

# レジリエンスのタクソノミと共通戦略

丸山 宏, Roberto Legaspi, 南 和宏

様々な分野におけるレジリエンスの文脈を整理するため、レジリエンスのタクソノミを、1) 擾乱のタイプ、2) 対象とするシステム、3) レジリエンスの局面、4) 回復のタイプの4つの軸に整理した。また、その中で共通と思われるレジリエンス戦略（冗長性・多様性・適応性）について議論し、それらを数理的モデルの上で表現するための枠組みを提案する。

キーワード：システムズ・レジリエンス、タクソノミ、共通戦略

## 1. はじめに

2011年3月に発生した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は、「想定外」に対応することの難しさを浮き彫りにした。想定外の事象 [1, 2] を考えるとき、システムが一時的にせよその機能や完全性を失うのは避けられない。障害を防止するのではなく、障害の発生を避けられないものとした上で、いかに回復し、システム全体を存続させるか、すなわちシステムをいかにレジリエントにするかについての議論の重要性が再認識されたと言えよう。この回復のプロセスは、必ずしも現状復帰を意味しない。システムの一部が破壊されたことを機会として、よりよいシステムへ変化していくことも、レジリエンスの重要な側面と捉えることができるからである。

生物、生態系、組織、社会システムなど、現存するシステムは常に変化にさらされているがその多くはレジリエントであり、生き残ってきている。我々はレジリエントなシステムに共通な性質、あるいはシステムをレジリエントに設計・運用するための共通戦略を科学的に解明する目的を持って、情報・システム研究機構の新領域融合センターに分野横断的プロジェクト「システムズ・レジリエンス」を2012年に立ち上げた [3]。本稿では、この4年間のプロジェクトの前半で得られた知見について述べる [4]。

レジリエンスは広い概念であり、様々な文脈において様々な意味に使われる。我々はまず、次節でこれら様々な概念をレジリエンスのタクソノミとして整理する。第3節では、冗長性、多様性、適応性というレジ

リエンスの共通戦略について述べる。特に、多様性とそれをもたらす収穫逓減の法則について深く議論する。第4節では、これら様々なレジリエンスの性質を数学的にモデル化し、検証する試みについて紹介する。

## 2. レジリエンスのタクソノミ

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。したがって、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) レジリエンスの局面、4) 回復のタイプの4つの軸に整理することができる。それらについて、以下に見ていく。

### 2.1 擾乱のタイプ

まず我々は、レジリエンスがどのような擾乱に対してのものなのか、について考える。擾乱のタイプを考える上で、その意図の有無、頻度、予測可能性、継続時間、内部性の5つの観点に分類する。

#### 2.1.1 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。インターネットは、ネットワークのランダムな故障に対しては極めて頑健だが、ルートDNSサーバーの乗っ取りなど、いくつか特定の攻撃に対し

まるやま ひろし, ロベルト レガスピ, みなみ かずひろ  
情報・システム研究機構 統計数理研究所・新領域融合研究センター  
〒190-8562 東京都立川市緑町 10-3

ては脆弱であることが知られている [5].

### 2.1.2 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ぬ。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。一般に、頻度の高い脅威に対しては防止 (prevention) の戦略が、稀だが影響の大きい脅威に対しては回復 (recovery) の戦略が有効である。

### 2.1.3 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の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。したがって、この場合事象の発生予測とそれに基づく事前準備は、レジリエンス戦略の主要な選択の一つとなる。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。

### 2.1.4 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。新幹線は遠方で発生した地震を検出してただちに列車を停止させるシステムを持っていて、東日本大震災においては、地震波が線路に到達する前にすべての列車の速度を十分に低下させることに成功

し、この結果東日本大震災においては新幹線での死傷者はゼロであった。

### 2.1.5 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 [6]。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。

### 2.2.1 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 [7]、生物学 [8]、金融 [9]、社会コミュニティ [2, 10]、組織 [11] などである。

### 2.2.2 粒度

レジリエンスを語るときに、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な外傷から回復するかについて考える [12, 13]。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 [14]。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 [7]。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ー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。

### 2.2.3 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。

### 2.2.4 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。明確な目的関数を持ったシステムであれば、特定の脅威シナリオに対するレジリ

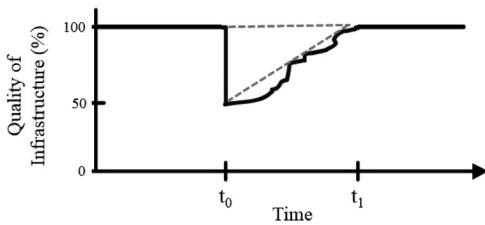


図1 Bruneau のレジリエンス・トライアングル

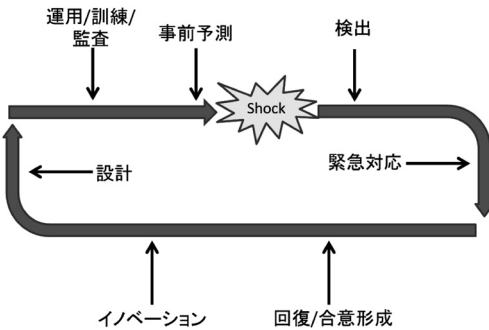


図2 レジリエンスサイクル

エンスを、例えば図1に示す Bruneau's Triangle [15] によって定量化することができ、その指標を基にシステムの最適化を行うことができる。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 レジリエンスの局面

レジリエンスは、システムのライフサイクルの様々な局面に関連する。タクソノミの第3の軸は、レジリエンス戦略がどの局面に注目するか、という観点である。我々は、レジリエンスに関するシステムのライフサイクルを図2のようなモデルで考える。

### 2.3.1 設計時

多くのレジリエンス戦略は、設計時にシステムに組み込まれる。データセンターを設計する際に、電源やネットワークシステムを多重に用意するのは、設計時の判断である。

### 2.3.2 運用時

通常時にシステムがどのように運用されているか、もレジリエンスに大きく影響する。ITIL, COBIT, ISO27001[16] など、情報技術のマネジメントに関するベストプラクティスは、システムの導入、アップデート、監視、訓練、内部点検などシステムの運用全般において、システムを継続的に健全に保つための戦略をまとめたものと考えられる。

### 2.3.3 事前予測

擾乱事象が予測可能な場合は、早期警戒システムを導入することは有効なレジリエンス戦略となる。スーパーコンピュータによる台風の進路予測は一つの例である。

### 2.3.4 検出

擾乱事象に対応するためには、まずその発生を検出しなければならない。自然災害のようなものはその発生が明らかであるが、近年脅威が増している APT (Advanced Persistent Threat) というサイバー攻撃は、その発生を検出するのが困難である。擾乱事象を安定的に検出することができ、発生してから被害をもたらすまでの経過時間にある程度の余裕がある場合には、その検出に投資するのは有効なレジリエンス戦略である。

### 2.3.5 緊急対応

通常に対応が不可能な巨大事象が生じた場合、システムは一時的にそのモードを変えて緊急対応をしなければならない。大切なのは人命を救うことと、被害の拡大を食い止めることである [17]。自然災害においては、発生後 72 時間が人命救助の可能な一つの目安であり、この期間は災害対策本部に意思決定の全権を与えるなど、通常のポリシーとは異なる優先順位で事態に対応しなければならない [8]。

### 2.3.6 回復/合意形成

緊急対応が一段落すると、レジリエントなシステムは回復モードに入る。この際、限られた資源の中で、どの機能を優先的に回復させるかについては、複数のステークホルダの間で合意形成が必要になることもある。

### 2.3.7 イノベーション

擾乱は必ずしも負の側面だけでなく、それをきっかけとしてよりよいシステムに生まれ変わるチャンスと見ることもできる。これはレジリエンスサイクルの重要なポイントである。イノベーションが起きた場合には、システムは新たな設計フェーズに入り、新たなサイクルを開始する。

このようにレジリエントなシステムは、擾乱を受け、それから回復するというサイクルを繰り返しながら存続していくものと考えられる。なお、上記のサイクルの各局面の名称は社会システムなど人によって管理運営されるもの（能動的レジリエンス）を念頭において名づけたものだが、自然界においてもこのようなサイクルは見ることができ。

## 2.4 回復のタイプ

上記レジリエンスサイクルにおいて、回復にはいくつかのタイプが考えられる。

### 2.4.1 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ときに、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。

### 2.4.2 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。1980年代までホストコンピュータのハードウェアビジネスで一世を風靡していたIBM社は、1990年代初頭にコンピュータのダウンサイジングの動きに出遅れて、一時は企業存続の危機に直面したが、その事業の柱をソフトウェアとサービスにシフトして生き残ることができた。企業の収益という機能を維持しながら、事業構造を変化させて回復した、機能的レジリエンスといえる。

### 2.4.3 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ときに、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 [18]。大日本帝国は第二次世界大戦によって壊滅的な打撃を受けたが、終戦後は自由と民主主義に基づく新たな価値観の国へと生まれ変わった。その間、日本としての同一性は完全ではないが、ほぼ保たれていると言えよう。このように、必ずしも初期の機能や目的は維持しないが、システムとしての同一性を大勢として維持するとき、我々は適応的レジリエンスと呼ぶ。

## 2.5 レジリエンスのタクソノミ

以上、レジリエンスの文脈を4つの軸で整理した。それを図表として表したものが、表1である。このフ

レームワークを用いることにより、様々な状況におけるレジリエンスの文脈が明らかになり、レジリエンス研究者の間の相互理解が向上することを期待したい。

## 3. レジリエンスの共通戦略

前節では、レジリエンスが様々な文脈の中で語られることを見てきたが、それらの間に共通の性質はあるだろうか。あるいは、共通なレジリエンス戦略はあるのだろうか。我々は少なくとも、冗長性、多様性、適応性については、文脈によらずに広く見られる戦略であると考えられる。

### 3.1 冗長性

システムの部品、機能などを冗長化して、ある一部が機能停止してもシステム全体として機能を保つ冗長性の考え方は単純でわかりやすいものであり、高信頼性を要求される宇宙航空工学などでは普遍的に見られる戦略である。また、生物システムにおいても、遺伝子の働きは多くの冗長性を持っていて、例えば大腸菌において、4,300個の遺伝子のうち4,000個については、それらのうちどれか1個の機能が失われても、菌全体の機能は失われないことが知られている [19]。

冗長性を上げるために、システムのすべての部品について、それぞれの代替品を用意するのはコストが高い。もし、それぞれの部品が共通のインターフェースを持っていれば、汎用の部品を用意してバックアップすることで、少ない代替部品で冗長性を向上させることができる。このように、システムの部分のモジュラリティは、冗長性を向上させるサブ戦略であると捉えることができる。

### 3.2 多様性

多様性 [20] は地球上の生命の存続に重要な役割を果たしてきた。40億年の間に、巨大隕石の衝突など絶滅の危機に瀕してきたにも関わらず、地球上の生物が全

TABLE I  
TAXONOMY FOR RESILIENCE

1) Type of Shock	Cause	Natural	←-----→			Intentional
	Frequency	Frequent	←-----→			Rare
	Anticipation	Predictable	←-----→			Unknown unknown
	Time Scale	Acute	←-----→			Chronic
	Source	External	←-----→			Internal
2) Target System	Domain	Biology	Engineering	Financial	Legal	Civil Infrastructure
			Organization	Community	Society	
	Passivity	Passive	←-----→			Active
	Granularity	Individual	←-----→			Multiple Type
3) Phase of Resilience	Objective	Simple	←-----→			
	Design Time	Operations	Training	Evaluation	Early Warning	
	Detection	Emergency Response	Recovery	Consensus	Innovation	
4) Type of Resilience		Structural	←-----→		Adaptive	
			Functional	←-----→		



減せずに残っているのは、多様な種のどれかが新しい環境にも適応できたからだと考えられている。

株式取引におけるポートフォリオの考え方も、多様性によるレジリエンスの現れと見ることができる。期待利得を最大にするのが目的であれば、最も期待利得の高い銘柄に全額投資するのが最適な戦略であるが、その場合、その株式がデフォルトを起こしたときには全額を失ってしまう。いくつかの株式に分散投資する（すなわち多様性を上げる）ことで、最悪の場合のリスクを抑えることができる。同様に、サプライチェーンマネジメントにおいて、サプライヤを特定の一社に限るのではなく、コストがかかっても複数社に分散させるのも、多様性に基づくレジリエンス戦略と考えることができる。

多様性をシステムに組み込む一つの方法は、その目的関数に収穫逓減の法則を適用することではないかと我々は考えている。集団遺伝学において、突然変異が少しでも環境適合性において有利であれば、有利な突然変異が積み重なった個体が支配的になるのは避けられない。しかし、自然界の遺伝子多様性はこのようなモデルでは説明できない。明石ら [21] は、有利な突然変異の組み合わせは、環境適合性において収穫逓減性を持ち、そのために多様性が維持されているのであると考えている。

### 3.3 適応性

適応性は環境の変化に対してシステムが適応する能力であり、環境の変化の速度に対する相対的な概念として定義される。

生物は高い適応性を持つことが知られている。生物の適応の仕組みの一つは、進化によるものである。生物は遺伝子の突然変異によって新たな変種を生み出すことができる。そのうち環境により適したものが有利になり生き残ることで、進化していく。進化による適応は、世代交代によって緩やかに起きるので、急速に

変化する環境には対応できない。

フィードバックは生物や工学システムによく見られる適応性戦略である。我々の体は自律神経系とホルモンなどによって、体温など様々な状態をコントロールしている。これによって、比較的短期における環境変化に適応している。機械等における制御システムも同様であり、環境やシステム状態の変化をセンスして、それをフィードバックすることによってシステムを安定に保つ。いずれも時定数が重要な概念であり、環境の変化に追いつき、なおかつシステムが不安定にならないようなフィードバックループが必要である。

ITシステムにおいては、2003年にIBMが提唱したオートノミックコンピューティングがある [22]。生態の自律的な回復力にヒントを得た考え方であり、システムに対する擾乱を検知し、対策を選択し、それを適用して効果を測定する、というサイクルを自動的に回すことによってレジリエンスを実現しようとするものであり、このような考え方はコンピュータシステムにとどまらず多くのシステムで使われている。

近年、Google や amazon.com のような企業では、巨大なデータセンターの維持のために、意図的に小さな擾乱を発生させることを行っている（“Game Day” と呼ばれる） [23, 24]。これによって、運用部隊の適応性が維持されるという考え方である。

## 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。我々は図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。

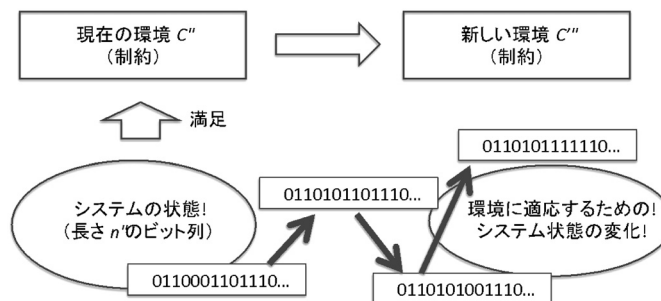


図3 レジリエンスの数理モデル

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。

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、ということを考えよう。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。

架空の宇宙船システムの例でさらに具体的に説明する。宇宙船は $n$ 個の部品から構成され、各部品 $i$ の状態は2値ビット $n_i$ で次のように表現される。つまり部品 $i$ は正常状態であれば $n_i = 1$ であり、そうでなければ $n_i = 0$ となる。したがって宇宙船の状態は長さ $n$ のビット列で表現される。宇宙船はすべての部品が正常である場合のみ環境に適応していると見なされ、制約条件は $C = 1^n$ と記述される。またこの宇宙船がときおり隕石と衝突するイベントDの発生で最大 $k$ 個の部品が壊れる可能性がある。もし宇宙船が離散時間における各タイムステップで1個の部品を修理できるとすると、この宇宙船はイベントDに対して $k$ -レジリエントと呼ぶことができる。

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[25]。現在は、この数理モデル上でシステムのレジリエンス性を検証するアルゴリズム、さらにレジリエンス性を実現するためのコストに関する最適化アルゴリズムの研究を行っている。今後は、どのような環境の変化、どのような適応の戦略、どのような多様性があれば、よりレジリエントなシステムを実現できるかを、このモデルを通して考えることができる、と我々は期待している。

## 5. 終わりに

我々は、本稿で述べたタクソノミと共通戦略を、数理モデルの上でエージェントベースのシミュレーション

によって検証し、これらの知見を知識体系としてまとめたいと考えている。それによって、社会インフラ、組織、工学システムなどのレジリエンスを達成するための一助としたい。

**謝辞** 本稿は、情報・システム研究機構新領域融合研究センター「システムズ・レジリエンス」プロジェクトに参加している約20名のメンバーの集大成であり、各メンバーに感謝する。また本プロジェクトを支援していただいている情報・システム研究機構 北川機構長に謝意を表す。

## 参考文献

- [1] J. L. Casti, *X-Events: The Collapse of Everything*, HarperCollins, 2012.
- [2] N. N. Taleb, *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable*, Random House, 2007.
- [3] "Transdisciplinary Research Integration Center Systems Resilience," <http://systemsresilience.org/>
- [4] H. Maruyama and K. Minami, "Towards Systems Resilience," *Innovation and Supply Chain Management*, **7**, 105–111, 2013.
- [5] A. Barabasi and E. Bonabeau, "Scale-free networks," *Scientific American*, **288**, 50–59, 2003.
- [6] P. Bak, C. Tang and K. Wiesenfeld, "Self-organized criticality: An explanation of the  $1/f$  noise," *Physical Review Letters*, **59**, 381–384, 1987.
- [7] C. S. Holling, "Resilience and stability of ecological systems," *Annual Review of Ecology and Systematics*, **4**, 1–23, 1973.
- [8] H. Maruyama, K. Watanabe, S. Yoshihama, N. Uramoto, Y. Takehara and K. Minami, "ICHIGAN Security: A Security Architecture that Enables Situation-Based Policy Switching," In Proceedings of *The 3rd International Workshop on Resilience and IT-Risk in Social Infrastructures (RISI)*, Sept. 2013.
- [9] L. Briguglio, G. Cordina, N. Farrugia and S. Vella, "Economic vulnerability and resilience: Concepts and measurements," *United Nations University-World Institute for Development Economics Research*, 2008.
- [10] J. A. Tainter, *The Collapse of Complex Societies*, Cambridge, Cambridge University Press, 1988.
- [11] ASIS Commission on Standards and Guidelines, "Organizational Resilience: Security, Preparedness and Continuity Management Systems—Requirements with Guidance for Use Standard," *ASIS*, 2009.
- [12] A. S. Masten, "Ordinary magic: Resilience processes in development," *American Psychologist*, **56**, 222–238, 2001.
- [13] S. Moskowitz, "Longitudinal follow-up of child survivors of the Holocaust," *Journal of the American Academy of Child Psychiatry*, **24**, 1985.
- [14] A. Ride and D. Bretherton, *Community Resilience in Natural Disasters*, Palgrave Macmillan, 2011.
- [15] M. Bruneau, S. E. Chang, R. T. Eguichi, G. C. Lee, T. D. O'Rourke, A. M. Reinhorn, M. Shinozuka, K. Tierney, W. A. Wallace and D. von Winterfeldt, "A framework to quantitatively assess and enhance the

- seismic resilience of communities,” *Earthquake Spectra*, **19**, 733–752, 2003.
- [16] ISO/IEC 27001:2013, Information technology—Security techniques—Information security management systems—Requirements, 2013.
- [17] P. Brennan, “Lessons learned from the Japan earthquake,” *Disaster Recovery Journal*, 22–26, 2011.
- [18] L. H. Gunderson and C. S. Holling, *Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems*, Island Press, 2002.
- [19] F. Dalerum, E. Z. Cameron, K. Kunkel and M. J. Somers, “Interactive effects of species richness and species traits on functional diversity and redundancy,” *Theoretical Ecology*, **5**, 129–139, 2012.
- [20] A. Purvis and A. Hector, “Getting the measure of biodiversity,” *Nature*, **405**, 212–219, 2000.
- [21] H. Akashi, N. Osada and T. Ohta, “Weak selection and protein evolution,” *Genetics*, **192**, 15–31, 2012.
- [22] J. O. Kephart and D. M. Chess, “The vision of autonomic computing,” *Computer*, **36**, 41–50, 2003.
- [23] ACM, “Resilience Engineering: learning to embrace failure: A discussion with Jesse Robbins, Kripa Krishnan, John Allspaw, and Tom Limoncelli,” *Queue*, **10**, article 20, 20–28, 2012. <http://doi.acm.org/10.1145/2367376.2371297>
- [24] A. Tseitlin, “The Antifragile Organization: Embracing failure to improve resilience and maximize availability,” *Communications of the ACM*, **56**, 40–44, 2013.
- [25] N. Schwind, T. Okimoto, K. Inoue, H. Chan, T. Ribeiro, K. Minami and H. 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.