

我が国の自然災害に対する統合的リスク指標

菊本 統¹・下野 勘智²・伊藤 和也³・
大里 重人⁴・稲垣 秀輝⁵・日下部 治⁶

¹正会員 横浜国立大学准教授 都市イノベーション研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail: kikumoto@ynu.ac.jp

²非会員 アクセンチュア テクノロジー (〒107-8672 東京都港区赤坂1-11-44赤坂インターシティ)

E-mail: kanchi.shimono@accenture.com

³正会員 東京都市大学准教授 工学部都市工学科 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)

E-mail: itok@tcu.ac.jp

⁴非会員 株式会社土質リサーチ (〒156-0041 東京都世田谷区大原2-27-31-904)

E-mail: shigeto@interlink.or.jp

⁵正会員 株式会社環境地質 (〒210-0014 神奈川県川崎市川崎区貝塚1-4-15-203)

E-mail: inagaki@kankyo-c.com

⁶フェロー会員 国際圧入学会 (〒108-0075 東京都港区港南2-4-12 港南YKビル9階)

E-mail: ipa.kusakabe@press-in.org

自然事象の頻度や程度を表す危険源, 自然災害にさらされる人口割合を表す曝露, 自然災害に対する社会や経済の脆さを表す脆弱性を定義し, 規準化した過去の災害記録や統計データの重み付け線形和により計算し, それらの掛け合わせとして自然災害に対するリスクを評価する統合的指標を提案した. そして47都道府県を対象としてリスク指標を算出し, 各都道府県が内包するリスクの特徴を考察するとともに, 指標の意義を説明した. 最後に, 指標を用いたリスクの分析と管理の方法について議論した.

Key Words : *natural hazards, vulnerability, exposure, risk index, disaster prevention*

1. はじめに

我が国は, 地震や豪雨など様々な自然災害に晒されてきた. 最近では, 気候変動や都市型水害など自然災害と被害の形態も多様化している. 一方で, 防災・減災対策に充てられる予算と人員は限られるため, インフラ整備や構造物の補強といったハード対策とハザードマップの整備・公開や防災教育といったソフト対策を効果的に組み合わせた包括的な防災・減災対策は言うまでもなく重要であり, 自然科学や工学の観点からだけでなく, 社会・経済的側面も含めた総合的な視点から, 早急に対策を講ずるべき自然災害の種類, 地域, 対策項目を見極める必要がある.

国連防災世界会議の最終文書Hyogo Framework for Action 2005-2015¹⁾では自然災害に対するリスクの低減に向けた体系的な取り組みの重要性が強調されるとともに, 具体的な方策の一つとして各国や地域レベルでの自然災害に対する社会・経済・環境の脆弱性を表す指標の必要性が

指摘され, その後, 世界では自然災害に対するリスク指標が幾つか提案されている^{2)~4)}. 例えば, World Risk Index³⁾は自然災害による被害の範囲や程度は自然事象の大きさや発生頻度のみでなく, 社会や経済がもつ脆弱性との相互関係により決まるという概念^{5), 6)}に基づいて, 各国の自然災害に対するリスクを定量化している. 一方, 国内レベルで自然災害に対するリスクを統合的に評価する指標は未だない. そこで著者らは, 長期的視野に立つて総合的な判断を支援する科学的なリスク指標が必要との観点から自然災害に対するリスク指標Gross National Safety for Natural Disastersの構想を提案し⁷⁾, 海外のリスク指標の特徴と課題を分析する⁸⁾とともに, 国内都道府県の脆弱性の一部を試算し⁹⁾, 我が国の自然災害リスク指標が備えるべき評価体系を議論してきた.

本論文では, これまでの検討を踏まえて我が国の自然災害に対するリスク指標を提案し, リスク評価体系と特徴を説明する. なお, 開発する指標は防災・減災対策の意思決定への利用を主目的とすることから, 統計データ

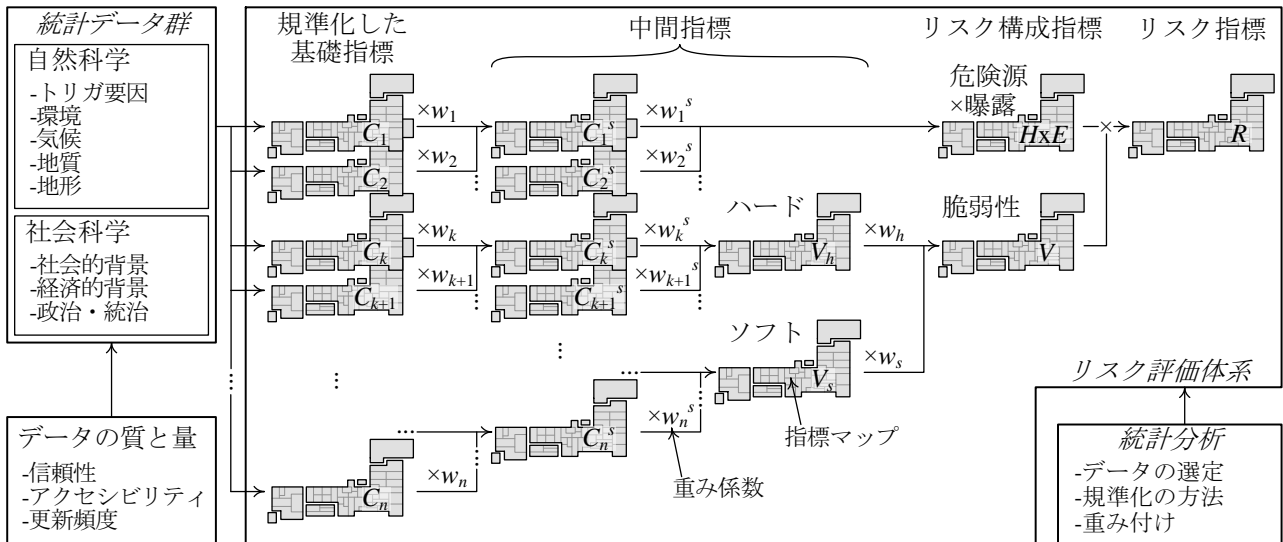


図-1 自然災害に対するリスク指標の評価体系

や科学的データが豊富で、防災・減災対策やインフラ整備の予算配分や意思決定が行われる行政区分である都道府県レベルでリスクを評価する。また、2015年度のリスクを算出し、意思決定指標としての活用方法を議論する。

2. 自然災害に対する統合的なリスク指標

(1) リスクの要素と変数

自然災害に限らず、環境や金融等に関するリスク評価では、リスク、危険源、脆弱性、曝露といった用語や変数が用いられる。しかし、例えば脆弱性だけでも25以上の異なる定義が示される¹⁰など、分野や研究者で用語や変数の定義は異なるため、リスク評価にあたっては正確に定義することが重要である。ここでは先行等における定義¹¹も踏まえつつ、国際的な整合性にも留意しながら、本研究で用いる用語と変数を定義する。

人的被害をもたらす可能性がある地震、津波、高潮、土砂崩れ・土石流・地すべり、火山噴火といった事象を危険源（hazard）と呼び、過去の記録や科学的に推定される地域毎の危険源の発生頻度を変数 H で表す。なお、災害（disaster）は危険源の影響領域内に人々や財産が曝され、かつ何らかの脆弱性が存在することで発生する被害や損失であり、危険源とは明確に区別する。

危険源により損失を被る可能性がある影響範囲の住民を暴露（exposure）と呼び、居住人口比率を変数 E で表す。

また、危険源による被害や損害を受けやすくなるような個人や社会、経済の性質を脆弱性（vulnerability）と呼び、その程度を変数 V で表す。脆弱性は物理的、社会的、経済的および環境的要因からなり、例えば建物やインフラの不備や不十分な保全で構成される。なお、危険源に曝された住民や財産、社会が危険源を受容する性質を強靱性（resilience）として変数 Re で表すが、強靱性が高い

ほど脆弱性は低減する¹²ので V の従属変数とする。

最後に、リスクは危険源による負の結果であり、ここでは人的被害の予測として変数 R で表す。リスクは危険源の規模や程度、頻度だけでなく、曝露や社会や経済が内包する脆弱性に依存することから次式で表される。

$$R = R(H, E, V, Re) \quad [\%] \quad (1)$$

強靱性 Re は脆弱性 V の従属変数なので次式に帰着する。

$$R = R(H, E, V) \quad [\%] \quad (2)$$

Crichton¹³は R が H 、 E 、 V のいずれにも依存するとしている。著者らも同じ観点から既往研究^{14,15}も参考に、

$$R = H \times E \times V \quad [\%] \quad (3)$$

を用いる。式(3)は H 、 E 、 V のいずれかが0、すなわち自然事象の発生確率がゼロ（ $H=0$ ）、自然事象が発生しても影響範囲内に住民がゼロ（ $E=0$ ）、あるいは住民が諸対策により完全に保護されていて脆弱性がゼロ（ $V=0$ ）であればリスクはゼロになることを意味する。

リスクは階層化された図-1の体系で評価しており、危険源 H 、曝露 E および脆弱性 V は直下の階層の中間指標 C_i^s の線形和で与えられる。 C_i^s 自身も直下の階層の指標の線形和で与えられ、最下層には過去の災害記録や統計データを標準化した基礎指標 C_i が位置する。例えば C_i^s は直下の指標 C_i とその重要度を反映した重み係数 w_i の線形和により式(4)で算出した。

$$C_i^s = \sum_i w_i C_i \quad [\%] \quad (4)$$

C_i はリスク指標の継続的な更新と透明性の確保のためフリーアクセス可能で定期的に更新される統計データや科学的データ、過去の災害記録から算出した。なお、国勢調査に基づくデータの更新頻度は5年、他は1年程度である。まず、数量や人数、距離等の単位をもつ値は各都道府県の値 x_i と全国平均 x_m を求め、式(5)により標準化した。

$$C_i = 100 \left\{ 1 - \exp \left(-\frac{x}{x_m} \right) \right\} \quad [\%] \quad (5)$$

表-1 リスク評価に用いるデータと中間指標および重み係数

統計データ	規準化した基礎指標	重み w_i	中間指標	重み w_i	中間 指標	重み w_i	リスク 構成指標	リスク 指標
J-SHIS Map 被災人口地図	海溝型地震	0.500	地震	0.200				
活断層延長 [km]	直下型地震	0.500						
津波発生回数 [回]	津波	1.000	津波	0.200				
標高3m未満人口割合 [%]								
高潮発生回数 [回]	高潮	1.000	高潮	0.200				危険源 H × 曝露 E
標高3m未満人口割合 [%]								
土砂災害発生件数 [回]	土砂災害	1.000	土砂災害	0.200				
土砂災害危険個所の人口割合 [%]								
噴火回数 [回]	火山	1.000	火山	0.200				
火山地人口割合 [%]								
戸建て耐震化率 [%]	耐震化率	0.330	住宅 ・ 公共建築	0.250				
公共施設耐震化率 [%]								
非防火木造建築数 [%]	非防火木造住宅割合	0.330						
建物の腐朽・破損の有無 [%]								
基幹管路耐震化率 [%]	上水道耐震化率	0.500	ライフライン	0.250				
浄水施設耐震化率 [%]								
配水池耐震化率 [%]	老朽管路率	0.500						
40年超過管率 [%]								
道路実延長 [m]	道路密度指数	0.500	インフラスト ラクチャー	0.250				
橋梁修繕率 [%]								
同報系防災行政無線通信設備整備状況 [%]	防災行政無線通信施設 整備率	0.500	情報・通信	0.250				
移動系防災行政無線通信設備整備状況 [%]								
Jアラート受信機整備率 [%]	Jアラート受信機 整備率	0.500						リスク R
自立起動Jアラート受信機整備率 [%]								
乾パン備蓄量(公的・流通) [食]	食料備蓄	0.200						
インスタント麺類備蓄量(公的・流通) [個]								
米備蓄量(公的・流通) [kg]								
主食缶備蓄量(公的・流通) [缶]								
副食刊備蓄量(公的・流通) [缶]			物資・備蓄	0.225				脆弱性 V
飲料水備蓄量(公的・流通) [L]								
毛布備蓄枚数(公的・流通) [枚]	毛布備蓄	0.200						
スーパー店舗数 [店]								
コンビニ店舗数 [店]	コンビニ指数	0.200						
医師数(従業地) [人]								
病床数 [人]	10万人当たり医師数	0.500	医療サービス	0.225				
病床数 [人]								
財政力指数	財政力指数	0.250						
ジニ係数								
老年人口指数 [%]	老年人口指数	0.250	経済と 人口構成	0.225				
被保護実人員 [%]								
地震保険加入率 [%]	被保護実人員割合	0.250						
土砂災害危険箇所 [数]								
土砂災害警戒区域 [数]	土砂災害警戒区域 指定率	0.333	保険	0.100				
津波ハザードマップ公開数 [数]								
洪水ハザードマップ公開数 [数]	ハザードマップ公開率	0.333	条例・自治	0.225				
土砂災害ハザードマップ公開数 [数]								
自主防災組織活動カバー率 [%]	自主防災組織カバー率	0.333						

式(5)は $C_i|_{x_i=0} = 0$ (頻度が0), $\lim_{x_i \rightarrow \infty} C_i = 1$ (頻度が極大) を満たす単調増加関数であることが必須であるが, 具体的な関数形には検討の余地があろう. その後, 百分率や割合で表される無次元の統計データも含めて値が大きいほど脆弱性が高くなるように正負の向きを調整した. また, 重み係数 w_i は,

$$\sum_i w_i = 1 \quad (6)$$

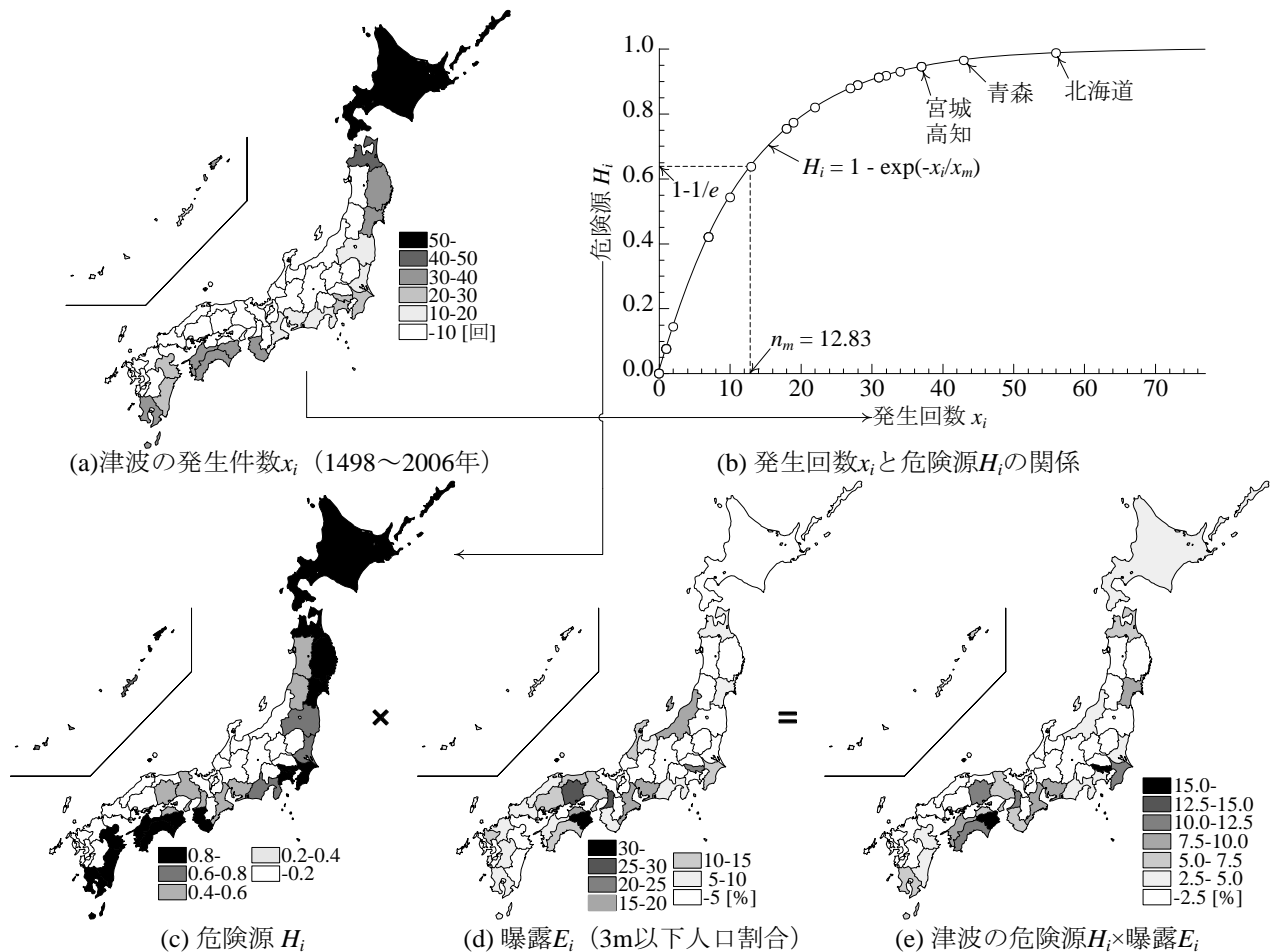
を満足する. 中間指標やリスクおよび重み係数を表-1にまとめる. 重み係数をデルファイ法¹⁶⁾により設定した事例²¹⁾もあるが, 専門家の数や選出基準に係数が依存する課題もあるため概ね均等に配分した.

(2) 危険源と曝露の計算方法

地震, 津波, 高潮, 土砂災害, 火山災害の5つの事象に対して危険源 H_i と曝露 E_i を求め, 各事象の重み係数 w_i を反映した線形和により式(3)の $H \times E$ を評価する.

$$H \times E = \sum_i w_i (H_i \times E_i) \quad [\%] \quad (7)$$

津波, 高潮, 土砂災害および火山災害の危険源 H_i は, 過去の各種災害記録から各都道府県の災害発生回数 x_i を求め, 式(5)により規準化した. なお, 稀頻度リスクにも対応するため, 可能な限り事象の発生間隔より長期間に収集された災害発生記録を採用した. 津波での危険源 H_i の計算例を図-2(a)~(c)に示す. (a)は1498~2006年の津波発生回数¹⁷⁾, (b)は式(5)で与えた発生回数と H_i の関係,

図-2 危険源 H_i と曝露 E_i の計算例(津波)

(c)は H_i の分布である。(c)では H_i が太平洋側が高い傾向にある。なお、高潮は701~1961年の高波発生回数^{18),19)}、土砂災害は最近7ヶ年の土砂災害発生件数²⁰⁾、火山災害は1600年以降の主な火山災害発生件数²¹⁾を用いて同様の方法で H_i を計算した。

津波、高潮、土砂災害および火山災害に対する曝露 E_i は、死傷者の発生が懸念される範囲を影響範囲として、都道府県の総人口に占める影響範囲内の居住人口比率とした。図-2(d)は津波に対する E_i の分布である。過去に甚大な被害を引き起こした津波の浸水高は標高5m以上であり²²⁾、木造家屋は津波浸水高2m程度から被害が生じて破壊する^{23),24)}ことを勘案し、津波の影響範囲は標高3m未満とした。なお、高潮の最高潮位記録も5m程度であるため¹⁹⁾、津波と同様に標高3m未満を影響範囲とした。また、土砂災害に対する E_i は土砂災害危険箇所(土石流危険渓流、急傾斜地崩壊危険箇所等、地すべり危険箇所土砂災害危険箇所)に居住する人口²⁵⁾率、火山災害に対する E_i は火山地域に居住する人口²⁵⁾率とした。最後に、自然事象ごとの H_i と E_i が得られたら、都道府県ごとに掛け合わせて図-2(e)のように $H_i \times E_i$ を求めた。

一方、地震は都道府県ごとに発生回数を得るのが難しく、無数の震源に対して影響範囲は一つに決まらないの

で、他の事象と同様に H_i と E_i を評価するのは難しい。そこで、海溝型地震と直下型地震に対して以下のように $H_i \times E_i$ を求め、平均値を $H_i \times E_i$ とした。

海溝型地震は、J-SHIS Map²⁶⁾により13の震源(色丹島沖、十勝―根室沖連動、三陸沖北部のプレート間、北海道西方沖、北海道西南沖、青森県西方沖、山形県沖、新潟県北部沖、東北地方太平洋沖方、大正型関東、東海、東南海、南海)で震度6弱以上に曝される推定人口を合算し、総人口に対する比率を求めた。直下型地震は、活断層の総延長^{27)~30)}から各都道府県の面積当りの活断層長 x_i と全都道府県の平均値 x_m を求め、式(5)で規準化した。

最後に図-3のように $H \times E$ を得た。徳島県は地震と津波に対する E_i が高く、 $H \times E$ は全国最大であった。また、東京都、大阪府、愛知県は津波と高潮、地震の E_i が顕著であり、 $H \times E$ も高かった。表-2には $H \times E$ と各事象や人口の相関をまとめているが、 $H \times E$ は地震と強い相関があり、津波、高潮とも中程度の相関が認められた。

(3) 脆弱性の計算方法

脆弱性 V はハード対策の脆弱性 V_h とソフト対策の脆弱性 V_s の両面から評価した。前者は危険源の影響を軽減・回避するための物理的対策で、例えば建造物の耐震化や

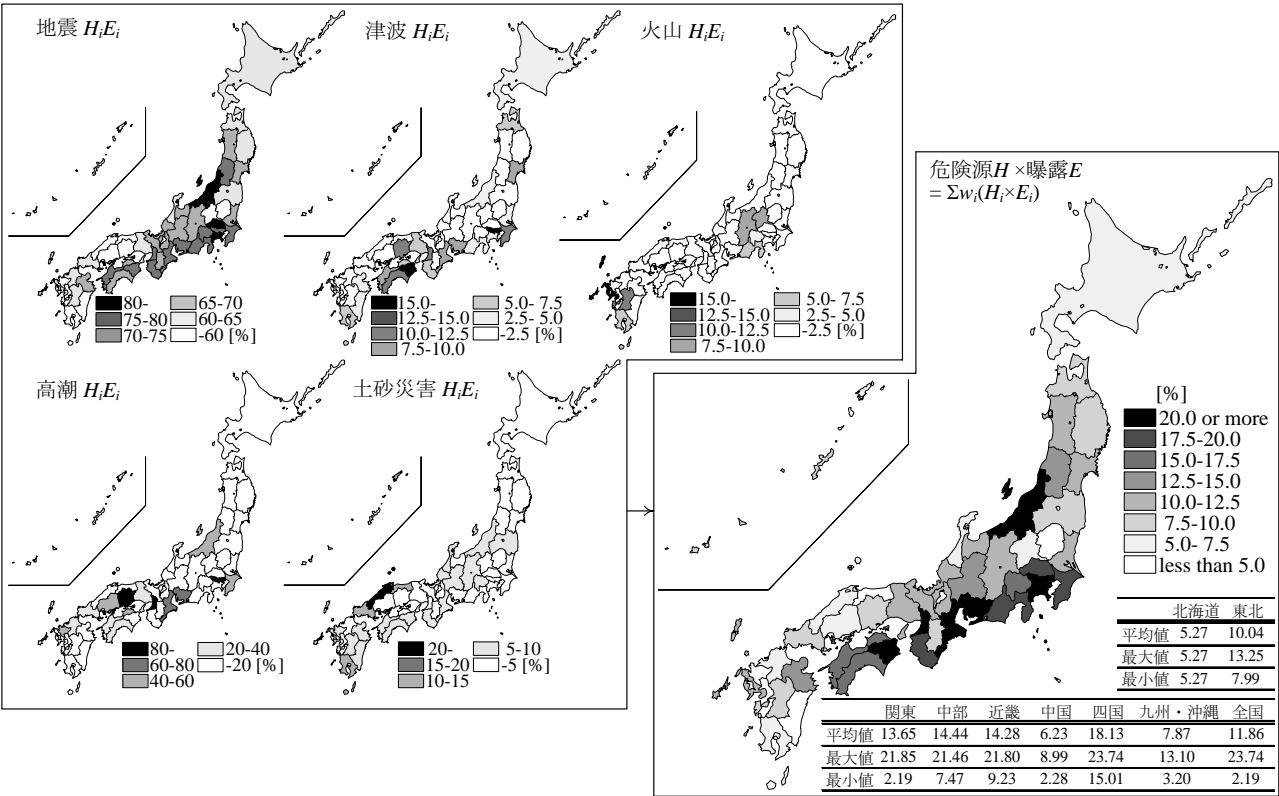


図-3 5つの自然危険源に対する危険源 $H \times$ 曝露 E の計算結果

表-2 危険源 $H \times$ 曝露 E との相関係数

地震	0.924
津波	0.586
高潮	0.393
土砂災害	-0.199
火山	-0.056
総人口	0.457
人口密度	0.489

老朽化した社会インフラの更新がある。後者は知識や実践を用いる非構造的対策で、例えばハザードマップや災害対応マニュアルの整備、物資の備蓄等がある。

a) ハード対策の脆弱性

V_h は表-1に示す住宅・公共施設、ライフライン、インフラ、情報・通信の4要素で評価した。下位の階層の基礎指標は14の統計データから求めた。

図-4に道路密度の基礎指標 C_i の計算例を示す。道路密度は自然災害発生時の避難、救助、支援ルートおよび代替ルート確保による孤立集落発生の防止といった観点の脆弱性を数値化するもので、人口10万人当たり、可住地面積1km²当たりの道路実延長³¹⁾ x_i を規準化して正負を調整して道路密度の基礎指標を求めた。

他の基礎指標の算出方法も同様で、耐震化率は住宅と公共施設の耐震化率³²⁾の平均値を用いた。住宅耐震化率は1981年施行の新耐震設計基準以降の建物とそれ以前のうち耐震補強済の建物の合計戸数の全戸建て住宅数に対する比率である。公共施設の耐震化率は公立小中学校、

病院、防災拠点となる公共施設等の耐震化率の平均値である。非防火木造住宅比率³³⁾の基礎指標は、木造住宅数のうち防火木造ではない住宅の比率である。腐朽・破損率³³⁾の基礎指標は、住宅の主要構造部分に腐朽・破損が認められる住宅の比率とした。以上の3つの基礎指標から住宅・公共建築の中間指標を算出した。

上水道設備の耐震化率は基幹管路、浄水施設および配水池の耐震化率³⁴⁾の平均である。40年超過管率³⁵⁾は供用期間が法定耐用年数の40年を超えた管路の比率である。ライフラインの中間指標は両指標から求めた。

橋梁修繕率³⁶⁾は橋梁修繕化計画における要修繕橋梁数に対する修繕済みまたは修繕中の橋梁の比率である。これを道路密度と併せてインフラの中間指標とした。

市町村防災行政無線整備率³⁷⁾は同報系防災行政無線と市町村移動系防災行政無線を整備済の市町村数比率の平均とした。Jアラート(全国瞬時警報システム)受信機整備率³⁷⁾はJアラート受信機と自立起動可能Jアラート受信機を整備済の市町村比率の平均値である。これらから情報・通信の中間指標を求めた。

V_h と中間指標の分布を図-5に示す。西日本は全体的に公共建築やライフラインの耐震化が遅れており、非防火木造住宅率も高く、 V_h が高い傾向にあった。表-3に示す V_h と中間指標および人口の相関係数からは、 V_h と情報・通信の指標の相関が強く、インフラの指標とは中程度、ライフラインの指標とは弱い相関があった。

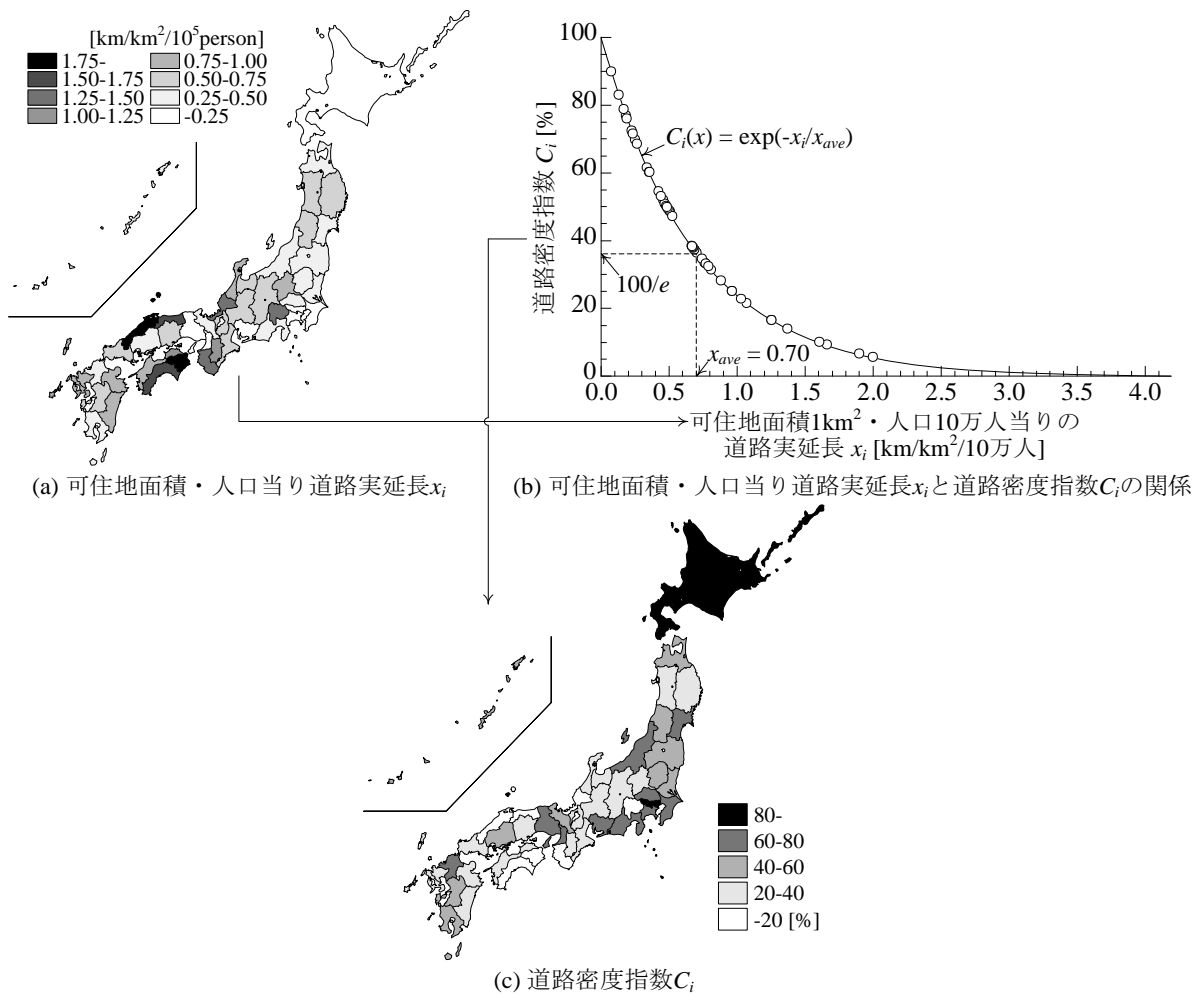


図4 脆弱性の基礎指標の計算例（道路密度指数の場合）

b) ソフト対策の脆弱性

V_s は表-1 に示す物資・備蓄、医療サービス、経済と人口構成、保険、条例・自治の中間指標で評価した。下位の基礎指標は22の統計データから求めた。

食料備蓄は主食、副食、米、乾パン、インスタント麺の備蓄量から算出した。いずれも公的備蓄量と流通在庫備蓄の合計³⁸⁾を用い、米は茶碗1杯分の生米75gを1食、副食缶は2缶を1食として、都道府県の総人口×3食/日×3日分に対する備蓄率を求めた。飲料水備蓄³⁹⁾は成人が1日に必要とする飲料水³⁹⁾を勘案し、総人口×3/1日×3日分に対する備蓄率を求めた。毛布備蓄量³⁹⁾は、総人口に対する備蓄枚数の比率を求めた。スーパー店舗数⁴⁰⁾およびコンビニ店舗数⁴¹⁾は緊急時の食糧や物資の供給に関連する値で、10万人当たりの店舗数を式(5)で規準化した。以上から物資・備蓄の中間指標を求めた。

医師数⁴²⁾は平成24年度時点の目標値（人口10万人あたり230人）⁴³⁾に対する比率を用いた。病床数⁴⁴⁾は10万人当たりの病床数を2000床で除した。医療サービスの中間指標はこれらから求めた。

財政力指数⁴⁵⁾は各都道府県の基準財政需要額に対する規準財政収入⁴⁶⁾の割合で、高いほど積極的に防災に予算

配分する財政力がある。ジニ係数は収入格差があるほど大きい0以上、1以下の係数で、一般に0.4を超えると暴動等の社会騒乱多発に対する警戒が必要になると言われている。災害発生時の社会秩序の評価のため、地域別年間収入のジニ係数⁴⁷⁾を用いた。老年人口⁴⁸⁾指数は15～64歳の生産年齢人口に対する65歳以上の高齢者人口の比率であり、要支援者の比率を表す。非保護実人員⁴⁹⁾は、都道府県の全人口に対する非保護者の割合である。以上の基礎指標から経済と人口構成の基礎指標を求めた。

地震保険加入率⁵⁰⁾は世帯の加入率で、地震発生後の復興や経済的損失のリスク移転に関わる。

土砂災害危険箇所⁵¹⁾は、土砂災害防止法⁵²⁾に基づいて人家や公共施設に被害を及ぼす可能性のある急傾斜地崩壊危険箇所、土石流危険渓流、地すべり危険箇所が指定されるが、土地利用制限等の規制や地価下落の懸念から指定の遅れが指摘されている。ここでは住民への情報公開の程度を測る指標として、土砂災害危険箇所に対する土砂災害警戒区域の指定率を算出した。ハザードマップ(HM)⁵³⁾公開率はHMを公開する市町村の比率である。津波HM公開率は海岸線を有する市町村数に対して計算し、海に面していない都道府県は100%とみなした。洪

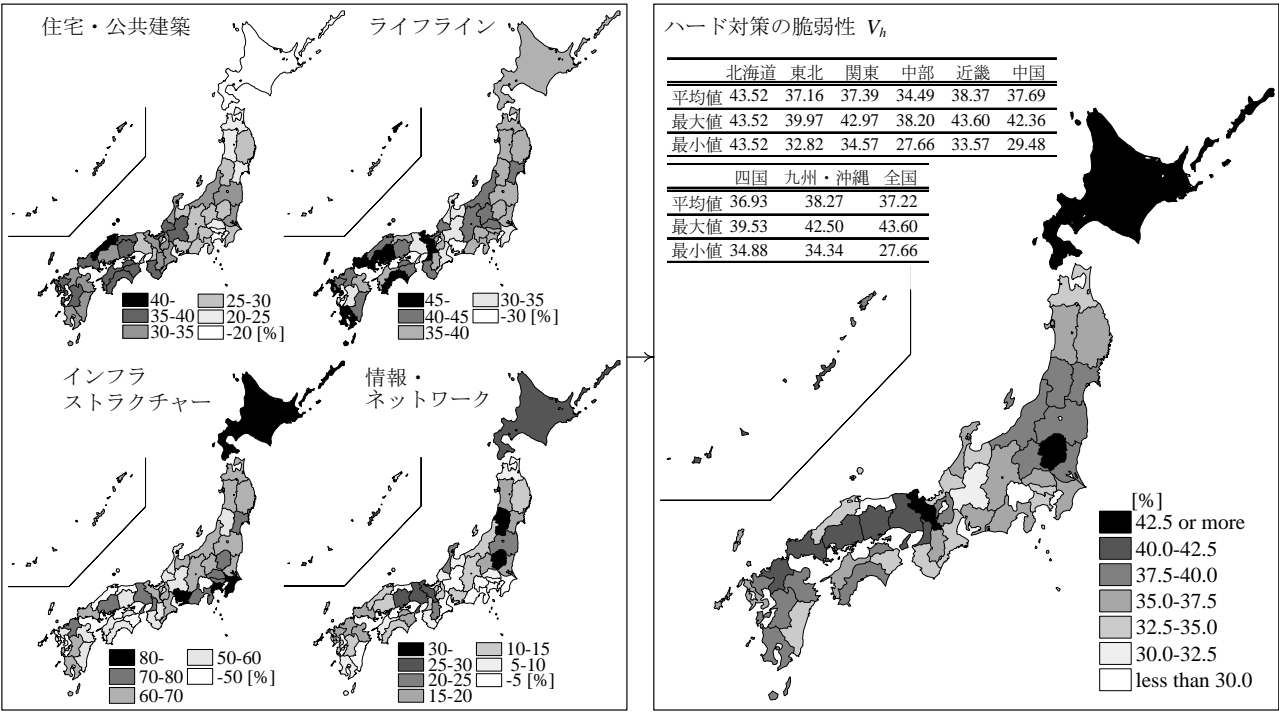


図-5 ハード対策の脆弱性 V_h と下位階層の中間指標群

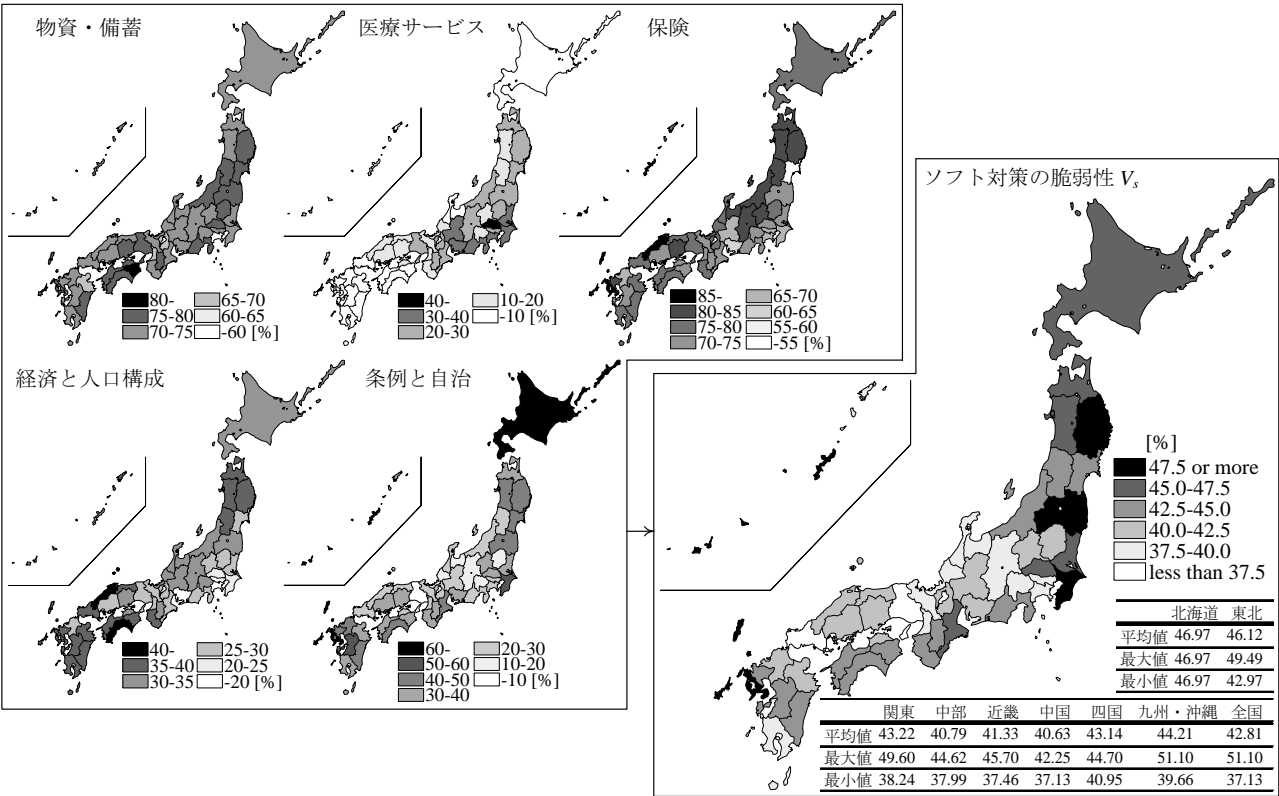


図-6 ソフト対策の脆弱性 V_s と下位階層の中間指標群

水HM公開率，土砂災害HM公開率は全市町村数に対する公開率を調査した．HMの公開率は上記の3種類の平均値として基礎指標を求めた．自主防災組織カバー世帯率³⁹⁾は，全世帯数に対する自主防災組織がカバーする世帯数の割合で，災害に対する地域連携の強さを表す．以上の3つの基礎指標から条例・自治の中間指標を求めた．

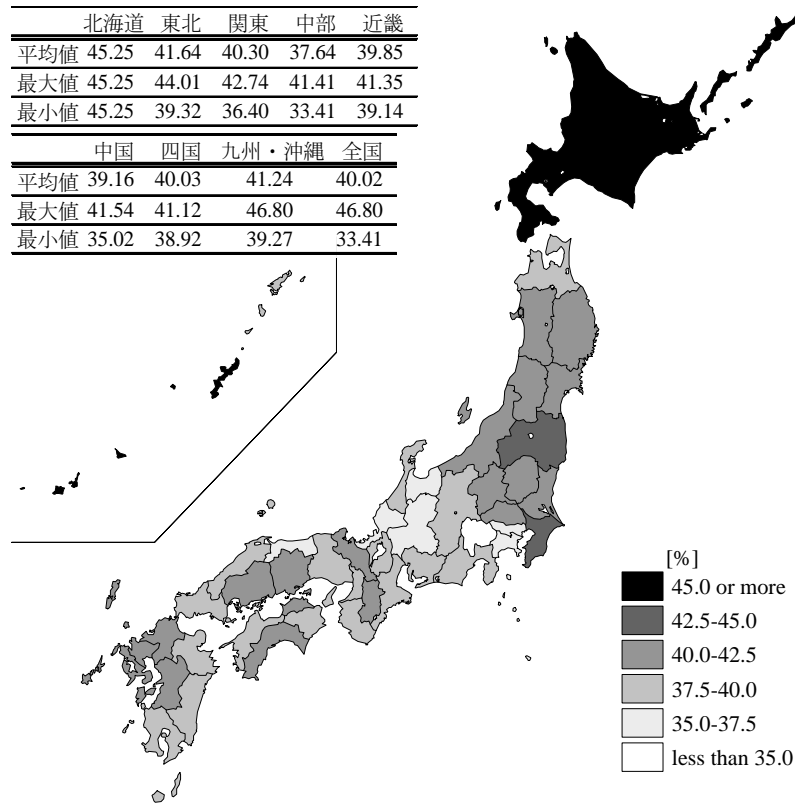
ソフト対策の脆弱性 V_s と中間指標の分布を図-6 に示す．また，表-4 に V_s と中間指標および人口の相関係数を示す．図より，東日本は全体的に V_s が高く， V_s と強い相関をもつ条例・自治の中間指標も高い値を示した．また，物資・備蓄の中間指標も V_s と中程度の相関があった．なお，医療サービスの中間指標は関東および中部エリアで

表-3 ハード対策の脆弱性 V_h との相関係数

住宅・公共施設	-0.005
ライフライン	0.310
インフラストラクチャー	0.533
情報・通信	0.752
総人口	0.137
人口密度	0.010

表-4 ソフトの脆弱性 V_s との相関係数

物資・備蓄	0.326
医療サービス	0.154
経済と人口構成	0.209
保険	0.192
条例・自治	0.815
総人口	-0.148
人口密度	-0.250

図-7 脆弱性 V の分布

の値が高かった。 V_s の算出に用いた基礎指標の多くは人口当りに規準化した。脆弱性は人口密度が高い都道府県で必ずしも不利ではなく、逆に弱い負の相関があった。

c) 脆弱性

脆弱性 V は式(8)に V_h 、 V_s と重み係数 $w_h = w_s = 0.50$ を代入して求めた。

$$V = w_h V_h + w_s V_s \quad [\%] \quad (8)$$

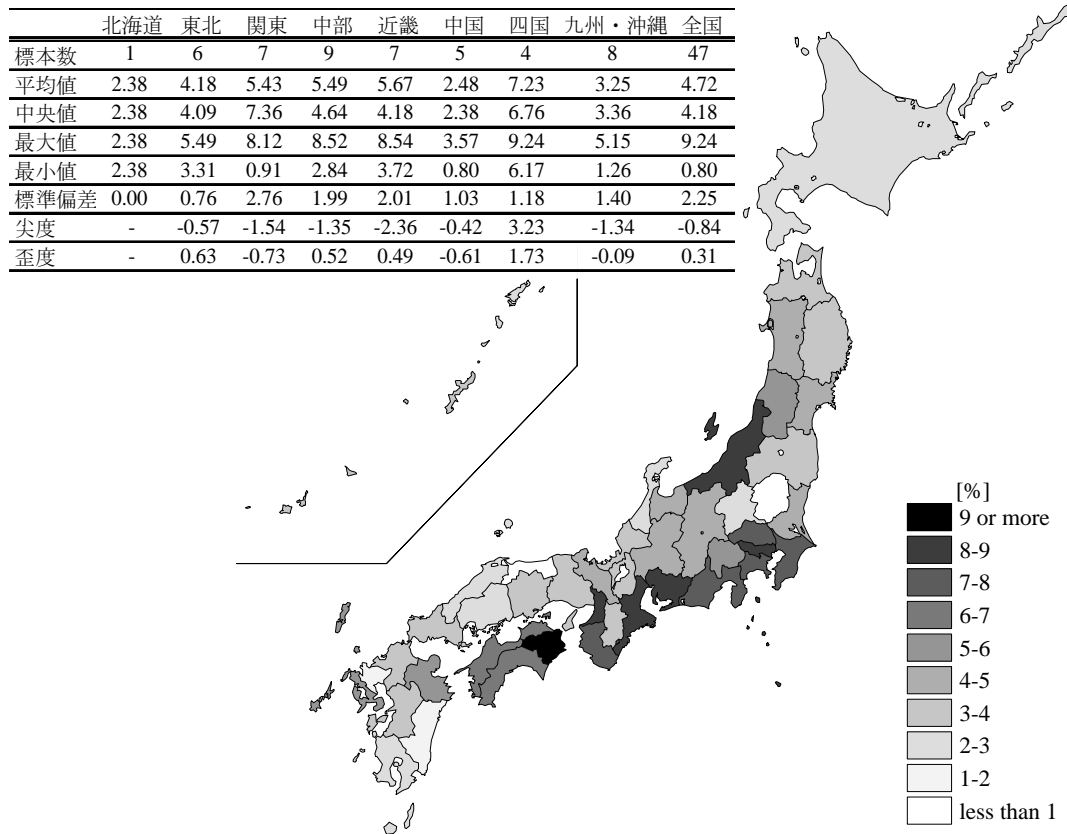
V の分布を図-7に示す。 V_h は西日本、 V_s は指標は東日本で高い傾向であったが、 V はやや東日本側で高く、地方別では北海道、東北、九州・沖縄地方の順に高く、中部は最も低かった。都道府県別では、 V は沖縄県と北海道で顕著に高く、次いで福島県、千葉県、岩手県の順であった。 V が低いのは山梨県、鳥取県で、次いで福井県、富山県、神奈川県、岐阜県、東京都の順であった。

(4) リスクの計算方法

リスク R は式(5)に $H \times E$ と V を代入して得た。図-8に R の分布と地方毎の基本統計量を示す。また、詳細な数値デ

ータは付録表-1に示す。図表より、 R は四国から関東にかけての太平洋岸で顕著に高く、徳島県、大阪府、愛知県、東京都、三重県、千葉県、神奈川県、静岡県、和歌山県の順であった。一方、東北地方太平洋岸の青森県、岩手県、宮城県および福島県は、四国地方から関東地方の太平洋岸の都府県と同様に津波に対する H は高いものの、全人口に対する標高3m以下の居住人口比率は低く、 E も小さいため、リスク指標も四国から関東の太平洋岸の都道府県ほど顕著ではなかった。また、新潟県は地震と土砂災害に対する $H_t \times E_t$ が非常に高く、 R も全国4位であった。地方別では四国地方の R が顕著に高く、次いで関東、中部、近畿地方の順であった。

表-5は R と $H \times E$ 、 V 、 V_h 、 V_s および人口の相関であるが、 R は $H \times E$ と強い相関があった。これは V は都道府県間で最大でも1.4倍程度の差に留まった(図-7)のに対して、 $H \times E$ は最大10.8倍の差がある(図-3)ためと考える。ところで、我が国の都市部は主に低平地に形成されて人口が集中しているため津波や高潮に対する $H \times E$ が高く

図-8 自然災害に対するリスク R の分布表-5 リスク指標 GNS とリスク構成指標の相関係数

	リスク指標 R	危険源 H \times 曝露 E	脆弱性 V	ハード対策 の脆弱性 V_h	ソフト対策 の脆弱性 V_s	人口	人口密度
リスク指標 R	1.000						
危険源 $H \times$ 曝露 E	0.992	1.000					
脆弱性 V	-0.074	-0.188	1.000				
ハード対策の脆弱性 V_h	-0.183	-0.253	0.704	1.000			
ソフト対策の脆弱性 V_s	0.078	-0.011	0.704	-0.008	1.000		
人口	0.449	0.457	-0.007	0.137	-0.148	1.000	
人口密度	0.460	0.489	-0.170	0.010	-0.250	0.891	1.000

なる傾向にあり（表-2），結果として R も人口密度と中程度の相関があった。

3. 自然災害に対するリスクの分析と管理

前章では，提案したリスク指標の算出方法について説明するとともに，指標は図-8のように自然災害に対するリスクを可視化し，自然災害のホットスポットを顕在化できることを示した．ここからはリスク指標を用いたリスクの評価と管理の方法について議論する。

(1) リスクの分析

リスクの特徴は R を構成する危険源 $H \times$ 曝露 E と脆弱性 V から把握できる．図-9は $H \times E$ と V の関係で，各都道府県の値をプロット，全国平均を破線で示している。

また，図中には $R (= H \times E \times V = \text{const.})$ の等高線を実線および一点鎖線（全国平均 $R_{ne}=4.72$ ）で示した．図より，沖縄県，北海道は V が高いが $H \times E$ は低く，結果として R は全国平均を下回っている．一方，東京都，神奈川県，大阪府，愛知県など都市圏は V が全国平均を下回るものの， $H \times E$ が全国平均を大きく上回り，結果として R も全国平均を超えた．ここで，図-9に二点鎖線で示した $R=7.4$ の等高線上の神奈川県，静岡県，埼玉県についてリスクの特徴を比較する．図-10は三県の R および主要な指標の全国平均に対する比である．三県の R は同じ値であるが， $H \times E$ は神奈川県，静岡県，埼玉県の順に高く， V は逆の順であった．よって，埼玉県は他の二県に比べてリスク R 低減のためには脆弱性 V に改善の余地があり，特に全国平均を明確に上回る V_s の改善が期待される．一方， V が既に全国平均をかなり下回る神奈川県では， V

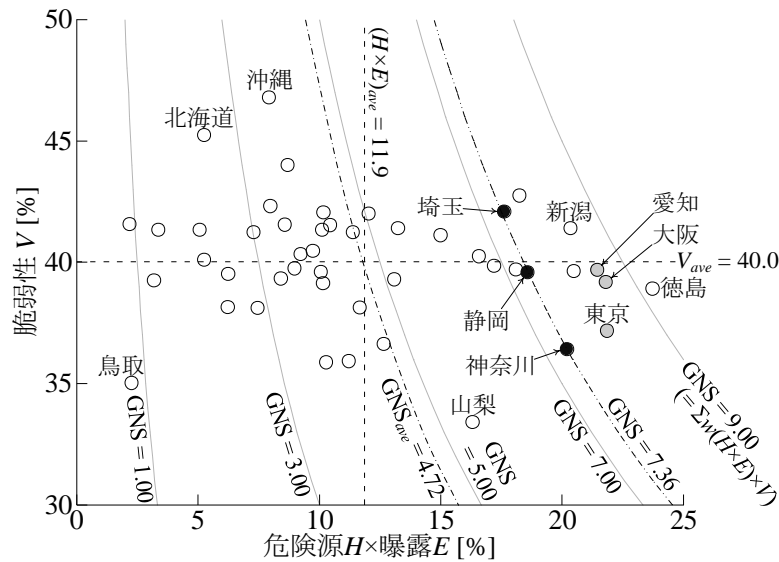


図-9 47都道府県の曝露と脆弱性の分布およびリスク指標の等高線

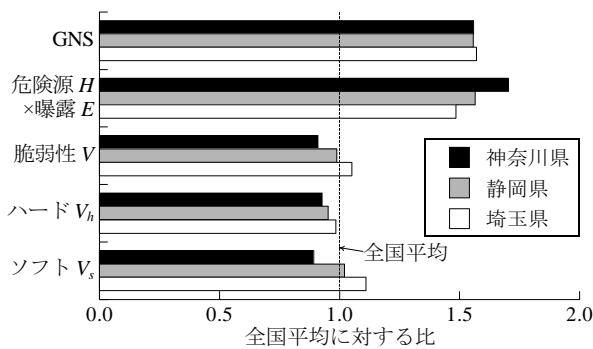
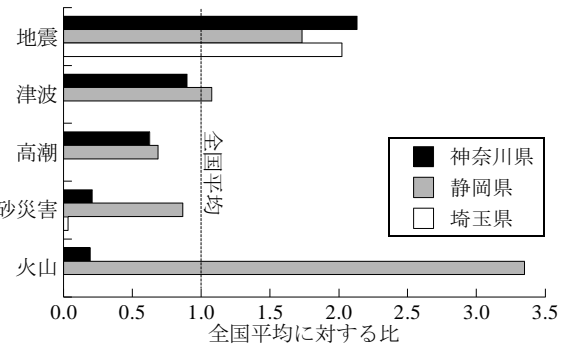
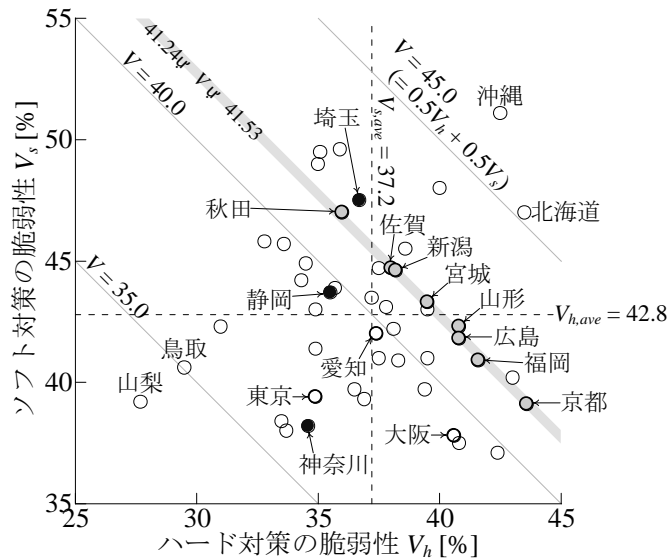

図-10 三県のリスクR, $H \times E$ およびVの比較

図-11 三県の $H \times E$ を構成する中間指標の比較


図-12 47都道府県のハード対策とソフト対策の脆弱性の分布および脆弱性Vの等高線

だけでなく $H \times E$ を改善する重要性も示唆される。

前述の三県について $H \times E$ を構成する中間指標の全国平均に対する比を図-11に示す。図より、神奈川県は地震に対する $H_i \times E_i$ が顕著であり、津波と高潮に対しても $H_i \times E_i$ が高い。静岡県はどの自然危険源に対しても $H_i \times$

E_i が高く、特に火山に対する $H_i \times E_i$ は全国平均の3倍を超えている。一方、海に面していない埼玉県は津波や高潮に対する曝露が0であり、同県が考慮すべき危険源は地震のみと言える。 $H \times E$ の低減によりリスクRの改善を目指す場合、自然事象の頻度や程度を反映するHは人為的

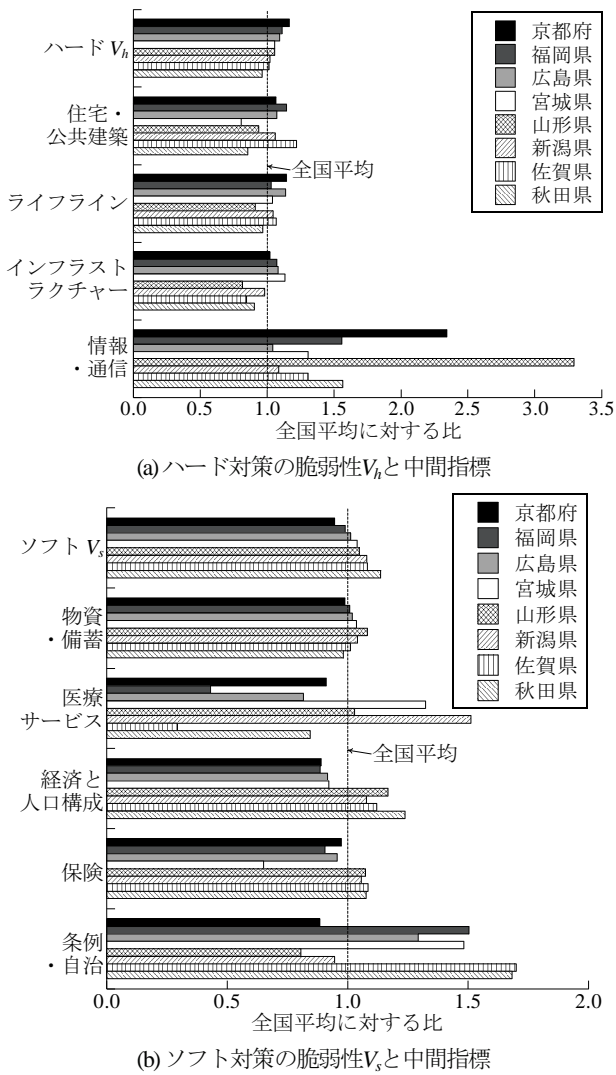


図-13 同程度の脆弱性 V をもつ八府県の比較

には改善できないので、 $H_i \times E_i$ が高い自然事象を分析した上で、事象の影響範囲内の人口を移転する等により暴露する人口比率を表す E の低減を目指す必要がある。

次に、 V の低減によりリスク R の改善を目指す場合には、ハード対策とソフト対策の両面から対策を講ずるべき要素を分析する。図-12は V_h と V_s の関係で、各都道府県の値をプロット、全国平均を破線で表している。図中には V 一定の等高線を実線で示しており、右上の領域ほど V が高い。図より、沖縄県と北海道は V が45%を超えて顕著に高い一方、山梨県だけは V が35%を下回る領域に位置する。また、都市部では東京都と神奈川県は V_s と V_h がともに全国平均を下回るのに対して、大阪府は V_h が全国平均を大きく超える。ここで図-12にグレーの帯は $41.2 \leq V \leq 41.5$ の領域には位置する八府県について、 V_h および V_s を構成する中間指標の全国平均に対する比を図-13に示す。八府県は V が同程度であるが、京都府、福岡県、広島県、山形県、宮城県、新潟県、佐賀県、秋田県の順に V_h が高く（ V_s が低く）脆弱性の質は異なっている。(a)で V_h を構成する中間指標を比較すると、 V_h が相対

的に高い府県でも、京都府はライフラインと情報・通信、福岡県は住宅・公共建築と情報・通信、広島県はライフラインとインフラストラクチャーの中間指標が高く、脆弱性の在り処が異なっている。なお、さらに遡って基礎指標を分析すれば対策を講ずるべき項目をより詳細に分析でき、例えばライフラインの中間指標が高い京都府と広島県でも改善すべき要素は異なり、京都府では40年超過管率が高く、広島県では水道耐震化率が低い。同様に(b)より、 V_s が相対的に高い秋田県、佐賀県、新潟県でも各県の特徴は異なり、新潟県は医療サービス、佐賀県と秋田県は経済・人口構成と条例・自治の中間指標が高い。こちらも基礎指標まで遡れば、新潟県は人口10万人当りの医師数と病床数がともに小さいこと、佐賀県と秋田県は土砂災害警戒区域指定率とハザードマップ公開率がともに低いことが脆弱性を高める要因であることがわかる。このように V は V_s と V_h の観点で分析できる。このようにリスク指標 R は自然災害に対するリスクのホットスポットを可視化するだけでなく、リスクを構成する中間指標を辿ることでリスクの根源を特定することができる。

(2) リスクの管理

図-14 (a)は $H \times E$ と V の関係、(b)は V_h と V_s の関係を模式的に示している。リスクの管理にあたってはまず、 R の目標値（許容値） R_a を設定し、(a)図中に $R (= H \times E \times V) = R_a$ の等高線を引く。等高線を境界として原点を含む領域をⅠ（ $R < R_a$ ）、それ以外の領域Ⅱ（ $R > R_a$ ）とする。

着目した都道府県のプロットがⅠのように領域Ⅰに存在する場合、 R は許容値 R_a 以下であるため、このままリスクを保持（許容）する。

着目した都道府県のプロットがⅡ（ $V = V_i, H \times E = (H \times E)_i$ ）のように領域Ⅱに存在する場合、 $H \times E$ と V のどちらか、または両方を減少させて同プロットを $R = R_a$ の等高線に移動させることが目標とする。 $H \times E$ について、前述のように H の改善は難しいので、住民移転等により各危険源に対する E_i を低減させてリスクを回避することが可能であるか検討し、 $H \times E$ の目標値 $(HE)_t$ を設定する。 $H \times E = (HE)_t$ に対して $R = R_a$ を達成するためには、(a)図のⅢに移動する必要がある。プロットⅢの脆弱性 V_t は

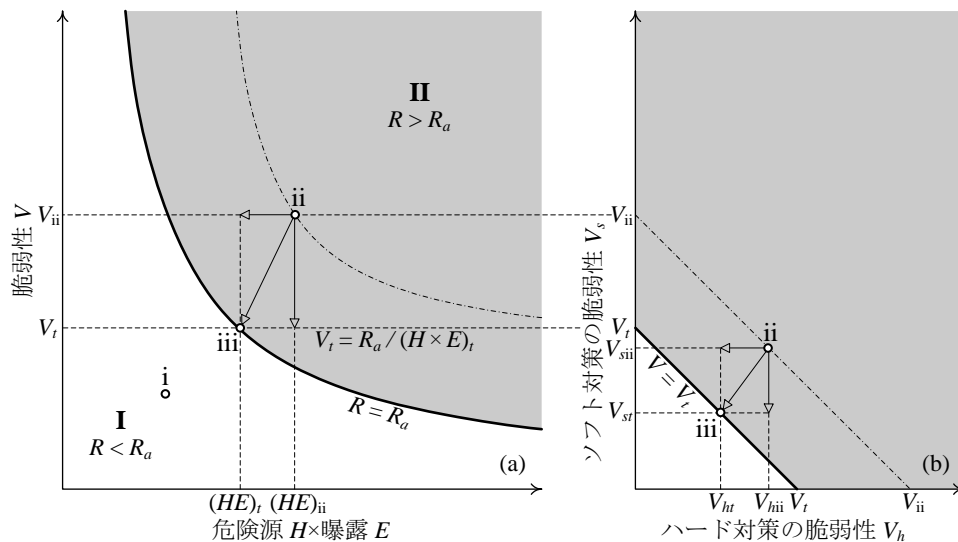
$$V_t = \frac{R_a}{(HE)_t} \quad (9)$$

となる。次に、 $V = V_t$ を達成する方法を(b)図で考える。

(b)図でⅢは一点鎖線（ $V_{ii} = \frac{V_h + V_s}{2} = \text{const.}$ ）上にあり、これを $V = V_t$ 上に移動させることが目標になる。すなわち

$$V_t - V_{ii} = \frac{dV_h + dV_s}{2} \leq 0 \quad (10)$$

を達成できるように V_h と V_s を低減する。さらに同様の方法で V_h と V_s の中間指標を精査し、改善すべき指標と

図-14 リスク指標 R を利用したリスク管理

その目標値を設定する。ただし、脆弱性を構成する中間指標群の低減に要する費用や労力、時間は指標ごとに異なるため、合理的な防災・減災対策のためには、各指標の低減に要するコストや期間の数値化も重要になる。

7. まとめ

本論文では、複数の自然事象の頻度や程度を表す危険源、自然災害にさらされる人口割合を表す曝露、自然災害に対する社会や経済の脆さを表す脆弱性を定義し、それらの掛け合わせで自然災害に対するリスクを評価する統合的指標を提案した。また、危険源、曝露および脆弱性を規準化した過去の災害記録や統計データの重み付け線形和で与えた。つづいて、都道府県レベルでのリスク指標を算出し、結果を示しながら同指標の特徴を説明した。その中で、自然災害に対するリスクのホットスポットの顕在化させるツールとしてのリスク指標の働きを示すとともに、リスク指標を構成する危険源と曝露および脆弱性を分析することで、提案した指標をリスクの分析と管理に用いる方法を説明した。なお、ここで提案したリスク指標は経時的に算出することにより、リスクや脆弱性の変動を把握し、防災・減災対策の進捗を評価するといった使用方法も想定されるため、今後さらに検討を進めて指標の有効性を検証していきたいと考えている。

謝辞：本研究は科学研究費補助金 挑戦的萌芽研究 25560184および基盤研究 (B) 16H03156の助成を受けて実施した。また、地盤工学会関東支部「地盤リスクと法・訴訟等の社会システムに関する事例研究委員会」の支援を受けた。ここに記して謝意を示す。

付録

2015年3月時点の公開データを用いて算出したリスク指標GNS、危険源 $H \times$ 曝露 E 、脆弱性 V 、ハード対策の脆弱性 V_h およびソフト対策の脆弱性 V_s を付録図-1に示す。

参考文献

- 1) UNISDR : *Hyogo Framework for Action 2005-2015 Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters*, www.unisdr.org/we/inform/publications/8720 (2016-01-10 アクセス), Geneva, 2005.
- 2) Maplecroft : *Natural Disaster Risk Index 2010*, prevention-web.net/go/14169 (2015-12-01 アクセス), 2010.
- 3) Birkmann, J., Krause, D., Setiadi, N. J., Suarez, D., Welle, T., Wolfertz, J., Dickerhof, R., Mucke, M. and Radtke, K. : *World Risk Report 2011*, Alliance Development Works, www.WorldRiskReport.org (2015-12-01 アクセス), 2011.
- 4) Shi, P. and Kaspersen, R. : *World Atlas of Natural Disaster Risk*, Springer, 2015.
- 5) Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I. and Wisner, B. : *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*, London, Routledge, 1994.
- 6) Smith, K. : *Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster*, 3rd edition, London, Routledge, 2000.
- 7) 日下部治, 伊藤和也, 小梅川博之, 稲垣秀樹, 大里重人 : 地盤リスクに関する保険制度と統一的評価手法の必要性, 地盤工学会誌, Vol. 61, No. 2, pp. 12-15, 2013.
- 8) 伊藤和也, 菊本統, 下野勘智, 大里重人, 稲垣秀樹, 日下部治 : 自然災害に対するリスク指標 World Risk Index の我が国における推移と考察, 自然災害科学 120, Vol. 36, No. 1, 2017.
- 9) 下野勘智, 菊本統, 伊藤和也, 大里重人, 稲垣秀樹, 日下部治 : 自然災害に対する全国 47 都道府県のリスク指標の試算と考察, 土木学会論文集 F6 (安全問題), Vol. 72, No. 1, pp. 1-10, 2016.
- 10) Birkmann, J. : Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: conceptual frameworks and definitions,

付録表-1 全国47都道府県の脆弱性, 曝露およびリスク指標GNS

順位	都道府県	リスク R [%]	$H \times E$ [%]	V [%]	V_h [%]	V_s [%]
1	徳島県	9.2	23.7	38.9	34.9	43.0
2	大阪府	8.5	21.8	39.2	40.6	37.8
3	愛知県	8.5	21.5	39.7	37.4	42.0
4	新潟県	8.4	20.4	41.4	38.2	44.6
5	東京都	8.1	21.9	37.2	34.9	39.4
6	三重県	8.1	20.5	39.6	33.6	45.7
7	千葉県	7.8	18.2	42.7	35.9	49.6
8	埼玉県	7.4	17.6	42.1	36.7	47.5
9	神奈川県	7.4	20.2	36.4	34.6	38.2
10	静岡県	7.4	18.6	39.6	35.5	43.7
11	和歌山県	7.2	18.1	39.7	34.5	44.9
12	愛媛県	6.9	17.2	39.8	35.7	43.9
13	香川県	6.7	16.6	40.2	39.5	41.0
14	高知県	6.2	15.0	41.1	37.5	44.7
15	山形県	5.5	13.3	41.4	39.5	43.3
16	山梨県	5.5	16.3	33.4	27.7	39.2
17	大分県	5.1	13.1	39.3	37.5	41.0
18	長崎県	5.1	12.0	42.0	35.0	49.0
19	宮城県	4.7	11.4	41.2	39.5	43.0
20	岐阜県	4.6	12.7	36.6	31.0	42.3
21	長野県	4.4	11.7	38.1	36.5	39.7
22	秋田県	4.3	10.4	41.5	36.0	47.0
23	茨城県	4.3	10.2	42.1	38.6	45.5
24	京都府	4.2	10.1	41.3	43.6	39.1
25	富山県	4.0	11.2	35.9	33.5	38.4
26	滋賀県	4.0	10.1	39.6	38.3	40.9
27	兵庫県	4.0	10.2	39.1	40.8	37.5
28	熊本県	3.9	9.7	40.5	37.8	43.1
29	福島県	3.8	8.7	44.0	40.0	48.0
30	奈良県	3.7	9.2	40.3	37.2	43.5
31	沖縄県	3.7	7.9	46.8	42.5	51.1
32	福井県	3.7	10.3	35.9	33.7	38.0
33	山口県	3.6	9.0	39.7	42.4	37.1
34	岡山県	3.6	8.6	41.5	40.8	42.3
35	岩手県	3.4	8.0	42.3	35.1	49.5
36	青森県	3.3	8.4	39.3	32.8	45.8
37	福岡県	3.0	7.3	41.2	41.6	40.9
38	石川県	2.8	7.5	38.1	36.9	39.3
39	鹿児島県	2.5	6.3	39.5	39.4	39.7
40	北海道	2.4	5.3	45.2	43.5	47.0
41	島根県	2.4	6.2	38.1	34.9	41.4
42	群馬県	2.1	5.3	40.1	38.1	42.2
43	広島県	2.1	5.1	41.3	40.8	41.8
44	佐賀県	1.4	3.4	41.3	38.0	44.7
45	宮崎県	1.3	3.2	39.3	34.3	44.2
46	栃木県	0.9	2.2	41.6	43.0	40.2
47	鳥取県	0.8	2.3	35.0	29.5	40.6
平均		4.7	11.9	40.0	37.2	42.8

Measuring Vulnerability to Natural Hazards –Towards Disaster Resilient Societies–, Birmkann, J. eds., pp. 9-54, 2006.

- 11) United Nations Office for Disaster Risk Reduction : 2009 *UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction*, www.unisdr.org/we/inform/publications/7817 (2016-01-10 アクセス).
- 12) UNDHA : *Internationally Agreed Glossary of Basic Terms Related to Disaster Management*, Geneva, 1992.
- 13) Crichton, D. : The Risk Triangle, Ingleton, J. ed., *Natural Disaster Management*, London: Tudor Rose, pp. 102-103,

1999.

- 14) Fournier d'Albe : Objectives of volcanic monitoring and prediction, *Journal of Geological Society of London*, Vol. 136, pp. 321-326, 1979.
- 15) UNDRO : *Natural Disasters and Vulnerability Analysis: Report of Expert Group Meeting*, 1979.
- 16) Norman, D. and Helmer, O. : An experimental application of the Delphi method to the use of experts, *Management Science*, Vol. 9, Issue 3, pp. 458-467, 1963.
- 17) 阿部勝正 : 日本付近に発生した津波の規模 (1498-

- 2006 年), www.eic.eri.u-tokyo.ac.jp/tsunamiMt.html (2016-01-14 アクセス), 2006.
- 18) 荒川俊秀, 石田祐一, 伊藤忠士: 日本高潮史料, 気象研究所, 1961.
 - 19) 宮崎正衛: 近年日本沿岸に來襲した高潮について, 海岸工学講演会講演集, Vol. 3, pp. 1-8, 1956.
 - 20) 国土交通省: 都道府県別土砂災害発生状況, www.mlit.go.jp/river/sabo/taisaku_sy-ojoho/dosyasaigai_hasseijokyo.pdf (2016-01-14 アクセス).
 - 21) 気象庁: 主な火山災害年表, www.data.jma.go.jp/svd/vois/data/tokyo/STOCK/souran/main/disaster_table.pdf (2016-12-14 アクセス).
 - 22) 小荒井衛, 岡谷隆基, 中埜貴元, 神谷泉: 東日本大震災における津波浸水域の地理的特徴について, 国土地理院時報, 第122集, pp. 97-111, 2011.
 - 23) 越村俊一, 郷右近英臣: 2011年東北地方太平洋沖地震津波被害における建物脆弱性と津波被害関数, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol. 68, No. 2, pp. I-336-I-340, 2012.
 - 24) 気象庁: 津波について, www.jma.go.jp/jma/kishou/known/faq/faq26.html (2016-01-14 アクセス).
 - 25) 大友篤, 笹川正, 角田敏: 土地形状別人口統計とその分析, 統計情報研究開発センター, 2001.
 - 26) 防災科学技術研究所: 地震ハザードステーション J-SHIS Map, www.j-shis.bosai.go.jp/map/ (2016-01-14 アクセス), 2014.
 - 27) 活断層研究会編: 新編日本の活断層一分布と資料, 東京大学出版会, 1991.
 - 28) 中田高, 今泉俊文 編: 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会, 2002.
 - 29) 国土交通省国土地理院: 都市圏活断層図, www.gsi.go.jp/bousaichiri/active_fault.html (2016-01-14 アクセス).
 - 30) 地盤ネット: 地盤安心マップ, www.jibanmap.jp/map/main.php (2016-01-14 アクセス).
 - 31) 国土交通省: 道路統計年報, www.mlit.go.jp/road/ir/ir-data/tokei-nen/index.html (2015-03-01 アクセス).
 - 32) 国土交通省: 耐震化の進捗について, www.mlit.go.jp/common/000133730.pdf (2016-01-14 アクセス).
 - 33) 総務省統計局: 平成20年住宅・土地統計調査, www.stat.go.jp/data/jyutaku/2008/ (2016-01-14 アクセス).
 - 34) 水道技術研究センター: 平成22年度における「地震対策3指標」の状況 - 水道統計に基づく試算結果(その1) -, 水道ホットニュース, 第342号, 2012.
 - 35) 水道技術研究センター: 「40年超過管率」の推移について - 平成22年度水道統計に基づく試算結果(その1) -, 水道ホットニュース, 第330号, 2012.
 - 36) 国土交通省: 都道府県別点検実施状況・計画策定状況・修繕進捗状況, www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo5_3.pdf (2016-01-14 アクセス).
 - 37) 総務省消防庁: 平成25年度版消防白書附属資料, www.fdma.go.jp/html/hakusho/h25/h25/index.html (2016-01-14 アクセス).
 - 38) 総務省消防庁: 地方防災行政の現状(付平成24年災害年報), www.fdma.go.jp/disaster/chihoubousai/ (2016-01-14 アクセス).
 - 39) 横浜市水道局: 飲料水の備蓄促進, www.city.yokohama.lg.jp/suidou/kyoku/torikumi/anshin-oishi/saigai/pdf/sinsaitaisaku-2-3.pdf (2016-01-14 アクセス).
 - 40) スーパーマーケット統計調査事務局: スーパーマーケット店舗数データ, www.j-sosm.jp/tenpo/ (2015-03-01 アクセス).
 - 41) NTTタウンページ: iタウンページ, itp.ne.jp/?rf=1 (2015-03-01 アクセス).
 - 42) 総務省統計局: 平成24年医師・歯科医師・薬剤師調査統計表, www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001116230 (2015-03-01 アクセス), 2013.
 - 43) 厚生労働省: 実績評価書, www.mhlw.go.jp/file/05-Shingikai-12601000-Seisakutoukatsukan-Sanjikanshitsu_Shakaihoshoutantou/0000021795.pdf (2015-03-01 アクセス).
 - 44) 総務省統計局: 平成24年医療施設(動態)調査下巻, 2014.
 - 45) 総務省: 平成24年度都道府県財政指数表, www.soumu.go.jp/iken/ruiji/todohuken24.html (2015-03-01 アクセス), 2013.
 - 46) 総務省: 地方交付税, www.soumu.go.jp/main_sosiki/c-zaisei/kouhu.html (2015-03-01 アクセス).
 - 47) 総務省統計局: 平成21年全国消費実態調査, www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?bid=000001034909&cyclo=0 (2015-03-01 アクセス).
 - 48) 総務省統計局: 2013年人口推計, www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001118081 (2015-03-01 アクセス).
 - 49) 総務省統計局: 平成24年度被保護者調査, www.e-stat.go.jp/SG1/estat/GL08020103.do?_toGL08020103_&listID=000001119498&requestSender=search (2015-03-01 アクセス).
 - 50) 損害保険算出機構: 損害保険料率算出機構統計集, www.giroj.or.jp/disclosure/toukei/ (2015-03-01 アクセス).
 - 51) 総務省: 土砂災害防止対策に関する実態把握活動, www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/000066869.html (2015-03-01 アクセス).
 - 52) 国土交通省: 土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律, www.mlit.go.jp/river/sabo/sabo_hourei.html (2015-03-01 アクセス).
 - 53) 国土交通省: ハザードマップポータルサイト, disaportal.gsi.go.jp/index.html (2015-03-01 アクセス).

(2017.1.6 受付)

A UNIFIED RISK INDEX FOR NATURAL DISASTERS

Mamoru KIKUMOTO, Kanchi SHIMONO, Kazuya ITOH,
Shigeto OSATO, Hideki INAGAKI and Osamu KUSAKABE

We defined hazard, exposure and vulnerability as the frequency and magnitude of natural disasters, the percentage of population that is exposed to natural disasters and the defects of society and economy to natural disasters, respectively. We evaluated them by weighted averaging of normalized data of past disaster records and statistics that are opened to public. We then calculated the integrated risk to five kinds of natural disasters including earthquake, tsunami, storm surge, sediment related disaster event, and volcanic activity by multiplying hazard, exposure and vulnerability. The results of disaster risk and vulnerability were presented in the prefectural scale in Japan and their tendency was discussed. We finally presented the way of applying the proposed risk index as a piece of scientific information for selecting highest priority measures for mitigation in a rational manner.