

階層分析法による総合指標の重み係数の合理化と自然災害に対するリスク指標への適用

神谷 圭祐¹・菊本 統²・伊藤 和也³・日下部 治⁴

Rational determination of weighting factors for an integrative index by Analytic Hierarchy Process and its application to a risk index against natural disasters

Keisuke KAMIYA¹, Mamoru KIKUMOTO²,
Kazuya ITOH³ and Osamu KUSAKABE⁴

Abstract

An index calculated by weighted linear summation of normalized data requires rational sets of the weighting factors. We proposed a method to calculate the weighting factors by applying Analytic Hierarchy Process (AHP) to the results of questionnaire to experts, and applied it to a risk index called Gross National Safety for natural disasters (GNS). The questionnaire regarding the alternatives (natural disasters and disaster prevention measures) considered in GNS was addressed to three groups in charge of disaster prevention. Sets of the weighting factors determined by AHP for each group showed slightly different trend, reflecting the regional characteristics of the disasters. The sets of weighting factors for disaster prevention measures were characterized by the criteria regardless of the groups, meaning reasonable selection of the alternatives.

キーワード：リスク指標，重み係数，階層分析法，整合度，自然災害

Key words: risk index, weighting factor, analytic hierarchy process, consistency index, natural disasters

¹ 横浜国立大学大学院都市イノベーション学府
Graduate School of Urban Innovation, Yokohama National University

² 横浜国立大学都市イノベーション研究院
Institute of Urban Innovation, Yokohama National University

³ 東京都市大学工学部都市工学科
Department of Urban and Civil Engineering, Tokyo City University

⁴ 国際圧入学会
International Press-in Association

本論文に対する討議は平成 31 年 2 月末日まで受け付ける。

1. はじめに

地震や豪雨をはじめ幾多の自然災害に曝されてきた我が国において、限りある防災・減災対策の予算や人員をハードとソフトの両面から効果的に組み合わせる重要性は言うまでもない。これに対して著者らのグループは、防災・減災投資の意思決定の支援を目的として、自然災害に対するリスク指標 **Gross National Safety for natural disasters (GNS)** を提案し、自然災害リスクを定量化している¹⁻³⁾。最近の検討では、GNS2015¹⁾の評価体系に基づいて都道府県および市区町村レベルで自然災害に対するリスク評価のスケール効果を検討しており⁴⁻⁶⁾、有識者や防災・減災の意思決定者との議論の中で、既存のリスク評価体系について課題が示されている⁷⁾。

個別の指標に重み係数を与えて一つの指標に集約する総合指標の算出方法は、GNSに限らず世界大学ランキング^{8,9)}をはじめ様々な分野でみられる。福本¹⁰⁾は、このような指標を「総合指標」として、都市政策のPDCAサイクルにおける総合指標の利活用のあり方を議論している。総合指標は、他都市との比較を通じて各都市の生活の質を把握したり、既に実施した政策を評価したりできる点で有用である一方、総合指標の作成方法は必ずしも確立されておらず、GNSの研究開発では重み係数の設定手法が課題として指摘されている^{2,3)}。

図1は、国内外の14種類の総合指標の評価過程をまとめている。図1に示すように、選定した統計データから総合指標を求める過程では規準化や重み係数の設定といった数理的操作が必要にな

り、その方法は総合指標の値に影響を及ぼす。データ群の重み付けについて、THE⁸⁾やQS⁹⁾といった世界大学ランキングを含めて、多くの総合指標では重み係数の設定に根拠は示されていない。一方、CSR企業ランキング¹¹⁾や新・企業力ランキング¹²⁾では、主成分分析の第一主成分得点を利用したデータ群のまとめ上げによる統計的な手法を用いた重み係数の設定も試みられているものの、設定される重み係数はデータ群に大きく依存するため、データ群の更新や規準化の方法の変更に伴って重み係数の値が異なる課題がある。

以上のことから、総合指標の改善には重み係数の合理化が不可欠である。しかし、前述のように重み係数は必ずしも統計的に決められるものではなく、同じ対象に対して指標を評価する場合でも、地域や時期、指標の目的によって異なるものと考えられる。これに対して本研究では、総合指標は、利用者が評価対象を効果的、効率的に改善することを支援するツールであるべきとの考えに立って、総合指標の利用者の意思を適切に反映した重み係数の決定手法として、Thomas L. Saaty¹³⁾が人間の主観を数値化する意思決定手法として提唱した階層分析法 (Analytic Hierarchy Process; AHP と略される) を用いた重み係数の設定手法を提案する。本論文では階層分析法をGNSの評価体系に適用し、指標を利用する防災・減災投資の意思決定者へのアンケートの結果を説明するとともに、AHPに基づいて決定した自然災害や防災・減災対策の種類ごとの重み係数を示す。さらに、アンケートのデータを回答者集団や評価基準ごとの重み係数の違いを議論する。

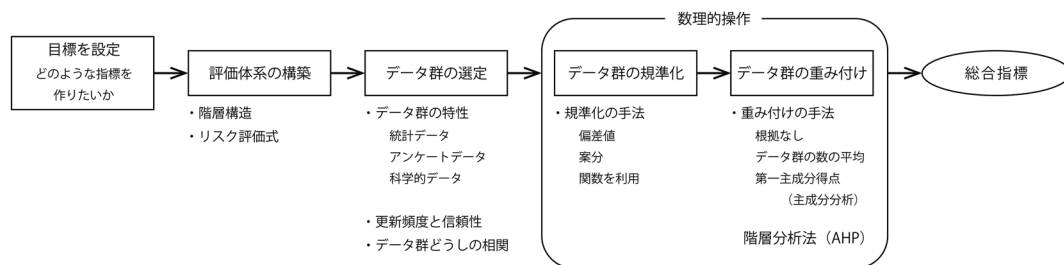


図1 総合指標の作成手法

2. 階層分析法 (AHP) に基づく重み係数の決定方法と GNS への適用

階層分析法 (AHP)^{13,14)} は1980年に Thomas L. Saaty によって提唱された意思決定手法で、人間の主観を数値化して最終目標に対する代替案の重要度を算出できる。AHP は国内においても、交通計画では通学バスの効率的な運行のための運行本数の決定¹⁵⁾、海岸工学では高潮対策工法の決定¹⁶⁾に、地震工学では地震被害評価情報を活用した想定地震の決定¹⁷⁾に使われている。防災分野でも AHP を用いて防災担当職員による防災対策の優先度を定量化した研究事例¹⁸⁾がある。本章ではまず4者の重み付け問題を例示しつつ、AHP の概要を説明する。さらにアンケートの概要として、AHP を GNS に適用する際の階層構造と調査対象を示す。

2.1 AHP における階層構造の構築

AHP では、解決したい問題を総合目的 (goal)、評価基準 (criteria)、代替案 (alternative) の3つの関係でとらえ、階層構造を作る。例えば、図2に示すように総合目的を設定し、それに対する選択肢を代替案として設定する。評価基準は、代替案の重要度を評価するためのアンケートにおいて、質問内容の前提条件として提示する。

2.2 一対比較法に基づいたアンケートの作成

AHP では、各階層内の2つの項目に対する人の主観に基づく「どちらがどのくらい重要か」という一対比較の結果を利用する。この手法は「一対比較法」と呼ばれ、階層内のすべての項目の組み合わせに対して行われる。本研究では表1に示す副詞を一対比較値に置き換えて一対比較を行った。一対比較値の妥当性は Saaty によって検証されている¹³⁾。一対比較の結果は図3に例示するアンケートにより得た。この回答例では「ライフライン」は、「住宅・公共施設」より「やや重要」な防災・減災対策であり、「情報・通信」より「かなり重要」な防災・減災対策であると回答したことが分かる。図2の階層構造に基づき重み係数を求め、一対比較表にまとめた一例を表2に示す。

2.3 一対比較値を用いた重み係数の算出方法

固有値法¹⁹⁾により2.2のアンケートで得た一対比較値から重み係数を算出する。いま、 n 個の評価基準または評価基準ごとの代替案 I_1, I_2, \dots, I_n があり、それぞれの重み係数を w_1, w_2, \dots, w_n とするとき、項目 I_i, I_j の重要度の一対比較値 a_{ij} は、

$$a_{ij} = \frac{w_i}{w_j} \tag{1}$$

という関係を満たすとする。このとき、 n 行 n 列の一対比較行列 $A = [a_{ij}]$ を次式で与える。

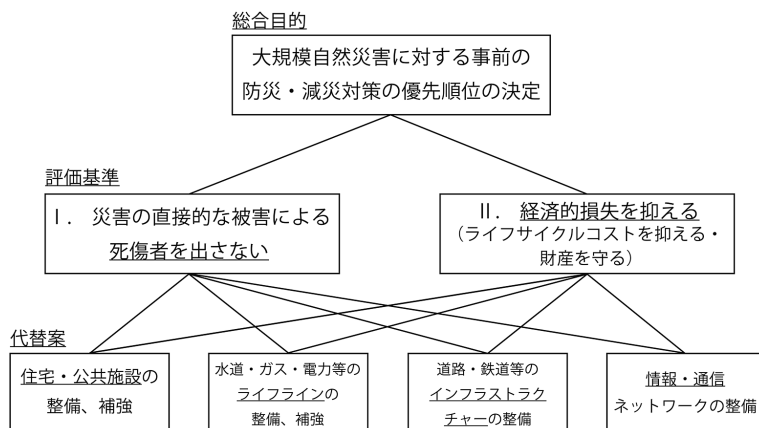


図2 本章で用いる階層構造の一例

$$A = \begin{bmatrix} \frac{w_1}{w_1} & \frac{w_1}{w_2} & \dots & \frac{w_1}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & & \frac{w_2}{w_n} \\ \frac{w_2}{w_1} & \frac{w_2}{w_2} & \dots & \frac{w_2}{w_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & \dots & \frac{w_n}{w_n} \\ \frac{w_n}{w_1} & \frac{w_n}{w_2} & & \frac{w_n}{w_n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 n 個の重み係数 w_1, w_2, \dots, w_n を成分とするベクトルを \mathbf{v} として、

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

表 1 本研究で用いた一対比較値

副詞	数値 (一対比較値)
同じくらい重要	1
やや重要	3
かなり重要	5

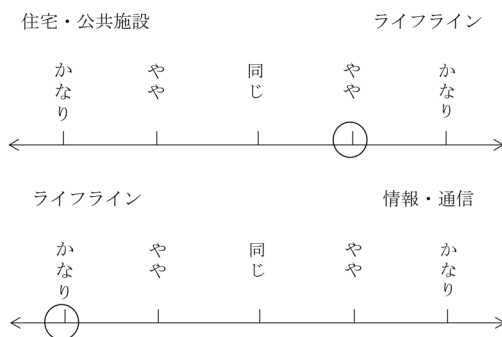


図 3 アンケートの回答例

表 2 アンケートの結果の一例 (一対比較表)

	住宅・公共施設	ライフライン	インフラストラクチャー	情報・通信	重み係数 (固有ベクトル)
住宅・公共施設	1.000	0.333	1.000	5.000	0.226
ライフライン	3.000	1.000	3.000	5.000	0.513
インフラストラクチャー	1.000	0.333	1.000	3.000	0.193
情報・通信	0.200	0.200	0.333	1.000	0.068
合計	$\lambda_{max} = 4.115, C.I. = 0.038$				1.000

と定義し、行列 A を左からベクトル \mathbf{v} にかけてると、

$$A\mathbf{v} = n\mathbf{v} \quad (4)$$

となる。式 (4) から、ベクトル \mathbf{v} は行列 A の固有ベクトルであり、 n は行列 A の固有値であることがわかる。

ところで、すべての a_{ij} において式 (1) を満たすとき、すべての a_{ij} が、

$$a_{ik} = a_{ij} a_{jk} \quad (5)$$

を満たす。式 (5) は項目 i と j および j と k の一対比較値により項目 i と k の一対比較値が求まることを意味するが、主観に基づく回答結果は必ずしも同式を満たさない。そこで、ベクトル \mathbf{v} が行列 A の固有ベクトルである性質を必要条件として用いる。

$$A\mathbf{v} = \lambda\mathbf{v} \quad (6)$$

このとき、 λ は行列 A の固有値である。ところで、 \mathbf{v} の成分、すなわち重み係数は正であるが、ペロン-フロベニウスの定理より λ の最大値 λ_{max} に対応する固有ベクトル \mathbf{v} の各成分は厳密に正であることが保証される²⁰⁾。よって、ここでは最大固有値 λ_{max} に対応する固有ベクトルを求め、成分の総和が 1 になるように重み係数を計算した。

$$\sum w_i = 1 \quad (7)$$

さらに、 $\lambda_{max} \geq n$ となることが Saaty によって証明されており、回答に矛盾が多いほど λ_{max} は大きくなる。そのため、 λ_{max} を除いた固有値の合計を、 λ_{max} を除いた固有値の数で除した値、

$$C.I. = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (8)$$

を整合度 C.I. (Consistency Index) として、回答の矛盾の度合いを調べることができる。

上記のように評価基準間の重み係数 w_j^C と評価基準ごとの代替案の重み係数 w_i^A を求め、それらを式 (9) を用いて合計し、総合目的に対応する重み係数 w_i^G を求める。

$$w_i^G = \sum_j w_j^C w_i^A \tag{9}$$

図 2 に示した階層構造によって求められる重み係数は、表 3 に示すとおりである。

2.4 GNS における階層構造

自然災害に対するリスク指標 GNS は、国連大学環境・人間の安全保障研究所 (UNU-EHS) を中心として開発された World Risk Index (WRI) の枠組みを参考²¹⁾にしつつ、都道府県における脆弱性の一部の試算²²⁾を踏まえて、我が国のリスク指標としてふさわしい評価体系を議論しつつ開発が進められた。GNS は、曝露量指数と脆弱性指数を掛け合わせることで評価される¹⁻³⁾。曝露量指数は被害をもたらす可能性がある事象の発生頻度を表す危険源 (Hazard) と、危険源の損失を被る可能性がある影響範囲内の居住人口比率を表す曝露 (Exposure) を掛け合わせることで求め、地震、津波、高潮、土砂災害、火山の噴火の 5 つの自然災害が考慮されている。脆弱性指数は、危険源の被害や損害を受けやすくする物理的、社会的、

経済的、環境的性質を表す脆弱性 (Vulnerability) から求め、ハードウェア対策とソフトウェア対策を合わせて 9 つの防災・減災対策が考慮されている。各指数の項目は、総和が 1 の重み係数を掛け合わせることで統合される。

ところで、WRI を提案した WorldRiskReport 2011 では、脆弱性を構成する指標は、WRI が対象とする複数の自然災害のいずれに対しても関連をもたねばならないと説明されている²³⁾。これに対して、GNS の脆弱性指数は我が国独自の防災・減災対策を考慮しつつ、WRI のフレームワークを踏襲する形で項目を設定している。すなわち、GNS における防災・減災対策の重みは危険源によらず一定であると仮定し、この仮定に基づいて危険源を一括りにした脆弱性指数の重み付けを行っている。しかし、複数の危険源に対して脆弱性指数の重み係数は必ずしも同一とは言えないことには注意が必要である。

GNS の評価体系を参考に、「災害対策を考慮する上で重要だと考えられる自然災害の決定」と「大規模自然災害に対する事前の防災・減災対策の優先順位の決定」の 2 つを総合目的とした階層構造を作成し、前者を曝露量指数の重み係数の決定に、後者を脆弱性指数の重み係数の決定に用いた。各総合目的に対する階層構造を図 4、5 に示す。

曝露量指数の重み係数の決定に用いた階層構造 (図 4) では、総合目的と評価基準を一体として

表 3 アンケートによって得られる重み係数

	評価基準 w_j^C 「死傷者を出さない」	重み係数 w_i^A	重み係数 w_i^G
住宅・公共施設	0.750	0.226	0.302
ライフライン		0.513	0.405
インフラストラクチャー		0.193	0.191
情報・通信		0.068	0.102
合計		1.000	1.000
	評価基準 w_j^C 「経済的損失を抑える」	重み係数 w_i^A	
住宅・公共施設	0.250	0.531	
ライフライン		0.082	
インフラストラクチャー		0.183	
情報・通信		0.204	
合計		1.000	

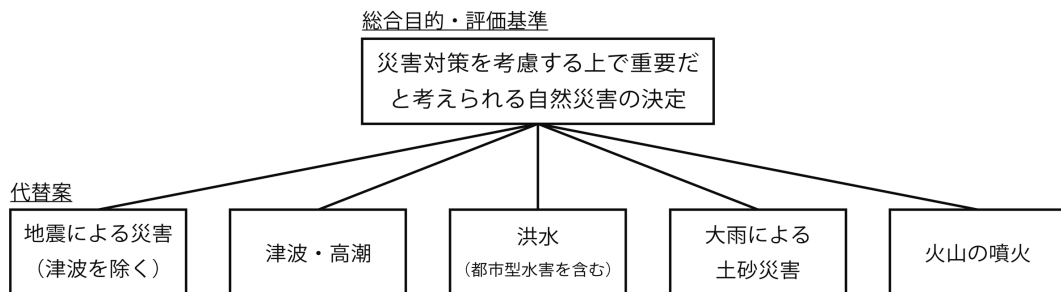


図4 曝露量指数の重み係数の決定に用いた階層構造

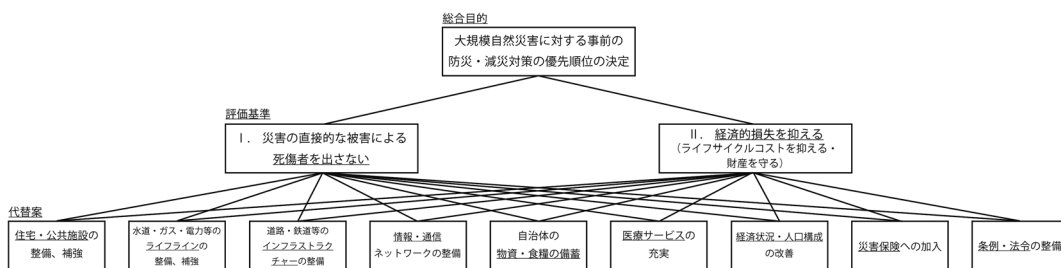


図5 脆弱性指数の重み係数の決定に用いた階層構造

捉え、2層の階層となっている。なお、AHPの各項目は、アンケートの回答者に混乱を与えないような独立性の高いものを採用することが重要であるため、一部の代替案の項目をGNSの評価体系と変更するとともに、GNSの評価体系にない洪水を新たな危険源として導入した。

脆弱性指数では、「災害の直接的な被害による死傷者を出さない」と、「経済的損失を抑える（ライフサイクルコストを抑える・財産を守る）」の2つを評価基準とした。自然災害による被害の対象を「ヒト」「モノ・カネ」と明確に示すことによって、回答者の混乱を避ける狙いがある。代替案はGNSの評価体系の脆弱性の中間指標に相当する9つの項目を設けた。一対比較の対象となる要素数は多くても7個から9個までに留める必要があるが、本アンケートは専門家を対象としたため、回答の矛盾は少ないと予想し、9項目でアンケートを実施した。なお、「ハードウェア対策」と「ソフトウェア対策」はGNSの評価体系では指標の明確さの観点で区別したが、ここでは区別なく

比較を行った。これにより、GNSの評価体系においてこれまで均等に配分されてきたハードとソフトの重み係数自体もAHPに基づいて適切な値を決定することになる。

図4、5の階層構造に基づいて、表4に示すアンケートを作成した。

2.5 調査対象

アンケートは2016年12月から2017年1月にかけて実施し、防災・減災対策の意思決定に関わる有識者として茨城県および神奈川県職員と日本技術士会に所属する技術士をはじめとして計77名の回答を得た(表5)。

茨城県と神奈川県については防災・減災対策の意思決定に関わる部署に回答を依頼した。また、行政以外の立場で防災・減災対策に関わる専門家として、日本技術士会神奈川県支部と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普及委員会」の計26名にアンケートを依頼し、結果を比較した。なお、回答者

表4 本アンケートの質問内容

質問No.	内容	回答方法	設問数
1	あなたの所属する部署を教えてください	選択式 (5択)	10問 1問 72問 (36問×2評価基準)
2	災害対策を考慮する上で重要だと考えられる自然災害5つをそれぞれ比較して下さい		
3	大規模自然災害に対する事前の防災・減災対策の優先順位の決定に際して、2つの評価基準をそれぞれ比較して下さい		
4	2つの評価基準に合わせて、9つの防災・減災対策をそれぞれ比較して下さい		

表5 本アンケートの対象

調査期間	2016年12月～2017年1月			
回収数	77			
回答者属性	茨城県 (46)	神奈川県 (5)	日本技術士会 神奈川県支部 (20)	地盤リスクと法・訴訟等の 社会システムに関する 事例研究普及委員会 (6)
	(所属部局) 生活環境部防災・危機管理局 防災・危機管理課 (4) 土木部検査指導課 (3) 土木部道路維持課 (5) 土木部河川課 (9) 土木部港湾課 (3) 土木部営繕課 (3) 土木部都市局都市計画課 (3) 土木部都市局都市計画課 (3) 土木部都市局下水道課 (3) 土木部都市局建築指導課 (3) 土木部都市局住宅課 (3) 土木部企画室 (4)	(所属部局) 県土整備局河川下水道部河川課 (1) 県土整備局建築住宅部建築安全課 (1) 県土整備局道路部道路管理課 (1) 県土整備局都市局都市計画課 (1) 安全防災局安全防災部災害対策課 (1)	(所有する技術部門※延べ 人数) 機械部門 (2) 電気電子部門 (2) 化学部門 (2) 金属部門 (2) 建設部門 (4) 経営工学部門 (2) 情報工学部門 (3) 応用理学部門 (2) 原子力・放射線部門 (1) 総合技術監理部門 (4) ()は人数を示す	

の1名は脆弱性指数の一对比較に関する設問には
 ほぼ未回答であったためアンケート結果から除外
 し、他数名のアンケート結果に稀に見受けられた
 未記入の回答欄は、「同じくらい重要」とみなして
 整理した。

3. アンケートの結果と考察

本章では、アンケートの結果をもとに、全アン
 ケートの整合度 C.I. と回答のばらつきに関する考
 察を行う。さらに、茨城県、神奈川県、日本技術
 士会に所属する技術士をはじめとした有識者の回
 答者集団別の重み係数の結果を考察する。

3.1 アンケートの整合度 C.I. と回答のばらつ きに関する考察

曝露量指数と脆弱性指数について、全回答の
 C.I. の分布を図6、7に示す。脆弱性指数の C.I. の

分布は、2つの評価基準による回答数の合計であ
 る。Saaty は C.I. が0.1～0.15以下のとき回答結果
 に整合性があるとした¹³⁾が、本アンケート結果の
 中央値および平均値は0.15前後に収まっているこ
 とから、概ね整合性のある結果が得られたといえ
 る。脆弱性指数の C.I. は曝露量指数の C.I. より
 も大きくなったが、これは階層内の項目数が9個
 と多いためと考えられる。本研究では、階層内の
 項目数が比較的多いため C.I. がやや高くなること
 と、回答者集団別に個人の一对比較の結果をまと
 めあげる際にできるだけ多くの回答に適用するこ
 とが望ましいとの観点から、曝露量指数に対して
 は C.I. < 0.200、脆弱性指数に対しては C.I. < 0.250
 を満たす回答結果(図6、7の赤色部分)を C.I. の
 しきい値とした。

なお、図6、7の横軸の左端は C.I. = 0 となっ
 た人数を表している。これらは、ほとんどの一对

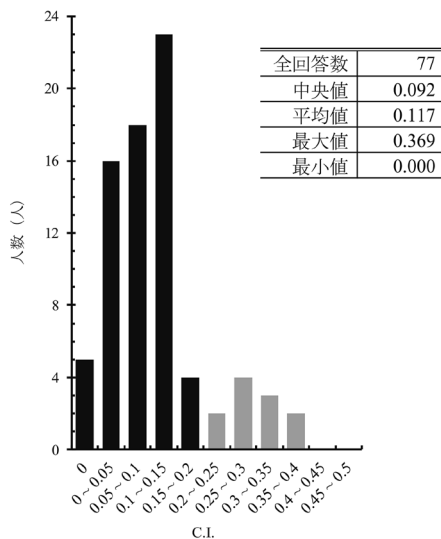


図6 曝露量指数の C.I. の分布

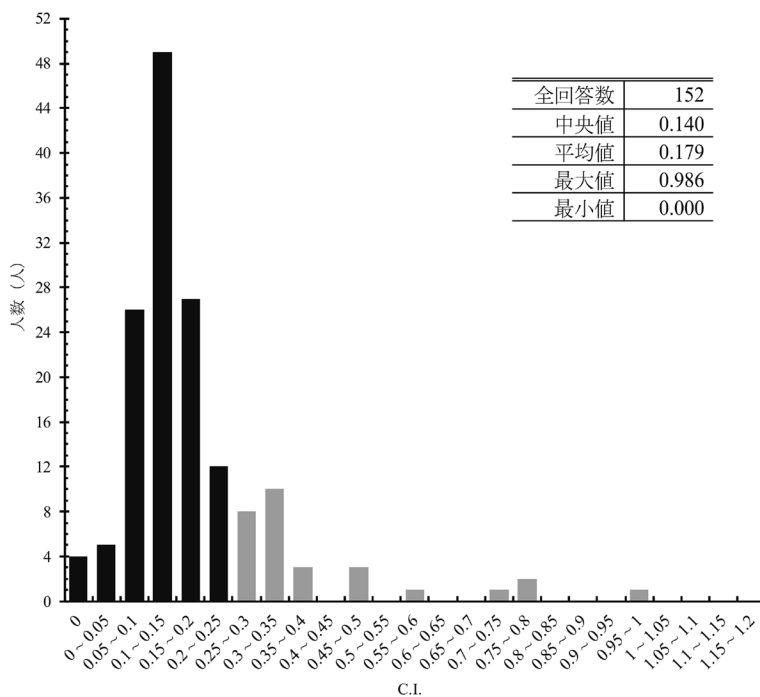


図7 脆弱性指数の C.I. の分布

比較で「同じくらい重要」と回答し、すべての a_{ij} が式 (5) を満たしている状態といえる。C.I. = 0 となった結果は、整合度とは別に回答を丁寧にやっていない可能性があり、データの扱いに注意が必要な場合がある。

「死傷者を出さない」評価基準における脆弱性指数の重み係数の散布図を図8の右図に示す。図8の左図は「住宅・公共施設の整備、補強」の重み係数のヒストグラムを表し、平均値と中央値、偏差値 T 別の値を記載している。また、図8の薄いグレーのハッチは、偏差値40から60の重み係数の範囲を示し、濃いグレーのハッチは偏差値45から55の重み係数の範囲を示している。

図8より、C.I. の大きい回答が必ずしも外れた値にはなっていないことが分かる。ばらつきがあり外れた値であっても、整合性があり信頼性の高いデータが多く存在し、重み係数を求める際には十分に考慮する必要がある。

3.2 回答者集団別重み係数に関する考察

集団幾何平均法を用いて個人の一対比較の結果から回答者集団別の重み係数を算出した¹⁴⁾。

集団幾何平均法では、個人の一対比較値 a_{ij} を幾何平均することで、集団での一対比較値 A_{ij} を求める。

$$A_{ij} = \left(\prod_k (a_{ij})_k \right)^{\frac{1}{k}} \quad (10)$$

このとき、個人の一対比較値 a_{ij} と同様に、

$$A_{ij} = \frac{1}{A_{ji}} \quad (11)$$

を満たすため、計算が容易である。一対比較値を求めた後の計算は、先述の重み係数の算出方法と同様に行った。集団幾何平均法の適用例を図9に示す。本研究では先述の通り、曝露量指数に対しては $C.I. < 0.200$ 、脆弱性指数に対しては $C.I. < 0.250$ を満たす回答結果 (図6, 7のグレー色部

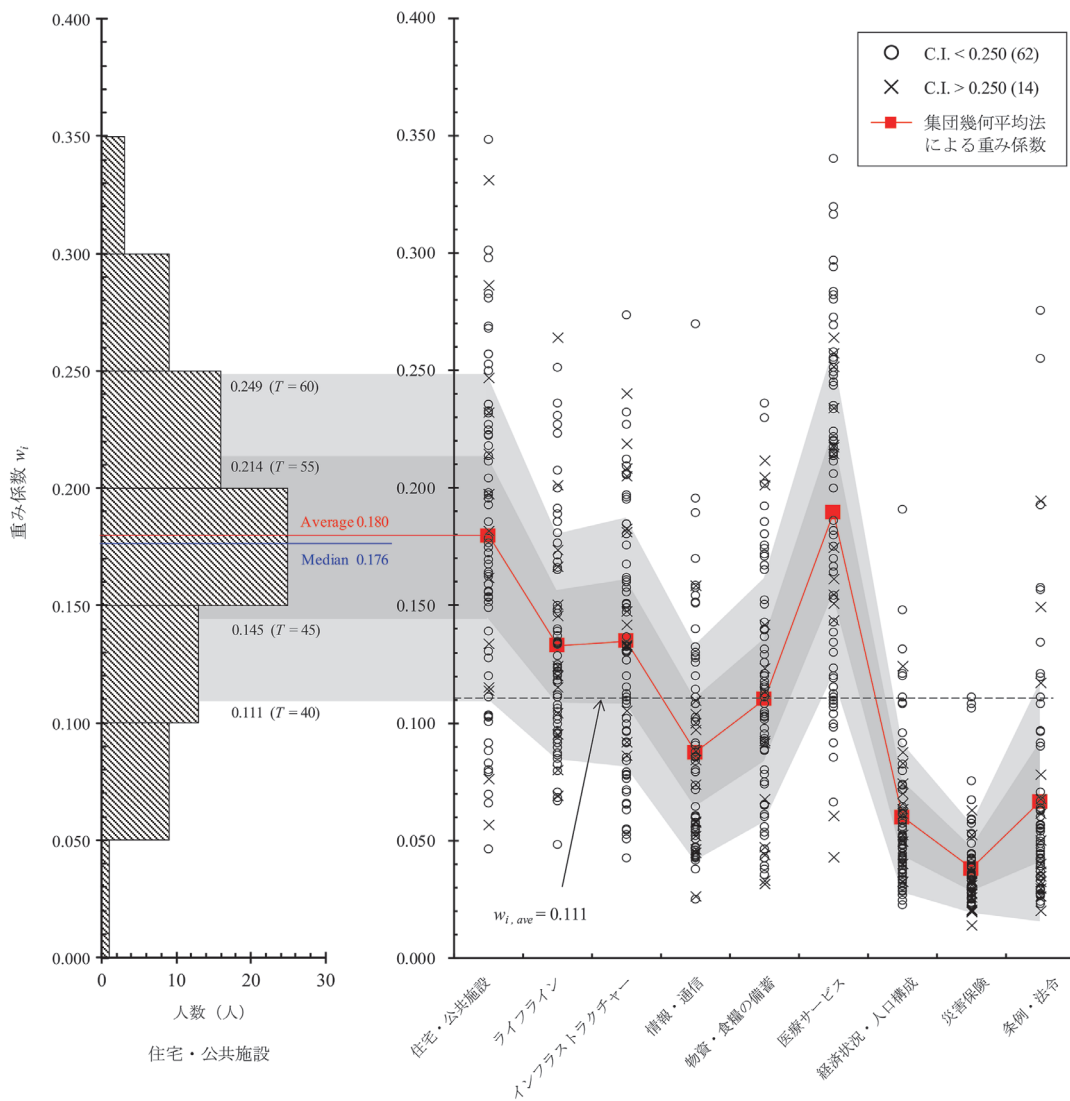


図8 「死傷者を出さない」評価基準における脆弱性指数の重み係数の散布図

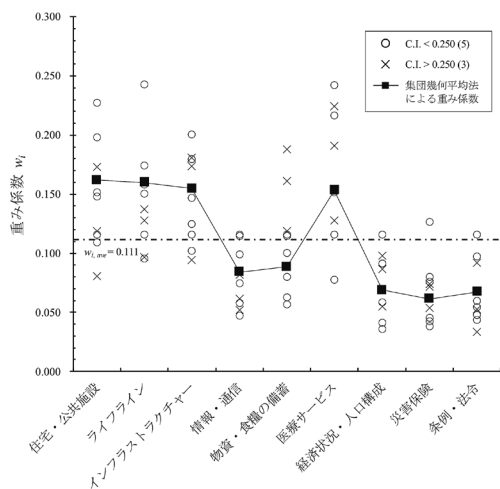


図9 脆弱性指数の重み係数の決定における幾何平均の例（茨城県河川課）

分)を用いて、集団幾何平均法を適用した。

茨城県および神奈川県職員と、日本技術士会に所属する技術士をはじめとした有識者、3つの回答者集団ごとに集団幾何平均法を適用した分析結果を以下に示す。

各回答者集団を対象とした曝露量指数の重み係数を図10に示す。どの回答者集団も地震の重み係数が大きくなった。これは近年、震度の大きい地震が多発し、防災・減災対策を考える上で意識する回数が多いためと考える。津波、洪水に関しては、茨城県の重み係数が他の2つの回答者集団に比べて大きくなった。これは、茨城県において、東日本大震災での津波被害や、2015年の東北・関東豪雨による洪水の被害など、近年県内での被害が連続したためと考える。一方、土砂災害や噴火の項目では、神奈川県の重み係数が相対的に大きい。神奈川県の土砂災害警戒区域数は茨城県や関東地方の平均値と比べ多い²⁴⁾こと、2015年以降、箱根山の火山活動が活発化していることが影響していると言えよう。以上より、重み係数は最近、発生した自然災害に幾らか影響を受けると考えられる。しかし本来、災害対策を講ずるべき自然災害は近年の大規模災害のみに依存するのではなく、国土・県土の長期的保全を視野に入れて検討すべきである。特に、大規模災害の発生直後には

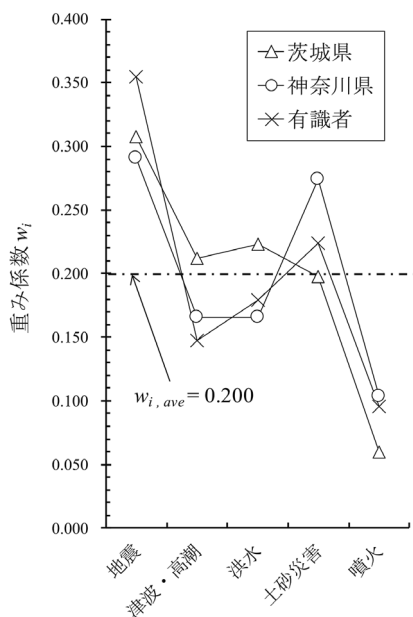


図10 曝露量指数の回答者集団別重み係数

アンケートの結果が当該の危険源に依存しやすくなると予想されるため、今後同様のアンケートを実施する際にはアンケートの問いや時期に留意する必要があるといえる。

次に、各回答者集団を対象とした脆弱性指数の重み係数を図11に示す。回答者集団ごとの値に差はあるものの、重み係数の大小に関しては概ね同じ傾向を示している。また、図11にはGNS2015における重み係数も併記しているが、GNS2015では、「住宅・公共施設」「医療サービス」で重み係数を過少に評価し、「経済状況・人口構成」「条例・法令」で過大に評価していることが伺える。GNS2015の重み係数は専門家や指標の利用者との議論を経由せずに設定されたものであるが、これらの重み係数は3つの回答者集団の意図を適切に反映しきれていないことがわかる。

図11に示した項目をハードウェア対策とソフトウェア対策に分類して足し合わせた重み係数を図12に示す。各回答者集団において明確な違いは現れず、両者の重み係数は同程度の値になった。

図13は、回答者集団ごとの脆弱性指数の評価基準別重み係数である。評価基準は代替案を評価す

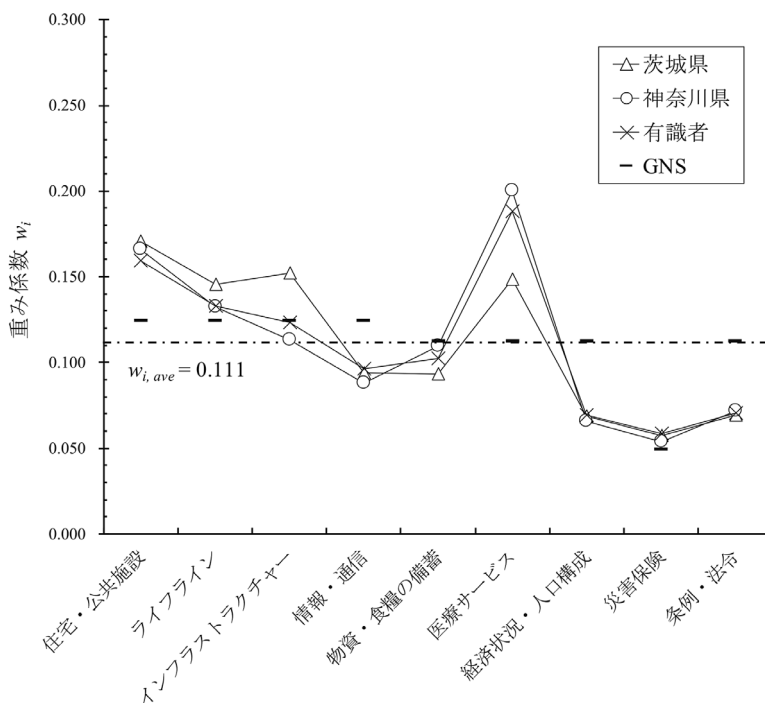


図11 脆弱性指数の回答者集団別重み係数

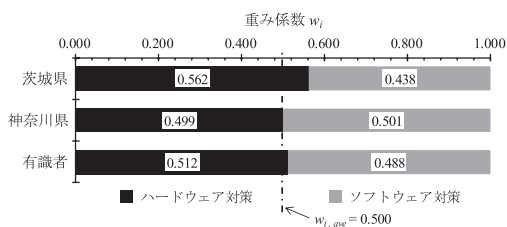


図12 回答者集団別のハードウェア対策とソフトウェア対策の合計の重み係数

る際に想定する被災対象であり、アンケートでの質問の仕方が異なる。すなわち、「死傷者を出さない(ヒト)」「経済的損失を抑える(モノ・カネ)」という評価基準で対比較の質問を行い、それぞれの評価基準に対して脆弱性指数の重み係数を評価した。回答者集団ごとに重み係数の大小は異なるものの、評価基準別にみた重み係数の大小関係は概ね一致している。特徴として、医療サービスにおいて「死傷者を出さない」評価基準では重み係数が大きくなり、「経済的損失を抑える」評価基

準では小さくなること、「経済状況・人口構成」「災害保険」「条例・法令」の3項目では「経済的損失を抑える」評価基準における重み係数が高くなるということが挙げられる。また、ハードウェア対策の項目ではソフトウェア対策の項目と比べ、各評価基準における重み係数の差が少ない。これは、ハードウェアの被害は死傷者を出す可能性のある一方、損壊の修復など、直接費による経済的損失が高いことを示している。これは、大規模な被害が想定される、道路や鉄道等を含んだ「インフラストラクチャー」の項目において、「経済的損失を抑える」評価基準の重み係数が高くなっていることから伺える。

さらに図13では、評価基準ごとの重み係数 w_i^A も算出している。どの回答者集団においても、「死傷者を出さない」と「経済的損失を抑える」の重み係数の比は、概ね3:1の関係となり、防災・減災対策の決定においては、死傷者を出さない対策が重視されることがわかる。これらの重み係数と式(9)を用いて、回答者集団ごとの脆弱性指数

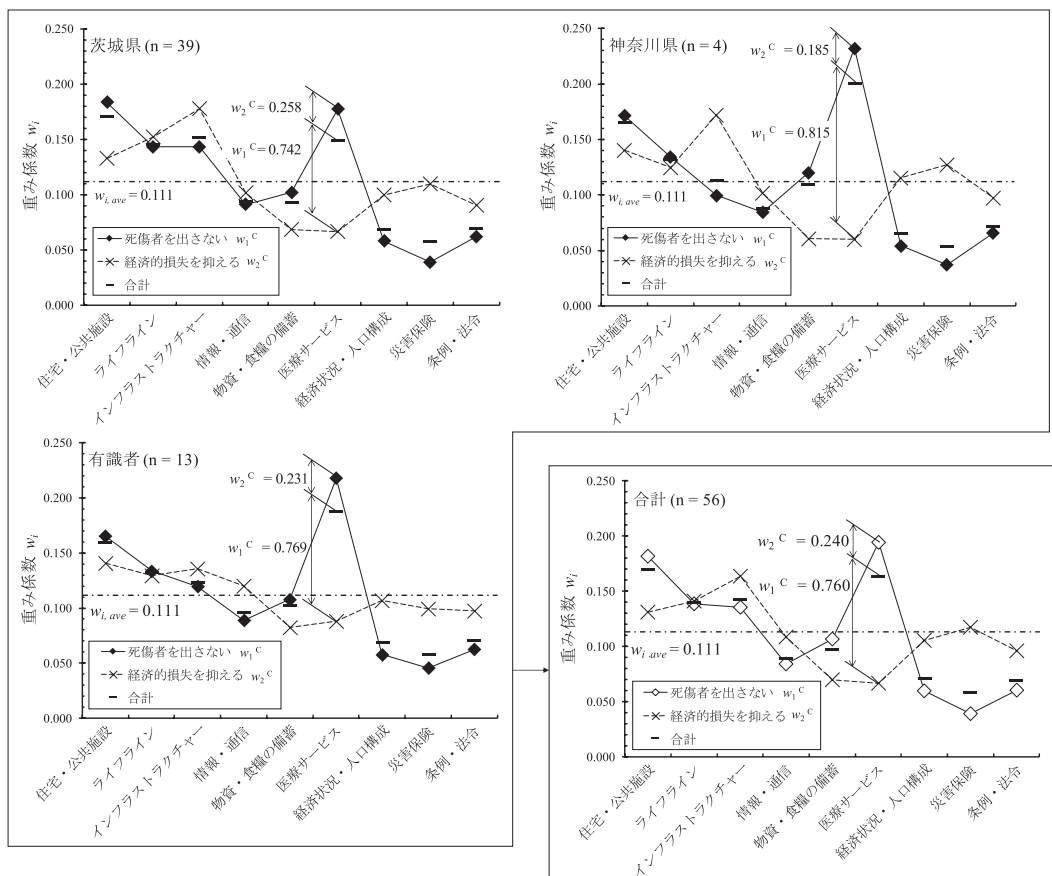


図13 回答者集団ごとの脆弱性指数の評価基準別重み係数

を求めることができる。図13に示す各回答者集団の「合計」の重み係数と、図11の結果は同じである。

評価基準どうしの重み係数がどの回答者集団でも同じ傾向を示すことは、評価基準が代替案の重み係数に与える影響は、回答者集団に依存しないことを示している。これは、評価基準は質問内容の前提条件として提示しているものであり、回答者集団の性質に依らない潜在意識で重みを決定づけているためといえる。また、評価基準別にみた重み係数の大小関係は概ね一致していることも、同様の理由といえる。図13は、回答者集団の性質に依らない、潜在意識の働く重み係数の分布を明確に表している。すなわち、AHPを用いた本アンケートで重み係数を決定することは妥当であり、評価基準や代替案の項目はふさわしいもので

あるといえる。

最後に本アンケートで得られた曝露量指数と脆弱性指数の回答者集団別の重み係数を表6、7に示す。表7には評価基準別のハードウェア対策とソフトウェア対策の重み係数も示しているが、どの回答者集団においても「経済的損失を抑える」評価基準において、ハードウェア対策の重み係数が大きくなる傾向がみられる。

4. まとめ

本研究では、階層分析法を用いて、専門家へのアンケート結果から重み係数を算出する手法を提案した。次に、自然災害に対するリスク指標GNSの評価体系に対して、専門家へのアンケートによる、自然災害や防災・減災対策の種類ごと

表 6 曝露量指数の重み係数一覧

属性		茨城県	神奈川県	日本技術士会 神奈川県支部 + リスクと法訴訟 委員会	GNS2015
有効回答数 (C.I.<0.200)		43	5	18	
重み係数	地震による災害 (津波を除く)	0.308	0.291	0.355	0.200
	津波・高潮	0.212	0.166	0.147	
	洪水 (都市型水害を含む)	0.223	0.166	0.179	
	大雨による土砂災害	0.198	0.274	0.224	0.200
	火山の噴火	0.059	0.104	0.095	0.200

表 7 脆弱性指数の重み係数一覧

属性		茨城県	神奈川県	日本技術士会 神奈川県支部 + リスクと法訴訟 委員会	GNS2015					
有効回答数 (C.I.<0.250)		39	4	13						
評価基準	死傷者を出さない	0.742	0.815	0.769						
	経済的損失を抑える	0.258	0.185	0.231						
重み係数 (死傷者)	ハード	0.562	0.490	0.507	0.165					
						住宅・公共施設	0.184	0.172	0.165	
						ライフライン	0.143	0.134	0.134	
						インフラストラクチャー	0.143	0.100	0.119	
	ソフト	0.438	0.510	0.493	0.058	0.063				
							情報・通信	0.091	0.084	0.089
							物資・食糧の備蓄	0.102	0.120	0.108
							医療サービス	0.177	0.232	0.218
							経済状況・人口構成	0.058	0.054	0.058
							災害保険	0.039	0.037	0.046
条例・法令	0.062	0.066	0.063							
重み係数 (経済的損失)	ハード	0.565	0.539	0.526	0.120					
						住宅・公共施設	0.133	0.140	0.141	
						ライフライン	0.153	0.125	0.129	
						インフラストラクチャー	0.178	0.172	0.136	
	ソフト	0.435	0.461	0.474	0.107	0.097				
							情報・通信	0.102	0.102	0.120
							物資・食糧の備蓄	0.068	0.061	0.082
							医療サービス	0.067	0.060	0.088
							経済状況・人口構成	0.100	0.116	0.107
							災害保険	0.110	0.127	0.100
条例・法令	0.090	0.098	0.097							
重み係数 (総合)	ハード	0.562	0.499	0.512	0.096					
						住宅・公共施設	0.171	0.166	0.160	
						ライフライン	0.146	0.132	0.133	
						インフラストラクチャー	0.152	0.113	0.123	
	ソフト	0.438	0.501	0.488	0.069	0.113				
							情報・通信	0.094	0.088	0.096
							物資・食糧の備蓄	0.093	0.109	0.102
							医療サービス	0.149	0.200	0.188
							経済状況・人口構成	0.069	0.066	0.069
							災害保険	0.057	0.054	0.058
条例・法令	0.069	0.072	0.071							

の重み係数の結果を示し、考察を行った。

重み係数の評価においては、はじめに、全アンケートの整合度 C.I. と回答のばらつきに関する考察を行った。AHP を利用して、同じ階層内の項目数が 5 個または 9 個のアンケートを実施したが、整合度 C.I. の中央値および平均値が 0.15 前後に収まった。また C.I. は、同じ階層内の項目数が増えると、大きくなる（整合しにくくなる）ことがわかった。また、ばらつきがあり外れた値であっても、C.I. が小さく信頼性の高いデータが多く存在し、重み係数を求める際にはそれらを十分に考慮する必要があることを示した。

次に、集団幾何平均法および C.I. のしきい値を用いて、回答者集団別の重み係数を求めた。茨城県、神奈川県および有識者の 3 つの回答者集団による曝露量指数の重み係数には、値の大小と近年の自然災害の発生度合いに関係性がみられた。一方、脆弱性指数の重み係数は、回答者集団ごとの値に差はあるものの、重み係数の大小に関しては概ね同じ傾向を示した。また、回答者集団別の脆弱性指数の評価基準別の重み係数は、回答者集団を問わず同じ傾向を示したことから、本アンケートによる重み係数の算出の妥当性を示した。さらに、どの回答者集団においても、「死傷者を出さない」と「経済的損失を抑える」の重み係数の比は、概ね 3 : 1 の関係となり、防災・減災対策の決定においては、死傷者を出さない対策が重視されることがわかった。

以上より、重み係数の合理化の手法の一つとして、AHP によるアンケートが有意であることを示した。AHP を適用し、指標の目標や用途に合わせ、アンケートの対象を設定することで、総合指標のデータ群に依存することのない重み係数を求めることができる。

本来は数値化しにくい防災・減災対策の意思決定者の経験や感覚を数値化して重み係数に取り込むことで、自然災害に対するリスク指標 GNS の利用者自身が重視する自然災害や防災・減災対策の個別指標値をより適切に GNS に反映できる。また、菊本ら³⁾と同様に GNS を比較・検証することで、自治体の防災・減災対策の進捗状況を把

握するとともに、感覚だけでは特定が難しい潜在的なリスクを特定することができる。

最後に総合指標の留意点として、開発者や利用者は指標に完璧な妥当性を求めるのは難しいことを認識し、適切に利用することが重要であると強調したい。総合指標の一例として大学ランキングがあるが、同指標はランキングを分かりやすく示し、社会の関心を集めた一方で、最近では過剰で歪んだランキング競争を煽り、大学の質の向上には直接的に関係のないランキング改善のみを目的とした数理的操作の横行が問題として指摘されている²⁵⁾。また福本⁸⁾は総合指標の利活用において、指標の作成方法に前提条件や限界がないため、指標値のみが独り歩きする危険性を示唆している。GNS は、防災・減災の意思決定者や社会意思を形成するすべての国民が、自然災害リスクについて広く知ってもらえるような分かりやすい指標づくりを目指す一方、数理的操作によって正当性、信頼性を失わないような開発を心がける必要がある。

今後は、他の都道府県において同様のアンケートを行い、重み係数の違いを考察するとともに、自然災害に対するリスク指標への反映を行う計画である。また、図 1 に示す「評価体系の構築」「データ群の選定」「データ群の規準化」といった課題に対しても改善を行いたいと考えている。よりよい総合指標の開発に向け、検討を進めたい。

謝辞

本研究は科学研究費補助金 基盤研究 (B) (代表：伊藤) の支援を受けて実施した。アンケートの実施にあたっては茨城県、神奈川県、日本技術士会 神奈川県支部および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普及委員会」の皆様にご協力いただいた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 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研究委員会：自然災害に対するリスク指標 GNS [2015年版]，地盤工学会 関東支部，2015，<http://www.jgskantou.sakura>.

- ne.jp/group/pdf/GNS2015.pdf (2017-02-16 アクセス).
- 2) Kusakabe, O., Kikumoto, M., Shimono, K., Itoh, K., Inagaki, H., Ohsato, S. and Watanabe, K.: Development of Gross National Safety Index for Natural Disasters, *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS and AGSSEA*, 48(1), 90-101, 2017.
 - 3) 菊本 統・下野勘智・伊藤和也・大里重人・稲垣秀輝・日下部 治: 我が国の自然災害に対する統合的リスク指標, *土木学会論文集 F6 (安全問題)*, 73 (1), 43-57, 2017.
 - 4) 川合彩加・菊本 統・伊藤和也・大里重人・稲垣秀輝・日下部 治: マルチスケールで捉えた自然災害のリスク, 第71回土木学会年次学術講演会, 仙台市, 講演概要集 (CD-ROM), 2016.
 - 5) 石澤幹太・伊藤和也・今井龍一・鈴木直人・菊本 統・日下部 治: 関東地方の市町村レベルでの自然災害リスク GNS の評価, 第44回土木学会関東支部技術研究発表会, 埼玉県, 講演概要集 (CD-ROM), 2017.
 - 6) 高德亮太・石澤幹太・伊藤和也・今井龍一・菊本 統・神谷圭祐・日下部 治: 関東地方の市町村レベルでの自然災害リスク GNS の評価, 第72回土木学会年次学術講演会, 福岡市, 講演概要集 (CD-ROM), 2017.
 - 7) 川合彩加: マルチスケールで捉える自然災害に対するリスク指標, 平成27年度 横浜国立大学卒業論文, 2016
 - 8) 福本潤也: 都市政策のPDCAサイクルにおける都市生活指標の利活用, *都市計画 = City planning review* 64 (1), 58-61, 2015-02-25.
 - 9) 東洋経済オンライン: 最新版! 「CSR 企業ランキング」トップ700社, <http://toyokeizai.net/articles/-/113426> (2017-02-16アクセス).
 - 10) 東洋経済オンライン: 「新・企業力ランキング」トップ300社」2016, <http://toyokeizai.net/articles/-/108548> (2017-02-16アクセス).
 - 11) Times Higher Education: World University Rankings, <https://www.timeshighereducation.com/world-university-rankings> (2017-02-16アクセス).
 - 12) Quacquarelli Symond: University Rankings, <https://www.topuniversities.com/university-rankings> (2017-02-16アクセス).
 - 13) Thomas L. Saaty: How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process, *European Journal of Operational Research*, 48, 9-26, 1990.
 - 14) 小笠原春菜: Analytic Hierarchy Process とは何か - Capability Approach 研究の一方法として, 千葉大学人文社会科学研究所, 2009.
 - 15) 杉浦 伸・木下栄蔵: AHP を適用した通学バス利用意識調査, *土木計画学研究・論文集*, 23, 103-110, 2006.
 - 16) 玉田 崇・間瀬 肇・安田誠宏: 階層分析法を用いた高潮対策工法選定法のシステム化に関する研究, *土木学会論文集 B2 (海岸工学)*, 68 (2), I_916-I_920, 2012.
 - 17) 戸松 誠・岡田成幸: 地震被害評価情報を活用した想定地震の対策優先度に関する研究, *日本地震工学会論文集*, 11 (2), 1-19, 2011.
 - 18) 岡田成幸・村田さやか・高井伸雄: 地域性を考慮した地震災害対策指針と担当行政の対策意識診断 - 北海道市町村を調査対象とした試行 -, *地域安全学会論文集*, (3), 241-248, 2001-11.
 - 19) Wilkinson, J.H.: *The Algebraic Eigenvalue Problem*, Clarendon Press, Oxford, 1965.
 - 20) 関谷和之: AHP と固有値問題, *AHP の理論と実際*, 日科技連出版社, 2000.
 - 21) 伊藤和也・菊本 統・下野勘智・大里重人・稲垣秀輝・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.
 - 22) 下野勘智・菊本 統・伊藤和也・大里重人・稲垣秀輝・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.
 - 23) 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, http://weltrisikobericht.de/wp-content/uploads/2016/08/WorldRiskReport_2011.pdf (2018-04-23 アクセス), 2011.
 - 24) 国土交通省: 全国における土砂災害警戒区域等の指定状況, http://www.mlit.go.jp/river/sabo/pdf/progress_160331.pdf (2017-02-06アクセス).
 - 25) 渡部由紀: 世界大学ランキングの動向と課題, *京都大学国際交流センター論叢* 2, 113-123, 2012-02.

(投稿受理: 平成29年10月22日
訂正稿受理: 平成30年4月24日)

要 旨

規準化した複数のデータの重み付き線形和により評価する総合指標では、重み係数を合理的に設定することが極めて重要になる。本研究では、専門家へのアンケート結果に階層分析法(AHP)を適用することで重み係数を算出する手法を提案するとともに、自然災害に対するリスク指標 **Gross National Safety for natural disasters (GNS)** の評価体系に対して、指標を防災・減災投資の意思決定として利用する専門家へのアンケートを実施した。個々のアンケート結果の信頼性を整合度 C.I. により判定した後、回答者集団ごとに自然災害や防災・減災対策の重み係数を求めた。その結果、回答者集団ごとの重み係数は自然災害の地域性を反映することが示唆された。一方、防災・減災対策の種類(代替案)ごとの重み係数は、回答者集団によらず質問の仕方(評価基準)を反映したユニークな結果になり、適切な代替案のもとで合理的な重み係数が設定されたことが示された。