

社会インフラのレジリエンス

林 幸雄

北陸先端科学技術大学院大学

改訂第2版 2023（URL を一部更新）

1. 現実のネットワークに潜む三重苦

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

しかも, 日々の生活や経済活動, 物流や通信手段, 我々自身の体内メカニズムに至るまで, どれも複雑なネットワークの上で成り立っている.

Extreme Attack Vulnerability

個々の現実ネットが脆い

$$P(k) \sim k^{-\gamma}$$

Scale-free 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

脆弱性： ハブの**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

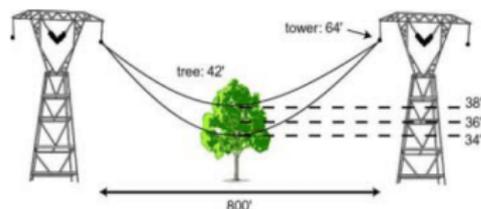
さらに、連鎖被害、相互依存性が加わった三重苦！



連鎖故障のシステム障害

許容量を越えた被害伝搬

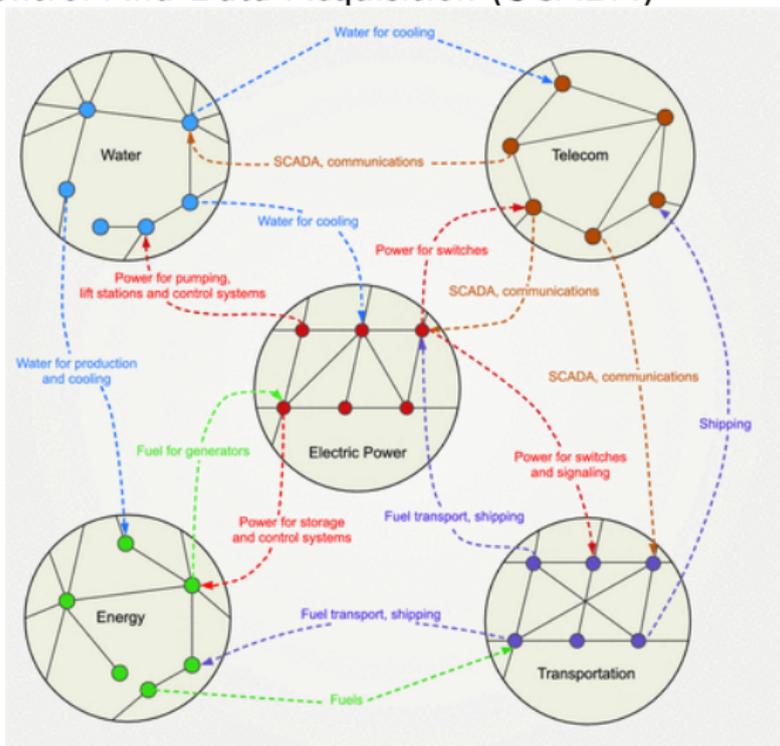
- 電力崩壊: 初期断線からの広域停電
- 道路やパケットの渋滞
- 不況で資金繰りが付かない企業の倒産連鎖
- :



2003年8月14日北米北東部停電事故に関する調査報告書, 2004年3月北米北東部停電調査団 (NERC "August 14 2003 Blackout"), 及び, 北米東部大停電について, IEEJ 2003年8月

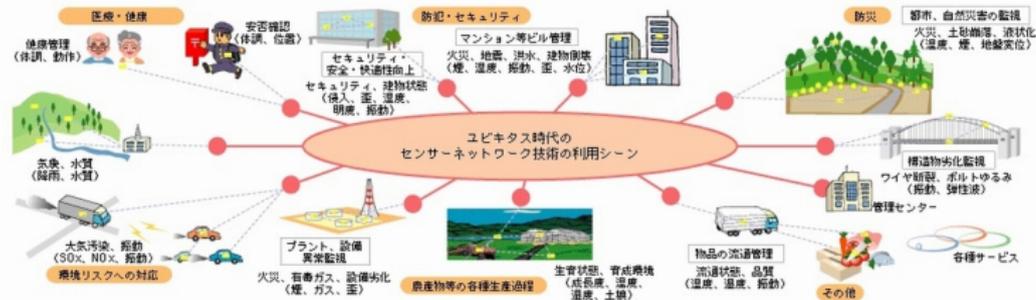
相互依存：社会を支える情報通信

Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)



J.Gao, D.Li, and S.Havlin, *National Science Review* 1, Special Topic: Network Science, 2014.

環境問題とネット脆弱の類似：利己・依存・広範囲



<http://ss-ecota.com/eco>,

http://www.chemsys.t.u-tokyo.ac.jp/research_environment.html,

<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h16/html>

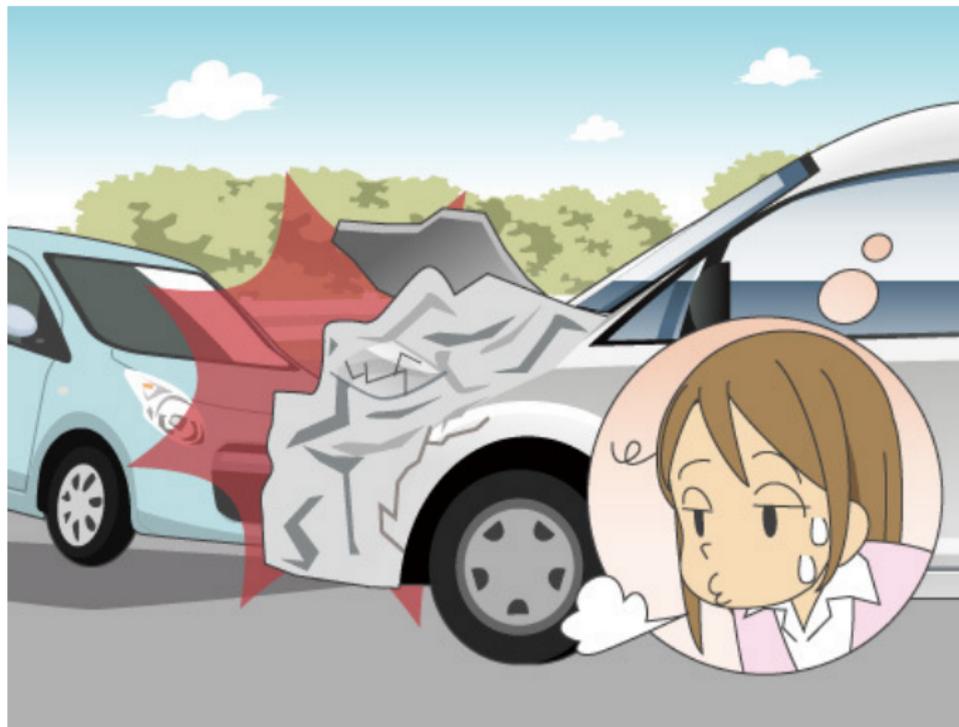
3. レジリエンスとは

レジリエンス

「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」



壊して衝撃を吸収する設計例



http://www.homemate-research-car-shop.com/useful/11962_shopp_069/

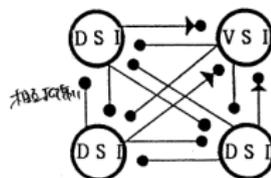
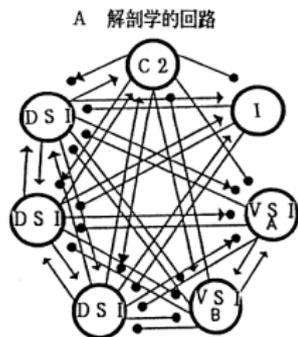


働かないアリに 意義がある

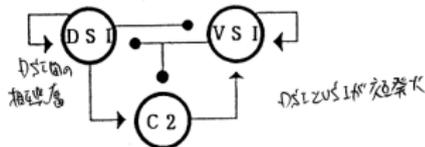
進化生物学者 長谷川英祐・著
メディアファクトリー新書
定価:本体740円(税別)

身につまされる最新生物学！
働き者で知られるアリに、われわれは
思わず共感する。だが、生態を観察す
ると、働きアリの7割はボーっとして
おり、1割は一生働かないことがわかっ
てきた。しかも、働かないアリがいる
からこそ、組織は存続できるという！
これらの事実を発見した生物学者が著
す本書は、アリやハチなどの社会性昆
虫に関する最新の研究成果を人間社会
に例えながら、わかりやすく伝えよう
とする意欲作である。(※カバーより)

神経回路の多機能性



C パターン生成モード (遊泳時)



ウミウシの遊泳運動リズムの神経回路。●は抑制性結合、▲は興奮性結合を表す。A：電気生理学的測定に基づく解剖学的構造。この回路図からだけでは、回路の機能はすぐにはわからない。B：反射モードの機能的構造。各DSI細胞は相互抑制で結合している。C：遊泳モードの機能的構造。各DSI細胞は相互興奮で結合され1つのまとまった集団として働く。図中では1つのDSIにまとめて表現し、自己興奮結合によって相互興奮結合を表している。Getting (1989) より。

⇒ バックアップ切り替えを前提としない

▶ 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』

人とシステムの双方に関するレジリエンス

レジリエンスの定義：システム、企業、個人が極度の状況変化に直面したとき、基本的な目的と健全性を維持する能力

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

システムの脆弱性を増幅するのは複雑さ、一極集中、同質性、効率偏重であり、レジリエンスを高めるのは適正な単純さ、局所性（分離性）、多様性、重複冗長性

A.Zolli, A.M.Healy 著（須川訳）レジリエンス 復活力、ダイヤモンド社、2013

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 予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 訳) 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, 2014Aug

Adaptive Capacity

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 | Context |
|--|---|---|--|
| Engineering resilience | Return time, efficiency | Recovery, constancy | Vicinity of a stable equilibrium |
| Ecological/ecosystem resilience, social resilience | Buffer capacity, withstand shock, maintain function | Persistence, robustness | Multiple equilibria, stability landscapes |
| Social-ecological resilience | Interplay disturbance and reorganization, sustaining and developing | Adaptive capacity transformability, learning, innovation | Integrated system feedback, cross-scale dynamic interactions |

F.Folke, Global Environmental Change 16, 253-267, 2006.

レジリエンスのある世界：自律, 分散, 協調

大事にするもの：

- 多様性, 生態的なばらつき, モジュール性
- ゆっくりと変化する変数を認識する
- 緊密すぎないフィードバック
→ 破滅への閾値を超える前に発見
- 社会関係資本：信頼の絆やリーダーシップ
- イノベーション：変化を受け入れる
- 機関や制度の重複
- 金銭では認識されない開発の提案や評価

枝廣著 レジリエンスとは何か, 東洋経済新報社, 2015

レジリエンス思考の必要性

『ますますグローバル化する世界では、社会状況、保健、文化、民主主義、そして安全保障や生存、環境の問題は複雑に絡み合っており、加速的な変化にさらされている。変化を避けることはできないものの、変化の性質について理解することが必須である。特に、閾値の存在と、実際には元に戻せない、望ましくないレジームシフトの理解は不可欠だ。(中略) 予防的アプローチとレジリエンスに関するより深い理解、および社会システムと経済システムにおける複合的な能力が必要である。』

枝廣著 レジリエンスとは何か, 東洋経済新報社, 2015

レジリエンスの分類

擾乱のタイプ： 意図の有無による人為 or 自然災害, 頻度, 予測可能性,
持続時間, 内部 or 外部要因

対象システム： 生物・生態系, 工学：人工物,
公共インフラ, 金融, 会社組織, 社会コミュニティ
→ 自律性, 粒度, 単一 or 複雑な目的

回復のタイプ： 構造的回復, **機能的回復**, 革新的回復

大学共同法人 著 システムのレジリエンス, 近代科学者社, 2016

レジリエントな（復活力のある）システム設計として具体的に何をどう
考えれば良いのか？

⇒ 強い耐性の自己組織化と自己修復が鍵！