。この方法論の精度は、モンテカルロ法を基礎とした数値実験によって確かめる。また、レイヤー内とレイヤー間の次数相関が耐性に与える影響について議論する。

まず、相互依存ネットワークに対して二部グラフ変換を施した後、ミクロな観点におけるノード同士のメッセージ伝搬を記述する。この定式化を基礎として、マクロな観点におけるメッセージ伝搬を記述する。一連の解析手順によって導出された解の精度を確認するため、数値実験を行ったところ、連鎖的故障後の MCGC の大きさに関して、解析解と実験で計測された値は非常に高い精度で一致しており、解析手法の正当性を確認できた。また、レイヤー間の正の次数相関を持つ場合、ランダム故障には頑強になるが、選択的故障の場合脆弱になる。一方で、レイヤー間の負の次数相関を持つ場合は、逆にランダム故障には脆弱になり、選択的故障の場合頑強になることが分かった。

対立ネットワークのモデルでは、初期故障を受けたノードがそのレプリカノードによって復活するかどうかに関して2つの状況を想定する。前者をケースフリー、後者をケースクエンチと呼ぶ。両方のケースにおいて、故障プロセスはレイヤー間のリンクが対立的であるため周期的に繰り返される。ケースクエンチの場合は、初期故障を受けるレイヤーにおいて残存する GC は、もう一方のレイヤーの影響に依存しない。しかし、ケースフリーの場合は、初期故障を受けるレイヤーにおいて残存する GC は、初期故障直後の GC に比べて増大する。また、初期故障を受けるレイヤーが最も耐性が強い状況は、レイヤー間の次数相関が負であり、自身のレイヤー内次数相関が正、対になるレイヤーの次数相関が負のときであることが判明した。また、現実世界のシステムとの比較において、生存を脅かされる希少種と侵略種によって構成される生態システムの例について、言及した。

マルチレイヤーネットワークによってモデル化できる対象は多岐に渡るため、本論文において扱ったモデルは限定的であるが、提唱した解析手法は多くの観点から現象を捉えて記述をしており、非常に柔軟性がある。そのため、これから開発されるであろう、より複雑なモデルに対しても充分応用出来るフレームワークであると著者は信じる。

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note : Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1 copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ (T2R2) にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。

Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).

(博士課程)
Doctoral Program

論文要旨

THESIS SUMMARY

専攻： 知能システム科学 専攻
Department of
学生氏名： 渡辺駿介
Student's Name

申請学位 (専攻分野)： 博士 (理学)
Academic Degree Requested Doctor of
指導教員 (主)： 権島祥介
Academic Advisor(main)
指導教員 (副)：
Academic Advisor(sub)

要旨 (英文 300 語程度)
Thesis Summary (approx.300 English Words)

The concept of multilayer networks offers a useful mathematical framework for describing complex systems in modern life. Their research field has been developed rapidly for these years, in which various properties of multilayer networks have been clarified. One of the major topics in the research is the percolation analysis. This is not only because the multilayer networks exhibit phenomena that differ from those known for single networks, but also because the percolation analysis has great relevance to making provision against the menace of natural or human-related disasters such as earthquakes, tsunamis, typhoons, wars, terrorisms, etc.

In this thesis, we study two types of multilayer networks composed of two sub-layers, each of which is a random degree-degree correlated network and connected with the counterpart via interdependent- or antagonistic inter-links. The former model, which is named interdependent networks, is used to explain the mechanism of massive black out caused by the failures in infrastructure networks composed of the Internet and power network. The latter model, named antagonistic networks, may be useful as a mathematical model of ecological networks: the habitat of endangered species and invasive ones are projected on each layer respectively.

The main objective of this thesis is to evaluate the size of the giant component (GC: the largest subset of connected nodes) in the interdependent- and the antagonistic networks when they suffer from random node failures or targeted node attack. For this, we develop an analytical method based on the cavity method in statistical mechanics, which enables us to explicitly handle not only both of the inter-layer and intra-layer degree-degree correlations, but also the hysteresis of the percolation process. Comparison between theoretical predictions obtained by the developed methodology and numerical experiments indicates that our method has an excellent ability for accurately evaluating the GC size in each layer in both cases. We also find that the effects of degree-degree correlations on the robustness of each layer vary a lot depending on system parameters and the type of inter-layer links: positive inter-degree-degree correlations and positive intra-degree-degree correlations in each layer make the interdependent networks more robust, while negative intra-degree-degree correlations are advantageous for the layer suffering from the initial targeted attacks in antagonistic networks.

備考：論文要旨は、和文 2000 字と英文 300 語を 1 部ずつ提出するか、もしくは英文 800 語を 1 部提出してください。

Note：Thesis Summary should be submitted in either a copy of 2000 Japanese Characters and 300 Words (English) or 1copy of 800 Words (English).

注意：論文要旨は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。
Attention: Thesis Summary will be published on Tokyo Tech Research Repository Website (T2R2).