

# レジリエントな社会に向けて

丸山 宏

スマートシティは、環境の状況に応じて柔軟に対応しなければならない。システムズ・レジリエンスは、様々なシステムに共通に見られる、レジリエンスのための知識の体系化を目指すものである。この論文では、システムズ・レジリエンスの基本的なアイデアと、スマートシティとの関連について議論する。

A smart city needs to cope with various threats to survive for many years. We launched a multi-disciplinary research project titled "Systems Resilience" with the aim of constructing a body of knowledge to design and operate resilient systems, borrowing ideas from many different areas such as biology and economics. In this paper we discuss the threats that cities are facing and how smart cities can apply some of the resilience ideas found in the literature.

## 1 はじめに

都市は何十年、何百年と長期に渡って持続可能でなければならぬ。それには、想定外の事象に対して柔軟に対応できる能力を備えていなければならない。2011年3月11日の東日本大震災とそれに続く福島第一原子力発電所の事故においては、「想定外」という言葉が多く使われた。我々の社会が持続可能なものであるためには、様々な外界の事象に柔軟に対応していなければならない。それらの事象の中には、想定されていたものも、想定されていなかったものもあるだろう。そもそも「想定外」とは何だろうか？ そのような事象に対して、我々はどのような備えをすればよいだろうか？

東京大学工学系研究科 緊急工学ビジョン・ワーキンググループ「震災後の工学は何をめざすのか」では、「今回のような震災に立ち向かうためには、災禍の損害から早期の機能回復が可能な技術社会システムを実現するための、レジリアンス工学とも呼ぶべき

Towards Resilient Society.

Hiroshi Maruyama, 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 統計数理研究所, The Institute of Statistical Mathematics, Research Organization of Information and Systems.

新分野を確立しなければならない」と述べている[1]。レジリエンスとは、環境の大きな変化に対して、一時的に機能を失ったとしても柔軟に回復できる能力を指す概念であり、生態学等ではよく知られたものである[2][3]。

我々は、多様な分野におけるレジリエンスを調べることによって、レジリエントなシステムを構築・運用するための共通な知識体系を構築することを目標に、大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構の中に、新たに領域横断型研究プロジェクト「システムズ・レジリエンス」を立ち上げた[4]。

本稿では、そのプロジェクトにおける議論を元に、どうしたら都市をレジリエントに設計し、運用することができるか、また、コンピュータ科学は都市をレジリエントにするために、どのように貢献できるかについて議論する。

## 2 都市が直面する脅威

都市には、その持続可能性に対して様々な脅威がある。

- 経済・産業

都市は、その活動を都市が提供する産業、周辺の経済状況に依存している。これら経済や産業の構

造が変化することによって、都市の存続が脅威にさらされることがある。軍艦島として知られる長崎県端島は、石炭の生産のために一時は 5,000 名以上の人口があったが、1974 年に閉山になり、無人島となった。

- サプライチェーン

どのような都市も、そのエネルギー、水、食料などの物資を、都市外のサプライチェーンに依存している。経済状況その他の要因により、サプライチェーンに支障が出ると、都市の存続に大きな影響がある。北京は深刻な水不足に陥っているという。また、地下水の枯渇による農業生産の低下や、地球温暖化による氷河減少に起因する長期的な水不足も都市の存続の脅威となる。企業のサプライチェーンに関しては、企業の事業継続計画 (BCP) の観点から多くの研究がなされている [5]。

- 自然災害

地震、台風、津波、火山活動などの自然災害によって都市の存続が脅威にさらされる。ポンペイは 79 年のヴェスヴィオ火山の噴火によって滅亡した。東日本大震災では、巨大な津波によって東北沿岸の各都市や、福島第一原発の周囲の市町村などが、大きな被害を受けた。

- 伝染病

多くの人が密集して生活する都市は、伝染病の脅威に対しても脆弱である。1854 年のロンドンのコレラ大流行においては、病人の発生を地理的にプロットした統計情報を元に、井戸水が原因であることが発見され、対策が取られた。

- 戦争・テロ・サイバー攻撃

歴史上、多くの都市が戦争のために滅亡したり多くの被害を被った。インカ帝国は 16 世紀にスペイン人によって滅ぼされた。2001 年のアメリカ同時多発テロ事件や、1995 年の東京における地下鉄サリン事件などは、テロによって都市が被害を受けた例である。また、今後はスマートシティが普及すると、サイバー攻撃による脅威についても考える必要がある。

- 社会の価値変化

人々の価値観の変化も、都市に大きな影響を与え

る。郊外に大きな家と自動車を持ち、週末に大型商業施設で買い物をするのが豊かな生活だと考える価値観と、コンパクトな町で集合住宅に住み、公共交通機関で移動するのが好む価値観とでは、自ずと都市の景観に与える影響も異なるだろう。

- 複雑さ

都市の複雑さそれ自体も、大きな変動の要因になる。Bak らは、「砂山モデル」を利用して、進化するシステムは必然的に臨界点に達し、大きな地すべり現象を起こす、ということを示した [6]。

これらの脅威には、ある程度想定できるものもある。地震等の自然災害は、いつ起きるかはわからないが、どのくらいの頻度で起きるかは、過去の統計から相当のことがわかっている。ただし、非常に稀な事象に対しては、起きるとわかっているにもかかわらず現実的な対策が不可能なために事実上「想定外」とせざるを得ないものがある。岩手県田老町では、明治 29 年と昭和 8 年に最大波高 15m の津波の被害を受けていたが、25 年かけて構築された防潮堤の高さは、10.7m であった。

### 3 レジリエンス戦略

都市をレジリエントにするためには、どのような戦略が考えられるだろうか？都市に限らず、生物学、生態学、経済学、コンピュータ・システムなど、レジリエントな性質を持つシステムは多くある。これらのシステムから学べる、レジリエンス戦略についていくつか概観する。

#### 3.1 冗長性

システムの構成を冗長にすることによって、一部の機能が失われても、全体の機能を維持することができる。2012 年 5 月に、日本の総発電量のおよそ 30% をまかなっていた原子力発電所がすべて停止した。しかし、日本の発電能力に十分な余力があったために、大規模な停電等は起きていない。ある機能に対して余剰の能力があったとしても、それが失われた機能を補完できなければ意味が無い。その意味で、モジュール性あるいは相互運用性は冗長性と共に重要である。また、冗長性には、相応のコストがかかる。したがっ

て、どの程度のレジリエンスを獲得するために、どの程度のコストをかけるべきか、決定しなければならない。

### 3.2 制御

大規模な人工システムによく用いられる戦略で、システムをモニタし、その結果を分析し、プランを立て、実行するというサイクルを回すことでシステムの安定性を確保する。IBM が提唱した Autonomic Coputing [7] の考え方はこれにあたる。この制御ループは、自動的なものもあるし、人間がデータの収集・分析からプランニングまで行うものもある。スマートシティにおいては、ICT がデータの収集・分析のほとんどを担うことが期待されている。この際、特に技術的に重要なのは (1) データを分析してその裏に起きている事象を正しく推測することと、(2) そのモデルに基いて将来を予測し、シミュレートすることでよりよいプランを策定することである。また、このサイクルが速く回ることによって、事態の急速な変化に対しても対応することができるようになる。

### 3.3 社会秩序

規範が確立していて秩序正しい社会においては、外界の変化要因に対する柔軟性が高い。社会の秩序は法律などの規制によるトップダウンの秩序形成と、構成員の自律的な協力・競争関係によるボトムアップな秩序形成がありうるが、どちらの形で秩序形成された社会が、外界の擾乱に対してよりレジリエントであるかについてはまだよくわかっていない。また、一度災害等が起きた場合に、必ずしも元の状態と同一の状態に戻る必要はない、と考えられることである。災害復興などにおいては、現状に復旧するのではなく、むしろより望ましい状態に移行するチャンスと捉えることもできる。このような場合、多様なステークホルダとの合意形成を考えなければならない。このためには、トップダウン・ボトムアップの秩序形成に加えて、合意形成のための規範、構成員の教養・成熟度も重要である。

### 3.4 緊急対応

緊急時には、平時と異なるモードで対応することが必要になることもある。軍隊などでは、Concept of Operations (ConOps) という概念で複数のモードを持つシステムを記述している。予め複数のモードを定義しておき、緊急時にはモードを切り替えることで、異なるポリシー、異なるプロセスでかつ混乱なく業務が行われることを担保しようというものである。IT システムの運用においては、ITIL や ISO27001 などにおいて事故の際の対応プロセスのベスト・プラクティスを定めている。また、ISO/TC223 (社会セキュリティ) においても、危機管理などの手順を定めようとしている。

### 3.5 多様性

生物生態学の分野では、種や生態系の保存のために多様性が重要であると考えられている。コンピュータ・システムや、組織論などにおいても、一様なシステムは特定の攻撃などの脅威に極端に脆弱になることがありうる。多様性がシステムの様々な性質にどのように影響するかについては、多くの研究がある [8]。

### 3.6 再生

システムの古くなった要素を、致命的になる前に壊して、新たに作りなおすこと。生物の個体はある年齢以上には生きられないが、子孫を残すことで種としては存続することができる。長期間動き続けるコンピュータ・システムを時々再起動するのもこれにあたる。

### 3.7 開発・運用方法論

何十年、何百年という長期に渡って持続可能な都市のようなシステムの構築には、要件を固定してからそれをシステムの要素にブレイクダウンしていくような、伝統的なウォーターフォール型の設計手法だけでは限界がある。要件は極めて複雑で、リーズナブルな分量の文書では書き表せないかもしれないし、システムが運用されていくにつれて、要件は不可避的に変わっていくからである。したがって、スマートシティを IT システムとして見た時には、開発と運用が常に

混在する DevOps の考え方を最初から仮定しなければならぬ。

要件のブレークダウンに基づくウォーターフォール型の設計手法に対して、最近議論されているのが、データに基づく帰納的設計論である [9]。帰納的設計においては、システムの要件は、文書の形ではなく、システムの期待される振る舞いを例示する、トレーニングデータセットによって表現される。システムの運用が進むにつれて変化する環境に対しては、環境からトレーニングデータセットを動的に修正していくことによって対応する。

#### 4 科学としてのシステムズ・レジリエンス

以上のように、様々な分野においてレジリエンスを観察することができ、レジリエンスのためのいくつかの戦略を見出すことができる。これらのドメインも目的も規模も異なるシステムの間には、どのような関係があるのだろうか？ 共通なモデル化が可能だろうか？ さらに、システムをレジリエントに設計し、運用するための一般的な方略が導けるだろうか？

システムのレジリエンスに関して、我々が興味を持っているのは、日常の小さな擾乱ではない。小さな擾乱に対しては、制御工学や信頼性工学などのよく知られた方法で対応できるからである。一方、東日本大震災など、稀で規模の大きな事象に対しては、既存の防御の考え方だけではうまく対処できない。そのためコストが現実的でないほど大きくなってしまっている。例えば、東日本大震災で東北地方を襲った津波に耐えられる高さの防潮堤を建設することは、工学的に可能であったとしても、コスト的には現実的ではないだろう。経済学者の竹内啓はその著書「偶然とは何か その積極的意味」において、極めて稀な事象については、起こらないものと仮定し、万が一起きてしまった場合には、その不幸を社会で再分配せよ、と述べている [10]。我々は、防禦と回復の戦略をどのように切り分ければよいのか、最適なメタ戦略を考えて行かなければならない。

複雑かつ大規模なシステムのレジリエンスを評価するためには、汎用的な数理モデル上で様々な動的特性を解明する計算論的手法が不可欠である。我々

は特に大規模システムを様々なネットワークモデル (Boolean, Constraint, Bayesian networks 等) として捉え、想定外のイベントに対するシステム構成の動的変化を効率よく表現するモデリング技法を考案する。またネットワークモデルにおいて、1) 外乱及びシステム変数に対する敏感性 [11]、2) システム状態の予測不可能性 [12]、3) 文法的また意味論的なシステム状態間の距離の概念の導入 [13]、4) ソフト制約をできる限り多く満たすネットワーク構成の更新、5) マルチエージェントにおける多目的最適化問題 [14] 等のダイナミクスを分析する計算理論の構築を行い、レジリエントなシステムを設計するための一般的原理の解明を目指している。

#### 5 今後の課題

本プロジェクト「システムズ・レジリエンス」においては、レジリエントなシステムを設計・運用するための知識の体系 (Body of Knowledge, BOK) を構築することが最終目標である。我々は、以下の 3 点について、答えを持たなければならない。

1. レジリエンスとは何か。その定義と評価基準
2. 様々なレジリエンス戦略のカタログの体系化
3. レジリエントなシステムを設計・運用するための方法論とベスト・プラクティス

本プロジェクトにおいて我々はまず、できるだけ多様な分野におけるレジリエンスの知見を収集し総合する。それによって、レジリエンスとは何かについてより明快な定義とメトリックを導き出すことを予定する。同時に、得られた知見を実行可能な計算モデルとして定式化することで、レジリエンスの本質を解き明かすアプローチをとる。

このように、システムズ・レジリエンスは、コンピュータ科学の方法論と、生物学、経済学、組織学、社会学などの知見を組み合わせた領域横断型の科学である。より広い視野に立った議論を通して、レジリエントな社会の実現をめざしていきたい。

## 参考文献

- [1] 東京大学工学系研究科 緊急工学ビジョン・ワーキンググループ, 「震災後の工学は何をめざすのか」, <http://www.t.u-tokyo.ac.jp/epage/topics/pdf/vision.pdf>, 2011.
- [2] Holling, C. S., Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, vol. 4, 1973.
- [3] Walker, B., C. S. Holling, S. R. Carpenter, and A. Kinzig. Resilience, Adaptability and Transformability in Social-Ecological Systems. *Ecology and Society*, 9 (2): 5, 2004.
- [4] 丸山他, システムズ・レジリエンス, FIT2012 予稿集, to appear.
- [5] Yossi Sheffi, *The Resilient Enterprise*, MIT Press, 2005.
- [6] Per Bak, Chao Tang, and Kurt Wiesenfeld. Self-organized criticality: An explanation of the  $1/f$  noise. *Physical Review Letters*, 59:381, Jul 1987.
- [7] Kephart, J. and Chess, D. The Vision of Autonomous Computing. *IEEE Computer*, January, 2003.
- [8] Scott E. Page, *Diversity and Complexity*, Princeton University Press, 2011.
- [9] 椿広計, 設計論的モデリング論, JST システム科学技術推進研究会, 2010.
- [10] 竹内啓. 偶然とは何か その積極的意味, ISBN-13: 978-4004312697, 2010.
- [11] Chan, H. and Darwiche, A. On the Revision of Probabilistic Beliefs Using Uncertain Evidence. *Artificial Intelligence*, 163(1):67-90, 2005.
- [12] Chiaki Sakama and Katsumi Inoue. Abduction, Unpredictability and Garden of Eden. *Model-Based Reasoning in Science and Technology (MBR 2012)*, Sestri Levante, Italy, June 2012.
- [13] Sebastien Konieczny, Pierre Marquis, Nicolas Schwind. Belief Base Rationalization for Propositional Merging. *Proc. 22nd International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-11)*, page 951-956, 2011.
- [14] Tenda Okimoto, Yongjoon Joe, Atsushi Iwasaki, Toshihiro Matsui, Katsutoshi Hirayama and Makoto Yokoo. Interactive Algorithm for Multi-Objective Constraint Optimization. *Proceedings of 18th International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP 2012)*, 2012, to appear.