複雑ネットワークの耐攻撃性に関する基礎的考察

岐阜大学工学部　○朴　亨斌
岐阜大学大学院　学生会員　佐藤慶昇
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

今日の社会基盤施設や社会機能は，各種システムが相互に連結され，依存し合った複雑な体系のもとに成り立っている．このため，何らかの原因によって一部に生じた障害が連鎖的に拡大していく可能性がある．そこで，社会の諸現象をネットワーク的な観点から捉えなおし，異常発生に伴うネットワーク・パフォーマンスの評価や，ネットワーク上を伝播する種々の現象のモデル化およびその挙動解明などを行う必要がある．そこで本研究では，「複雑ネットワーク解析」の手法を用いて，「平常時」と攻撃を受けたときの「異常時」に対する特性を比較，検討することで，今日の社会に存在する複雑なネットワーク構造が及ぼす影響について考察する．

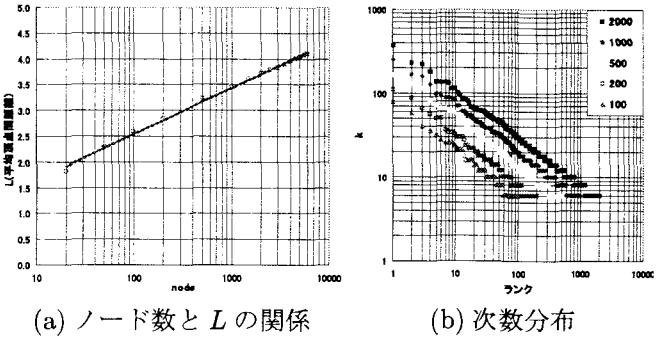
2. 複雑ネットワークの一例 (BA モデル) とその特性

2.1 BA モデル

これまで様々な社会現象に関するネットワークに対する研究が行われた結果，様々なモデルが提案されてきた．その中で，スケールフリーネットワーク (BA モデル) は，成長するネットワークを対象としており，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たものである．これから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を分析していく．

2.2 平常時のネットワーク特性

平常時のネットワーク特性を調べるため，BA モデルに従うネットワーク生成の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，成長過程で新たなノードが加わるときのリンク数をm=3と設定した．そしてノード数n=100, 200, 500, 1000, 2000 まで成長するネットワークを想定してシミュレーションを行った．**図 1-(a)** に示すようにノードの数が 10 倍に増えても平均頂点間距離 (L) は約 1 の増加にとどまり，ノードの増加に伴う距離の増加は緩やかであると確認できる．そして**図 1-(b)** は，次数を大きいものから順に並べ替え，縦軸にはその次数を横軸にはその次数が表れる順をプロットしたものである．両軸とも対数表示しており，このときランクと次数の関係がほぼ直線的な関係となった．このことから，①ベキ則，②ハブ (突出して多数のリンクを持つノード)，この 2 つの特徴を捉えることができた．

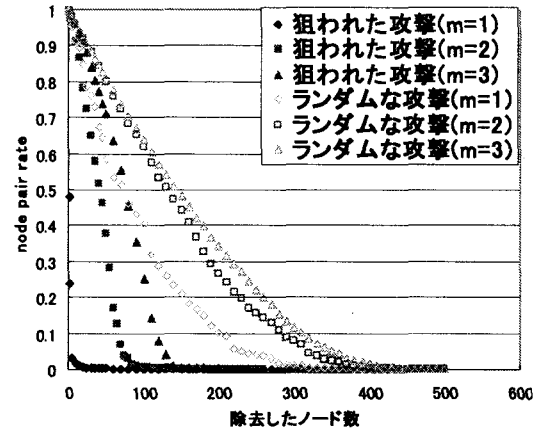


(a) ノード数と L の関係　(b) 次数分布

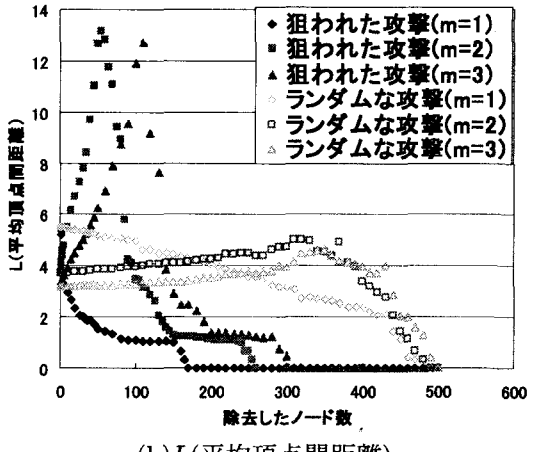
図 1　BA モデルの平常時のネットワーク特性

2.3 攻撃に対するネットワーク特性

攻撃 (被害) を受けたときのネットワークのふるまいを見るため，ノードを除去するシミュレーションを行った．攻撃としては，自然災害などの「ランダムな攻撃」(ランダムにノードを除去) とテロなどの「狙われた攻撃」(次数が大きいノードから除去) の 2 つのパターンを考える．そこで，m_0=5, n=500 として m=1, 2, 3 と変化させた 3 つネットワークに対し，2 パターンの攻撃によって変化する L(平均頂点間距離) とノードペア率について比較・考察



(a) ノードペア率



(b)L(平均頂点間距離)

図 2　BA モデルの攻撃に対するふるまい

を行う．**図 2** にシミュレーション結果を示す．まず (a) のノードペア率をみると，狙われた攻撃の場合，m=1 のときは約 3 割，m=2 と 3 のときはそれぞれ約 5 割と 6 割のノードの除去によりネットワークが完全にその機能を失うことがわかる．一方，ランダムな攻撃に対しては，ノード除去数に対する機能低下は比較的緩やかで頑健性を示している．m が少ないほど攻撃に対して脆弱であることは共通的に言える特徴である．

一方，(b) の L(平均頂点間距離) をみると，m=1 と m=2, 3 のグラフ傾向が異なることがわかる．追加ノードあたりリンクを 1 つしか持たない m=1 の場合は，ノード間の到達ルートが 1 つしかなく，攻撃により容易に分断されるため，L はノード除去に対して単調減少の傾向を示す．これに対し，m=2, 3 の場合は攻撃により直ちに分断されることはなく，短距離のパスなくなることで L はいったん増加傾向を示す．ところが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 減少傾向に転じることがわかる．この傾向は，狙われた攻撃において特に顕著である．

3. 航空路線網を用いた分析例

3.1 対象としたデータ

航空路線は，典型的なハブ・アンド・スポーク型のネットワークであり，スケールフリー性を持つと考えられる．ここでは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こととする．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）を対象としてネットワークデータを作成した．**図 3** は，空港の位置と航空路線のネットワークモデルを示したものである．

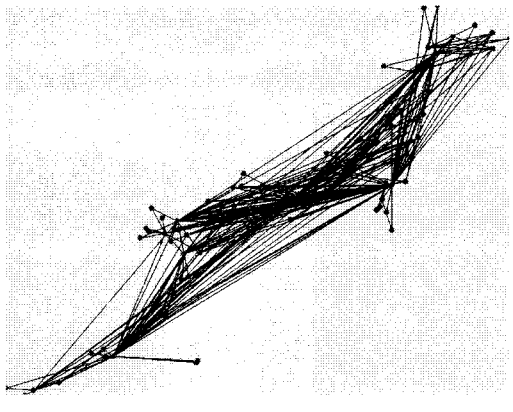


図 3　わが国の国内線の航空路線網

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 (空港)=86，リンク数 (路線)=491，L(平均頂点間距離)=2.49 となっている．**図 4** は航空路線網の次数分布である．次数分布がベキ則に従うことと，ハブが存在することが確認できることから，航空路線網は BA モデルに類似のスケールフリー性を持つと考えられる．

3.3 攻撃に対するネットワーク特性

この航空路線網についても攻撃に対するネットワーク特性を調べるため，先の BA モデルと類似の条件で，耐攻撃性のシミュレーションを行った．結果を**図 5** に示す全体的には，m=2 と 3 の BA モデルと同様の傾向を示していることがわかる．このネットワークの 1 ノードあたり平均片道リンク数は 2.85 であることや，約 6 割のノードの除去によりネットワークの機能を完全に失うことから，m=3 の BA モデルと近い特性を持っていると考えられる．

4. おわりに

本研究では，スケールフリーネットワーク (BA モデル) と航空路線網のデータを用いてシミュレーションを行い，ネットワークの耐攻撃性に関する基礎的知見を得ることができた．BA モデルはネットワークが巨大化しても小さい平均頂点間距離 L を保ち，次数分布はベキ則に従うことが確認された．さらに，狙われた攻撃とランダムな攻撃の二つのシミュレーション結果から，ハブを持つトポロジーがネットワークの頑健性を高める反面，ハブの故障がカスケード故障 (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ることがわかった．

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，自然災害やテロ攻撃に対する耐攻撃性について，さらに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.

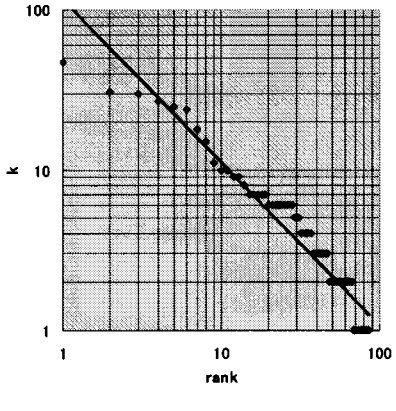
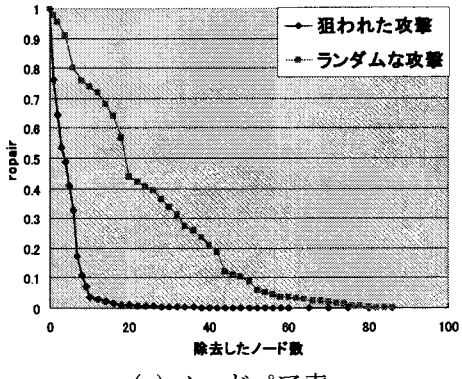
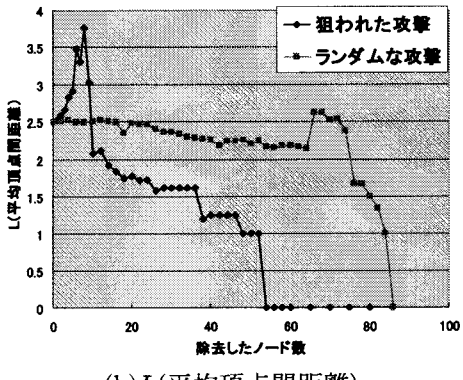


図 4　航空路線網の次数分布



(a) ノードペア率



(b)L(平均頂点間距離)

図 5　航空路線網の攻撃に対するふるまい