

地域依存性を考慮した 津波フラジリティ曲線の同定および 構造物被害棟数のリスク推定への適用

青木 康貴¹・秋山 充良²・布施 柚起³・越村 俊一⁴

¹学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科 建設工学専攻博士課程
(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1) E-mail: mo09ca12@toki.waseda.jp

²正会員 早稲田大学教授 創造理工学部 社会環境工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)
E-mail: akiyama617@waseda.jp (Corresponding Author)

³学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科 建設工学専攻修士課程
(〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1) E-mail: yuzu21@ruri.waseda.jp

⁴正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)
E-mail: koshimura@irides.tohoku.ac.jp

津波による構造物の被害推計では、過去の被災情報から推定された構造物の津波フラジリティ曲線が対象地域に依らず適用されてきた。本研究では、過去の被災情報に加えて全国の自治体の土地利用情報を用いて、地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線をその適用先となる市町村と併せて提示できる手法を提案する。具体的には、土地利用情報を用いた主成分分析・クラスター分析から全国の自治体を地域性の類似度により分類し、グループ毎の被害データの集積から津波フラジリティ曲線を市町村別に算定する。適用例として、東北地方太平洋沖地震の被災データから地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線を同定し、それをを用いた構造物被害棟数のリスク算定手順を示す。

Key Words: fragility curve, regional characteristics, national survey, principal component analysis, cluster analysis

1. はじめに

津波災害を対象に被災地の被害データから構造物の津波に対する脆弱性（経験的な津波フラジリティ曲線¹⁾を推定する研究が行われている²⁾。津波フラジリティ曲線は、被災データから得られる構造物の損傷確率および津波ハザード強度（例えば、流速や浸水深）の関係を累積分布関数により近似することで算定される。例えば、東北地方太平洋沖地震時の東日本太平洋沿岸地域³⁾、2010年チリ地震を受けたディチャト⁴⁾、あるいは2018年インドネシア・スラウェシ島地震によるパル湾⁵⁾の被害データから多数の津波フラジリティ曲線が提案されている。これら津波フラジリティ曲線は、それぞれの地域にある個別構造物の形状・材質による耐力のばらつき、あるいは湾形状や土地利用等が影響を及ぼす津波の特性に関する差異（すなわち、各地域に位置する構造物の被災

傾向）を損傷確率として考慮することで、被災地域にある構造物の津波に対する脆弱性を表している。

将来の津波災害が懸念される地域を対象とした構造物の被害推計では、上述した被災地の被害データから経験的に推定された津波フラジリティ曲線が一般に用いられている⁷⁾。この推計法では、対象地域にある構造物の損傷確率と津波ハザード強度の関係が、過去の被災地における関係と同様であると仮定していることになる。しかしながら、津波による構造物の損傷は、構造物の形状や密集度、あるいは堤防の整備状況等といった地域性に強く支配されるため、この地域性が被災地と対象地域で乖離する場合、上記の仮定は不適切なものとなる⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。つまり、過去の被災データから一意に推定された津波フラジリティ曲線を日本全国の各自治体に適用する場合、被災地と地域性が大きく異なる市町村では、算定される構造物被害棟数が実際に生じるものと乖離することが懸

念される。

過去の被災データから経験的に得られたフラジリティ曲線を用いることで、将来に発生する自然災害を推定することの妥当性、つまり、経験的フラジリティ曲線の適用範囲に関しては、多くの既往研究で言及されているものの、それらは定性的な議論に留まっている^{例え 2) 10)}。過去の構造物被害データから得られた津波フラジリティ曲線の適用が妥当でないと推測される市町村に関しては、そこにある構造物の情報や地形条件から Monte Carlo 法など、解析的にフラジリティ曲線を評価する必要がある。また、被災地の被害データから得られたフラジリティ曲線を将来の被害推計のために他市町村に適用した場合の精度や、それを各市町村の状況に応じて如何に修正すべきであるのかに関する議論は行われていない。したがって、将来の津波災害による構造物被災棟数を高精度に評価するには、過去の被災データから算定される構造物の津波フラジリティ曲線の地域依存性とその他市町村への適用範囲、および最終的に推計される被害棟数の妥当性に関する定量的な検討により、地域別に適切な津波フラジリティ曲線を同定することが求められる。なお、本研究における地域性とは、構造物の損傷傾向に大きな影響を及ぼす土地利用や地形条件などの地域に特有な性質として定義する^{3) 10)}。

本研究では、過去の被災データおよび全国の自治体の土地利用情報を活用することで、地域依存性を考慮した地域別の津波フラジリティ曲線をその適用先となる市町村と併せて同定できる手法を提案する。具体的には、全国の市町村を地域性の類似度により分類した各グループに対して、そこに属する被災市町村の被害データのみからフラジリティ曲線をそれぞれ算出し、その適用範囲を同グループ内の市町村のみに制限することで、地域依存性を考慮したフラジリティ曲線を地域別に提示する。つまり、地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線は、地域性の近い被災市町村群から集積された被害データにより算定され、それらと地域性が類似した市町村へのみ適用する。これを可能にするための分析手法として、土地利用情報から対象市町村内にある構造物の損傷傾向を表す地域性を同定するのに主成分分析¹¹⁾を適用し、地域性の類似度に応じた全国の市町村の分類にクラスター分析¹²⁾を用いる。さらに、過去の被災データから得られるフラジリティ曲線を将来の津波災害の推定に適用した際の構造物被害棟数の推定誤差は、被災地を細分化した各市町村を対象とした再現結果と実測値の関係（ばらつき）と等しいと仮定することで算定する。これにより、全国の市町村の地域性に基づくグループ分けが、将来の津波災害により発生する構造物被害の推計結果に及ぼす影響を検証した上で、地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線を市町村別に同定できる。ケーススタディでは、

2011年東北地方太平洋沖地震時の被災データおよび全国の沿岸市町村（海岸線を有する市町村）の土地利用情報を活用した検討を行い、提案手法の有効性を検証する。

2. 地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線の算定手順

地域依存性を考慮したフラジリティ曲線の算定手順を図-1に示す。計算手順は3つのプロセスから構成され、(I)全国の市町村の土地利用および過去の構造物被害に関するデータの収集、(II)主成分分析およびクラスター分析を活用した地域性に基づく全国の市町村の分類、(III)地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線の算定とその適用範囲・妥当性の検証、である。

既往研究^{例え 2) 13)}では、被災地域にある構造物の被害情報からフラジリティ曲線を算定し、その地域依存性・適用範囲を被災地、および被害推計の対象となる地域の土地利用情報の比較から定性的に検討している。一方で、図-1に示されるように、提案手法では、被災地の事後調査から得られた被害データを異なる地域で将来発生する津波災害に対して活用することを前提に、被災情報に加えて日本全国の土地利用情報を用いることで、地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線を地域別に算定し、その適用先となる市町村と併せて提示する。

(1) 使用データの収集

地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線の同定に用いるデータは、全国の市町村の地域性を表す土地利用情報、および構造物の脆弱性を評価するための被災情報である。収集する土地利用情報には、津波を受ける構造物の被害傾向に影響すると推測される指標を任意に選択できるが、被災地を含めた全国の市町村全てに対してそれらを取得する必要がある。そこで、総務省による統計調査や国土交通省が公開する国土に関する資料など、統一された規格により全国的に収集・整備されている情報を活用する^{14) 16)}、あるいは情報が取得できない市町村の欠損データを適切に補完する¹⁷⁾。

構造物の津波フラジリティ評価に必要なデータは、構造物の損傷度とその位置における津波ハザード強度である。津波災害による構造物の被害実態、あるいは生じた津波ハザード強度は、現地調査や、航空写真、観測結果等から把握され、そのデータの一部は一般に公開されている^{4) 9) 18) 20)}。これら蓄積されてきた全国の土地利用情報、および過去の津波災害による構造物被害・ハザード強度に関するデータを統合することで、地域依存性を考慮したフラジリティ曲線を推定する。

なお、得られるデータの制約から、被災した全ての構

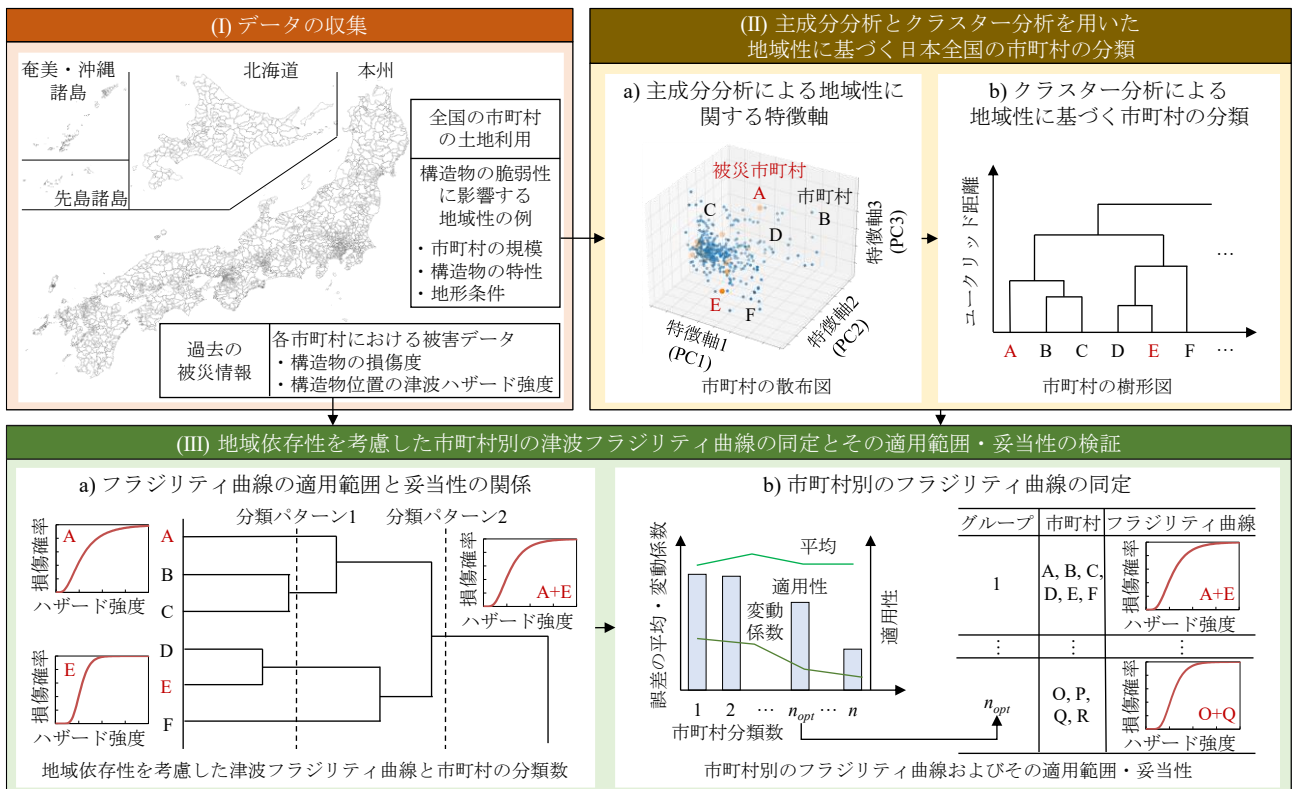


図-1 地域依存性を考慮した市町村別の津波脆弱性曲線の算定手順

造物の正確な位置情報を取得できるとは限らず、例えば、各構造物の位置を平均で約 2km^2 の分解能である大字レベルで代表させることもあり得る²⁰⁾。構造物位置に関する分解能と算出される脆弱性曲線の妥当性は、本研究の対象外とし、各被災市町村の被害データから脆弱性曲線を算定できるものとする。

(2) 主成分分析およびクラスター分析を用いた日本全国の市町村の地域性に基づく分類

a) 主成分分析による地域性に関する特徴軸の同定

全国の市町村の土地利用情報から主成分分析により、地域性を表す特徴軸（主成分）を同定することで、被災地を含む全ての市町村を対象に構造物の損傷傾向の類似度に応じた分類を可能にする。地域にある構造物の損傷傾向に大きな影響を及ぼす土地利用情報を事前に特定することは難しいため、構造物の脆弱性に関わると推測されるデータを網羅的に収集することになる。一般に土地利用・国土に関する指標間には強い相関関係があるため（例えば、人口と住宅数）、それらを直接用いた市町村の分類は収集したデータの小さな変化により結果が大きく異なる可能性がある²¹⁾。つまり、網羅的な土地利用情報をそのまま活用した市町村の分類は、その物理的意味の解釈が難しい。そこで、市町村の土地利用情報の主成分分析により、構造物の損傷傾向に影響する地域性を表す互いに独立な変数群（主成分）に変換することで、市町村を分類する。さらに、主成分分析から得られる主成分を座標軸とした散布図を活用することで、各市町村の

地域性の差異を把握できる。つまり、過去の災害による被災市町村に顕著な地域性や、それとは異なる地域性を持つ自治体を把握することができる。

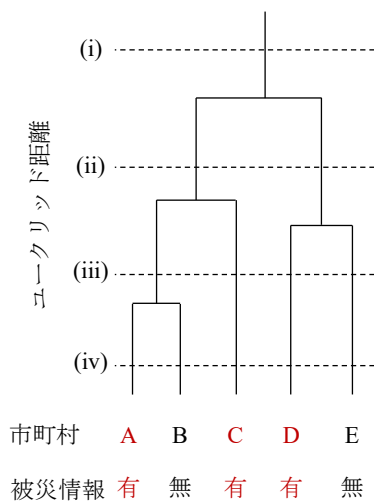
主成分分析¹⁰⁾では、土地利用情報の線形結合として主要な地域性を表す主成分を算定する。得られる主成分は、それが有する相対的な情報量である因子寄与率が高い順に第1主成分から第 p 主成分と呼ばれる。ここに、 p は主成分の総数である。主成分分析の詳細な手順は、参考文献¹⁰⁾に記載されている。なお、得られたデータの単位設定が算定される主成分に影響を及ぼさないようにするため、各土地利用情報は事前に標準化される。

b) クラスター分析を用いた全国の市町村の地域性に基づく分類

主成分分析により推定された特徴軸を基にクラスター分析を行うことで、被災地を含めた全国の市町村をそこに位置する構造物の損傷傾向に応じて分類する。これにより、地域性の近い被災市町村群より得られる被害データのみから算定される地域依存性を考慮した津波脆弱性曲線の適用先となる自治体（すなわち、適用範囲）を同定することが可能となる。

クラスター分析では、各主成分得点から式(1)により算出される市町村間の地域性に関する類似度（主成分空間上のユークリッド距離）に基づいて、Ward法¹²⁾により市町村を分類する。

$$L_{r,s} = \sqrt{\sum_{q=1}^p (z_{r,q} - z_{s,q})^2} \quad (1)$$



(a) 市町村の樹形図

手法		従来手法 ^{2),13)}	提案手法								
分類パターン		(i)	(ii)	(iii)				(iv)			
市町村分類数 (グループ数)		1	2	4				5			
フラジリティ 曲線の 算定法	曲線の数	1	2	3				3			
	使用データ	A, C, D	A, C	D	A	C	D	A	C	D	
	適用先	A, B, C, D, E	A, B, C	D, E	A, B	C	D	A	C	D	
地域依存性		低	中	高				過剰			
適用性 (%)		100	100	80				60			
構造物被害棟数の 推定精度		低	中	高				高			

(b) 従来手法と提案手法によるフラジリティ曲線の算定法の比較

図-2 地域性に基づく市町村の樹形図および従来手法と提案手法によるフラジリティ曲線の算定法の比較

ここに、 $L_{r,s}$ は市町村 r と市町村 s 間の主成分空間上のユークリッド距離、 $z_{r,q}$ は市町村 r の第 q 主成分である。

Ward法は、予め分類数を決める必要がない階層クラスタ分析の中で最も一般的な手法であり、クラスター内のユークリッド距離の平方和を最小にするように個体を分類する¹²⁾。クラスタ分析による市町村のグループ数は、次節で詳述されるように、地域依存性を考慮したフラジリティ曲線の適用範囲、およびそれを活用した構造物被害棟数の推定精度に大きく影響するため、分類数を任意に調整できるWard法(階層クラスタ分析)は提案手法に適している。市町村の分類結果は、地域性の類似度に基づく分岐を繰り返したツリー構造である樹形図として、図-2(a)に示すように可視化される。市町村の樹形図より、各市町村の地域性に関する類似性、あるいは次節で詳述される地域依存性を考慮した市町村別の津波フラジリティ曲線の適用範囲を同定できる。

(3) 地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線の同定およびその適用範囲・妥当性に関する検討

a) フラジリティ曲線の適用範囲と妥当性の関係

従来手法^{2),13)}と提案手法におけるフラジリティ曲線の算定法、地域依存性、適用範囲(適用性)、および妥当性に関する比較を図-2(b)に示す。従来手法では、図-2の分類パターン(i)に示されるように、全ての被災市町村から集積されたデータを用いてフラジリティ曲線を一意に算定しており、地域依存性を考慮できない。したがって、従来手法を活用して推定される構造物被害棟数のリスクは、地域性に基づく構造物の被害傾向を無視した平均的な推定に留まり、各市町村で実際に生じる構造物被害と大きく乖離する可能性がある。

一方で、提案手法では、地域性に基づく市町村の樹形図を活用することで、地域依存性を考慮したフラジリティ曲線を自治体別に同定する。具体的には、図-2の分類

パターン(ii)~(iv)に示すように、クラスタ分析による分類に基づき、地域性の近い被災市町村から集積した構造物被害データを用いて、地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線を複数算定し、それぞれを対応する分類内の市町村へのみ適用する。地域依存性を考慮したフラジリティ曲線を用いた構造物被害棟数の推定は、地域に特有な被害傾向を考慮できるため、従来手法と比較してその精度(妥当性)を向上させることができる。しかしながら、図-2の分類パターン(iv)に示すように、地域性に基づく市町村の分類数を増大させ、フラジリティ曲線の地域依存性を過度に重視すると、それを適用できる市町村は少なくなる。つまり、算定されるフラジリティ曲線の地域依存性と適用性はトレードオフの関係にあり、次項記載の方法により定量化されるそれらの指標に基づいて、適切な市町村の分類数を選定する必要がある。

被災市町村群の被害データを用いた構造物の津波フラジリティ曲線は、津波ハザード強度毎に算定した被害率から最小二乗法により、以下の式に示す対数正規分布のパラメータを定めることで算出する²³⁾。

$$P_{g_{n,i}}(DS=ds | H=h) = \Phi\left(\frac{\ln h - \lambda_{g_{n,i}}}{\xi_{g_{n,i}}}\right) \quad (2)$$

ここに、 $P_{g_{n,i}}$ は市町村分類数が g_n の場合にグループ i に適用する津波フラジリティ曲線であり、津波ハザード強度 $H=h$ を受ける構造物が損傷度 $DS=ds$ になる確率である。 $\Phi(\bullet)$ は標準正規分布の累積分布関数、 $\lambda_{g_{n,i}}$ は平均値、 $\xi_{g_{n,i}}$ は対数標準偏差である。

b) 市町村別のフラジリティ曲線の同定

適用性と地域依存性を調和させたフラジリティ曲線を市町村別に算定するため、それらの指標をそれぞれ定量化し、適切な市町村分類数を同定する。地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線の適用性は、次式により与えられ、クラスタ分析から得られた樹形図を用いるこ

とで容易に算定できる。

$$R_{a,g_n} = n_{a,g_n} / n \quad (3)$$

ここに、 R_{a,g_n} は市町村分類数を g_n として算定されるフラジリティ曲線群の適用性を表す指標、 n_{a,g_n} は地域依存性を考慮したフラジリティ曲線を適用可能な総市町村数、 n は土地利用情報を取得した全国の市町村の総数である。

過去の被災データから得られた地域依存性を考慮したフラジリティ曲線を適用して算定される、将来の津波災害により発生する構造物被害棟数の推定誤差は、各被災市町村を対象とした再現解析と実測値の誤差と等しいと仮定する。これにより、地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線から得られる将来の構造物被害棟数の推計結果の妥当性、すなわち推定誤差を表すばらつきは、次式により与えられる。

$$\mu_{\varepsilon,g_n} = \frac{\sum_{k=1}^{n_{am}} R_{k,g_n}}{n_{am}}, \quad \sigma_{\varepsilon,g_n} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n_{am}} (R_{k,g_n} - \mu_{\varepsilon,g_n})^2}{\mu_{\varepsilon,g_n}^2 (n_{am} - 1)}} \quad (4)$$

$$R_{k,g_n} = n_{k,act} / n_{k,g_n} \quad (5)$$

$$n_{k,g_n} = \sum_{st \in k_{g_n,i}} P_{g_n,i} (DS = ds_i | H = h_{st}) \quad (6)$$

ここに、 μ_{ε,g_n} および C_{ε,g_n} はそれぞれ将来の被害推計におけるモデル誤差の平均値および変動係数、 n_{am} は被災市町村の総数、 R_{k,g_n} は実測値と推定値の比、 n_{act} は被災市町村 $k_{g_n,i}$ で観測された構造物被害棟数の実測値、 n_{k,g_n} は市町村分類数 g_n でグループ i に属する被災市町村 $k_{g_n,i}$ における構造物被害棟数の推定値、 h_{st} は構造物 st の位置で定められた津波ハザード強度である。

市町村分類数、式(3)に示される地域依存性を考慮したフラジリティ曲線の適用性、および式(4)で与えられる将来の被害推計における推定誤差の関係を図-3に示す。図-3には、市町村分類数を $g_n = n$ として式(4)より算定した変動係数の下限値を示している。図-3より、モデル誤

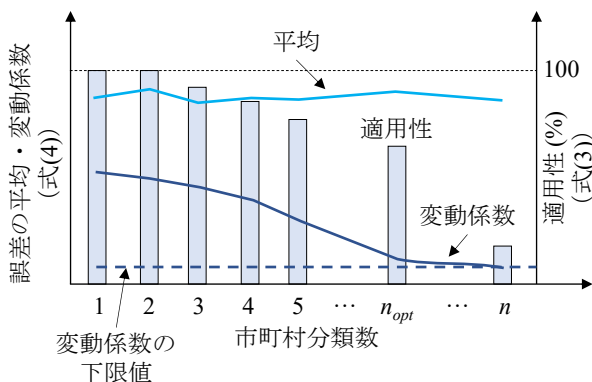


図-3 地域依存性を考慮したフラジリティ曲線の妥当性・適用性のトレードオフ

差の変動係数とその下限値に十分に漸近し、その中で適用性が大きくなる分類数 n_{opt} を選定する。それに基づき市町村を分類することで、地域依存性と適用性が調和したフラジリティ曲線を各自治体に対して算出できる。なお、地域依存性を考慮したフラジリティ曲線の適用範囲外となる市町村では、従来手法によるフラジリティ曲線（市町村分類数 $g_n = 1$ から算定）を活用することになり、図-3および式(4)に示されるように、被害棟数の推定誤差は大きくなる。

3. 東北地方太平洋沖地震時の被災データによる地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線

(1) 東北地方太平洋沖地震時の被災データおよび全国の沿岸市町村の土地利用情報

全国の沿岸市町村の土地利用情報および東北地方太平洋沖地震時の被害情報を活用した提案手法により、地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線を同定する。津波災害を想定していることから、対象とする市町村は、国土交通省が公開する海岸線¹⁹⁾と接するものを選定した。その総数は、382である。これは、東北地方太平洋沖地震による被災4県（青森県、岩手県、宮城県、および福島県）を除く全国の601の沿岸市町村、および被災情報から津波フラジリティ曲線を算定できた31の被災市町村を合わせた632の市町村から、後述の土地利用情報の全てを取得できる人口1万5千人以上の市町村を抽出すると382の市町村となる。

沿岸市町村を対象とした土地利用情報には、総務省が公開する統計情報¹⁹⁾、および国土交通省による国土調査結果¹⁹⁾を用いた。表-1に示される地域性を表す28の指標を被災市町村を含めた計382の沿岸市町村に対して取得した。選定した28の指標は、4つの区分に大別でき、それぞれ市町村規模、土地利用状況、構造物の規模・密集度、および海岸線・堤防の特徴を表す。表-1より、市町村の規模や土地利用状況を表す指標は、地域に顕著な構造物種別や建設時期に関連している。構造物の規模・密集度は、津波を受ける構造物の脆弱性に影響を及ぼすと考えられるため対象とした³⁾。さらに、津波の特性と関連する海岸線延長や堤防整備率などを選定した。なお、住宅棟数および1住宅当たりの延べ面積は、構造物の密集度や規模に関連する重要な指標であるものの、人口1万5千未満の町村からは取得できなかった¹⁹⁾。本研究で提示するケーススタディでは、それらの小規模な町村を対象外としたことに注意されたい。

東北地方太平洋沖地震による構造物の被害情報は、関本ら¹⁹⁾が作成した復興支援調査アーカイブデータ²⁰⁾から取得した。東北地方太平洋沖地震時に津波の影響を受

表-1 地域性を表す土地利用情報と主成分の因子負荷量

区分	指標	記号	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
規模	総面積	A_t	0.00	-0.32	0.06	-0.17	0.07	-0.25
	可住地面積	A_h	0.06	-0.32	-0.02	-0.15	-0.09	-0.14
	住居地域面積	A_r	0.23	-0.22	-0.07	0.02	-0.09	0.00
	商業・近隣商業地域面積	A_c	0.23	-0.22	0.01	-0.02	0.00	-0.02
	工業・準工業地域面積	A_i	0.20	-0.20	-0.13	0.01	-0.15	-0.19
	人口	N_p	0.27	-0.17	0.01	0.03	0.09	0.06
	住宅棟数	N_b	0.27	-0.17	0.03	0.03	0.11	0.06
	木造住宅棟数	N_w	0.24	-0.23	-0.05	0.07	0.04	0.00
	RC・SRC造住宅棟数	N_{rc}	0.26	-0.03	0.15	-0.04	0.24	0.12
	S造住宅棟数	N_s	0.25	-0.13	-0.07	0.04	-0.03	0.10
	1970年以前に建築された住宅数	N_o	0.22	-0.24	0.07	0.12	0.07	0.03
	人口密度 ^{a)}	D_p	0.23	0.21	0.07	0.13	0.24	-0.03
	財政力指数	I_f	0.21	0.12	-0.25	-0.01	-0.26	-0.03
土地利用	可住地率 ^{b)}	R_h	0.13	0.23	-0.14	0.07	-0.28	0.11
	住宅地域率 ^{b)}	R_r	0.20	0.24	-0.06	0.21	-0.07	-0.07
	商業・近隣商業地域率 ^{b)}	R_c	0.20	0.20	0.07	0.08	0.11	-0.05
	工業・準工業地域率 ^{b)}	R_i	0.14	0.18	-0.10	0.23	-0.18	-0.18
	木造住宅率 ^{c)}	R_w	-0.15	-0.16	-0.30	0.40	0.08	-0.08
	RC・SRC造住宅率 ^{c)}	R_{rc}	0.15	0.17	0.29	-0.41	0.00	0.05
	S造住宅率 ^{c)}	R_s	0.17	0.03	-0.24	0.03	-0.42	0.06
	1970年以前に建築された住宅率 ^{c)}	R_o	-0.19	-0.10	0.10	0.36	0.25	0.15
建造物の 特性・密集度	1住宅当たりの延べ面積	A_{if}	-0.17	-0.11	-0.22	0.33	0.13	0.11
	住宅の密集度 ^{d)}	D_b	0.23	0.20	0.08	0.12	0.27	-0.03
	平均容積率 ^{e)}	R_{fa}	0.23	0.20	0.04	0.17	0.24	-0.04
海岸線・堤防	海岸線の延長	L_c	-0.03	-0.15	0.49	0.21	-0.24	-0.04
	堤防の延長	L_{sw}	0.00	-0.19	0.33	0.23	-0.22	0.14
	陸地の奥行き ^{f)}	L_d^{-1}	-0.01	0.11	0.42	0.29	-0.35	0.02
	堤防整備率 ^{g)}	R_{sw}	0.04	-0.05	-0.11	-0.08	-0.04	0.85
因子寄与率 (%)			37.2	20.6	8.1	5.9	4.6	3.6
累積寄与率 (%)			37.2	57.9	65.9	71.8	76.3	80.0

*算定式の一覧： a) $D_p = N_p/A_h$, b) $R_x = A_x/A_t$, c) $R_x = N_x/N_b$, d) $D_b = N_b/A_h$, e) $R_{fa} = N_b \times A_{if}/A_h$, f) $L_d^{-1} = L_c/A_t$, g) $R_{sw} = L_{sw}/L_c$

けた計 22 の市町村における建造物の損傷度、およびその位置の浸水深を活用した。参考文献²⁾から「全壊（流出）、全壊、全壊（1階天井以上浸水）」を全壊、「大規模半壊、半壊（床上浸水）」を半壊、および「一部損壊（床下浸水）、被災なし」を無損傷と定義し、全壊および半壊以上に関する津波フラジリティ曲線をそれぞれ算定する。なお、対象とした被災市町村数が 22 であるのは、復興支援アーカイブが被災情報を提供する 34 の市町村から、フラジリティ曲線の算定に十分なデータ数である 200 棟以上の建造物被害情報がある 31 の市町村を抽出し⁴⁾、そこから前述した人口 1 万 5 千未満の市町村を除いたためである。全国の土地利用情報の欠落により限られた被災情報の全てを活用できなくなるため、小規模市町村を含めた統計資料の全国的な拡充、あるいは欠損データの適切な補完は、今後の重要な課題である。

(2) 主成分分析による地域性に関する特徴軸

地域性を表す 28 の指標を用いた主成分分析により得

られた主成分から、累積寄与率 80 % までの主要な特徴軸を表-1 に示す。各主成分の物理的意味は、主成分および各指標の相関係数である因子負荷量より解釈できる¹⁾。第 1 主成分(PC1)は、他の主成分と比較して、人口や住宅棟数といった市町村の規模を表す多くの指標と正の相関を有するため、「市町村規模」を示す指標である。第 2 主成分(PC2)は、人口密度や住宅の密度、土地利用に関する指標と正の相関があり、一方で市町村面積と強い負の相関関係にあることから、「建造物密集度」を表す。第 3 主成分(PC3)は、海岸線と堤防に関する指標との正の相関が強いため、「海岸線長さ」を表している。第 4 主成分(PC4)は、1 住宅当たりの延べ面積や、平均容積率、および海岸線・堤防に関する指標と正の相関を持つため、津波の影響下にある建造物の特徴を統合した地域性と解釈できる。第 5 主成分(PC5)は、建造物の規模・密集度に関する指標と正の相関関係にあり、建造物の特性を表す指標といえる。第 6 主成分(PC6)は、堤防整備率とのみ強い正の相関があるため、堤防の整備状況の良さを示す。

第1~3主成分を座標軸とした全国の沿岸市町村の散布図を図-4に示す。図-4より、全国の市町村の地域性と比較して、東北地方太平洋沖地震による被災市町村の多くは、市町村規模および海岸線延長が極めて小さかったことが確認できる。東北地方太平洋沖地震により被災した全ての市町村から集積された被害データを活用したフラジリティ曲線は、兵庫県尼崎市や岡山県倉敷市といった規模が大きい市町村、あるいは長崎県対馬市や沖縄県那覇市などの長い海岸線を有する離島には適さない可能性がある。

(3) クラスタ分析を用いた沿岸市町村の分類

地域性を顕著に表す主成分を用いたクラスタ分析により、全国の沿岸市町村は図-5に示されるように分類された。図-5より、全国の市町村は、小さい市町村規模で構造物が疎に立地するグループ(A-a)、小規模市町村で構造物が密集するグループ(A-b)、過密で大規模な市町村のグループ(B-a)、および大規模市町村で構造物密集度が小さいグループ(B-b)の4つに大別される。東北地方太平洋沖地震により被災した多くの市町村は、小規模グループ(A-aあるいはA-b)に属している。それら市町村の集積データから得られる津波フラジリティ曲線は、東京湾周辺や大阪府に位置する市町村(B-a)、あるいは瀬戸内海の沿岸にある市町村(B-b)に特有な地域性を十分に考慮できない。

さらに、より詳細な地域性を考慮する場合には、グループA-a-8~A-a-10およびA-b-2~A-b-6に多くが属する被災市町村から得られるフラジリティ曲線は、同様な地域性を示す茨城県周辺や三重県南部、あるいは高知県にある市町村へは適用可能であるといえる。一方で、沖縄県(A-b-1)や北陸地方(A-a-1~A-a-4)に位置する市町村へ適用すると、高精度な構造物被害棟数の推定とはならないことが懸念される。既往の検討では、過去の津波災害で得られた津波フラジリティを他の地域に単純に適用している²¹⁾。提案手法を用いることで、地域性の違いを踏まえた津波フラジリティの選択が可能であり、また、過去の被災事例から得られた津波フラジリティ曲線を適用することに不適な場所を同定できる。

(4) 地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線の同定およびその妥当性・適用性の検証

地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線の適用性および妥当性の関係を図-6に示す。図-6より、全壊棟数の推定誤差の変動係数が下限値に漸近し、適用性が大きい分類数 $n_{qt} = 10$ の場合に地域依存性と適用性が調和した津波フラジリティ曲線を算定できると判断した。分類数 $n_{qt} = 10$ に基づく地域依存性を考慮した提案手法、および従来手法による津波フラジリティ曲線を図-7に示す。

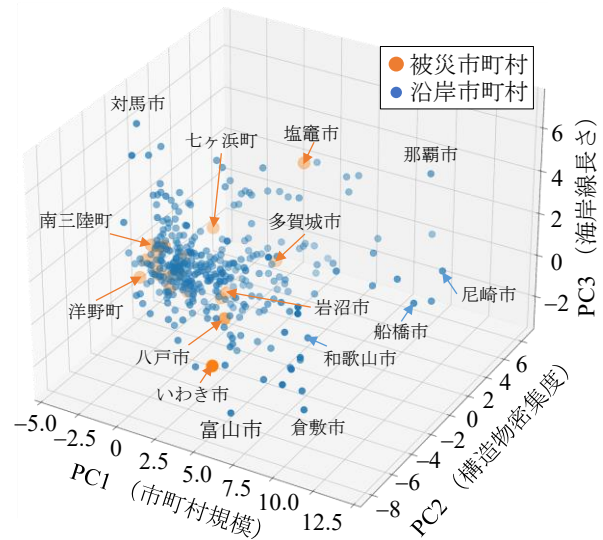


図-4 地域性に関する特性軸に関する沿岸市町村の散布図

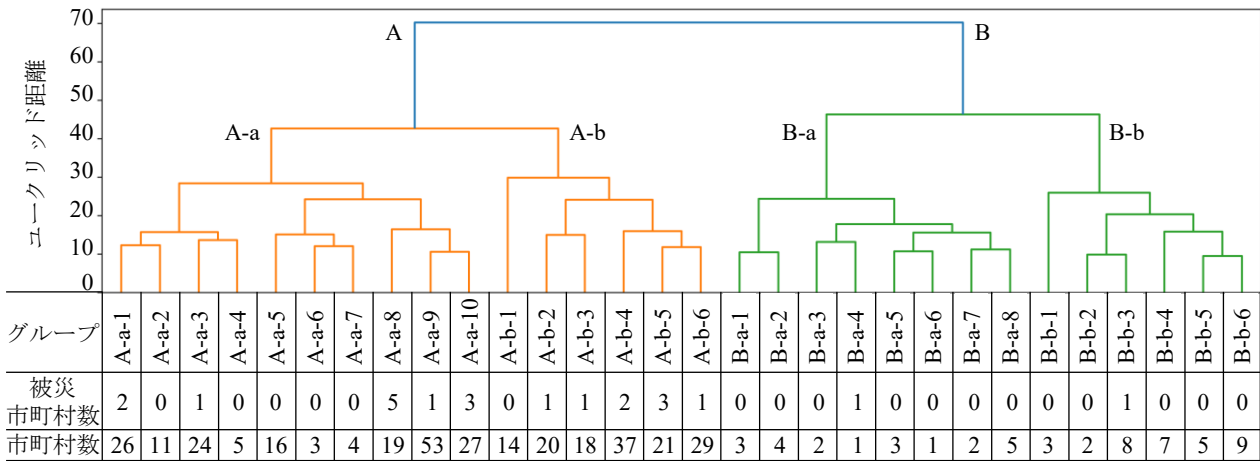
図-5、図-6および図-7より、グループA-a-1~4、A-a-8~10、A-b-2~3、A-b-4~6、B-a-3~8、およびB-b-2~6に属する335市町村では、それぞれ異なる地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線を活用する。式(4)から得られる推定誤差の統計量は、半壊棟数の平均と変動係数、および全壊棟数の平均と変動係数でそれぞれ0.99, 0.21, 1.03, および0.10である。グループA-a-5~7、A-b-1、B-a-1~2、およびB-b-1に属する47市町村では、地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線の適用外であるため、従来手法²¹⁾による曲線を用いることになる。その推定誤差のパラメータは、半壊棟数の平均と変動係数、および全壊棟数の平均と変動係数でそれぞれ1.08, 0.29, 0.99, および0.20である。したがって、提案手法により津波フラジリティ曲線の地域依存性を考慮することで、対象とした沿岸市町村の内87.7%の自治体において構造物の半壊・全壊棟数の変動係数を半減できる。

4. 地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線を用いた構造物被害棟数のリスク推定

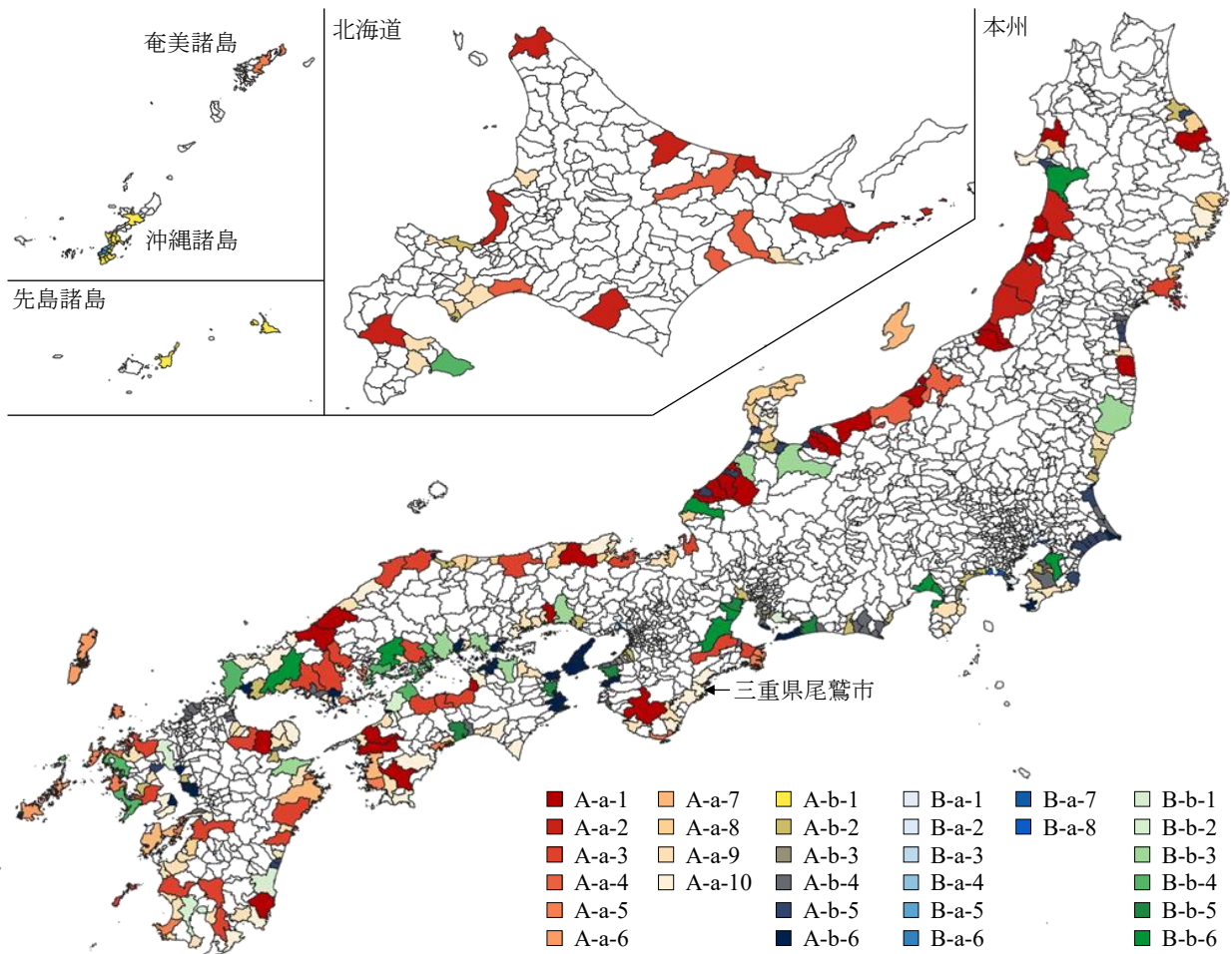
地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線を用いた構造物被害棟数のリスクは、式(4)を統計量とするモデル誤差を乗ずることで、次式により算定される。

$$n_f = \sum_{st \in A_{g_n, i}} \int_0^{\infty} \left\{ P_{g_n, i} (H = h) \cdot \left| -\frac{dF_{H, st}(h)}{dh} \right| \right\} dh \cdot \varepsilon_{g_n} \quad (7)$$

ここに、 n_f は市町村分類数 g_n でグループ i に属する市町村 $A_{g_n, i}$ で生じる構造物の被害棟数、 $P_{g_n, i}$ はグループ i の地域依存性を考慮したフラジリティ曲線、 $F_{H, st}(h)$ は構造物 st の位置の津波ハザード曲線^{24), 25)}、 ε_{g_n} は構造物被害棟数の推定誤差を表す平均 $\mu_{\varepsilon_{g_n}}$ および変動係数 $C_{\varepsilon_{g_n}}$ の正規乱数である。



(a) 全国の沿岸市町村を対象とした地域性に基づいた分類・樹形図



(b) 全国の沿岸市町村を対象とした地域性に基づいた分類に関する空間性

図-5 クラスタ分析による全国の沿岸市町村の地域性に基づく分類

提案手法を用いることで、津波による構造物被害棟数のリスクを従来手法と比較して高精度に推定できることが期待される。例えば、南海トラフ地震による甚大な被害が懸念される三重県尾鷲市で発生する構造物の全壊棟数のリスクを算定する場合、従来手法では、図-7(a)に示される津波フラジリティ曲線を適用し、変動係数0.20の推定誤差を考慮することになる。一方で、前章で得られ

た地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線を用いた場合には、図-5(b)より図-7(c)に示すフラジリティ曲線を用いることになり、地域に特有な構造物の損傷傾向を考慮できるだけでなく、式(7)に示す推定に伴うモデル誤差の変動係数を半減させることができるため、従来手法と比較して精緻な推定が可能になると期待される。

5. 結論

過去の災害情報および日本全国の市町村の土地利用情報を活用し、算定される地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線をその適用先となる自治体とともに提示できる手法を提案した。ケーススタディでは、東北地方太平洋沖地震時の被災データから津波フラジリティ曲線の地域依存性を同定し、その妥当性・適用性を検証した。さらに、地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線を用いた構造物の被害棟数のリスク算定式を示した。

本研究により得られた知見を以下にまとめて示す。

1. 全国の市町村をそこに位置する構造物の損傷傾向に応じて分類した各グループに対して、そこに属する被災市町村群から集積された被害データを用いてフラジリティ曲線をそれぞれ算定し、その適用先を同グループ内の自治体だけに制限することで、地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線を地域別に算

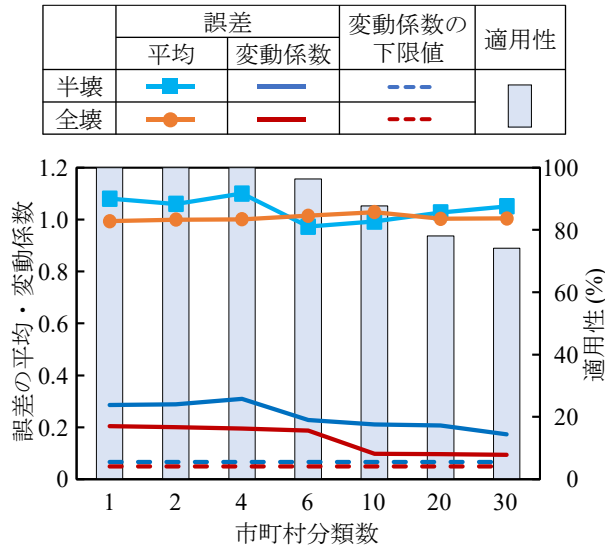


図-6 地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線の適用性および妥当性

定できる。

2. 主成分分析を行うことで、土地利用情報から構造物の損傷傾向に影響する地域性（主成分）を抽出できる。また、算定された主成分を用いたクラスター分析により、日本全国および被災地域の市町村をそれらの地域性に基づいて分類できる。結果として得られる市町村の樹形図を用いることで、地域性の近い被災市町村群の集積データから地域依存性を考慮したフラジリティ曲線を算定でき、それを適用可能な近い地域性を有する市町村群を同定できる。
3. 地域依存性を考慮したフラジリティ曲線を用いることで、将来の津波災害により各地域で生じる構造物被害棟数を精緻に算定することができる。一方で、地域依存性を過度に重視する（地域性に基づく市町村分類数を過剰に増加させる）と、算定されるフラジリティ曲線を適用できる市町村は極めて少なくなる。すなわち、被害推定の精度向上に寄与する地域依存性の考慮の度合いは、そのフラジリティ曲線を適用できる市町村数とトレードオフの関係にある。提案手法を用いることで、地域依存性を考慮したフラジリティ曲線の全国の市町村への適用性、およびそれを用いて算定される構造物被害棟数の推定精度の関係を評価できるため、構造物の被害傾向の違いを適切に考慮した津波フラジリティ曲線を自治体別に提示できる。
4. 東北地方太平洋沖地震および全国の沿岸市町村を対象としたケーススタディでは、フラジリティ曲線の地域依存性を考慮することで、将来の津波災害による構造物の被害棟数の推定精度が向上することを示した。具体的には、東北地方太平洋沖地震の各市町村内で生じた構造物の全壊棟数 N_{tot} 、およびその再現解析結果 N_{est} の比 (N_{est}/N_{tot}) の変動係数が、被災情報から一意に推定された、あるいは地域依存性を考慮したフラジリティ曲線を適用した場合で、それぞれ

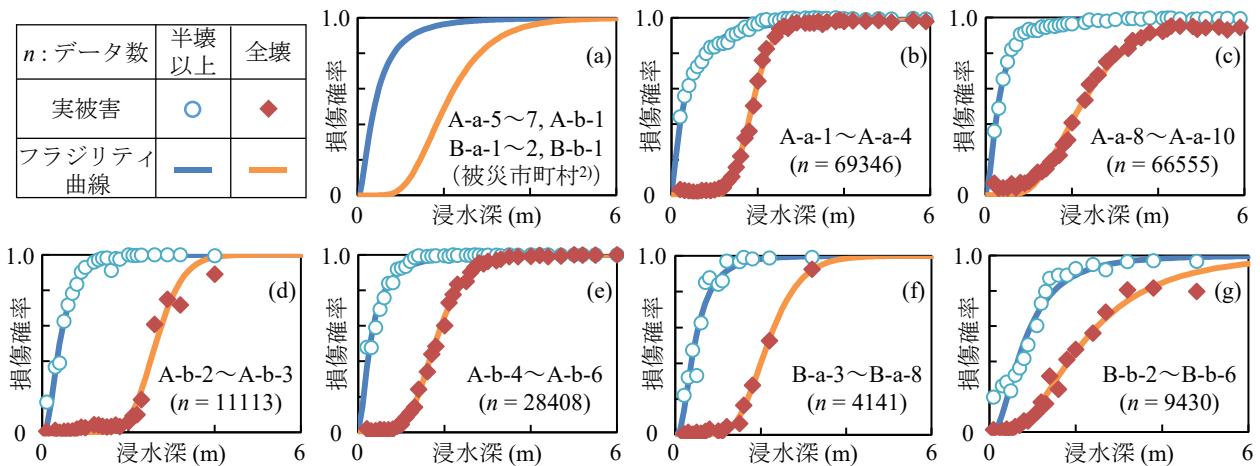


図-7 地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線およびその適用先となる市町村の一覧

0.20, および0.10であった。つまり、津波フラジリティ曲線の地域依存性を適切に考慮することで、推定される構造物全壊棟数の変動係数を半減できる。

5. 地域依存性を考慮した津波フラジリティ曲線を用いた構造物被害棟数のリスク算定では、地域に特有な構造物の損傷傾向を考慮できるだけでなく、推定誤差を低減させることができるため、従来手法と比較して精緻な被害推定が可能になるといえる。

謝辞：本研究の一部は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2128 の支援を受けたものです。

REFERENCES

- 1) Shinozuka, M., Feng, M. Q., Lee, J. and Naganuma, T.: Statistical analysis of fragility curves, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 126, No. 12, 2000.
- 2) Ishibashi, H., Akiyama, M., Kojima, T., Aoki, K., Koshimura, S. and Frangopol, D. M.: Risk estimation of the disaster waste generated by both ground motion and tsunami due to the anticipated Nankai Trough earthquake, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 50, No. 8, pp. 2134-2155, 2021.
- 3) Yanagawa, R.: Development and application of a building group destruction probability model based on the Great East Japan earthquake tsunami experience, *Japan Society for Natural Disaster Science*, Vol. 38, No. 2, pp. 145-164, 2017.
- 4) Suppasri, A., Charvet, I., Imai, K. and Imamura, F.: Fragility curves based on data from the 2011 Tohoku-Oki tsunami in Ishinomaki City, with discussion of parameters influencing building damage, *Earthquake Spectra*, Vol. 31, No. 2, pp. 841-868, 2015.
- 5) Mas, E., Koshimura, S., Suppasri, A., Matsuoka, M., Matsuyama, M., Yoshii, T., Jimenez, C., Yamazaki, F. and Imamura, F.: Developing Tsunami fragility curves using remote sensing and survey data of the 2010 Chilean Tsunami in Dichato, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol.12, No. 8, pp.2689-2697, 2012.
- 6) Mas, E., Paulik, R., Pakoksung, K., Adriano, B., Moya, L., Suppasri, A., Muhari, A., Khomarudin, R., Yokoya, N., Matsuoka, M. and Koshimura, S.: Characteristics of tsunami fragility functions developed using different sources of damage data from the 2018 Sulawesi earthquake and tsunami, *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 177, No. 6, pp. 2437-2455, 2020.
- 7) 内閣府政策統括官, 南海トラフ巨大地震の被害想定について (建物被害・人的被害), 2019.
- 8) 環境省環境再生・資源環境局: 災害廃棄物対策指針 (改訂版), 2018.
- 9) 三重県: 三重県災害廃棄物処理計画, 2020.
- 10) 成田裕也, 越村俊一: 津波被害の地域特性に基づく津波被害類型化, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 71, No. 22, pp. I_331-I_336, 2015. [Narita, Y. and Koshimura, S.: Classification of tsunami fragility curves based on regional characteristics of tsunami damage, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 71, No. 22, pp. I_331-I_336, 2015.]
- 11) Pearson, K.: On lines and planes of closest fit to systems of points in space, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, Vol. 2, No. 11, pp.559-572, 1901.
- 12) Ward, J. H.: Hierarchical grouping to optimize an objective function, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 58, No.301, pp.236-244, 1963.
- 13) 翠川三郎, 伊東佑記, 三浦弘之: 兵庫県南部地震以降の被害地震データに基づく建物被害関数の検討, 日本地震工学会論文集, Vol. 11, No. 4, pp. 4_34-4_47, 2011. [Midorikawa, S., ITO, Y. and Miura, H.: Vulnerability functions of buildings based on damage survey data of earthquake after the 1995 Kobe earthquake, *Japan of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 4_34-4_47, 2011.]
- 14) 総務省統計局: e-Stat (政府統計の相談窓口), 都道府県・市町村のすがた (社会・人口統計体系), <https://www.e-stat.go.jp/regional-statistics/ssdsview/municipality>, 2022年8月10日閲覧
- 15) 国土交通省国土政策局: 国土数値情報ダウンロード, <https://nlftp.mlit.go.jp/ksj/>, 2022年8月10日閲覧
- 16) 内閣府地方創成室: Regional Economy Society Analyzing System (地域経済分析システム), <https://resas.go.jp/#/13/13101>, 2022年8月10日閲覧
- 17) Schafer, J. L. and Graham, J. W.: Missing data: our view of the state of the art, *Psychological Methods*, Vol. 7, No. 2, pp. 147-177, 2002.
- 18) 内閣府: 災害に係る住家の被害認定, <http://www.bousai.go.jp/taisaku/nyou.html>, 2022年7月1日閲覧
- 19) 関本義秀, 西澤明, 山田晴利, 柴崎亮介, 熊谷潤, 樫山武浩, 相良毅, 嘉山陽一, 大伴真吾: 東日本大震災復興支援調査アーカイブ構築によるデータ流通促進, GIS-理論と応用, Vol. 23, No. 2, pp. 87-95, 2013. [Sekimoto, Y., Nishizawa, A., Yamada, H., Shibasaki, R., Kumagai, J., Kashiya, T., Sagara, T., Kayama, Y. and Otomo, S.: Data mobilization by digital archiving of the Great East Japan earthquake survey, *Theory and Application of GIS*, Vol. 21, No. 2, pp. 87-95, 2013.]
- 20) 国土交通省都市局: 復興支援調査アーカイブ, <http://fukkou.csis.u-tokyo.ac.jp/>, 2022年7月1日閲覧
- 21) 鳥澤一晃, 松岡昌志, 堀江啓, 井ノ口宗成, 山崎文雄: 2016年熊本地震における宇城市の罹災証明データに基づく建物被害関数の検討, 日本地震工学会論文集, Vol. 21, No. 1, pp. 1_172-1_186, 2021. [Torisawa, K., Matsuoka, M., Horie, K., Inoguchi, M. and Yamazaki, F.: Study on building fragility curves based on Uki City's disaster-victim certificate data due to the 2016 Kumamoto earthquake, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol. 21, No. 1, pp. 1_172-1_186, 2021.]
- 22) Sambandam, R.: Clusters analysis gets complicated, *Marketing Research*, Vol. 15, No.1, pp.16-21, 2003.
- 23) Kwak, D. Y., Stewart J. P., Bradenberg, S. J. and Mikami, A.: Characterization of seismic fragility curve using field performance data, *Earthquake Spectra*, Vol. 32, No. 1, 2015.
- 24) 青木康貴, 秋山充良, 石橋寛樹, 小島貴之, 越村俊一: RBF ネットワークと準モンテカルロ法を用いた

確率論的津波ハザード解析および南海トラフ地震による災害廃棄物量のリスク評価への適用, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 78, No. 1, pp. 1-16, 2022. [Aoki, K., Akiyama, M., Ishibashi, H., Kojima T. and Koshimura, S.: Probabilistic tsunami hazard analysis using radial basis function network and quasi-Monte Carlo simulation and its application to risk estimation of disaster waste caused by the anticipated Nankai Trough earthquake, *Journal of Japan Society of Civil*

Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering), Vol. 78, No. 1, pp. 1-16, 2022.]

25) Alhamid, A. K., Akiyama, M. Ishibashi, H., Aoki, K., Koshimura, S. and Frangopol, D. M.: Framework for probabilistic tsunami hazard assessment considering the effects of sea-level rise due to climate change, *Structural Safety*, Vol. 94, 102152, 2022.

DEVELOPMENT OF TSUNAMI FRAGILITY CURVES CONSIDERING REGIONAL CHARACTERISTICS AND ITS APPLICATION TO RISK ESTIMATION OF THE NUMBER OF DAMAGED STRUCTURES

Koki AOKI, Mitsuyoshi AKIYAMA, Yuzuki FUSE and Shunichi KOSHIMURA

Empirical fragility curves have been used for estimating the number of damaged structures regardless of the structures' location and dimension, structure density, and land use of the analyzed area (i.e., regional characteristics). This paper presents a novel methodology for identifying fragility curves based on regional characteristics. The fragility curves are estimated from the past disaster data in the corresponding municipalities classified according to their regional characteristics by using national survey data, principal component analysis, and cluster analysis. In a case study, the tsunami fragility curves were estimated considering the regional characteristic based on the tsunami disaster data of the 2011 Great East Japan earthquake. Moreover, a method to estimate the risk associated with the number of damaged structures subjected to tsunamis is presented by using the proposed tsunami fragility curves.