

# レジリエンスへの科学的アプローチ

○丸山 宏 (統計数理研究所)

## A Scientific Approach to Resilience

\* Hiroshi Maruyama (The Institute of Statistical Mathematics)

**Abstract**— Some systems are resilient (and thus sustainable) while others are not. Our question is, are there common features that make systems more resilient? By investigating many different domains we are trying to understand the science behind resilience. Following the tradition of science, we first categorize various resilient and non-resilient systems into taxonomy and make a catalogue of resilience strategies. Then we propose a mathematical model to represent resilience and draw some implications from it.

**Index terms**— Resilience, Sustainability, Interdisciplinary research

### 1 はじめに

生態システム, 工学システム, 社会システムなど, 様々な領域において, 擾乱に対して弾力的(レジリエント)であり, 生き残るシステムもあれば, 生き残ることができずに消えてなくなっていくシステムもある. レジリエントなシステムとそうでないシステムの間にはどのような違いがあるのだろうか? 我々は, システムのレジリエンスを科学的に解明するため, 情報・システム研究機構の領域横断的研究プロジェクト「システムズ・レジリエンス」を2012年に立ち上げた<sup>1</sup>. 本稿では, その4年間にわたるプロジェクトにおける主要な成果[1]を概括する.

科学の伝統に従って, 我々は(1)既存のシステムを観察し, 分類することによってその原理的な性質を導くのと共に, (2)レジリエンスに関して数理的なモデルを作り, そのモデルから理論的な性質を導く, という2つのアプローチを取った. 本稿では次章で前者の結果として様々なレジリエンスのタクソノミについて述べ, それらに対して有効な戦略を3章で議論する. 4章では, それらの知見にもとづいてレジリエンスの理論的なフレームワークを提案しその意味するところについて述べる.

### 2 タクソノミ

レジリエンスは文脈に依存する概念である. あるシステムがレジリエントである, と言うときに, それがどのような擾乱に対してなのか, 対象とするシステムは何か, どのステークホルダの観点からなのか, など様々な状況によって見方が変わる. 従って, 我々はまず, レジリエンスの文脈を定義しなければならない. 多くのレジリエンスに関する先行研究を調査した結果, 我々はレジリエンスの文脈は, 少なくとも1)擾乱のタイプ, 2)対象とするシステム, 3)回復のタイプの3つの軸に整理することができると思う. それらについて, 以下に見ていく.

#### 2.1 擾乱のタイプ

● **意図の有無**  
擾乱には地震・台風・津波など自然災害のように, 意

図を持たないものと, サイバー攻撃・テロ・戦争など攻撃者による意図的なものがある. 意図を持たない擾乱は, システムの状態や目的に関わらず, 一定の確率分布によってランダムに生じると考えられることができる. 一方, 意図的な攻撃は, その目的に従って, システムの最も脆弱な点を突くなど創造的かつ最適化されたものとなる.

● **頻度**

擾乱には, 高頻度で起きるものもあれば, 極めて稀なものもある. WHOによれば, 2010年には全世界で124万人が交通事故で死亡したという. 交通事故は被害者にとって致命的な脅威であり, これだけの高い頻度で起きるからには, 何らかの対策を施さなければならない. 一方, 1,000メガトンクラスのエネルギーを持つ隕石衝突は1万年から10万年の頻度で起きると考えられている. しかし, このように極めて稀な事象に対して備えることは, コスト的に合わないかもしれない. このような場合は, リスクを認識した上で敢えて対策をしない, という選択もありうる.

● **予測可能性**

擾乱を予測できる場合がある. 近年では台風の進路はかなり精度で予測できるものの一つである. 台風の上陸地点が予測できれば, 水害が予想される地域からの事前の避難を行うことができる. 一方, 地震については, 長期的な時間軸において統計的な予測はできるが, 特定の大規模地震の時刻と震源を事前に予測することは難しい. このような場合, レジリエンス戦略の主眼は, 予測に基づく事前準備ではなく, 事象発生後の緊急対応と回復に充てられることになるだろう.

● **継続時間**

擾乱はその発生から終了までの継続時間に大きなバリエーションがある. 落雷はその発生から終了までが極めて短時間であり, その間に何か対応できる可能性は小さい. 一方, 地球温暖化のような擾乱では, その継続時間が極めて長い. 事象の継続時間が長ければ, その発生を検出して対応することは, 有効なレジリエンス戦略となる. この事象継続時間は, 絶対的な長さではなく, 対応スピードとの相対的な長さであることに注意されたい. 地震は比較的継続時間が短い事象だが, それでも震源における地震発生から, 対象となる地域に地震波が達するまでには距離に応じて数秒から数分の時間差がある.

● **内部性**

自然災害や意図的な攻撃などの擾乱はシステムの外

<sup>1</sup> <http://systemsresilience.org/>

部から来る。一方、システムの内部から発生する脅威もある。Per Bakらは、有名な「砂山モデル」で、単調に複雑さを増していくシステムは自己崩壊することを示した[5]。2008年に発生した金融危機は典型的な内部崩壊の例である。

## 2.2 対象システム

レジリエンスのタクソノミの2つ目の軸は、対象となるシステムそのものである。

### ● 対象領域

レジリエンスは様々な対象領域で研究されている。生態学、生物学、金融、社会コミュニティ、組織などである。

### ● 粒度

レジリエンスを語る時に、個別の個体を対象とするのか、個体の集合として考えるのか、で粒度の差がある。心理学におけるレジリエンスは、個人の心がいかに精神的外傷から回復するかについて考える。一方、社会におけるレジリエンスでは、個人の生存も重要であるが、社会全体の存続が主眼となる。生態学におけるレジリエンスでは、系が多数の種からなり、そのうちの幾つかの種が滅亡しても、系全体が存続すればそれはレジリエントな生態系と考えるのが一般的である。このように「誰にとってのレジリエンスか」という観点は、特に多様なステークホルダが絡む社会システムのレジリエンスにとって重要な観点となる。

### ● 能動性

生物や生態系などのシステムは、擾乱に対する回復のメカニズムを内在的に持ち、自律的にレジリエントだと言える。地球上の生物はおよそ40億年前に発生し、その後何度も絶滅の危機に瀕したが今でもその子孫は存続している。これを我々は受動的レジリエンスと呼ぶ。一方、社会システムや企業などは、その維持に人間の知的作業による介入が強く関わっている。人間の知的作業が介入することによって擾乱に対応するとき、我々はこれを能動的レジリエンスと呼ぶ。

### ● 機能

あるシステムは、明確にその目的関数を持っている。企業の業績は、売上高や利益など、少数の明確に定義された指標で評価できる。一方、社会コミュニティのように、多数のステークホルダがいて、システム全体の目的関数をはっきりしない場合もある。

## 2.3 回復のタイプ

システムがレジリエントであるとは、擾乱に対して何らかの回復が行われるということである。この回復についてもいくつかのタイプが考えられる。

### ● 構造的レジリエンス

システムが擾乱の前と全く同じ構造に戻る時に、これを構造的レジリエンスと呼ぶことにする。工学的システムにおいて、破損した部品を交換することがこれにあたる。

### ● 機能的レジリエンス

システムが機能を維持するためには、必ずしも擾乱前と同じ構造に戻る必要はない。システムの機能が同

等以上である限り、異なる構造に変化することも可能である。

### ● 適応的レジリエンス

状況によっては、システムはその機能や目的を失ったとしても、別の機能・目的を持った新たなシステムとして生まれ変わった時に、少なくともあるレベルの同一性を維持できればレジリエントであると考えられることもできる。

## 3 レジリエンス戦略

システムをレジリエントにする戦略は様々なものが考えられる。我々は、それらの戦略を、Fig.1に示すレジリエンス・サイクルに沿って整理する。

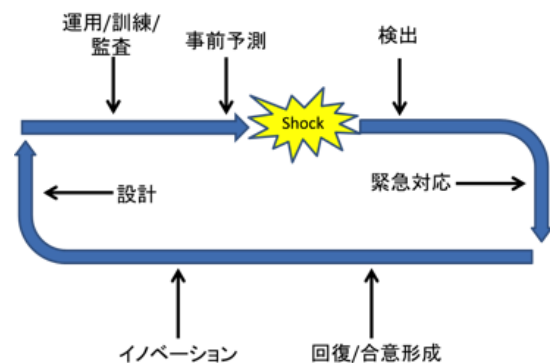


Fig. 1: Resilience Cycle

### 3.1 設計時のレジリエンス戦略

自然に発生した生態系等を除き、多くのシステムはシステム設計時にレジリエントになるよう意図的に設計されている。設計時に組み込まれるレジリエンス戦略には以下の様なものがある。

### ● 冗長性

冗長性戦略にはいくつかのパターンがある。マージンの増大は、より高い津波に耐える防潮堤を作る、など、想定する擾乱を大きくし、それに耐えるシステムとする、という考え方である。多重化は、データセンターにおいて電源やネットワークをバックアップするシステムを準備するなど、システムの運用に不可欠なリソースが擾乱によって失われないようにする。相互運用性は、多重化と似ているが、複数のサブシステムのバックアップ資源の相互運用性を向上させることにより、より少ないバックアップ資源で多重化の効果を出す。

### ● 多様性

多様性は、想定できない擾乱に対して、システムの一部がダメージを受けたとしても、他の部分が生き残ることによってシステムの存続を図るのに有効な戦略である。多様性を導入する方法にも、いくつかのパターンがある。多様性指標管理は、組織においてマイノリティ従業員の割合を管理することによって、直接的に多様性を維持するなど、多様性指標を管理する考え方である。ポートフォリオは、多様性指標管理の中で、特に金融の世界で使われる概念である。このため、間接的に多様性を導入するための戦略として、収穫逡減

則の効果があることが知られている[1].

- 資源・管理の分散化

一般に、資源や管理が集中化しているシステムは全体最適化がしやすいが、一旦中枢部分が壊れるとシステム全体が存続の危機に陥る。分散化システムはより障害に強い。例えば、インターネットは（DNSなど一部を除き）分散システムとして設計されているために、ネットワークの一部が失われたとしても柔軟に機能を回復することができる。

- リスク転移

比較的頻度が高く、生起確率やその期待損失がよくわかっている擾乱に対しては、保険をかけるなどして、そのリスクを他者に転移することは有効な戦略である。

### 3.2 運用時のレジリエンス戦略

システムが構築され、運用が始まった後でも、その通常運用時に適用されるレジリエンス戦略がある。

- 訓練

地震や火災など想定される災害に対して、その準備態勢を整えるために訓練を行うことは広く行われている。訓練には、事前に通告して行うスケジュールされた訓練と、抜き打ちで行う訓練がある。Googleなどのデータセンターにおいては、“Game Day”と称して抜き打ちで意図的に障害を注入する訓練も行っている。

- マネジメントサイクル

システムが運用されていくと、当然その環境も変化し、構成メンバーが変化する。また、工学システムの場合は部品が劣化するなどの変化が生じる。これらの経時変化に対して、システムの本来設計された機能を維持するためには、PDCAサイクルを回すことが必須である。

- 効率化

擾乱が起きた場合、システムがその維持のために必要とする資源の供給がストップすることがある。このため、システムは通常運用時には、システムのアウトプットを最大化するような効率化を行い、できるだけ多くの予備資源を蓄積することが有効である。国であれば国民1人あたりGDP、企業であれば1株あたり利益のような指標が用いられる。

- 抑止

意図的な攻撃に対しては、抑止戦略も効果がある。抑止に役立つのは、早期警戒や防護手段を見せることで攻撃が成功しないだろうと思わせることや、法的な制裁や、報復手段を持つことによって、攻撃を思いとどまらせるなどの方法がある。

### 3.3 早期警戒に関するレジリエンス戦略

擾乱がやってくるのがわかれば、実際の擾乱が来る前にできることがある。

- 擾乱の予測

擾乱の予測には、データ収集とその分析が重要である。データ収集には、様々なセンサーネットワークが使われる。また、擾乱の予測には、数理的な予測モデルを作り、シミュレーションを行う。

- 早期対策

擾乱が予測される場合は、それに応じて対策を取る

ことができる。大型の台風が来ることがわかれば事前に公民館に集まるなど早期避難ができる。テロの危険が高まったと判断すれば、警戒レベルを上げてより適切に攻撃を検出したりタイミングよく対応したりすることができる。

### 3.4 緊急時のレジリエンス戦略

特に人命に関わるような事象の場合は、発生直後に特に必要な打ち手がある。これらを緊急時レジリエンス戦略と呼ぶ。

- 擾乱の検出・損害評価

まずは発生した擾乱を検出しなければならない。擾乱の検出には、予測と同様にデータの収集とその分析が必須である。状況認識(Situational awareness)は、システムのデータの収集とそれに基づく分析を指す言葉として使われる。さらに、損害が起きた場合には、その損害の評価をすることが大切である。

- ダメージコントロール

擾乱が検出され、被害が出たことがわかれば、次に行うことはそれ以上の被害拡大を避ける必要がある。これがダメージコントロールである。ダメージコントロールには、いくつかの方策がある。原子力発電所のECCS(緊急炉心冷却装置)のようにシステムを自動停止するのはその一つである。また、コンピュータネットワークがウィルスによって攻撃された際に、侵入を受けたマシンをネットワークから切り離すなど、被害を受けた部分を正常な部分から切り離す分離(Isolation)も重要な戦略である。

- ポリシーの切り替え

緊急時には、システムの優先順位が変わることがある。通常時には、個人情報の保護は重要だが、ひとたび人命に関わる状況になれば、個人情報を保護するよりも人命を救助するほうを優先しなければならない。このためには、個人情報保護のポリシーを一時的に切り替えなければならないかもしれない。

- 現場のエンパワメント

どんなに周到に準備をしても、実際に緊急事態になると、想定していないことが起きるものである。現場では、その場の状況に応じて臨機応変に対応する必要がある。このためには、現場で危機対応を行う第一応答者(first responder)がかなりの自由裁量を任されている必要がある。

### 3.5 回復時のレジリエンス戦略

人命に関わる緊急期が過ぎると、システムは回復期に入る。回復時には、以下の戦略が有効である。

- 資源割当の最適化

災害の復興などにおいては、その情報伝達の混乱から、必ずしも必要な資源が必要な場所に届かないことがある。資源を有効に、かつタイムリーに配送するためには、十分な情報の収集と、資源割当の最適化を行う必要がある。

- 利他主義

災害の際に、多くの人々が自分の利益を後回しにして他人を助けることで、コミュニティ全体の復興が進む例が複数報告されている。このように、非常時に利

他的な行動を生み出す土壌を醸成しておくのもレジリエンス戦略といえる。

● 境界拡大

ある対象システムを回復しようとするとき、多くの外部システムに依存していることが判明し、結局のところより広いスコープのシステムの回復全体を考えなければならないことがある。広域災害時に企業の回復を考える際、企業そのものだけでなく、サプライチェーンを構成する取引先や、地域の市場の回復も同時に考えなければならないことなどが、それにあたる。状況に応じて、システムの境界を柔軟に考えなければならないことがわかるだろう。

3.6 イノベーション時のレジリエンス戦略

システムに擾乱があったとき、それはリスクでもあるが、同時にシステムを再構成し、より良いシステムに発展させるチャンスでもある。我々はこれを、通常の回復によるレジリエンスを表現する“bounce back”という言葉に対して、“bounce forward”という言葉で表現することができる。“Bounce forward”のための戦略もいくつか考えることができる。

● 事後調査

擾乱が起きた後、事後調査を行い、その一連の事象、状況や意思決定の推移を再構成し、何が想定外だったのか、何がうまく行き、何がうまく行かなかったのかを調査することは、将来のシステムの設計のために重要な情報となる。

● 合意形成

コミュニティのように多くのステークホルダが関与するシステムでは、システムをどのようなものに“bounce forward”させるかには、ステークホルダの合意形成が必要である。住民参加で都市計画を考える参加型企画(participatory planning)という考え方は、合意形成の一つの方略である。また、法制度における共同規制(co-regulation)の考え方も、合意形成の一つの形であると言える。このような合意形成に使えるテクノロジーとしては、様々な選択枝の帰結をシミュレーションによって可視化する、などの方略がある。

● 研究開発投資

組織や社会が長期的にイノベーションを起こし、よりレジリエントになっていくためには、研究開発投資が有効な戦略の一つであることは改めて言うまでもな

いことだろう。

3.7 メタ戦略

以上、様々なレジリエンス戦略を概括したが、これらの戦略は常に有効であるとは限らない。それぞれの文脈に応じて、効果のある戦略もあれば、そうでない戦略もある。このため、我々は戦略選択の支援ツールとして、レジリエンスの文脈と戦略との対応表を作成しようとしている(Fig. 2)。これはまだ作業中の表であるが、一つのメタ戦略を示すものと言える。

また、戦略の間にはトレードオフがある。冗長性や多様性はコストのかかる戦略であり、そのためにシステムの効率が犠牲になり、有事に必要な資源の蓄積が足りなくなることもある。ダメージを受けた地域の分離は全体を救うには有効な手段だが、同時にその地域の住民には過剰な負担を強いることになる。これらのトレードオフを、どのようにバランスするかは、メタ戦略であり、我々としては今後の課題と考える。

4 レジリエンスの数理モデル

複雑かつ大規模なシステムのレジリエンス性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、計算機科学の知見を元に、レジリエンスの数理モデルを提案し、そこから論理的に導かれるいくつかの性質について議論する。

4.1 SR Model

我々は Fig. 3 に示すようにシステムの状態が、有限の記述で表現できると仮定する。このことは、システムの状態を長さ  $n$  のビット列で表すことができる、と言い換えることができる。システムは、 $2^n$  通りの異なる状態を持つことができる。

システムはある時点で、環境に適応している。環境への適応性は、これらのビット列に対する制約という形で表現することにする。環境(制約)  $C$  は、システムの状態空間の部分集合として表す。一般にシステムの状態  $s$  の環境  $C$  に対する適応度はシステムの状態空間における適応度関数で定義できる。ここでは説明を簡略化するため、状態  $s$  が環境  $C$  に適応 ( $s \in C$ ) してい

Taxonomy		Phase of Concern		Design Time		Operation Time		Early Warning		Emergency Response		Recovery		Innovation		
		Cause	Frequency	Level of Anticipation	Timescale	Source	Domain	Human Involvement	Granularity	Utility	Resilience	Diversity	Redundancy	Adaptability	Flexibility	Robustness
Type of System	Type of Shock	Natural														
		Intentional	x													
		Frequent														
		Rare		x	x											
Type of System	Type of Shock	Predictable														
		Unpredictable														
		Acute														
		Chronic														
Type of System	Type of Shock	External														
		Internal														
		Biological														
		Engineering														
Type of System	Type of Shock	Civil Infrastructure	x	x												
		Financial														
		Organization														
		Society														
Type of System	Type of Shock	Passive														
		Active														
		Individual														
		Community														
Type of System	Type of Shock	Ecosystem														
		Simple														
		Complex														
		Structural	x	x	x											
Type of System	Type of Shock	Functional														
		Adaptive														

Fig. 2: Taxonomy-Strategy Matrix

るかまたは不適応 ( $s \notin C$ ) であるかの2値を考慮する適応度関数を考えることにする. システムの状態  $s$  が環境  $C$  に適応しているとは,  $s \in C$  が成り立つと定義する.

さて, 環境  $C$  が変化して,  $C'$  になったとしよう. もし, 今のシステム状態  $s$  が新たな環境に適応していない, すなわち  $s \notin C'$  とする. その場合, システムは新しい環境に適応すべく, システム状態を変化させなければならない. 例えば, 一度に1ビットを反転させて  $s \in C'$  になるにはどれだけのステップがかかるか, という問題を考えよう. もし, 環境の変化に対して常に  $k$  ステップ以内で  $s \in C'$  とすることができれば, このシステムは  $k$ -レジリエントと呼ぶことにする.

これは非常にシンプルな数理モデルであるが, 我々はこの考えを拡張してレジリエンスの数理モデル SR-Model を構築した[2]. このモデルでは, レジリエンスは, 外界の擾乱とシステム管理者の対応が交互に行われる, 2 プレイヤーのゲームの軌跡(System State Trajectory, SST)として解釈される(Fig. 4). この軌跡のコスト(あるいはコストの移動平均)がある閾値を超えない場合, システムはこの軌跡に関してレジリエントだったと定義する.

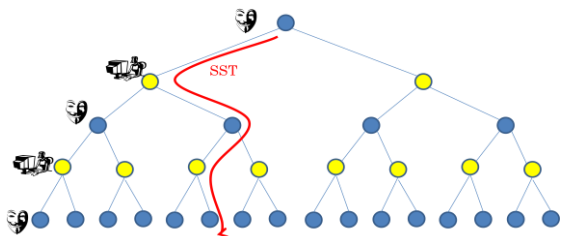


Fig. 4: Resilience as Two-Player Game

#### 4.2 レジリエンスの指標

このモデルから得られる帰結の一つは, レジリエンスの指標に関するものである. レジリエンスの指標としてよく知られているのは, Bruneau による, Resilience Triangle というものである(Fig. 4). これは, 起きた事象に対して, システムのパフォーマンスを計測し, 本来あるべきパフォーマンスとの差を積分したもの(図でいえば三角形の部分の面積)をレジリエンスの指標とするものである. これを, 事後レジリエンス指標(performance metric)と呼ぶ. Fig 4 における軌跡に対してコスト関数を割り当てることに相当する.

事後レジリエンス指標は, 起きてしまった事象に対してシステムのレジリエンスを評価するには使える

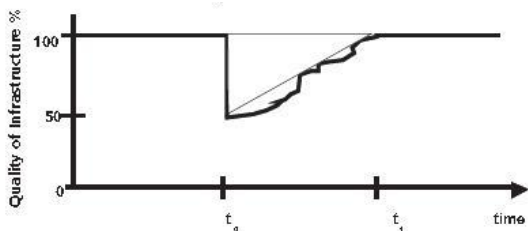


Fig. 4: Resilience Triangle

が, 将来起きうる事象に対して, システムがレジリエントにふるまうかについての知見を与えてくれるわけ

事後レジリエンス指標 (performance metric)	事前レジリエンス指標 (competency metric)
過去に生じた事象	将来の事象
実証された指標	想定上の指標
客観的	(しばしば)主観的
絶対的指標	相対的指標(「システム A のほうがよりレジリエント」)
一つのタイムライン	複数のタイムラインを考慮

Table 1: Performance Metric vs Competency Metric

ではない. 我々が欲しいのは多くの場合, 将来に起きうる事象に対して, システムがレジリエントであるかどうかの指標である. これを我々は事前レジリエンス指標(competency metric)と呼ぶ. 事前レジリエンス指標を客観的に求めることは難しい. 将来にどのような事象が生起するかわからないからである. このため, 事前レジリエンス指標は多くの場合, ドメインに依存した主観的な指標となる. 例えば都市におけるレジリエンスの評価においては, 市民一人あたりの GDP, 教育水準, 失業率などの指標を組み合わせ, どの都市が将来の擾乱に対してよりレジリエントであるかを判断する, ということが行われている. このため, 事後レジリエンス指標と事前レジリエンス指標を明確に結びつけることができない.

我々の SR-Model を用いると, 事前レジリエンス指標は, 「起きうるすべての将来に対しての事後レジリエンス指標の最大値」のような形で, 事後レジリエンス指標と事前レジリエンス指標の間の関連付けを行うことができる. もちろん, このためには「起きうるすべての将来事象」を数え上げられることが前提となる.

#### 4.3 レジリエンスの時間地平線

このモデルから理論的に得られる一つの帰結は, レジリエンスを語るには, 有限の時間地平線を設ける必要がある, ということである. Fig. 4 において, 外界の擾乱とシステムの回復が, それぞれシステムのコストを 50% の確率で +1, -1 すると仮定する. そうすると, システムのコストの軌跡はランダムウォークとなる.

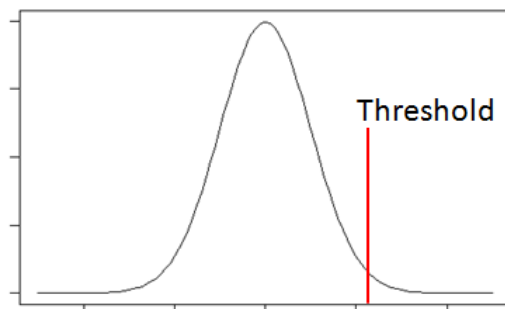


Fig. 5: Prob. Dist. of Cost of Random Walk

ランダムウォークの結果, コストが最終的に取る値は, このランダムウォークを無限回試行すれば初期コストを中心とした正規分布になることが知られている.

このことは, どんな有限の閾値を設定しても, 時間軸を無限に取る限り, ゼロでない確率でシステムのコストが閾値を超えることを意味する. したがって, 時間軸を無限に取る限り, レジリエンスを保証するシステムは実現できないことが理論的に示される.

レジリエンスを実際に議論する時には, 時間地平線について意識することは少ないと思われるが, 我々が狙うレジリエンスとは, 次の10年なのか, 100年なのか, 1,000年なのか, というタイムスケールを意識してレジリエンスを議論することが重要である, というのが我々の数理モデルから言えることの一つである.

## 5 終わりに

様々なシステムのレジリエンスに関して, その科学的なアプローチについて議論した. レジリエンスの科学的解明には, 多くの分野の知見を統合した学際的研究が不可欠であり, この分野の発展を期待したい.

## 謝辞

本プロジェクトは, 情報・システム研究機構の新領域融合センターの活動の一環として, 統計数理研究所, 国立遺伝学研究所, 国立情報学研究所他のメンバーとともに実施しているものである. プロジェクトをサポートしていただいた情報・システム研究機構の北川機構長と, プロジェクトを実施して下さったメンバーに感謝する.

## 参考文献

- 1) Hiroshi Maruyama and Kazuhiro Minami. Towards Systems Resilience. *Innovation and Supply Chain Management*. 7(3), 2013.
- 2) Nicolas Schwind, Tenda Okimoto, Katsumi Inoue, Hei Chan, Tony Ribeiro, Kazuhiro Minami, and Hiroshi Maruyama. Systems Resilience: a Challenge Problem for Dynamic Constraint-Based Agent Systems. In *Proceedings of the 12th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS)*, May, 2013.