

故障と攻撃の両方に強いスモールワールド・ネットワーク

A Small-World Network Robust for Both Random Failures and Targeted Attacks

澤井 秀文
Hidefumi SAWAI

情報通信研究機構未来ICT研究所

Advanced ICT Research Institute, National Institute of Information and Communications Technology

A network architecture with bimodal degree distribution robust for both random failures and targeted attacks has been proposed. This paper studies the robustness of “n-Star network” which was proposed by the author as a new Small-World network by comparing with the bimodal degree distribution network and a scale-free network. As a result, the n-Star network was found to be not only more robust than the bimodal degree distribution network and the scale-free network, but also has the good characteristics maintaining Small-World even under the above severe random failures and targeted attacks.

1. はじめに

地震や災害の多い我が国では非常時での通信の確保が喫緊の課題となっているが、2011年3月11日の東日本大震災時には被災地周辺地域の通信が寸断されたことは記憶に新しい。また、インターネット回線を通じたコンピュータウイルスを始めとする各種のサイバー攻撃により情報の流出が頻繁に起こるため、セキュアな通信を確保することも日常的な重要課題となっている。

本研究では、上記のようなコンピュータネットワーク環境での自然発生的な故障と外部からの意図的なサイバー攻撃に対し、従来提案されているネットワークよりもさらに頑健なネットワーク・アーキテクチャを提案する。

2. 故障と攻撃の両方に強いネットワーク

これまで、インターネットにおけるリンクの次数分布として、スケール・フリー(scale-free)性があることが確かめられている[Barabási, et.al. 1999]。スケールフリー・ネットワーク(図1)は、次数の高い少数のハブ(hub)と、次数の低い多数のノードから成り、ランダムな故障に対してはロバスト(robust)ではあるが、ハブへの意図的な攻撃に対しては極めて脆弱(fragile)であることが知られている[Albert, et.al. 2000]。

2.1 2極次数分布ネットワークの特徴

そこで提案されているのが、大きな次数($k_2 \gg 1$)をもつ少数のノード(存在確率: r_2)と、小さな次数($k_1 \ll \langle k \rangle$)をもつ多数のノード(存在確率: r_1)をもち、スケールフリー・ネットワークの次数分布を2つに極限化した**2極次数分布ネットワーク**(bimodal degree distribution network)である(図2) [Tanizawa et.al. 2005]。このネットワークはランダムな故障と意図的な攻撃の両方に強いことが示されている。また、極数を m ($m \geq 2$)個に増やしたマルチモーダルネットワークは、 m の極限($m \rightarrow \infty$)においてスケールフリー・ネットワークと等価であることが示されている [Tanizawa et.al. 2006]。

2.2 n-Star ネットワークの特徴

著者は先に、従来知られている様々な複雑ネットワークをスモール・ワールド(Small-World)の観点から再検討し、

連絡先: 澤井秀文, 情報通信研究機構未来ICT研究所,
〒651-2942 神戸市西区岩岡町岩岡 588-2, sawai@nict.go.jp

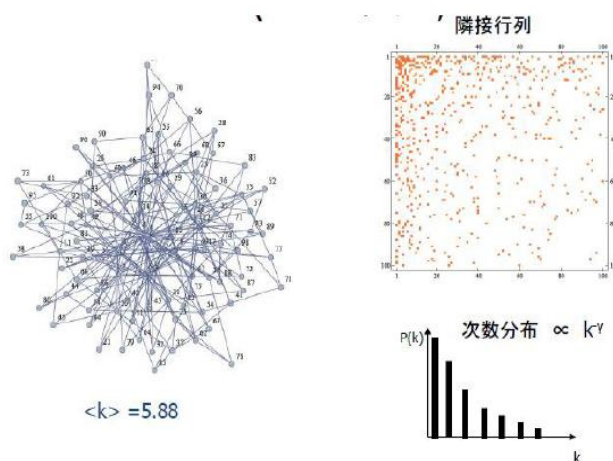


図1. スケールフリー・ネットワーク (BAモデル, N=100)

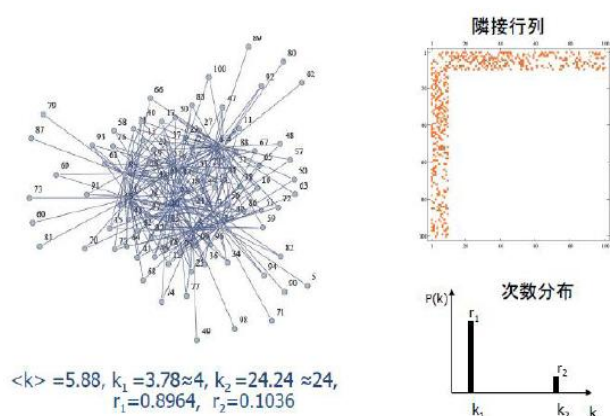


図2. 2極次数分布ネットワーク (N=100)

ランダムグラフを出発点に擬似的なACO (Ant-Colony Optimization) アルゴリズムに基づいて平均経路長 (average path length) L が絶対値の意味で最小となる **n-Star ネットワーク**を提案した(図3) [Sawai 2011]。このネットワークは、ノード数 N のとき、少数 n 個のスター・

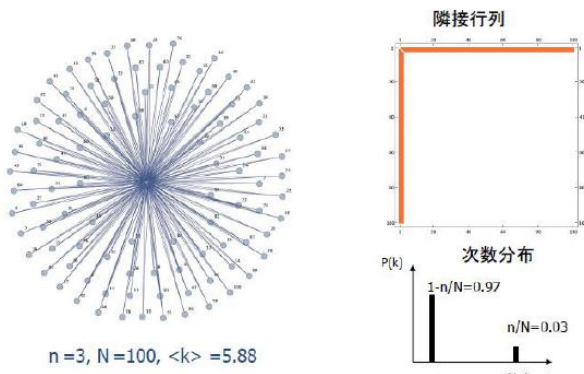


図3. n-Star ネットワーク (n=3, N=100)

ノードと(N-n)個の周辺ノードをもち、n個のスター・ノードは互いに完全結合(clique)を形成しており、各周辺ノードはn個のスターノードと全て結合している特徴的なアーキテクチャをもつ。このため、平均経路長Lはnの値に関係なく常に2未満の値をもつ新しいタイプのスモールワールド・ネットワークである。実際に、WS (Watts-Strogatz)モデルやBA (Barbási-Albert)モデルと比較しても、同じ平均次数<k>の値に対して、**絶対的に小さなL**をもつことが確かめられている。本研究では、このn-Starネットワークの故障や攻撃に対する**頑健性(robustness)**を、2極分布ネットワークやスケールフリー・ネットワークの典型モデルであるBAモデルとの比較実験シミュレーションを通して評価する。

3. ネットワーク障害について

ネットワーク障害の種類としては、大きく分けて自然発生的なランダムな故障と、外部からの意図的な攻撃によるネットワークへの侵入と破壊(所謂サーバーテロ)がある。通常、意図的な攻撃はハブノードをターゲットにする場合が多いが、リンクやノードの故障確率を極めて高く設定することでこの状況を模擬できると考えられる。これら2種の障害はノードとリンクの機能不全をもたらすため、以下の幾つかの場合に分けて、障害に対する頑健性/耐故障性の評価を行う。但し、公平な性能比較のため、障害を受けない場合のノード数N、平均次数<k>は3種のネットワークで同一の値に設定する。

3.1 リンクが故障した場合

自然なランダム故障か意図的な外部攻撃かに関わらず、確率 P_l でリンクが故障した場合を考え、 P_l を0から1近くまで増加させながら、n-Starネットワーク、2極次数分布ネットワーク、スケールフリー・ネットワーク(BAモデル)の3種のネットワークのリンク故障に対する頑健性を評価する。

3.2 ノードが故障した場合

リンク故障と同様に、ノードが確率 P_n で障害を受けた時、 P_n を0から1近くまで増加させながら、上記3種のネットワークについて頑健性を評価する。

3.3 リンクとノードが故障した場合

現実には、リンクとノードのいずれか一方だけが故障する場合だけでなく、両方がある確率 P_f で故障することも考えられるため、 $P_f = \alpha P_l + (1-\alpha) P_n$, ($0 \leq \alpha \leq 1$)とおき、同様に3種のネットワークの頑健性を評価する。

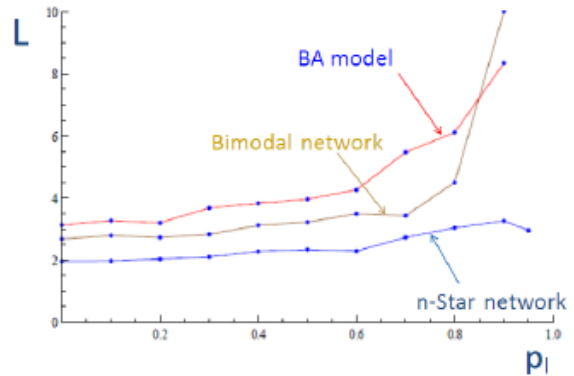


図4. リンク障害時の平均経路長Lとリンク故障確率 P_l の関係 (n=3, N=100, $k_1=4$, $k_2=24$, $r_1=0.896$, $r_2=0.104$)

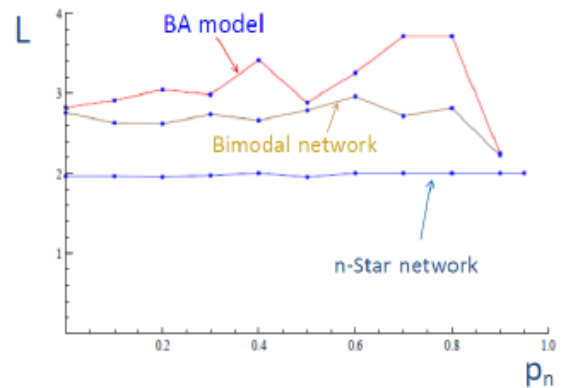


図5. ノード障害時の平均経路長Lとノード故障確率 P_n の関係 (n=3, N=100, $k_1=4$, $k_2=24$, $r_1=0.896$, $r_2=0.104$)

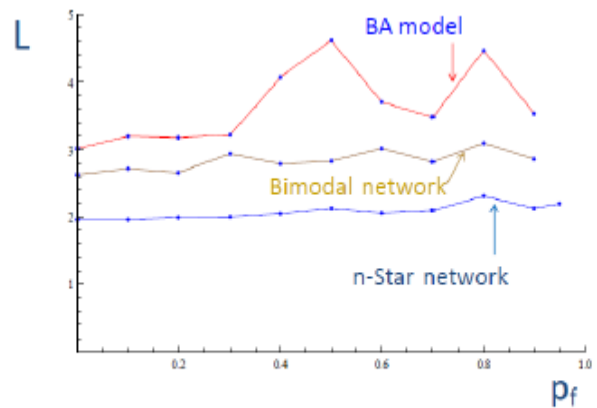


図6. リンク・ノード故障時の平均経路長Lとリンク・ノード故障確率 P_f の関係 (n=3, N=100)

4. 故障実験シミュレーション

4.1 リンク故障の場合

リンク故障の場合の平均経路長 L の変化を図 4 に示す。リンク故障確率 P_l が 0 から大きくなるにつれて、 L は徐々に増加する。2 極分布ネットワークとスケールフリー・ネットワーク (BA モデル) では 0.6 より大きな範囲では急激に増加し、0.9 では事実上これらのネットワークは寸断されてしまうが、 n -Star ネットワークは $P_l=0.95$ でも L は僅かな増加に留まり、スモール・ワールド性を保持している。

4.2 ノード故障の場合

ノード故障の場合の平均経路長 L の変化を図 5 に示す。リンク故障時と同様、 n -Star ネットワークは、 $P_n=0\sim 0.95$ の範囲で L の値が 2 と極めて安定しているが、他の 2 種のネットワークでは、 L の値がより大きく不安定な挙動を示す。 $P_n=0.9$ で L が急激に減少しているのは、上記 2 種 (2 極次数分布ネットワークとスケールフリー・ネットワーク) の最大連結成分のネットワーク構造が「木構造 (tree)」になったためである。

4.3 リンクとノードが故障した場合

リンクとノードが同時に故障した場合 ($\alpha=0.5$ とした時) の平均経路長 L の変化を図 6 に示す。ノード故障時と同様に、2 極次数分布ネットワークとスケールフリー・ネットワークでは、故障確率 P_f の増加に伴い、 L の値が大きな値で不安定となるが、 n -Star ネットワークでは、 $P_f=0\sim 0.95$ の範囲で約 2 の値で安定している。

図 7 は、 n -Star ネットワーク ($n=3, N=100$) のリンク・ノード障害例を示す。左のグラフが障害前で、右のグラフが障害時 (リンク障害確率 P_l とノード障害確率 P_n が共に $P_l=P_n=0.25, P_f=0.5$) のグラフであり、右下は 26 個の孤立ノード群を表す。障害がない時に平均次数 $\langle k \rangle = 5.88$ であったネットワーク構造が、 $\langle k \rangle = 2.34$ まで減少しているが、3つのスター・ノードの内2つが健在であるため、周辺ノードとのリンクが確保され、小さな平均経路長 $L=2.13$ を保持している。

図 8 は、2 極次数分布ネットワークのリンク・ノード障害例を示す。左のグラフが障害前で、右のグラフが障害時 (同様に、リンク障害確率 P_l とノード障害確率 P_n が共に $P_l=P_n=0.25, P_f=0.5$) のグラフであり、右下は孤立ノード群である。障害がない時に平均次数 $\langle k \rangle = 5.88$ であったネットワーク構造が、 $\langle k \rangle = 3.24$ まで減少しているが、 n -Star ネットワークに比べて平均次数 $\langle k \rangle$ の減少は少ない。これは、 n -Star ネットワークのスター・ノードが故障すると、それに結合した $(N-1)$ 個のリンクが一度に失われるが、2 極次数分布ネットワークでは大きな次数 ($k_2 \gg 1$) をもつノードが故障しても、 n -Star ネットワークほどリンク障害への影響が大きいと考えられる。このときの平均経路長は $L=2.78$ であり、 n -Star ネットワーク ($L=2.13$) より大きい、孤立ノード数は n -Star ネットワークと同じ 26 個であり、ネットワーク構造は一定程度原形を保っていることが分かる。

図 9 は、スケールフリーネットワーク (BA モデル) の場合のリンク・ノード障害例を示す。左のグラフが障害前、右のグラフが障害時 (同様に、リンク障害確率 P_l とノード障害確率 P_n が共に $P_l=P_n=0.25, P_f=0.5$) のグラフであり、右下は 30 個の孤立ノード群を示す。平均次数 $\langle k \rangle$ は、5.88 から 2.12 まで減少して

おり、3 種のネットワーク中では最も減少の度合いが激しい。多くのハブノードが故障し、生き残った 4 つのハブノードに周辺ノードが結合することで、かろうじてネットワークとしての原形を留めている様子が見て取れる。平均経路長 L は故障後に $L=3.84$ となり、3種のネットワークの内でも大きい。

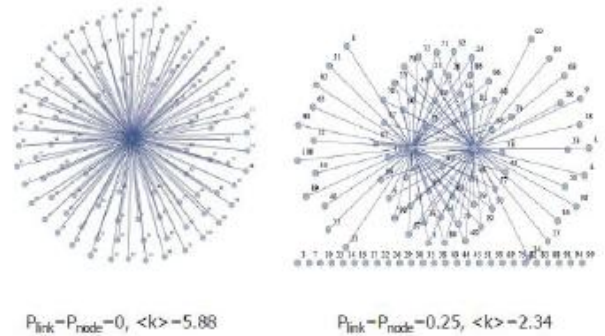


図 7. n -Star ネットワークのリンク・ノード障害例 (左のグラフが障害前、右のグラフが障害時のグラフ、右下は孤立ノード群、 $N=100$)

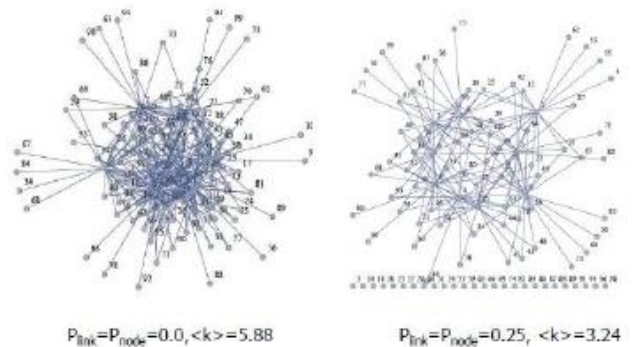


図 8. 2 極分布ネットワークのリンク・ノード障害例 (左のグラフが障害前、右のグラフが障害時のグラフ、右下は孤立ノード群、 $N=100$)

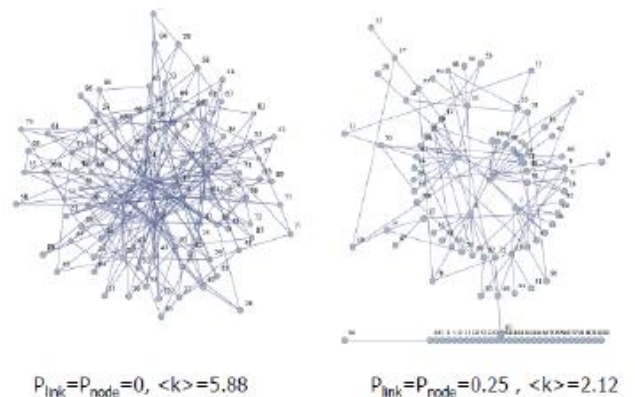


図 9. スケールフリーネットワーク (BA モデル) のリンク・ノード障害例 (左のグラフが障害前、右のグラフが障害時のグラフ、右下は孤立ノード群、 $N=100$)

5. 検討と考察

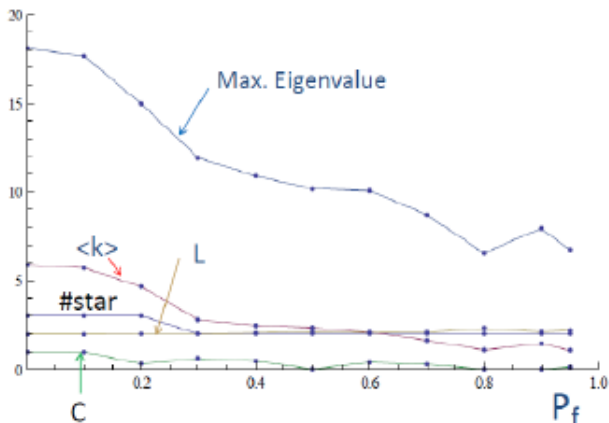


図10. n-Star ネットワークの場合の各種ネットワーク指標 (<k>, L, C, 最大固有値 Ev) とリンク・ノード故障率 Pf との関係 (n=3, N=100)

図 10 に、n-Star ネットワークの場合について、リンク・ノード故障率 Pf を変化させたときの平均経路長 L、平均次数 <k>、生き残ったスター・ノード数 #star、クラスタリング係数 C、最大固有値 Max. Eigenvalue (Ev) をそれぞれ示す。n-Star ネットワークでは、生き残ったスター・ノード数 #star とクラスタリング係数 C、最大固有値 Ev との間に正の相関が認められる。また、リンク障害に対してよりも、ノード障害に対するこれらの値の変動が大きいことが分かった。これは、部分的なリンク障害は直ちにネットワークの分断には結び付き難いが、ノード障害時にはノードに結合している全てのリンクの機能不全を同時に引き起こすためである。しかしながら、n-Star ネットワークでは、Star ノードが 1 つでも生き残ってさえいれば、いずれの障害の場合でも L の値は約 2 を保つことができるため、ネットワーク障害に対しより頑健 (robust) であるだけでなく、スモール・ワールド性を保持しているという、他のネットワークには見られない優れた特徴があることが分かる。

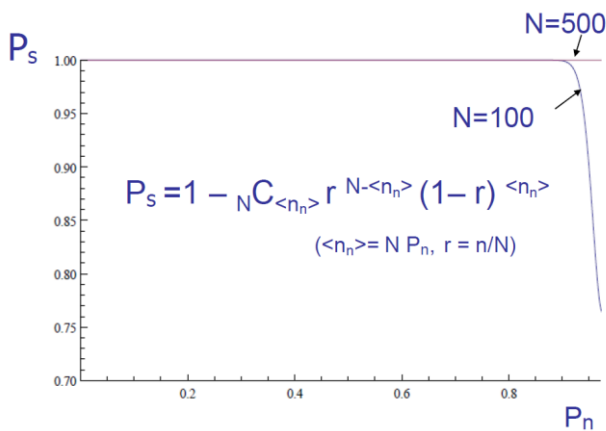


図11. n-Star ネットワークの場合の n-Star が少なくとも 1 つ生き残る確率 Ps とノード故障率 Pn との関係 (n=3, N=100)

これを解析的に確かめるために、リンク障害に比べてより影響の大きいノード障害の場合に、ノード故障率 Pn と n-Star ノードが少なくとも 1 つ生き残る確率 Ps の関係を図 11 に示す。Ps の計算式は図中に示している。この図から、ノード故障率 Pn が 0~0.95、N ≥ 100 の範囲で Ps ≒ 1 を保持していることが分かり、この事実こそが、n-Star ネットワークが強い頑健性 (robustness) を示す最大の理由であると考えられる。

また、本稿では他の 2 種のネットワークとの頑健性の性能比較から n-Star ネットワークに周辺ノードが存在しない場合を考えた。しかし、外部攻撃者がスター・ノードやハブノードをターゲットとして優先的に攻撃した場合、全てのスター・ノードやハブの機能が失われるとネットワーク全体への影響が甚大となる。特に n-Star ネットワークの場合にはこの影響を最小限に抑えるためには、周辺ノード同士をある確率で予め繋いでおくことにより、ネットワーク全体が完全に崩壊することを避けることができる。

6. むすび

本研究では、n-Star ネットワークのノードやリンク故障に対する頑健性を 2 極次数分布ネットワークとスケールフリー・ネットワークとの比較実験を通して明らかにした。その結果、他の 2 種のネットワークと比較してランダムな故障と外部からの意図的な攻撃の両方により強いだけでなく、極めてシビアなネットワーク障害時でもスモール・ワールド性を保持するという優れた特性を有することが分かった。この結果は、コンピュータネットワークだけでなく、航空網のようにその運航が自然災害や気候条件などに大きく左右されるロジスティクスのようなネットワークにおいても適用可能な極めて有用な結果であると考えられる [Sawai 2012a] [Sawai 2012b]。

参考文献

[Barabási, et.al. 1999] A-L. Barabási and R. Albert, : Emergence of Scaling in Random Networks, Science, vol.286, 15, pp.509-512, Oct. 1999.
 [Albert, et.al. 2000] R. Albert, H. Jeong, A-L. Barabási, : Error and attack tolerance of complex networks, Nature, vol.406, pp378-382, 2000.
 [Tanizawa, et. al. 2005] T.Tanizawa et.al., : Optimization of network robust to waves of targeted and random attacks, Physical Review E 71, 047101-1~8, 2005 年.
 [Tanizawa, et. al. 2006] T.Tanizawa et.al., : Optimization of the robustness of waves of multimodal networks, Physical Review E 74, 06125-1~8, 2006 年.
 [Sawai 2011] 澤井 秀文: スモール・ワールドの創発と解析, 人工知能学会創立 25 周年記念合同研究会資料, SIG-DOCMAS-B101-1, pp.2-1~2-8, 2011 年.
 [Sawai 2012a] H. Sawai, : Exploring A New Small-World Network for Real-World Applications, The Fourth International Conference on Networked Digital Technologies (NDT 2012), Canadian University of Dubai, UAE, Apr. 2012, to be presented.
 [Sawai 2012b] H. Sawai, : Reorganizing A New Generation Airline Network Based on An Ant-Colony Optimization-Inspired Small-World Network, 2012 IEEE World Congress on Computational Intelligence, Brisbane, Australia, June 2012, to be presented.