地域における地震災害の類型化手法の検討

清水智¹⁾、若浦雅嗣²⁾、小丸安史³⁾、
藤原広行⁴⁾、中村洋光⁵⁾、森川信之⁶⁾、早川譲⁷⁾

- 1) 非会員 応用アール・エム・エス株式会社、修士（工学）
e-mail : satoshi.shimizu@oyorms.co.jp
- 2) 非会員 応用アール・エム・エス株式会社、博士（統計科学）
e-mail : masatsugu.wakaura@oyorms.co.jp
- 3) 正会員 応用アール・エム・エス株式会社
e-mail : yasushi.komaru@oyorms.co.jp
- 4) 正会員 防災科学技術研究所、博士（理学）
e-mail : fujiwara@bosai.go.jp
- 5) 正会員 防災科学技術研究所、博士（理学）
e-mail : manta@bosai.go.jp
- 6) 正会員 防災科学技術研究所、博士（理学）
e-mail : morikawa@bosai.go.jp
- 7) 非会員 応用地質株式会社
e-mail : hayakawa-yuzuru@oyonet.oyo.co.jp

要 約

本稿では日本全国に適用可能な地震災害の地域特性の類型化手法を検討した。これは、地震による被害形態が被災地の地域特性に依存すると考えられるためである。本稿では、地震被害に大きく影響を与える基礎的な要因として、「震動」「液状化」「火災」「土砂災害」といった地震によって発生する災害事象に着目した。この各災害のポテンシャルを定量化・基準化することにより、各災害ポテンシャルを指標値の類似度により比較できるようにするとともに、指標値を用いた地震災害の地域特性を類型化する枠組みを提案した。また、提案した枠組みを用いたケーススタディとして、全国を対象とした地震災害の地域類型化を試行するとともに、実際の地震被害の発生状況と比較し、提案した類型化の枠組みの課題について考察した。

キーワード： 地震災害、地域特性、定量評価、類型化

1. はじめに

日本は世界有数の地震国であり、その度に大きな被害を受けてきた。この20年間だけでも、1995年兵庫県南部地震、2004年新潟県中越地震、2011年東北地方太平洋沖地震などにより大きな被害を受けたが、被害の様相は地震によって様々である。兵庫県南部地震では大都市の直下で早朝に地震が発生

した。住宅倒壊によって多数の死者が発生するとともに、鉄道・高速道路・港湾等の被害も重なり都市機能は麻痺した。中越地震では中山間部で土砂災害が発生し多数の集落が孤立した。その結果、山古志村では全村避難という事態に陥った。東北地方太平洋沖地震では津波によって太平洋沿岸の地域で甚大な被害が発生しただけでなく、原子力発電所の事故により直接被災していない地域へ電力供給に支障が発生するなど各方面に大きな影響を及ぼした。このような地震による被害の地域特性を整理することができれば防災・減災対策の基礎資料となると考えられる。

しかし、地震によって発生する被害は、地震の発生状況、地域の脆弱性、社会構造等の様々な要素の影響を受ける。加えて、これらの影響因子が複雑に絡み合って被害が発生する場合もある。現状、震動による被害予測ですら、ばらつきがかなり大きい状況であり、これら被害の発生要因を構造化し、地域における地震被害の特徴を定量的に積み上げて評価することは現状では困難である。そこで著者らは、地震被害の地域特性を「見える化」する第一歩として、「震動」「火災」「液状化」「土砂災害」といった地震によって引き起こされる災害事象に着目した。本稿では、着目した各災害事象のポテンシャルを定量的指標で表現するとともに、これら4つの指標の組合せにより地震被害の地域特性を類型化する枠組みを提案した。次に、ケーススタディとして提案した枠組みを利用して全国の地震災害の地域特性の類型化を試行した。最後に、試算した類型結果と実際の被害との比較を行い、提案した枠組みの利点と課題について考察した。なお、本稿は、ケーススタディとして得られた類型結果そのものよりも、地域性を類型化する枠組みの検討に重点を置いたものである。

2. 地域類型化の枠組みの検討

2.1 地震被害の地域性を決める要因

文献1)2)では、日本で過去発生した兵庫県南部地震以前の地震における被害の波及状況を被害連関図という形で整理している。これらの連関図は、地震発生前の地域特性や社会的背景と地震発生から被害の波及状況を整理したもので、地震発生後の被害の波及状況を火災や液状化といった災害事象別に考えて被害の波及状況を整理している。これは、被害の発生状況・被害量・空間的な広がりや災害事象別に異なるためと考えられる。実際、東日本大震災の津波被災地と内陸部の被災地の違いからも分かるように、同じ地震でも災害事象の違いにより社会資本への影響や復旧・復興の速度、被災地の社会・経済活動、さらには被災地以外の経済活動への影響が異なってくると考えられる。

これらのことを踏まえると、地震被害の地域特性を把握する基本的な要素として、対象地域においてどのような災害事象が発生するかを把握することは非常に重要と考えられる。

2.2 地域類型化の枠組み

地域で起こり得る災害事象をどのように表現するかは重要な問題である。被害と地域性について定量的に分析した既往研究の例として、因子分析や主成分分析を行って地震被害に影響を与える要因・因子を特定する例がある³⁾。しかし、この方法では因子や主成分が被害を明示しないため、因子の重ね合わせから被害を推量する必要があるとともに、被害レベルを把握することができないといった欠点がある。定量的に地震被害を評価するメリットの一つは被害率（または被害量や被害レベル）を把握できることである。そのため、本稿において災害事象を表現する際は、被害レベルを明示できる形で災害事象別の被害ポテンシャルを定量的に示すことを試みた。

また、地震被害を定量化する際、特定のシナリオに基づく評価ではなく、評価地点の直下に震源を設定し、これに基づいた被害率により災害事象別の被害ポテンシャルを定量化することとした。これは、定量化したポテンシャルのシナリオ依存性を防ぐとともに、「表層地盤のゆれやすさ全国マップ」⁴⁾と同様に地域が保有する災害ポテンシャルを地盤状況と起こり得る地震の両面から評価することを意図したためである。

このような形で定量化した各災害ポテンシャルを利用し、各指標が類似する地域を類型化し各地域が保有する地震災害の特徴を明らかにする。類型化する際は指標の類似度によってグルーピングするためクラスター分析を用いることとした。ただし、本稿では、ある特定地域のみを対象とした訳ではなく、全国（約600万メッシュ）に適用可能な方法論を目指している。全国を対象として考えた場合、

すべてのメッシュを利用してクラスター分析を行うことは計算量の点から現実的な選択ではない。そこで、被害地震の被災地等を対象に各災害事象で特徴的な地域などから適切な標本を抽出し、標本を対象にクラスター分析を実施して、地域が保有する地震災害の特徴を示す類型を定義した上で、全国を対象に判別分析を実施し、全国のメッシュ単位の類型化を実施することとした。

2.3 災害ポテンシャルの表現方法

(1) 災害ポテンシャルに必要な要素と定量化

地域の被害特性を表現する災害ポテンシャルは、地震によって発生する各災害や被害の起こりやすさ、被害レベルを示すものである。このため、本稿で考える災害ポテンシャルは評価地点の「地震のハザード」「地震によって引き起こされる災害のハザード」「エクスポージャ」「バルナラビリティ」によって示されるべきと考えられる¹⁾。

災害ポテンシャルを定量化する際、被害率で表現するか、被害量で表現するかという問題があるが、ここでは、以下の点から被害率を利用した定量評価に基づき類型化を行うこととした。

- a) 国・自治体の被害想定等では建物被害を災害事象別に定量評価して想定地震に対する被害量が算出されることが一般的だが、「揺れ」に対する被害量に対して、「液状化」や「土砂災害」の被害量は絶対量がそもそも小さい⁵⁾。この結果、被害量を用いた定量評価に基づき類型化を行う場合に、揺れの被害の絶対量のみで類型が決まる可能性がある。
- b) a)の理由のひとつとして、揺れは想定した地震が発生した場合に必ず出現する現象であるのに対して、液状化や土砂災害は揺れが伝わった地盤条件に基づき発生有無やその程度が決まる事象であり、揺れよりも事象そのものの発生確率が小さいことが考えられる。これに対する一つの方法として各事象が発生するという条件下で定量評価を行い類型化する方法も考えられるが、そもそも液状化や土砂災害といった事象の発生確率そのものも地震被害の地域特性を構成する必要な要素と考えられる。

これらa)b)の理由から、各事象の発生確率を考慮しつつ揺れの被害量のみで類型化されることを防ぐとともに、地域でどのような種類の被害が発生しやすいかを表現するため、各災害事象の被害率を用いて類型化することを試みた。

また、被害率で定量化した災害ポテンシャルは、地震災害の地域性を類型化するための「道具」である。そのため、異なる災害を同一の基準で評価でき、ポテンシャルの絶対値を災害間で比較できるよう各災害の数値の重みを同じとする必要がある（少なくとも重みを同じとする努力が必要である）。この点から、災害ポテンシャルの定量化を行う場合、以下の2つの条件①②を満たす必要があるとともに、③の処置を行うこととした。

- ① 空間的な評価単位を均一にする。
- ② 定量化の際、災害が異なっても「地震ハザード」や対象とする「エクスポージャ」は同一とする。
- ③ 定量化した災害ポテンシャルは各災害で全国平均値が0、分散が1となるように基準化する。

上記①は町丁目単位や行政区単位等で実施した場合、地域によって面積等の空間的な広がり異なるため、定量化したポテンシャルを各災害間で等価に扱うことが難しいと考えられるためである。そこで、評価単位は全国地震動予測地図⁶⁾と同じ4分の1地域メッシュ（以降「250mメッシュ」と称す）単位とした。この処置により地形特性や表層地盤の増幅特性等を全国一律の基準で扱うことが容易となる。

上記②は災害ポテンシャルを同一の基準で評価する場合、当然満たさねばならない条件である。そこで、「地震ハザード」は、全国どこでも起こり得る最大級の地震(地表断層が不明瞭な地震)として想定されるMw6.8の点震源を深さ4kmに置き⁷⁾、これによって求まる地表の地震動とした。「エクスポージャ」は、基本的な物的被害量であるとともに人々の日常生活に欠かせない物で、全国的にデータが整備され⁸⁾、様々な災害事象の影響を受ける「建物」を対象とした。この建物の被害率（全壊率）に基

¹⁾ 本稿における「ハザード」は地震動の揺れの強さや地震によって引き起こされる災害の発生確率を指し、「エクスポージャ」は災害に対し危険に曝されている対象物（建物など）を、「バルナラビリティ」は災害に対する脆弱性を示す。

づき災害ポテンシャルを評価することとした。なお「地震によって引き起こされる災害のハザード」や「バルナラビリティ」は定量化しようとする災害事象によって異なるため、3.で詳述する。

上記③は災害ポテンシャルを類型化する観点から最も重要な点である。①②を満足することで同一ハザード・同一対象物に対する各災害のポテンシャルを定量化することができるが、各災害で定量化された数値の大小関係が、そのまま各災害ポテンシャルの大小関係を示すのだろうか。例えば、一般的に埋立地では液状化の危険性は高いが、①②を適用し地震被害想定と同様の手法⁹⁾で建物全壊率を算出すると、地震動による全壊率が液状化による全壊率よりも大きな値となる。しかし、液状化の可能性が高い埋立地の地域特性が震動被害とは誰も思わないであろう。しかしながら、災害毎にエクスポージャを変えると、異なる災害の数値を同じ重みで扱うことはできず、地域類型の信頼性は得られないであろう。そこで、各災害の全国平均値が0、分散が1となるように基準化した。これにより、各災害の数値が「全国平均を0、分散(標準偏差)を1としたときの指標値」という基準を持つとともに、同基準の枠内で各災害ポテンシャルの絶対値を等価に扱うことが可能となる。

(2) 災害の種類

地震によって起こる災害事象は様々である。リスク学事典¹⁰⁾では、代表的な事象として、「地震動による建造物の破壊」「斜面崩壊や地すべり」「液状化」「火災」「津波」の5つを挙げている。これら5つの事象は文献1)2)でも被害連関図を作成する際、事象を分けて波及状況を整理しており、地震によって引き起こされる基本的な災害事象と考えられる。よって、本稿では、以下の4つの災害事象を対象にポテンシャルを定量化することとした。

- ① 震動被害
- ② 液状化
- ③ 火災
- ④ 土砂災害

図1 類型化のフロー

なお、津波は地震災害の地域を表現する非常に必要な要素であるが、地震ハザードの設定において、(1)項で示した評価地点の直下に震源を置く地震ハザードでは津波の発生は考えられず、海域の震源を用いると評価地点に対するシナリオ依存性が発生してしまう。そのため、津波を考慮した類型化は今後の課題とし、本稿では検討対象から除外した。

本稿で検討した類型化のフローを図1に示す。

3. 地震災害のポテンシャルを示す指標値

2.1の検討に基づき、災害事象別の建物全壊率を250mメッシュ単位で算出し基準化することで、地域が保有する地震災害のポテンシャルを指標化する。以降では、災害ポテンシャルを定量化するための地震動・建物データや、災害別建物全壊率や基準化の具体的な算出方法を示した。

3.1 入力地震動

建物全壊率を計算するための入力地震動は、既述のように各メッシュの直下にMw6.8の点震源を深さ4kmに置き、工学的基盤における地震動を距離減衰式により算出する。これに表層地盤における地震動の増幅率を乗じることで地表の地震動を算出した。工学的基盤($V_s=600\text{m/s}$ 相当)の最大速度 $PGV_{b600}[\text{m/s}]$ は、司・翠川(1999)¹¹⁾の距離減衰式を用いて算出した(式(1))。なお、地震のタイプは地殻内地震とした。

表層地盤による最大速度の増幅率(amp)は、若松・松岡(2008)¹²⁾による全国を対象として作成された250mメッシュ毎の微地形区分から求められた深さ30mまでの平均S波速度($AVS30[\text{m/s}]$)との関係に基づくもので、全国地震動予測地図⁶⁾と同様に藤本・翠川(2006)¹³⁾による経験式(式(2))を用いて算出した。

また、本稿で使用する被害関数の説明変数等の多くは震度（または計測震度）のため、算出した地表の最大速度 $PGV[\text{m/s}]$ は、藤本・翠川(2005)¹⁴⁾により計測震度 I に変換した(式(4))。

$$\log PGV_{b600} = 0.58M_w + 0.0038H + d - 1.29 - \log(X + 0.0028 \times 10^{0.50M_w}) - 0.002X \quad (1)$$

$$\log(\text{amp}) = 2.367 - 0.852 \log(AVS30) \quad (2)$$

$$PGV = \text{amp} \times PGV_{b600} \quad (3)$$

$$I = 2.002 + 2.603 \log PGV - 0.213(\log PGV)^2 \quad (4)$$

ここで、 M_w ：モーメント・マグニチュード、 H ：震源断層中心深さ[km]、

d ：地震タイプ別の係数（地殻内地震の場合： $d=0.0$ ）、 X ：断層最短距離[km]。

3.2 建物データ

建物全壊率を算出するための建物データは大井ほか(2010)⁸⁾を元に作成した。同データは250mメッシュ単位で構造・用途などの属性を付与した建物棟数のデータである。これに2008年住宅土地統計調査¹⁵⁾の市区町村別の構造別建築年代比率を適用し、250mメッシュ別構造別建築年代区分別建物棟数データを作成した。

3.3 震動による建物全壊率

震動による建物全壊率は小丸ほか(2010)¹⁶⁾と同様に建物構造別に次の被害率曲線により算出した。

・木造建物 … 中嶋・岡田(2008)¹⁷⁾による損傷度0.6以上の被害率と震度の関係

・非木造建物 … 中央防災会議(2013)⁹⁾による非木造全壊率と震度の関係

ただし、木造建物については、過去の被害発生状況を踏まえ被害発生下限値(計測震度5.5)を設定した。上記の方法で算出した木造・非木造別全壊率と建物データを利用して式(5)により各メッシュの建物全壊率を算出した。

$$R_s = (R_{ws} \times N_w + R_{ns} \times N_n) / (N_w + N_n) \quad (5)$$

ここで、 R_s ：建物全壊率、 R_{ws} ：木造建物全壊率、 R_{ns} ：非木造建物全壊率、 N_w ：木造建物棟数、 N_n ：非木造建物棟数を示す。

図2 建物全壊率曲線

図3 液状化発生確率曲線

3.4 液状化による建物全壊率

液状化による建物全壊率は以下の方法で算出した。

$$R_{liq} = P_l \times R_{pa} \times R_{bl} \quad (6)$$

ここで、 R_{liq} ：液状化による建物全壊率、 P_l ：液状化発生確率、 R_{pa} ：液状化が発生したメッシュの液状化面積率、 R_{bl} ：液状化が発生した場合の建物全壊率を示す。

液状化発生確率は、全国250mメッシュ別の微地形区分¹²⁾を用いて発生確率を計算する松岡ほか(2011)¹⁸⁾を用いて算出した。

$$P_l = \Phi \left[\frac{l - \mu}{\sigma} \right] \quad (7)$$

ここで $\Phi[\cdot]$ は正規分布の累積分布関数を、 l は計測震度を示す。なお、全壊率の計算目的は液状化が発生しやすいメッシュを評価することであるため、松岡ほか(2011)¹⁸⁾のグループ①～④に属する微地形区分のみを計算対象とし砂礫質台地は除外した。図3に本稿で使用した液状化発生確率曲線を示す。

液状化が発生したメッシュ内の液状化面積率は、1983年日本海中部地震や2004年新潟県中越地震の被害データを元に設定した山本ほか(2009)¹⁹⁾の微地形区分毎の液状化面積率を適用した(表1参照)。液状化が発生した場合の建物全壊率は中央防災会議(2003)²⁰⁾の手法を用いた(表2参照)。

表1 微地形区分毎の液状化面積率¹⁹⁾

微地形区分	液状化面積率	微地形区分	液状化面積率
谷底低地	3%	旧河道	25%
扇状地	1%	砂州・砂礫州	5%
自然堤防	10%	砂丘末端緩斜面	15%
後背湿地	3%	砂丘間低地	5%
三角州・海岸低地	(日本海側) 10%	砂丘	5%
	(太平洋側) 2%	干拓地	15%
		埋立地	20%

表2 液状化発生時の建物全壊率²⁰⁾

木造建物		非木造建物	
1960年以前築	1961年以降築	杭なし	杭あり
13.3%	9.6%	23.2%	0.0%

3.5 火災による建物全焼率

地震による火災の被害の特徴は、単に地震後に火災が出火しただけでなく、出火後に大きく延焼し、被害が広がることである。そこで、火災は「延焼」被害に着目し、出火後の延焼によって建物が全焼する割合を算出した。なお、評価単位が250mメッシュ単位であり、火災の延焼被害を算定するには大きな領域を対象としているため、ここでは隣接メッシュへの延焼は想定していない。

$$R_{fb} = N_{bf} \times R_f \quad (8)$$

ここで、 R_{fb} ：建物全焼率、 N_{bf} ：炎上出火件数、 R_f ：焼失率を示す。

炎上出火件数 N_{bf} は中央防災会議(2013)⁹⁾の考え方にに基づき式(9)で算出した。全出火件数 N_{ff} も中央防災会議(2013)⁹⁾の考え方にに基づき、①建物が倒壊する場合の火器器具・電熱器具からの出火、②建物が倒壊しない場合の火器器具・電熱器具からの出火、③電気機器・配線からの出火を合計した式(10)で算出した。

$$N_{bf} = (1 - R_{ie}) \times N_{tf} \quad (9)$$

$$N_{tf} = 0.00153 \times N_{cb} + R_{bf} \times N_b + 0.00074 \times N_{tb} \quad (10)$$

$$N_{tb} = R_{ws} \times N_w + R_{ns} \times N_n \quad (11)$$

ここで、 R_{ie} ：初期消火成功率(表3参照)、 N_{if} ：全出火件数、 N_{cb} ：建物倒壊棟数、
 R_{bf} ：震度別出火率(表4参照)、 N_b ：建物棟数、 N_{ib} ：建物全壊棟数、
 R_{ws} ：木造建物全壊率、 R_{ns} ：非木造建物全壊率、 N_w ：木造建物棟数、
 N_n ：非木造建物棟数
(なお、建物倒壊棟数は高知県(2013)²¹⁾と同様に全壊棟数の3割と仮定。)

表3 初期消火成功率

震度	成功率
～6弱	67%
6強	30%
7	15%

表4 震度別出火率
(住宅・共同住宅：冬18時)

震度	出火率
5弱	0.0010%
5強	0.0034%
6弱	0.0109%
6強	0.0351%
7	0.1150%

図4 焼失率と
木防建蔽率の関係

焼失率は焼失率と木防建蔽率の関係²²⁾を使用した(図4参照)。木防建蔽率は火災による市街地の延焼危険度を示す指標の一つである(式(12)参照)。

$$R_{bc} = A_{wb}/A \quad (12)$$

ここで、 R_{bc} ：木防建蔽率、 A_{wb} ：木造(防火木造を含む)建築物の建築面積、 A ：地区の面積。
なお、焼失率を計算する際の木造建築物における純木造と防火木造の比率は、2008年住宅土地統計調査¹⁴⁾を元に市区町村毎に設定した。図4から焼失率を算出する際は、純木造建築面積と防火木造建築面積の重み平均から木防建蔽率-焼失率の関係式を設定し焼失率を算出した。

3.6 土砂災害による建物全壊率

土砂災害による建物全壊率は式(13)で算出した。なお、土砂災害の対象は、山間部等での土砂災害の発生のし易さを表すものとし、若松・松岡(2008)¹²⁾の微地形区分の山地・山麓地・丘陵・火山地・火山山麓地・火山性丘陵のみを対象とした。

$$R_{ls} = P_{ls} \times R_d \quad (13)$$

ここで、 R_{ls} ：土砂災害による建物全壊率、 P_{ls} ：崩壊確率、 R_d ：崩壊地の震度別全壊率²³⁾(表5参照)。
崩壊確率は、内田ら(2004)²⁴⁾による崩壊の発生・非発生を示す判別関数式(基礎式)によって算出される判別得点 F と1995年兵庫県南部地震の崩壊発生率の関係(図5)から算出した。なお、最大加速度は大井ほか(2002)²⁵⁾による最大速度との経験式から求めた。

$$F = 0.075I - 8.9c + 0.0056PGA - 3.2 \quad (14)$$

$$\log_{10}(PGA) = 0.60\log_{10}(PGV) + 1.61 \quad (15)$$

ここで、 c ：平均曲率(メッシュサイズが大きいため0とした)、 I ：斜面勾配[deg]、 PGA ：最大加速度[gal]
なお、判別関数式の斜面勾配 I は、国土数値情報²⁶⁾で公開されている250mメッシュ別標高データの最大斜度を用いた。

図5 判別得点と崩壊確率の関係

表5 崩壊地における震度別全壊率

震度	全壊率
4以下	0%
5弱	6%
5強	12%
6弱	18%
6強	24%
7	30%

図6 災害別指標値のヒストグラム

図7 東京周辺の災害別指標値の分布

3.7 建物全壊率の基準化

災害間の指標値を等価に扱うため、3.3~3.6で算出した建物全壊率を、災害毎の全国平均値が0、分散が1となるように式(16)により基準化した。

$$I_{ij} = (B_{ij} - B_{im}) / S_i \quad (16)$$

ここで、 I_{ij} : メッシュ j における事象 i の指標値、 B_{ij} : メッシュ j における事象 i の建物全壊率、 B_{im} : 事象 i の平均値、 S_i : 事象 i の標準偏差。

図6には、全国約600万メッシュの災害別指標値のヒストグラムを示す。図7には指標の空間分布の例として東京周辺の震動・火災の指標値を示す。

4. ケーススタディ

本章では、ケーススタディとして、図1に示した類型化手法のフローに沿って、3.で示した災害ポテンシャルを示す指標値を全国250mメッシュ別に算出し、地震災害の地域類型化を行った。なお、指標値の算出は陸上のすべてのメッシュで算出することとし、建物が存在しないメッシュに対しては全国の平均的な建物特性（構造比率や建築年代比率）を設定し、これを利用して指標値を算出することとした。これは、本稿の目的が、建物被害の類型化ではなく、地域の地震被害の類型化にあるためである。実際、地震が発生した場合、建物が存在しないメッシュでも地震被害は発生するポテンシャルがあると考えられる。本稿においては、建物被害を定量的に類型化するための道具と位置づけ、建物が

存在しないメッシュでは全国の平均的な建物特性を仮定して類型化を行った。

4.1 地域類型の設定

地域類型の設定のために算出した250mメッシュ別指標値から標本を抽出し階層的クラスタ分析を実施した。標本の抽出は、各指標値の最大値のあるメッシュを保有する市区町村、近年の被害地震で各災害事象(震動・液状化・土砂災害)が特徴的に表れた市区町村、及び火災による延焼被害が発生しやすい木造住宅密集地の多い地域²⁷⁾を中心に表6の地域を選定した。次に、選定した標本地域を対象にクラスタ分析(Ward法)を行った。分析の結果、得られた樹形図を図8に示す。

樹形図の切断は以下の手順で実施した。

- ① 各クラスターにおける各地震災害のポテンシャルの大小関係を簡潔に示すため、災害別指標値を中央値と四分位偏差を用いてレベル分けする方法を設定した(表7参照)。

- ② 表7の基準を用い、クラスター数を変化させた場合の各災害レベルの変化を確認した。この結果、クラスター数が9になると災害レベルが全て同じクラスターが複数出現すること、クラスター数が8の場合は7の場合から土砂災害が細分化されるのみで、それ以外の災害レベルの組合せは変化していないことから、図8に示す位置で樹形図を切断し、7つの地域類型を設定した。

表6 選定地域とその選定理由

市区町村名	選定理由
宮城県栗原市	2008年岩手宮城内陸地震で土砂災害が頻発した地域
福島県須賀川市	2011年東北地方太平洋沖地震で住宅全壊被害が多かった地域の一つのため
埼玉県幸手市	液状化指標値が最大となるメッシュが存在するため
千葉県浦安市	2011年東北地方太平洋沖地震で液状化による被害が顕著に出た地域の一つのため
東京都千代田区・中央区・港区	日本で最も発展した大都市のため
東京都中野区・杉並区・世田谷区	台地上にある木造密集地域があるため
東京都八丈町	震動指標値が最大となるメッシュが存在するため
長野県北安曇郡白馬村	土砂災害指標値が最大となるメッシュが存在するため
大阪市生野区・東成区・西成区・阿倍野区	木造住宅が密集した地域で、火災が延焼しやすいと考えられるため。生野区は火災指標値が最大となるメッシュが存在するため。

表7 災害別指標値のレベル分けの基準

	レベル分けの基準	レベルの意味合い	理由
L4	事象 i の中央値 I_m が以下の条件を満たす場合 $I_m \geq 1$	極めてポテンシャルが高い → 『極めて被害が出やすい』	事象 i の中央値は平均値+標準偏差よりも大きく、全国的に見ても極めて被害が出やすい事象と考えられるため。
L3	事象 i の中央値 I_m が以下の条件を満たす場合 $0 \leq I_m < 1$	ポテンシャルが高い → 『被害が出やすい』	事象 i の中央値は平均値以上かつ平均値+標準偏差未満に位置し、全国的に見ると被害が出やすい事象と考えられるため。
L2	事象 i の中央値 I_m が負の値で、四分位偏差がゼロよりも大きい場合	ポテンシャルがある → 『被害が出る可能性がある』	事象 i の中央値は平均値以下であるが、四分位偏差がゼロよりも大きく、当該クラスターの25%以上で被害が発生するクラスターで、被害が発生する可能性があるため。
L1	事象 i の四分位偏差がゼロの場合	ポテンシャルの低い → 『被害が相対的に出にくい』	各クラスターの分布形状から四分位偏差がゼロの場合は当該クラスターの75%で事象 i による被害(建物全壊被害)が発生しないクラスターであり、被害が発生する可能性は相対的に低いと考えられるため。

表8 各クラスターの中央値と四分位偏差

	メッシュ数	中央値				四分位偏差			
		震動	液状化	火災	土砂災害	震動	液状化	火災	土砂災害
CL1	67	6.033	0.353	51.851	-0.916	0.623	0.051	24.324	0.000
CL2	361	5.429	13.955	-0.040	-0.916	0.287	4.827	0.000	0.000
CL3	824	4.089	0.255	-0.040	-0.916	1.197	0.657	0.000	0.000
CL4	314	0.331	-0.154	8.616	-0.916	0.163	0.164	5.312	0.000
CL5	2147	-0.282	-0.154	-0.040	1.150	0.011	0.000	0.000	0.992
CL6	3856	-0.206	-0.154	-0.040	-0.916	0.372	0.159	0.000	0.000
CL7	5475	-0.261	-0.154	-0.040	-0.308	0.031	0.000	0.000	0.535

図8 得られた樹形図

表9 各類型（クラスター）の特徴

類型名	震動	液状化	火災	土砂災害	類型の特徴
CL1	L4	L3	L4	L1	震動・火災の被害が極めて出やすい地域。液状化の被害も出やすい地域。
CL2	L4	L4	L1	L1	震動・液状化の被害が極めて出やすい地域。
CL3	L4	L3	L1	L1	震動の被害が極めて出やすい地域。液状化の被害が出やすい地域。
CL4	L3	L1	L4	L1	火災の被害が極めて出やすい地域。震動の被害が出やすい地域。
CL5	L2	L1	L1	L4	土砂災害の被害が極めて出やすい地域。震動の被害が出やすい地域。
CL6	L2	L2	L1	L1	震動・液状化の被害が出る可能性がある地域
CL7	L2	L1	L1	L2	震動・土砂災害の被害が出る可能性がある地域

設定した地域類型の中央値と四分位偏差を表8に、災害レベルと類型の特徴を表9に示す。表9の類型では、液状化や火災がL3・L4の地域では震動もL3～L4であり、土砂災害がL4の地域は震動がL2と低い。これは、地震動が増幅されやすい平地で液状化・火災の被害が出やすく、土砂災害のポテンシャルが高い山間部は相対的に地震動が増幅しにくいという地震学や地震工学の常識と整合した結果であった。

4.2 全国の地域類型

4.1で定義した地域類型と全国の災害別指標値を使ってマハラノビス距離 D_i^2 による判別分析を行い、全国を対象とした地域特性の類型化を行った。

$$D_i^2 = (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_i)^T \boldsymbol{\Sigma}^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_i) \quad (17)$$

$$\boldsymbol{\Sigma} = \mathbf{W} / (n - g) \quad (18)$$

$$\mathbf{W} = \sum_i^g \sum_k^{n_i} (\mathbf{x}_{ik} - \boldsymbol{\mu}_i)(\mathbf{x}_{ik} - \boldsymbol{\mu}_i)^T \quad (19)$$

ここで、 $\mathbf{x}$ ：各メッシュの指標値ベクトル、 $\boldsymbol{\mu}_i$ ：クラスター i の指標値の平均ベクトル、 $\boldsymbol{\Sigma}$ ：不偏分散共分散行列（式(18)）、 $\mathbf{W}$ ：各クラスター内の平方和積和行列（式(19)）、 n ：標本メッシュ数、 n_i ：クラスター i の標本メッシュ数、 g ：クラスター数、 $\mathbf{x}_{ik}$ ：クラスター i の指標値ベクトル
判別分析の結果得られた日本全国の250mメッシュ単位の地域類型の分布と構成比を図9に示した。

図9 地震災害の地域特性の類型結果と各類型の全国構成比

凡例のCLの右側の表記は災害略称を示す。「震」は震動、「液」は液状化、「火」は火災、「土」は土砂災害を示す。災害略称が無印の場合はL4、()印はL3、[]印はL2を示す。

各類型の全国的な分布(図9)は、平野部ではCL3・6が多く分布し、山間部や丘陵地ではCL5・7が分布する結果となった。また、東京・大阪等の大都市部では、埋立地で液状化の被害が極めて発生しやすいCL2が広く分布し、住宅密集市街地では、CL1・4といった火災の被害が極めて発生しやすい類型が分布する結果となった。また、類型結果をメッシュ数で単純に全国集計した場合は、土砂災害の影響を受けるCL5・7といった類型が約7割を占めるが、人口により重み付けし集計すると、CL1～4・6といった火災や液状化の影響を受ける類型の構成比が相対的に大きくなる。このことは、日本の人口分布が平野部に偏っており火災・液状化に対して脆弱な地域で社会生活が営まれていることと矛盾しない結果である。

判別分析による全国の地域類型結果の妥当性を確認するため、潮来市・日野町・米子市・長岡市旧山古志村を対象に過去の被害地震の被災地の類型結果(図10・11)と実際の被害について比較した。

潮来市ではCL2・3・6が大半を占める。液状化の影響が強い(CL2・3)は南東部を中心に分布し、実際、2011年東北地方太平洋沖地震では、日の出地区で大規模な液状化によって大きな被害が出た。

日野町は土砂災害の影響が強いCL5・7が大半を占める。また、米子市の類型は日野川流域や弓ヶ浜半島ではCL3・6が分布し、市の南西部・南東部ではCL5・7が分布する。2000年鳥取県西部地震の際、日野町では土砂災害によって大きな被害が出ている点や米子市の弓ヶ浜半島沿岸部では液状化被害が発生した点は、類型結果と被災状況が類似している。

長岡市旧山古志村では土砂災害の影響が強いCL5・7が村域の99%を占める。2004年新潟県中越地震の際には土砂災害によって大きな被害を出しており、類型結果と被害の傾向は一致している。

図 10 日野・米子・山古志・潮来の地域類型

凡例のCLの右側の表記は災害略称を示す。「震」は震動、「液」は液状化、「火」は火災、「土」は土砂災害を示す。災害略称が無印の場合はL4、()印はL3、[]印はL2を示す。

図 11 潮来市・日野町・米子市・旧山古志村の地域類型の分布

凡例のCLの右側の表記は災害略称を示す。「震」は震動、「液」は液状化、「火」は火災、「土」は土砂災害を示す。災害略称が無印の場合はL4、()印はL3、[]印はL2を示す。

以上、判別分析によって得られた全国の地域類型結果と実際の被災状況の比較を行った。その結果、実際の被災状況と類型結果の傾向の整合性が確認できた。特に、図11のように市町村単位で類型結果を集計し各類型の構成比に着目すると、対象市町村の災害形態別の影響度が明確となる。

一方、本手法では250mメッシュ単位で地域を類型化した。メッシュ個々の類型結果と実被害は必ずしも対応していない。これは、災害別指標を作成する際に微地形区分を用いている点や個別の建物属性が反映されない点、類型化に用いた地震動が実際の地震動とは異なる点などが原因として考えられる。

5. おわりに

本稿では全国一律の基準により地震災害の地域性を類型化する手法を検討した。その結果、過去の被災状況等を参考に適切な地域を標本として類型を設定することにより、地域で起こりやすい地震災害のポテンシャルを反映した全国の類型結果を得ることができる枠組みを提案することができた。ま

た、提案した枠組みに基づき実施したケーススタディでは、結果として得られた類型は近年の被害地震の被災状況と整合的であることが確認できた。

さらに本検討を通して得られた成果として、同じ想定地震における建物全壊率を災害事象別に算出し基準化することで、「各災害の全国の中での相対的なポテンシャル(被害の出やすさ)」という尺度を持つことが可能となり、定量化した指標の類似度を災害間で比較出来るようになった。その結果、個々の評価手法に精度上の問題はあるものの、全体的には実際の被害状況とも整合的な地域類型化の枠組みを構築することができたと考えられる。

近年、全国各地の自治体でハザードマップの整備が進んでいるが、対象とする災害事象によって想定する震源を変化させたり²⁸⁾²⁹⁾、あるシナリオ地震が発生した場合のハザードマップが作成される例も多く、評価結果がシナリオに依存する問題点がある。本稿で提案した手法は、全国一律の基準による複数の災害事象の評価結果の組合せから、地域が保有する地震災害のポテンシャルを評価することが可能であり特定の地震に基づく結果ではない。このため、シナリオ地震に依存しない具体的な事前対策を検討するための基礎的な資料となると考えられる。また、地震発生後の利用方法として、想定外の地震が発生した直後に詳細な情報が得られていない被災地域へ外部から援助等が入る場合の基礎的な情報として有効な情報となると考えられる。ただし、想定した地震ハザードは他地域と比較するためのものであり、実際には本稿で想定したハザードよりも大きな地震動に見舞われる可能性があることやより詳細な地盤・建物情報を反映させた場合には本稿の結果と異なる可能性があるため、具体的な対策を考える場合には、より詳細な情報に基づく被害予測等を参考とする必要がある。

一方、提案した枠組みでは標本の抽出方法により地域類型の定義や結果が異なる。本稿では東北地方太平洋沖地震・岩手宮城内陸地震の被災地や指標の最大値が存在する地域等を中心に特徴的な地震災害のポテンシャルが高い地域を標本に設定した。結果的に、設定した地域類型に基づく類型結果は実際の被害状況と調和的な結果が得られたが、標本の選定方法は今後も継続して改善に取り組む必要がある。また、本稿では中央防災会議(2013)⁷⁾の全国どこでも起こり得る最大級の地震(地表断層が不明瞭な地震)と同じMw6.8の地震を想定したが、マグニチュードがより大きな震源を想定した場合、全壊率が増加するとともに基準化した指標値が変化するため、類型(クラスター)そのものが変化することがあり、全国の類型結果も変化すると考えられる。想定したマグニチュードの大きさの変化による類型結果の変化については、今後の課題である。

謝 辞

本研究は国立研究開発法人防災科学技術研究所による「自然災害に対するハザード・リスク評価に関する研究」の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) 鹿島SEEHM研究会：ロングロード 第2号 ー地震被害の低減を目指して(過去の地震に学ぶ)ー、1992年、pp.2-7.
- 2) 鹿島SEEHM研究会：ロングロード 第5号 ー地震被害の低減を目指してー 阪神大震災を考えるー、1995年、pp.2-3.
- 3) 渡邊紀子、浦川豪、佐土原聡、村上處直：地域特性を考慮した都市の地震災害危険度評価手法に関する研究、地域安全学会論文集、No.1、1999年、pp.173-178.
- 4) 内閣府政策統括官(防災担当)：「表層地盤のゆれやすさ全国マップ」について、2005年.
- 5) 東京都防災会議：首都直下地震等による東京の被害想定報告書、2012年.
- 6) 地震調査研究推進本部：今後の地震動ハザード評価に関する検討 ～2013年における検討結果～、2013年.
- 7) 中央防災会議 首都直下地震モデル検討会：首都直下のM7クラスの地震及び相模トラフ沿いのM8クラスの地震等の震源断層モデルと震度分布・津波高等に関する報告書、2013年.
- 8) 大井昌弘、石橋圭太、藤原広行：地震リスク評価のための全国建物分類データベースの開発、第13回日本地震工学シンポジウム論文集、2010年、pp.1708-1715.

- 9) 中央防災会議 首都直下地震対策検討ワーキンググループ： 首都直下地震の被害想定項目及び手法の概要～人的・物的被害～、2013年。
- 10) 日本リスク研究学会：地震による災害、リスク学事典、pp.122-123、2000年。
- 11) 司宏俊、翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式、日本建築学会構造系論文集、第523号、1999年、pp.63-70。
- 12) 若松加寿江、松岡昌志：地形・地盤分類250mメッシュマップ全国版の構築、日本地震工学会大会－2008 梗概集、2008年、pp.222-223。
- 13) 藤本一雄、翠川三郎：近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均S波速度の関係、日本地震工学会論文集、第6巻、第1号、2006年、pp.11-22。
- 14) 藤本一雄、翠川三郎：近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法、地域安全学会論文集、Vol.7、2005年、pp.1-6。
- 15) 総務省統計局：平成20年住宅土地統計調査、<http://www.stat.go.jp/data/jyutaku/2008/> (参照 2015-11-01)。
- 16) 小丸安史、清水智、藤原広行、河合伸一、森川信之、松山尚典、早川譲：全国地震動予測地図のハザード情報に基づく建物被害リスクおよび人的被害リスクの試算、第13回日本地震工学シンポジウム論文集、2010年、pp.2584-2591。
- 17) 中嶋唯貴、岡田成幸：時間軸上の死者低減率最大化を主目標とした木造住宅耐震化戦略の策定、日本建築学会構造系論文集、第73巻、第623号、2008年、pp.79-86。
- 18) 松岡昌志、若松加寿江、橋本光史：地形・地盤分類250mメッシュマップに基づく液状化危険度の推定手法、日本地震工学会論文集、第11巻、第2号、2011年、pp.20-39。
- 19) 山本明夫、小丸安史、吉村昌宏、山口亮：微地形区分データを用いた広域の液状化危険度と液状化による建物被害率の予測に関する研究、地域安全学会論文集、Vol.11、2009年、pp.275-285。
- 20) 中央防災会議：東南海・南海地震の被害想定手法について、2003年。
- 21) 高知県：【高知県版】南海トラフ巨大地震による被害想定について、資料4 被害想定 of 計算方法、2013年。
- 22) 建設省建築研究所：安全・安心住宅市街地ネットワーク会議報告書、愛知県建設部、2003年。
- 23) 中央防災会議：「日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会」資料、2006年。
- 24) 内田太郎、片岡正次郎、岩男忠明、松尾修、寺田秀樹、中野泰雄、杉浦信男、小山内信智：地震による斜面崩壊危険度評価手法に関する研究、国総研資料第204号、2004年。
- 25) 大井昌弘、野畑有秀、水谷守、藤原広行：強震記録から見た地震動強さの指標間の関係、第11回日本地震工学シンポジウム、2002年、pp.633-638。
- 26) 国土交通省国土政策局：国土数値情報ダウンロードサービス、<http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html>。
- 27) 大阪市住宅局：住宅地区改良事業－老朽住宅密集市街地整備－ 実施説明資料、2006年。
- 28) 東京都都市整備局：地震に関する地域危険度測定調査（第7回）、2013年、http://www.toshiseibi.metro.tokyo.jp/bosai/chousa_6/home.htm (参照 2015-11-01)。
- 29) 東京都土木技術・人材育成センター：東京の液状化予測 平成24年度改訂版、<http://doboku.metro.tokyo.jp/start/03-jyouhou/ekijyouka/index.htm> (参照 2015-11-01)。

(受理：2015年4月3日)

(掲載決定：2016年1月23日)

Study of Methodology for Classifying Local Characteristics of Disasters by Earthquakes

SHIMIZU Satoshi ¹⁾, WAKAURA Masatsugu ²⁾, KOMARU Yasushi ³⁾,
FUJIWARA Hiroyuki ⁴⁾, NAKAMURA Hiromitsu ⁵⁾, MORIKAWA Nobuyuki ⁶⁾,
and HAYAKAWA Yuzuru ⁷⁾

1) OYO RMS Corporation, M. Eng.

2) OYO RMS Corporation, Ph.D. in Statistical Sci.

3) OYO RMS Corporation

4) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Sci.

5) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Sci.

6) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Sci.

7) OYO Corporation

ABSTRACT

This paper aims at developing a scheme to classify the local characteristic of disasters by earthquakes. First, we create the numeric indices which show the potential of the disasters. Second, conducting cluster analysis we classify typical areas in damage feature, such as Urayasu City hit by liquefaction due to 2011 Tohoku Earthquake, into seven characteristics. Finally, we classify other areas by conducting discrimination analysis to verify the method. We find that results derived from the method well classify overall damage situations due to earthquakes that hit in Japan during recent years.

Keywords: Seismic Disaster, Local Characteristic, Quantification, Classifying