

重要インフラ防護のための複雑ネットワークの耐障害性と耐攻撃性に関する考察

岐阜大学大学院 学生員 ○佐藤 慶昇

岐阜大学大学院 朴 亨斌

岐阜大学工学部 正会員 能島 暢呂

岐阜大学流域圏科学研究センター 正会員 杉戸 真太

1. はじめに

近年、様々な都市機能の相互依存性が深まってきている。このため、大規模自然災害やテロ攻撃を受けた場合の連鎖的な被害波及を阻止し、重要インフラを防護することが大きな課題となっている。このところ注目されつつある「複雑ネットワーク解析」の手法を用いると、社会の諸現象をネットワークの観点から捉え直すことにより、ネットワーク上を伝播する種々の現象のモデル化や挙動解明などを行うことができる。本研究では、様々な形態のネットワークを対象としてシミュレーションを行うことで「平常時」と「異常時」に対する特性を比較、検討し、重要インフラ防護に関する基礎的考察を行う。

2. 複雑ネットワークの一例（BA モデル）とその特性

2.1 BA モデル

スケールフリー・ネットワークは複雑ネットワークの典型的なモデルであり、その一種であるBAモデルは、ネットワークの成長過程において、次数が高いノードほど新たなノードに連結されやすい（優先的選択）という特徴を反映している。このモデルを用いて「平常時」と「異常時」のネットワーク特性について分析する。

2.2 BA モデルの平常時の特性

まず平常時のネットワーク特性を調べるため、BAモデルのネットワーク生成シミュレーションを行った。条件としては、初期状態をノード数 $m_0=5$ の完全ネットワークとして、成長過程で新たにノードが追加されるときリンク数を $m=3$ と設定し、ノード数 $n=100, 200, 500, 1000, 2000$ のネットワークを生成した。図1(a)に示すようにノード数が10倍となっても平均頂点間距離 L の増加は約1にとどまっており、ネットワークの大規模化に伴う距離の増加は緩やかであることが確認できる。図1(b)は、次数を大きいものから順にノードを並べ替え、次数と順位（ランク）の関係を両対数軸で示したものである。ほぼ直線関係となり、次数分布はべき則に従い、ハブ（突出して多数のリンクを持つノード）が少数存在すると確認できる。

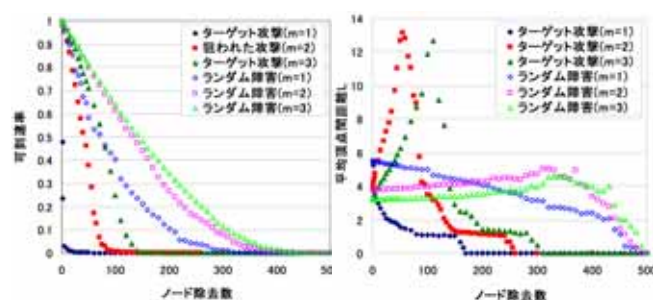
2.3 BA モデルの異常時の特性

障害や攻撃といった異常時のネットワーク特性を調べるため、ノードを除去するシミュレーションを行う。ここでは自然災害などの「ランダム障害」（ランダムにノード除

去）とテロなどの「ターゲット攻撃」（次数が大きいノードから順に除去）の2つのパターンを考える。 $m_0=5$, $n=500$, $m=1, 2, 3$ の3つのネットワークにおける可到達率と平均頂点間距離 L の変化を図2に示す。

(a) 可到達率では、ランダム障害よりもターゲット攻撃の方が、ノード除去による減少が非常に急で、特に $m=1$ の場合は、最初の数個のノード除去でネットワーク機能はほぼ完全に崩壊していることが確認できる。

一方、(b) 平均頂点間距離 L では、 $m=1$ の場合は、ノード間の到達ルートが1つしかないため L は単調減少となる。これに対し $m=2, 3$ の場合は、短距離の経路がなくなることで L はいったん増加傾向を示すものの、ノード除去がある程度以上に進むと、ネットワークが分断され、 L は減少傾向に転じる。この傾向はターゲット攻撃において特に顕著である。



(a) 可到達率

(b) 平均頂点間距離 L

図2 BAモデルの攻撃・障害に対するふるまい

3. 航空路線網を用いた分析例

3.1 対象としたデータ

日本国内の航空路線の実データを用いてネットワーク特性を調べる。計11の航空会社により86の空港を結んで運行されている定期便（2005年11月現在）を対象とし、空港をノード、路線をリンクとしてモデル化した（図3）。

3.2 平常時のネットワーク特性

平常時の航空路線網の状態はノード数=86、リンク数=491、平均頂点間距離 $L=2.49$ となった。次数分布は図4に示すようにほぼ直線関係となり、次数分布はべき則に従い、ハブ的な特徴を有する空港の存在が確認できることから、航空路線網はスケールフリー性を持つといえる。

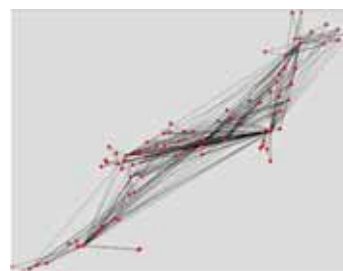


図3 国内航空路線網

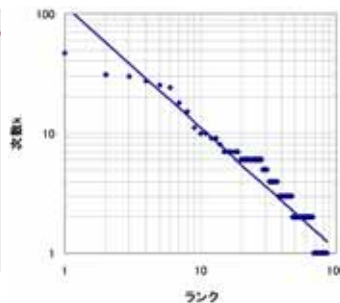
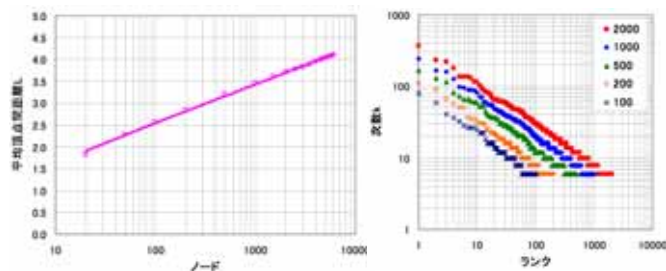


図4 次数分布



(a) ノード数と L の関係

(b) 次数分布

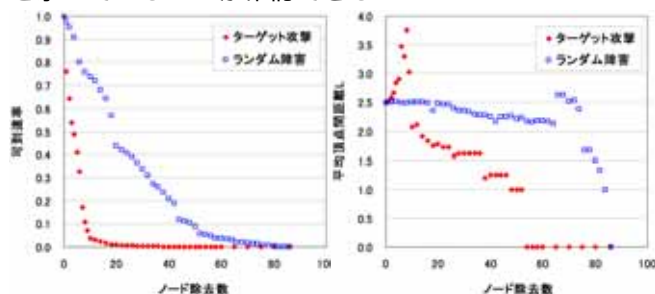
図1 BAモデルの平常時のネットワーク特性

複雑ネットワーク, BAモデル, スケールフリー, 相互依存, 被害連鎖

〒501-1193 岐阜市柳戸1-1 TEL:(058)293-2416 FAX:(058)293-2416

3.3 攻撃に対するネットワーク特性

異常時における航空路線網のネットワーク特性を調べるため、BAモデルと同様の条件でノード除去のシミュレーションを行った。図5(a), (b)にそれぞれ複雑ネットワークの指標である可到達率、平均頂点間距離 L の関係を示す。全体的な傾向として、 $m=2, 3$ のBAモデルと同様の傾向が確認できる。ランダム障害に対しては頑健性を維持しているものの、ターゲット攻撃に対しては約6割のノード除去によりネットワーク機能を完全に失っており、脆弱性を示していることが確認できる。



(a) 可到達率 (b) 平均頂点間距離 L

図5 航空路線網の攻撃に対するふるまい

4. 新潟県道路網を用いた分析例

4.1 新潟県中越地震における道路被害とモデル化

新潟県中越地震により被災した道路を対象とした例を示す。全域では、国道85箇所（直轄22箇所を含む）、主要道78箇所、一般道87箇所の計250箇所道路被害があった。異常なし・完全復旧、片側交互通行、一部車線規制、緊急車両通行可、全面通行止めの5段階に分けた復旧過程を図6に示す。ここでは、比較的被害が大きかった小千谷市、山古志村、川口町の3つの市町村を対象として道路網のモデル化を行った（図7）。なお、道路が交差する場所をノード、道路の路線をリンクとし、対象とした3市町村の周辺の市町村をそれぞれ1つのノードと捉え、これらに接続する路線をリンクとした。

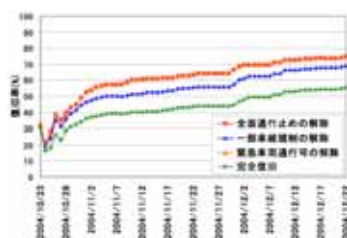
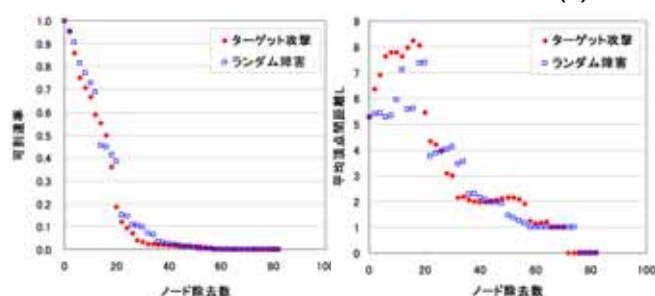


図6 復旧過程 図7 道路網のモデル化



4.2 攻撃に対するネットワーク特性

ランダム障害とターゲット攻撃によるノード除去のシミュレーション結果をそれぞれ図8に示す。道路網の場合、ハブのような突出して多数のリンクを持つノードが存在しない。このため、BAモデルや航空路線網で示した結果とは異なり、「ランダム障害」が「ターゲット攻撃」の違いによる差はほとんどみられない結果となった。(a) 可到達率



(a) 可到達率 (b) 平均頂点間距離 L

図8 道路網の攻撃に対するふるまい

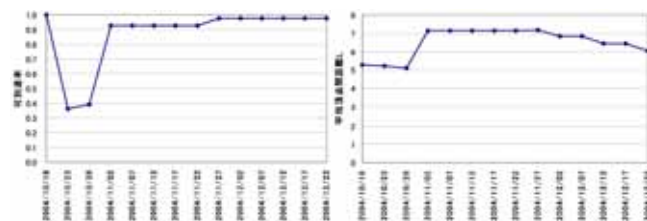
率では、ランダム障害、ターゲット攻撃ともにノード除去による減少はほぼ同じ傾向を示した。(b) 平均頂点間距離 L では、ノード除去数が20個程度までは、ランダム障害よりもターゲット攻撃の方が L の増加が大きい。しかし、平均頂点間距離 L がピークを迎え減少傾向に転じるあたりからはほぼ同じ傾向を示した。

4.3 複雑ネットワーク指標を用いた復旧過程の表現

新潟県中越地震における道路被害の復旧過程を、複雑ネットワーク解析の指標で表現した結果を図9に示す。

(a) 可到達率に示したように、地震発生後に急激に減少し、40%に満たないまで落ち込んでいる。これはノード除去シミュレーションにおいて、約20個のノード除去に相当している。その後、90%を超えてからの推移は、ほとんど変化がみられない。

(b) 平均頂点間距離 L を見ると、地震発生前後の L は約5.3と約5.2で、その変化は小さい。しかし、図8(b)のノード除去シミュレーションにおいて、 L はノード除去数に対して増加（迂回路の利用に伴う距離増加）から減少（ネットワーク分断によるサイズ縮小）に転じている。このことから、地震発生直後の約5.2という数字は、ピークより右側の値に相当することが考えられる。復旧過程に伴う平均頂点間距離 L の増減は、ノード除去数の減少とあわせて考えると理解しやすい。



(a) 可到達率 (b) 平均頂点間距離 L

図9 複雑ネットワーク指標を用いた復旧過程

5. おわりに

本研究では、BAモデルと航空路線網の例を通じて、スケールフリー・ネットワークの耐障害性と耐攻撃性に関する基礎的考察を行った。

1. 自然災害などの「ランダム障害」に対しては、健全なハブが機能してネットワークの分断を防ぎ、頑健性を高めている。
2. ハブに狙いを定めた「ターゲット攻撃」に対しては、カスケード故障（局所的な故障がシステム全体の機能損失に波及する現象）の原因となり、ネットワークの脆弱性を高めている。
3. 日本国内の航空路線網を用いてネットワーク特性を調べた。ハブ的な特徴を有する空港の存在が確認できることから、航空路線網はスケールフリー性を持つといえる。
4. 被災した道路網の復旧過程を複雑ネットワーク指標で表現し、ノード除去シミュレーションと比較することで、復旧過程の特性を分析することができた。

今後、様々な社会基盤施設により構成される社会ネットワークを対象として、異常発生に伴うネットワーク・パフォーマンス評価を行い、重要インフラ防護に関する知見を得るための検討を進める方針である。

参考文献

- 1) マーク・ブキャナン（阪本芳久 訳）：複雑な世界、単純な法則、草思社、2005.3.
- 2) 増田直紀・今野紀雄：複雑ネットワークの科学、産業図書株式会社、2005.2.
- 3) 新潟県中越地震復旧・復興 GIS プロジェクトホームページ：
<http://chuetsu-gis.nagaoka-id.ac.jp/>
- 4) 新潟県ホームページ：新潟県中越地震に関する情報、
http://saigai.pref.niigata.jp/content/jishin/jishin_1.html