

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

Disaster Risk Reduction Assessment :Immunization on Scale-free Topology

岡崎孝太郎

井上克巳

KOTARO OKAZAKI

KATSUMI INOUE

総合研究大学院大学

国立情報学研究所

The Graduate University for Advanced Studies National Institute of Informatics

GENSAI is disaster risk reduction assessment with inevitable damages. We propose the immunization on scale-free topology as GENSAI. Hazard and instances of situation are independently defined. Relation between instances implies directed graph as random boolean network. Site percolation of entity network on Scale-free topology is formulated as hazard occurrence and progress of disaster. We immunize critical nodes from percolated graph, i.e. we remove influence of hazard from situation. However, many open questions remain including how critical probability is estimated, and how we find optimized strategy for immunization. Our challenge goes on.

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軽減させる取り組み全般を指す。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、事前事後に適切なエッジションを絶えず適用させていく一連の手続きと定義できる。

2. 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。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。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。

3. モデル

3.1 インスタンス・ネットワーク

例として広域火災に関するインスタンスを定義する。86件の参考文献を形態素解析にかけて語彙に分割し、TFIDF[a]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1に列挙する。

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デランシーの高さ	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 避難動線の集中度

表1 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

岡崎孝太郎, SONAR, 東京都中央区銀座 8-16-6-2F, 03-5148-1133,
Fax 03-5148-1155, okazaki@sonar01.co.jp

a) 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。

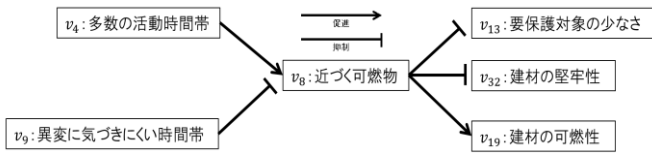


図1 v_8 :近づく可燃物 に関連した有向グラフ

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エッジ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エッジは促進か抑制の二つの意味をもつ。ノードに入力するエッジが複数の場合、発現条件としてエッジ同士に論理和や論理積を設定できる。つまりインスタンス・ネットワークはランダムブーリアンネットワークである。例えば表1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1に示す。 $v_4 \rightarrow v_8$, $v_9 \rightarrow v_8$ 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。

これに基づいて、表1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エッジ群を付与すると図2のインスタンスグラフ g となる。ノード数は37、エッジ数は88である。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。これをインスタンスグラフ g 上に図示したものが着色部(赤, 黄色, 緑, 紫, 橙)である。

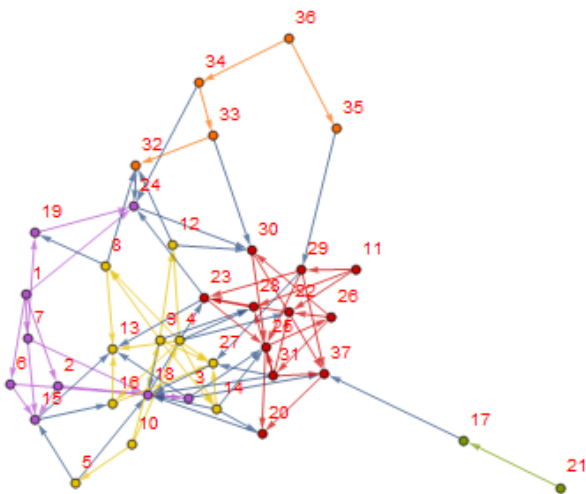


図2 広域火災のインスタンスグラフ g と内包するコミュニティ構造

次にグラフ g と同ノード数で同ノード/エッジ比でエッジを貼っていく Barabási Albert (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3に示す。ヒストグラムのビン数はグラフ g に揃えている。

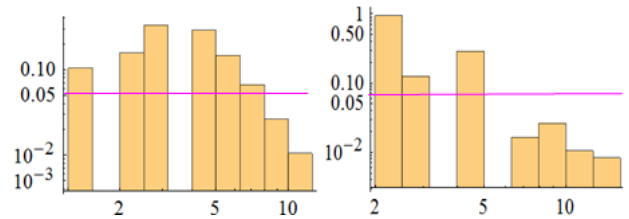


図3 左: g の次数分布 右: g と同ノード数, 同ノード/エッジ比で作成した BA グラフの次数分布

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2からは、「消火水源へのエッジセス $\{v_{17}, v_{21}\}$ 」「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 $\{v_4, v_5, v_8, v_9, v_{10}, v_{12}, v_{13}, v_{14}, v_{16}, v_{27}\}$ 」「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。

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 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。

3.2 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エッジ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、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齐に浸透するか」「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」の如何によって浸透する効率を高められる。また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。この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。つまりコミュニティ構造に乗じて「平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4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、想定外の複合被害につながる。また図5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エッジに占める密度 $\theta(q)$ 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。

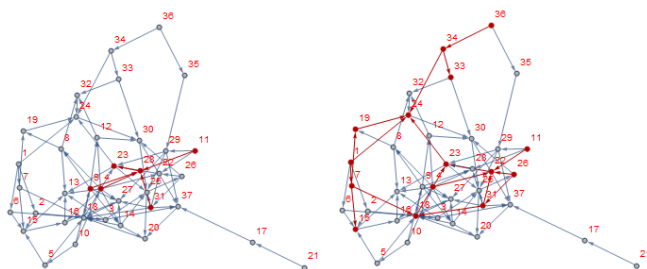


図4 インスタンスグラフ \mathcal{G} 上にポワソン分布($\lambda = 250$)で異なる粒度で発生したハザード・パーコレーション例

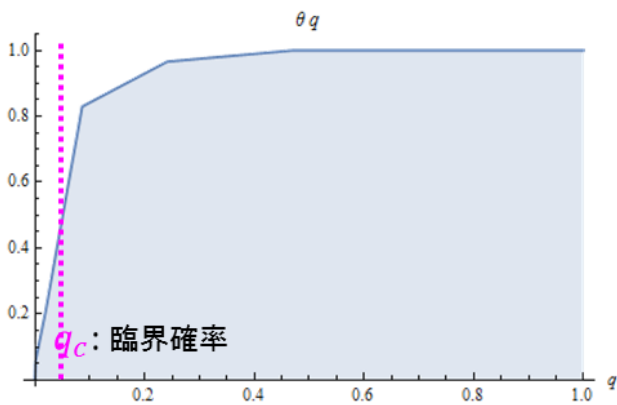


図5 \mathcal{G} 上に浸透するハザードの粒度 q と q の連結成分が全エッジに占める密度 $\theta(q)$

こうした有限のスケールフリー形状の有向ネットワークのノードへの浸透を、図6のように浸透部分の全体における粒度と、その際に獲得した連結性という分解した2つの作用の組み合わせと考えると、 k 時点での浸透には、連結の結果として生起する $k+1$ 時点での占有が含まれる。これは二次元の遷移行列として表現できる(表2)。またブーリアンネットワークであるインスタンス・ネットワークの媒質としての状態も遷移行列に変換可能なため、ハザードの発生による初動事態の推移については、論理計算によって代数的に解を導出でき、計算量からも多項式時間で解くことができる。

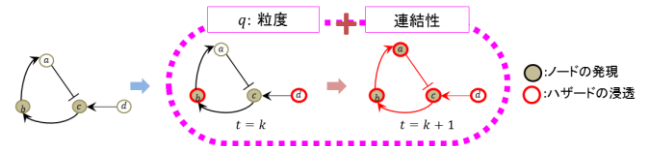


図6 パーコレーションの作用分解とノード発現のモデル

Nodes to be percolated at $t = k + 1$

0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Percolated nodes at $t = k$

表2 図4右のハザード・パーコレーションを表す遷移行列

3.3 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(2)は、*Size up* (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(3)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7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8のようになる。

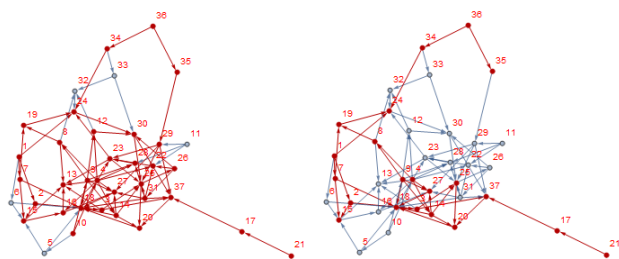


図7 左: g 上のハザード・パーコレーション $g'(q=0.241)$
 右: g' から浸透ノード v_{26} v_{23} v_{31} を不染化した結果

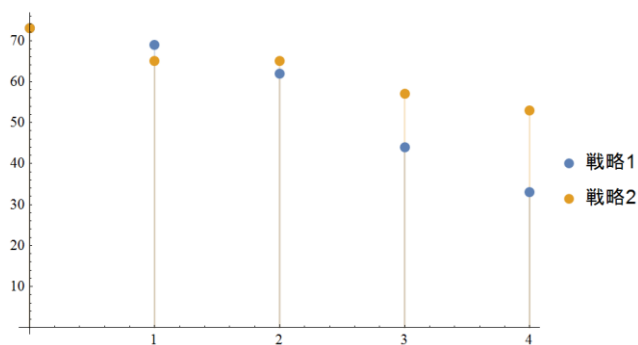


図8 戦略の違いから乗じる減災効果の差
 横軸: 不染化するノード数
 縦軸: 不染化後のパーコレーション密度(%)

ノードを一つ不染化するに従って、減衰する傾きが急にな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(4)。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(5)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(6)、また金融政策面で不良債権からの不染化(7)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(8)は特筆に値する。

4. 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のか? 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? 次の段階として、我々は各課題につき探究していく。

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) United States Department of Homeland Security. "Investigation of Confined Structure Fires." 2006
- 3) Anderson, Roy M., and Robert McCredie May. *Infectious diseases of humans*. Vol. 1. Oxford: Oxford university press, 1991.
- 4) Pastor-Satorras, Romualdo, and Alessandro Vespignani. "Immunization of complex networks." *Physical Review E* 65.3 (2002): 036104.
- 5) 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.
- 6) Kitsak, Maksim, et al. "Identification of influential spreaders in complex networks." *Nature Physics* 6.11 (2010): 888-893.
- 7) Kobayashi, Teruyoshi, and Kohei Hasui. "Efficient immunization strategies to prevent financial contagion." *Scientific reports* 4 (2014).
- 8) FOLSCHETTE, Maxime, et al. "Concretizing Process Hitting models into Biological Regulatory Networks with Thomas' formalism using ASP."