

Title	複雑ネットワークにおける連結ロバスト性の構造的要因に関する研究
Author(s)	牟, 映洲
Citation	
Issue Date	2026-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	https://hdl.handle.net/10119/20611
Rights	
Description	Supervisor: 林 幸雄, 先端科学技術研究科, 博士

氏名	MOU, Yingzhou		
学位の種類	博士（工学）		
学位記番号	共博工第6号		
学位授与年月日	令和8年3月25日		
論文題目	複雑ネットワークにおける連結ロバスト性の構造的要因に関する研究		
論文審査委員	林 幸雄	北陸先端科学技術大学院大学	教授
	池田 心	同	教授
	由井 隆也	同	教授
	坂本 二郎	金沢大学	教授
	長谷川 雄央	茨城大学	教授

論文の内容の要旨

Modern infrastructures such as communication networks, transportation systems, and energy supply networks, as well as social and biological systems, can be modeled as complex networks with highly uneven connectivities. A fundamental issue in these systems is the robustness of connectivity, namely, how well global connectivity is preserved when nodes are removed by failures, natural disasters, or malicious attacks. While previous studies have mainly focused on statistical properties such as degree distribution and average degree, the structural and geometric factors underlying robustness of connectivity have not been fully investigated.

This dissertation aims to clarify the structural factors that govern the robustness of connectivity in complex networks. Two kinds of networks which widely exist in real-world systems are investigated: scale-free networks, which have highly uneven connectivities, such as WWW, and spatial networks, which are embedded in the surface of Earth such as road and communication systems constrained by geography. The robustness of connectivity is evaluated using two measures: a robustness index defined as the area under the curve of the largest connected component during node removal, and a critical fraction of removed nodes at which network fragmentation becomes most pronounced. Several attack strategies, including recalculated degree attacks, recalculated betweenness attacks, and belief propagation attacks that approximate the worst loop destruction, are applied.

For scale-free networks, the power-law exponent is continuously varied within a realistic range from $\gamma \sim 2.1$ (WWW) to $\gamma \sim 4.0$ (western power-grid in U.S.), showing that an increase in the exponent narrows the degree distributions, enlarges holes in networks represented by longer average length of the shortest loops, and leads to a consistent improvement with upper bound in robustness of connectivity. These results demonstrate that the robustness and the average length of the shortest loops is strongly affected by the variance of the degree distributions.

For spatial networks, networks are constructed using population data from major Japanese urban regions based on relative neighborhood graph and Gabriel graphs. Three node placements are considered: population-based (Pop.), in which nodes are preferentially located in densely populated areas to meet concentrated access demand; inverse population-based (Inv.), in which nodes are placed in sparsely populated areas for lower cost of construction; and uniform (Uni), in which nodes are distributed randomly to represent an intermediate spatial configuration.

Overall, the robustness of connectivity is primarily determined by the variance of the degree distribution and the length of the shortest loops. In scale-free networks, as the power-law exponent increases and the degree distribution becomes narrower, larger holes emerge within the network, leading to an improvement of the robustness. In spatial networks, local modulars formed by spatial concentration of nodes and short links show a strong influence on the robustness of connectivity. When nodes are unevenly placed according to population, strong local modules are formed, and the loss of bridging links causes the network to fragment rapidly. As a result, the robustness decreases markedly with increasing modularity. The findings of this study provide an important theoretical foundation for the robustness-oriented design of real-world infrastructure networks and complex systems.

Keywords: Robustness of connectivity, Complex networks, Scale-free networks, Spatial networks, Shortest loops, Modularity, Infrastructure networks.

論文審査の結果の要旨

本論文審査委員会は、提出学位論文に対する論文指導会を令和7年11月28日に、公聴会を令和8年2月3日に行い、これら口頭発表の結果を踏まえ、以下のように判定した。

現代社会を支える重要インフラとして、電力網・通信網・物流網など多くのネットワークは**効率偏重**の生成原理に基づき、極少数のハブを持つスケールフリー(SF)と呼ばれる共通のつながり構造ゆえ、悪意のある攻撃に対して極端に脆弱で分断されやすい**深刻な問題がある**。そこで、ループ強化や次数分布の均等化により、攻撃に対する結合耐性が大幅に改善できることを同研究室にて発見しているが、中くらいの大きさの穴（リンクが属する最小ループで、ノード総数 N に対して $\log N$ 程度）が良いことも近年分かってきた。一方、現実にも多々存在するモジュール構造が加わると、極端に不平等からほぼ完全に平等へ次数分布を連続変化させた如何なるネットワークも脆弱化が免れない普遍的特性も明らかになった。但し、それらでは、地表面に埋め込まれた局所モジュールの影響は考慮されず、限られたべき指数3のSFネットワークのみを対象としていることから、以下の検討を加えた。

- 1) SF 構造における攻撃耐性の数値解析として、同一の平均次数の条件下でべき指数を変化させ、攻撃耐性と穴の関係を網羅的に調べると、次数分布の分散が小さくなるほど耐性が強化されて穴が大きくなる、先の連続変化の場合と一貫して分散がより大きな場合にも拡張されることが判明した。
- 2) 地表面上に近接結合で構築されたネットワークで、局所的に疎密な人口分布に基づくノード配置によるモジュール構造の攻撃耐性への影響を分析すると、設備配置を局所的に集中させてモジュール性が強いほど脆弱になることが、トポロジーだけでなく空間ネットワークでも立証できた。

これらの研究成果を、2報の国際学術論文（うち1報は受理済で掲載予定）と2報の国際会議概要（口頭発表）にて掲載している。分布に着目する統計物理学と最適化アルゴリズムなどコンピュータ科学の分析法を駆使しながら、**特定の事例に依存しない普遍的な特性**として、異なるべき指数を持つSFネットワークで結合耐性の向上と穴（最短ループ長の分布の平均や分散）の密接な関連性を明らかにし、道路網や通信網などの平面グラフにおいてもモジュール（局所コミュニティ）化による耐性低下を解明しており、応用面では**耐性強化には効率偏重から脱却すべき**として、巨大ハブ化や都市などへの設備配置の集中を抑制すべきことや、衛星通信など遠距離の立体交差リンクの有効活用が示唆されることから、有用かつ学術的に十分価値があると言え、博士（工学）として認められる。