

3.3. 断層帯周辺における地震動予測の高度化のための研究

目次

(1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 3カ年の年次実施業務の要約
 - 1) 平成24年度
 - 2) 平成25年度
 - 3) 平成26年度
- (e) 平成26年度業務目的

(2) 平成26年度の成果

- (a) 業務の要約
- (b) 業務の方法
- (c) 業務の成果
 - 1) 立川臨時観測およびMeSO-net観測点におけるレーザー関数法解析および追加微動観測による地下構造モデルの高精度化
 - 2) 立川断層帯における震源断層モデルの構築
 - 3) 立川断層帯周辺地域における強震動予測シミュレーション
- (d) 結論
- (e) 引用文献

(1) 業務の内容

(a) 業務題目 断層帯周辺における地震動予測の高度化のための研究

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人東京工業大学	教授	山中 浩明
国立大学法人東京工業大学	産学官連携研究員	佐口 浩一郎
国立大学法人東京工業大学	助教	地元 孝輔

(c) 業務の目的

サブテーマ1および2で得られた成果および既存の調査研究の結果を基に、立川断層帯における震源断層モデルおよび地下構造モデルを構築し、本断層帯周辺地域における強震動評価の高精度化を図る。

(d) 3カ年の年次実施業務の要約

1) 平成24年度:立川断層帯周辺の地下構造や地盤増幅特性に関する既存の資料の収集と整理を行った。さらに、本断層帯周辺において微動観測を実施すると同時に地震観測点で得られている地震記録の分析を行い、その結果に基づいて本断層帯周辺の地下構造モデルを構築した。

2) 平成25年度:初年度で収集した資料と追加で実施した微動アレイ観測の結果から、本断層帯近傍における3次元深部地盤構造モデルの構築を行った。また、構築したモデルを用いて中小地震の3次元シミュレーションを実施した。さらに、「全国地震動予測地図」(地震調査研究推進本部地震調査委員会、2010)による断層モデル(以下、「推本断層モデル」)を用いて地震動予測を試行的に実施した。

3) 平成26年度:サブテーマ1b(3.1.2. 自然地震観測に基づく断層周辺の広域的3次元構造調査)による立川臨時観測および首都圏地震観測網(MeSO-net)観測点(酒井・平田、2009)における地震記録のレスリー関数法解析を実施し、微動観測を補足的に行うことにより、3次元地下構造モデルの高精度化を行った。サブテーマ①および②による成果を考慮して本断層帯の震源のモデル化を行った。構築した3次元地下構造モデルと震源断層モデルを用いて、81ケースのシナリオを対象とした地震動予測を実施し、平均値および標準偏差($\pm\sigma$)の評価を行った。さらに、浅部地盤探査の実施によって浅部地盤構造が明らかな地点について非線形応答の評価を行った。

(e) 平成26年度業務目的

立川臨時観測およびMeSO-netにおける地震記録のレスリー関数法解析を実施し、微動観測を補足的に行うことにより、3次元地下構造モデルの高精度化を行う。サブテーマ①および②による成果を考慮して本断層帯の震源のモデル化を行う。構築した3次元地下構造モデルと震源断層モデルを用いて、81ケースのシナリオを対象とした地震動予測を実施し、平均値および標準偏差($\pm\sigma$)等の評価を行う。さらに、浅部地盤探査の実施によ

って浅部地盤構造が明らかな地点について非線形応答の評価を行う。

(2) 平成26年度の成果

(a) 業務の要約

本業務では、立川断層帯周辺地域における強震動予測のための3次元深部地盤構造モデルの精度向上を目的として、サブテーマ1bによる立川臨時観測および首都圏地震観測網(MeSO-net)観測点(酒井・平田、2009)における地震記録のレーザ関数法解析と、微動アレイおよび微動単点観測による追加観測の結果を昨年度の結果に統合することにより、昨年度よりさらに詳細な3次元深部地盤構造モデルの構築を行った。構築した3次元モデルと「長周期地震動予測地図」(地震調査研究推進本部地震調査委員会、2012)による3次元モデル(以下、「推本モデル」)を用いて強震動予測を実施し、「全国地震動予測地図」(地震調査研究推進本部地震調査委員会、2010)による既存の強震動予測での断層モデルの予測結果における工学的基盤上における最大速度分布および断層近傍の速度波形に対する比較検討を行った結果、立川断層帯周辺における地震基盤の構造が大きく影響していることが明らかとなった。次に、サブテーマ1および2による成果を考慮して本断層帯の震源断層モデルの構築を行った。構築した3次元地下構造モデルと震源断層モデルを用いて、81ケースのシナリオを対象とした地震動予測を実施し、平均値および標準偏差($\pm\sigma$)の評価を行い、本断層帯周辺地域における地表面の最大速度および震度分布を明らかにした。最後に、浅部地盤探査の実施によって浅部地盤構造が明らかな50地点について等価線形化法による解析を実施し、地盤が非線形することによる地震動への影響についての評価を行うことにより、地盤が非線形化した場合における最大速度および計測震度と浅部地盤におけるAVS30(地下30mまでの平均S波速度)との関係について明らかにした。

(b) 業務の方法

まず、サブテーマ1bにおいて実施された立川断層帯周辺における立川臨時観測点と首都圏地震観測網(MeSO-net)観測点(酒井・平田、2009)で得られた地震記録のレーザ関数の逆解析を行うことにより、各観測点における深部地盤構造を推定した。同時に微動単点観測結果であるH/Vスペクトルの卓越周期と微動アレイ探査結果である深部地盤構造より、微動単点観測の各測線上における深部地盤構造を明らかにした。以上の結果と昨年度に構築した深部地盤構造モデルと統合することにより、昨年度よりさらに詳細な3次元深部地盤構造モデルの構築を実施した。次に、サブテーマ①および②による成果を考慮して本断層帯の震源断層モデルを強震動予測レシピに従い構築した。構築した3次元地下構造モデルと震源断層モデルを用いて3次元差分法と統計的グリーン関数のハイブリッド法による強震動予測シミュレーションを行った。強震動予測シミュレーションでは解析時間は80秒間とし、アスペリティの位置、応力降下量、破壊伝播速度および破壊開始点を不確定要素とした81ケースのシナリオによるシミュレーションを実施し、平均値およびばらつき($\pm\sigma$)の評価を行うことにより、本断層帯周辺地域における地表面の最大速度および震度分布を500m間隔で明らかにした。最後に、浅部地盤探査の実施によって浅部地盤構造が明らかな50地点について等価線形化法による解析を実施し、線形解析結果

と比較することにより、地盤が非線形化した場合における最大速度および計測震度と浅部地盤における AVS30（地下 30 m までの平均 S 波速度）との関係について明らかにした。

(c) 業務の成果

1) 立川臨時観測および MeSO-net 観測点におけるレシーバー関数法解析および追加微動観測による地下構造モデルの高精度化

サブテーマ 1b「自然地震観測に基づく断層周辺の広域的 3 次元構造調査」では本断層帯近傍において 2013 年の 1～7 月にかけて 30 地点の臨時観測を実施されている。同様に首都圏では首都圏地震観測網(MeSO-net)が整備されており（酒井・平田 2009）、これらの観測点において地震記録が得られている。そこで、本研究では図 1 に示す立川臨時観測点および MeSO-net において新たにレシーバー関数法解析を行った。なお、同図に示される立川断層帯は地質調査所（1997）によるものである。解析には概ね震央距離 100 km 以内における中小地震 ($M_j=4.0\sim 6.0$) から各観測点 10～20 程度の地震記録を使用してレシーバー関数を算出した。レシーバー関数法により得られた解析結果の例として、図 2 に立川臨時観測点である TC22～TC28 におけるレシーバー関数を示す。図 2 に示されるよう、各観測点における PS-P 時間（PS 変換波と P 波の到達時間差）は立川断層の西から東側にかけて大きくなっており、断層の東ごく近傍に位置する TC24 と TC25 の間で急激に変化している。このことから、断層の西側では堆積層が薄いのに対して、東側では堆積層が急激に厚くなることが明らかである。

次に図 3 に示すように 6 地点の微動アレイ観測と 3 測線による微動単点観測を新たに実施した。F-K 法解析から得られた微動アレイ観測の各観測点におけるレイリー波位相速度を図 4 に示す。立川断層の東側に位置する観測点では、位相速度は概ね周期 0.5 秒～5 秒の間で 0.5km/s～2.5km/s とそれぞれ分散性を示しており、位相速度に大きな相違は見られない。これに対して、立川断層の西側の観測点では東側の観測点に比べて全体的に位相速度は速くなっている。図 5 に各測線において得られた微動の H/V スペクトルの卓越周期分布を示す。図 5 が示すように、立川断層の中央部の L7 測線ではほぼ断層が位置する箇所において急激に卓越周期が変化していることがわかる。したがって、立川断層の中央部では急激に地下構造が変化していると考えられる。これに対して、L2 測線および L11 測線では断層を挟んで卓越周期に明瞭な変化は見られないことから、深部地盤構造に大きな変化はないと考えられる。

これらの結果から、昨年度と同様に各観測点（微動アレイ、微動単点および地震観測点）における 1 次元深部地盤構造を推定した。すなわち、微動アレイ観測点近傍 1km 以内に地震観測点がある場合にはレイリー波位相速度とレシーバー関数による同時逆解析により微動アレイ観測点における深部地盤構造を推定した。その他の地震観測点では、同時逆解析結果による速度を固定して、層厚のみをパラメータとしたレシーバー関数による単独逆解析を行った。微動単点観測点では微動アレイ観測点における観測 H/V スペクトルの卓越周期に対する各観測点の卓越周期の比を、微動アレイ観測点の深部地盤構造の層厚に乗じることにより各測線における深部地盤構造を推定した。

最後に推定した各観測地点の 1 次元深部地盤構造を、昨年度に構築した 3 次元深部地盤構造モデルに追加し、Kriging 法により図 6 に示す 3 次元深部地盤構造の再構築を行った。

図 6 が示すように、再構築した 3 次元深部地盤構造モデルでは、立川断層の中央部付近において、地震基盤は立川断層近傍を境として南西から北東に向かい急激に深くなっており、1~1.5 km 以上の地震基盤の落差を有している。

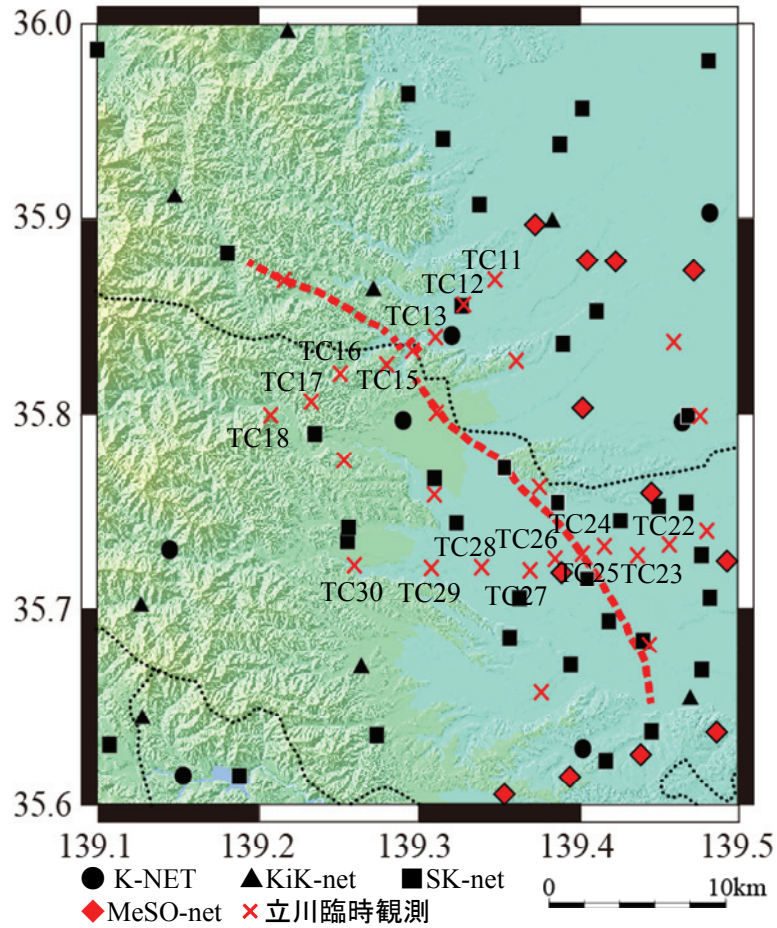


図 1 立川断層帯周辺における強震観測点および臨時観測点
 黒点線：県境 赤点線：地質調査所（1997）による名栗断層および立川断層

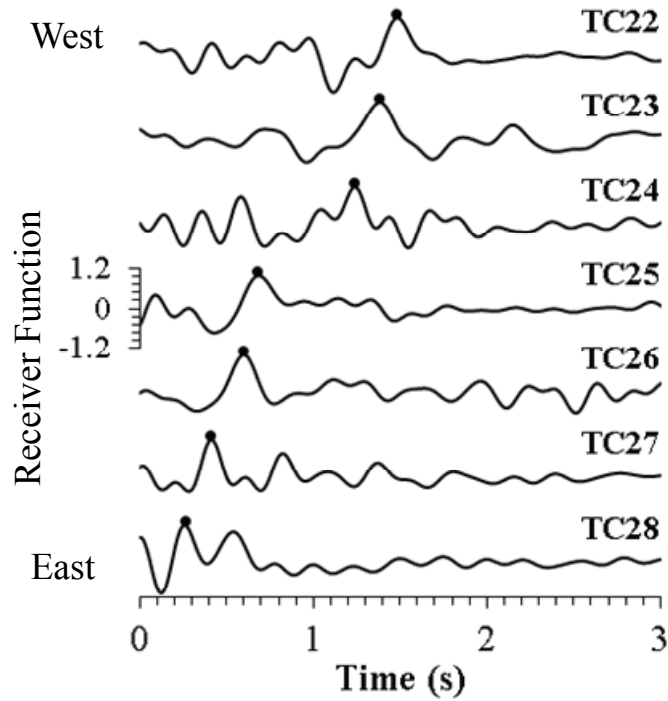


図 2 立川臨時観測で得られた各観測点におけるレシーバー関数
 黒丸：レシーバー関数が最大となる時間（PS-P 時間）

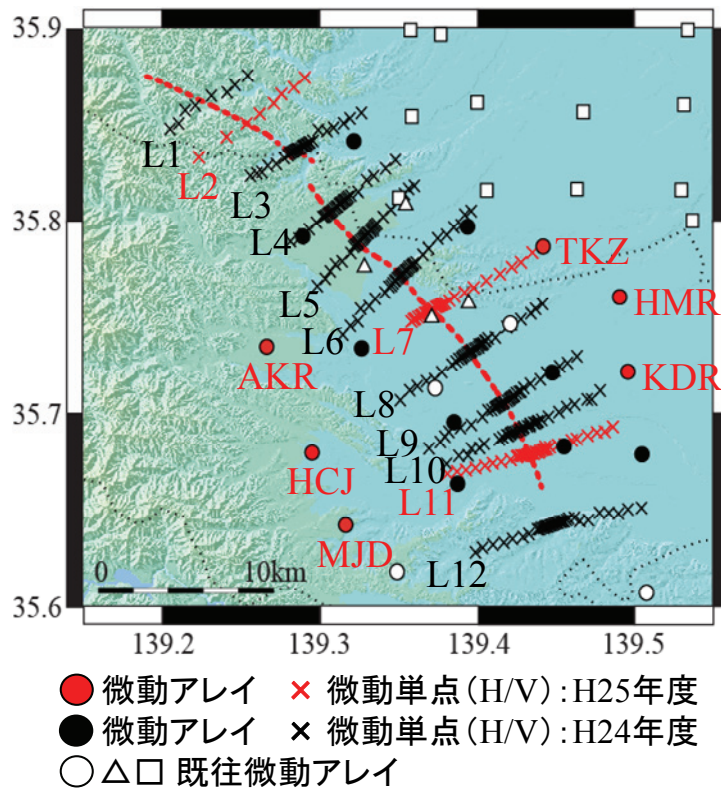


図 3 立川断層帯近傍における微動アレイおよび微動単点観測点
 赤点線：地質調査所（1997）による名栗断層および立川断層

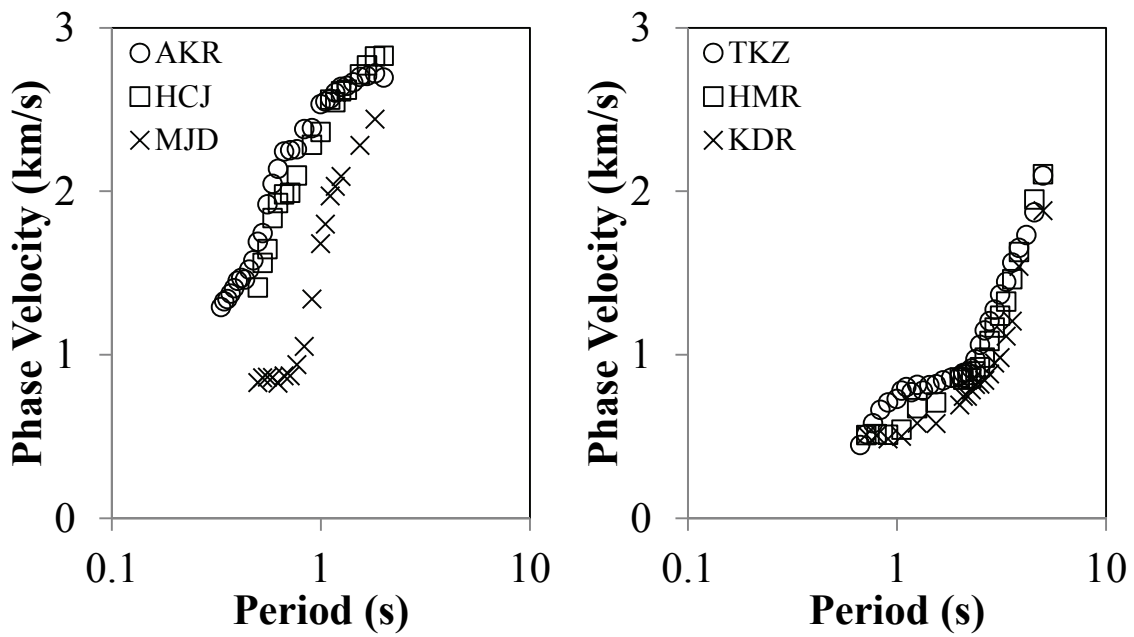


図4 各微動アレイ観測点において得られたレイリー波位相速度
 左：立川断層西側観測点 右：断層東側観測点

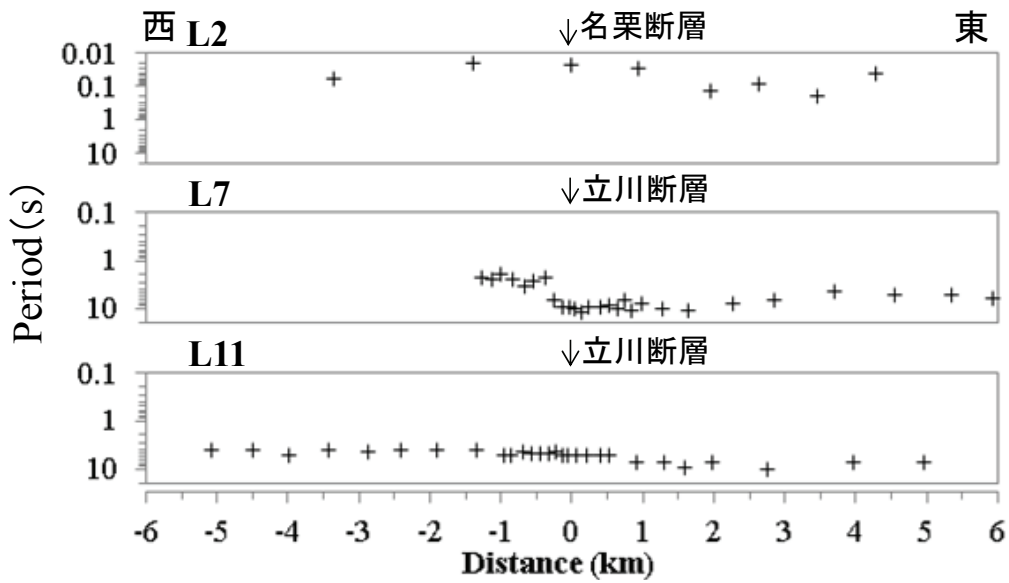


図5 追加微動単点観測の各測線において得られた微動 H/V スペクトルの卓越周期分布

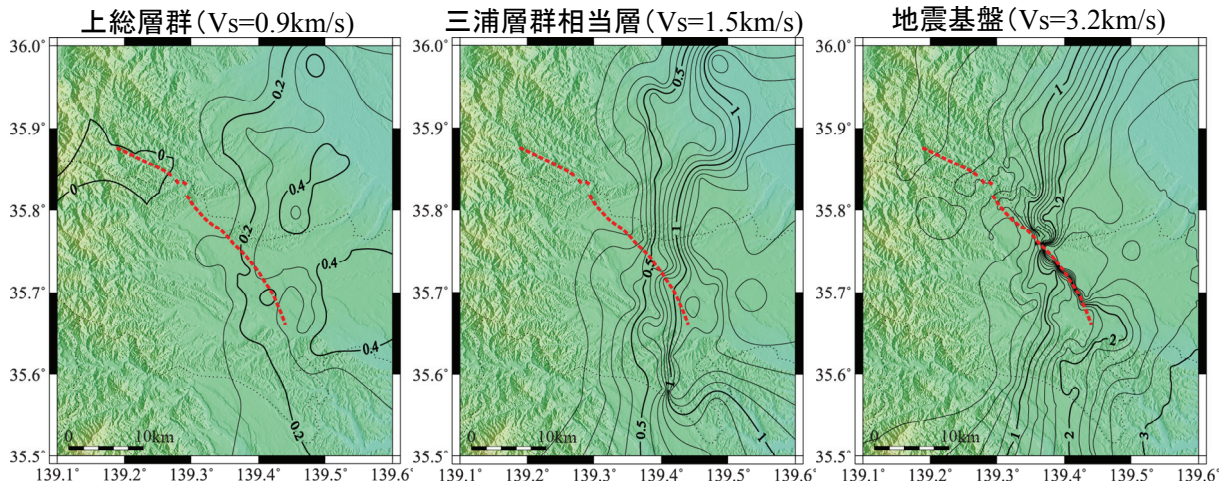


図 6 構築した立川断層帯周辺地域の
3次元地盤構造モデルにおける各層上面の深度分布
赤点線：地質調査所（1997）による名栗断層および立川断層

最後に、深部地盤構造の影響を理解するために、構築したモデルと推本モデルによる 3次元深部地盤構造モデルを用いて強震動予測を実施し、図 7 に示す既存の強震動予測での推本断層モデルにおける両者の予測結果に対しての比較検討を行った。同図には巨視的および微視的断層パラメータから算出した震源時間関数（中村・宮武、2000）も示してある。構築モデルを用いた強震動予測（3D-FDM）結果の一例として、図 8 に最大速度分布を示す。図 8 に示されるように、破壊開始点の北東では構築したモデルによる予測結果の方が推本モデルによる予測結果と比較して、最大速度は大きくなっている。図 9 に図 8 に示す破線上の各観測点の工学的基盤上における EW 成分の速度波形（周期 1 秒以上）を示す。図 9 に示されるように、立川断層の北東 3~6 km の地点では、S 波初動の後に振幅の大きな後続位相が現れており、これらの結果から立川断層帯周辺に存在する地震基盤の不整形構造が強震動予測結果に大きく影響することが明らかとなった。

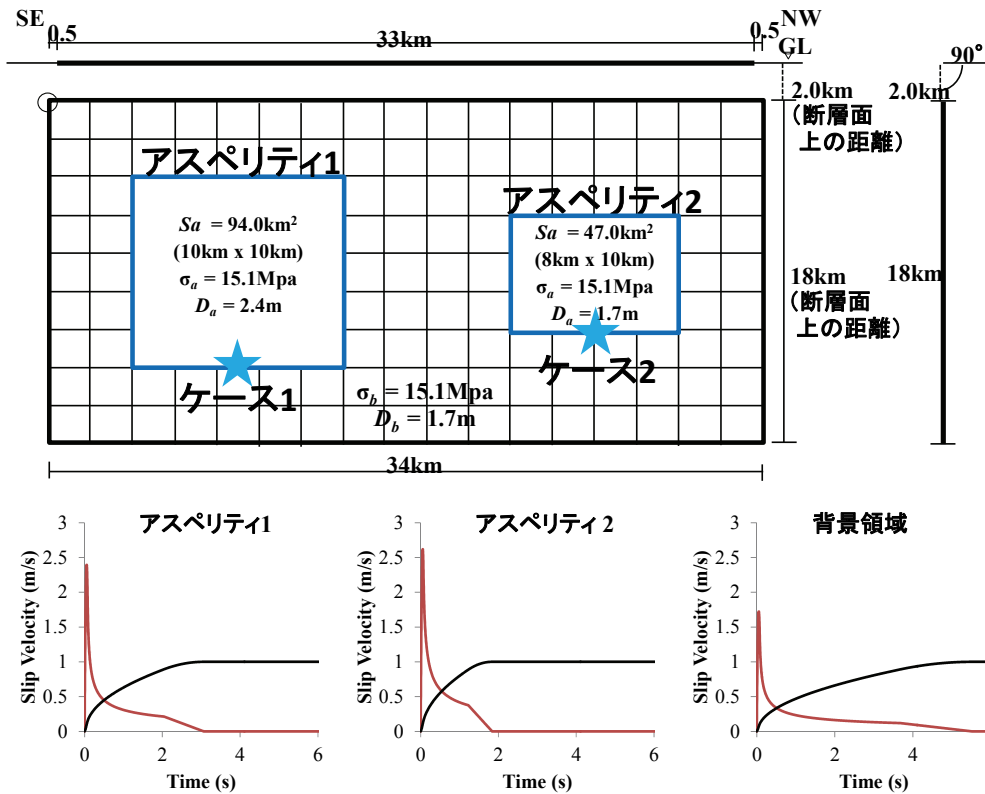


図7 「全国地震動予測地図」(地震調査研究推進本部地震調査委員会、2010)における立川断層帯の地震動シミュレーション用の震源断層モデルと震源時間関数

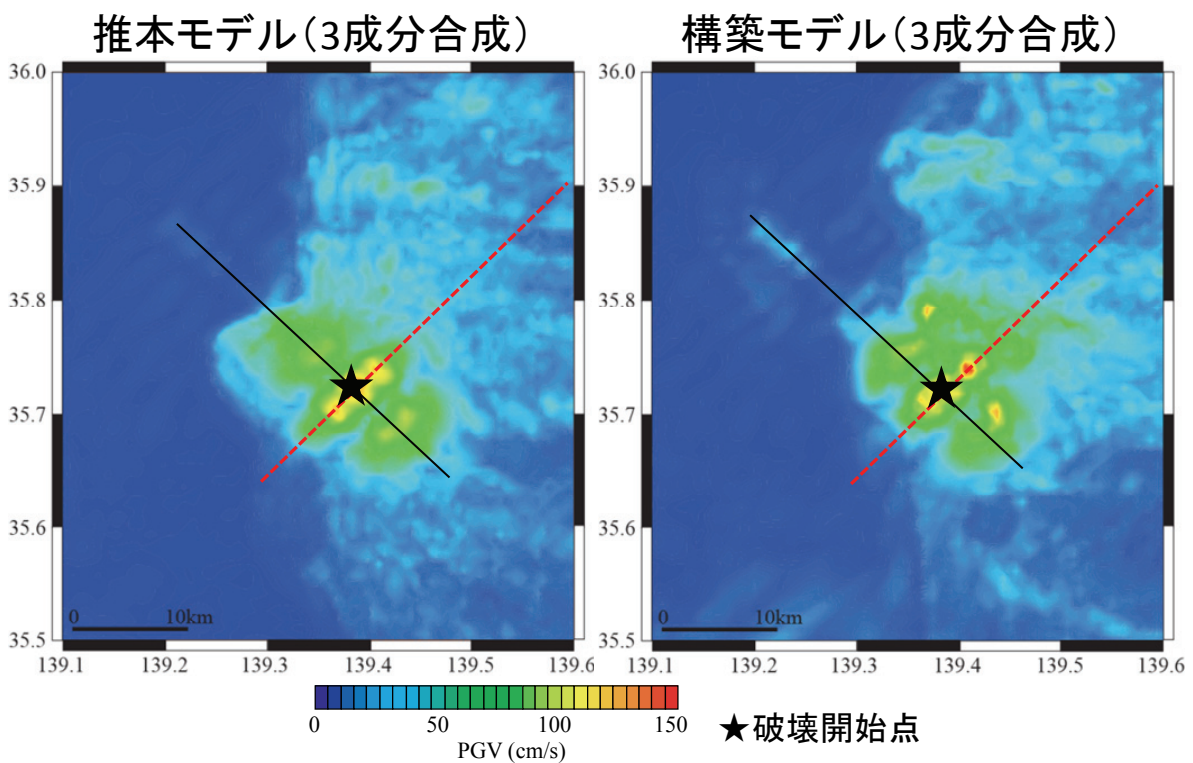


図8 推本モデルと構築モデルによる強震動予測結果の比較(最大速度分布)
黒線：地表面における断層線 赤点線：速度波形の比較測線

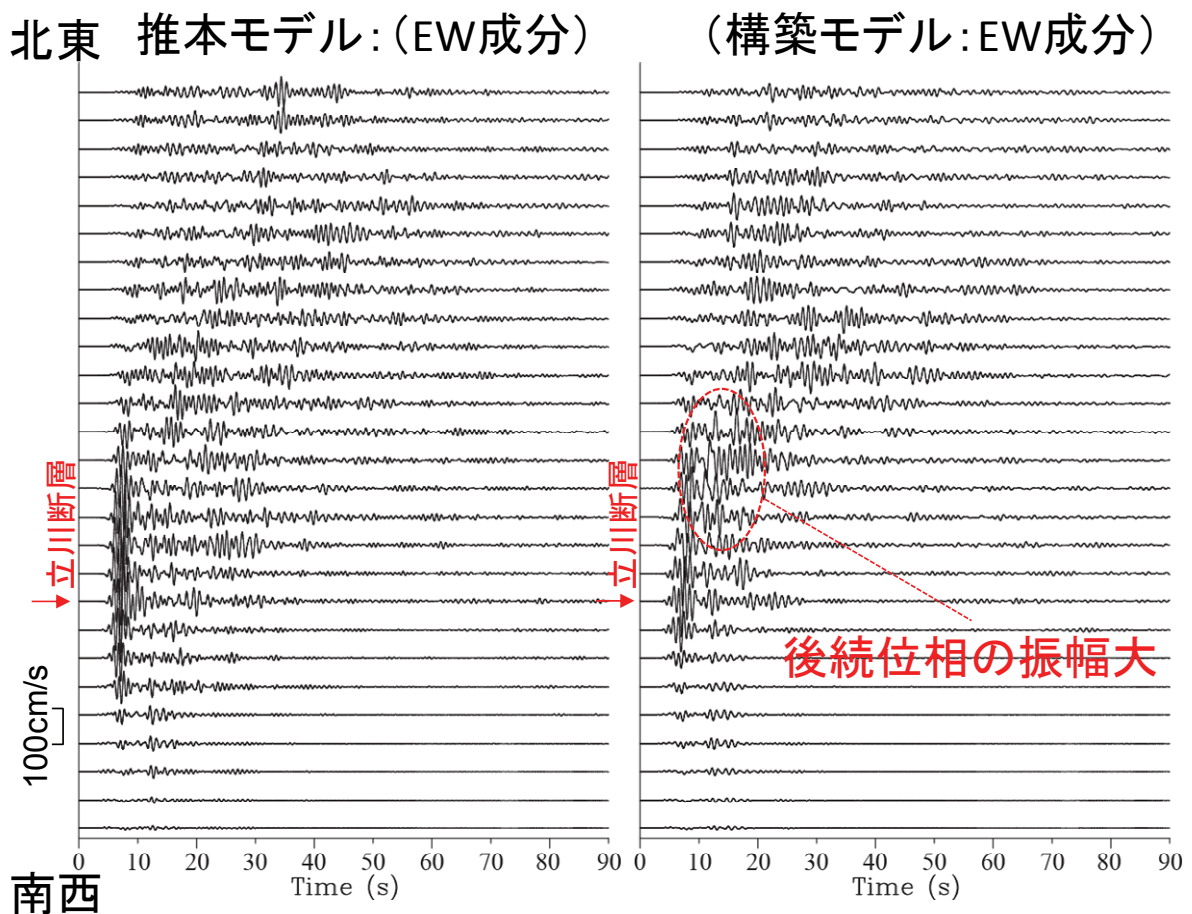


図9 推本モデルと構築モデルによる強震動予測結果の比較
(工学的基盤における速度波形：EW成分)

3) 立川断層帯における震源断層モデルの構築

サブテーマ①および②による成果を考慮して本断層帯の特性化震源モデルの構築を行った。サブテーマ①および②による浅層反射およびトレンチ調査等によって、金子台～箱根ヶ崎では活断層の存在は明らかになっており、名栗断層および立川断層の南部では中期更新世以降の活動は認められていない。したがって、図10に示すように、新たに本断層帯を金子台～箱根ヶ崎を中心とした断層長さ17 km、断層幅14 kmの断層モデルの構築を行った。断層の平均走向、傾斜角およびすべり角はサブテーマ①および②の調査より、それぞれ 314° 、 70° および 26.6° （縦横比1:2）である。各断層パラメータは、強震動予測レシピ（地震調査研究推進本部地震調査委員会、2009）による「震源断層を特定した地震の強震動予測手法」に準拠し設定した。表1に設定した各断層パラメータを示す。断層モデルの上端は本研究による地震基盤上面深度より、3 kmと設定した。本断層帯におけるアスペリティは1つとし、金子台～箱根ヶ崎にかけた長さ10 km、幅6 kmを設定した。アスペリティの平均すべり量はサブテーマ②の狭山神社ピットにおける調査結果から2.0 mと設定した。

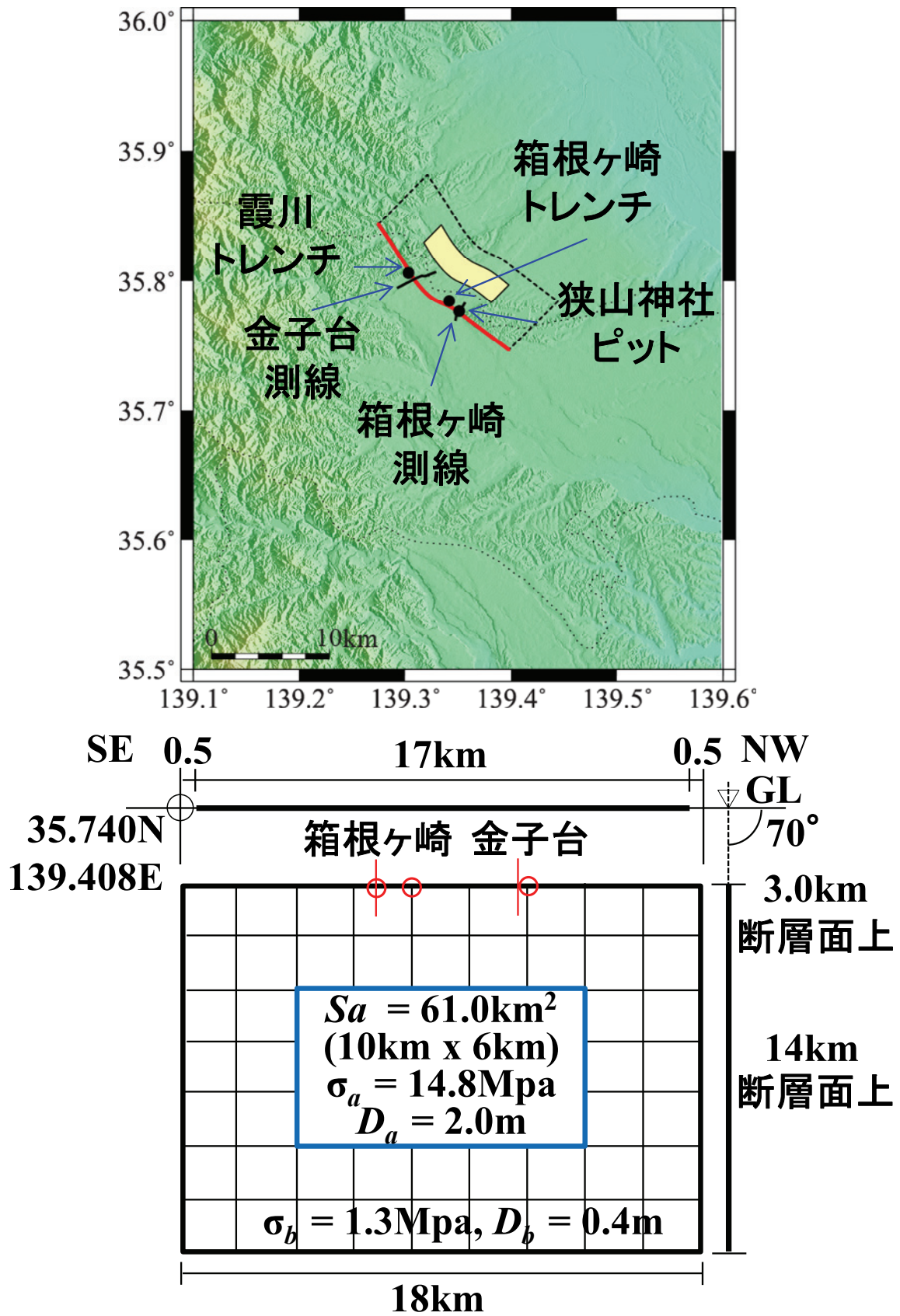


図 10 本断層帯の位置と本断層帯で発生する地震の特性化震源モデル

表 1 各断層パラメータ

基本パラメータ			
活断層長さ L(km)	サブテーマ①および②による成果	17 km	
マグニチュード M	$M = (\log L + 2.9) / 0.6$	6.9	
巨視的震源パラメータ			
断層モデルの原点		35.740 N 139.408 E	
走向(平均) θ	サブテーマ①および②による成果	314.0 °	
傾斜角(平均) δ	サブテーマ①および②による成果	70 °	
すべり角 γ	サブテーマ①および②による成果	26.6 °	
地震モーメント M_0	$\log M_0 = 1.17M + 10.72$	5.90E+18 Nm	
モーメントマグニチュード M_w	$M_w = (\log M_0 - 9.1) / 1.5 \Delta \sigma$	6.4	
断層モデル上端深さ	本研究による成果	3 km	
断層モデル長さ L_{model}		18 km	
断層モデル幅 W_{model}	地震発生層の厚さを考慮	14 km	
断層モデル面積 S_{model}	$S_{model} = L_{model} \times W_{model}$	252 km ²	
静的応力降下量 $\Delta \sigma$	$\Delta \sigma = 7/16 \cdot M_0 / R^3$	3.6 MPa	
平均すべり量 D_{model}	$D_{model} = M_0 / (\mu \cdot S_{model})$	0.9 m	
短周期レベル A	$A = 2.46 \cdot 10^{17} \times M_0^{1/3}$	9.58E+18 Nm/s ²	
微視的震源パラメータ			
アスペリティ	面積 S_a	$S_a = \pi r^2, r = 7\pi/4 \cdot M_{0a} / (A \cdot R) \cdot \beta^2$	61 km ²
	平均すべり量 D_a	サブテーマ①および②による成果	2.0 m
	実効応力 σ_a	$\sigma_a = \Delta \sigma_a = 7/16 \cdot M_{0a} / (r^2 \cdot R)$	14.8 MPa
	地震モーメント M_{0a}	$M_{0a} = \mu \cdot D_a \cdot S_a$	3.31E+18 Nm
	計算用面積		60 km ²
	計算用長さ $La1$	サブテーマ①および②による成果	10 km
	計算用幅 $Wa1$		6 km
背景領域	面積 S_b	$S_b = S_{model} - S_a$	191 km ²
	平均すべり量 D_b	$D_b = M_{0b} / (\mu \cdot S_b)$	0.4 m
	実効応力 σ_b	$\sigma_b = (D_b / W_b) \cdot (\pi^{1/2} / D_a) \cdot r \cdot \sum \gamma_i^3 \cdot \sigma_a$	1.3 MPa
	地震モーメント M_{0b}	$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$	2.59E+18 Nm
	計算用面積		192 km ²

3) 立川断層帯周辺地域における強震動予測シミュレーション

立川断層帯周辺地域における詳細法による強震動予測シミュレーションでは、図 11 に示すように周期 1 秒以上の長周期帯域を 3 次元差分法により、周期 1 秒以下の短周期帯域を統計的グリーン関数によるハイブリッド法を用いた。3 次元差分法では、図 10 に示す南北 55 km×東西 45 km×深さ 55 km 程度を対象として、100 m 格子により図 6 に示す深部地下構造を用いてモデル化した。なお、10km 以深における地殻・マンツルの構造は推本モデルをそのまま使用している。統計的グリーン関数では、各小断層からの入射角を考慮して次式に示す加速度フーリエスペクトルから加速度波形を求め、工学的基盤上において合成を行った (Boore, 1983 ; 釜江・他、1990)。

$$D(\omega) = \frac{R_{\theta\phi} \cdot FS \cdot PRTITN}{4\pi\rho\beta^3} \cdot M_0 \cdot \frac{\omega^2}{1+(\omega/\omega_c)^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+(\omega/\omega_{max})^{2s}}} \cdot \frac{e^{-\omega R/2Q\beta}}{R} \cdot G(\omega)$$

ここに、 $R_{\theta\phi}$ はラディエーションパターン (釜江・他、1990)、 FS は自由表面による増幅、 $PRTITN$ は水平 2 成分へのエネルギーの分割、 ρ は密度、 β は S 波速度、 ω_c はコーナー周波数、 ω_{max} は高振動数遮断周波数、 s は係数 (Boore, 1983)、 R は震源距離、 Q は Q 値、 M_0 は地震モーメント、 G は地震基盤から工学的基盤までの増幅率である。

また、経時特性は次式に示す佐藤・他 (1994) を用いている。

$$E(t) = \begin{cases} \left(\frac{t-t_a}{t_b-t_a} \right)^2 & (t_a \leq t < t_b) \\ 1 & (t_b \leq t < t_c) \\ \exp \left\{ -\frac{(\ln 10) \cdot (t-t_c)}{t_d-t_c} \right\} & (t_c \leq t < t_d) \end{cases}$$

ここに、 t_b-t_a および t_d-t_c は、地震動の立ち上がり部および主要動部における時間である。

強震動予測における不確定要素として、アスペリティの位置、応力降下量、破壊伝播速度および破壊開始点をパラメータとする表 2 に示す 81 ケースのシナリオによるシミュレーションを実施した。強震動予測シミュレーションにおける解析時間は 80 秒間とし、ハイブリッド法による接続周期帯域は周期 1~2 秒とした。

強震動予測結果の一例として、CASE1-1 による工学的基盤面における最大速度分布および震度分布を図 12 に示す。図 12 から断層の北東地域と南西地域では予測結果に大きな差異が認められる。すなわち、断層帯の北東地域では最大速度が 60 cm/s 以上、震度 5 強~6 弱となっているのに対し、断層帯の南西地域では最大速度が 20 cm/s 以下となり、震度も概ね 4~5 弱となっている。これは、本断層帯周辺における深部地盤構造が予測結果に大きく寄与しているためである。

本断層帯周辺地域における地表面の地震動算出のためには AVS30 (地下 30 m までの平均 S 波速度) に基づく地盤増幅特性の補正が必要となるため (地元・他、2015)、地元・他 (2015) による、微地形区分と AVS30 との関係から図 13 に示す強震動予測対象地域の AVS30 の分布を求め、次式に示される最大速度増幅率 AF (藤本・翠川、2006) を算出した。

$$\log AF = 2.367 - 0.852 \cdot \log AVS30$$

同図には強震動予測対象地域における最大速度増幅率の分布も示されており、本断層帯の北東から東にかけての地域では最大速度増幅率が大きくなっており、特に埼玉県南部においては1.5～1.7倍と顕著であることがわかる。

この最大速度増幅率を用いて算出したCASE1-1による地表面における最大速度分布および震度分布を図14に示す。図14に示す地表面における最大速度分布から、本断層帯の北東から東にかけての地域においては図12に示す工学的基盤上における最大速度分布と比較して概ね最大速度40 cm/s以上の範囲が広く分布しており、最大震度6強となる地域も存在する。また、予測結果の例として図15にK-NETおよびKiK-net観測点における速度波形およびフーリエスペクトルを示す。図15から、地表面における地震動は断層帯の南西から北東に向かって増幅されており、特に周期1秒付近の周期帯域が増幅されていくことがわかる。

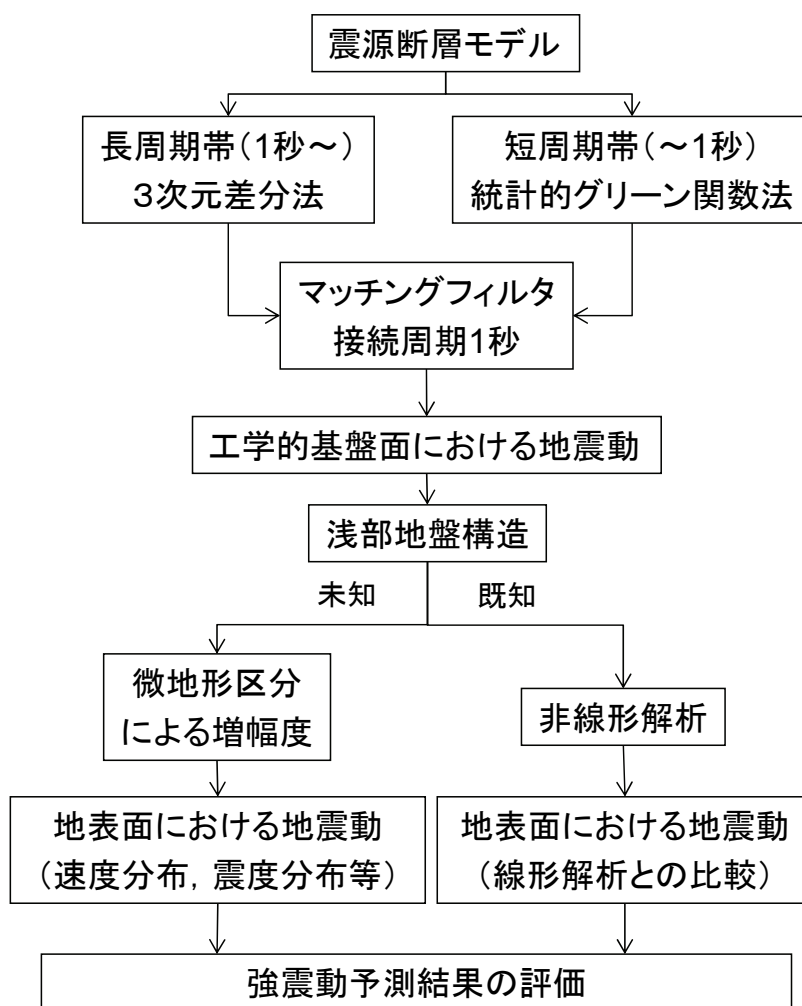


図11 強震動予測シミュレーションのフロー

表 2 強震動予測シミュレーションの各ケースにおける不確定要素のパラメータ

アスペリティ位置	応力降下量	破壊伝播速度	破壊開始点	CASE
Center 上端 7km (断層面上)	$\Delta\sigma=3.6\text{MPa}$	Vr=2.4km/s	North	1-1
			Central	1-2
			South	1-3
		Vr=2.7km/s	North	1-4
			Central	1-5
			South	1-6
		Vr=3.0km/s	North	1-7
			Central	1-8
			South	1-9
	$\Delta\sigma=5.4\text{MPa}$	Vr=2.4km/s	North	2-1
			Central	2-2
			South	2-3
		Vr=2.7km/s	North	2-4
			Central	2-5
			South	2-6
		Vr=3.0km/s	North	2-7
			Central	2-8
			South	2-9
	$\Delta\sigma=2.4\text{MPa}$	Vr=2.4km/s	North	3-1
			Central	3-2
			South	3-3
		Vr=2.7km/s	North	3-4
			Central	3-5
			South	3-6
		Vr=3.0km/s	North	3-7
			Central	3-8
			South	3-9

アスペリティ位置	応力降下量	破壊伝播速度	破壊開始点	CASE	アスペリティ位置	応力降下量	破壊伝播速度	破壊開始点	CASE
Upper 上端 3km (断層面上)	$\Delta\sigma=3.6\text{MPa}$	Vr=2.4km/s	North	4-1	Lower 上端 11km (断層面上)	$\Delta\sigma=3.6\text{MPa}$	Vr=2.4km/s	North	7-1
			Central	4-2				Central	7-2
			South	4-3				South	7-3
		Vr=2.7km/s	North	4-4			North	7-4	
			Central	4-5			Central	7-5	
			South	4-6			South	7-6	
		Vr=3.0km/s	North	4-7			North	7-7	
			Central	4-8			Central	7-8	
			South	4-9			South	7-9	
	$\Delta\sigma=5.4\text{MPa}$	Vr=2.4km/s	North	5-1		Vr=2.4km/s	North	8-1	
			Central	5-2			Central	8-2	
			South	5-3			South	8-3	
		Vr=2.7km/s	North	5-4		Vr=2.7km/s	North	8-4	
			Central	5-5			Central	8-5	
			South	5-6			South	8-6	
		Vr=3.0km/s	North	5-7		Vr=3.0km/s	North	8-7	
			Central	5-8			Central	8-8	
			South	5-9			South	8-9	
	$\Delta\sigma=2.4\text{MPa}$	Vr=2.4km/s	North	6-1		Vr=2.4km/s	North	9-1	
			Central	6-2			Central	9-2	
			South	6-3			South	9-3	
		Vr=2.7km/s	North	6-4		Vr=2.7km/s	North	9-4	
			Central	6-5			Central	9-5	
			South	6-6			South	9-6	
		Vr=3.0km/s	North	6-7		Vr=3.0km/s	North	9-7	
			Central	6-8			Central	9-8	
			South	6-9			South	9-9	

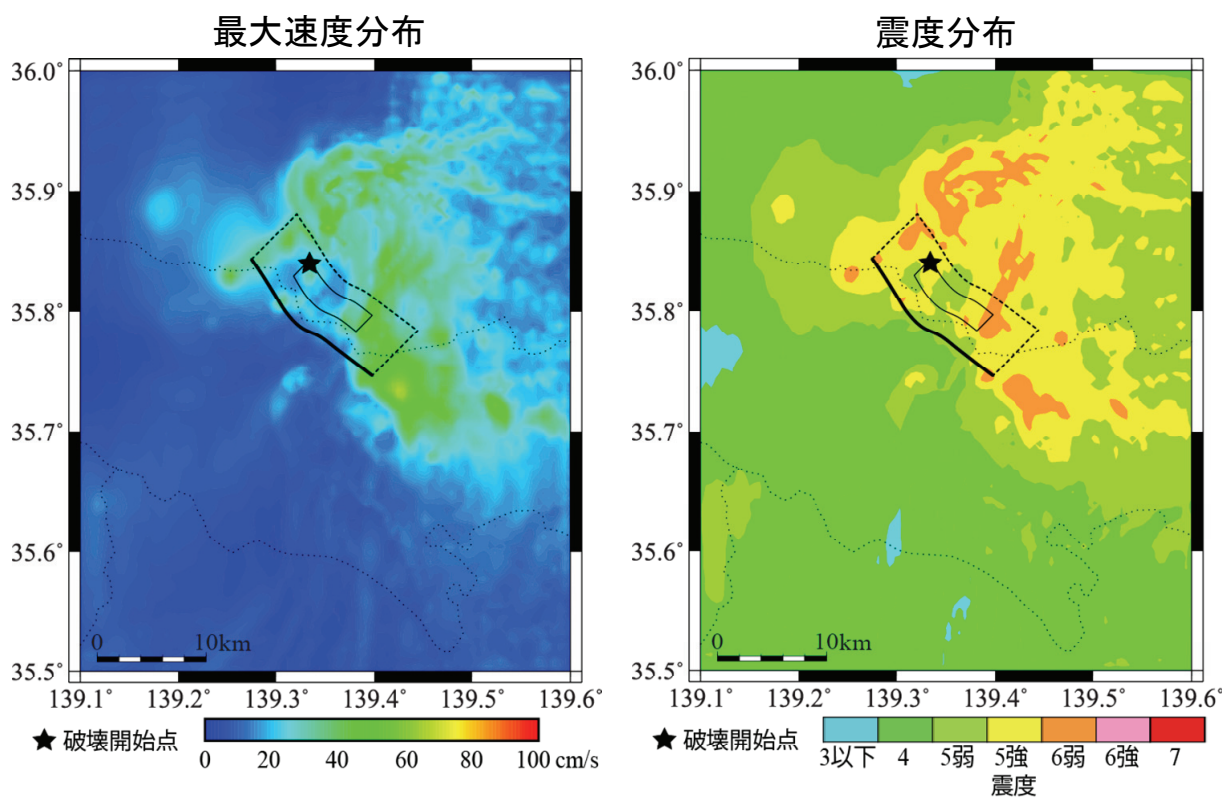


図 12 CASE1-1 による工学的基盤面における最大速度分布（左）と震度分布（右）

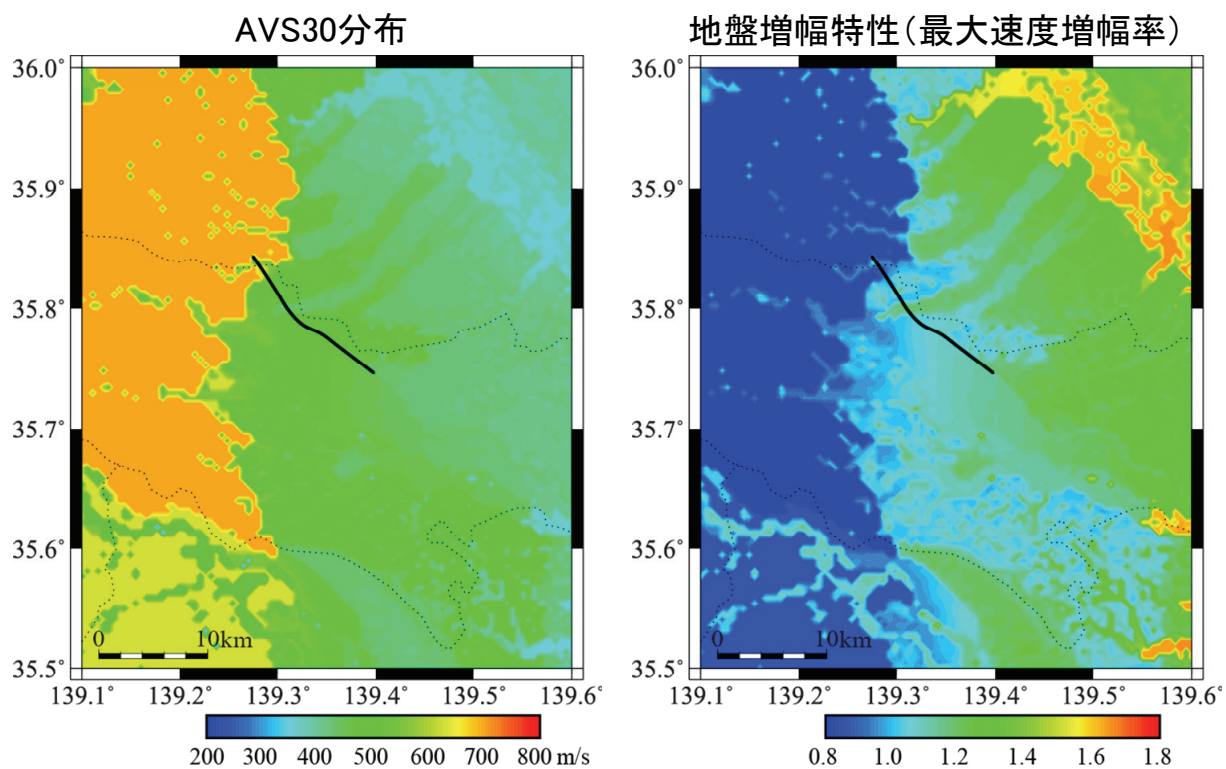


図 13 CASE1-1 による工学的基盤面における最大速度分布（左）と震度分布（右）

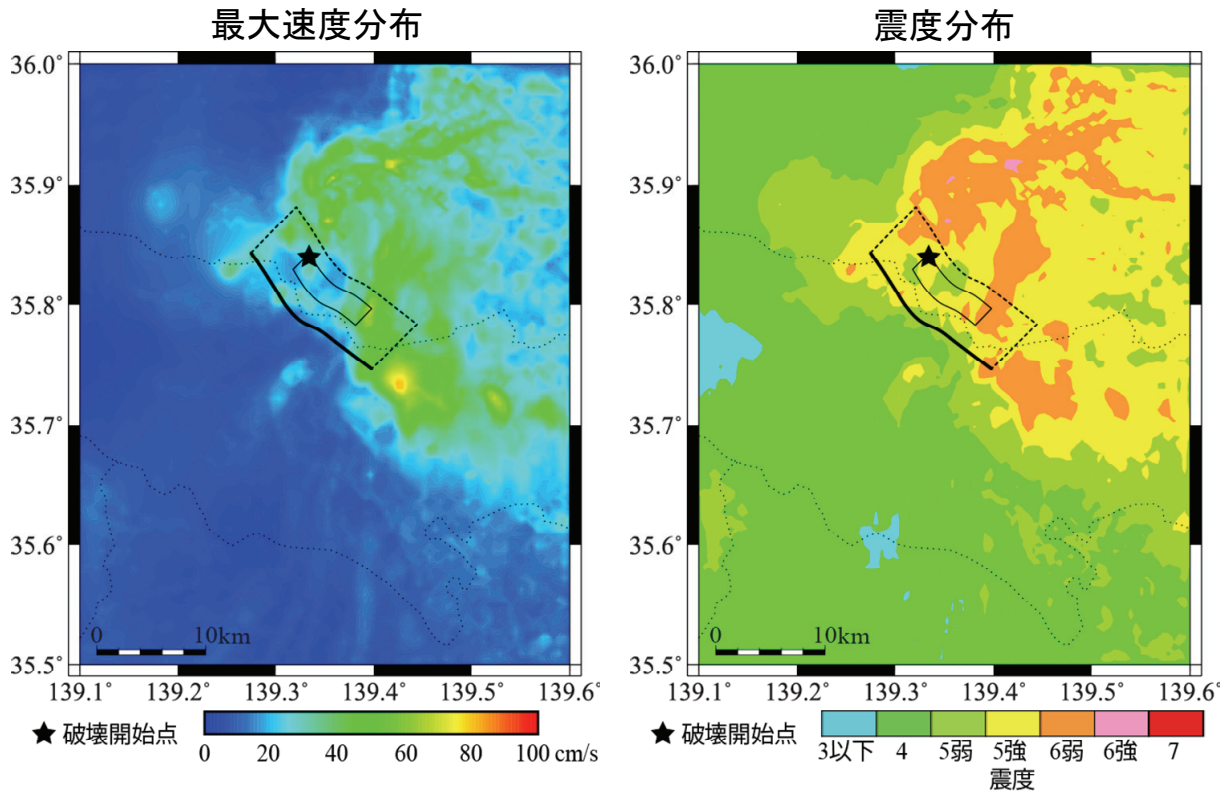


図 14 CASE1-1 による地表面における最大速度分布（左）と震度分布（右）

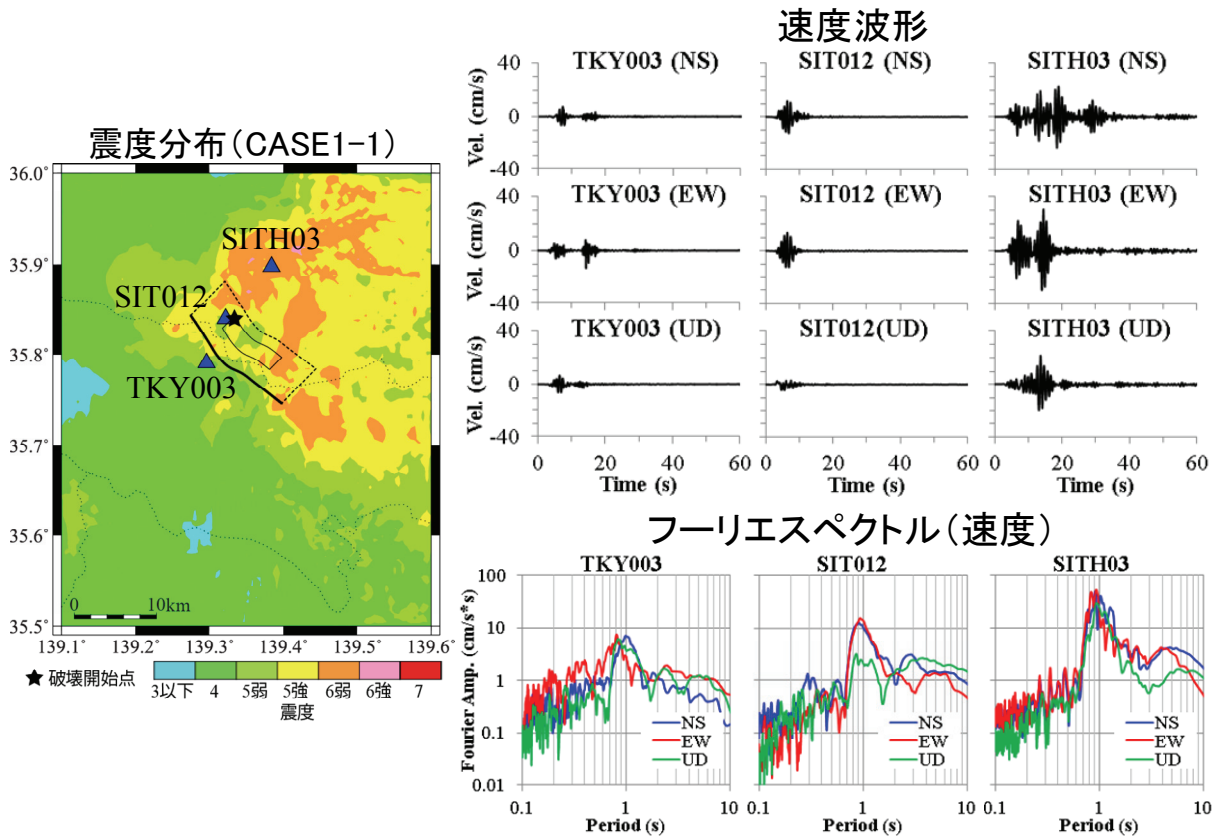


図 15 CASE1-1 による地表面における速度波形とフーリエスペクトルの例

次に、不確定要素としての震源パラメータの差異が地表面における予測結果に与える影響についての検討を行った。図 16 に各震源パラメータを変化させた場合における予測結果（震度分布）の比較を示す。図 16 に示されるよう、アスペリティがモデル上部にある場合に最も予測震度が大きくなる。応力降下量および破壊伝播速度は大きくなるほどその値に比例して全体的に予測震度は大きくなる傾向にあるが、最大震度となる箇所といった分布の性状が大きく異なることはない。これに対して、破壊開始点が異なると最大震度には大きな変化がないが、震度分布の性状、すなわち最大震度となる箇所が異なる。したがって、破壊開始点の設定には注意を要する事が明らかになった。

図 17 に全 81 ケースのシナリオによる予測結果の平均値による最大速度分布および震度分布を示す。図 17 に示すように、予測結果の平均値における最大速度は本断層帯の北東地域において 130 cm/s 程度であり、最大震度は 6 強となっている。

また、全 81 ケースのシナリオによる予測結果のばらつきの評価の一例として KiK-net 観測点である SITH03 における評価結果を図 18 に示す。なお、図中の sample は SITH03 におけるシナリオ数（81 ケース）であり、 x^2 は正規分布の最大値であり、大きくなるほど分布が中央値にあり、予測結果に及ぼすばらつきが少ないことを表している。同図の速度応答スペクトルが示すように、アスペリティの位置および応力降下量によるばらつきが大きく、特に周期 1 秒以上の周期帯域で大きくばらつく傾向にある。これに対して、破壊伝播速度は他の震源パラメータと比較して、ばらつきが小さい傾向にある。

図 19 に全 81 ケースのシナリオによる予測結果の $\pm\sigma$ （最大速度および計測震度）を示す。図 19 から示すように、予測結果の $\pm\sigma$ は本断層帯の北東地域において最大となり、最大速度は平均値の約 2 倍程度、計測震度で 1 程度である。図 20 に全 81 ケースのシナリオによる予測結果の平均値 $\pm\sigma$ による震度分布を示す。図 20 から、本断層帯の北東地域においては予測結果の平均値 $+\sigma$ では最大震度は 7 になるが、平均値 $-\sigma$ では最大震度は 5 強となり、全体的な傾向として震度階で 3 程度ばらつくことがわかる。

最後に、図 21 に示す浅部地盤探査の実施（地元・他、2015）によって浅部地盤構造が明らかとなっており強震時において地盤の非線形化する可能性のある 50 地点について等価線形化法による解析を実施し、非線形応答の評価を行った。等価線形化法解析では次式で示す Hardin-Drnevich モデルを用いており、繰返しせん断特性のモデルパラメータは表 3 に示す古山田・他（2003）を用いた。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \gamma_{0.5}}, \quad h = h_{\max} \left(1 - \frac{G}{G_0} \right)$$

ここに、 G/G_0 はせん断剛性比、 h は減衰定数、 $\gamma_{0.5}$ は h_{\max} は最大減衰定数である。なお、解析に用いた浅部地盤構造における各層のパラメータは、各地点における微地形区分と S 波速度に対応する土質から設定している。図 22 に解析結果の一例として、AK1 地点における速度波形を示す。図 22 が示すように、地盤が非線形化を起こすことにより、S 波主要動において最大振幅が 1/2 程度となっている。

また、全地点において等価線形化法解析結果と線形解析結果と比較することにより、地盤が非線形化した場合における最大速度および計測震度と浅部地盤における AVS30 との関係についての検討を行った。図 23 に最大速度および計測震度に対しての等価線形化法

解析結果と線形解析結果による比較を、図 24 に、線形解析結果に対する等価線形化法解析結果のそれぞれの比と AVS30 との関係をそれぞれ示す。図 23 から、最大速度が大きくなるほど非線形化が大きく、図 24 から AVS30 が小さいほど、地盤の非線形化の影響が大きいことが明らかであり、地盤が非線形化した際には、浅部地盤構造（AVS30）が最大速度および SI 値に及ぼす影響が大きいという傾向があることを示唆している。

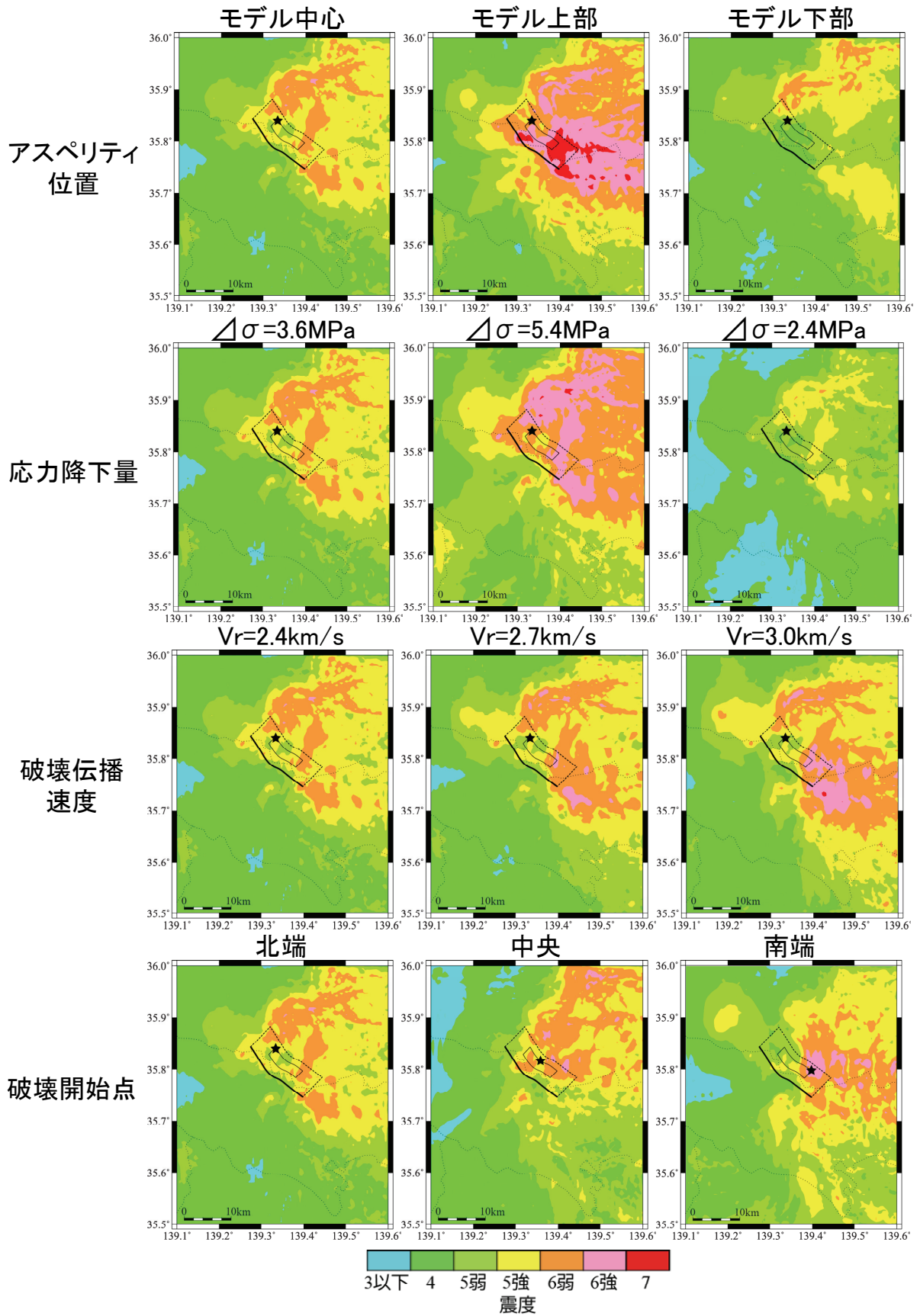


図 16 震源パラメータの違いによる予測結果の比較（震度分布）

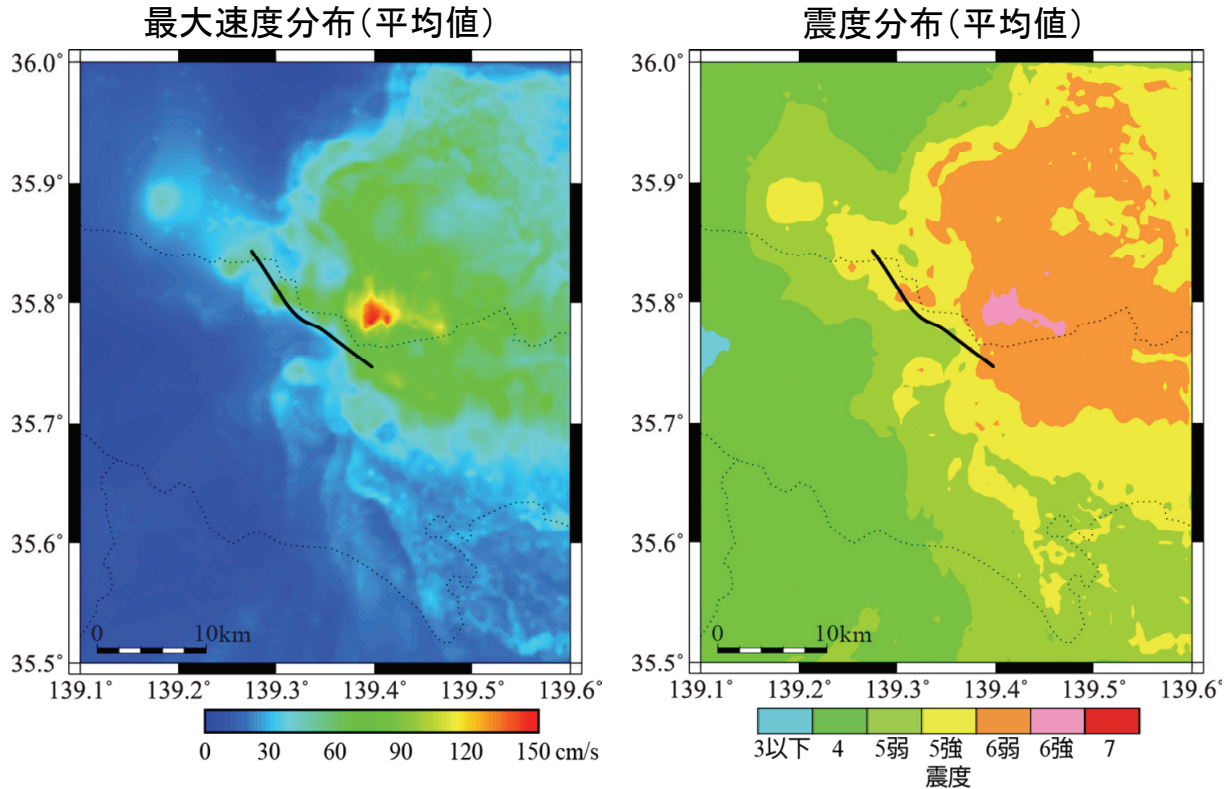


図 17 全 81 ケースのシナリオによる予測結果の平均値
(左：最大速度分布 右：震度分布)

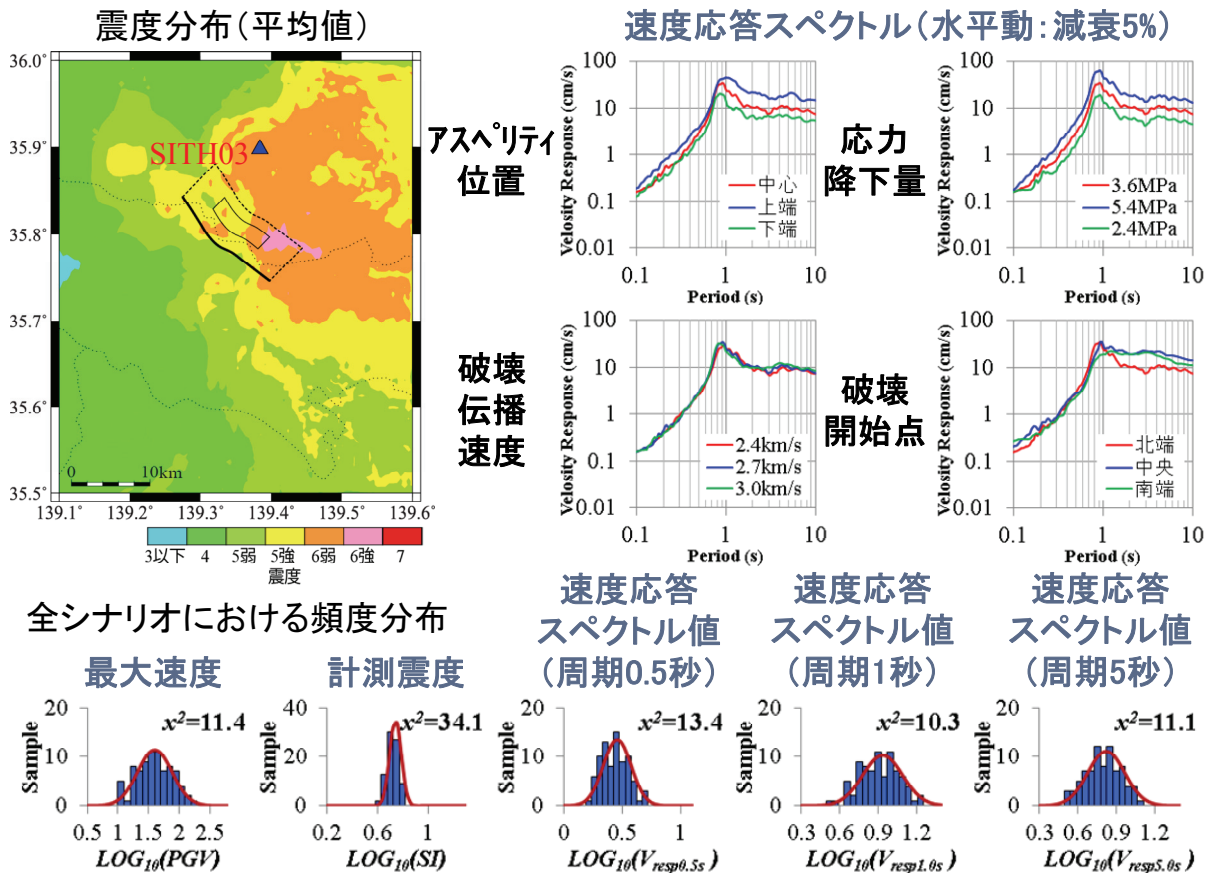


図 18 予測結果のばらつき評価の例 (KiK-net 日高)

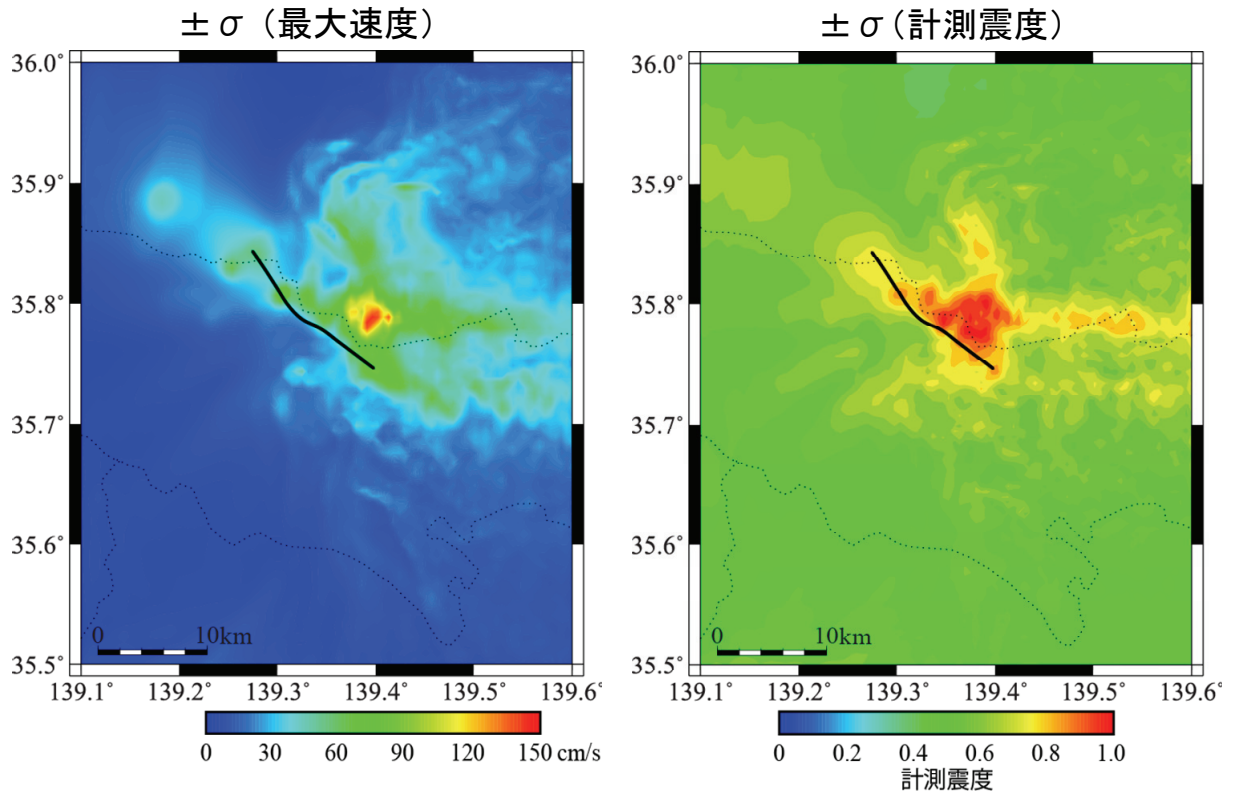


図 19 全 81 ケースのシナリオによる予測結果の±σ (左：最大速度分布 右：震度分布)

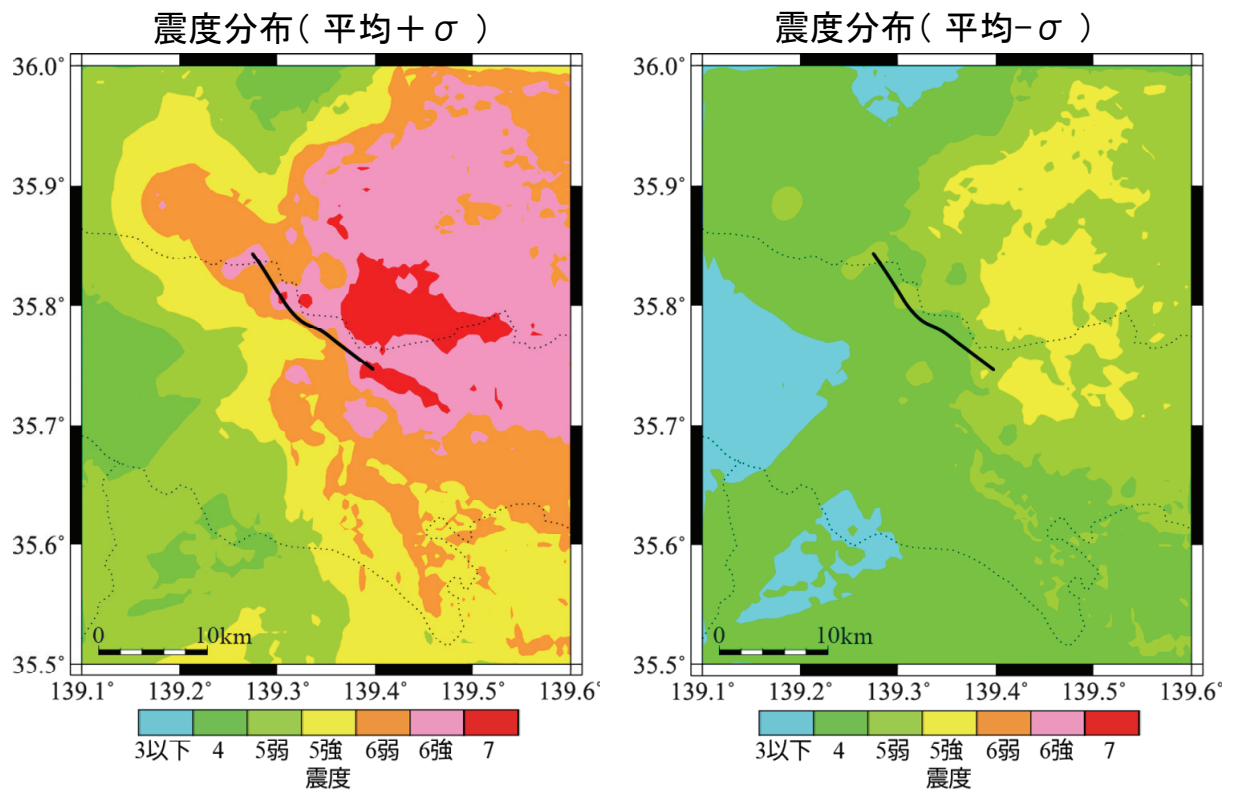


図 20 全 81 ケースのシナリオによる予測結果の平均値±σ (震度分布)

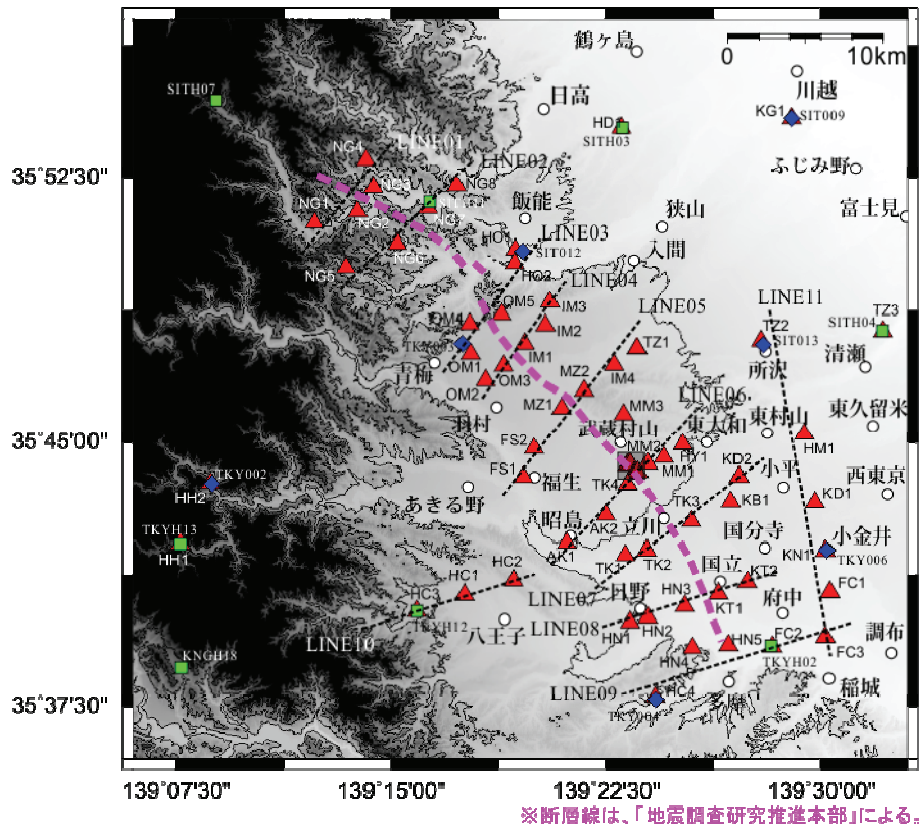


図 21 立川断層帯（地質調査所、1997）周辺地域における浅部を対象とした微動アレイ探査地点（地元・他、2015）

表 3 繰返しせん断特性のモデルパラメータ（東京）

地層	土質	拘束圧 (kPa)	間隙比 e	塑性指数 I_p (%)	細粒分含有率 F_c (%)	S波速度 V_s (m/s)	基準ひずみ $\gamma_{0.5}$	最大減衰定数 h_{max}
沖積層	粘土層	92	1.77	30.6	82.1	150	0.0019	0.16
	砂質土	74	0.89	-	17.2	190	0.0009	0.21
洪積層	ローム	48	3.71	44.7	96.1	190	0.0019	0.14
	粘性土	174	1.45	37.4	91.5	270	0.0020	0.13
	砂質土	167	0.91	-	10.4	370	0.0009	0.21

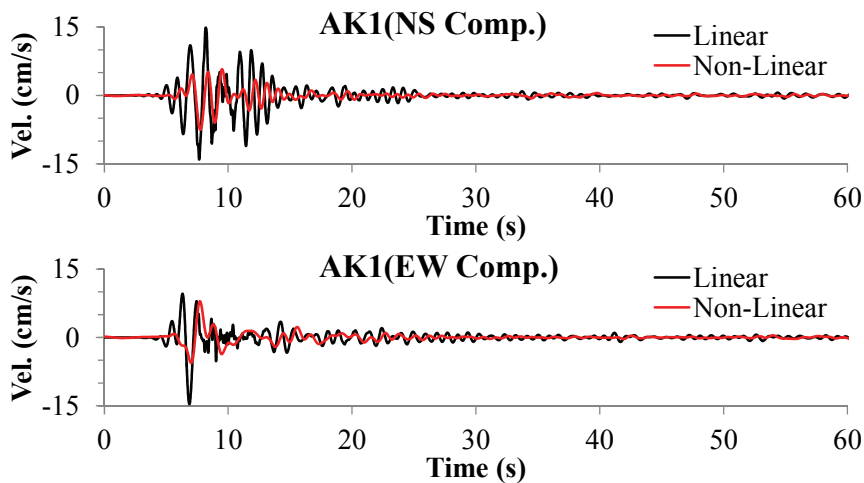


図 22 AK1 地点における等価線形化法による解析結果

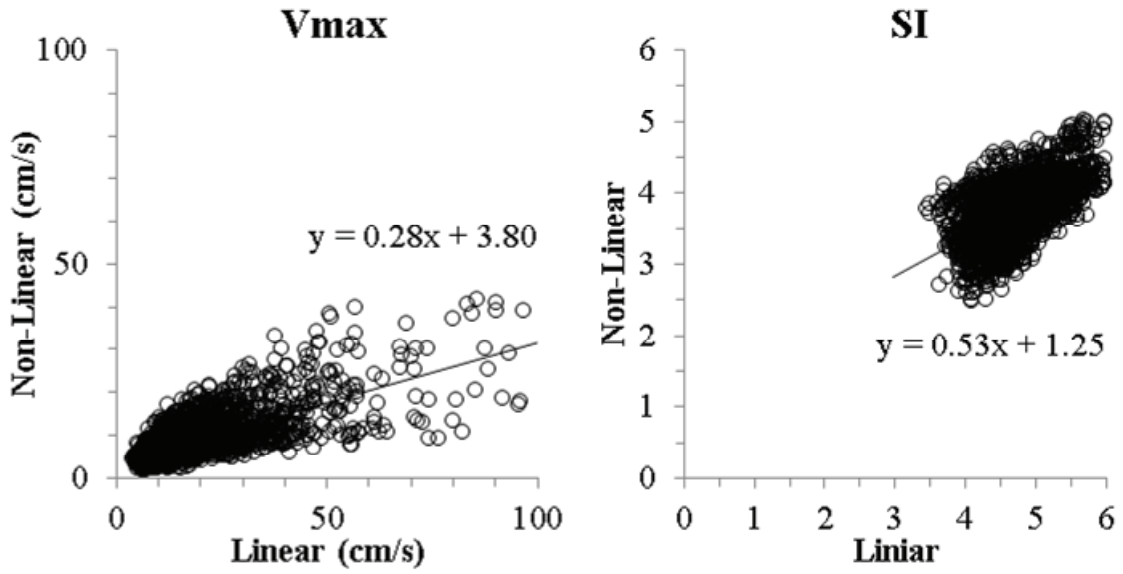


図 23 等価線形化法による解析結果と線形解析結果の比較（左：最大速度 右：SI 値）

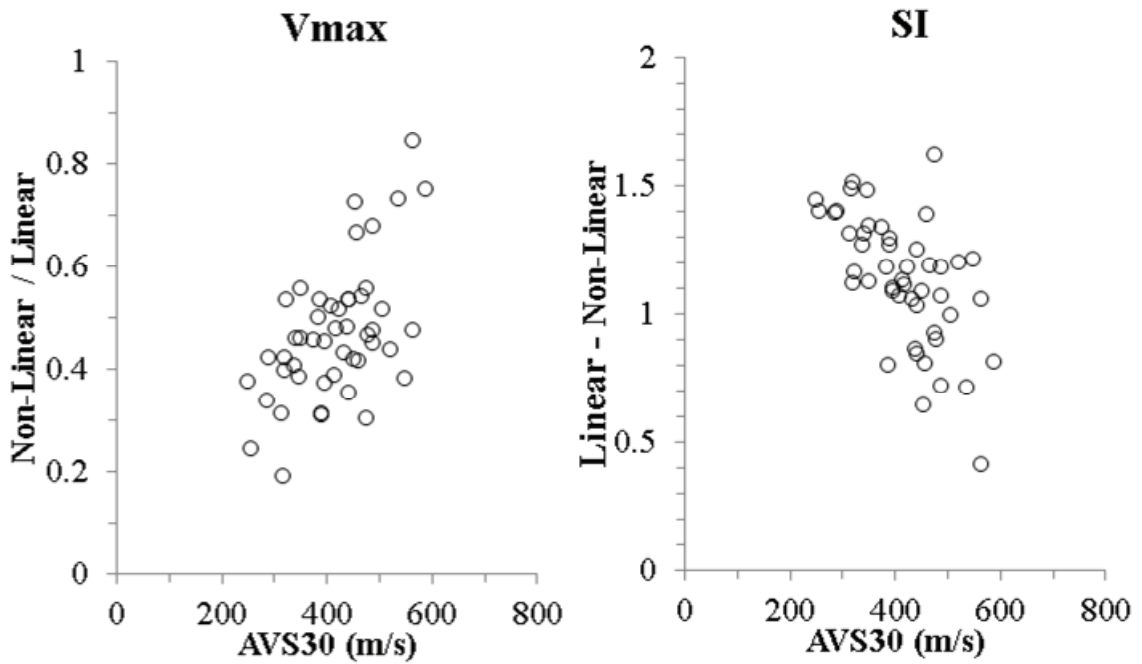


図 24 地盤の非線形化と AVS30 との関係（左：最大速度 右：SI 値）

(d) 結論

立川断層帯周辺地域における強震動予測のための3次元深部地盤構造モデルの精度向上を目的として、サブテーマ①bによる立川臨時観測および首都圏地震観測網(MeSO-net)観測点(酒井・平田、2009)における地震記録のレシーバー関数法解析と、微動アレイおよび微動単点観測による追加観測の結果を昨年度の結果に統合することにより、昨年度よりさらに詳細な3次元深部地盤構造モデルの構築を行った。構築した3次元モデルと推本による3次元モデルを用いて強震動予測を実施し、既存の強震動予測での推本断層モデルにおける両者の予測結果に対する比較検討を行った結果、立川断層帯周辺における地震基盤の構造が大きく影響していることが明らかとなった。次に、サブテーマ①および②による成果を考慮して本断層帯の震源断層モデルの構築を行った。構築した3次元地下構造モデルと震源断層モデルを用いて、81ケースのシナリオを対象とした地震動予測を実施し、平均値およびばらつき(±σ)の評価を行い、本断層帯周辺地域における地表面の最大速度および震度分布を明らかにした。地震動予測結果の平均値における最大速度は本断層帯の北東地域において130 cm/s程度であり、最大震度は6強となった。また、本断層帯の北東地域においては予測結果の平均値+σでは最大震度は7になるが、平均値-σでは最大震度は5強となり、全体的な傾向として震度階で3程度ばらつくことがわかった。最後に、浅部地盤探査の実施によって浅部地盤構造が明らかな50地点について等価線形化法による解析を実施し、地盤が非線形することによる地震動への影響についての評価を行うことにより、浅部地盤におけるAVS30(地下30mまでの平均S波速度)との関係について明らかにした。

(e) 引用文献

Boore, D.M. : Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motion Based on Seismological Models of the Radiated Spectra, Bull. Seism. Soc. Am., 73, No.6, 1865-1894, 1983.

地元孝輔・佐口浩一郎・山中浩明：微動アレイ探査による立川断層帯周辺における表層地盤のS波速度構造モデルの推定, 日本地震工学論文集, Vol.15, No.1, 81-100, 2015.

藤本一雄・翠川三郎：日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均S波速度分布の推定, 日本地震工学会論文集, Vol.3, No.3, 13-27, 2003.

地質調査所：50万分の1活構造図, 8, 東京, 第2版, 1997.

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」2010年版,
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/10_yosokuchizu/k_dansomodel.pdf.

地震調査研究推進本部地震調査委員会：「長周期地震動予測地図」2012年試作版,
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/index.htm

地震調査研究推進本部地震調査委員会：付録3 震源断層を特定した地震の強震動予測手法(「レシピ」), http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_yosokuchizu/g_furoku3.pdf.

釜江克宏・入倉孝次郎・福知保長：地域的な震源スケーリング則を用いた大地震(M7級)のための設計用地震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 416, 57-70, 1990.

古山田耕司・宮本裕司・三浦賢治：多地点での原位置採取試料から評価した表層地盤の非線形特性, 地盤工学研究発表会, pp.2077-2078, 2003.

- 中村洋光・宮武隆：断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式,
地震 2,53,1-9,2000.
- 酒井慎一・平田 直：首都圏地震観測網の設置計画,地震研究所彙報, 84, 57-69, 2009.
- 佐藤智美・川瀬博・佐藤俊明：ボアホール観測記録を用いた表層地盤同定手法による工学的
基盤波の推定及びその統計的経時特性,日本建築学会構造系論文報告集, 461, 19-28,
1994.