


# ネットワーク科学に基づいた ロバストな情報通信ネットワーク

林 幸雄

北陸先端科学技術大学院大学

 スケールフリー，インターネット，ハブ攻撃，結合耐性，ショートカット

## 1. はじめに

我々を取り巻く社会は複雑なネットワークで成り立っている。“電力網や情報通信網”“交通路線”“物流や金融取引”“環境に関する生態系”“企業や人のつながり”“国家間の安全保障”等々，これらは全く異なる要素でネットワークを形成しているが，そのつながり方に共通の性質があることが21世紀初頭ごろに発見された。そうしたネットワークの生成原理やトラフィック特性を解明するための科学的な興味だけでなく，大規模な電力崩壊，都市における交通や通信のシステム障害，サイバーテロなど，通常はあまり意識していないが経済や社会生活にもはや欠かせない重要なインフラが突然使えなくなる事態が現実問題となっている。

本稿では特に，21世紀初頭ごろに誕生したネットワーク科学の観点からネットワークの頑健（ロバスト）性について概説する。ネットワークの一部が故障あるいは攻撃を受けて機能しなくなった時，ノードの連結性が保持されて残った部分がつながってないと通信はできない。そこで，故障や攻撃によってどの程度までばらばらになり，どのくらい連結して生き残っているかを定量的に調べれば被害規模が把握できる。特に，全く通信ができなくなる機能不全状態に至る限界は，ネットワークの構造，すなわち，つながり方の性質に深くかかわることがこれまでの研究（物理学のパーコレーション理論など）で知られている。

本稿では，今日の情報通信網を支えるインターネットの故障や攻撃に対する強さと弱さを紹介し，その結合耐性の改善策や広域無線通信網を含めた今後の方向性などについても述べたい。ここで，結合耐性とはネットワークとしての通信機能を維持するためのノード間の連結性に関する耐性を差し，ノード自体の攻撃や故障に対する耐性ではないので注意されたい。したがって，何らかの攻撃や故障で機能不全となったと仮定したノードを除いた残りの部分の通信機能について議論する。また，こうした研究は，現状のインターネット（もしくは多くの現実のネットワーク）への対策のみならず，近未来の情報通信網の設計原理を見いだすことも目指している。

## 2. 現実のネットワークが持つスモールワールド（小さな世界）性とスケールフリー性

世間は狭いもので，世界中の見ず知らずのだれとだって私たちは6人程度の知人を介して辿り着ける。人をノードに，知人としてのつながり関係をノード間のリンクに対応付けたネットワークを考えると，数十億もいる人々が互いに数ステップ（ノード総数 $N$ に対して $\log N$ 程度）の仲介経由でつながる「小さな世界」となっている。しかも，友達の友達は，また自分自身の友達でもあることが多い（2ステップ先が自分に戻ってくる三角形を構成しやすい＝クラスタリングが高い）。

こうした特徴は，社会学では40年以上も前から経験的に知られていた。しかしながら，道路網のような碁盤目の格子では，端から端に辿り着くのに多くのステップ数（正方格子の一辺の長さである $\sqrt{N}$ 程度）を必要とする。一方，全くランダムにノードを選んで結合したネットワークでは，結構飛び飛びに経由して行くのでステップ数は小さくなるものの，でたらめにつながっているため友達の友達の関係は絶望的である。そこで，小さな世界と友達関係の両特徴を持つように，格子などのように規則的にノードが結合するネットワーク構造から，全体の数%程度だけリンクの片方の端をランダムに選んだノードに張り替えてショートカット結合するスモールワールド（SW）モデルが10年ほど前に考えられ，新しい研究分野ネットワーク科学の火付け役となった。ここでSWモデルは，一般にスモールワールド性と呼ばれる「小さな世界」の特徴のみならず，友達関係の特徴をも合わせ持つ点で，より現実のネットワークに近い。

ちょうどそのころ，電力網やインターネット，生物の遺伝子などの生化学反応系などの現実の多くのネットワークが上記の両特徴を持つことや，以下に述べるスケールフリー（SF）構造もそれらにおいて実測されるとともに，統計物理的な理論解析も急速に進んだ。SF構造を持つネットワーク（以下，スケールフリーネットワークと呼ぶ）は，ノードが持つ次数 $k$ （あるノードが他のノードと結合する数）のネットワーク全体における分布が，べき乗則： $P(k) \sim k^{-\gamma}$ ， $2 < \gamma < 3$ ，に従い，大多数の低次数ノード

と極少数の高次数ノード=ハブで構成される。ハブを直観的にイメージするには、自転車の車輪の中心や、航空路線における羽田空港などを想像するとよいかもしれない。ハブを経由するとノード間が互いに小さなステップ数で行き来できるものの後述するように、悪意のあるハブ攻撃が“インターネットのアキレス腱”として通信機能に極めて大きな被害を与えてしまうのである。

### 3. 攻撃には極めて弱いインターネット

#### 3.1 拠点レベルの脆弱性

その軍事目的の生い立ちから、インターネットは複数の通信拠点施設への爆弾投下にも通信網として耐えられるように設計され、そのために全体を集中管理することなく、ノードやリンクの追加や故障に対して自律的に迂回路を見つける分散システムである。それぞれの通信拠点における局所的な利害や判断に従って、現在もインターネットは成長している。しかも、大学や研究所などの拠点間の自律システム (Autonomous System: AS) レベルと、個々の機器間のルータレベルの結合関係ともに、だれかが意図したわけではなく結果的にSFネットワークを形成している<sup>(1)</sup>。

さて、現実の多くのネットワークに共通するSF構造から生じる特性の1つとして、ランダムなノード除去に相当する不慮の故障には極めて強い (全体の80%程度の故障までは残ったノード間が通信できる) ことが挙げられる。ネットワーク科学によって解明されたこの特性は、元々の自律分散システムとしてのインターネットの設計思想にも合致している。

一方、古典的な研究で多用された、規則的な格子やランダム結合したネットワークは、ランダムな故障に対して案外脆い (50%程度の故障でばらばらになる)。もちろん、インターネットのつながり方は規則的でも全くランダムでもないので故障には強いものの、近年のテロリストの出現で現実味を帯びてきた、極少ないハブへの集中攻撃には非

常に脆弱である欠点も有する。しかも、ネットワーク全体の接続図から次数が大きなハブを探し出すまでもなく、もっと単純な方法で恐ろしい結果が起き得ることが理論的な洞察や数値実験から予測できてしまう。

図1は2006年時点で $N = 22\,456$ ノードの実測データに基づくASネットワークにおけるシミュレーション結果であるが、ハブ攻撃によって次数の大きいノードから順に数%程度を使えなくするだけで、ネットワークがほぼ完全にばらばらになって通信できなくなることを示している。横軸の攻撃率 $f$  (攻撃前の元のネットワークのノード総数に対する攻撃されたノードの比) の増加に対して、縦軸の最大連結成分 (攻撃で分断化された中で互いにつながって通信可能なノード数の最大値 $S$ ) のサイズ比 $S/N$ が激減している。挿入図では、最大連結成分以外の孤立した部分に含まれるノード数の平均値 $\langle s \rangle$ がピークとなる時に、この連結成分が崩壊している。ここで、 $\langle s \rangle$ の値が1に近いのは、大多数の孤立部分は単独ノードからなるサイズ1であって、複数ノードが連結された部分は割合として少ないことを意味する。

一方、図2は、ランダムに選んだノードの結合先のノードをまたランダムに選んでウイルス感染から救う「知人の免疫化」<sup>(2)</sup>と呼ばれる2段階操作を同じASネットワークのノード攻撃に応用した場合で、急峻な崩壊が少し緩和されるものの図1と類似した結果を示している。知人攻撃と呼んでるのは、2段階目における免疫化を攻撃に置き換えた操作を実行していることによる。この2段階操作を攻撃されるノードの立場でとらえると、次数が大きいハブほど自分と結合した隣接ノードを多く持ち、そのうちのどれかが第1段階で選ばれる可能性が次数に比例して高くなることから、低次数ノードよりもハブが攻撃されやすくなる。言い換えれば、この2段階のランダム選択で確率的にハブが攻撃されやすくなり、わずかな攻撃にも耐えられなくなったと考えられる。ちなみに、同程度のノード数やり

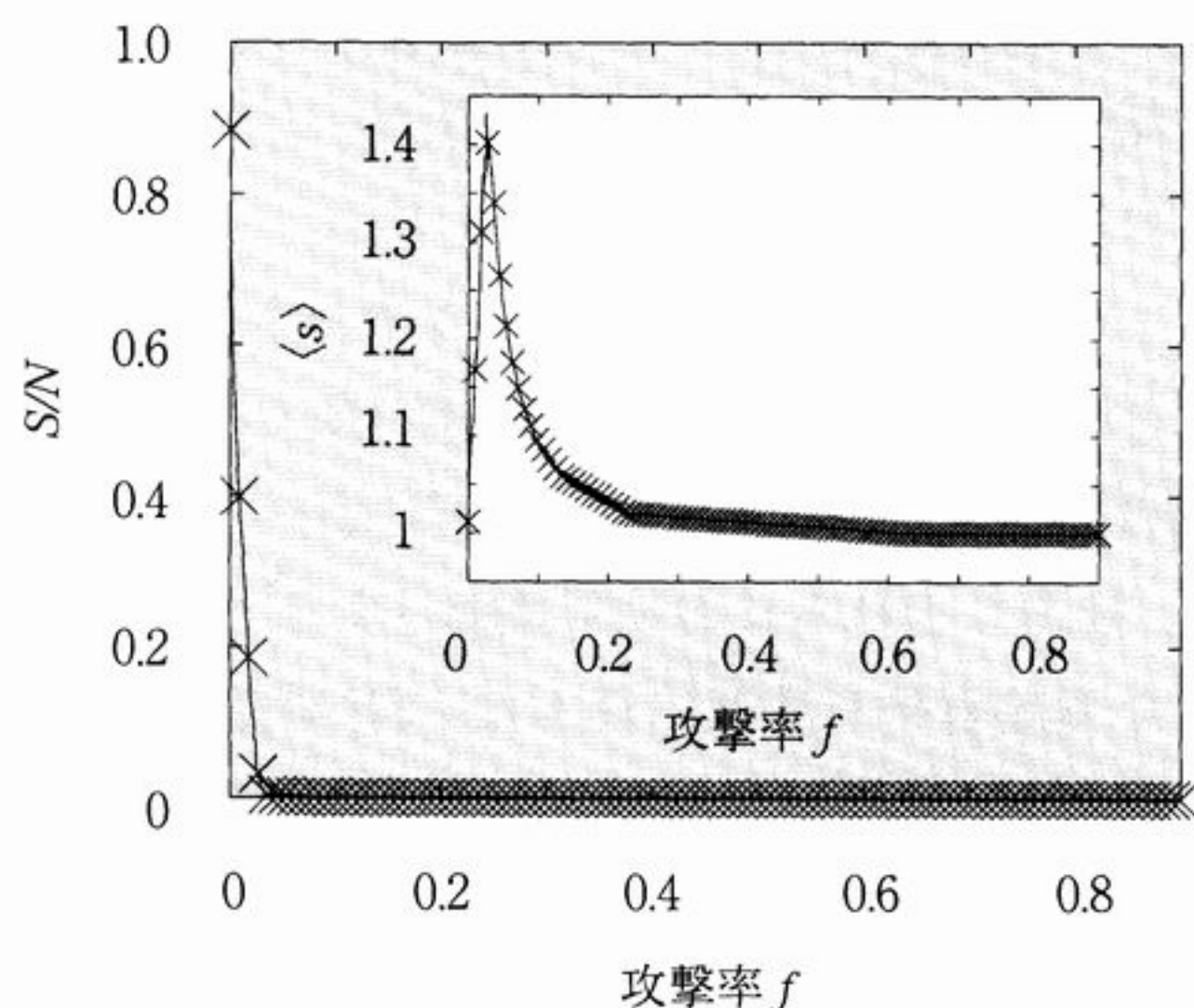


図1 ハブ攻撃に対するASネットワークの被害

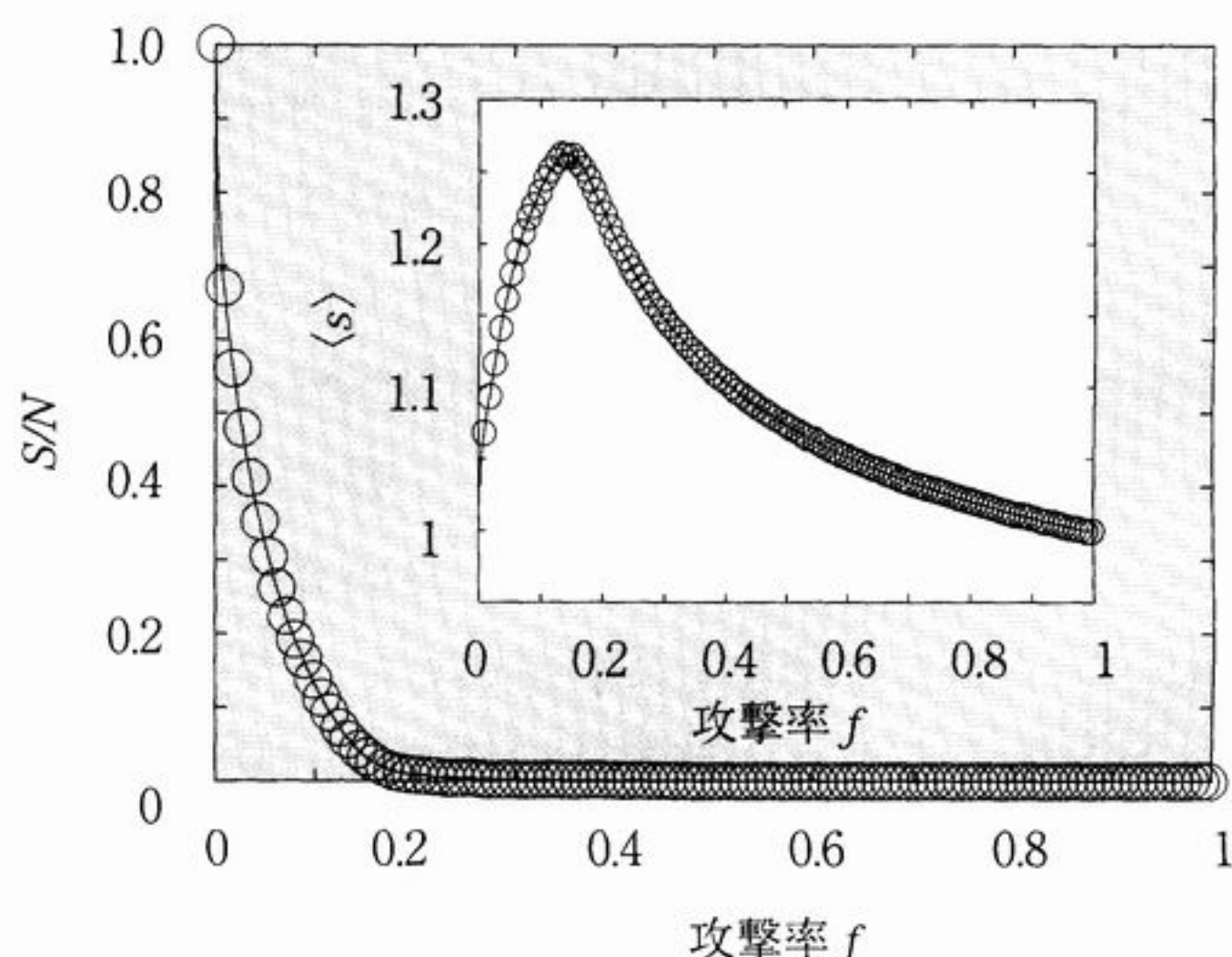


図2 知人攻撃に対するASネットワークの被害

ンク数を持つ Barabasi-Albert (BA) モデルにおけるハブ攻撃では 20% 程度までは耐えられる<sup>(3)</sup>。毎ステップに新ノードを追加して優先的選択（新ノードからすでに存在するノードにその次数に比例した確率で結合する）により成長する BA モデルはネットワーク科学の創生期に提案された代表的なスケールフリーネットワークであるために、頑健性などのさまざまな特性が調べられているものの、SF 構造を生成する他のモデルについてはハブ攻撃に対する結合耐性が網羅的に分かっているわけではない。多くの研究者は、個々のモデルの数量的な細かな比較よりも、結合耐性に関する本質的な支配要因を探ることに関心がある。

ところで、ある AS 拠点ノードを使えなくするには、何も爆破などの物理的な攻撃をしなくても、通常は DoS と呼ばれる方法で標的ドメイン内のサーバなどに大量のパケットを短時間に送りつけばよい。DoS (Denial of Service) では、サーバなどのネットワークを構成する機器に対する攻撃で、サービスの提供を不能な状態にすることである。ところで、パケット量を監視することでサーバ側の防御はある程度できるが、悪意があるかどうかを逆探知するには難しい問題も含んでいる。例えば、Web ロボットが辞書 DB からアクセス統計情報を収集したり、TV 会議などで大量の動画データが送られたりすると紛らわしい。送り先には悪意はなく、ウイルスなどを仕込まれて知らないうちに大量パケットを送り付けることが多いことも根本原因への対処を難しくしている。受け手のサーバ側は、想定量以上のパケットが同じようなサイトから同じようなアクセスで送られたら機械的にセッションを切るか、IP アドレスごとに流量監視するなどして危険そうなサイトに人手で警告するしかない。ただし、それらによって送り手のサービスが停止したり損害が発生すると、法的処置に至るなど技術的な問題だけに収まらないことも有り得る。

また、複数が同時に攻撃される場合などは、拠点ノード（具体的には標的ドメイン内のサーバなど）の防御よりもむしろ（個々の場所で多少の犠牲を払ったとしても）ネットワーク全体における中継通信機能が阻止されないような具体的対策を考えることが重要かつ急務であろう。こうした課題に対処するには、従来のセキュリティ研究だけでは不十分であることから、本稿で概説するネットワーク科学のアプローチに今後の期待と重点投資が切望される。少なくとも欧米はかなり本気で取り組んでいる<sup>(4)</sup>ようで、日本がネットワークインフラにおける技術的優位性を維持するには国家的戦略が必要かもしれない。

### 3.2 ルータレベルのより詳細な構造

ルータレベルでは、その次数分布がべき乗則に従うだけでなく、より詳細なネットワーク構造が知られている。図

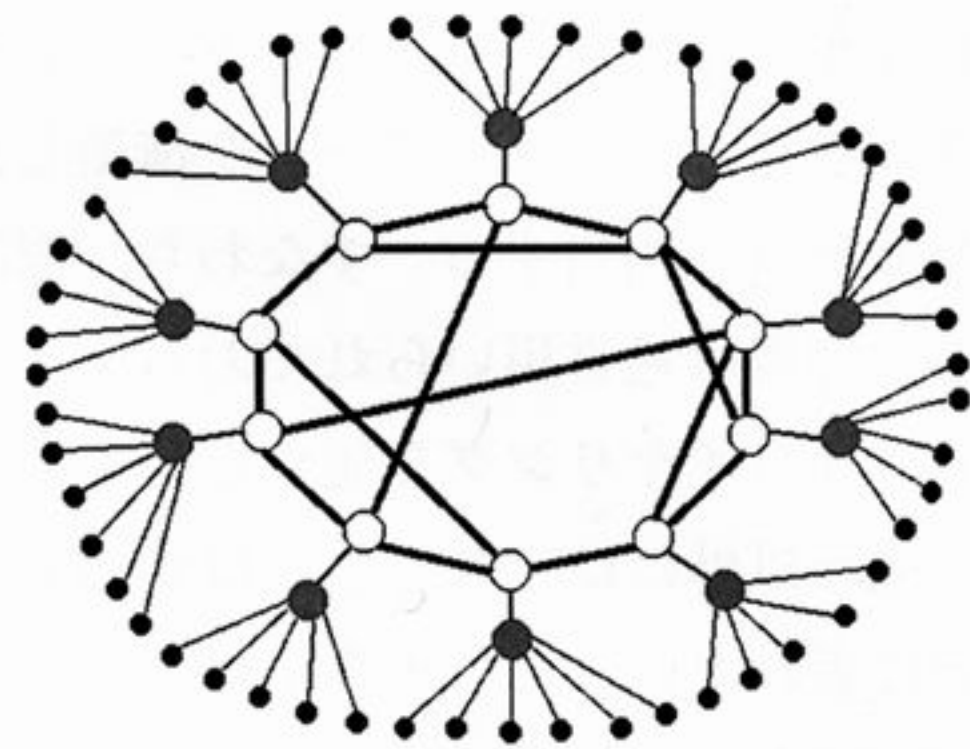


図3 ルータレベルの模式的なネットワーク構造

3は、アメリカにおける大学間などのルータネットワーク<sup>(5)</sup>を模式的に示したもので、低次数のコア（白丸）とそれらの間の高速回線（太線）、コアと末端を中継するゲートウェイ役のハブ（灰丸）、低速回線（細線）でつながれた末端ノード（黒丸）で構成されている。この場合、もし次数の大きいハブをいくつか攻撃したとしても、末端が途切れるだけで通信の要となるコアへの被害は小さい。

ルータレベルにおいても、図1のように数%のハブ攻撃で最大連結成分が崩壊する結果は同様である<sup>(1)</sup>が、最大連結成分にコアが必ず含まれるわけではないので、生き残った極少数のノードからなる連結部分にコアが含まれていればバックボーン（通信の要となる高速回線を含むネットワークの基幹部分）が機能する可能性はある。もしそうだとすると、ハブ攻撃による被害は通信機能の崩壊という状況とは異なりそうである。

ところで、このようにトポロジカルな結合耐性を調べる際には回線容量の影響を無視しているものの、一部のリンクが渋滞しても連結性を保持していれば迂回路に流せることから、ノードが機能不全になる方がダメージが大きい。

ハブ攻撃による脆弱性に関して、べき乗次数分布に基づく理論解析や BA モデルとルータレベルのネットワークとの違いは（べき指数  $\gamma = 3$  と 2.1 の違いを除いて）どこにあるのか？その理由の1つとして、次数分布以外のネットワークの特徴、例えば、友達の友達の関係の頻度を表すクラスタリングや、ハブ同士あるいは異なる次数を持つノード間の結合傾向が頑健性に影響しているものと考えられる。ルータネットワークの場合は、ハブ同士は直接結合せず、コアと末端を中継する階層的な構造になっている。更に、地理的なノード間の距離、または通信拠点の回線帯域幅や処理能力、人口密度などによっても結合のしやすさが異なるものと思われる。ただし、地理的距離や人口分布を考慮することは現在進行的な研究課題である。

### 3.3 ショートカットの追加による改善策

一般に、次数やクラスタリングに関するノード間の結合傾向を無視して（ランダムに選んだ2本のリンクの両端ノードを互いに交差して各ペア同士をリワイヤするなど）与

えられた次数分布のみに従って、他のトポロジカルな特徴をランダム性でなくしてネットワークを構築した場合が理論解析やBAモデルに相当する。すなわち、理論解析では次数分布以外の特徴は通常用いられておらず、またBAモデルは意図的にリワイヤリングを施さなくても、次数分布がべき乗則に従う以外には、こうしたほかのトポロジカルな特徴が顕著に表れない。この場合、ノード攻撃への結合耐性は過大評価される。3.1節でも少し述べたが、数値実験において元のSFネットワークではわずか3%のハブ攻撃で壊滅状態に陥るが、リワイヤリングして結合傾向をなくすと30%程度まで耐えられる結果となる<sup>(6)</sup>。一方、リワイヤリングを施さなくても、次数分布以外のほかの特徴が顕著でないBAモデルでは先に述べたように20%程度の耐性となる。20%と30%の差は、ネットワークのノード総数や平均次数などの違い、次数分布の微妙な違い、あるいは他のわずかなトポロジカルな特徴の違いなどに起因するものと考えられるが、より重要なことは同様な次数分布でも結合耐性に約10倍の差が生じ得ることや、現実のネットワークでは地理的な制約などによって生じる他のトポロジカルな特徴が結合耐性に大きく影響することである。

実際、運営構築コストを抑えるために地理的に近いノード同士が結合しやすいことから、インターネットなどの現実のSFネットワークは脆弱になっている。ただし、その改善策として、ランダムに選んだ2ノード間にショートカットを少量加えると結合耐性が大幅に強化できることが知られている<sup>(7)</sup>。効率良く設計されたネットワークは弱点を見つけられやすく攻撃に対して脆くなるが、多少のランダムさを加えると効率を損なわずに耐性も強化できる。全く別の組織論の観点からも、このようなショートカットの効果が「近所づきあいと遠距離交際」<sup>(8)</sup>として定性的に指摘されていることは興味深い。ノードの連結部分が孤立分断化するのを阻止してネットワーク全体のつながりを強固にす

ることの本質が、直感的にイメージできるものと思われる。

一方、べき乗次数分布に従うSFネットワークだけでなく、より一般に、ある次数分布を仮定した時、クラスタリングやハブ同士のつながり具合など、どんな結合傾向が最も頑健なネットワークになるのか?については、研究が続けられているものの突破口すら定かではなく未解決である。

#### 4. おわりに

大多数の低次数ノードと極少数のハブで構成された、べき乗次数分布に従うSFネットワークの代表格であるインターネットに関して、悪意のある攻撃に対するASレベルおよびルータレベルの結合耐性について述べた。また、個々の拠点サーバにおいて攻撃を未然に防ぐための逆探知などの技術的手段のみならず、ネットワーク全体における被害をできるだけ抑えるための対策案にも言及した。紙面の都合で割合したが、ノードの処理能力や回線容量の上限値を超えた場合は、渋滞や故障した箇所を迂回することで連鎖的に被害が広がるカスケード故障と呼ばれる現象を考える必要があつて、その複雑さゆえに研究途上にある。

最後に、わりと最近の研究動向について少し触れたい。無線技術の進展に応じた近未来の広域なアドホック通信網などを想定して、SF構造を持つ現在のインターネットから少し離れると、ハブを持たないネットワークがむしろ故障にも攻撃にも強い耐性を持つことが明らかになってきた。

更に、人口分布に応じたノード配置やルーティング特性の観点から、例えば、時間的にトポロジーなどが変化しても局所情報のみで短い経路を探し出してダイナミックに通信できるような、幾何学的な細分に基づくネットワークの構成法が検討され始めている<sup>(9)</sup>。こうした取組みが更に発展していくことを期待したい。

#### 文 献

- (1) Romualdo Pastor-Satorras and Alessandro Vespignani: Evolution and Structure of the Internet, Cambridge University Press (2004)
- (2) Reuven Cohen, Shlomo Havlin, and Daniel ben-Avraham: "Efficient Immunization Strategies for Computer Networks and Populations", Physical Review Letters, Vol. 91, No. 24, p.247901 (2003)
- (3) Reka Albert, Hawoong Jeong, and Albert-Laszlo Barabasi: "Error and attack tolerance of complex networks", Nature, Vol. 406, pp. 379-381 (2000)
- (4) Science, Special Issue "Complex Network Systems", Vol. 325, Issue 5939, pp.405-428 (2009)
- (5) Lun Li, et al.: "A First-Principles Approach to Understanding the Internet's Router-level Topology", ACM Computer Communication Review, Vol. 34, pp.3-14 (2004)
- (6) 林幸雄:「情報通信ネットワークが持つべき特性」, リレー連載 ネットワーク科学最前線 第14回, 数理科学, No. 533, pp.77-83 (2007)

- (7) Yukio Hayashi: "Necessary Backbone of Superhighways for Transport on Geographical Complex Networks, Advances in Complex Systems, Vol. 12, No. 1, pp.73-86 (2009)
- (8) 西口敏宏:「[[第1回] ネットワーク理論への招待」, 新連載 経営学のイノベーション ネットワーク思考のすすめ, 一橋ビジネスレビュー, 54, 1, pp.98-109 (2006)
- (9) Yukio Hayashi: "Evolutionary construction of geographical networks with nearly optimal robustness and efficient routing properties", Physica A, Vol. 388, pp.991-998 (2009)



林 幸雄

はやし・ゆきお

1987年豊橋技術科学大学大学院電気電子工学専攻修了。富士ゼロックス(株)システム技術研究所,(株)国際電気通信基礎技術研究所,1997年より北陸先端科学技術大学院大学知識科学研究科,准教授。専門はネットワークの自己組織化や分散システムなど。工学博士。