

同一断層帯を対象とした複数ケースの シナリオ地震動予測地図の クラスター分析による特徴分類

吉田 光太郎¹・能島 暢呂²・高橋 幸宏³

¹ 学生会員 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科修士課程 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

E-mail: y4523031@edu.gifu-u.ac.jp

² 正会員 岐阜大学 工学部 教授 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

E-mail: nojima@gifu-u.ac.jp

³ 学生会員 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科修士課程 (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

E-mail: x4523024@edu.gifu-u.ac.jp

シナリオ地震動予測地図において、複数ケースの断層パラメータを設定し、地震動分布の多様な可能性を効率的に網羅することは、重要な検討課題である。本研究では基礎的検討として、複数ケースの断層パラメータの設定の違いが、予測震度の空間分布形状の類似性・非類似性に与える影響について把握することを目的とする。具体的には、複数ケースの予測震度分布の非類似性の尺度として距離行列を求め、階層的クラスター分析を適用して特徴分類を行った。さらに主成分分析による主成分得点の二次元布置によって、分類結果の解釈の手がかりを得るとともに、予測震度分布に及ぼす断層パラメータの影響について考察を行った。

Key Words: *scenario earthquake, predicted seismic intensity distributions, seismogenic fault model, cluster analysis, principle component analysis*

1. はじめに

将来発生しうる地震動の予測は、地震ハザード・リスク評価において最も本質的な課題の一つである。このため地震調査研究推進本部は「全国地震動予測地図」を作成・公開している¹⁾。このうち「シナリオ地震動予測地図」は、震源断層を特定して予測される地震動分布を地図化したものであり、断層パラメータの不確定性を考慮して、複数ケースの予測地図が作成される場合が多い。

しかし将来発生しうる地震動はきわめて多様な可能性を持つ。近年、熊本地震、大阪府北部の地震、北海道胆振東部地震と、地震災害が相次いでいるが、実際に発生する地震は、想定されたシナリオ地震とかなり乖離していることがほとんどである。

以上のことから、複数ケースの断層パラメータによるシナリオ地震動予測地図によって、地震動分布の多様な可能性を効率的に網羅することは、重要な検討課題であるといえる。その実現には、断層パラメータのばらつき幅を適切に設定するとともに、多くのシミュレーション

によって、予測震度分布の多様性を表現することが求められ²⁾、現在の「シナリオ地震動予測地図」の高度化を目指す必要がある。

こうした背景のもとで、本研究では基礎的検討として、複数ケース (4~12 ケース) のシナリオ地震動予測地図を対象として、ケース間の断層パラメータの設定の違いが、予測震度の空間分布形状の類似性 (あるいは非類似性=特徴) に与える影響について把握することを目的とするものである。具体的には、複数ケースの予測震度分布の距離行列を求めて、これを非類似性の尺度とし、階層的クラスター分析を適用して特徴分類を行う。さらに主成分分析を適用して、第 1~3 主成分得点の二次元布置によって、分類結果の解釈の手がかりを得るとともに、予測震度分布に及ぼす断層パラメータの影響について考察を行うものである。

以下、2.では適用する手法を解説し、3.では 5 断層を対象とした分析結果を示す。最後に 4.では全体の考察のまとめを行い、今後の課題について述べる。

2. 階層的クラスター分析および主成分分析

クラスター分析とは多変量データの距離行列に基づいて、類似度の高い個体同士をまとめてグループ化し分類を行う多変量解析手法である。クラスター分析には大きく分けて階層的手法（類似した個体を順次併合して最終的に全データを1つのクラスターにまとめるボトムアップの手法）と非階層的手法（あらかじめ分割数を決めて分類するトップダウンの手法）である^{3,4)}。本研究ではデータの統合過程をデンドログラムで確認可能な階層的手法を用いる。デンドログラムとは、下層から上層に向けてボトムアップ的に、個体やクラスターが併合される過程を示したものである。得られたデンドログラムに基づいて、クラスター数を任意に指定すると、それに応じた分類結果が得られる。

本研究では、主要活断層を対象とした複数の予測震度分布に対してクラスター分析を適用する。具体的には震源断層1つに対して複数ケース設定された断層モデルを用いた予測震度分布図にクラスター分析を適用し、類似したケース同士をグループ化するものである。

対象領域のメッシュ数を M として、予測震度分布のメッシュ震度を x で表し、1 ケース分の全メッシュの震度を列ベクトル $\mathbf{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_M\}^T$ で表す。さらに、ケース数を N として、全 N ケースをまとめて M 行 N 列の行列 $\mathbf{X}$ で表す。メッシュ i 、ケース j の震度は、行列 $\mathbf{X}$ の i 行 j 列要素 x_{ij} と表される。

各ケースの予測震度分布の非類似度については、列ベクトル間の距離で表す。本研究ではユークリッド距離を採用する。ケース j とケース k の距離 d_{jk} は次式で表される。

$$d_{jk} = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - x_{ik})^2} \quad (1)$$

全 N ケース間の非類似度は、式(1)の d_{jk} を jk 要素とする N 行 N 列の距離行列で表される。またクラスター間の距離に関しては群平均法を用いる。

文献³⁾においては、地震動の経時特性のクラスター分析結果の可視化を目的として、計量的多次元尺度構成法（多次元データを低次元に縮約して、データ間の相互関係を可視化表現する方法）^{3,4)}が用いられた。本研究でもこれにならって、クラスター分析の結果の解釈の手がかりを得るため、主成分分析^{3,4)}を用いることとした（計量的多次元尺度構成法とほぼ等価であるが、軸の持つ意味を主成分得点として明確化可能）。第1～第3主成分を用いて、各ケースの相対的な関係を立体的に可視

化する。以上のクラスター分析および主成分分析の結果と、各ケースの断層パラメータの設定とを比較して多面的な考察を行う。

3. 対象とする5断層のクラスター分析

本研究では、文献⁹⁾で対象とした糸魚川-静岡構造線帯中北部（8 ケース）、深谷断層（12 ケース）、石狩低地東縁断層帯主部（12 ケース）、山崎断層（4 ケース）、の4つの断層に、上町断層（6 ケース）を加えた5断層を対象とする。以下に示す予測震度分布図および断層パラメータ図は、すべて J-SHIS⁷⁾より引用したものである。

(1) 糸魚川—静岡構造線帯中北部（8 ケース）

左横ずれ断層で8 ケース設定されている。各ケースの予測震度分布図を図-1に示す、図-2に各ケースのアスペリティの位置および大きさと破壊開始点を示す。アスペリティ位置は全ケースともに4箇所設定されている。またデンドログラムを図-3に示す。デンドログラムの高さによって、ケース間およびクラスター間の距離が表現されている。主成分分析の結果を図-4に示す。第1・第2主成分、第1・第3主成分、第2・第3主成分をそれぞれ両軸とした3つの二次元布置を行い、ケース間およびクラスター間の相対的な位置関係を視覚化している。

以下、クラスターの形成過程に関する表記方法として、ケース a と b が統合された場合は「 C_{a-b} 」とし、ケース a と b が統合されたクラスターとケース c と d が統合されたクラスターが統合された場合は「 $C_{a-b-c-d}$ 」とする。

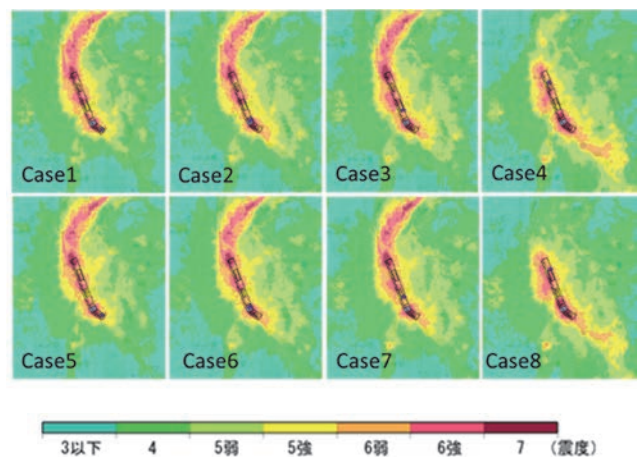


図-1 各ケースの予測震度分布（糸魚川）⁷⁾

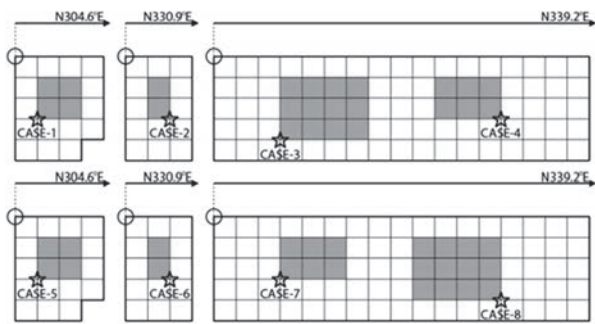


図-2 各ケースの断層パラメータ（糸魚川）⁷⁾

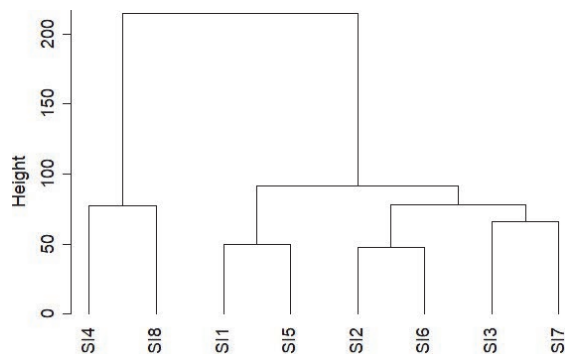


図-3 デンドログラム（糸魚川）

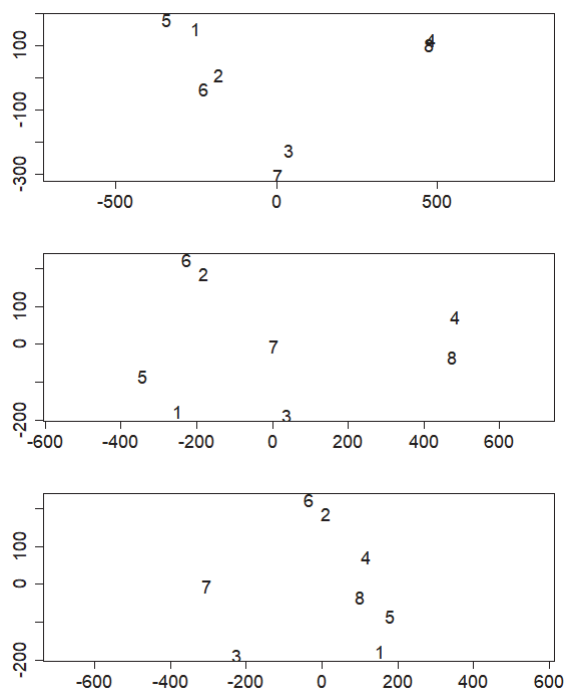


図-4 主成分得点（糸魚川）

（上：第1－第2 中：第1－第3 下：第2－第3）

図-3 より、クラスターの形成過程は C_2-C_6 , C_1-C_5 , C_3-C_7 , C_4-C_8 , $C_{2.6}-C_{3.7}$, $C_{1.5}-C_{2.6.3.7}$ となっている。最初に統合されたケース 2, 6 は、破壊開始点が同一で、かつ、破壊開始点のあるアスペリティの大きさも同一であるため類似度が極めて高くなったと考えられる。また図-4 より、ケース 2, 6 は軸が第1～第3のどの主成分得点となっても近くに配置されており、類似度が特に高いことがわかる。2 番目に統合されたケース 1, 5 についても同様である。3 番目に統合されたケース 3, 7 も破壊開始点が同一であるが、破壊開始点のあるアスペリティの大きさが異なるため、ケース 2, 6 およびケース 1, 5 に次ぐ類似度となっている。これは、4 番目に統合されたケース 4, 8 についても同様である。

5 番目以降はクラスター間の統合であり、破壊開始点が断層の中央寄りに設定されたケース 2, 6 とケース 3, 7 が統合されている。破壊開始点が両端部にある場合と比べて、中央寄りにある場合はフォワード・ディレクティブ効果効果が表れにくいため、中央寄りに破壊開始点が設定されているペア同士の類似度が高くなっていると推察される。

最後に統合されたケース 4, 8 は破壊開始点が最も北に設定されており、図-1 から明らかなように、フォワード・ディレクティブ効果の現れ方が他の 6 ケースと逆であるため類似度が低い。クラスター数を 2 とした場合は、ケース 4, 8 とそれ以外のケース 2 群となる。図-3 のデンドログラムの縦軸が表すクラスター間距離に注目すると、これら 2 群の距離がかけ離れていることが視覚的によくわかる。図-4 の第1主成分得点もケース 4, 8 と他ケースとの隔たりが大きい。

(2) 上町断層帯（6 ケース）

逆断層で 6 ケース設定されており、各ケースの予測震度分布図を図-5 に示す。各ケースのアスペリティの位置および大きさと破壊開始点を図-6 に示す。アスペリティ位置は全ケースともに 2 箇所設定されている。また、ケース 5, 6 は断層中央付近で屈曲しているモデルである。また、デンドログラムを図-7、主成分分析の結果を図-8 に示す。

図-7 より、クラスターの形成過程は C_5-C_6 , C_1-C_2 , C_3-C_4 , $C_{5.6}-C_{3.4}$ となっている。最初に統合されたケース 5, 6 は北部と南部に設定されたアスペリティの面積の差およびすべり量の差がともに小さい。このことが予測震度分布の類似度がもっとも高くなった要因と考えられる。さらに図-8 の第1－第2主成分得点によると、ケース 5, 6 はともに近い値をとっており、他の 4 ケースと比べて類似度が極めて高いことを示している。

2番に統合されたケース1, 2は、アスペリティ位置・大きさが共通したケースである。3番目に統合されたケース3, 4についても同様である。こうした共通の設定が、類似した予測震度分布を与えた理由と考えられる。

4番目以降はクラスター間の統合であり、ケース5, 6とケース3, 4が統合されている。これらのケースにおいては、断層北部のアスペリティが小さく設定されている。これに対してケース1, 2では大きく設定されており、表層地盤による増幅効果で高震度が大阪平野一帯に広がっている。こうしたパラメータ設定の違いにより、クラスター数を2とした場合は、ケース1, 2とそれ以外のケースの2群となるが、図-7の縦軸に注目すると、図-4に見られたほどには2群の距離は離れていないことがわかる。

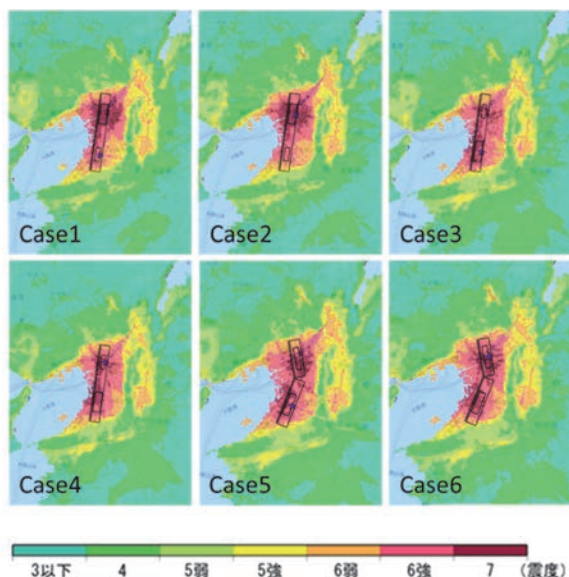


図-5 各ケースの予測震度分布（上町）⁷⁾

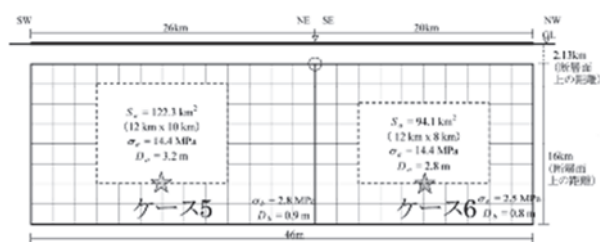
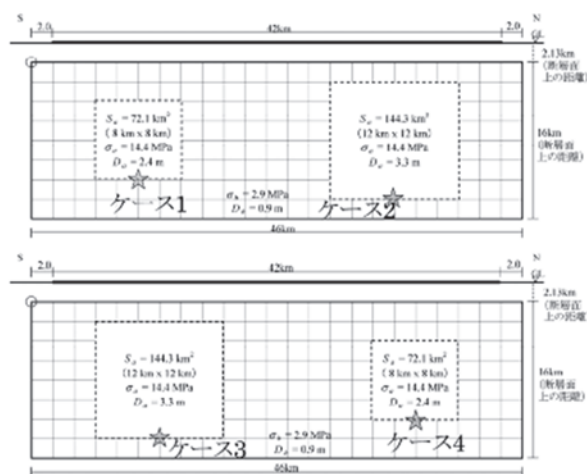


図-6 各ケースの断層パラメータ（上町）⁷⁾

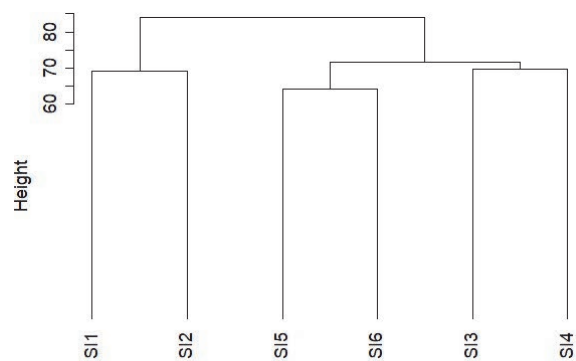


図-7 デンドログラム（上町）

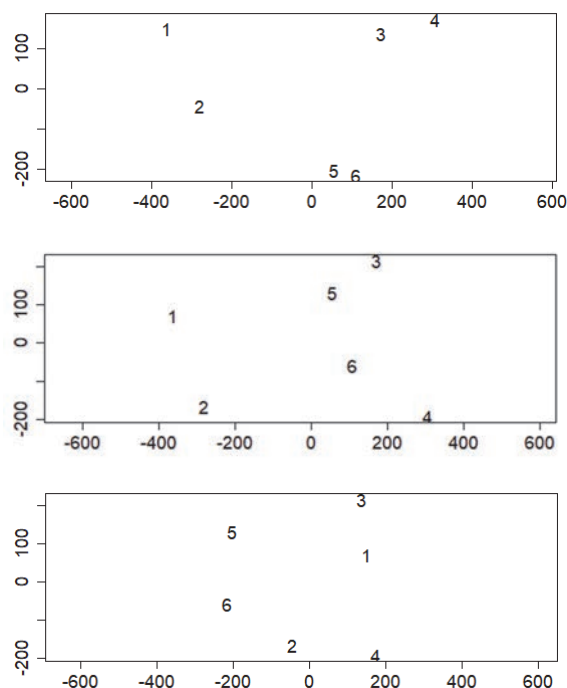


図-8 主成分得点（上町）

（上：第1－第2 中：第1－第3 下：第2－第3）

(3) 深谷断層（12 ケース）

逆断層で 12 ケース設定されており，各ケースの予測震度分布図を図-9 に示す．各ケースのアスペリティの位置と大きさおよび破壊開始点を図-10 に示す．アスペリティ位置はケース 1～8 では 4 箇所，ケース 9～12 では 2 箇所設定されている．アスペリティの設置数が異なるのは本研究で対象とした 5 断層中で唯一である．また，デンドログラムを図-11，主成分分析の結果を図-12 に示す．

図-11 より，クラスターの形成過程は C_6-C_7 ， C_1-C_2 ， C_3-C_4 ， $C_{6,7}-C_5$ ， $C_{1,2}-C_{3,4}$ ， $C_{5,6,7}-C_{1,2,3,4}$ ， C_9-C_{10} ， $C_{11}-C_{12}$ ， $C_{5,6,7,1,2,3,4}-C_{9,10}$ ， $C_{5,6,7,1,2,3,4,9,10}-C_{11,12}$ となっている．ケース 1～7 までの統合は，すべてアスペリティが 4 箇所のケースであり，その中でも，大小の配置パターンが共通のもので，かつ，震源が近隣に設定されているものからクラスター化が進んでいる．ただしケース 8 のみが特異的に最後に統合されている．ケース 8 では断層南東部に比較的大きなアスペリティが設定され，その下端に破壊開始点が設定されている．断層南東端周辺は表層地盤増幅率が高く，その領域で強震度が広がっていることは，他ケースでは見られない特徴であり，類似度が低くなったと考えられる．

アスペリティが 2 箇所のケース 9，10 およびケース 11，12 はそれぞれアスペリティの大小の配置パターンが共通のものとしてクラスターを形成している．ただしその 2 クラスターは 1 つに統合されずに，ケース 9，10 がケース 1～7 とともにクラスターを形成している．図-12 の第 1 主成分が 0 付近でケース 1～8 とケース 9～12 が分かれているものの，第 2 主成分ではケース 11，12 がかなり特異な傾向を示すことによると考えられる．

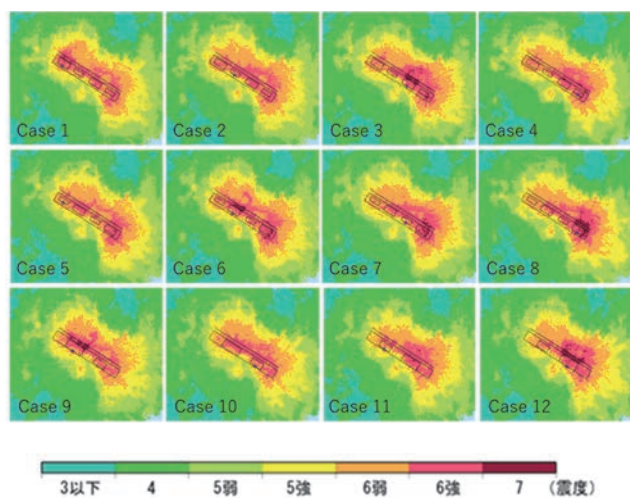


図-9 各ケースの予測震度分布（深谷）⁷⁾

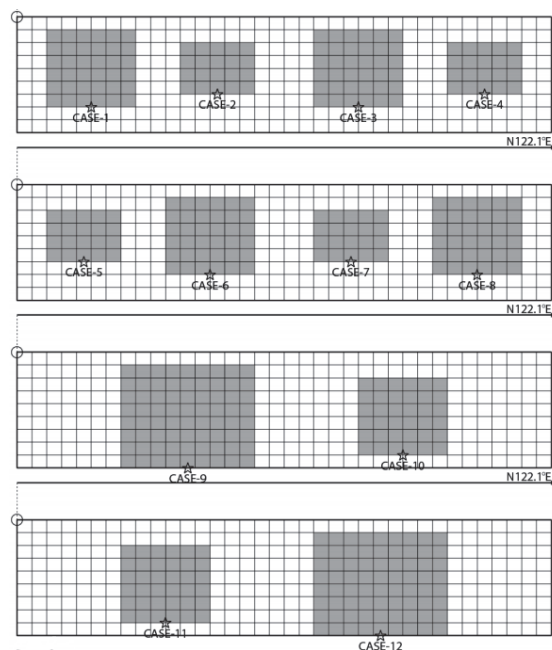


図-10 各ケースの断層パラメータ（深谷）⁷⁾

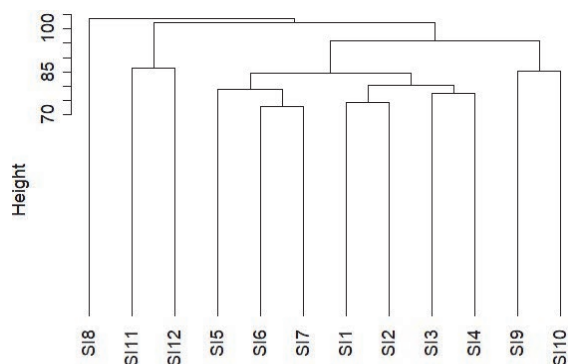


図-11 デンドログラム（深谷）

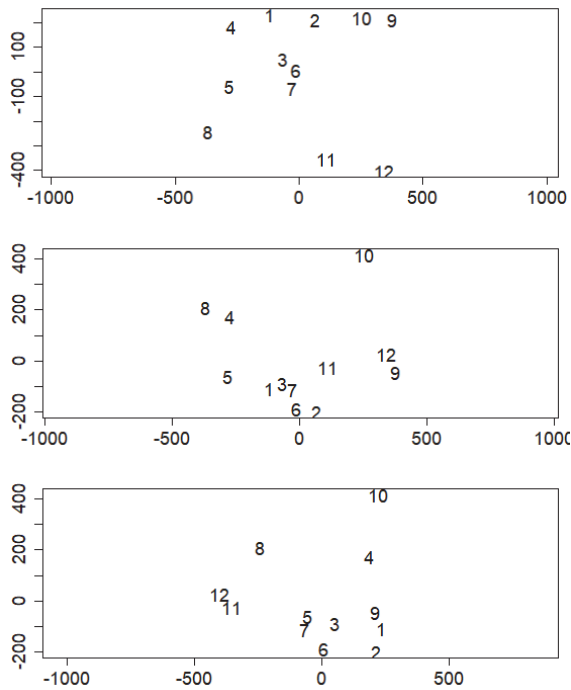


図-12 主成分得点 (深谷)

(上: 第1-第2 中: 第1-第3 下: 第2-第3)

(4) 石狩低地東縁断層帯主部 (12 ケース)

逆断層で 12 ケース設定されており、各ケースの予測震度分布図を図-13 に示す。各ケースのアスペリティの位置および大きさと破壊開始点を図-14 に示す。全ケースとも断層中南部付近で屈曲しているモデルであり、アスペリティ位置は 3 箇所設定されている。しかし地震モーメントはケース 1~6 とケース 7~12 で異なり、前者が後者よりも大きく設定されている。地震モーメントが異なるのは本研究で対象とした 5 断層中で唯一である。また、デンドログラムを図-15、主成分分析の結果を図-16 に示す。

クラスターの形成過程は、 C_1-C_4 , C_9-C_{12} , C_7-C_{10} , C_2-C_3 , $C_{2.3}-C_5$, $C_{9.12}-C_8$, $C_{2.3.5}-C_6$, $C_{2.3.5.6}-C_{1.4}$, $C_{8.9.12}-C_{7.10}$, $C_{7.8.9.10.12}-C_{11}$ となっている。地震モーメントが異なるケース 1~6 とケース 7~12 がそれぞれのクラスターを形成している。図-16 の第 1 主成分でも 0 付近を境界として、2 群が明確に分離されている。深谷断層ではアスペリティ数の違いが支配的であったのに対して、ここでは地震規模の違いが支配的であることがわかる。

C_1-C_4 , C_9-C_{12} , C_7-C_{10} までのクラスター形成に関しては、震源位置が共通で、第 2 主成分が近い値をとることがわかる。その後の統合過程については、明確な解釈は困難であるが、図-16 の第 1-第 2 主成分得点に注目

すると、それぞれ近い値をとるものが、順次クラスターを形成していることが見て取れる。一方、第 3 主成分に関してはこうした傾向は明確ではない。

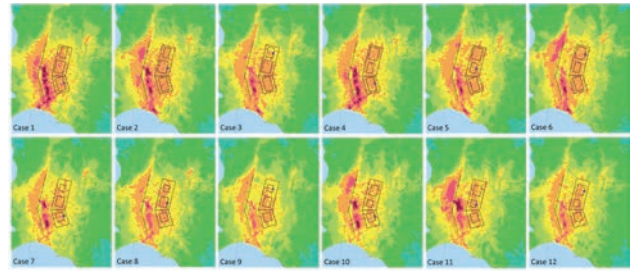


図-13 各ケースの予測震度分布 (石狩) 7

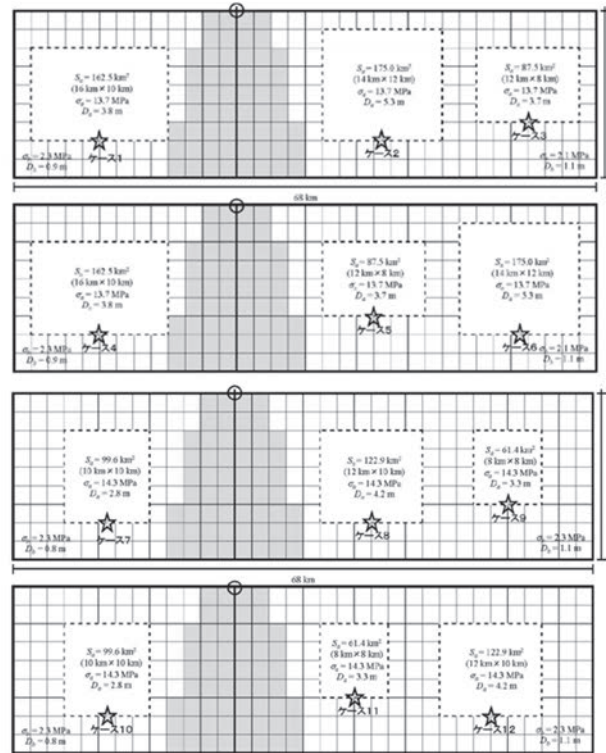


図-14 各ケースの断層パラメータ (石狩) 7

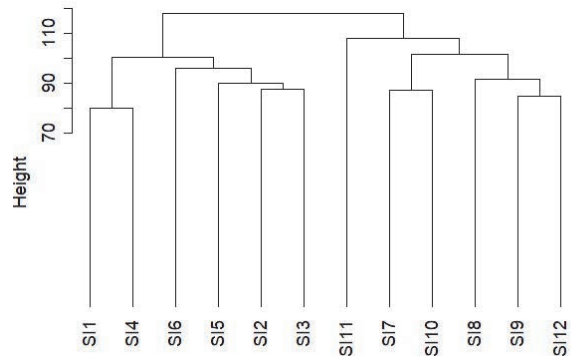


図-15 デンドログラム (石狩)

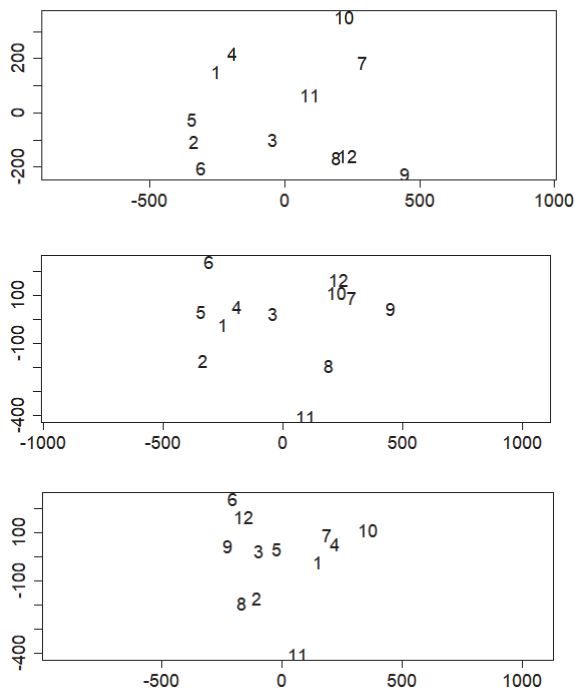


図-16 主成分得点（石狩）

（上：第1－第2 中：第1－第3 下：第2－第3）

(5) 山崎断層（4 ケース）

左横ずれ断層で4 ケース設定されており，各ケースの予測震度分布図を図-17 に示す．各ケースのアスペリティの位置および大きさと破壊開始点を図-18 に示す．アスペリティ位置はいずれも2箇所であり，大小の配置が異なるモデルである．デンドログラムを図-19，主成分分析の結果を図-20 に示す．

クラスター形成過程は， C_2-C_4 ， C_1-C_3 となっており，破壊開始点が同様であるケースが統合されている．これは同じ横ずれ断層である糸魚川と同じ傾向である．設定されているケースが4 ケースと少ないため，比較的単純に解釈が可能である．図-20 より，第1－第2主成分得点の得点の近い順にクラスター化されており，第3主成分は寄与していないことがわかる．

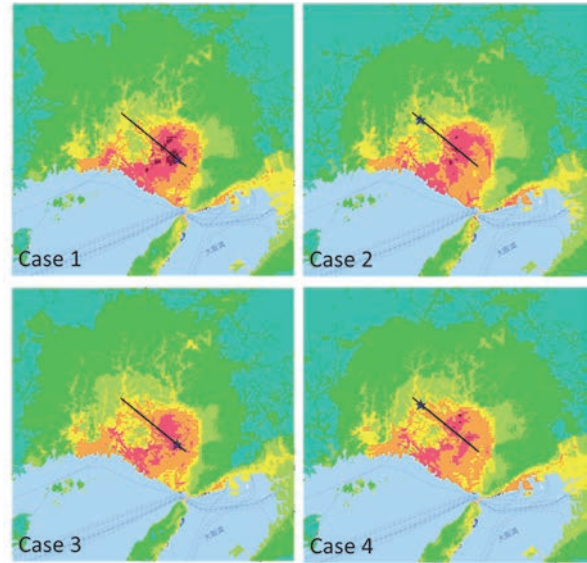


図-17 各ケースの予測震度分布（山崎）⁷⁾

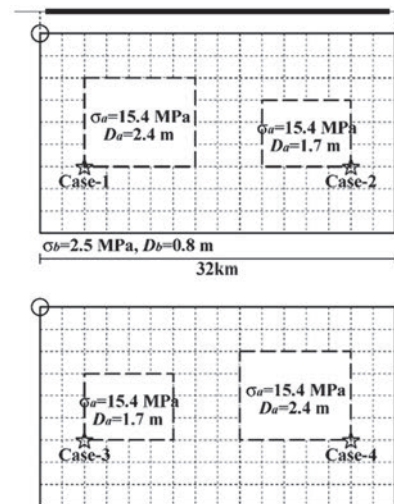


図-18 各ケースの断層パラメータ（山崎）⁷⁾

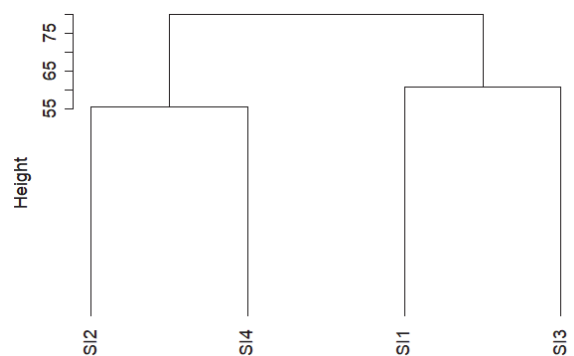


図-19 デンドログラム（山崎）

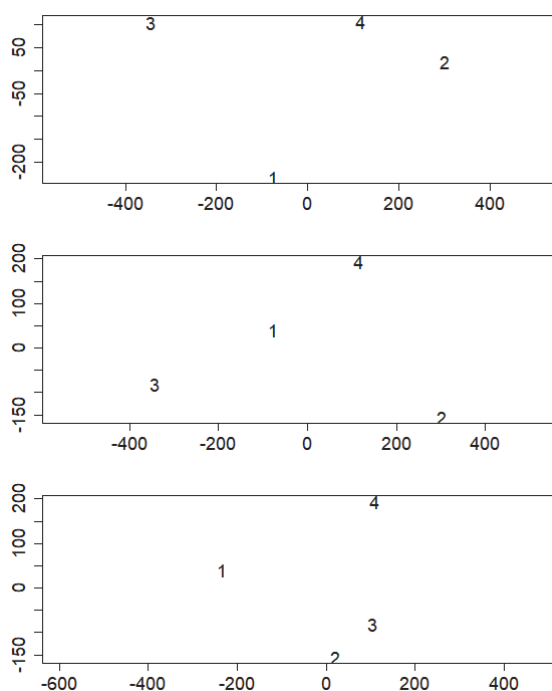


図-20 主成分得点 (山崎)
(上：第1-第2 中：第1-第3 下：第2-第3)

4. まとめ

本研究では、断層パラメータが予測震度分布に与える影響を考察するためにシナリオ地震動予測地図にクラスター分析を適用するとともに、主成分分析によって分類の解釈の手がかりとした。対象とした5つの断層全体を通して、予測震度分布の類似性・非類似性に大きく影響する要因として、下記の事項が挙げられる。

- (1-1) 横ずれ断層（糸魚川，山崎）に関しては、破壊開始点が共通，もしくは近隣に位置するケースがクラスターを形成する傾向にある。
- (1-2) 特に糸魚川では，フォワード・ディレクティビティの出現傾向によって大きく2群に分かれている。
- (2-1) 逆断層（上町，深谷）に関しては，アスペリティの設定方法（位置・大きさ）が共通のケースがクラスターを形成する傾向にある。
- (2-2) 特に深谷に関しては，アスペリティの個数が2種類（4個および2個）設定されており，その違いがクラスター形成に大きく影響している。明確に2群に分かれたわけではないものの，それぞれの設定数の中では，破壊開始点が近隣に設定されているものからクラスター化が進む傾向にある。
- (2-3) また上町では，大阪平野直下に大きなアスペリティ

があるケースで集中的な高震度が見られ，やや特異な傾向を示している。

- (3) 石狩に関しては，地震モーメントの設定の大小の違いにより大きく2群に分かれている。クラスター形成過程はやや複雑であるが，2群内のそれぞれにおいて，破壊開始点が共通のケースがクラスターを形成する傾向が認められる。
- (4) いずれの断層においても，第1主成分得点，第2主成分得点の順にクラスター形成に支配的であり，第3主成分得点の寄与は大きくないことが分かった。

今後，より多数のケースのシミュレーションが行われている地震動分布²⁾にクラスター分析を応用し，断層パラメータ設定と地震動分布との関係を明らかにし，シナリオ地震の設定方法について考察を進める方針である。

謝辞：本研究は JSPS 科研費 JP17H02068 の助成を受けたものである。また本研究では，(国研)防災科学技術研究所の「地震ハザードステーション(J-SHIS)⁷⁾」に掲載された予測震度分布および関連資料を使用させていただいた。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部地震調査委員会：全国地震動予測地図 2018 年版，2018.，https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/shm_report/shm_report_2018/（最終アクセス：2019 年 9 月 1 日）
- 2) 例えば，香川敬生：多数の断層破壊シナリオによる強震動のばらつき分布，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.71, No.4(地震工学論文集第 34 巻)，pp.191-197, 2015.
- 3) 中村永友：多次元データ解析法 R で学ぶデータサイエンス 2，共立出版，248p., 2009
- 4) 金明哲：R によるデータサイエンスーデータ解析の基礎から最新手法までー，森北出版，320p., 2007.
- 5) 能島暢呂，久世益充，高島拓也：地震動の経時特性の特徴抽出と階層的クラスター分析による分類，日本地震工学会論文集，第 17 巻，第 2 号，pp.2128-2141, 2017.
- 6) 能島暢呂，久世益充，高橋幸宏：シナリオ地震動予測地図のモード分解による予測震度分布の空間相関特性の分析，日本地震工学会論文集，第 19 巻，第 1 号，pp.1121-1135, 2019.
- 7) (国研)防災科学技術研究所：地震ハザードステーション(J-SHIS)：<http://www.j-shis.bosai.go.jp/>（最終アクセス：2019 年 9 月 1 日）

CLASSIFICATION OF CHARACTERISTICS OF MULTIPLE PREDICTED SEISMIC INTENSITY DISTRIBUTIONS FOR A SCENARIO EARTHQUAKE

Kotaro YOSHIDA, Nobuoto NOJIMA and Yukihiro TAKAHASHI

In prediction of seismic intensity distributions for a scenario earthquake, a variety of possible distributions should be efficiently covered by considering multiple cases of fault parameter settings. This study aims to understand the effect of parameter settings on the characteristics of seismic intensity distributions in terms of similarity and dissimilarity. For this purpose, hierarchical cluster analysis was applied to distance matrix representing dissimilarity among a set of seismic intensity distributions for a scenario earthquake. Furthermore, principle component analysis was applied to visually aid one to understand the result of cluster analysis. Finally, the effect of fault parameter settings on the predicted seismic intensity distribution was discussed.