

3) 1894年庄内地震の震源断層モデルに関する検討

a) はじめに

1894年庄内地震は明治27年10月22日17時35分頃に山形県庄内平野北部を震源として発生したM7.0の地震である。この地震によって特に酒田を中心とした庄内平野で大被害を引き起こした。酒田では大火災が発生し、当時の市街地の総戸数の8割が焼失した。庄内平野東縁断層帯が活動したと考えられてきたが^{例えば 25), 26)}、トレンチ調査では新しい地層に明瞭な変位は残されておらず、地表地震断層は現れなかったとされている。

本プロジェクトでは平成31年度(令和元年度)に、沿岸海域および海陸統合地殻構造調査として、震源・津波波源断層の形状把握と島弧・背弧海盆の基本的な地殻構造を把握するために、東北日本弧中部の背弧を構成する新庄盆地東縁から庄内平野に至る約60kmの陸上区間とその西方海域の日本海盆にいたる約350kmの海域区間において、海陸統合地殻構造探査が行われた。この調査によって庄内平野西部に東下がり²⁷⁾の形状を持つ伏在断層が発見された。この断層は庄内平野の直下に位置することから、活動した場合には庄内平野全体が強震動に襲われる可能性が高いと考えられる。

一方、歴史史料に基づいた1894年庄内地震(M7.0)の被害分布がとりまとめられている²⁷⁾。本項では、「地震被害分布の再現」という、本地震に対する従来の研究とは異なるアプローチにより、この地震の震源断層の推定を試みた。具体的には、前述の探査結果に基づいて、庄内平野東縁断層帯及び庄内平野西部に位置する震源断層モデルを設定し、それらを対象として、地震本部で実施されている、「震源断層を特定した地震の強震動予測手法」の方法に準拠して震源断層モデルパラメータを決めて、地震動シミュレーションを実施し、地表面震度を算出し、被害に基づく震度分布と比較して、震源断層モデルを検討した。その際、地下構造モデルには、深部地盤構造モデルとして、国立研究開発法人防災科学技術研究所が提供している地震ハザードステーション(J-SHIS)の深部地盤モデルV2(J-SHIS V2モデル)に微動アレイの位相速度情報、地震記録のR/Vスペクトル比を用いて更新したものに、本プロジェクトの反射法探査断面情報を照査したものを利用する。詳細な揺れの分布に密接に関わると考えられる、浅部地盤構造モデルは、地盤ボーリング情報に基づいて構築したものを利用することとした。

b) 浅部・深部地盤構造モデル

庄内平野の深部地盤構造モデルについては、国立研究開発法人防災科学技術研究所が提供している地震ハザードステーション(J-SHIS)の深部地盤モデルの最新版(J-SHIS V2モデル)に、微動アレイ観測によって得られた位相速度情報、及び地震記録のR/Vスペクトル比を利用してモデルの調整を実施した。更新した深部地盤構造モデルについて、庄内平野で実施された人工地震探査による断面の比較を図72で行った。下段の図面が、反射法地震探査断面でのP波速度トモグラフィによって得られた速度プロファイル²⁸⁾を反射断面図に重ね書きしたもので、その速度値の色を上段の深部速度構造断面と同じにしたものを中段に示している。速度トモグラフィ結果は速度が連続的に変化している一方、上段の深部速度構造モデルは均一速度の多数の層で構築されている違いがあるが、上段と中段の色の分布、すなわち速度構造は似ており、深部地盤構造モデルとモデル構築には用いていない測線の情報は対応していると考えられることができる。

浅部地盤構造モデルは、微地形区分情報とボーリングデータを用いた。ボーリングデータによって250mメッシュの地質柱状図を作成し、S波速度をN値との経験式(表5)²⁸⁾

で与え、密度値²⁹⁾とP波速度値はS波速度との関係 ($V_P = 5.099 \times V_S$)²⁹⁾を用い、工学的基盤面 (V_S 350 m/s 以上) までの速度を与えた。ボーリングがないメッシュは、同じ微地形区分で最も近いボーリングによる地下構造モデルをあてはめている。図 73 に今回用いた、ボーリングデータのあるメッシュ位置を示す。酒田市を中心に多くのボーリングが位置している一方、特に庄内平野南部では空間密度が高くないことがわかる。図 74 に浅部地盤構造モデルの工学的基盤面深度を示す。平野内の多くの工学的基盤面深度は約 30 m であるが、一部の地域では深度 60 m を超えるメッシュがある。スポット的に見えるのはボーリング密度が十分にないことに起因するかもしれない。

図 75 に浅部地盤構造モデルの AVS30 を示す。庄内平野では概ね 200 m/s 以上を示しており、海岸地域も多きが 250 m/s 以上に見えるが、雄物川河口近くの一部や平野南部において 200 m/s を下回る地域が見られる。

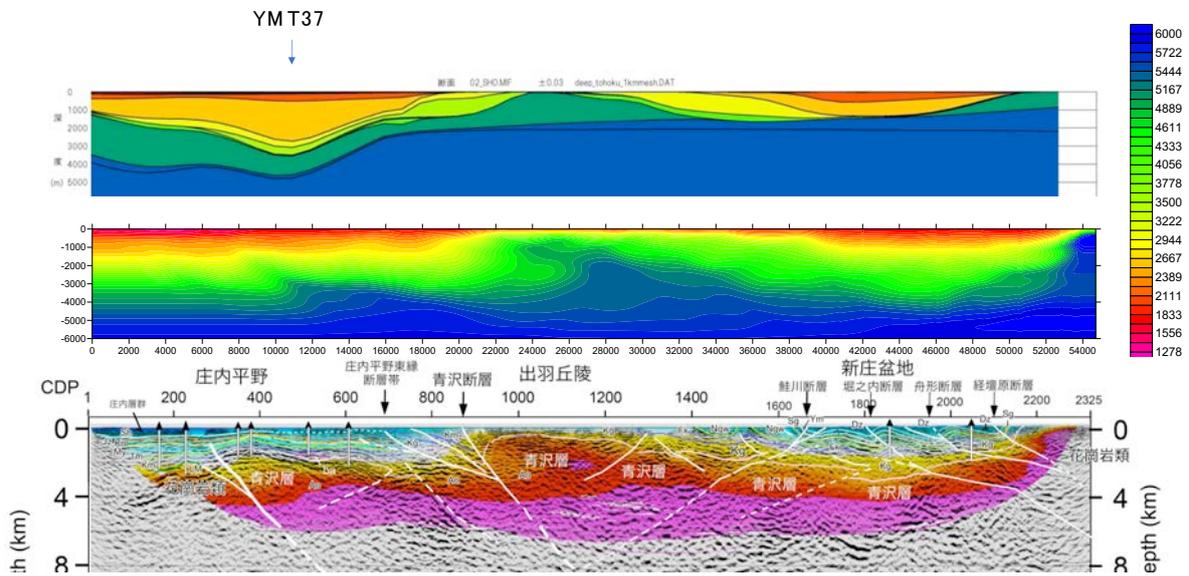


図 72 反射法地震探査結果と深部地盤構造モデルの P 波速度断面の比較。上段：3 次元深部地盤構造モデル。中段及び下段：反射法地震探査結果。

表 5 本研究で使用した V_S と N 値の関係式²⁸⁾

	今回のデータの回帰式
粘性土 (沖積・洪積)	$V_S = 123.8 \cdot N^{0.2641}$
砂質土 (沖積・洪積)	$V_S = 90.58 \cdot N^{0.3219}$
礫質土 (沖積・洪積)	$V_S = 121.9 \cdot N^{0.2635}$

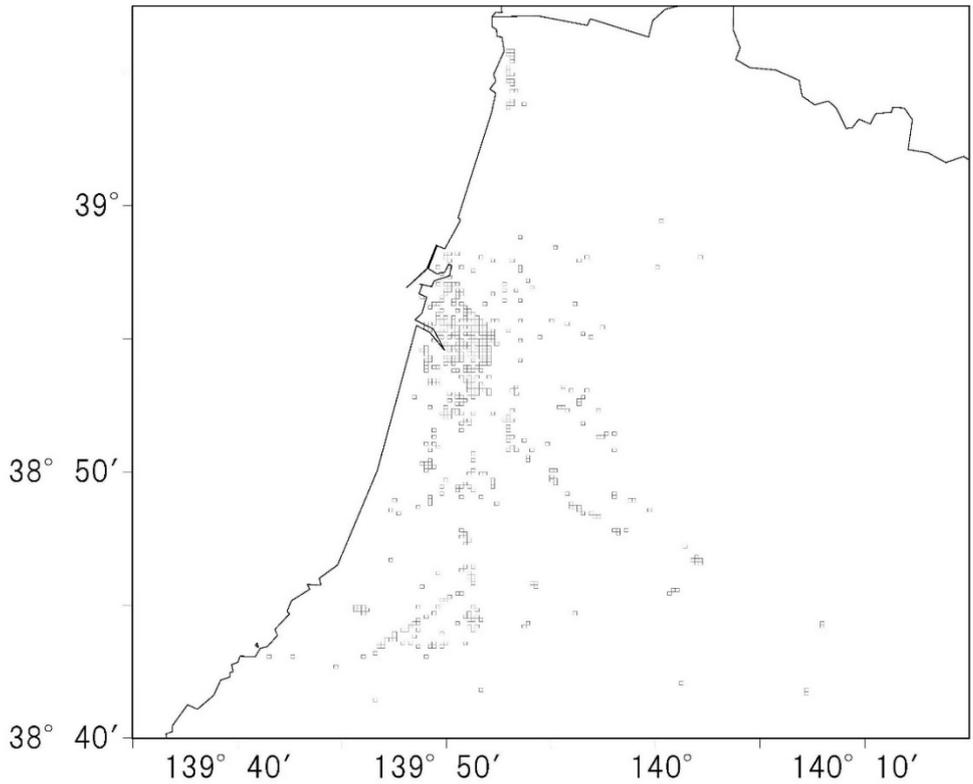


図 73 浅部地盤構造モデル作成に用いられたボーリングデータのあるメッシュ位置

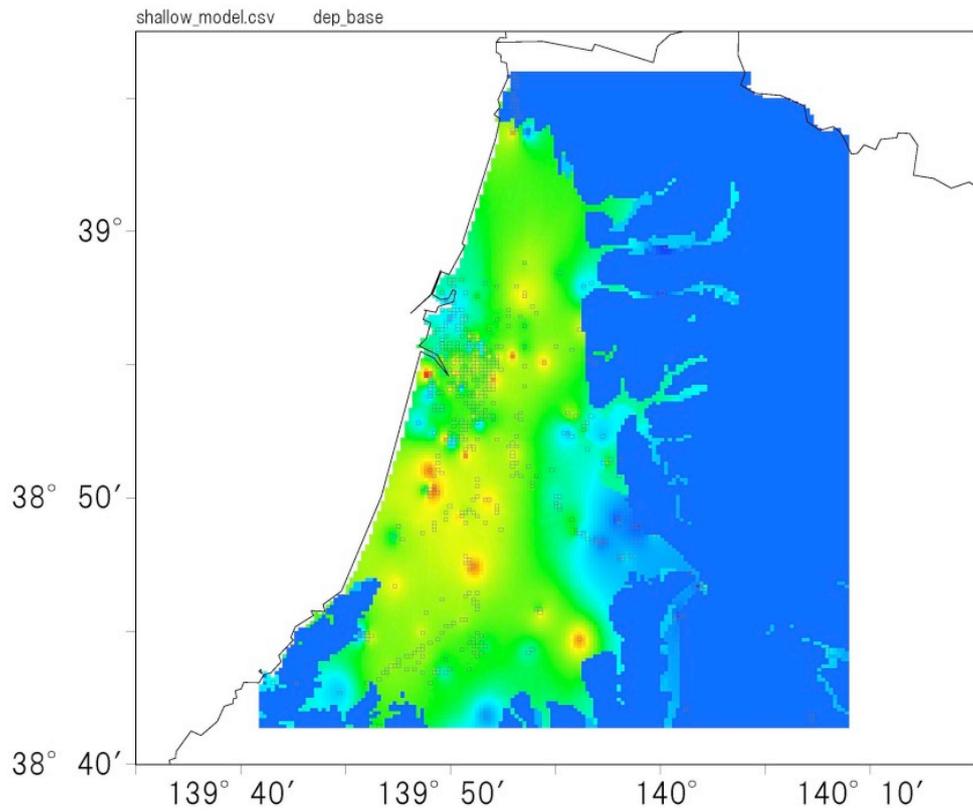


図 74 浅盤地下構造モデルの工学的基盤面深度とボーリングがあるメッシュ

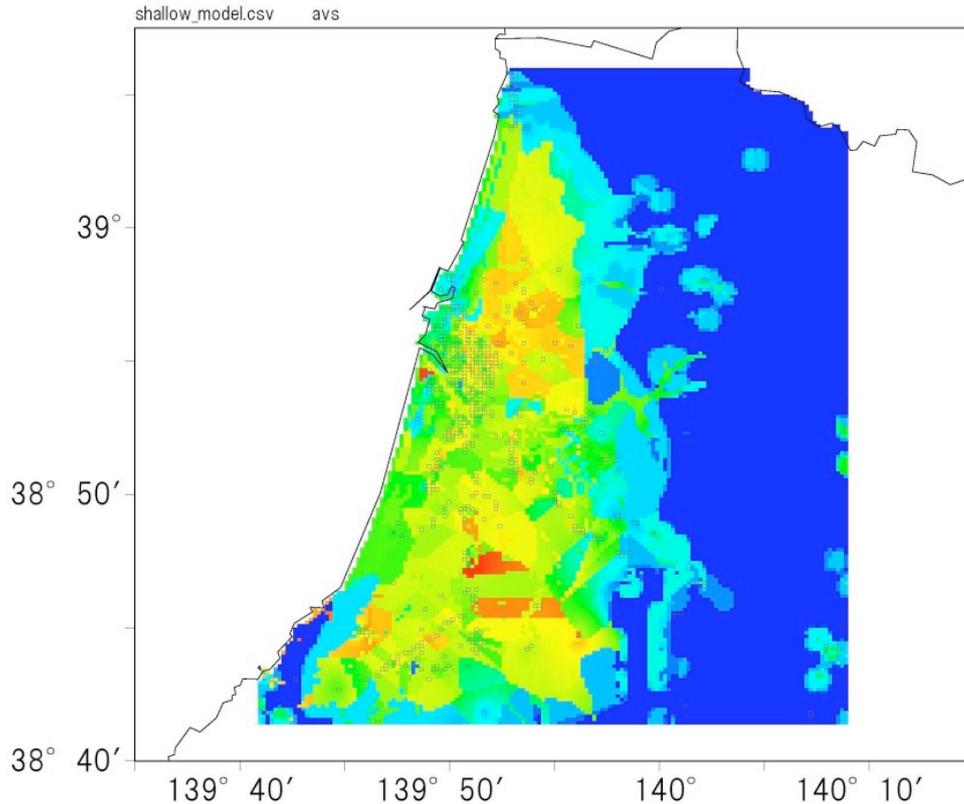


図 75 浅部地盤構造モデルの AVS30 分布とボーリングのあるメッシュ

c) 震源断層モデル

本プロジェクトによって設定された震源断層モデルを図 76 に示す。ここでは庄内平野西部に位置する伏在活断層の震源断層モデルを SHN01、庄内平野東縁断層帯に対応する震源断層モデルを SHN02 とする。両者とも東に傾き下がる逆断層で、傾斜角は 45 度を仮定している。SHN02 の震源断層長さは、活断層情報から与えられている。一方 SHN01 については調査した反射断面上での断層面形状は仮定できるが、断層長さに関する条件はないことから、SHN01 と震源断層面積がほぼ同じになるように設定した。地震規模（気象庁マグニチュードに相当）は M 7.5、モーメントマグニチュードは Mw 6.9 となる。なお、地震本部の主要活断層帯の長期評価によれば、庄内平野東縁断層帯で想定されている地震規模は M 7.5 である³⁰⁾。

これらの震源断層面に対して、地震本部で実施されている、「震源断層を特定した地震の強震動予測手法」の方法¹⁹⁾による標準的な震源断層モデルパラメータを与えたモデルを構築することとした。震源断層面上の強い揺れを生成する「強震動生成領域」（あるいはアスペリティ）の個数や位置設定は当然任意性があるが、個数については、規模から 2 つとして、位置については、被害分布から推定されている高震度領域²⁷⁾が南にやや偏在していることから、南側のアスペリティを大きいものとして設定し、逆断層タイプの地震の平均特性として、アスペリティの最下端から破壊が開始するものとした。図 77 と表 6、7 に SHN01 と SHN02 の震源断層パラメータとアスペリティ位置、破壊開始点などを示す。なお、後述の波形計算手法に統計的グリーン関数法を用いる時の小断層サイズを 2 km

× 2 km にしたため、両モデルの震源断層面の大きさ、形状は同じになっている。図 78 には、SHN01 および SHN02 の震源断層面の破壊開始点付近での東西断面図を深部地盤モデル上にプロットした。

断層面上のすべり角は一覧表にあるように本地域の応力場と震源断層面形状から設定しているが、強震動計算において各小断層でのすべり方向を同じとすると、ある方位にのみ強い波が出される可能性が高い。そこでここでは、最近日本海沿岸で発生した逆断層型の地震について、強震波形を用いた震源インバージョンの結果から、すべり角のばらつきを求めることとした。一般に強震波形を用いた震源インバージョンでは、小断層のすべり角は、ダブルカップル震源解などから得られているすべり角を中心にある範囲でのゆらぎを許してモデル化を行っていることから、結果として小断層でのすべり角にバラつきがある。ここでは、2004 年新潟県中越地震³¹⁾、2007 年能登半島地震³²⁾、2008 年岩手・宮城内陸地震³³⁾ のすべり角のばらつきをまとめた。なおすべり角に関してすべり量で重みづけを行った。3 地震のすべり角の揺らぎの平均は約 20 度となったので、本検討の断層モデルにおいては、すべり角について、標準偏差 20 度の正規分布による揺らぎを与えた。

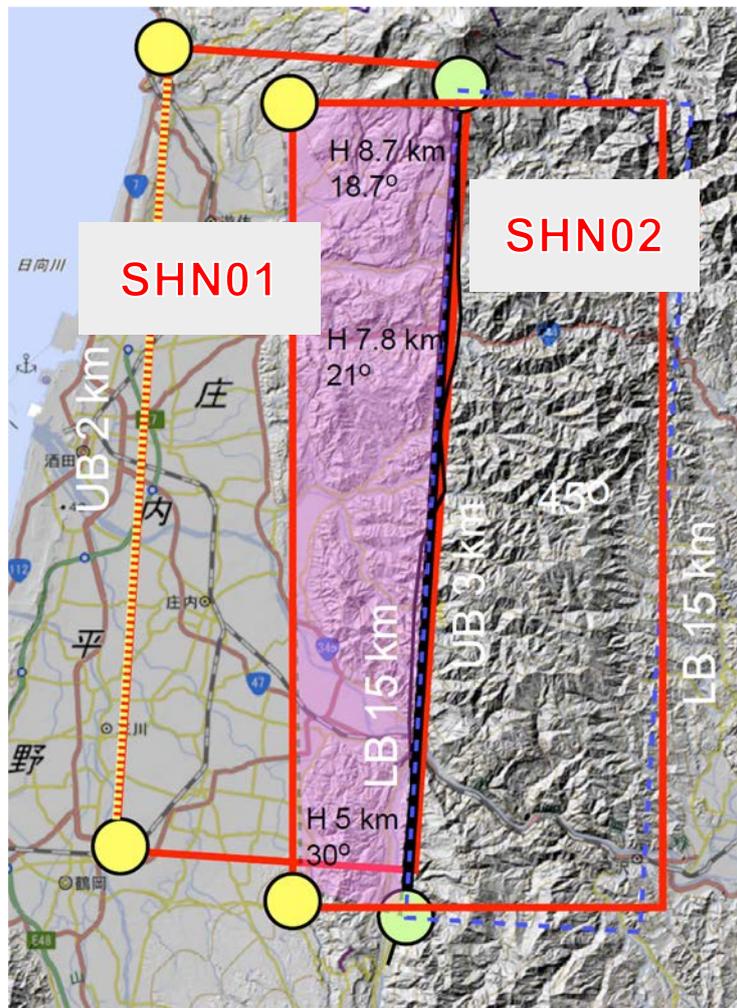
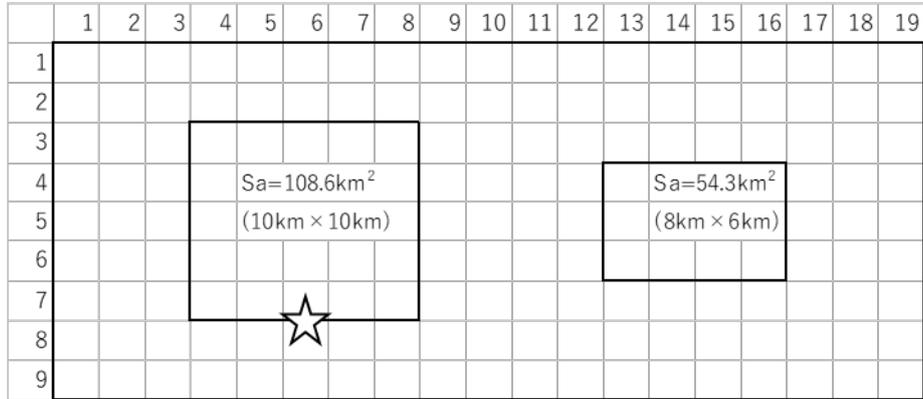


図 76 本プロジェクトによって設定された震源断層モデルの map view。基図は地理院地図による。

Mw6.9 38km × 18km, 傾斜角45度東下がり
 アスペリティ上端深さ 4.8km



Mw6.9 37 km × 18km, 傾斜角45度東下がり
 アスペリティ上端深さ 4.8km

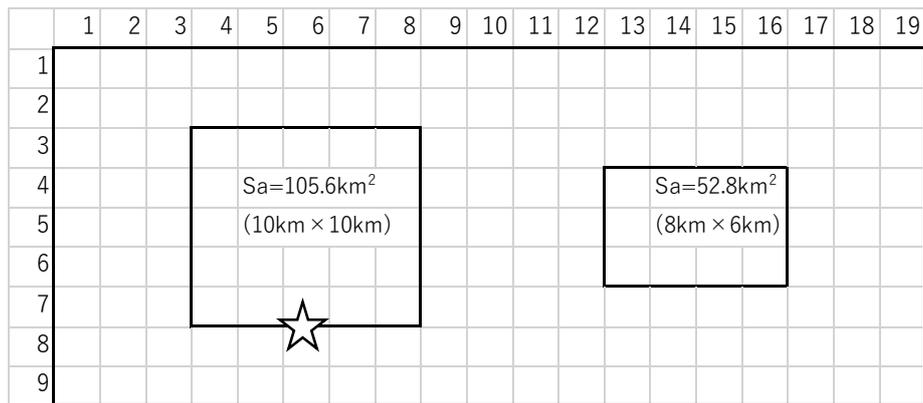


図 77 上 : SHN01、下 : SHN02 の設定震源断層面と強震動生成領域（アスペリティ）、破壊開始点の位置。震源断層面サイズやアスペリティサイズの記載面積はモデル計算によって出てきた数値を書いており、2 km × 2 km の小断層を使ったモデル化において、端数は合致していない。

表 6 SHN01 の巨視的・微視的震源パラメータ

巨視的震源パラメータ		設定方法	設定値
断層長さ L			37.8 km
マグニチュード M		$M = (\log L + 2.9) / 0.6$	7.5
走向 θ			4 °
傾斜角 δ			45 °
すべり角 λ			78 °
断層モデル上端深さ			2 km
断層モデル下端深さ			15 km
断層幅 W			18.4 km
断層面積 S			694.9 km ²
断層モデル幅 W_{model}			18 km
断層モデル長さ L_{model}			38 km
断層モデル長さ S_{model}		$S_{\text{model}} = L_{\text{model}} \times W_{\text{model}}$	684 km ²
地震モーメント M_0		$M_0 = (S/4.24 \times 10^{11})^2 \times 10^{-7}$ (入倉・三宅(2001))	2.69E+19 Nm
モーメントマグニチュード M_w		$M_w = (\log M_0 - 9.1) / 1.5$	6.9
剛性率 μ		地殻内の平均値	3.12E+10 N/m ²
静的応力降下量 $\Delta\sigma$		$\Delta\sigma = 7/16 \cdot (M_0 / R^3)$, $R = (S_{\text{model}} / \pi)^{1/2}$	3.6 MPa
平均すべり量 D		$D = M_0 / (\mu \cdot S)$	1.2 m
短周期レベル A		$A = 2.46 \cdot 10^{17} \times M_0^{1/3}$	1.59E+19 Nm/s ²

微視的震源パラメータ		設定方法	設定値
ア テ ス イ ペ リ	面積 S_a	$S_a = \pi r^2$, $r = 7\pi/4 \cdot M_0 / (A \cdot R) \cdot \beta^2$	162.9 km ²
	平均すべり量 D_a	$D_a = \gamma_D \cdot D_{\text{model}}$, $\gamma_D = 2.0$	2.5 m
	実効応力 σ_a	$\sigma_a = \Delta\sigma_a = 7/16 \cdot M_0 / (r^2 \cdot R)$	15.2 MPa
	地震モーメント M_{0a}	$M_{0a} = \mu \cdot D_a \cdot S_a$	1.27E+19 Nm
第 1 テ ア イ ス ペ リ	面積 S_{a1}	$S_{a1} = S_a \cdot (2/3)$ または $S_{a1} = S_a$	108.6 km ²
	実効応力 σ_{a1}	$\sigma_{a1} = \sigma_a$	15.2 MPa
	平均すべり量 D_{a1}	$D_{a1} = (\gamma_1 / \Sigma \gamma_i^3) \cdot D_a$ または $D_{a1} = D_a$	2.8 m
	地震モーメント M_{0a1}	$M_{0a1} = \mu \cdot D_{a1} \cdot S_{a1}$	9.39E+18 Nm
	計算用面積	2kmメッシュサイズ	100 km ²
第 2 テ ア イ ス ペ リ	面積 S_{a2}	$S_{a2} = S_a \cdot (1/3)$ または 「なし」	54.3 km ²
	実効応力 σ_{a2}	$\sigma_{a2} = \sigma_a$ または 「なし」	15.2 MPa
	平均すべり量 D_{a2}	$D_{a2} = (\gamma_2 / \Sigma \gamma_i^3) \cdot D_a$ または 「なし」	2.0 m
	地震モーメント M_{0a2}	$M_{0a2} = \mu \cdot D_{a2} \cdot S_{a2}$ または 「なし」	3.32E+18 Nm
	計算用面積	2kmメッシュサイズ	48 km ²
背 景 領 域	面積 S_b	$S_b = S_{\text{model}} - S_a$	521.1 km ²
	実効応力 σ_b	$\sigma_b = (D_b / W_b) \cdot (\pi^{1/2} / D_a) \cdot r \cdot \Sigma \gamma_i^3 \cdot \sigma_a$	2.9 MPa
	平均すべり量 D_b	$D_b = M_{0b} / (\mu \cdot S_b)$	0.9 m
	地震モーメント M_{0b}	$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$	1.42E+19 Nm
	計算用面積	2kmメッシュサイズ	536 km ²

表 7 SHN02 の巨視的・微視的震源パラメータ

巨視的震源パラメータ		設定方法	設定値
断層長さ L			36.6 km
マグニチュード M		$M = (\log L + 2.9) / 0.6$	7.4
走向 θ			359 °
傾斜角 δ			45 °
すべり角 λ			74 °
断層モデル上端深さ			2 km
断層モデル下端深さ			15 km
断層幅 W			18.4 km
断層面積 S			672.9 km ²
断層モデル幅 W_{model}			18 km
断層モデル長さ L_{model}			38 km
断層モデル長さ S_{model}		$S_{\text{model}} = L_{\text{model}} \times W_{\text{model}}$	684 km ²
地震モーメント M_0		$M_0 = (S/4.24 \times 10^{11})^2 \times 10^7$ (入倉・三宅(2001))	2.52E+19 Nm
モーメントマグニチュード M_w		$M_w = (\log M_0 - 9.1) / 1.5$	6.9
剛性率 μ		地殻内の平均値	3.12E+10 N/m ²
静的応力降下量 $\Delta\sigma$		$\Delta\sigma = 7/16 \cdot (M_0 / R^3)$, $R = (S_{\text{model}} / \pi)^{1/2}$	3.5 MPa
平均すべり量 D		$D = M_0 / (\mu \cdot S)$	1.2 m
短周期レベル A		$A = 2.46 \cdot 10^{17} \times M_0^{1/3}$	1.55E+19 Nm/s ²

微視的震源パラメータ		設定方法	設定値
ア テ ス イ ペ リ	面積 S_a	$S_a = \pi r^2$, $r = 7\pi/4 \cdot M_0 / (A \cdot R) \cdot \beta^2$	158.4 km ²
	平均すべり量 D_a	$D_a = \gamma_D \cdot D_{\text{model}}$, $\gamma_D = 2.0$	2.4 m
	実効応力 σ_a	$\sigma_a = \Delta\sigma_a = 7/16 \cdot M_0 / (r^2 \cdot R)$	15.0 MPa
	地震モーメント M_{0a}	$M_{0a} = \mu \cdot D_a \cdot S_a$	1.19E+19 Nm
第 1 テ ア イ ス ペ リ	面積 S_{a1}	$S_{a1} = S_a \cdot (2/3)$ または $S_{a1} = S_a$	105.6 km ²
	実効応力 σ_{a1}	$\sigma_{a1} = \sigma_a$	15.0 MPa
	平均すべり量 D_{a1}	$D_{a1} = (\gamma_1 / \Sigma \gamma_i^3) \cdot D_a$ または $D_{a1} = D_a$	2.7 m
	地震モーメント M_{0a1}	$M_{0a1} = \mu \cdot D_{a1} \cdot S_{a1}$	8.76E+18 Nm
	計算用面積	2km メッシュサイズ	100 km ²
第 2 テ ア イ ス ペ リ	面積 S_{a2}	$S_{a2} = S_a \cdot (1/3)$ または 「なし」	52.8 km ²
	実効応力 σ_{a2}	$\sigma_{a2} = \sigma_a$ または 「なし」	15.0 MPa
	平均すべり量 D_{a2}	$D_{a2} = (\gamma_2 / \Sigma \gamma_i^3) \cdot D_a$ または 「なし」	1.9 m
	地震モーメント M_{0a2}	$M_{0a2} = \mu \cdot D_{a2} \cdot S_{a2}$ または 「なし」	3.10E+18 Nm
	計算用面積	2km メッシュサイズ	48 km ²
背 景 領 域	面積 S_b	$S_b = S_{\text{model}} - S_a$	525.6 km ²
	実効応力 σ_b	$\sigma_b = (D_b / W_b) \cdot (\pi^{1/2} / D_a) \cdot r \cdot \Sigma \gamma_i^3 \cdot \sigma_a$	2.6 MPa
	平均すべり量 D_b	$D_b = M_{0b} / (\mu \cdot S_b)$	0.8 m
	地震モーメント M_{0b}	$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$	1.33E+19 Nm
	計算用面積	2km メッシュサイズ	536 km ²

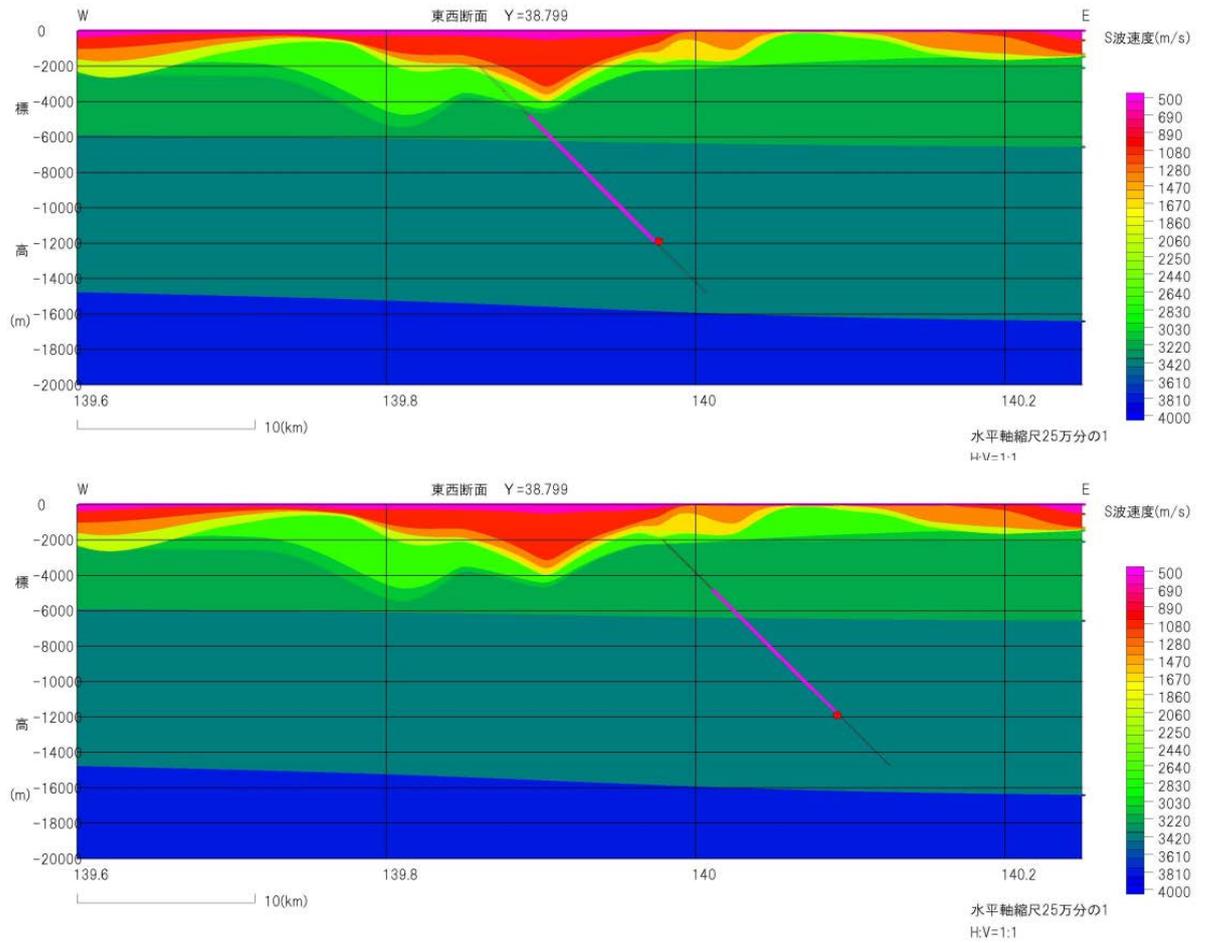


図 78 (上) SHN01、(下) SHN02 の設定震源断層面を深部地下構造モデル断面（破壊開始点を通る北緯 38.799 度の東西断面）に書き入れたもの。縦横比は 1:1 である。黒線が震源断層面で、マゼンタ色線がアスペリティ、赤点が破壊開始点位置を示している。

d) 強震動計算

強震動計算は、深部地盤構造モデルを用いて工学的基盤面における広帯域地震動を求め、浅部地盤構造モデルを用いた等価線形解析により地表面波形を計算して、地表震度を計測震度の計算法を用いて求めた。工学的基盤面における広帯域地震動は、3次元有限差分法と統計的グリーン関数法のハイブリッド法（接続周期は1秒）により求めた。

1秒以上の長周期帯域の地震動は、3次元有限差分法により計算を行った。S波速度が350 m/sの層の上面を解放基盤面として計算を行った。差分法の計算の基本となる差分スキームは、速度一応力スタガードグリッド³⁴⁾であり、時間方向に2次、空間方向に4次の精度³⁵⁾で計算を行っている。速度一応力スタガード・グリッドに対する震源の導入には、モーメントテンソルを等価な体積力として表現する方法³⁶⁾を用いた。吸収境界³⁷⁾は、20格子分確保した。粘弾性条件はメモリバリアブルによる方法³⁸⁾を使い、基準周期を4秒とした。基準とするQ値は、J-SHIS V2モデルの各層に与えられている Q_s 値をQ値として用いた³⁹⁾。

計算領域は東西120 km、南北120 km、深さ26.9 kmで、水平グリッドサイズは50 m、差分の時間ステップ間隔は0.0025秒で、総ステップ数は65,600、計算時間は164秒とした。鉛直方向は速度構造に合わせてグリッドサイズを4段階に変更している（表8）。なお、地震基盤以深の構造は、全国一次地下構造モデル（暫定版）の15層以下の構造を接続し、物性値についても全国一次地下構造モデル（暫定版）⁴⁰⁾の値を用いた。

短周期帯域（1秒以下）の強震動計算には、加速度振幅スペクトル⁴¹⁾および包絡関数⁴²⁾を用いて地震基盤面における要素波（統計的グリーン関数）をSV波、SH波それぞれについて作成し、地震基盤面から工学的基盤面までの地盤増幅は、SV波、SH波それぞれ地震基盤面への斜め入射により評価し、座標回転によりNS成分、EW成分、UD成分の3成分の波形を計算した。なお、理論ラディエーション係数を算出するための射出角および非弾性減衰を算出するための走時については、球殻モデルによる計算値を用いた。以下に要素波の作成方法、波形合成の計算方法等について示す。

まず、地震基盤面における要素波の周波数 f [Hz]に関する加速度振幅スペクトル $A(f)$ を設定する。

$$A(f) = \frac{R_{\theta\phi}(f) \cdot M_0 \cdot (2\pi f)^2}{4\pi\rho\beta^3} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \cdot \frac{1}{[1 + (f/f_{\max})^{2s}]^{\frac{1}{2}}} \cdot \frac{\exp(-\pi f t_t / Q)}{R} \cdot \sqrt{\frac{\rho\beta}{\rho_b\beta_b}}$$

ここで、 $R_{\theta\phi}$ はラディエーション係数、 ρ [kg/m³]および β は震源における密度およびS波速度を表す。 M_0 [N・m]は地震モーメント、 f_c [Hz]はコーナー周波数であり、 f_{\max} [Hz]は高周波数遮断フィルターの遮断周波数を表し、係数 s はフィルターの次数を表す。 Q はみかけの減衰定数、 t_t [s]および R [km]はそれぞれ、震源からサイト直下の地震基盤までの走時および距離を表す。また、 ρ_b と β_b はそれぞれ、地震基盤における密度およびS波速度である。 Q 値は $Q = 110.3f^{0.69}$ とした⁴³⁾。高周波数遮断周波数 f_{\max} は6 Hzに設定し、次数 s は2を用いた。また、コーナー周波数 f_c は、次式⁴⁴⁾で算出した。

$$f_c = 4.9 \times 10^6 \beta (\Delta\sigma / M_0)^{1/3}$$

なお、ここでは $A(f)$ の振幅に一様乱数で位相を与え、包絡関数⁴²⁾を考慮して、地震基盤における要素波を作成した。

次に、ラディエーション係数 $R_{\theta\phi}(f)$ について、周波数では理論放射係数 $R_{\theta\phi 0}$ 、高周波数では平均化された放射係数 $R_{\theta\phi m}$ となるように、次式 45) を用いた。

$$R_{\theta\phi} = \frac{(\log(f_2) - \log(f))R_{\theta\phi 0} + (\log(f) - \log(f_1))R_{\theta\phi m}}{\log(f_2) - \log(f_1)}$$

ここでは $f_1 = 0.25$ Hz、 $f_2 = 2$ Hz とし、高周波数での平均化された $R_{\theta\phi m}$ を算出した 46)。震源からサイト直下の地震基盤までの走時 t_t および射出角については、球殻モデル 47) により算出される値を用いた。球殻モデルの S 波構造は、モホ面深さ M を 32 km、地表からの深さを H [km] として以下のように設定した。

$$V_s = 3.1 \times \left(\frac{R_0 - H}{R_0} \right)^{-60} \quad H < M$$

$$V_s = 4.475 \times \left(\frac{R_0 - H}{R_0 - M} \right)^{-3} \quad H \geq M$$

なお、球殻モデルの半径 R_0 は 6371 km とした。以上を基に、積分による変位波形がベル型となるという条件を満たす波形 46) を地震基盤における要素波として採用した。

工学的基盤面での波形合成では、SV 波、SH 波それぞれに、サイト直下の地盤構造を用いた斜め入射による地盤増幅係数を乗じ、Radial および Transverse 成分から NS、EW および UD 成分への座標回転を考慮した後、補正関数 48) を用い波形合成を行った。

$$U(f) = \sum_m^{N_L} \sum_n^{N_W} e^{-i2\pi f t_{mn}} \left\{ 1 + \frac{1}{n'(1 - e^{-1})} \sum_{k=1}^{(N_D-1)n'} e^{-\frac{k-1}{(N_D-1)n'}} e^{-i2\pi f \frac{(k-1)\tau}{(N_D-1)n'}} \right\} u_{mn}(f)$$

ここで、 $U(f)$ は波形合成後のサイトの加速度フーリエスペクトルであり、 $u_{mn}(f)$ は要素断層によるサイトの加速度フーリエスペクトルである。 t_{mn} は破壊開始時刻からサイトに到達するまでの時間であり、球殻モデルによる走時と破壊開始点から要素断層までの破壊伝播時間の和で表される。 N_L 、 N_W 、 N_D はそれぞれ長さ方向、幅方向、すべり方向の分割数であり、 τ [s] はライズタイム、 n' は重ね合わせによる人工的な周期特性を有効周波数より高い周波数側に移動させる再分割数である。

これらのようにして作成した工学的基盤面での統計的グリーン関数法による短周期地震動と 3 次元有限差分法による長周期地震動波形を、1 秒をマッチングフィルターとするフィルターを施したのちに時間領域で足し合わせる。この際、地震基盤面以深の速度構造モデルが統計的グリーン関数法と差分法では厳密には同じではないことから、統計的グリーン関数の初動走時は球殻モデルのそれから、3 次元有限差分法による初動走時は地盤構造モデルを縦横深さ方向に 1,000 m のグリッドモデルに変換し、3 次元レイトレーシングにより計算し、それらが一致するように波形を時間シフトして足し合わせた。

地表面地震動の計算は、前述で作成した工学的基盤面波形に、浅部地盤構造モデルを用いて水平成分については等価線形解析を行って地表面波形を求めた。等価線形解析の主な条件は SHAKE⁴⁹⁾ に準じた。SHAKE では、有効ひずみ γ_{eff} を次式で定義し、 γ_{eff} に対応する剛性率 G および減衰定数 h を用いた一次元重複反射理論による周波数領域の応答解析を行う。これを反復計算し、設定した収束条件を満足した場合、反復計算が終了となる。

$$\gamma_{eff} = \alpha \gamma_{max}$$

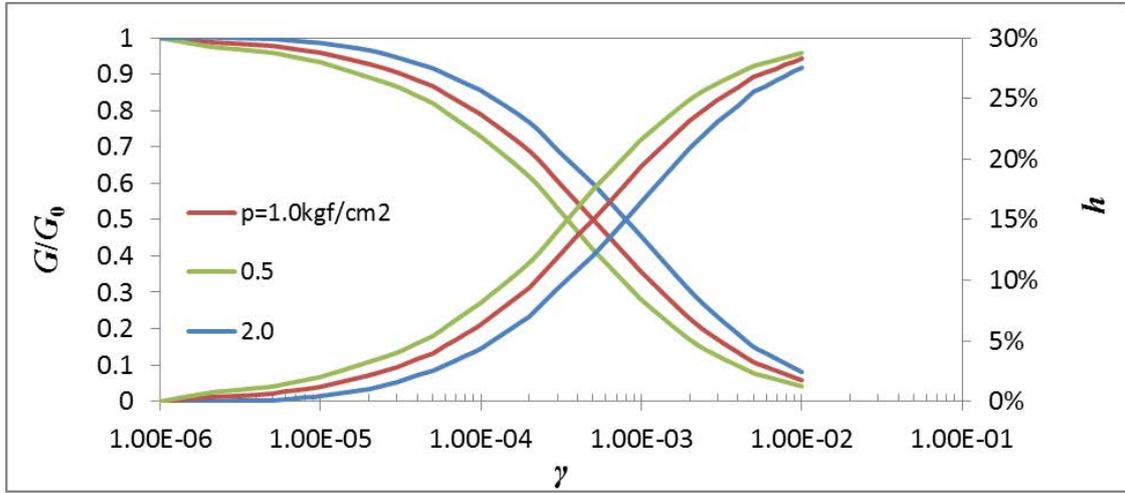
ここで、 α は補正係数であり、 γ_{max} は最大ひずみである。補正係数 α には標準的に用いられる 0.65 を採用した。また、収束条件についても標準的に用いられる「すべての層において G および h の前回計算との誤差が 5%以内」とした。主な計算手法の設定内容を表 9 に示す。等価線形解析に用いる動的変形特性曲線は、粘性土層に対しては土研式の沖積粘性土の動的変形特性曲線を、それ以外に対しては土研式の沖積砂質土の動的変形特性曲線を適用した。図 79 に適用した動的変形特性曲線を示す。一方、上下成分は、浅部地盤モデルの、P 波伝播として取り扱い、地表面上下成分を求めた。このようにして得られた 3 成分の地表面地震動から、計測震度⁵⁰⁾の算出を行った。

表 8 差分法での鉛直方向の計算緒元

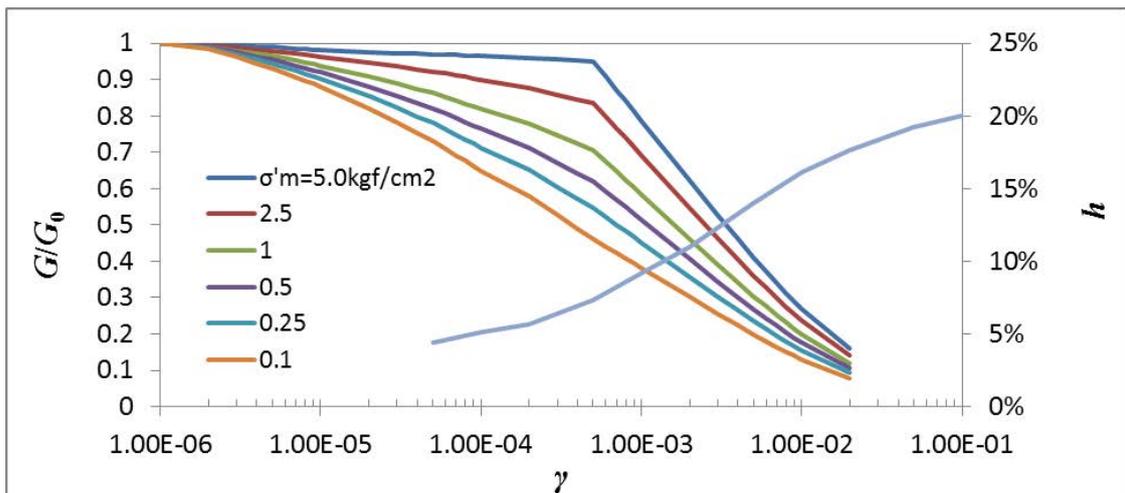
Layer	Vs min. (km/s)	Vs max (km/s)	Vp min. (km/s)	Vp max (km/s)	Depth range (km)	Dz (m)	Min. Preiod (s)
1	0.35	3.2	1.6	5.5	0.0-1.0	50	0.71
2	0.6	3.2	2.0	5.5	1.0-4.5	100	0.83
3	1.4	3.4	3.0	5.8	4.5-8.9	200	0.71
4	3.1	4.5	5.5	7.5	8.9-26.9	300	0.48

表 9 等価線形解析の設定内容

使用プログラム	DYNEQ ⁵¹⁾
解析手法	SHAKE ⁴⁹⁾ に準じる
複素剛性の計算手法	$G^* = G(1 - 2h^2 + 2ih\sqrt{1 - h^2})$
イタレーション終了の誤差判定値	5%
有効ひずみの設定	$\gamma_{eff} = \alpha\gamma_{max}$ ($\alpha = 0.65$)
動的変形特性曲線の与え方	$G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ を表形式で与える
動的変形特性曲線	土木研究所 ⁵²⁾
ひずみが動的変形特性曲線の範囲外に達した時の補間方法	最大ひずみと同じ
散乱の減衰	考慮しない
入力地震波	解放基盤波 (2E) として入力



①砂質土 (土研式 沖積砂質土)



②粘性土 (土研式 沖積粘性土)

図 79 動的変形特性曲線

e) SHN01 及び SHN02 モデルによる震度の比較と記録との対応

これまで説明してきた、震源断層モデル及び浅部・深部地盤構造モデルに基づき、ハイブリッド法による広帯域地震動計算を実施し、地表面での算出地震動計算結果から、計測震度分布をもとめた。図 80 に SHN01 及び SHN02 それぞれの震源モデルに対する計測震度分布図を示す。震源断層面が庄内平野の直下にある SHN01 震源断層モデルでは、庄内平野南部を中心に高震度領域が広がっている。一方、SHN02 震源断層モデルでは、庄内平野南部で高震度領域が広がっているが、平野と丘陵境界から丘陵地域においても高震度が分布していることがわかる。

明治庄内地震の被害分布から求めた震度値の分布²⁷⁾とそれぞれの計測震度分布の重ね書きを図 81 に示す。なお、被害分布（倒壊率）から求めた震度と計測震度は 1:1 対応するものではないことに注意する必要がある。これらの図の比較からは、震度データにおける高震度の領域の対応は、SHN01 の方が SHN02 のそれよりよいように見える。庄内平野内の震度データの高震度域は、SHN01 の計測震度分布から大体包含されている一方、SHN02 の方は、平野東部の丘陵地との境界及び周辺域や、平野中央部の震度データの高震度域の説明性が悪いようにみえる。

図 82 に、震度データと、地震動シミュレーションに基づく計測震度の相関を、震度データの得られている地点で比較した。○が個々の比較を表し、平均値及び標準偏差をつけている。震度データ地点における計測震度のバラつきが多いものの、SHN01 の相関の方が SHN02 の相関よりややよいように見える。震度データに対して計測震度のバラつきが大きい、特に、この中で震度データが低い震度 4.5 や 5 において非常に広がってしまっているのは、震度データが、狭いサイズの村の建物被害から想定されているのに対して、地盤条件は 250 m メッシュで与えており、ボーリングデータがないところは、微地形区分で設定していることから、局所的な状況を正確にはとらえることができていないからと考える。この時代を考えると、治水工事などは極めて限定的と考えられるため、庄内平野内においては、集落は自然堤防といった微高地にあったであろうから、そういった局所的な情報がこのような分析には必要と考える。

1894 年庄内地震では、地表地震断層が明確には現れていないが、活構造としての庄内平野東縁断層帯が活動して被害を引き起こしたと考えられてきたが、本研究の結果からは、今回本プロジェクトで見つかった庄内平野西部に見られる活構造の活動の可能性も指摘できた。

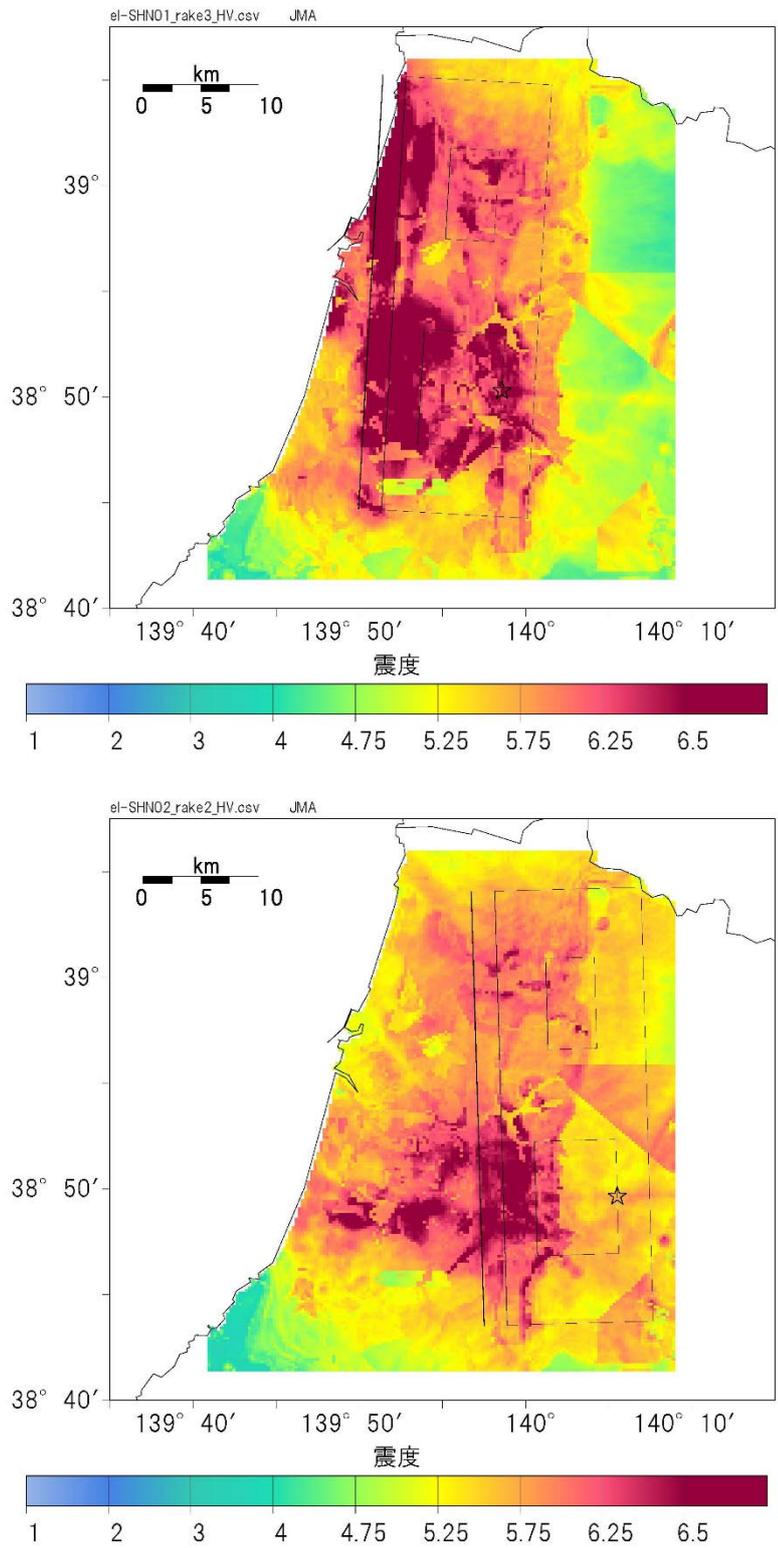


図 80 地表震度分布の比較。(上) SHN01 震源断層モデル、(下) SHN02 震源断層モデル。

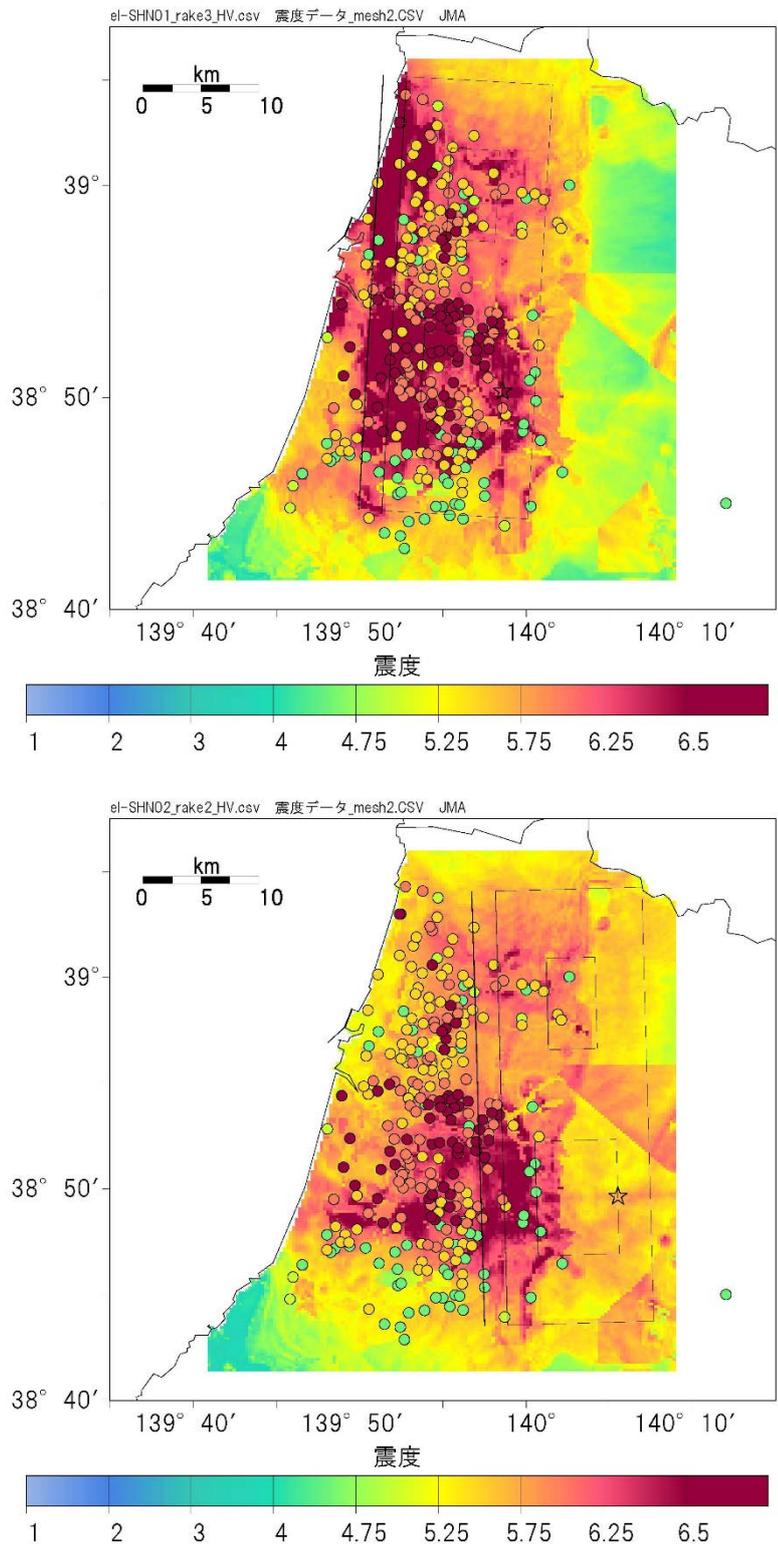


図 81 地表震度分布と、明治庄内地震の被害に基づく震度分布²⁷⁾の比較。(上) SHN01 震源断層モデル、(下) SHN02 震源断層モデル。

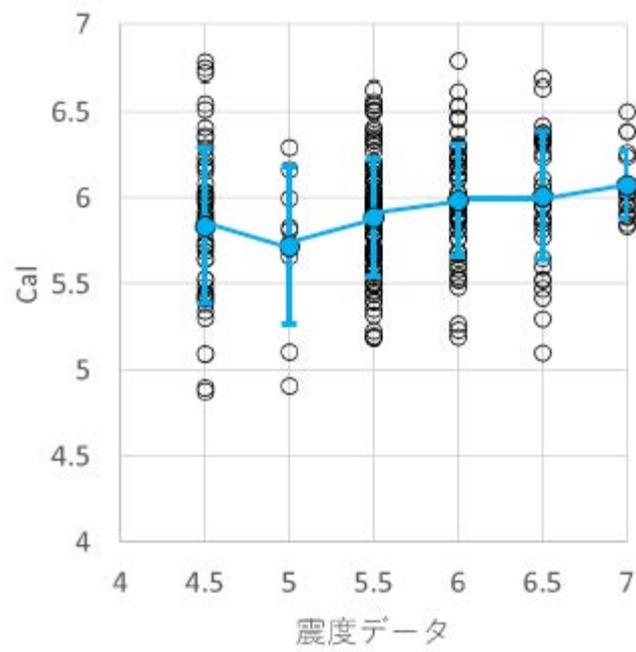
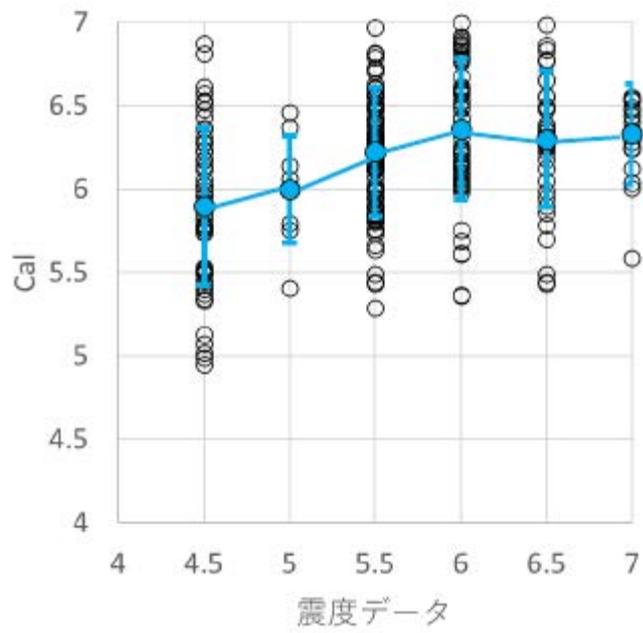


図 82 震度データと計測震度の相関。(上) SHN01 震源断層モデル、(下) SHN02 震源断層モデル。