Vol.2014-ICS-177 No.9
2014/12/15

# スケールフリー・トポロジーにおける不染化を応用した減災評価方法

岡﨑孝太郎[†1]　　井上克巳[†2]

災害に強いまちづくりとして減災が注目されている．減災は，災害の発生を前提に二次被害まで含むリスクを軽減する取り組みである．一方，予期せぬ巨大事象の衝撃を吸収し損害から回復するシステムに関する研究も進む．システムズ・レジリエンスである．不完全情報下のレジリエンス評価は本分野の未決問題であり，減災はその具体例である．本論は複雑ネットワークの理論的枠組みの中で，事象の媒質群にスケールフリーなトポロジーを仮定し，進行する事態と減災を二者間のゲームと捉える．生命情報学で知られる不染化戦略で減災を定式化し，レジリエンスシステムの統一的な設計原則である SR モデルへ組み込むことで，未知のダイナミック環境での最適な減災評価を実現する．

# Disaster Risk Reduction Assessment : Immunization on Scale-free Topology

KOTARO OKAZAKI [†1]　KATSUMI INOUE [†2]

## 1. はじめに

減災は 1995 年 1 月 17 日に発生した阪神・淡路大震災を経て生まれた日本独自の概念である(1)．被害はいずれにせよ発生するものと仮定した上で，発生以前から発生直後まで，被害を甚大化させず逆にリスクを逓減させる取り組み全般を指す．以降その概念はこれまで再度の震災経験を経てさらに，地域防災力の向上をめざす各自治体のまちづくり構想において重要な戦略として浸透している．

総務省が取りまとめた減災に資する ICT 技術やサービス分野は，①緊急通報②安否確認③被害予測④情報収集に大別される(2)．そこで紹介されている 18 件の技術動向のうち 16 件が, 災害発生以降の被害軽減など事後措置に相当する．同様にアメリカでも災害現場や事件現場での標準化された対応規則であるインシデント・マネジメント・システム(3)が定められており，あらゆる不測事態発生時に準拠が義務づけられている．減災技術の主動向はこのように事態発生後の危機管理であり，災害発生以前から発生中といった激変する環境下で求められる情報処理技術は，シミュレーションによる被害量の事前算出以外見当たらない．2014 年 10 月, 原子力規制委員会は原子力発電所の重大事故での住民の避難範囲を決める際，緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム(SPPEDI)の計算結果を利用しないと決めた．被害予測技術とその結果が，予測精度や周知すべき時機の面で不確定要素を含んでしまうため，責任上過失が許されない公的発表に馴染まないのである．しかしこのことは被害予測技術が不要であることを意味しない．減災における予測技術の本質は，被害が生じるメカニズムの解明と，そうした知識に基づく不完全でかつダイナミック環境での，想定外の被害可能性の発見にある．

そうして近年さまざまな分野で複雑システムのレジリエンス性に関する探究が重要性されてきた．しかし例えば生物学やコンピュータ科学等でレジリエントな事例が多々みられながら，研究上の共通の定義も，特定ドメインの実相をレジリエントなシステムへ移し変える方法論も従来明らかではなかった．予期せぬ事象や変化による巨大な規模の摂動によって機能性が一時的に失われても，システムが迅速に体よく復旧し長期的な機能を維持できるようなレジリエントなシステムを設計，運用する一般原則の呈示と知識の編成を目指す研究はシステムズ・レジリエンス(4)と呼ばれて着手されつつある．現在体系化されているレジリエンスのタクソノミー(5)が表 1 である．

Taxonomy of 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 Organization | Financial Community | Legal Society | Civil Infrastructure |
| | Passivity | Passive | ← | | | → Active |
| | Granularity | Individual | | Single Type | | Multiple Type |
| | Objective | Simple | ← | | | → Complex |
| 3] Phase of Resilience | | Design Time Detection | Operations Emergency Response | Training Recovery | Evaluation Consensus | Early Warning Innovation |
| 4] Type of Resilience | | Structural | | Functional | | Adaptive |

表 1　レジリエンスのタクソノミー

このタクソノミーから記述すれば，減災の評価とは，無作為に発現する低頻度の予測不能な急峻事象について，被害発生メカニズムを見極め，事前事後に適切なアクションを

†1 総合研究大学院大学 複合科学研究科 情報学専攻　後期博士課程
†2 国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系　教授

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

絶えず適用させていく一連の手続きと定義できる．そして減災の評価が災害発生という事態に近接するほど，不完全情報下での判断を求められる．しかし現時点のシステムズ・レジリエンスは過去からのダイナミックなシステム形状に関する完全な知識を前提とする(6)．減災はシステムズ・レジリエンス上の未解決課題なのである．

本論は，不完全情報下での減災評価方法について一連のプロセスを呈示する．常時大量に外部から流入するセンシングデータや SNS のコメントデータなどを活用して，災害科学のオントロジーに即したドメイン毎の背景知識を構築する．これを基に複雑ネットワークの理論的枠組みの中で，ドメイン内知識を表す実体同士の関係にネットワークを，そのトポロジーにスケールフリーを仮定する．そしてネットワークの状態遷移によりハザードの媒質となる状況を更新する．その上でハザードと呼ばれる危険事象の進行と減災とを 2 者間のゲームと捉える．媒質のダイナミック環境下で発生し被害を拡大させていくハザードを粒度と同期を示すサイト・パーコレーションとしてモデル化し，パーコレーション上で影響力の強いノードを不染化して感染の進行を分断する戦略によって減災を定式化する．パーコレーションが臨界の近傍にあるとき，不染化戦略はどのように最適なオプションを持ち得るのか．我々はコスト関数を適用して戦略を数値化し，レジリエントなシステムの統一的な設計原則である SR モデルへ組み込む．プロセスの理解を助けるために広域火災のドメイン例を添えて説明していく．最後に，未知のダイナミック環境での最適な減災評価を実現へ向けて，今回呈示した方法から見出される今後の研究課題を述べる．

## 2. 捉えられ始めたハザードのダイナミクス

図 1　東日本大震災時の宮城県石巻市に発生したグリッドロック現象．左:地震発生 1 時間前　右:地震発生 15 分後

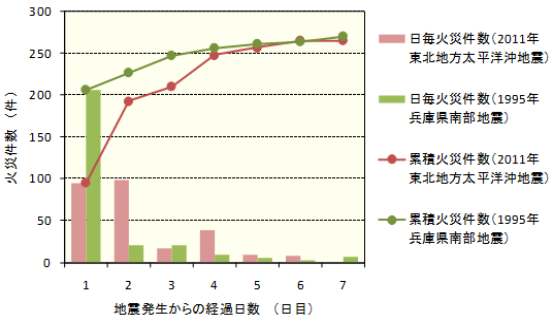


図 2　地震発生からの経過日数と火災発生件数の関連

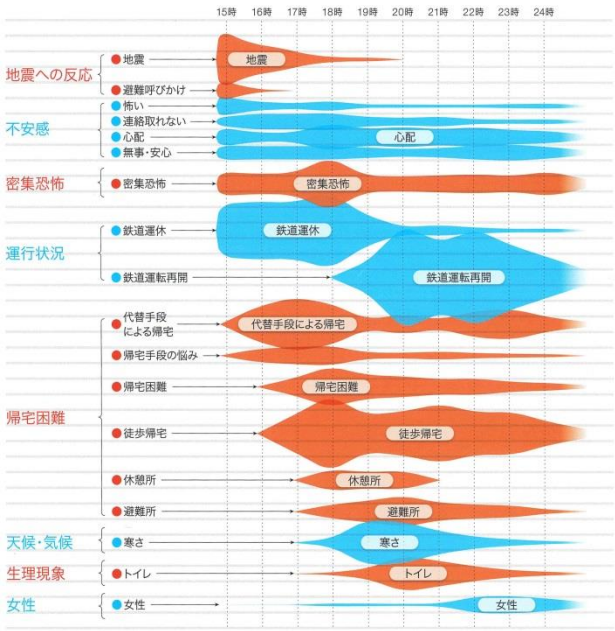


図 3　地震当夜の東京都渋谷区周アークで発せられた SNS ログ解析による帰宅困難者の心理の時系列動向

2011 年 3 月 11 日に東北地方を襲った東日本大震災は，情報技術の高度に駆使した現代社会として我々が初めて遭遇した巨大災害である．それはすなわちハザードを直接把握する観測値のみならず，被災者がその瞬間まで日常生活で使用していた多くの情報機器とプラットフォーム上に，ハザードが被害発生に繋がる瞬間とその拡大の様を記した，かつてない膨大なログが図らずも残された災害でもある．

地震発生後 15 分で，宮城県石巻市の中心市街地ではグリッドロック[a]とよばれる超渋滞現象が発生した(図 1)．それがさらに 15 分後に市の東西を渡る国道の約 30km にのぼる未曽有の大渋滞につながった．この様子は走行車両など移動体に残されたダイナミックなデータ解析によって初めてその成長過程が明らかになった(7)．また地震発生による家屋倒壊を直接の契機としない，津波に起因する火災発生という，従来想定されなかった被害の拡大が消防の出動記録の時系列解析と GPS データから初めて捉えられた(図 2) (8)．そして地震当夜の東京都心では，実況的に発せられた大量の SNS のコメントログから刻一刻と変化する帰宅困難者の心理と事態の推移が抽出されている(図 3) (9)．超渋滞は河川に囲まれた石巻市の地形的特徴と少ない橋梁，駐車車両の一斉発車によって急激に増幅した．津波による火災は家屋や車両の瓦礫の漂着堆積にともない，燃料や比重の軽い油が水面に拡散，車両の電池からの漏電が海水によって導電され，瓦礫の衝突で引火，火は街路を満たした海水面を伝わって次々に延焼した．これらの解析結果は共通して，被害を引き起こすハザードにダイナミクスが存在し，災害科学における知識更新や減災での被害予測が非単調推

a) グリッドロックとは，渋滞車両の列が周アーク交通網上の全交差点で他方向からの車両通行を遮断したために発生する完全な交通麻痺状態をさす．

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

論であることを示している．そして不完全ながらもこれらの現象を科学的に捉えられるアプローチの登場が，ハザードと被害拡大を表すシステムモデルの構築可能性を高めた点について特記しなければならない．ダイナミック環境から得られるさまざまな大量データによって不完全情報の補遺と更新を進め得る実相こそが，実践可能な減災評価方法の論理的根拠だからである．

## 3. 減災評価方法

地震や出火といったハザード自体と被害の程度との関係は決定論的ではない．ハザードに起因し被害を発現させ増幅する要因は，それが発生した状況のインスタンスの組み合わせによる処が大きい．例えば人家の乏しいジャングルに囲まれた山岳で，深夜に発生した火山噴火と，頂上付近の紅葉を楽しむため登山客が繰り出した山岳で，日中に発生した火山噴火では，同じハザードでも被害は後者の方が甚大になる．またグリッドロックや津波火災の例はインスタンスの特殊な組み合わせの発現の結果であるだけでなく，インスタンス同士の決定論的な作用が二次災害の誘発につながる可能性を示唆している．

そこで本論ではハザードと，ハザードのいわば媒質である状況のインスタンス群とを独立事象とする．減災という概念ではハザードは常に無作為で予測不能だからである．状況を構成する変数群において，ドメインからなるインスタンス集合が時間経過とともに遷移する．つまりいずれ紅葉が散り冬になり，気温が下がって登山客は減る．

複数のインスタンス同士の作用をダイナミックな有向の複雑ネットワークと捉える．インスタンスの発現は上位のインスタンスから決定論的に定まるが，それが未観測である可能性を考慮してベイズ確率的に定めておく．そしてある時点のインスタンス集合に対して，ハザードが発生する．これは，状況を表すインスタンス集合の無作為に選ばれた元からなる部分集合に対して一斉に，ハザードに起因する特殊なドメイン変更が起きることに相当する．更新されたインスタンス集合は，特殊なドメインを維持したまま遷移して想定外の状況を発現するのである．

このような考えに従い，不完全情報下の減災評価方法を，複雑ネットワーク理論と動的制約最適化問題(DCOPs)との結合問題へ帰着させていく．複雑ネットワーク理論における感染伝播モデルの研究は，近年システム生物学で遺伝子ネットワーク解析に多くの成果が見られ，また SNS 上でのコメントログを解析した話題追跡に関する研究が盛んな一方で，実社会のダイナミクス研究は，実践上の喫緊な必要性に比べて研究事例が乏しい．対象となるネットワークを俯瞰しにくく，制御も実証も難しいからである．制約充足問題においては，刻々と変化する事態に応じた変数やドメインの加除や，相反した複数の目的の同時達成をめざす多目的制約最適化問題(MO-DCOP)の研究が進んでいる(10,11,12)が，やはり対象システムのダイナミックな発現形状について完全に既知を前提とする．本論は実践への応用に伴い厳密性とのトレードオフをある程度許容しながら，ダイナミック環境下の外部データを使って，複雑ネットワーク理論と DCOP それぞれの分野の先端的な知見を減災という実問題に適用する．

## 4. モデル

不完全情報下での減災評価方法を呈示する．プロセスの理解を助けるために広域火災のドメイン例を添えて説明していく．

### (1) インスタンス・ネットワーク

まず対象地域の状況に関する減災面から見たオントロジーを構築する．より厳密に言えば，インターネット上の公開情報や災害報告書，SNS のコメントログなどの文書から減災オントロジーに必要と思われる情報を抽出し，インスタンスとして定義し蓄積する．同時にオントロジー自体の更新も図っていく．オントロジーを介した情報抽出(OBIE)は一般的に図 4 のようなシステムとなる．

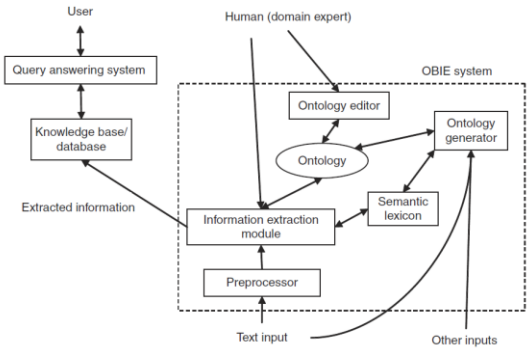


図 4　オントロジーを介する情報抽出概念図(13)

例として広域火災に関するインスタンスを定義する．86 件の参考文書を形態素解析にかけて語彙に分割し，TFIDF[b]により共起関係を計算して可視化した．文脈上同一トピックと考えられる語彙群を目視でまとめあげ，広域火災に関連する計 37 の状況にまつわるインスタンス群を抽出した．結果を表 2 に列挙する．試行結果から減災オントロジーでは，ハザードの直接契機となる内容を除外してインスタンスとの関係が独立であるように概念領域を保つこと，またインスタンス間に有向性が見出された際にそれらを命題として理解しやすくするために，インスタンス自体に真偽を含まないよう定義することが求められる．

b) TFIDF とは，主に情報検索や文書要約などの分野で利用される文書中の単語に関する重みをさす．Term Frequency:単語出現頻度と Inverse Document Frequency:逆文書頻度の二つの指標から算出される．

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 気圧変化 | 13 | 要保護対象の少なさ | 25 | 避難動線の集中度 |
| 2 | 風向きが不安定 | 14 | 近づく要保護対象 | 26 | 滞留区域の広さ |
| 3 | 風下に街区 | 15 | 動かせない可燃物 | 27 | 退避可能人数の多さ |
| 4 | 多数の活動時間帯 | 16 | 分散した要保護対象 | 28 | 非公式情報の伝播量 |
| 5 | 発生時刻 | 17 | 給水路の確保 | 29 | 近隣の互助性 |
| 6 | 連続的な強風 | 18 | 退避可能時間 | 30 | 広場への集中度 |
| 7 | 空気の乾燥 | 19 | 建材の可燃性 | 31 | 滞留密度の高さ |
| 8 | 近づく可燃物 | 20 | 重要動線の輻輳度 | 32 | 建材の堅牢性 |
| 9 | 異変に気づきにくい時間帯 | 21 | 消火水源の近さ | 33 | 居住者当たりの面積の広さ |
| 10 | 火元を使う時間帯 | 22 | 非公式情報の伝播速度 | 34 | 特定区域人口密集 |
| 11 | SNSリテラシーの高さ | 23 | 誤誘導可能性 | 35 | 転居率の高さ |
| 12 | 滞留人数の多さ | 24 | 囲まれた広場 | 36 | 急速な人口流入 |
| | | | | 37 | 救難動線の集中度 |

表 2　関連テキスト群から抽出した
広域火災ドメインのインスタンス群

図 5　$v_8$:近づく可燃物 に関連した
オントロジーを記す双方向グラフ

状況を構成する要素である個々のインスタンスをノードとし，複数のインスタンス同士の決定論的な因果関係や相互作用を示すアークをノード間に貼り双方向グラフを描く．各ノードには，インスタンスを示す性質が発現しているか否かを含む複数の状態を定義する．インスタンス同士をつなぐアークは促進か抑制の二つの意味をもつ．ノードに入力するアークが複数の場合，発現条件としてアーク同士に論理和や論理積を設定できる．例えば表 2 中のインスタンス“No.8: 近づく可燃物”というノード$v_8$ について考える．このノード$v_8$ の発現は“可燃物(例えばタンクローリー車)がハザード発生現場に近づいてくる”ことにあたる．$v_8$ に関連づけられた他のインスタンスと $v_8$ とのグラフ表現を例として図 5 に示す．例えば$v_4 \rightarrow v_8$，$v_9 \rightarrow v_8$ は，多数の活動時間帯が発現する(日中などの時間帯)場合に，可燃物が近づく可能性が高まるが，異変に気づきにくい時間帯(深夜など)では逆に可燃物が近づく可能性が低くなることを示している．以上を減災オントロジーの構造とする．

これに基づいて，表 2 の広域火災ドメインのインスタンス群に対し，インスタンス抽出時に同じく定義したアーク群を付与すると図 6 のインスタンスグラフ $\mathcal{g}$ となる．ノード数は 37，アーク数は 88 である．各種中心性の高さで上位 3 位までノードを挙げると，次数中心で$\{v_{18}\ v_4\ v_{25}\}$．媒介中心で$\{v_{25}, v_{26}, v_{23}\}$．近接中心で$\{v_{31}, v_{26}, v_4\}$．固有ベクトル中心で$\{v_{25}, v_{23}, v_{20}\}$ であった．またグラフ内のコミュニティ構造をモジュラリティ計算により検知した．モジュラリティはネットワークの与えられた分割に対して，「グループ内のノード同士が繋がるアークの割合」から「アークがランダムに配置された場合の期待値」を引いた値として定義される．ノードを$\{g_1, g_2, g_3 \ldots, g_C\}$ の C個のグループに分け，$g_i$に属するノードと $g_j$に属するノードをつなぐアーク数の合計の全アーク数に占める割合を $e_{ij}$ とする．一方アークが全くランダムに配置された場合の，アークの一方に$g_i$ 内のノードに結合したアークが選ばれる確率を$a_i$とすれば，モジュラリティ $Q$ は以下のようになる．

$$Q = \sum_i (e_{ii} - a_i^2) \quad (14)$$

モジュラリティ $Q$ を最大化するようにグループと所属ノードを分割しコミュニティとして定義した．これをインスタンスグラフ $\mathcal{g}$ 上に図示したものが図 6 の着色部(赤，黄色，緑，紫，橙)である．

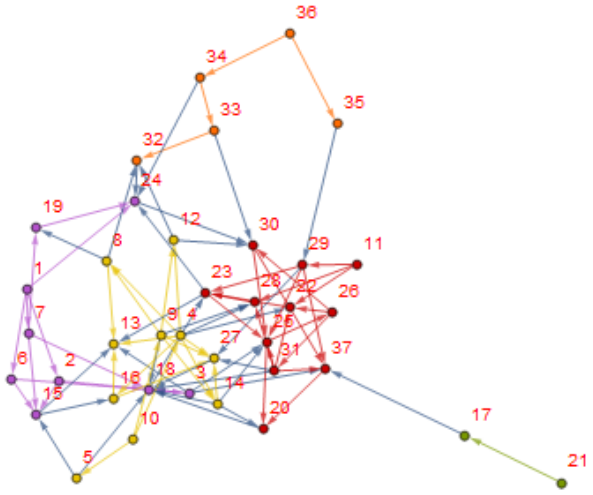

図 6　広域火災のインスタンスグラフ$\mathcal{g}$
と内包するコミュニティ構造

次にグラフ $\mathcal{g}$ と同ノード数で同ノード/アーク比でエッジを貼っていく BA グラフを仮定し，この BA グラフの次数分布とグラフ g の次数分布とを比較し図 7 に示す．ヒストグラムのビン数はグラフ$\mathcal{g}$ に揃えている．

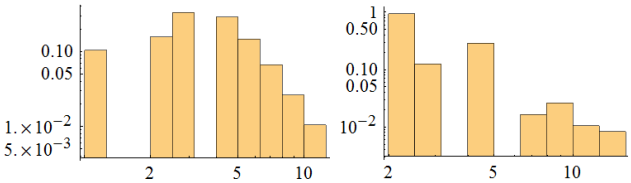


図 7 左: $\mathcal{g}$ の次数分布 右: $\mathcal{g}$ と同ノード数，
同ノード／アーク比で作成した BA グラフの次数分布

試行結果から減災オントロジーからの状況のインスタンス・ネットワークは，コミュニティ構造を備えたインスタンス部分集合を含んでいると判る．これらの部分集合は上位オントロジーとしてさらに集約できる．図 6 からは，「消火水源へのアクセス$\{v_{17}, v_{21}\}$」「長期的な人口密集にともなう事象$\{v_{32}, v_{33}, v_{34}, v_{35}, v_{36}\}$」「ハザード発生時の気象に左右される事象$\{v_1, v_2, v_3, v_6, v_7, v_{15}, v_{18}, v_{19}, v_{24}\}$」「ハザード発生時の生活時間帯に左右される事象

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

$\{v_4, v_5, v_8, v_9, v_{10}, v_{12}, v_{13}, v_{14}, v_{16}, v_{27}\}$」「避難人数の密集と情報の伝播$\{v_{11}, v_{20}, v_{22}, v_{23}, v_{25}, v_{26}, v_{28}, v_{29}, v_{30}, v_{31}, v_{37}\}$」などがトピックとして集約でき新たなインスタンスとして更新できる．減災の観点から，こうしたインスタンスの同期や複合作用がハザードに起因する被害の規模を左右していると推測できる．ここでは特に「避難人数の密集と情報の伝播(いかに一斉に正しい情報が伝わり正しい方角へ逃げられるか)」にネットワーク上の中心性が強く，次に「生活時間帯(いつ発生するか)」「避難可能時間(どれだけ逃げる余裕があるか)」の影響が強い．またインスタンス・ネットワークの形状は，スケールフリーの高次数部分に相当していると推測する．今回の試行では主に専門家の記した文書からインスタンスを抽出したため，低次のインスタンスが抽出できなかったことによると思われる．ちなみにグラフ $\mathcal{G}$ のクラスター係数は$C$ =0.0392157 で，比較対照用のBA グラフでは$C$ =0.123418 となった．ここから，本論におけるインスタンス・ネットワークのトポロジーとしてはスケールフリーを採用する．インスタンスの発現状態にブール値を設定すれば，インスタンス・ネットワークはランダムブーリアンネットワークとなる．この場合ハザードが生じる前の現場の定常状態をランダムブーリアンネットワークのある種のアトラクタであると仮定できる．また展望としては，アークに遷移確率を付与することで確率ブーリアンネットワークとしてもモデル化できる．

なおスケールフリー形状のランダムブーリアンネットワークの解析については(15,16)に詳しい．OBIE については(17)によって既に普遍的な概念定義がなされており，そこから数多の研究成果が見られる中，特に SNS からの情報抽出に関して(18)，また最近の研究動向としてオンラインからの自動情報抽出のアルゴリズムについては(19,20)に知見が豊富である．

### (2) ハザード・パーコレーション

発生するハザードの粒度と同期をインスタンス・ネットワークにおけるサイト・パーコレーションで表現する．ハザードは例えばポワソン分布などの特定の確率分布に従い，ランダムにインスタンス・ネットワークの複数のノード(サイト)へ同期的に浸透(パーコレーション)する．浸透したノードから出るアークも同様に浸透を許す．即ちハザードが特定のインスタンスを襲った場合，そのインスタンスが近傍のインスタンスに与える作用までハザードが乗じるとする．発生するハザードがより多くのインスタンスを同時に襲えば，インスタンス自体の発現と相互作用が媒質として働き被害は複合的に拡大する．ハザードは本質的に無作為の急峻事象であるが，解説上もし仮にハザードに戦略を与えるとすれば，まずネットワークのもつスケールフリー性に乗じ「どれだけ多くのノードに一斉に浸透するか」「いかにネットワーク全体に対して影響力の大きなノードに浸透するか」の如何によって制圧する効率を高められる．ハザードの粒度とハザードがネットワークに浸透した規模は非線形に比例する．ある粒度を超えた時点でパーコレーションの一般的な特質である相転移が生じ，ハザードの浸透規模は劇的に拡大するからである．相転移を生じるパーコレーション粒度は臨界確率と呼ばれる．一方コミュニティ構造に乗じて「定常状態では相互に隔てられた複数の異なるトピックを跨っていかに浸透するか」の如何によっては想定外の複合的な被害を引き起こせる．インスタンス・ネットワークグラフ$\mathcal{G}$上に異なる粒度で発生したハザードのパーコレーション例をならべて図 8 に示す．左は $q$ =0.001，右は $q$ =0.019 の場合である．右の例ではハザードが異なるトピックを跨いでいる．「長期的な人口密集」「発生時の気象」「発生時の生活時間帯」「避難人数の密集と情報の伝播」がハザードによって同期的に結び付けられたため，インスタンスの発現の組み合わせ次第では，特定のトピック内で収まるハザードの場合に比べ，想定外の複合的被害につながる．また図 9 は$\mathcal{G}$上のハザード・パーコレーションの粒度$q$とその際の連結成分が全アークに占める密度$\theta(q)$の関係である．臨界確率 $q_c$ は $0 < q_c < 0.1$ の範囲にあり，非常に小規模のハザードで相転移が起きることが判る．

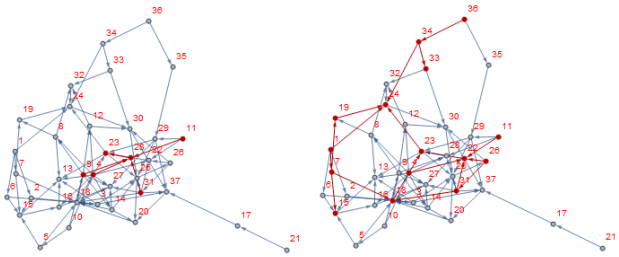

図 8 インスタンスグラフ$\mathcal{G}$ 上にポワソン分布($\lambda = 250$)で異なる粒度で発生したハザード・パーコレーション例

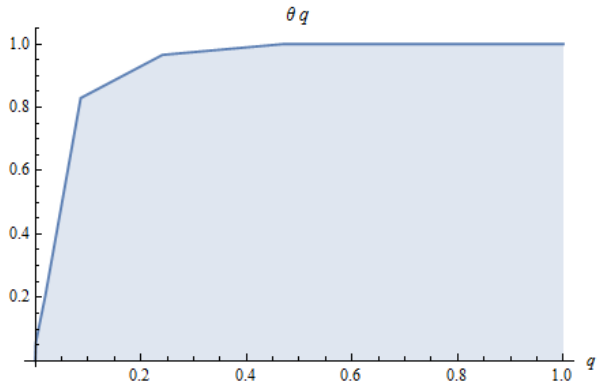


図 9 $\mathcal{G}$ 上に浸透するハザードの粒度 $q$ と $q$の連結成分が全アークに占める密度 $\theta(q)$

パーコレーションはネットワーク研究の歴史上最も早くから始められた感染伝播モデルのひとつである(21)．複雑ネットワーク上のパーコレーションは今世紀に入ってから盛

んに進められてきた(22,23,24,25). なかでもスケールフリーネットワーク上のパーコレーションにおける臨界確率の厳密解については(26)に詳しい．またインスタンス・ネットワークにおけるハザードの発生は，ある時点のインスタンス集合から無作為に選ばれた部分集合が，ハザードに起因する特殊なドメイン変更を一斉に余儀なくされることに等しい．これはハザードの影響下にあるインスタンス単位で見れば，定常状態ではみられない新しい第 3 のドメインの発現を意味している．従ってハザードの発生を組み込む場合には，ドメインをブール値で定義するブーリアンネットワークをインスタンスグラフの構造として採用できない．我々はインスタンス・ネットワークの制御構造として，トーマス・モデル(27,28,29)や GSPNs(30)など主にシステム生物学の分野で研究されてきた遺伝子調節ネットワークからモデルを起用する．インスタンスの発現ドメイン数が 3 であること, またネットワークの振る舞いに遅延が考慮され，インスタンスの発現条件にインスタンス内部の何らかの閾値関数が仮定できるなどの点で，今後の研究展望に有効であると考える．

### (3) 不染化による減災戦略

次に被害の進行に対抗する減災の定式化を考える．アメリカの国土安全保障省によって定められた消火活動の基本原則(31)は，*Sizeup* (消防給水路や救難動線などの配置を勘案して消火作戦地域の領域を定義する)，*Fire Confinement* (予め定めた作戦地域内へと火災を局限させ, 他地域への延焼を防ぐ)，*Exposure Protection* (火災に晒されている対象を保護し，消火作戦地域から隔離する)，*Fire Extinguishment* (局限された火災から, 燃料や給気や熱を除去することによって鎮火を図る)から構成されている. これらプロセスに共通する戦略は，分断と隔離による災害の減衰である．本論における減災戦略もこれに従う．即ちある時点で，ハザードの浸透を許したインスタンス群のうち，被害の減衰に最も効果があると思われるノードから順番にそのノードに対するパーコレーションの影響を排除する．この操作を不染化(32)と呼ぶ．その際のノードの選択と不染化する順番を要素とする集合を戦略と定義する．戦略を成し遂げるのに要する時間やその他のあらゆる負荷に対してコストが伴う. 戦略に従う不染化の結果，パーコレーション上の$q_c$ 時点を超えない事態へと被害を局限させるのに要するコストの値によって戦略オプションの優劣を比較する．同一のパーコレーションで減災に要するコストが最も少ない戦略を最善策であると評価する．進行したパーコレーションが，ネットワーク全体に対して影響力の強いノードを不染化することで局限される様子を図 10 に例示する. 除外するノード数と不染化の結果としてのパーコレーション密度との関係を複数の戦略比較として表すと図 11 のようになる．

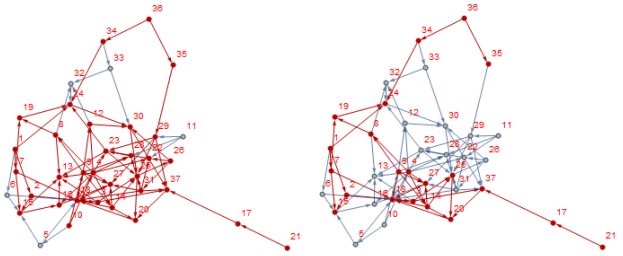

図 10 左: $\mathcal{G}$ 上のハザード・パーコレーション$\mathcal{G}'$( $q$ =0.241)
右: $\mathcal{G}'$から浸透ノード $v_{26}\ v_{23}\ v_{31}$ を不染化した結果

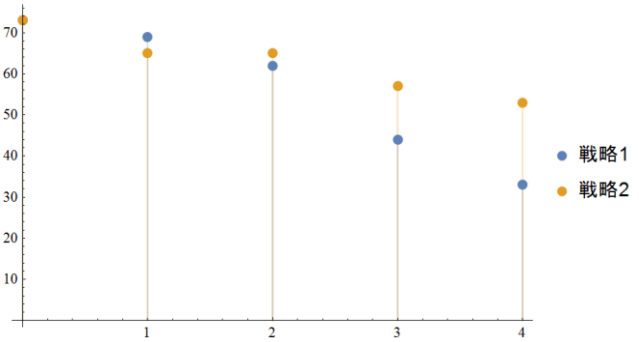


図 11 戦略の違いから乗じる減災効果の差
横軸: 不染化するノード数
縦軸: 不染化後のパーコレーション密度(%)

ノードを一つ不染化するに従って，減衰する傾きが急であるほどそのノードの減災への貢献度は高い．その不染化するノード数が少ないうちにパーコレーションが減衰するほどその戦略の減災への貢献度は高い．

不染化に関する研究は早くから免疫学の分野で進められてきた(33)．これらに共通して病気の感染系として SIR モデルを採用してきたが，複雑ネットワーク研究が急速に進んだ 2000 年代以降は, 媒質となるネットワークの性質に焦点をあてた研究(34)や，不染化において影響を最大化させるネットワークの中心性に関する研究(35)，また金融政策面で不良債権からの不染化(36)など，異なる分野を横断した挑戦が続けられている．なかでも最新の成果として，遺伝子調節ネットワークの相互作用の双方向グラフを，制約を表す解集合プログラミングに置き替え，処置による未知の影響を予測しながら攻撃すべき最適なノードや戦略を導く *Process Hitting Model*(37)は特筆に値する．

### (4) SR モデルによるレジスタンス評価

SR モデル(6)は，システムズ・レジリエンス研究において開発されたレジリエンス評価および最適化を図る数理モデルである．想定外の摂動に見舞われたシステムが，変数やドメインや制約などトレードオフを含む要素の組み合わせを劇変させながらシステムとして遷移し続け，最終的には初期の定常状態に戻るまでの複数の戦略オプションを、最適化するものである. 図 12 を使ってその一部を説明する．

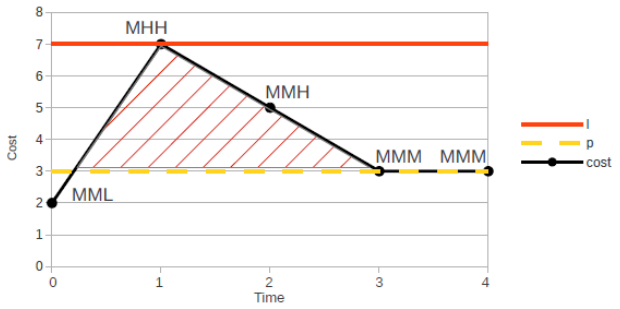


図 12 SR モデルによる減災評価例

グラフの横軸が時間$t$ ，縦軸がコストを表す．今 3 つの変数から構成されるシステムを仮定する．変数が取り得るドメインは *H,M,L* のいずれかとする．ドメインの値に応じてかかるコストが予め決まっている．システムが遷移できる回数も限られている．$t = 0$ 時点でシステムの軌跡は 3 変数の値に{*M,M,L*}をとっている．このときシステムの負荷は定常状態のコスト値 $p = 3$ を下回っている．この直後に何らかの急峻事象が生じてシステムは対応しようとする．$l =$ 7 は処置臨界に相当し，システムコストがこれを超えた場合は復旧不可能となる．システムは 4 回遷移するまでに事態を復旧し，コストを $p$ まで戻さなければならない．ある戦略の場合，システムは最初の遷移で{*M,H,H*}を示し，過大な負荷に見舞われるものの，臨界を超えない．摂動にたいする耐性を示すこの状態を *l-resistance* と呼ぶ．全 3 回の遷移のうちで定常状態を超えるコストをのべ 6 単位払って，定常状態 $p$ へ復旧している．この復旧状態を *<3,6>-recoverable* と呼ぶ．本論で定義する減災状態は，不染化による減災戦略にともなうコストが SR モデル上の *l-resistance* であることを言う．但し，閾値 $l$ は予め知らされておらず，さらに時間の推移の中で，減災戦略の優劣に応じて変動する．言い換えれば $l$ とは，ハザードに起因する被害の進行と，発生を認識して発動する不染化戦略との 2 者間ゲームにおけるダイナミックな均衡点である．

## 5. 課題

本論で我々は被害予測技術としての減災オントロジーによるインスタンス・ネットワークを定義した．無作為に発生するハザードがこのインスタンス集合を媒質として被害を拡大させるメカニズムの定式化と，被害を受けたインスタンスを不染化して被害を減衰させる方法を試みた．遷移するインスタンス・ネットワーク上にランダムな粒度で同期的に乗じるハザードと不染化による減災戦略との，2 者間ゲームにおけるダイナミックな均衡点として処置臨界を割り出す可能性を示した．しかし研究は端緒に着いたばかりである．探究すべき課題は多い．ダイナミック環境下の外部データからオントロジーを介していかに実状況を反映したインスタンス・ネットワークを構築するのか？独立事象であるハザードの浸透を組み込んだスケールフリーなグラフ構造をどう定義するか？ハザード・パーコレーションの臨界確率はどのように定まるのか？普遍的に最適な減災戦略はどのような性質を備えているのか？SR モデルの閾値 $l$ は不完全情報からどのようにして求められるか？次の段階として，我々は遺伝子調節ネットワークを応用した仮想インスタンス・ネットワークを基礎として各課題につき探索していく．

## 参考文献

1) 仲谷善雄. "大規模災害に対する減災情報システム (前編)." *情報処理* 45.11 (2004): 1164-1174.
2) 総務省. "防災・減災に資する ICT サービス事例集."
3) United States Department of Homeland Security. "National Incident Management System."2008
4) Maruyama, Hiroshi. "Towards systems resilience." *Dependable Systems and Networks Workshop (DSN-W), 2013 43rd Annual IEEE/IFIP Conference on*. IEEE, 2013.
5) 丸山宏. "レジリエンスのタクソノミ." (2014).
6) Schwind, Nicolas, et al. "Systems resilience: a challenge problem for dynamic constraint-based agent systems." *Proceedings of the 2013 international conference on Autonomous agents and multi-agent systems*. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2013.
7) 桑原雅夫. "復興のためのデータ融合解析 (特集 進化する災害報道: 東日本大震災から 3 年・メディア多様化時代の防災情報)--(ポスト 3.11 防災情報を巡る新潮流)." *放送メディア研究* 11 (2014): 231-235.
8) 清水建設. "東北地方太平洋沖地震関連技術レポート." (2011)
9) 阿部博史. "震災ビッグデーター可視化された 3.11 の真実." (2014)
10) Clement, Maxime, et al. "Model and Algorithm for Dynamic Multi-Objective Distributed Optimization." *PRIMA 2013: Principles and Practice of Multi-Agent Systems*. Springer Berlin Heidelberg, 2013. 413-420.
11) Okimoto, Tenda, et al. "Cyber security problem based on multi-objective distributed constraint optimization technique." *Dependable Systems and Networks Workshop (DSN-W), 2013 43rd Annual IEEE/IFIP Conference on*. IEEE, 2013.
12) 沖本天太, et al. "多目的分散制約最適化問題における厳密/非厳密解法の提案." *電子情報通信学会論文誌 D* 96.12 (2013): 2929-2938.
13) Wimalasuriya, Daya C., and Dejing Dou. "Ontology-based information extraction: An introduction and a survey of current approaches." *Journal of Information Science* (2010).
14) Newman, Mark EJ. "Modularity and community structure in networks." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103.23 (2006): 8577-8582.
15) Serra, Roberto, Marco Villani, and Luca Agostini. "On the dynamics of random Boolean networks with scale-free outgoing connections." *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 339.3 (2004): 665-673.
16) 大澤智興, and 竹本和広. "スケールフリーランダムブーリアンネットワークの力学的性質に対するブール関数の組み合わせ依存性 (テーマセッション 「ランダムネスと予測~ その基礎と応用」及び一般, ランダムネスと予測-その基礎と応用 2)." *電子情報通信学会技術研究報告. NLP, 非線形問題* 105.417 (2005): 19-24.
17) Gruber, Thomas R. "Toward principles for the design of ontologies

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan

used for knowledge sharing?." *International journal of human-computer studies* 43.5 (1995): 907-928.
18) Laniado, David, and Peter Mika. "Making sense of twitter." *The Semantic Web–ISWC 2010*. Springer Berlin Heidelberg, 2010. 470-485.
19) Etzioni, Oren, et al. "Open information extraction from the web." *Communications of the ACM* 51.12 (2008): 68-74.
20) Schmitz, Michael, et al. "Open language learning for information extraction." *Proceedings of the 2012 Joint Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing and Computational Natural Language Learning*. Association for Computational Linguistics, 2012.
21) Grassberger, Peter. "On the critical behavior of the general epidemic process and dynamical percolation." *Mathematical Biosciences* 63.2 (1983): 157-172.
22) Cohen, Reuven, et al. "Breakdown of the Internet under intentional attack." *Physical review letters* 86.16 (2001): 3682.
23) Albert, Réka, Hawoong Jeong, and Albert-László Barabási. "Error and attack tolerance of complex networks." *Nature* 406.6794 (2000): 378-382.
24) Callaway, Duncan S., et al. "Network robustness and fragility: Percolation on random graphs." *Physical review letters* 85.25 (2000): 5468.
25) Newman, Mark EJ. "Spread of epidemic disease on networks." *Physical review E* 66.1 (2002): 016128.
26) Cohen, Reuven, Daniel Ben-Avraham, and Shlomo Havlin. "Percolation critical exponents in scale-free networks." *Physical Review E* 66.3 (2002): 036113.
27) Bernot, Gilles, et al. "Application of formal methods to biological regulatory networks: extending Thomas' asynchronous logical approach with temporal logic." *Journal of theoretical biology* 229.3 (2004): 339-347.
28) Richard, Adrien, Jean-Paul Comet, and Gilles Bernot. "Formal methods for modeling biological regulatory networks." *Modern Formal Methods and Applications*. Springer Netherlands, 2006. 83-122.
29) Ahmad, Jamil, et al. "Formal Modeling and Analysis of the MAL-Associated Biological Regulatory Network: Insight into Cerebral Malaria." *PloS one* 7.3 (2012): e33532.
30) Ajmone Marsan, Marco, Gianni Conte, and Gianfranco Balbo. "A class of generalized stochastic Petri nets for the performance evaluation of multiprocessor systems." *ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)* 2.2 (1984): 93-122.
31) United States Department of Homeland Security. " Investigation of Confined Structure Fires."2006
32) Anderson, Roy M., and Robert McCredie May. *Infectious diseases of humans*. Vol. 1. Oxford: Oxford university press, 1991.
33) Pastor-Satorras, Romualdo, and Alessandro Vespignani. "Immunization of complex networks." *Physical Review E* 65.3 (2002): 036104.
34) Madar, Nilly, et al. "Immunization and epidemic dynamics in complex networks." *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems* 38.2 (2004): 269-276.
35) Kitsak, Maksim, et al. "Identification of influential spreaders in complex networks." *Nature Physics* 6.11 (2010): 888-893.
36) Kobayashi, Teruyoshi, and Kohei Hasui. "Efficient immunization strategies to prevent financial contagion." *Scientific reports* 4 (2014).
37) FOLSCHETTE, Maxime, et al. "Concretizing Process Hitting models into Biological Regulatory Networks with Thomas' formalism using ASP."

**謝辞** 本研究にご協力頂いた皆様に，謹んで感謝の意を表する．

ⓒ 2014 Information Processing Society of Japan