

ネットワーク科学から示唆される望ましい自律分散社会に向けて

○林 幸雄（北陸先端科学技術大学院大学）

Toward Desirable Decentralized Autonomous Societies suggested by Network Science

○ Yukio HAYASHI (Japan Advanced Institute of Science and Technology)

Abstract: Based on recent progress in Network Science, we introduce effective methods of network generation and reconstruction after attacks or disasters. Moreover, we discuss desirable decentralized autonomous societies, which are suggested by the research activities to be resilient systems for avoiding the disparity and the extreme vulnerability caused by the selfish rule in many real networks.

Keywords: Social Infrastructures, Resilience, Self-organization, Self-healing, Distributed Algorithm, Degrowth, Mutual Aid

1 はじめに

社会的、技術的、生物的な現実の多くのネットワークには、Scale-Free と呼ばれる共通の繋がり構造が存在し、残念ながら悪意のある攻撃に対して極端に脆いという弱点が今世紀初頭頃に発見されている [1]。これらのネットワークは、大多数の低次数なノードと極少数の非常に高次数なノード（ハブ）で構成され、その次数分布がべき乗則に従う。ここで、ノードの結合リンク数は次数と呼ばれる。また、こうした不平等な分布は、所得格差においても知られている [2]。

全く異なる構成要素や目的を持つネットワークに、共通した Scale-Free 構造が何故出来てしまうのか？。その生成原理は、「Rich gets richer」則とも呼ばれる利己的な「優先的選択」に、意識的あるいは無意識に従うからと考えられる [1]。すなわち、ハブに繋がると、ハブを経由して互いのノードが短い距離（経由ホップ数）で行き来できるので、誰もが自分にとって都合が良い、効率的な結合相手を選択する。その結果、ハブに大多数のリンクが集中する不平等な構造ができてしまう。しかも、全く無意識なリンク先の真似っ子の結合でも「優先的選択」となってしまう [3] のが悩ましい。これらの弱点や生成原理は、電力網、通信網、物流網、などの現代社会を支える技術インフラのみならず、我々の経済活動そのものでもある、中心と周辺からなる「広域システム」にも当てはまる [4]。

本稿では、ネットワーク科学の最新の知見に基づき、災害や攻撃に最も強いネットワークの設計構築法をサーベイ紹介し、利己主義に基づいて同様な構図で奪い合う競争による分断社会から、互いに助け合う自律分散社会に改める必要性について議論する。

2 レジリエントな設計

2.1 優先的選択はレジリエンスの真逆

レジリエンスとは、固く強いが限界に達すると壊れてしまう従来の設計方針から脱却して、竹のようにしなやかな強靱さで復活力を持つシステムの実現を目指す新たな概念として、工学や環境生態学を中心に近年注目を集めている。耐性、信頼性、冗長性、対応と回復力を重視し、以下のように、適応能力の維持 [5] としてレジリエンスは概念的には定義される。

適応能力の維持： 予測不能な混乱や変動が頻繁に発生する現代において、状況の変化に適応しつつ自己の目的を達成する為、好ましい状態からはじき出されないように抵抗力を強化し、いざというときに備えて許容性の幅を広げておくこと。

一般にシステムの脆弱性の増幅 [5] と、その逆としてレジリエンスを高めるそれぞれの主要因を表 1 に示す。多くの現実のネットワークを生成する基本原理として考えられている優先的選択は、こうしたレジリエンスの観点からも真逆であることが分かる。また、レジリエンスの考え方は、安全についても「予測可能を前提とした原因の究明と改善」から「変わりうる状況下で成功する能力を伸ばすことに注力」すべきことを指摘している [6]。但し、後者は前者（原因の究明と改善）を不定するものではなく、包括した考え方である。さらに、広義のレジリエンスは、全く元通りの復元ではなく、構造は多少異なっても基本機能は維持する、あるいは、イノベーション的な新たな生まれ変わりとしての再構築や再組織化をも許容する [7]。

2.2 ネットワークの自己組織化や自己修復

概念のみならず、しなやかな復活力を持つレジリエントなネットワークの具体的な設計方法を考えよう。

Table. 1 優先的選択はレジリエンスの真逆.

優先的選択	脆弱性を増幅 ↔	高レジリエンス
誰も同様に	同質性	多様性
利己主義で	効率偏重	重複冗長
結果としてハブ創出	一極集中	局所分離
非一様な次数分布	複雑さ	適正な単純さ

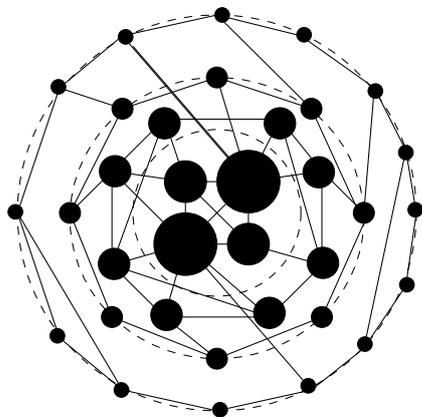


Fig. 1 玉葱状構造

まず、次数分布を固定したとき、攻撃に対して（最も強く連結性を維持できる）最適耐性となるネットワークは、正の次数相関を持つ玉葱状構造であることが発見されている [8, 9]. これは図 1 のように、同程度の次数のノードを同心円上に、次数の大きい順に中心から周辺に配置すると、似た次数同士のノードの結合で輪が可視化され、玉葱状となる。一方、最適耐性となるには、次数相関よりもループ強化がより本質的で重要であることが近年徐々に分かってきた。その理論的な裏付けとして、攻撃法を特定しない最少のノード除去を考えた、剥ぎ取り (Dismantling) 問題と無閉路化 (Decycling) 問題の等価性 [10] が指摘され、直感的にも、ループの無い木構造になったら（任意の節ノードの除去で）すぐに分断されるのは理解できよう。言い換えれば、ノード除去によって、出来るだけ木構造になりにくいネットワークが最適耐性となる。しかしながら、ループ形成に必要な最少のノード集合を探す問題は、そもそも NP 困難であり [11], その集合の最大化は更に難しくなる。

難問にもかかわらず、以下のような構築法により（少なくとも現状で）最適耐性なネットワークが実現できる可能性が示されている。

- 逐次成長における、部分コピー操作とランダム結合 [12] 及び協調的な仲介 [13] による自己組織化。
- 元々より強い構造に再構築する、リンク喪失したノード間の輪形成と輪上のループ強化による、分散処理にも適した自己修復 [14].
- 種々のループ強化法による、次数保存および次数非保存のリワイヤリング [15].

- 平均次数を固定して次数分布を変化させ、最大-最小の次数差を小さくする平等化 [16].

これらに共通する操作として、ランダム結合は偶然に繋がる機会を、低次数ノードへの結合は弱者に繋がる機会を与えることに相当する。すなわち、分断されにくい最適耐性なネットワークとなるには、これらの機会を与えられるよう、利己的に強者にリンク集中させる優先的選択から脱却する必要があると言える。逆に、現状のままで脱却できなければ、現代社会を支える多くのネットワークは脆弱なままであり、気候激変やテロ攻撃などの脅威がますます増大する中で、甚大な被害が起き続けることになる。

こうした深刻な問題点は残念ながら一般にほとんど認識されておらず、我々の価値観を根本的に改めるべきとして、十分強調するに値する。

3 過去、現在、今後の社会を考える

3.1 広域システムの本性

ところで、世の中に蔓延する利己主義を続けることは、ネットワークを脆弱化させるのみならず、目に見えない人々のつながりも含めた経済活動等で（現代社会における広域システムによって）ますます格差を助長するものと考えられる。東日本大震災をきっかけに、広域システムのこうした本性が暴露された [4]. 以下、その論点を要約する。

電力・水道・ガス・交通・通信・生産（サプライチェーン）・物流などの社会インフラにおける、中央による巨大システム形成が、地方をも取り込んで行き、貿易自由化、大店法改正、商工農の解体、医療・交通・教育の制度改革などを通じて普遍的に見られる現象として、それらが巨大かつ複雑すぎて、どうすることもできない人々の周辺化・モノ化が進み、主体性を喪失していく。統治する中心（都市）と、便利さや目先の僅かな利益に惑わされて結局は搾取される周辺（地方）との非対称な関係が出来上がる。その結果、弱者である周辺（地方）は、誰かが何とかしてくれると思うしかない依存に慣れてしまう。通信網や物流網において、効率的な短い経路となるよう個々の利益に基づき多くのノードがハブに繋がって、結果的に全体の連結性を極一部のハブに頼り切るのとまさに同じ構図である。

震災後、地方のあるべき姿を熟考せず、復興の名のもと経済発展の狭い視野で中心がエゴを発揮して、早く多く予算を使って周辺に進出侵入し、結局は発注先の大手企業に利益は還流すると共に、地方の下請けは切り捨て可能で、長期的な失敗リスクは地方に落し付けられて下位化・従属化していく。中心はより豊かになる一方、周辺はますます貧しくなっていく。また経済競争する限り、

誰かが勝てば、誰かは負ける。競争や成長は本当に必要なのだろうか?、多少縮小する現状維持では何が悪く、誰が困るのか?

人口問題においても、「ひと」を中心に「まち」と「しごと」の好循環を考えるべきところ、グローバル資本主義を地方にも貫通させる目的で、まずは「しごと」づくりから着手と論理のすり替えが行われ、収入≠社会的地位なのに都市の仕事は格上なのだという（根拠のない）序列化意識が植え付けられていく。

選択と集中: 経済のために残す地域/残すべきでない地域の振り分け、経済性に基づく生き残り合戦。
非常事態の論理を常態化。

人口より財政・経済を優先: 産業の高次元化、優先は人口集住の規模の経済：二次三次産業 ≠ 適正な人口規模でむしろ安定な一次産業。

冷たい客観主義: 自分は排除の対象でないから他を排除。但し、何の根拠もなく、支えもなく。

上記の「都市の正義」によって、農山漁村への露骨な侵食が地域創生への支援として暴力的に行われてきたが、より本質的な問題は、人手不足、子育、低所得、孤独化などに関する都市にある欠陥で、その一極集中を阻止すべきである [17]。

震災に限らず、市町村合併や産業活性化政策として、合理化や効率化に基づいてこれまで行われて来た近代化は、社会的分断と不安や恐怖を煽る同様な構図となる。この依存化・従属化から脱するには、周辺（地方）の自律化・主体化を復権させる取り組みが必要となる。

3.2 経済至上主義が元凶

では、いつ頃から、どうしてこのような中心-周辺、都市-地方、グローバル経済-地元社会、富裕者-貧困者、強国-弱国など、分断化された世の中になってしまったのだろうか。それは以下のように、際限なき成長を追求する資本主義社会（自然軽視の人間中心、西欧中心、男性中心、植民地主義の発想で生産力だけを重視する社会）の考え方が元凶だと考えられる [18]。

産業革命を通じた、工場制手工業における労働力の搾取、人種・民族を区別する植民地主義による階層化などを経て、経済成長の執拗な追求がほんの数百年前から続けられてきた。特に、個人主義に基づく利己的な「地位財」を強欲に追求すると、大量高価に他人を上回ることを目指し、他者を置き去りにして、不平等が広がり社会全体のウェルビーイング（身体的・精神的・社会的に良好な状態）は損なわれる。考えてみれば結局のところ、（分配可能な資源や財が無限にない限り）経済成長は収奪であり、人と人、国家と国家、人間と自然環境との間で、労働と資源の不等価交換を是とする階層型の社会文化シス

テムとして、より安価に生産し、より安価に維持し、より安価に人間を搾取する仕組み [18] と言える。しかも、経済合理性を前提とした自由な市場原理による均衡論は間違いで [19]、強欲に儲けて大量消費する生活を良しとする価値観を改めるべきこと [20] が前世紀後半から主張されてきたが、それにもかかわらず乱開発や金融恐慌など多大な破壊と混乱を繰り返してきている。

こうした現状に対して、脱成長としてスケールダウン・スローダウンしながら、全体のパイを縮小し、より多く共有し、より公正に分配して再生産力を重視すべきだと提起されている [18]。すなわち、相互扶助に基づき、土地・資源・文化を自ら管理していく権利を取り戻す変革の実現に向けて、方向転換すべきと考えられる。この転換を考えるにあたって、現状の「政府縮小-市場拡大」戦略と、今後の望ましい「市場抑制-社会拡大」戦略 [21] の対比を表 2 に示す。但し、政府や自治体にお金がないから「公助」を削り取る手段として、「自助」「共助」を政策として推進することは論外である [21]。

Table. 2 現状と今後の望ましい社会の対比。

政府縮小-市場拡大	市場抑制-社会拡大
分断され、奪い合う 生産の場を重視 量の経済	自助共助で、分かち合う 生活の場を重視 質の経済

世の中の役割として、経済活動を担う競争セクターのみならず、福祉・教育・文化・生活などを担う共有セクターがある。我々はどうやら、これまで競争セクターのみ重視して来たようであるが、今後は共有セクターに大いに目を向けないといけない。特に、老朽化のみならず（本稿などネットワーク科学に基づく）科学的知見から脆弱化に対策が施されず、ネットワークの社会インフラは、経済成長の名のもと整備がおろそかにされてきた訳で、共有セクターが本来扱うべきものと言えよう。

3.3 もともとは相互扶助社会

そもそも人間のみならず、広く生き物にとって、弱肉強食による個体の欲望よりも種の繁栄が重要であり、最小限のエネルギーで最大限の生の充実にとって、環境に応じて多様化しながら繁栄していく「形質の分岐」を是とする、闘争なき進化に着目すべきことは、民衆生活や動物社会のフィールドワークの実地調査に基づいて百年以上前に実は明らかにされている [22]。

人間同士の結び付きは歴史的に、〈血縁〉による種族共同体、〈地縁〉による村落共同体、〈業縁〉による自由都市共同体、〈選択縁/趣味縁〉による協同組合やボランティアな組織とその主軸が移行してきた。欧州では、城壁で囲まれた共同体が点在した形跡が今でも残っている。近代国家が台頭する以前は、これらの共同体における自律と協同は表裏一体で、「一人は万人のため、万人は一人

のために」という個と全体の相補性と、無意識の良心～「惻隱の情」に基づくものであった。世界の各宗教においても、過ぎた富は罪であり、消費より儉約がずっと尊ばれている [20]。しかしながら、18 世紀以降に国家によって農地が略奪され、村落共同体が破壊されて私利私欲の追求が正当化され、「各自は自己のため、国家は万人のため」として相互扶助を不要にし、個人の集合が無機的な群れ化して、共同集団を基礎とした有機的な結合体という性格を失ってしまった [22] のが、近代国家の成立以降の世の中だと言えよう。競争というものが、前近代的な Competition（共に探し求める：自分なりの目標やり方を考えて競い合う）から、近代以降は Emulation（まねする：同じものを手本にまねをする競争）にすり替わり [23]、特に 1980 年代から米シカゴ学派の経済学者が提唱した新自由主義により強欲を善として目先の株主価値を重視する余り [24]、「自由を束縛する悪しき平等」につながる「助け合い」が冷遇され、中央集権化が進み過度な経済成長を求める今日に至っている。こうした近代国家、個人主義、経済至上主義は、割と最近に植え付けられた考え方なのである。

長い目で人類の歴史を振り返れば、「文化や生物の多様性はもちろん、言語、技術、家族のあり方、信仰における多様性こそが、人間の適応力やレジリエンスの基礎となってきた。だが、成長追求という様式がグローバリゼーションの名のもとに世界に広がって、そうした多様性と入れ替わってしまった。… 経済成長ありきという思想にすっかりなじんでいる集団にとっては、それ以外の生き方など、ほとんど創造すら出来ない。」 [18] のである。氷河期などにも左右され、食糧を求めて移動する採集経済から、定住可能な農業経済に移行してきたのであるが、「暖かい手と手をつなぐ」という生き方でなく、「自分さえ良ければ」という生き方に立てば自然環境への関心も失い、気候激変や資源乱獲などで自然の自己再生力も喪失して、人類滅亡という根源的な恐怖に怯えることになりかねない [21]。

3.4 自律分散の助け合い社会に向けて

こうした経済至上主義ではなく、一方で国家に基づく共産主義や軍事中央政権の社会でもない、(地域などの)共同体が有機的に連帯した自律分散な社会を目指すことはあながち机上の空論ではない。もちろん、中世以前の社会に戻る訳ではなく、最新技術を否定するものでもない。すでに、共同菜園、地域支援型農業、共同生活、共有住宅、共同保育などの共同システムの実践例 [18] をはじめ、地域のイントラネットでも共有地における主体性を促進する米 NY 州の Red Hook WiFi、アフリカのオフグリッド電力、メキシコ先住民コミュニティ通信など [25]、自律分散な社会を構築するための未来に向けた技術の芽も存在する。

いずれにおいても、競争や成長よりもコミュニティのウェルビーイングを優先した生活を実現する鍵となる概念は、以下の「コモンズ」と「コモニング」である。

コモンズ： 資源を共有する生活システム。

生活必需品の提供・供給やケアの共有を強化拡大。私有化や民営化の勢力を跳ね返すかも。

コモニング： 協働、衝突、協議を通じて、共有の伝統や規制を維持し適応させていく努力と実践。

協働するネットワーク間で相互に支え合う。

こうした脱成長社会を目指す目的かつ手段である [18]、

- 尊厳ある働き方
- 利己的な競争の減少
- 人や環境の公正な関係
- 個人の優劣で格付けされないアイデンティティ
- 結束のあるコミュニティ
- 人間らしい生活のリズム
- 自然環境への敬意

は、いままでの考え方の対比としての、生産性から質へ、「産業的」「操作的」ツールから「共生」ツールへ、「創造的破壊」から「耐久性」へ、依存から安定へ、排除から共有へ、切迫感から熟考へ、というガイドライン [24] とも矛盾しない。

4 おわりに

ネットワーク科学が明らかにした、現状の多くのネットワークを脆弱化させる元凶と考えられる利己主義からの脱却の必要性と、しなやかな復活力を持つレジリエンスの概念とその実現のためのネットワークの自己組織化や自己修復のアイデアを紹介した。これらは、あくまで科学技術の知見から議論したものであるが、広く今後の社会のあり方：「自由競争・金儲けを至上とする社会」から「すみ分け・助け合いを基盤とする社会」への転換 [26] にも示唆を与えるものとして、社会人類学にも関連するかも知れない。

とりわけ、一極集中への依存から、多様な主体が分散しつつ、自律した各々が有機的に連帯して互いにどのように助け合うか、事例分析や社会実装のみならず、構成要素の性質に立脚した物質論から離れてシステム論的な共通メカニズムを更に探求していくことは重要な課題と考えられ、社会的意義もある。

謝辞

本研究の一部は科研費 21H03425 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Albert, R., Barabási, A.-L.: Statistical mechanics of complex networks, *Rev. Mod. Phys.*, 74, 1, 47/51 (2002).
- [2] 松下貢: 統計分布を知れば世界が分かる -身長・体重から格差問題まで-, 中公新書 2564, 中央公論新社 (2019).
- [3] Pastor-Satorras R., Smith, E., Solé. R.V.: Evolving protein interaction networks through gene duplication, *J.Theo.Bio.*, 222, 2, 199/210 (2003).
- [4] 山下祐介: 東北発の震災論 -周辺から広域システムを考える-, ちくま新書 995, 筑摩書房 (2013).
- [5] Zolli, A, Healy, A.M.: Resilience: Why Things Bounce Back, Free Press (2012).
- [6] Hollnagel, E.: Safety-I and Safety-II -The Past and Future of Safety Management-, CRC Press (2014).
- [7] Folke, C.: Resilience: The emergence of a perspective for social-ecological systems analyses, *Global Environmental Change*, 16, 253/267 (2006).
- [8] Schneider, C.M., Moreira, A.A., Andrade Jr., J.S., Havlin, S, Herrmann, H.J.: Mitigation of malicious attacks on networks, *Proc. Natl. Acad. Sci.(USA)*, 108, 10, 3838/3841 (2011).
- [9] Tanizawa, T., Havlin, S., Stanley, H.E.: Robustness of onion-like correlated networks against targeted attacks, *Phys. Rev. E*, 85, 046109; (2012).
- [10] Braunstein, A., Dall 'Asta, L., Semerjand, G., Zdeborová, L.: Network dismantling, *Proc. Natl. Acad. Sci.(USA)*, 113, 44, 12368/12373 (2016).
- [11] Karp, R.M.: Reducibility among combinatorial problems, In *Complexity of Computer Communications*, Miller, E. et al. Eds.: Plenum Press, NY, 85/103 (1972).
- [12] Hayashi, Y.: Growing Self-organized Design of Efficient and Robust Complex Networks, *IEEE Xplore Digital Library SASO 2014*, 50/59 (2014).
- [13] Hayashi, Y.: A new design principle of robust onion-like networks self-organized in growth, *Network Science*, 6, 1, 54/70 (2018).
- [14] Hayashi, Y., Tanaka. A, Matsukubo, J.: More Tolerant Reconstructed Networks by Self-Healing against Attacks in Saving Resource, *Entropy, Special Issue: Critical Phenomena and Optimization in Complex Networks*, 23(Issue 1), 102, 1/15 (2021).
- [15] Chujyo, M., Hayashi, Y.: A loop enhancement strategy for network robustness, *Applied Network Science*, 6, 3, 1/13 (2021).
- [16] Chujyo, M., Hayashi, Y.: Improvement of the robustness against attacks in continuously varying degree distributions, *Proc. of the 10th Int. Complex Networks and their Applications* (2021).
- [17] 山下祐介: 「都市の正義」が地方を壊す -地方創生の隘路を抜けて-, PHP 新書 1146, PHP 研究所 (2018).
- [18] Kallis, G. et al. (上原裕美子/保科京子 訳): なぜ、脱成長なのか -分断・格差・気候変動を乗り越える-, NHK 出版 (2021).
- [19] 内橋克人 編: 経済学は誰のためにあるのか -市場原理主義批判-, 岩波書店 (1997).
- [20] Durning, A. (山藤泰 訳): どれだけ消費すれば満足なのか -消費社会と地球の未来-, ダイヤモンド社 (1996).
- [21] 神野直彦 他編: 「分かち合い」社会の構想 -連帯と共助のために-, 岩波書店 (2017).
- [22] Kropotkin, P. (大杉栄 訳): <新装>増補修訂版 相互扶助論, 同時代社 (2017).
- [23] 大窪一志: 相互扶助の精神と実践 -クロポトキン『相互扶助論』から学ぶ-, 同時代社 (2021).
- [24] Sutter, A.J. (中村起子 訳): 経済成長神話の終わり -減成長と日本の希望-, 講談社現代新書 2148, 講談社 (2012).
- [25] Srinivasan, R. (大屋雄裕 監訳, 田村豪 訳): シリコンバレーを越えて -次世代の革新家がめざすデジタル新技術と平等社会- 下, NEWTON PRESS (2021).
- [26] 岩附正明: 幸せな世の中をつくる 80 の提言 -金儲け社会から助け合い社会への転換-, 合同出版 (2011).