

# 複数ケースの震源パラメータ設定がシナリオ地震動予測地図の 空間相関特性に及ぼす影響について

岐阜大学工学部社会基盤工学科 能島暢呂  
岐阜大学院自然科学技術研究科 高橋幸宏

Effect of Source Parameter Settings on Spatial Variation and Correlation of  
Predicted Seismic Intensity Maps for Scenario Earthquake

Nobuoto Nojima

Department of Civil Engineering, Gifu University

Yukihiro Takahashi

Graduate School of Natural Science and Technology, Gifu University

## 和文抄録

シナリオ地震動予測地図では、地震動予測の不確定性を考慮して、複数ケースの震源パラメータを設定することが多い。このため予測震度分布におけるばらつきの空間分布と空間相関は、震源パラメータ設定に依存する。筆者らは、ばらつきの空間分布と空間相関の評価手法として、特異値分解を用いたモード分解を提案し、逆断層 2 つと左横ずれ断層 2 つの計 4 断層に対して提案手法を用いた評価を行った。本研究では、新たに 3 つの逆断層(長野盆地西縁断層帯飯山-千曲区間 12 ケース, 上町断層帯 6 ケース, 石狩低地東縁断層帯南部 4 ケース)を対象とした。左特異ベクトルとして得られるモード形状の支配要因(アスペリティの設定, ディレクティビティ効果, 断層モデルの形状など)について、各ケースの震源パラメータの設定条件や右特異ベクトルと関連付けて比較・考察を行った。

## Abstract

Prediction of seismic intensity distribution maps for scenario earthquake is usually performed for several cases of source parameter settings in order to consider epistemic uncertainty associated with parameter settings. Spatial variation and correlation reflected in a set of seismic intensity distributions maps depends on source parameter settings. In the previous studies, the authors proposed a mode decomposition technique based on singular value decomposition to evaluate the spatial variation and correlation; the proposed technique was applied to four kinds of scenario earthquakes which can be potentially caused by two kinds of reverse faults and two kinds of left strike-slip faults. In this study, the proposed technique was applied to three kinds of scenario earthquakes which can be potentially caused by three kinds of reverse faults (Western Boundary Fault Zone of Nagano Basin, Iyama-Chikuma Segment: 12 cases, Uemachi Fault Zone: 6 cases and South segment of Eastern Boundary Fault Zone of the Ishikari Lowland: 4 cases) as an additional case study. Spatial variations are derived as left-singular vectors in modal forms. Dominant factors, such as spatial configuration of asperities, forward directivity effect and shape of fault model, were listed for each mode with reference to source parameter settings and right-singular vectors characterizing the seismic distribution of each case.

## 1. はじめに

地震動予測には震源特性や伝播経路特性, サイト特性など様々な不確定要因を伴うため, その予測結果にばらつきが生じる。地震調査研究推進本部<sup>1)</sup>および(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)<sup>2)</sup>が公表している震源断層を特定した地震動予測地図(以下, 「シナリオ地震動予測地図」)では, これらの不確定要因のうち, 震源パラメータ設定によって生じるばらつきを考慮して, 複数ケースの震源断層モ

デルが設定され、異なる破壊シナリオを想定していることが多い。

震源パラメータ設定に伴う地震動強度のばらつきに関する既往研究<sup>3)9)</sup>では、ばらつきの空間分布が評価されているが、ばらつきの地点間の空間相関に関する評価は行われていない。また、ばらつきの空間相関の簡便的な評価手法として提案された離間距離によるモデル<sup>10)</sup>は、ばらつきの空間的均質性(一様性と等方性)を前提とした非負関数である。このため、ばらつきが震源パラメータ設定に依存して空間的に変動する複数ケースのシナリオ地震動予測地図への適用は妥当とは言えない。複数ケースの震源パラメータ設定が予測震度分布の空間相関特性に及ぼす影響について詳しく考察することが重要である。

そこで筆者ら<sup>11),12)</sup>は、ばらつきの空間分布とその相関関係の評価手法として特異値分解を用いたモード分解を提案した。この提案手法では、複数ケース(ケース数  $N$ )のシナリオ地震動予測地図の地震度強度分布(メッシュ数  $M$ )を表す  $M \times N$  行列  $\mathbf{X}$  ( $i$  行  $j$  列要素はメッシュ  $i$  のケース  $j$  の地震動強度)に対して、全マップの平均値と標準偏差で正規化して  $\mathbf{X}_0$  としたうえで特異値分解を適用し、3つの行列の積にモード分解する。

$$\mathbf{X}_0 = \mathbf{UDV}^T = \begin{pmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{M1} & \cdots & u_{MN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & d_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{11} & \cdots & v_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{N1} & \cdots & v_{NN} \end{pmatrix}^T \quad (1)$$

分解により得られる行列  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{V}$  は次のような意味を持つ。

- 行列  $\mathbf{U}$ : 列方向の左特異ベクトル ( $i$  行  $j$  列要素はメッシュ  $i$  のモード  $j$  の地震動強度を表す正規直交基底) は、ばらつきの空間相関を規定するモード形状を表しており、そのマップ表示によりメッシュ間の空間的な相関関係を可視化できる。
- 行列  $\mathbf{D}$ : 対角行列 ( $j$  行  $j$  列要素はモード  $j$  の特異値すなわち固有値の平方根) であり、ケースに依存しない各モードの重みを表す。
- 行列  $\mathbf{V}$ : 列方向の右特異ベクトル ( $i$  行  $j$  列要素はケース  $i$  におけるモード  $j$  の重みを表す正規直交基底) は、ケースに依存する各モードの重みを表し、モード要因の解釈の手掛かりとなる。

以上のうち、行列  $\mathbf{UD}$  は、全ケースの地震動強度分布を支配する基本構造となっており、その基本構造に基づいてケース  $i$  の地震動分布を特徴付けているのは、行列  $\mathbf{V}$  を構成する行ベクトル  $\mathbf{v}_i = (v_{i1}, \dots, v_{iN})$  である。ここで、メッシュ間の分散共分散行列は  $\mathbf{X}_0 \mathbf{X}_0^T / N = \mathbf{UD}^2 \mathbf{U} / N$  で表される。この巨大な  $M \times M$  行列の評価を回避して行列  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{V}$  を評価できる点に特徴がある。手法の詳細については文献<sup>11)</sup>を参照されたい。

前報<sup>12)</sup>では、逆断層である石狩低地東縁断層主部と深谷断層帯、横ずれ断層である山崎断層帯主部南東部と糸魚川-静岡構造線断層帯中北部の4断層における予測震度分布を対象として、モード分解結果に見られる特徴(左特異ベクトルの空間分布とその支配要因)について比較・考察を行った。本研究では、さらに適用対象を広げるため、逆断層である長野盆地西縁断層帯飯山-千曲区間、上町断層帯、石狩低地東縁断層帯南部の3断層に対して提案手法と適用し、その特徴の比較・考察を行う。なお、本研究で用いる震度分布は(国研)防災科学技術研究所の地震ハザードステーション<sup>2)</sup>J-SHISが公表しているシナリオ地震動予測地図であり、分析結果はそれらの予測手法、震源断層の設定条件、ケース数、およびデータセットに依存した結果となっている。

## 2. 対象断層と予測震度分布

### 2.1 震源断層パラメータとモデル

対象とする3断層の震源断層モデルの震源断層パラメータとその概略図を表1および図1に示す。

(a) 長野盆地西縁断層帯飯山-千曲区間(以下、基本的に「長野盆地」と略記)

傾斜角  $35^\circ$  の逆断層である。震源断層モデルは要素断層1つから構成され、アスペリティ数は4つと2つの2種類が設定されている。破壊開始点との組み合わせにより、断層モデル設定数は  $N=12$  ケース設定されている。

## (b) 上町断層帯(以下, 基本的に「上町」と略記)

逆断層で, 要素断層数は 1 つ(傾斜角 70°)と, 断層の屈曲を考慮した 2 つ(傾斜角 70°と 110°)の 2 種類が設定されている. アスペリティの配置および破壊開始点の組み合わせにより  $N=6$  ケース設定されている.

## (c) 石狩低地東縁断層帯南部(以下, 基本的に「石狩南部」と略記)

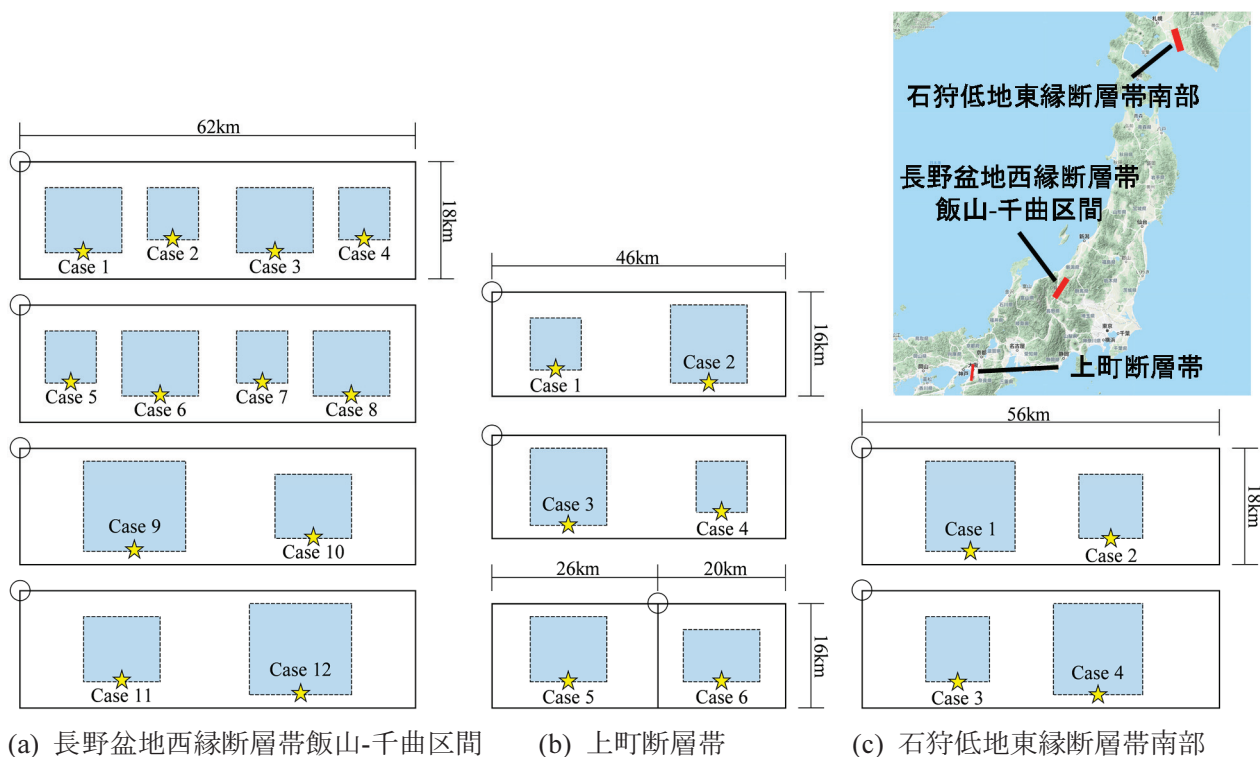
傾斜角 30°の逆断層である. 要素断層 1 つから構成される. アスペリティの配置および破壊開始点の組み合わせにより  $N=4$  ケース設定されており, 対象の 3 断層で最も少ない.

## 2.2 予測震度分布と対象領域の地盤構造

対象の 3 断層を震源断層としたシナリオ地震動予測地図の予測震度分布および  $N$  ケースの平均値と標準偏差の分布を図 2 に示す. ただし, 紙面の都合上, 予測震度分布は全  $N$  ケースのうちケース 1~4 のみを示す. 予測震度分布は 250m メッシュ単位で評価されており, 図中の黒の実線は断層の地表投影面, 破線は地表トレース線を表し, 予測震度分布および平均値分布の断層に示されている丸印は断層モデル原点を表す. 対象領域の地盤条件として, 表層地盤の地震動増幅率(250m メッシュ単位)と深部地盤構造(1km メッシュ単位)を図 3 に示す. なお, 上町の図中(図 2 (b)および図 3 (b))に示す断層はケース 1~4 の震源断層モデルであり, 以下の図においても同様とする.

表 1 対象断層の震源断層パラメータ(文献<sup>2)</sup>を基に作成)

|                      | 長野盆地西縁断層帯<br>飯山-千曲区間      | 上町断層帯   | 石狩低地東縁断層帯南部           |
|----------------------|---------------------------|---|-----------------------|
| 断層タイプ                | 逆断層                       | 逆断層   | 逆断層                   |
| 設定ケース数 $N$           | 12                        | 6   | 4                     |
| 対象領域のメッシュ数 $M$       | 253251                    | 167684  | 209760                |
| 構成する要素断層数            | 1                         | 1 (ケース1~4)<br>2 (ケース5・6)  | 1                     |
| 設定されている<br>アスペリティ数   | 4 (ケース1~8)<br>2 (ケース9~12) | 2   | 2                     |
| 走向                   | N33.7°E                   | N8.2°E (ケース1~4)<br>北側:N350.8°E (ケース5・6)<br>南側:N201.8°E (ケース5・6) | N342.5°E              |
| 傾斜角[°]               | 35                        | 70 (ケース1~4)<br>北側:70 (ケース5・6)<br>南側:110 (ケース5・6)                | 30                    |
| 断層長さ $L$ [km]        | 62                        | 46 (ケース1~4)<br>北側:20 (ケース5・6)<br>南側:26 (ケース5・6)                 | 56                    |
| 断層幅 $W$ [km]         | 18                        | 16  | 18                    |
| 気象庁マグニチュード $M_{JMA}$ | 7.8                       | 7.5   | 7.7                   |
| 地震モーメント $M_0$ [Nm]   | $6.73 \times 10^{19}$     | $3.47 \times 10^{19}$   | $5.66 \times 10^{19}$ |
| モーメントマグニチュード $M_w$   | 7.2                       | 7.0   | 7.1                   |



(a) 長野盆地西縁断層帯飯山-千曲区間 (b) 上町断層帯 (c) 石狩低地東縁断層帯南部

図1 対象断層の震源断層モデル

(文献<sup>2)</sup>を基に作成. 青色の矩形はアスペリティ, 星印は破壊開始点, 丸印は断層モデル原点を示す.)

(a) 長野盆地西縁断層帯飯山-千曲区間

平均震度 5.5 以上の領域は, 断層の地表投影面から地表トレース線の北西および地表トレース線の北方まで広がっている. 標準偏差は断層上端と地表トレース線との間, 地表トレース線南部の西方, 断層北方の沿岸部で大きい. 深部地盤構造 ( $V_s=1700\cdot 2700\text{m/s}$  下面深度) は断層の南西から北東方向, 断層の南東で深い分布となっており, 震度と標準偏差のいずれにも大きく影響していると考えられる.

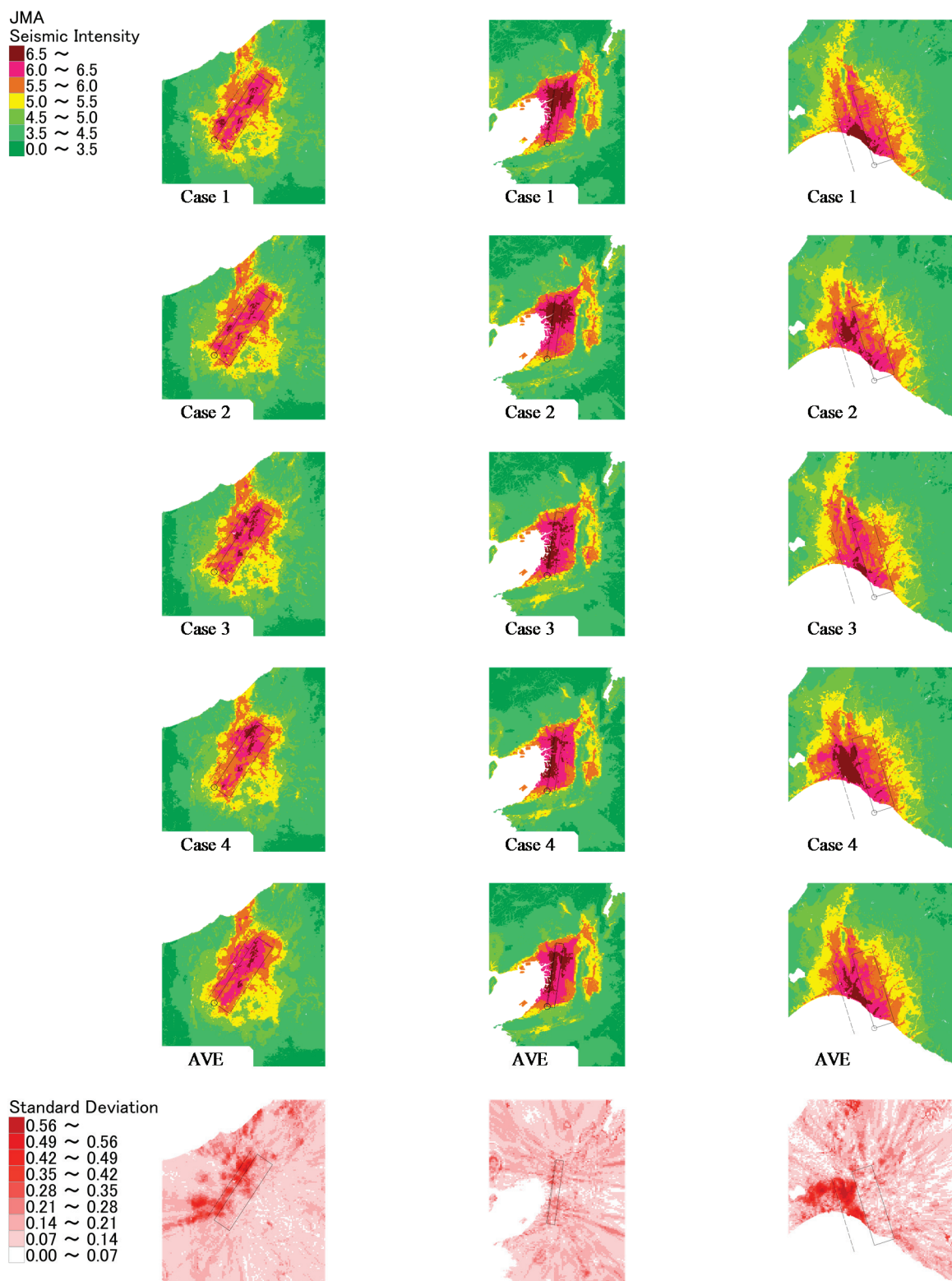
(b) 上町断層帯

平均震度 5.5 以上の領域は, 表層地盤の地震動増幅率が 1.0 以上である領域中に, 平均震度 6.0 以上の領域は断層西方と断層北部の東方に集中している. 標準偏差は断層北部また南部から放射状に分布している. 他の 2 断層と比較して, 標準偏差の最大値は小さい.

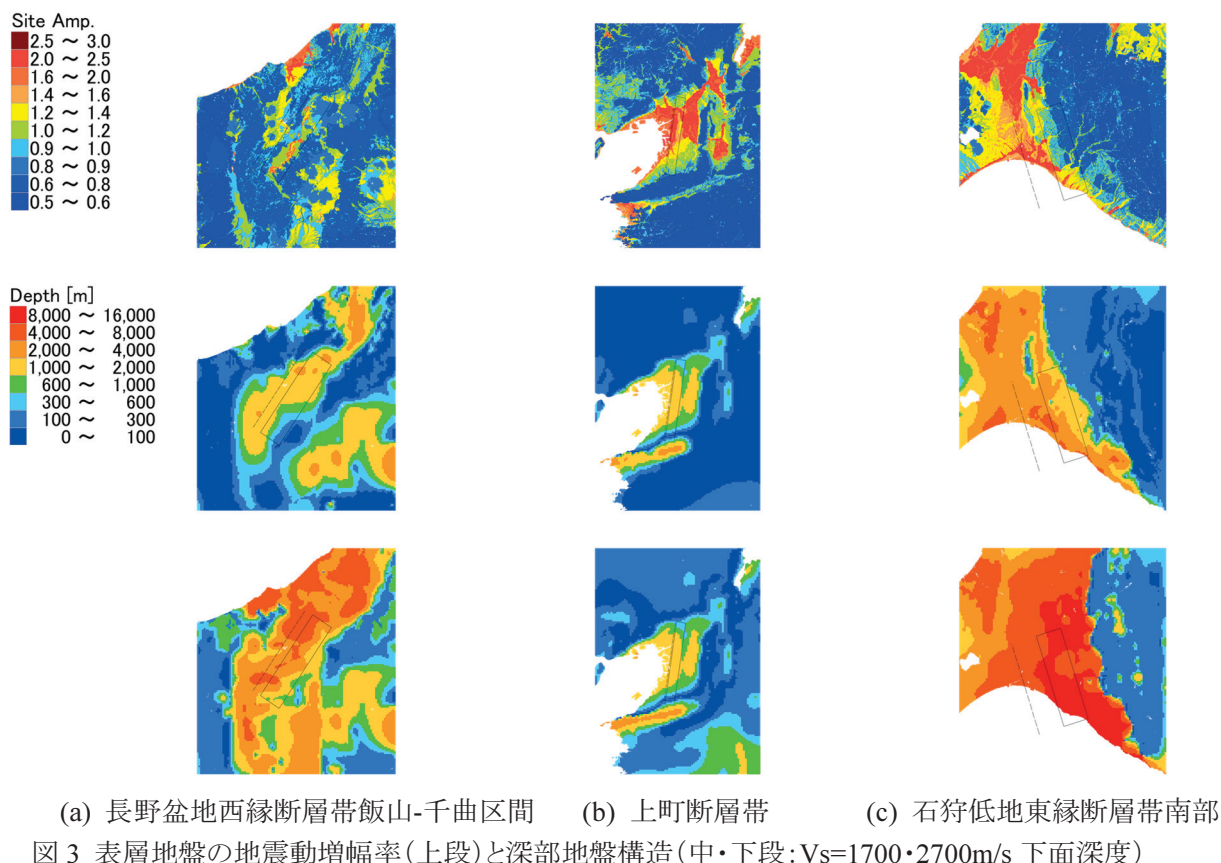
(c) 石狩低地東縁断層帯南部

平均震度 5.5 以上の領域は, 断層の地表投影面から地表トレース線の西方および地表トレース線の北方まで広がり, 平均震度 6.0 以上の領域は断層上端と地表トレース線との間に集中している. 標準偏差は断層上端と地表トレース線との間, 地表トレース線北部の西方, マップ北部で大きい.





(a) 長野盆地西縁断層帯飯山-千曲区間 (b) 上町断層帯 (c) 石狩低地東縁断層帯南部  
 図2 予測震度分布(ケース4まで表示)と全ケースの平均値と標準偏差の分布(文献<sup>2)</sup>を基に作成)

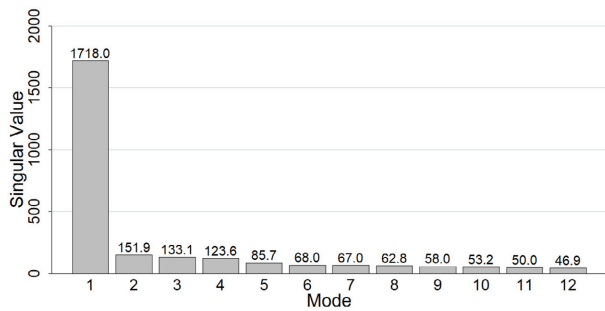


### 3. 予測震度分布の特異値分解による空間相関特性の評価と比較

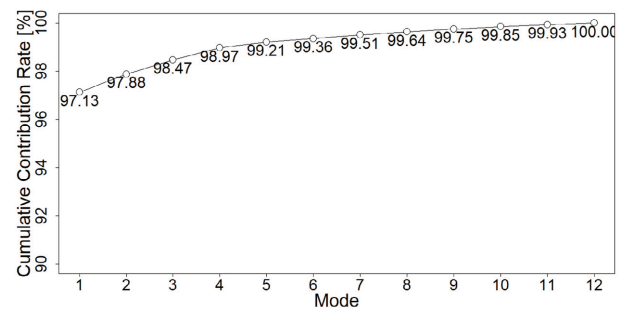
対象の3断層の予測震度分布に対して特異値分解を適用し、空間相関特性の評価を行う。特異値分解によって、各断層の予測震度分布は設定ケース数  $N$  と同じ次数(長野盆地:12次, 上町:6次, 石狩南部:4次)までのモードに分解される。

#### 3.1 特異値

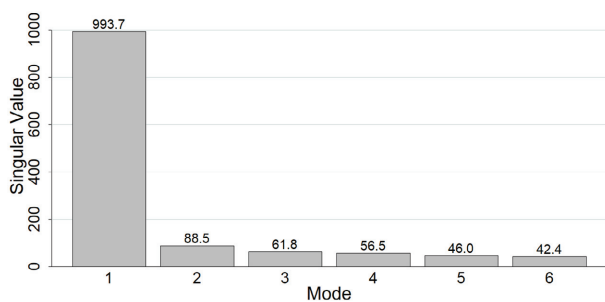
各断層の特異値(行列  $\mathbf{D}$  の対角要素, 固有値の正の平方根)を図4に示し, 固有値の累積寄与率を図5に示す。3断層すべてで1次モードの値が突出しており, 寄与率は96%以上である。特に上町断層帯のモード1の寄与率は98%を超過しており, 他の2断層よりも大きい。2次モード以降も一定の寄与を持っており, これらの傾向は前報<sup>12)</sup>と同様である。



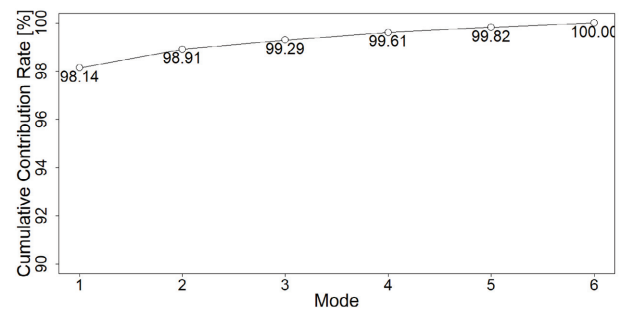
(a) 長野盆地西縁断層帯飯山-千曲区間



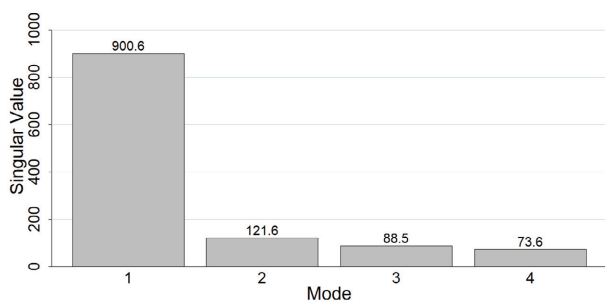
(a) 長野盆地西縁断層帯飯山-千曲区間



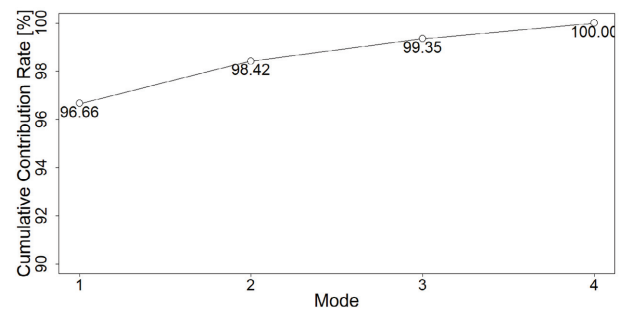
(b) 上町断層帯



(b) 上町断層帯



(c) 石狩低地東縁断層帯南部



(c) 石狩低地東縁断層帯南部

図 4 特異値(行列 **D** の対角要素)

図 5 固有値(特異値の 2 乗)の累積寄与率

### 3.2 左・右特異ベクトルと空間相関特性の要因分析

各断層の左特異ベクトル(行列 **U** の列要素)の空間分布を図 6 に示し, 右特異ベクトル(行列 **V** の列要素)の値を図 7 に示す. ただし, 紙面の都合上, 各断層のモード 1~4 のみを示す. 図 6 の左特異ベクトルの空間分布は, 予測震度分布におけるケースごとのばらつきのモード形状を表し, 赤色が正值, 青色が負値を示しており, 同符号のメッシュ間では正相関, 異符号のメッシュ間では負相関の関係にあることを表している. 図 7 の右特異ベクトルは, 各ケースにおける当該モードの重み係数を表す. 以下では, 各断層のモード 1~4 の特徴について, 左特異ベクトルと右特異ベクトル, 震源断層パラメータを関連付けて考察を行う.

なお, 図 6 の左特異ベクトルの空間分布については, モード 1 では左特異ベクトルの値が 250m メッシュ単位で変動していることから, 250m メッシュ単位で評価された表層地盤の地震動増幅特性(図 3 の上段)が反映されていると考えられる. 一方, モード 2 以降では基本的に 1km メッシュ単位で値が変動していることから, 1km メッシュ単位で評価された工学的基盤の地震動増幅特性(図 3 の中・下段)が反映されていると考えられる(文献<sup>11)</sup>の図 9 (b)参照).

(a) 長野盆地西縁断層帯飯山-千曲区間

- (1) モード 1: 前報<sup>12)</sup>において、モード 1 は全設定ケースの平均震度分布特性に影響を与える「距離減衰特性」と「表層地盤の地震動増幅特性」を反映していることが明らかにされている。ここでも同様であり、左特異ベクトルの空間分布は、対象領域全体における 12 ケースの平均震度からの偏差に対応して、断層近傍で正值、遠方で負値をとっている。右特異ベクトルは全ケースではほぼ等しい値をとるが、ケース間に見られる小さな差異は、ケースごとの距離減衰勾配の微妙な違いを表すものである。
- (2) モード 2: 左特異ベクトルは断層の中央付近を境に、マップの南西部で正值、マップの北西部で負値が分布している。右特異ベクトルはアスペリティの重心が断層の南西側に偏ったケース 1, 9 で正值、北東側に偏ったケース 11, 12 で負値をとっており、特にケース 11, 12 の絶対値が大きい。これよりモード 2 は、アスペリティの重心の偏りを反映していると考えられる。また左特異ベクトルは、マップの北東端や断層北方の沿岸部における深部地盤深度が深い領域で比較的大きな負値が分布していることから、深部地盤構造の影響も認められる。
- (3) モード 3: 左特異ベクトルは断層の南東側から南東方向にかけて正值、北東側から南東方向にかけて負値が分布している。また断層の地表トレス線沿いの北東側および断層上端の南端付近から西方に向かって比較的大きな正值が分布している。右特異ベクトルの絶対値は特にケース 10 が大きい。これよりモード 3 は、ケース 10 のディレクティブティ効果に関連すると考えられる。
- (4) モード 4: 左特異ベクトルは断層の北端付近から北東部で正值が分布し、それ以外の領域では負値が支配的に分布している。また断層上端の南端付近から北西方向にかけて、大きな負値が分布している。右特異ベクトルの絶対値は特にケース 9 が大きい。これよりモード 4 は、ケース 9 のディレクティブティ効果に関連すると考えられる。

以上のモード 2~4 ごとに右特異ベクトルの絶対値を比較すると、アスペリティが 2 つ(ケース 9~12)の方が 4 つ(ケース 1~8)よりも比較的大きな値をとっており、各モードへの寄与が大きいことがわかる。前者のようにアスペリティ数が少数のケースでは予測震度分布に顕著な傾向が現れやすい一方、後者のようにアスペリティを細分化して多数設定したケースでは、その傾向がやや平均化されることを示唆している。前報<sup>12)</sup>の深谷断層帯は、長野盆地と同様に 12 ケースの設定パターン(アスペリティが 4 つの 8 ケース+2 つの 4 ケース)の逆断層であることから、2・3 次モードでアスペリティ数の違いによる影響が現れており、4 次モードまでの右特異ベクトルや支配要因の傾向は長野盆地と類似した傾向を示している(後出の表 3 参照)。

(b) 上町断層帯

- (1) モード 1: 他断層と同様に「距離減衰特性」および「表層地盤の地震動増幅特性」を反映している。上町は表層地盤の地震動増幅率が大きい大阪平野に位置するため、予測震度分布が表層地盤の地震動増幅特性の影響を大きく受け、モード 1 の固有値の寄与率が 98%を超過したと考えられる。
- (2) モード 2: 左特異ベクトルは断層の中央付近を境に、マップの南部で正值、マップの北部で負値がかなり明瞭に分布している。右特異ベクトルは面積の大きなアスペリティが断層の南側に位置するケース 3~6 で正值、北側に位置するケース 1, 2 で負値をとっている。これよりモード 2 では、面積の大きなアスペリティの配置を反映していると考えられる。これは長野盆地のモード 2 と近い支配要因である。なお、ケース 2 については例外である。
- (3) モード 3: 左特異ベクトルはケース 1~4 の断層の地表投影面で正值、ケース 5・6 の断層の地表投影面で負値が分布している。右特異ベクトルは震源断層モデルを構成する要素断層数が 1 つのケース 1, 3, 4 で正值、要素断層数が 2 つのケース 5, 6 で負値をとっている。これより、モード 3 は断層モデルの形状の違いに関連すると考えられる。これは断層の形状が 2 種類設定された上町の特徴的なモードであり、断層の形状が 1 種類である他の 2 断層および前報<sup>12)</sup>ではこのモードは現れていない。
- (4) モード 4: 左特異ベクトルは断層の地表トレス線沿いの北側で正值、南側で負値を分布しており、それぞれの位置から東方で負値および正值が分布している。右特異ベクトルは破壊開始点が断層の北側に位置するケース 2, 4, 6 で正值、断層の南側に位置するケース 1, 3, 5 で負値をとっている。これよ



り、モード 4 はアスペリティ下端の破壊開始点からアスペリティ上端に向かう破壊伝播効果に伴うディレクティビティ効果を反映していると考えられる。

### (c) 石狩低地東縁断層帯南部

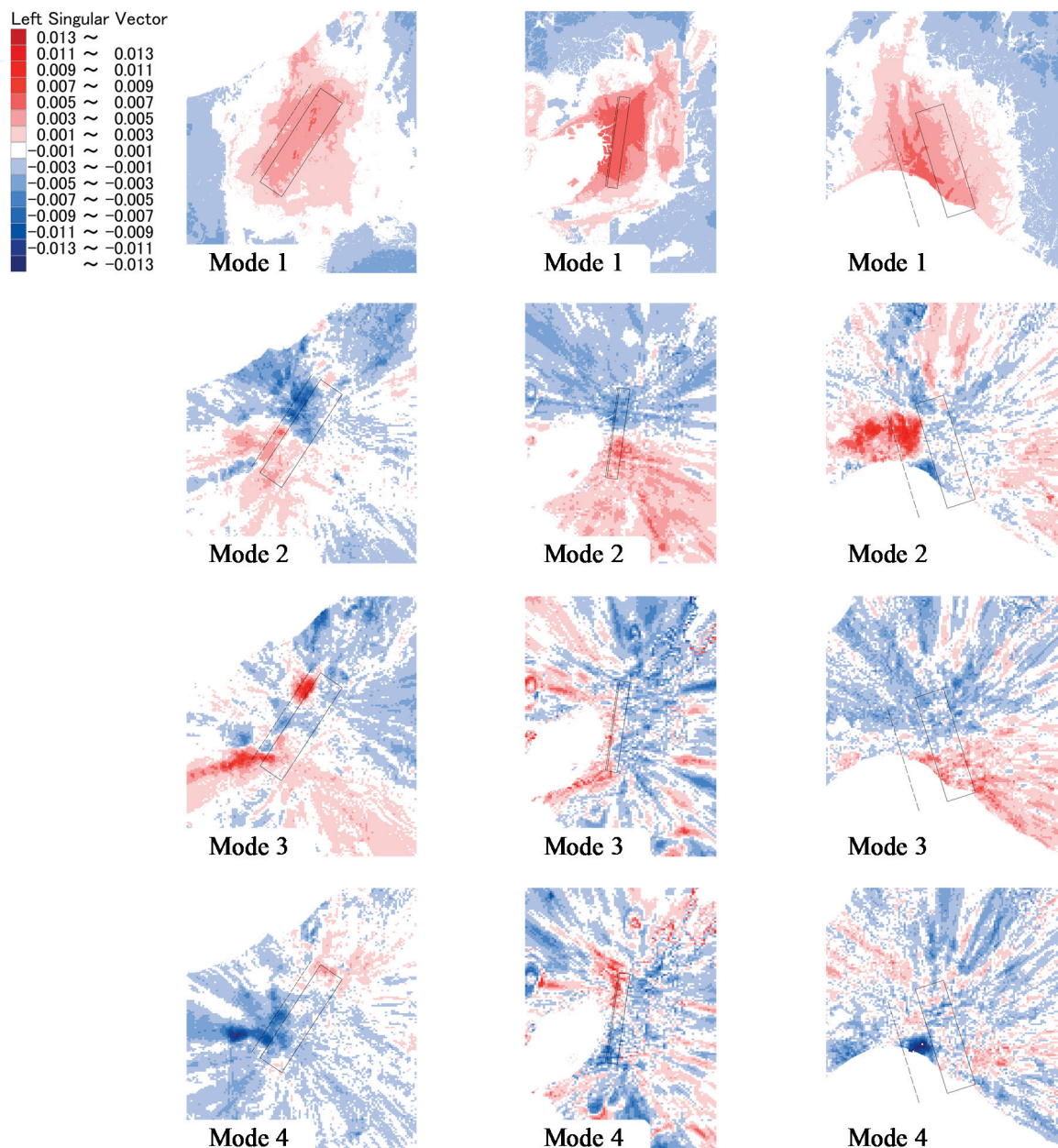
- (1) モード 1: 他断層と同様に「距離減衰特性」および「表層地盤の地震動増幅特性」を反映している。
- (2) モード 2: 左特異ベクトルは断層上端の北側また南側から西方にかけてそれぞれ正值、負値が分布している。右特異ベクトルは破壊開始点が断層の北側に位置するケース 2, 4 で正值、南側に位置するケース 1, 3 で負値をとっている。これよりモード 2 では、破壊開始点の位置に依存したディレクティビティ効果を反映していると考えられる。これは上町のモード 4 と近い支配要因である。
- (3) モード 3: 左特異ベクトルは断層の中央付近を境に、マップの南部で正值、マップの北部で負値をとっている。右特異ベクトルは面積の大きなアスペリティが断層の北側に位置するケース 1, 2 で正值、南側に位置するケース 3, 4 で負値をとっている。これよりモード 3 では、面積の大きなアスペリティの配置を反映していると考えられる。これは長野盆地および上町のモード 2 と近い支配要因である。
- (4) モード 4: 左特異ベクトルは断層上端の南側の西方で大きな負値が分布している。しかし、分布形状はモード 1~3 と比較すると複雑化しており、震源パラメータとの明確な関連性を読み取れない。モード 4 は石狩南部の最高次モードであることから、各ケースの広域的な震度分布の細部の調整項であると考えられる。

### 3.3 対象 3 断層および前報の 4 断層の比較・考察

前節の断層ごとのモード分解結果に見られた特徴(空間分布の傾向および支配要因)を表 2 にまとめる。表中には、本論文では省略した 5 次モード以降の特徴についても記載した。本論文で対象とした 3 断層はすべて逆断層であり、2 次モード以降の支配要因としてアスペリティの設定(水平方向の配置・サイズ)、破壊開始点の設定(ディレクティビティ効果)による影響が共通して大きいことが分かる。

前報<sup>12)</sup>で扱った 4 断層に関するまとめを表 3 にまとめる(前報<sup>12)</sup>より一部修正)。石狩低地東縁断層帯主部はマグニチュードが 2 種類設定された逆断層であり、マグニチュードの違いが 2 次モードで現れた。深谷断層帯はアスペリティ数が 2 種類設定された逆断層であり、アスペリティの設定に関連した特徴が 2・3 次モードで現れた。山崎断層帯主部南東部は傾斜角 90°の横ずれ断層であり、その特徴として断層線を軸としたほぼ線対称な分布が全モードで現れた。糸魚川-静岡構造線断層帯中北部は横ずれ断層であり、ディレクティビティ効果を反映した 2 次モードの寄与率が、他の断層と比較してかなり大きく現れた。

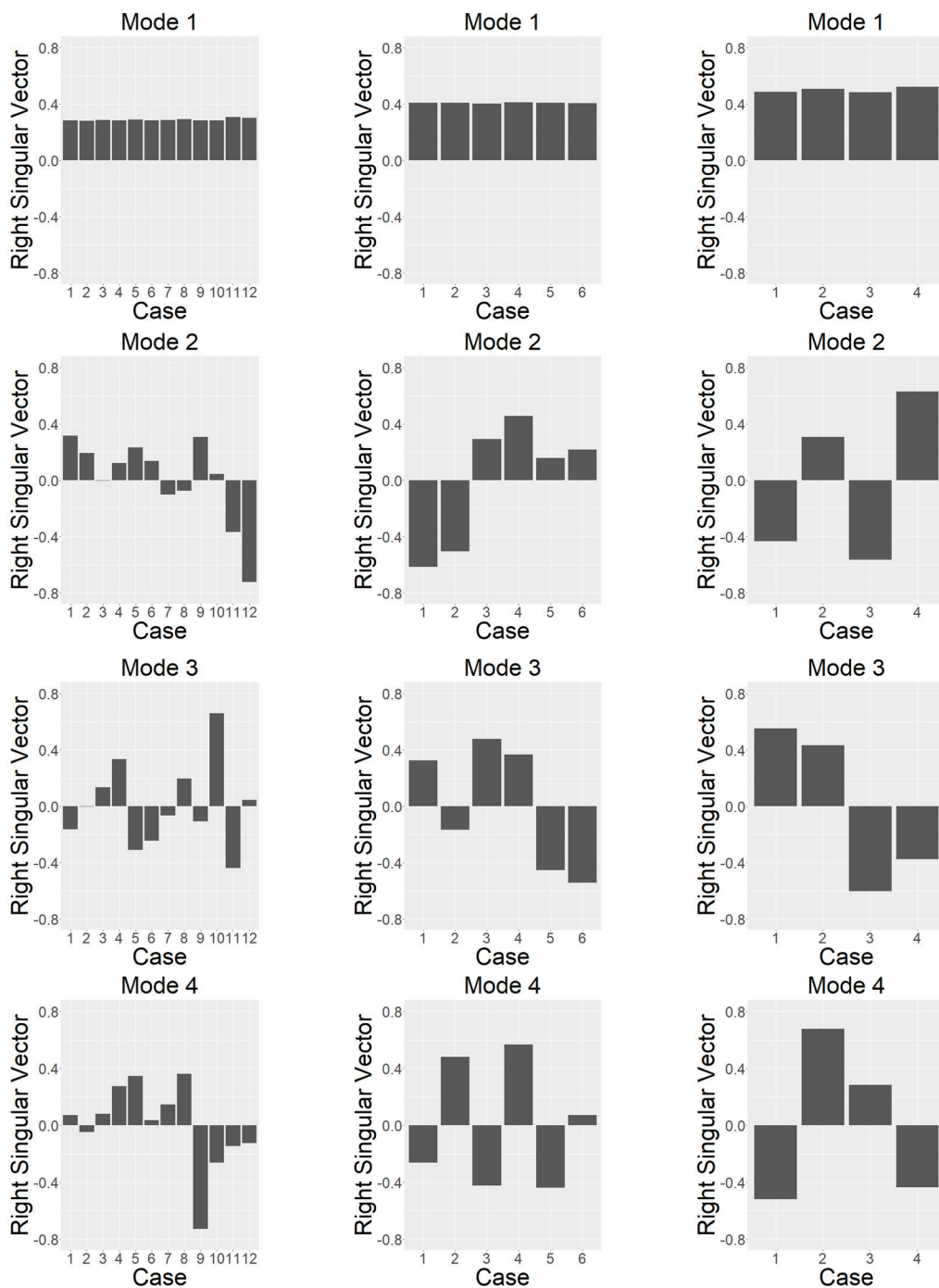
先述したように、長野盆地と前報<sup>12)</sup>の深谷断層帯は、設定パターン(アスペリティが 4 つの 8 ケース+2 つの 4 ケース)が同様の逆断層であり、1~4 次モードにおける右特異ベクトルや支配要因は類似した傾向を示す。石狩南部と前報<sup>12)</sup>の山崎断層帯主部南東部はそれぞれ逆断層と横ずれ断層であるが、設定パターン(アスペリティが 2 つの 4 ケース)は同様であり、右特異ベクトルや支配要因は類似した傾向を示す。なお、石狩南部と山崎断層帯における 1 次モードを除く左特異ベクトルの分布傾向の違いは断層タイプの違いによる影響が大きいと考えられる。これらのことから、異なるシナリオ地震動予測地図でも、震源パラメータ設定が近い場合、両者のモードの特徴については類似する傾向があると考えられる。



(a) 長野盆地西縁断層帯飯山-千曲区間 (b) 上町断層帯 (c) 石狩低地東縁断層帯南部

図6 左特異ベクトル(行列  $\mathbf{U}$  の列要素)の空間分布

(4次モードまで表示. 赤色: 正值, 青色: 負値, 同符号のメッシュ間で正相関, 異符号のメッシュ間で負相関)



(a) 長野盆地西縁断層帯飯山-千曲区間 (b) 上町断層帯 (c) 石狩低地東縁断層帯南部  
 図7 右特異ベクトル(行列  $\mathbf{V}$  の列要素, 4次モードまで表示)

表2 断層別のモード分解に見られる特徴(同色のセルは支配要因が類似していることを示す)

|          | 長野盆地西縁断層帯飯山-千曲区間<br>(傾斜角35°, 逆断層, N=12) | 上町断層帯<br>(傾斜角70°・110°, 逆断層, N=6) | 石狩低地東縁断層帯南部<br>(傾斜角30°, 逆断層, N=4) |
|----------|---|----------------------------------|-----------------------------------|
| 1次モード    | 距離減衰特性, 表層地盤の地震動増幅特性 (平均震度分布特性)         |                                  |                                   |
| 2次モード    | アスペリティの重心の偏り<br>(+深部地盤の地震動増幅率)          | 面積の大きなアスペリティの配置                  | ディレクティブティ効果                       |
| 3次モード    | ディレクティブティ効果<br>(ケース10)                  | 断層モデルの形状の違い                      | 面積の大きなアスペリティの配置                   |
| 4次モード    | ディレクティブティ効果<br>(ケース9)                   | ディレクティブティ効果                      | 各ケースの広域的震度分布の細部表現                 |
| 5・6次モード  | 各ケースの広域的震度分布の細部表現                       |                                  |                                   |
| 7-12次モード |   |                                  |                                   |

表3 断層別のモード分解に見られる特徴  
(文献<sup>12)</sup>より再掲して修正. 同色のセルは支配要因が類似していることを示す.)

|          | 石狩低地東縁断層帯主部<br>(傾斜角30°, 逆断層, N=12)            | 深谷断層帯<br>(傾斜角60°, 逆断層, N=12)                  | 山崎断層帯主部南東部<br>(傾斜角90°, 左横ずれ断層, N=4) | 糸魚川-静岡構造線断層帯中北部<br>(傾斜角70°, 左横ずれ断層, N=8) |
|----------|---|---|-------------------------------------|--|
| 1次モード    | 距離減衰特性, 表層地盤の地震動増幅特性 (平均震度分布特性)               |   |                                     |  |
| 2次モード    | 地震モーメントの違い                                    | アスペリティの重心の偏り                                  | ディレクティブティ効果                         | ディレクティブティ効果                              |
| 3次モード    | ディレクティブティ効果                                   | アスペリティの配置の広がり具合                               | 面積の大きなアスペリティの配置                     | (ディレクティブティ効果+)<br>複数アスペリティからの同時到達効果      |
| 4次モード    | (ディレクティブティ効果+)<br>複数アスペリティからの同時到達効果           | ディレクティブティ効果                                   | 各ケースの広域的震度分布の細部表現                   | (ディレクティブティ効果+)<br>複数アスペリティからの同時到達効果      |
| 5次モード    | (左特異ベクトルの傾向より)<br>断層南部およびマップ中南部の<br>震度分布形状を表現 | (左特異ベクトルの傾向より)<br>断層周辺およびその他周辺部の<br>震度分布形状を表現 | 各ケースの広域的震度分布の細部表現                   | (右特異ベクトルの傾向より)<br>アスペリティの重心の偏り           |
| 6次モード    |   |   |                                     | 各ケースの広域的震度分布の細部表現                        |
| 7・8次モード  | (左特異ベクトルの傾向より)<br>断層北部およびマップ中北部の<br>震度分布形状を表現 |   |                                     |  |
| 9-12次モード | 各ケースの広域的震度分布の細部表現                             |   |                                     |  |

■原著からの修正点

\* 深谷断層帯: 2・3次モードに「アスペリティ数の違い」を追加

\*\* 糸魚川-静岡構造線断層帯中北部: 「深部地盤の地震動増幅特性」が現れるモードを変更(1-8次モード → 1-3次モード)

#### 4. おわりに

本研究で得られた成果を以下に要約する.

- 1) J-SHIS<sup>2)</sup>で公表されている複数ケースのシナリオ地震動予測地図に対して, 特異値分解を用いたモード分解を適用し, 予測震度分布間におけるばらつきの空間分布とその空間相関の要因分析を行った. 前報<sup>12)</sup>(逆断層2つ, 横ずれ断層2つの計4断層)の追加のケーススタディとして, 本研究では長野盆地西縁断層帯飯山-千曲区間, 上町断層帯, 石狩低地東縁断層帯南部の3つの逆断層を対象とし, 前報<sup>12)</sup>の結果も踏まえて比較・考察を行った.
- 2) 左特異ベクトルの分布形状の支配要因について右特異ベクトルと震源パラメータを関連付け, モードごとに考察した. 主要な支配要因として, 「平均震度分布特性(距離減衰特性と表層地盤の地震動増幅特性)」、「アスペリティの設定条件(水平方向の配置・サイズ・数)」、「破壊開始点に依存したディレクティブティ効果」が現れた. また高次モードになるにつれ, 左特異ベクトルの空間分布は複雑に変動し, 解釈が困難であった. これらは前報<sup>12)</sup>でも同様であった.



- 3) 上町のみ 2 種類の要素断層数が設定されていることから、その影響が「断層モデル形状の違い」として 3 次モードに現れた。断層モデルが複数設定された断層の特徴的な支配要因である。
- 4) 長野盆地(および前報<sup>12)</sup>の深谷断層帯)ではアスペリティ数が 2 種類(4 つおよび 2 つ)設定されている。各モードへの寄与を比較したところ、アスペリティ数を少数設定したケースではモードへの寄与が相対的に大きく、予測震度分布に顕著な傾向が現れやすい一方、アスペリティを細分化して多数設定したケースではモードへの寄与および震度分布の特徴が平均化されることが分かった。
- 5) 石狩南部(逆断層)および前報<sup>12)</sup>の山崎断層帯主部南東部(横ずれ断層)では断層タイプは異なるが、アスペリティ数が 2 つの 4 ケースが設定されている。アスペリティ数の設定条件が同様である長野盆地と深谷断層帯、また石狩南部と山崎断層帯では、モードの支配要因にそれぞれ類似性が見られた。

以上、本研究では、同一断層帯に対して複数ケースの震源パラメータが設定された震度分布にモード分解することにより、空間相関特性の要因分析を行い、震源パラメータ設定の影響について考察を行った。震源パラメータ設定の違いによる応答スペクトルのばらつきの空間分布に関する既往研究<sup>7)</sup>では、長周期になるほど破壊伝播効果の影響が顕著に現れることが指摘されている。このため、応答スペクトル分布を対象としたモード分解により、周期別に空間相関特性の要因分析を行う方針である。既往研究<sup>7)</sup>より、応答スペクトル分布における空間相関特性の主要な支配要因は周期に依存して変化することが予想される。

シナリオ地震動予測地図の震源パラメータ設定は「強震動予測のレシピ<sup>13)</sup>」に基づくため、予測震度の空間分布特性の多様性は「レシピ」の設定に依存する。さらに、多数ケースの予測震度分布のうち公表ケースは限定的にならざるを得ない。一方、防災利用の面においては、公表ケースの予測震度分布には空間分布特性の多様性が求められる。そこできわめて多数の破壊シナリオが想定されている地震動分布<sup>例えば 7)</sup>に対して、モード分解による空間相関特性の要因分析を行い、地震動分布の多様性を保持しつつ、震源パラメータ設定を効率的に絞り込む方策について検討する方針である。さらに、モード分解結果を踏まえて「レシピ」の想定条件に関する検討する方針である。

**謝辞:** 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<sup>2)</sup> J-SHIS に掲載された予測震度分布や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/](https://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/shm_report/shm_report_2018/) (最終アクセス: 2020 年 1 月 12 日)
- 2) (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:2020 年 1 月 12 日)
- 3) 奥村俊彦, 佐藤俊明, 石井透, Somerville, P., Graves, R., Collins, N.:断層パラメータの変動に伴う地震動のばらつきに関する基礎的検討, 土木学会地震工学論文集, Vol.28, 論文番号 P167, 2005.
- 4) 山田雅行, 先名重樹, 藤原広行:強震動予測レシピに基づく予測結果のバラツキ評価の検討, ~震源パラメータのバラツキについて~, 日本地震工学会論文集, 第 7 巻, 第 1 号, pp.43-60, 2007.
- 5) 山田雅行, 先名重樹, 藤原広行:強震動予測レシピに基づく予測結果のバラツキ評価の検討, ~逆断層と横ずれ断層の比較~, 土木学会地震工学論文集, pp.104-113, 2007.
- 6) 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), 第 71 巻, 第 4 号, pp.I\_191-I\_197, 2015.
- 7) 香川敬生:多数の断層破壊シナリオによる強震動周期特性の空間分布, 日本地震工学論文集, 第 15 巻, 第 7 号, pp.90-99, 2015.
- 8) 岩城麻子, 前田宜浩, 森川信之, 藤原広行:震源パラメータのばらつきを取り入れた広帯域地震動予測と観測記録の再現性, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, 講演番号 SSS25-P08, 2016.

- 9) 岩城麻子, 前田宜浩, 森川信之, 藤原広行: 広帯域地震動シミュレーションによる地震動のばらつきの空間分布, 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, 講演番号 SSS15-12, 2017.
- 10) 高田毅士, 下村哲人: 台湾集集地震記録に基づく地震動のマクロ空間相関特性, 日本建築学会構造系論文集, Vol.68, No.565, pp.41-48, 2003.
- 11) 能島暢呂, 久世益充, LE QUANG DUC: シナリオ地震動予測地図の特異値分解によるモード分解と地震動分布のシミュレーション, 日本地震工学会論文集, 第 18 巻, 第 2 号, pp.2\_95-2\_114, 2018.
- 12) 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(報告), 第 19 巻, 第 1 号, pp.1\_121-1\_135, 2019.
- 13) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 震源断層を特性した地震の強震動予測手法(「レシピ」), 平成 29 年(2017 年)4 月, 2017, 51p., [https://www.jishin.go.jp/main/chousa/17\\_yosokuchizu/recipe.pdf](https://www.jishin.go.jp/main/chousa/17_yosokuchizu/recipe.pdf) (最終アクセス: 2020 年 1 月 17 日)