

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

キーワード：社会インフラ, レジリエンス, 自己組織化, 自己修復,
分散アルゴリズム, 脱成長, 相互扶助

林 幸雄 (yhayashi@jaist.ac.jp)

北陸先端科学技術大学院大学
先端科学技術研究科/融合科学共同専攻

第 34 回自律分散システム・シンポジウム
Jan.21, 2022

1. 社会を支えるネットワークは極端に脆弱！

全く異なる対象や構成要素であるにもかかわらず、現実の多くのネットワークには**共通の繋がり構造**が存在

社会的関係

知人関係, 企業間取引, 映画の共演, 論文引用, 性的関係, 言語

インフラ技術

インターネット (ルータおよび AS レベル), WWW, 航空路線, 電力網, 電子メール送受信

生物系

神経回路網, 遺伝子やエネルギー代謝の反応系, 食物連鎖

R. Albert et al., Rev. Mod. Phys. 74(1), 2002.

感染を止められない一方, 攻撃に弱い

① 個々の現実ネットが脆い

べき乗分布: $P(k) \sim k^{-\gamma}$

Scale-Free(SF) 構造の性質

頑健性: ランダムなノード故障には極めて強く連結性を保持

$$\lambda_c \leq \frac{\langle k \rangle}{\langle k^2 \rangle} \sim \frac{1}{\log N}$$

脆弱性: ハブへの集中攻撃で極度に分断

理論的裏付け: D.S.Callaway et al., Phys.Rev.Lett. 85, 2000.

⇒ 利己的な優先的選択で生成

さらに, ② 連鎖的被害, ③ 相互依存性が加わった三重苦!



2. 優先的選択：次数に比例したリンク確率

なぜ共通な構造が存在？ → リンク先選択に何か原理があるのでは

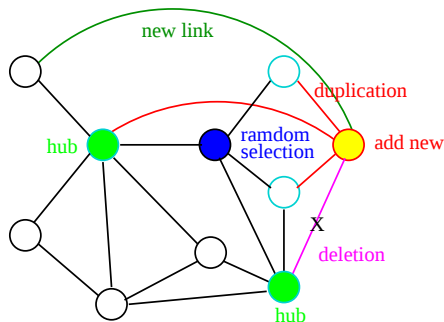
- 国内航空網において新規航路を開設する際、全国各地への多くの乗り継ぎ便を持ったハブである羽田空港に乗り入れると便利で自社の利用客が増える.
- 多くの回線が接続する通信拠点に繋ぐ方が少ない経由数で何処にでも辿り着けそう.
- 貧乏人より金持ちと付き合った方が金回りが良い.

ノードを人に、リンクを経済取引から得るお金に対応付ければ、優先的選択は、"金持ちはより金持ちになる (rich get richer)" 法則に読み替えられる.

優先的選択は単なるネットワーク生成モデルの基本的規則に留まらず、ある種の利己原理を個々人が持てば、例え全体への影響を意図しなくても不平等な世界が生じうる!

無意識なリンク先への真似っ子の結合でも

Duplication-Divergence Model



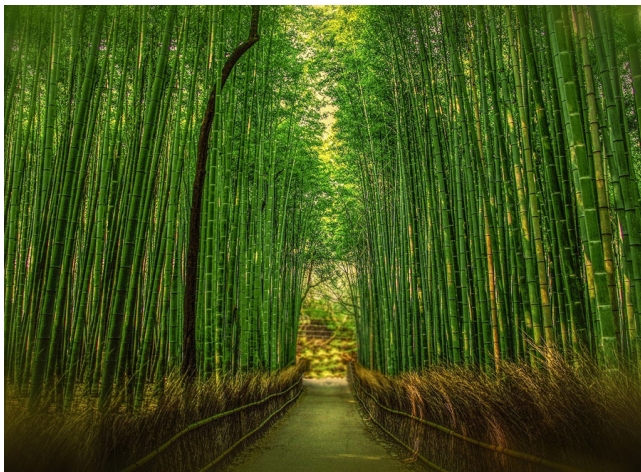
ランダムに選ばれた頂点に隣接するハブにはリンク複写のチャンス大で次数に比例：優先的選択！

R.V.Solé et al., SantaFe Inst. Working Paper 01-08-041, 2001, R.Pastor-Satorras et al., J.Theo.Bio. 222(2), 2003.

注) デタラメのデタラメはデタラメではない

3. レジリエンスとは

困難な状況にもかかわらず、しなやかに適応して生き延びる力



<https://publicdomainq.net/bamboo-forest-arashiyama-0019127/>

レジリエンス的な設計例

クッション性： 車の衝撃吸収ボデー https://www.homemate-research-car-shop.com/useful/11962_shopp_069/

無駄も役立つ： 長谷川著 働かないアリに意義がある, メディアファクトリー新書, 2010

「... 実際に観察すると、アリもハチもその7割はボーッとしており、約1割は一生働かないことがわかってきた。また、働かないアリがいるからこそ、組織が存続していけるというのである！...」

切り分け不能： 神経回路の多機能性

同じ回路で, 引き込み反射と逃避運動パターン生成

P.A.Getting, Emerging principles governing the operation of neural networks, ▶ Annu Rev Neurosci 12, 185-204, 1989

バックアップ切り替えを前提としない対応回復

▶ レジリエンス・エンジニアリングによる新しい宇宙機冗長設計, JAMSS & JAXA, 2015.

レジエントなシステム設計という新概念

レジリエンス（復活力）：固く頑丈でも限界に達すると脆い従来のシステムから脱却して、**必ずしも全く元道りに戻る訳ではないかも知れないが、しなやかに機能を復活させる**ことができる力 ⇒ 新たな設計指針：植物、車、...

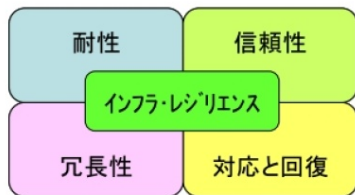


図 1.2-1：インフラ・レジリエンスを構成する4つの要素

防衛基盤整備協会『重要インフラ防護におけるレジリエンス・マネジメントについて』

<https://ssl.bsk-z.or.jp/kakusyu/pdf/25-5tyousa.pdf>

優先的選択はレジリエンスの真逆

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

A.Zolli and A.M.Healy 著（須川訳）「レジリエンス 復活力」, 2013.

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

安全に対する考え方の変革

「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」へ

	伝統的な Safety-I	新たな Safety-II
安全の定義	悪い方向 へ向かう物事が できるだけ少ないこと	できるだけ多くのことが 正しい方向 に向かうこと
安全管理の原則	何かが起こったときに 反応し、応答する	事前対策的 , 発展や事象を 预期するように努める
事故の説明	事故は失敗や機能不全が 原因 で起こる	結果によらず, 物事は同じ 方法で起こる
ヒューマンファクター の見方	責任	資源

E.Hollnagel(吉住) Safety-I から Safety-II へ -レジリエンス工学入門-, オペレーションズ・リサーチ, Aug. 2014.

復元しない再構築も許す

例えば, 燃えて新たに再生する森の生態系のような変革も含む概念

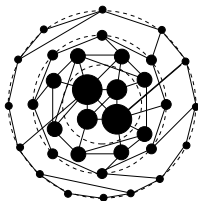
Concept	Characteristics	Focus on
Engineering resilience	Return time, efficiency	Recovery
Ecological/ecosystem resilience, social resilience	Buffer capacity, withstand shock, maintain function	Persistence robustness
Social-ecological resilience	Interplay disturbance and reorganization, sustaining and developing	Adaptive capacity transformability learning innovation

F.Folke, Global Environmental Change 16, 2006.

⇒ レジリエントなネットワークを具体的にどう構築？

4. 攻撃に最も強い耐性を持つ構造の発見

攻撃に最適な結合耐性 = 正次数相関
を持つ玉葱状構造 C.M.Shneider et al.,
PNAS 810, 2011, T.Tanizawa, S.Havlin, and
H.E.Stanley, Phys.Rev.E 85, 046109, 2012.
⇒ リンク全体張り替えのみ Z.-X.Wu,
and P.Holme, Phys.Rev.E 84, 026116, 2011

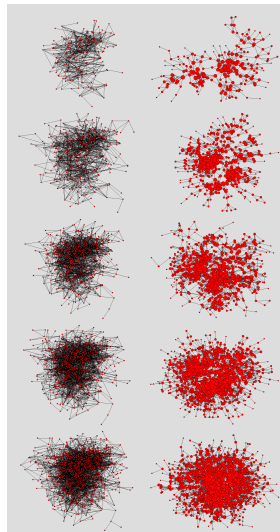


レジリエンス具現化: 世界初の逐次成長法

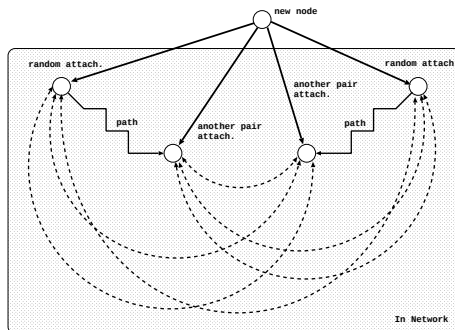
▶ Y.Hayashi, IEEE Xplore Digital Library SASO 2014 ,

Y.Hayashi, Physica A 457, 255-269, 2016.

成長しながら構築!



仲介に基づく玉葱状ネットの自己組織化



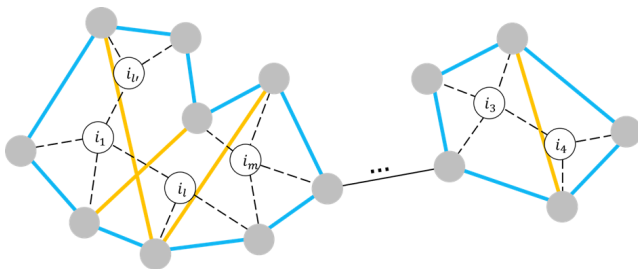
- 逐次成長において、毎時刻に追加される新ノードからの m 本のリンクを $m/2$ 個のペアとして、片方をランダム選択して結合、もう片方はランダム選択ノードから μ 仲介した $\mu + 1$ ホップ先のノードに結合
- バイパス増により、SF よりも過負荷連鎖を抑えられる

⇒ 出来るだけ木構造にならない、ループの強化がより本質的

Y.Hayashi, Network Science 6(1), 2018 [▶ Open Access](#), [▶ Sci.Rep. 8, 11241, 2018.](#)

より良い再構築のための自己修復法

機能不全ノード（白丸）を検出した隣接ノード（灰丸）が2ホップ以上の拡張隣接間で輪形成した後, $M_h \stackrel{\text{def}}{=} r_h \times \sum_{i \in D_q} k_i$ 本まで輪上の弱点をつないでループ強化（黄線）



Y.Hayashi, A.Tanaka, and J.Matsukubo, Entropy 23 (102),

► Special Issue: Critical Phenomena and Optimization in Complex Networks, 2021.

J.Kim, and Y.Hayashi, Proc. of Conf. on Complex Systems 2020.

確率伝搬法 (BP) におけるメッセージ伝搬

NP 困難な最小 FVS 問題を, 統計物理の Cavity 法で近似的に求める

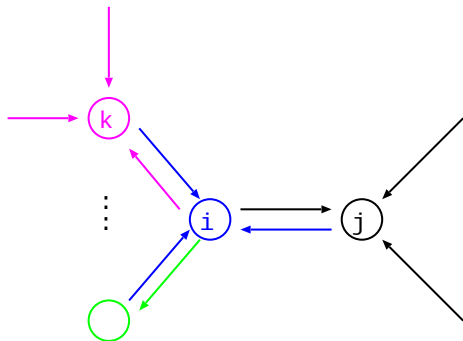
$$q_i^0 = \frac{1}{z_i(t)},$$

$$q_{i \rightarrow j}^0 = \frac{1}{z_{i \rightarrow j}(t)}.$$

反復計算により, i がループ形成に必要な不可欠な FVS に属する確率 q_i^0 を求める

q_i^0 値が小さいノードは部分木に属してループに関与しない弱点と考えられ補強

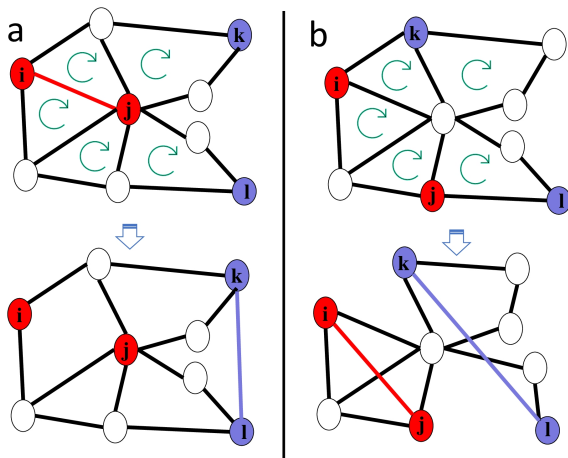
$$q_{i \rightarrow j}^k = \frac{e^{\chi} \prod_{k \neq j} [q_{k \rightarrow i}^0 + q_{k \rightarrow i}^k]}{z_{i \rightarrow j}(t)},$$



H.-J.Zhou, Euro.Phys. J. B 86, 2013.

ループ強化に基づく部分的リワイヤリング

次数, q_i^0 , 全域木数に関してノード選択: a) 次数非保存, b) 次数保存



M.Chujyo, and Y.Hayashi, Applied Network Science 6(3), 2021.

結合耐性を強化する方法（小まとめ）

脆弱性の元凶の優先的選択から脱却すべき！

- 逐次成長における, 部分コピー操作とランダム結合, 及び, 協調的な仲介による **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**
- 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（次数分布が変わる） **リワイヤリング**
- 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**

⇒ 共通操作として, 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

5. 過去, 現在, 今後の世の中を考える

震災で暴露された広域システムの本性：

世の中も同様な構図

中央（都市, 強国, 富裕者） 経済発展が主, 大手に還流	周辺（地方, 弱国, 貧困者） 便利さや目先の利益で受入 (従属化・下位化で搾取される)
一部のハブ 結果的に強者にリンク集中	他ノード 個々の効率性でハブに繋がる (全体の連結性をハブに依存)

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, 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, 主体性を喪失して依存

一方で, 地方の下請けは切り捨て可能で, 長期的な失敗リスクは落し付け

山下著, 「東北発の震災論」, 2013.

利己的な経済至上主義が元凶

際限なき成長を追求する資本主義社会：
個人主義に基づく利己的な「地位財」を強欲に追求
競争して、もっと多く、容易に搾取・略奪する仕組み

これまで	これから
政府縮小-市場拡大	市場抑制-社会拡大
分断され、奪い合う	自助共助で、分かち合う
生産の場を重視	生活の場を重視
量の経済・幸福	質の経済・幸福
(極一部の強者を優遇)	(弱者を助ける)

⇒ 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

G.Kallis et al(上原/保科 訳), 「なぜ、脱成長なのか」, 2021.

そもそも相互扶助だった

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、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 -百年以上前の研究より-

中世以前の共同体：自律と協同は表裏一体で、共同集団の有機的な結合体
「一人は万人のため、万人は一人のために」

↓ 自律分散の共有地だったが

近代国家成立後：共同体が破壊され私利私欲の追求が正当化
「各自は自己のため、国家は万人のため」

+ '80年代以降に提唱された新自由主義「自由を束縛する悪しき平等」

⇒ 自己責任化され、格差がますます増大！

P.Kropotkin(大杉 訳), 「〈新装〉増補補修版 相互扶助論」, 2017.

自律分散の助け合い社会に向けて

自律分散した共同体の協調・連帯：中世以前の社会に戻る訳でなく、国家に基づく共産主義でもない

草の根からの変革で、コミュニティのウェルビーイングを優先した生活に

- 身の丈に合った生活やコミュニティでの暮らしを広める
- 非営利創出で、働く人と使う人のニーズとウェルビーイングが主眼
- 共有と協力を前提にコミュニティ主導で生産
- 資源やエネルギーの消費を抑え、ローカルに多くを循環

すでに、RIPESS 憲章やフェアトレードなど欧州や中南米の社会連帯経済に関連した、共同菜園、地域支援型農業、共有住宅、米 NY 州の地域イントラネット: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が芽生えている！

G.Kallis et al(上原/保科 訳), 「なぜ、脱成長なのか」, 2021.

R.Srinivasan(大屋 監訳/田村 訳), 「シリコンバレーを越えて 下」, 2021.

廣田著, 「社会的連帯経済入門」, 2016.

6. まとめ

現実の多くのネットワークに潜む脆弱さの元凶となる効率偏重の利己主義（優先的選択）を改める必要性と、レジリエンスの考え方に従うことで強固な耐性かつ通信効率を低下させない可能性をシステム論的に提起。

- ① 個々のネットワークは脆く、許容量を超える連鎖被害, 相互依存性も加わり, 中央統制は不可能で自律分散に委ねるべき。
- ② しなやかな復活力 = レジリエンスを高めるには, 多様性, 重複冗長性, 局所分離性, 適正な単純さが重要で, これらは優先的選択の真逆。
- ③ この真逆に基づく具体的な設計としての, 最適耐性を持つ玉葱状構造のネットワーク成長法, 自己修復法, リワイヤリング法を紹介。
⇒ 出来るだけ木構造にならないループ強化が鍵。
- ④ 強者（中央）による弱者（周辺）の従属化と搾取は, 世の中の非常に脆い経済システムにも当てはまり, 利己主義を脱却した今後のあり方として, 「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」へ転換すべき。

付録 1. NP 困難問題における等価性

Decycling グラフ G の decycling 数 $\theta_{dec}(G)$ はループ無グラフにする為に除去するノードの最小比

Dismantling(剥ぎ取る, 裸にする) グラフ G の dismantling 数 $\theta_{dis}(G)$ は GC のサイズが定数 C より小さくなる為に除去するノードの最小比

次数分布 $\{p_k\}$ のランダム疎グラフにおいて

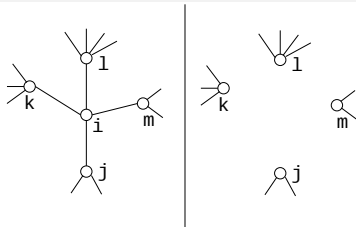
$$\theta_{dec}(p_k) = \lim_{N \rightarrow \infty} E[\theta_{dec}(G)], \quad \theta_{dis}(p_k) = \lim_{N \rightarrow \infty} \lim_{C \rightarrow \infty} E[\theta_{dis}(G, C)].$$

- 任意の次数分布で $\theta_{dis}(p_k) \leq \theta_{dec}(p_k)$
- $\langle k^2 \rangle < \infty$ なら, $\theta_{dis}(p_k) = \theta_{dec}(p_k)$

A.Braunstein et al., PNAS 113(44), 12368-12373, 2016.

付録2. Cavity(空洞) グラフ近似

Bethe-Peierls 近似：
独立積



joint prob.

$$\mathcal{P}_{\setminus i}(A_j : j \in \partial i) \approx \prod_{j \in \partial i} q_{j \rightarrow i}^{A_j}.$$

- ① $A_i = 0$: i は非占有の状態：木の根として不要
⇒ 木以外のループ形成の為の FVS に含まれるノード
- ② $A_i = i$: i 自身が根. i が追加結合された時, 隣接 $j \in \partial i$ の状態 $A_j = j$ は, i が j の根の状態 $A_j = i$ に変化可
- ③ $A_i = l$: i が追加結合された時, ある隣接 $l \in \partial i$ が存在して, 他の全ての $k \in \partial i$ が非占有 or 根なら, l が i の根

H.-J.Zhou, Euro.Phys. J. B 86, 2013.