

第 2 章 長周期地震動作成手法の改良

2-1 背景・目的

2011 年 3 月 11 日に Mw9.0 の東北地方太平洋沖地震が発生した。本章は、この地震を踏まえて、長周期地震動作成手法の改良を行うことを目的とする。

はじめに、平成 22 年度までに作成している、減衰定数 5% の擬似速度応答スペクトルと群遅延時間の平均値と標準偏差の経験式に基づき、2011 年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動のシミュレーションを行い、経験式の適用性と課題を整理する。

次に、その結果を踏まえるとともに、余震等の記録を追加して、長周期地震動の経験式の改良を行う。

最後に、工学的基盤波の作成に関して記述する。

2-2 旧経験式による東北地方太平洋沖地震の長周期地震動の試算

2-2-1 はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、多数の地震観測点で記録が観測されている。佐藤(2011)、清水建設(2011)では、気象庁(2011)の遠地実体波を用いた震源インバージョン結果に基づき、3つの断層からなる連動型の震源モデルを設定し、旧経験式(国土交通省, 2010)に基づき、2011年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動のシミュレーションを行っている。この断層モデルは、スケーリングモデルやカスケードモデルに基づいたものではない。ここでは、断層モデルを、カスケードモデルを適用して設定し、長周期地震動の試算を行ない、課題を整理する。

2-2-2 断層モデルの設定

経験式に基づく長周期地震動作成フローを図 2.2-1 に示す。連動型地震に対して、ある地点で長周期地震動を計算するために必要なパラメータは、各断層の地震モーメント M_0 、各断層からの断層最短距離、各断層の破壊開始点からの震源距離、各断層の破壊開始時間差である(佐藤・他, 2010)。したがって、各断層の巨視的断層パラメータと破壊開始時間差を設定する必要がある。

複数の断層からなる連動型地震の断層パラメータを設定する際の考え方としてスケーリングモデルとカスケードモデルがある(例えば、栗山・他, 2008)。スケーリングモデルでは、断層全体を1つの地震と考えてスケーリング則をあてはめるモデルである。カスケードモデルでは、各断層を独立の地震と考え、各断層にスケーリング則をあてはめるものである。

中央防災会議(2003)の東海・東南海・南海地震の3連動地震、東海・東南海地震の2連動地震に対する統計的グリーン関数法に基づく強震動計算では、カスケードモデルを仮定したことになる。また、今回はすでに発生し、 M_w が決まっている地震を対象とすることから、カスケードモデルを仮定し断層モデルを設定することとした。

(a) 断層全体の地震モーメント M_0 、断層の走向、傾斜角、剛性率

これまで、多くの震源モデルが提案されているが、ここでは、佐藤(2011)と同様に、気象庁(2011)に基づき以下のように設定した。

$$M_0=4.0E+22 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (M_w9.0)$$

走向 203°

傾斜角 10°

断層面は、気象庁の震源位置($N38^\circ 06.2'$ 、 $E142^\circ 51.6'$ 、深さ 24km)が載るように設定した。また、剛性率 μ は、S波速度 $4.0[\text{km/s}]$ 、密度 $3.0[\text{g/cm}^3]$ を仮定して、 $4.8E+10[\text{N/m}]$ と設定した。

(b) 各断層の位置・ M_0 、破壊伝播性状

図 2.2-2 には、気象庁の震源インバージョン結果を示す。主な破壊は図中の①、②、③で示されている3つに分けられる。そこで、3つの断層からなる連動型の震源モデルを設定することと

した。佐藤(2011)と同様に、3つの断層の地震モーメントは、震源時間関数に基づき、1:3:1に分担させた。各断層のモーメントマグニチュード M_w は、8.5、8.9、8.5になる。また、②、③の断層は、震源時間関数に基づき、破壊開始から40秒、100秒後に破壊するとした。

断層幅は、図2.2-2の気象庁(2011)のすべり量分布で、すべり量の小さい深い部分45kmと浅い部分15kmを除いた240kmとした。断層長さは、(1)で計算される断層面積と断層幅240kmから計算した。各断層の位置は、図2.2-2の気象庁(2011)のすべり量の大きい領域や、経験的グリーン関数法に基づく強震動生成領域を考慮して設定した。図2.2-3~5には、経験的グリーン関数法に基づく強震動生成領域のパラメータと位置を示す(入倉・倉橋,2011; 浅野・岩田,2011; 釜江・川辺,2011a, 2011b)。研究者により、強震動生成領域の数や位置やパラメータが異なるが、大局的にみると、最初の破壊が宮城県沖、次に宮城県沖(+岩手県沖)、次に福島県・茨城県沖に破壊が進んでいるといえる。また、破壊開始時間差も、気象庁(2011)の震源時間関数に基づき設定した値である、40秒、100秒後と大局的に類似している。3つの断層に対応すると考えられる強震動生成領域SGMAの M_0 の割合は、以下の通りである。

入倉・倉橋(2011) SGMA1:SGMA2+SGMA3:SGMA4+SGMA5=1 : 2.18 : 0.33

浅野・岩田(2011) SGMA1:SGMA2:SGMA3=1 : 1.78 : 0.82

釜江・川辺(2011b) SGMA1:SGMA2:+SGMA3SGMA4+SGMA5=1 : 2.23 : 0.94

②は①の2倍程度、③は①と同じかやや小さい。なお、背景領域がないため、これらの強震動生成領域の M_0 の合計は、全体の $M_0(4.0E+22 \text{ Nm})$ より小さくなっている。

第1・第2破壊開始点位置は、気象庁の震源位置とし、第3破壊開始点位置は、第1・第2破壊開始点位置から同心円状に破壊が進展すると仮定した場合に、最も早く到達する位置とした。

(c) その他の各断層の断層パラメータ

その他の各断層の断層パラメータは、地震調査研究推進本部(2009)に基づき、以下のようにして設定した、断層パラメータを表1、表2に、断層面位置(断層面の地表面投影図)を図2.2-6、図2.2-7に示す。①、②、③に対応する断層を、それぞれ、断層1、断層2、断層3としている。

各断層の静的応力降下量 $\Delta\sigma_i$ を設定し、(2)式により、各断層の面積 S_i を計算する(Eshelby, 1957)。

$$M_{0i}=16/(7\pi^{3/2})\Delta\sigma_i S_i^{3/2} \quad (1)$$

ここで、 i は、3つの断層に対する添え字(1~3)である。各断層の静的応力降下量 $\Delta\sigma_i$ としては、以下の2ケースを考えた。

$\Delta\sigma_i=1.4 \text{ MPa}$: Murotani et al.(2008)の海溝型地震の平均値

$\Delta\sigma_i=3.0 \text{ Mpa}$: 中央防災会議(2003)の東海・東南海・南海地震、これらの連動型地震

各断層の平均すべり量は、(2)式で計算される。

$$D_i=M_{0i}/(\mu S_i) \quad (2)$$

$\Delta\sigma_i=1.4 \text{ MPa}$ としたケースでは、断層全体の面積が大きく、断層2のみで気象庁(2011)の震源インバージョンに使われた全体の断層の面積程度となっている。 $\Delta\sigma_i=3.0 \text{ MPa}$ としたケースでは、気象庁(2011)の震源インバージョンに使われた全体の断層の面積程度である。そこで、シミュレ

ーション解析では、 $\Delta\sigma_i=3.0\text{MPa}$ としたケースで計算を実施した。

なお、経験式の最大 M_w は 8.2 であるから、各断層の M_w が 8.5、8.9、8.5 は経験式の外挿となる。

2-2-3 長周期地震動の試算

図 2.2-8 には、本震の K-NET、KiK-net(地表)観測点における観測記録の、周期 2、3、5、8 秒における減衰定数 5%の擬似速度応答スペクトル分布を示す。図 2.2-9 には、同じ観測点で計算したシミュレーション結果を示す。図 2.2-10 には、3 つの観測点での観測とシミュレーションの速度波形と擬似速度応答スペクトルの比較を示す。図 2.2-8、図 2.2-9 の比較から周期 2、3 秒では、東北地方では、シミュレーション結果は観測をほぼ説明している。関東地方では、シミュレーション結果の方が観測より大きい。周期 5、8 秒では、全体に観測のシミュレーション結果の方が観測より大きい。関東地方でシミュレーション結果の方が観測より大きい一因として、経験式における観測点での地盤増幅率の算出の際に、長周期地震動が卓越している 2004 年紀伊半島沖の地震の本震、前震、余震の記録が大きいためと考えられる。

この考察のために、東京湾岸にある K-NET 東雲 TKY016 での、3 つの地震の観測速度波形と擬似速度応答スペクトルの比較の結果を紹介する(清水建設,2011)。図 2.2-11 には、東雲から震源距離がほぼ同じである、2011 年東北地方太平洋沖地震($M_w9.0$)と 2005 年宮城県沖地震($M_w7.1$)と 2004 年紀伊半島沖地震($M_w7.4$)の震源モデルと震源(破壊開始点)位置と示す。図 2.2-12 には、3 つの地震の東雲での速度波形と擬似速度応答スペクトルを示す。2011 年東北地方太平洋沖地震と 2005 年宮城県沖地震は、速度波形の形状もスペクトルの形状も類似している。一方、2004 年紀伊半島沖地震($M_w7.4$)は、これら 2 つの太平洋プレートの地震に比べ、周期 4 秒程度以上の長周期が相対的に大きくなっていることがわかる。2004 年紀伊半島沖地震などのフィリピン海プレートの地震は、付加体の影響で長周期地震動が効率よく伝播することが指摘されており、このような現象を表現するには、太平洋プレートとフィリピン海プレートの地震の伝播特性、地盤増幅特性を区別する必要があると考えられる。

また、周期 5 秒、8 秒で全体にシミュレーションが過大評価する原因として、 M_w を外挿していることが考えられる。 M_w の 1 次式を用いると M_w が大きくなると、過大評価になることが指摘されている(福島・田中, 1991; 福島・翠川,1993)。図 2.2-13 には、福島・田中(1991)による、 ω^{-2} モデルを考えた場合の、スケーリング則を示す。 M_w の 1 次式を用いると、 ω^{-2} モデルの場合に比べ、 M_w が大きいところで過大評価になることがわかる。 ω^{-2} モデルを考えた場合には、特に、長周期領域で、この傾向が顕著になる。そこで、 M_w^2 の項を導入したり(福島・翠川,1993)、 ω^{-2} モデルを導入する(壇・他,1986)ことが行われている。最近の NGA*(New Generation Attenuation:米国太平洋地震工学センター (PEER) が主導する。米国西海岸の地殻内地震を対象とする研究プロジェクト)による距離減衰式でも、 M_w^2 の項を導入したり、 M_w が大きい場合と小さい場合で M_w に関するモデルや回帰係数を変化させたりすることが行われている。経験式の改良には、このような震源項の改良も必要と考えられる。

2-2-4 まとめ

気象庁(2011a)の震源モデルを参考に、2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)を3つの巨視的断層面から成る連動型地震と考えて、カスケードモデルに基づき震源モデルを設定し、パブコメで公表されている旧経験式に基づき長周期地震動のシミュレーションを実施した。その結果、以下のことがわかった。

- ・周期5秒以下では東北地方でシミュレーション結果は観測をほぼ説明できる。
- ・周期5秒以上ではやや過大評価となる。
- ・特に関東平野では周期1秒以上で過大評価となる。
この原因として、以下の可能性を指摘した。
- ・経験式がMw8.2以下のデータセットから作成されているため、連動型の震源モデルを考えた場合もMwが外挿となる。一方、応答スペクトルの経験式がMwの項のみでモデル化されているため、 ω^2 モデルが成り立つとすると長周期で過大評価となる。
- ・関東平野では、太平洋プレートの地震とフィリピン海プレートの地震で、長周期の励起特性が異なる傾向がある。
- ・震源モデルが適切でない。

2-3節では、以上の結果を踏まえ、長周期地震動の経験式の改良を行うとともに、東北地方太平洋沖地震の震源モデルの改良を行う。

参考文献

- 浅野公之・岩田知孝(2011). 経験的グリーン関数法による2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル, <http://sms.dpri.kyoto-u.ac.jp/k-asano/pdf/jpgu2011.pdf>
- 中央防災会議 東南海・南海地震等に関する専門調査会(2003). 第16回、資料3 図表集, pp.18-20. <http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai>
- 壇一男・宮腰淳一・八代一彦(1996). 中小規模地震の観測記録から得られる地盤増幅特性に基づく大規模地震の応答スペクトルの簡易評価法, 日本建築学会構造系論文集, 第480号, pp.35-46
- 福島美光・田中貞二(1991). 気象庁マグニチュードによる震源スペクトルのスケーリング則, 日本建築学会構造系論文報告集, 第425号, pp.19-25.
- 福島美光・翠川三郎(1993). 岩盤における観測記録に基づくMw²項を考慮した地震動応答スペクトルの予測式, 日本建築学会構造系論文報告集, 第447号, pp.39-49.
- Eshelby, J. D. (1957), The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, Proceedings of the Royal Society, A241, pp.376-396.
- 入倉孝次郎・倉橋奨(2011). 2011年東北地方太平洋沖地震の強震動生成のための震源モデル, <http://www.kojiro-irikura.jp/pdf/irikura20110622.pdf>
- 釜江克宏・川辺秀憲(2011a). 2011年東北地方太平洋沖地震(Mw9.0)の震源のモデル化(強震動

生成域) (第1報), <http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/jishin/eq/tohoku1/Tohoku-ver1-rev20110601.pdf>
釜江克宏・川辺秀憲(2011b). 2011年東北地方太平洋沖地震の震源パラメータの修正,
<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/jishin/eq/tohoku3/SourceParaRev20110617.pdf>
気象庁(2011). 「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」について(第28報),
<http://jma.go.jp/jma/press/1103/25b/kaisetsu201103251730.pdf>
栗山雅之・隈元崇・関口春子・岩田知孝(2008). 地震規模予測の考え方の違いが長大活断層で発生
する地震の強震動予測結果にもたらす影響の評価—糸魚川-静岡構造線活断層帯北部・中部を
震源断層として, 自然災害科学, J.JSND, 27-1, pp.45-67.
国土交通省(2010). 「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案について」に関するご意
見募集について http://www.mlit.go.jp/report/press/house05_hh_000218.html
Murotani, S., H. Miyake, and K. Koketsu(2008). Scaling of characterized slip models for plate-boundary
earthquakes, Earth Planets Space, Vol.60, pp.987-991.
佐藤智美・大川出・西川孝夫・佐藤俊明・関松太郎(2010). 応答スペクトルと位相スペクトルの経
験式に基づく想定地震に対する長周期時刻歴波形の作成, 日本建築学会構造系論文集, 第
649号, pp.521-530.
佐藤智美(2011). 経験式に基づく2011年東北地方太平洋沖地震の長周期地震動の予測, 土木学会
第66回年次学術講演会, pp.965-966
清水建設株式会社(2011). 東北地方太平洋沖地震関連技術レポート,
<http://www.shimz.co.jp/theme/earthquake/pdf/report03.pdf>
地震調査研究推進本部(2009). 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

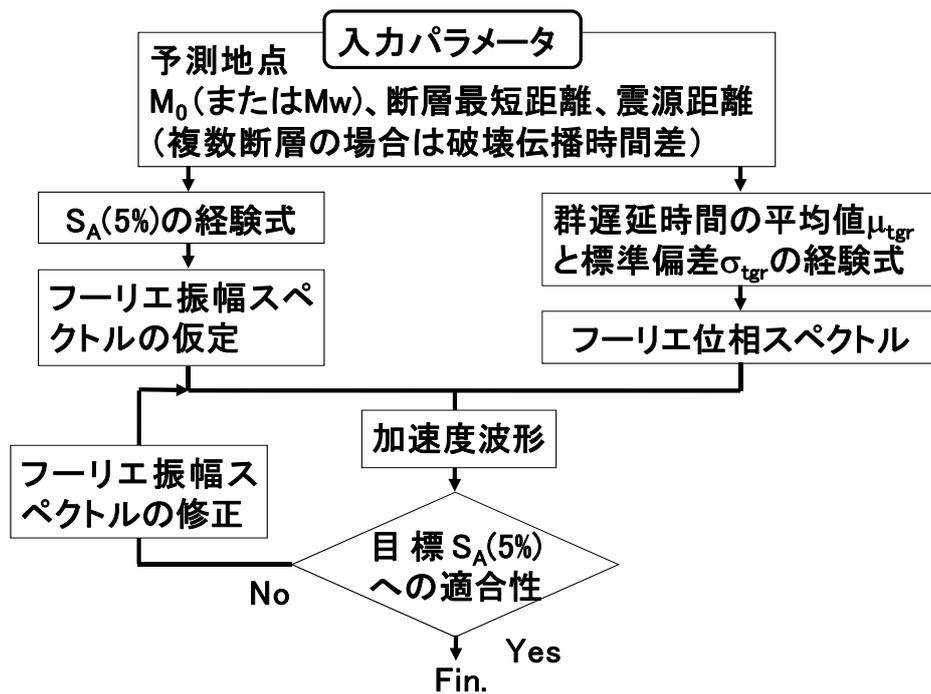


図 2. 2-1 経験式に基づく長周期地震動作成フロー

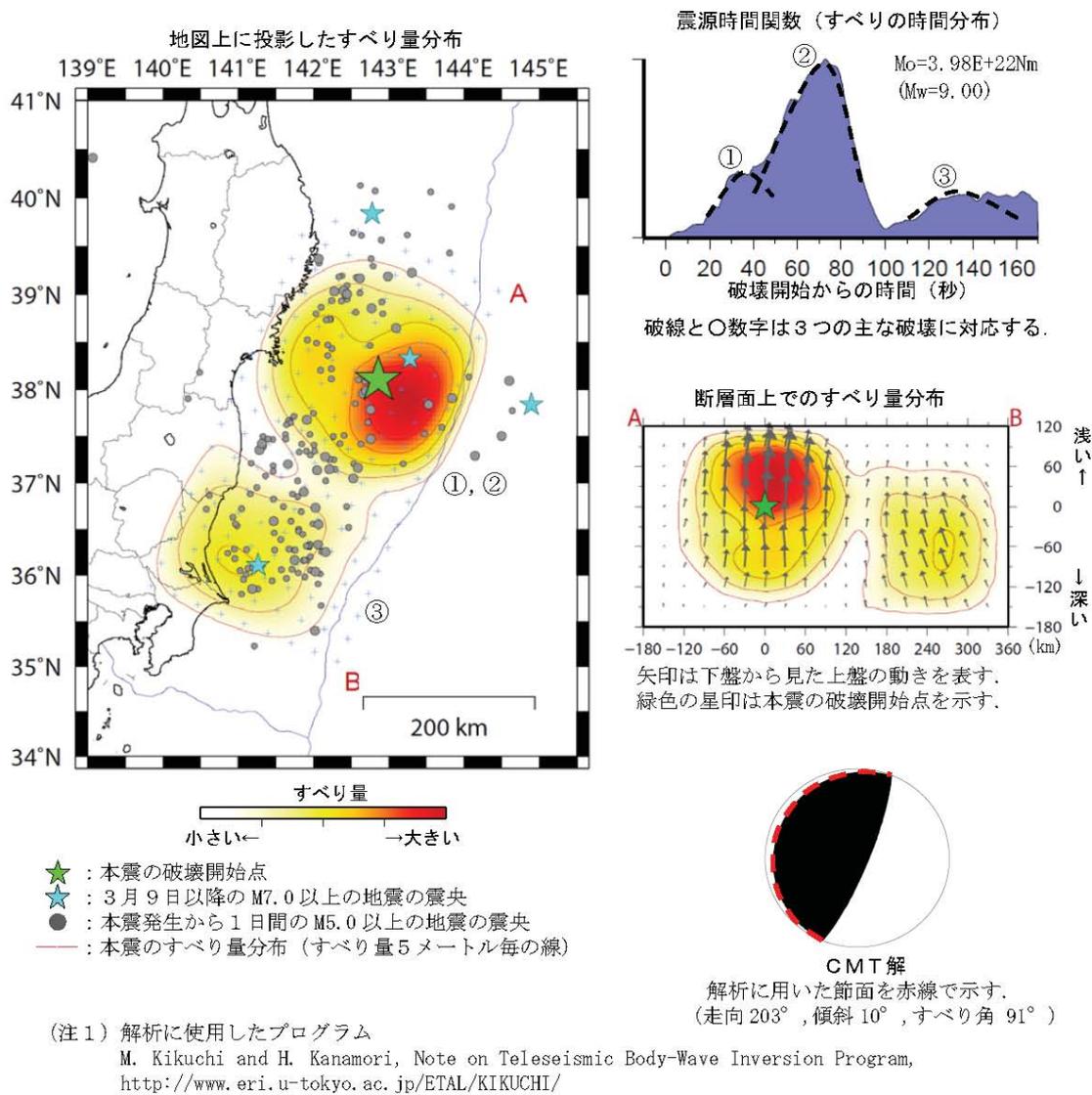


図 2.2-2 気象庁(2011)の遠地実体波を用いた2011年東北地方太平洋沖地震の震源インバージョン

強震動生成域(SMGA 1, 2, 3, and 4)の震源パラメータ

	L (km)	W (km)	Mo(Nm)	Stress Drop (MPa)	Delay time from Origin time (sec)
SMGA 1	62.40	41.60	2.31E+21	41.3	15.64
SMGA 2	41.60	41.60	7.05E+20	23.8	66.42
SMGA 3	93.60	52.00	4.34E+21	29.5	68.41
SMGA 4	38.50	38.50	3.83E+20	16.4	109.71
SMGA 5	33.60	33.60	3.99E+20	26.0	118.17

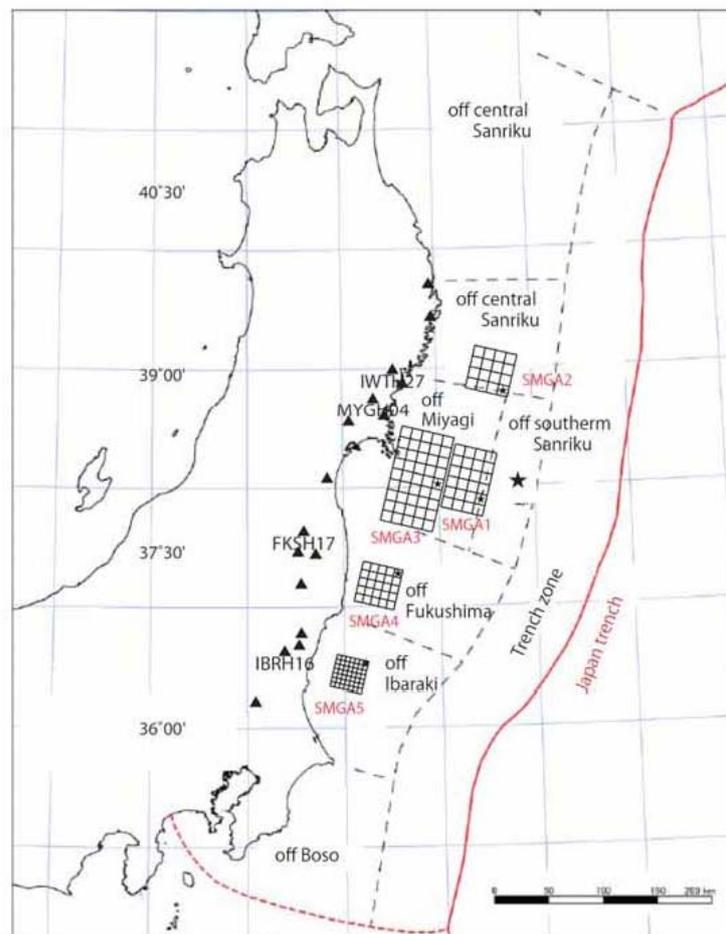


図 2.2-3 経験的グリーン関数法に基づく震源モデル(入倉・倉橋, 2011)

(表) 各強震動生成領域のパラメータ

	Length (km)	Width (km)	Area (km ²)	Rise Time (s)	M ₀ (Nm)	Δσ (MPa)	Rupture Starting Point of SMGA			Delay Time from Origin Time (s)
							Latitude (deg)	Longitude (deg)	Depth (km)	
SMGA1	39	39	1521	4.20	3.43x10 ²⁰	14.1	38.125	142.052	35.4	25.0
SMGA2	39	39	1521	4.20	6.09x10 ²⁰	25.0	38.102	142.494	29.0	67.2
SMGA3	52	52	2704	1.84	4.20x10 ²⁰	7.3	37.059	141.123	40.5	114.3

※各強震動生成領域内の破壊伝播速度は4.0 km/s

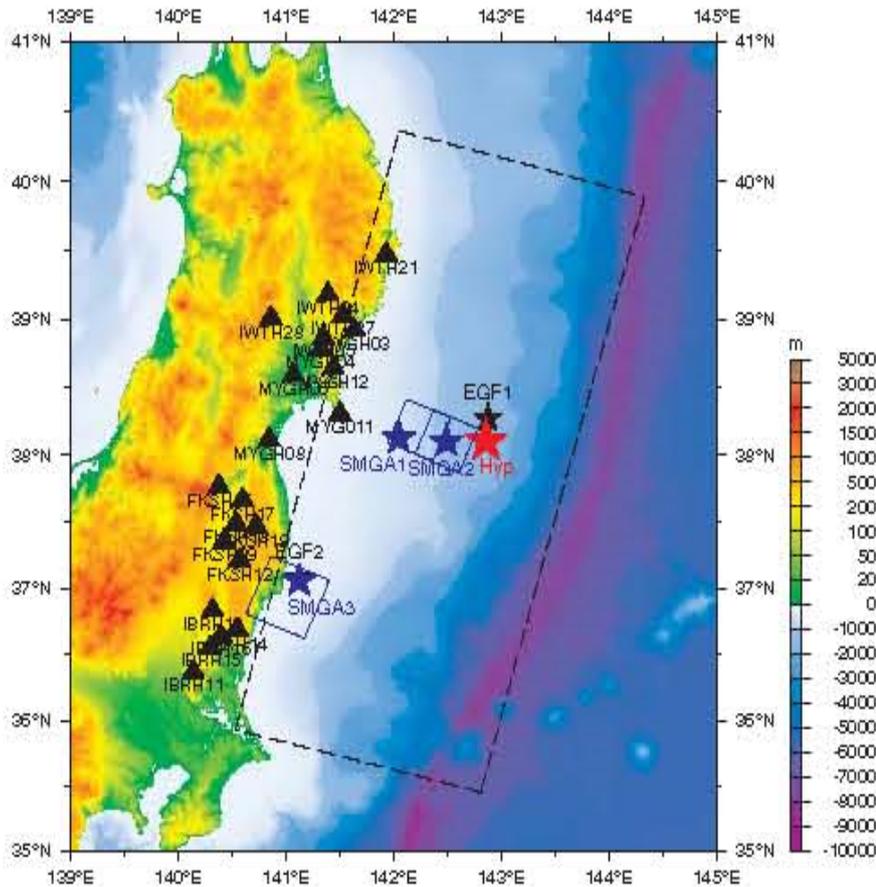


図 2.2-4 経験的グリーン関数法に基づく震源モデル(浅野・岩田, 2011)

表2 震源パラメータ (修正後)

	Asp1	Asp2	Asp3	Asp4	Asp5
走行 (°)	195	195	195	195	195
傾斜角 (°)	13	13	13	13	13
面積 (km ²)	40×40	50×50	20×20	30×30	30×30
地震モーメント (N・m)	4.93×10^{20}	1.10×10^{21}	8.8×10^{19}	1.19×10^{20}	2.58×10^{20}
応力降下量 (MPa)	18.9	21.6	27.0	10.8	23.1
ライズタイム (s)	3.6	4.5	1.8	2.7	2.7
破壊開始時間 (s)	0.0	35.0	57.0	87.0	102.0
経験的グリーン関数 として用いた地震	2011/03/10 3:16 M6.4	2011/03/10 3:16 M6.4	2011/03/10 3:16 M6.4	2011/03/10 3:16 M6.4	2005/10/19 20:44 M6.3

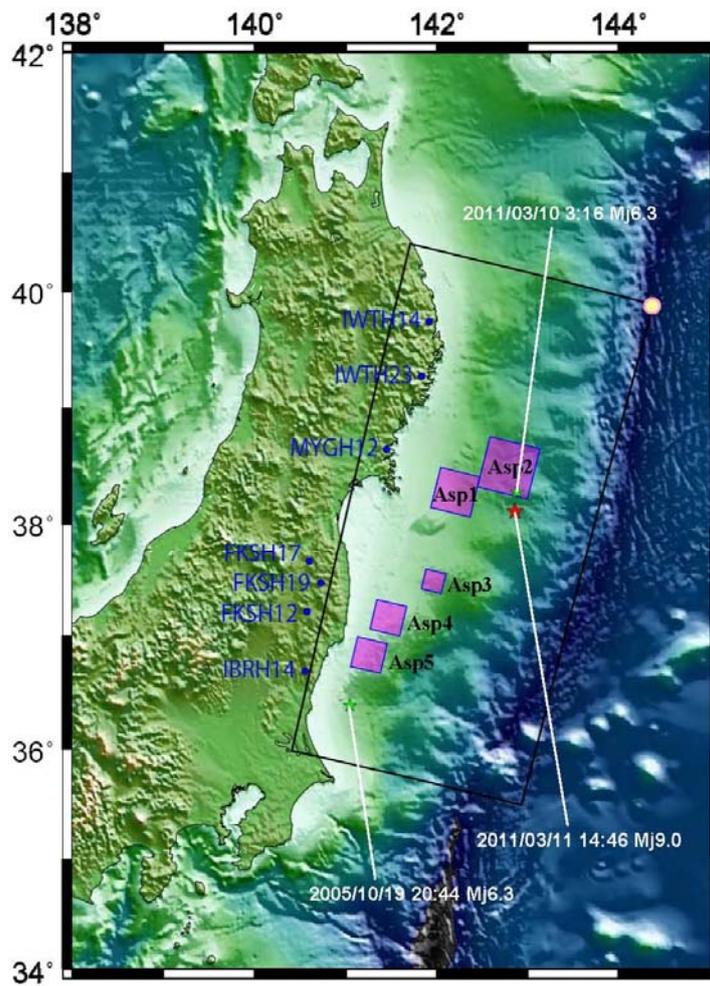


図2 本震及びグリーン関数として使用した地震の震央位置、KiK-net観測点、並びにアスペリティの位置

図 2.2-5 経験的グリーン関数法に基づく震源モデル(釜江・川辺, 2011a, 2011b)

表1 カスケードモデル($\Delta\sigma_i=1.4\text{MPa}$)

断層	パラメータ	記号	単位	値	設定根拠
全体	地震モーメント	M_0	$\text{N}\cdot\text{m}$	$4.00\text{E}+22$	気象庁(2011)
	静的応力降下量	$\Delta\sigma$	MPa	0.85	$M_0=16/(7\pi^{3/2})\Delta\sigma S^{3/2}$
	面積	S	km^2	236468.8	$S=S_1+S_2+S_3$
	平均すべり量	D	cm	352	$D=M_0/(\mu S)$
	剛性率	μ	N/m	$4.80\text{E}+10$	$\mu=\rho\beta^2, \rho=3\text{g/cm}^3, \beta=4\text{km/s}$
断層1	地震モーメント	M_{01}	$\text{N}\cdot\text{m}$	$8.00\text{E}+21$	$M_{01}=M_0 \times 1/(1+3+1)$
	静的応力降下量	$\Delta\sigma_1$	MPa	1.4	Murotani et al.(2008)
	面積	S_1	km^2	57868.6	$M_{01}=16/(7\pi^{3/2})\Delta\sigma_1 S_1^{3/2}$
	長さ×幅	$L_1 \times W_1$	$\text{km} \times \text{km}$	241×240	$W_1=240\text{km}$ 固定
断層2	地震モーメント	M_{02}	$\text{N}\cdot\text{m}$	$2.40\text{E}+22$	$M_{02}=M_0 \times 3/(1+3+1)$
	静的応力降下量	$\Delta\sigma_2$	MPa	1.4	Murotani et al.(2008)
	面積	S_2	km^2	120731.6	$M_{02}=16/(7\pi^{3/2})\Delta\sigma_2 S_2^{3/2}$
	長さ×幅	$L_2 \times W_2$	$\text{km} \times \text{km}$	503×240	$W_2=240\text{km}$ 固定
断層3	地震モーメント	M_{03}	$\text{N}\cdot\text{m}$	$8.00\text{E}+21$	$M_{03}=M_0 \times 1/(1+3+1)$
	静的応力降下量	$\Delta\sigma_3$	MPa	1.4	Murotani et al.(2008)
	面積	S_3	km^2	57868.6	$M_{03}=16/(7\pi^{3/2})\Delta\sigma_3 S_3^{3/2}$
	長さ×幅	$L_3 \times W_3$	$\text{km} \times \text{km}$	241×240	$W_3=240\text{km}$ 固定
	平均すべり量	D_3	cm	288	$D_3=M_{03}/(\mu S_3)$

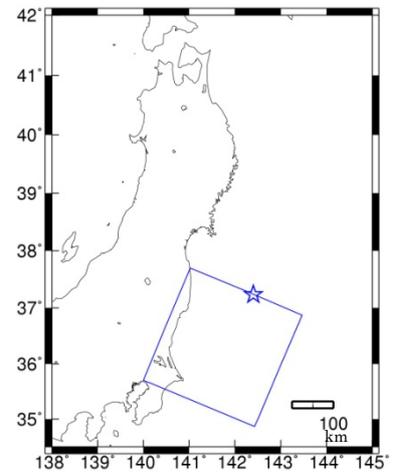
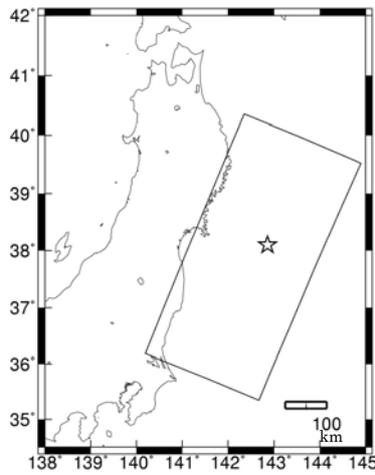
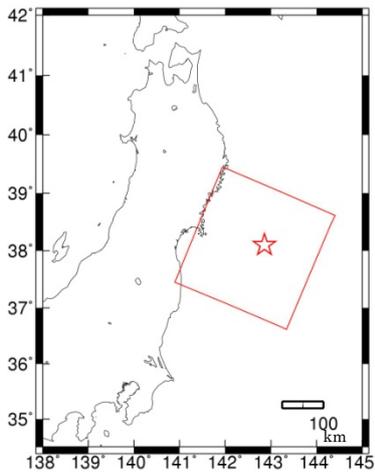
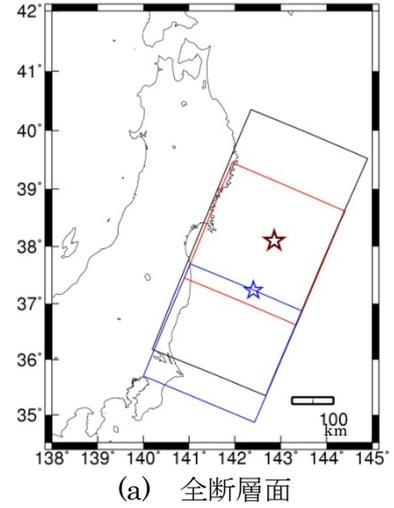
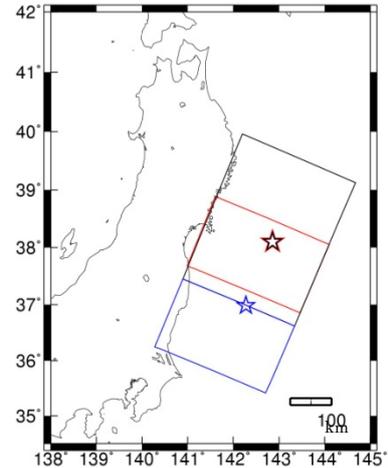


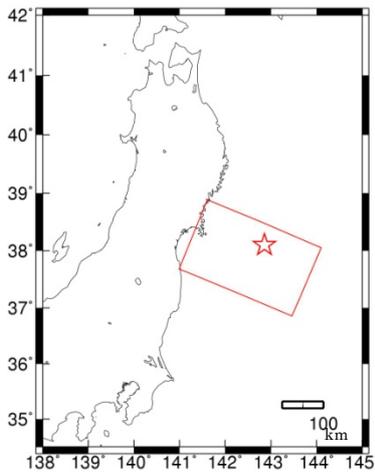
図2.2-6 カスケードモデル($\Delta\sigma_i=1.4\text{MPa}$)に基づく断層面位置
(星印は破壊開始点位置)

表2 カスケードモデル($\Delta\sigma_i=3.0\text{MPa}$)

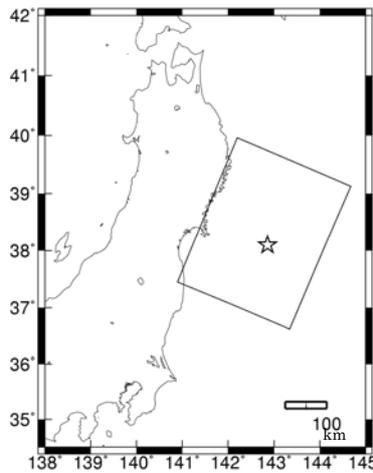
断層	パラメータ	記号	単位	値	設定根拠
全体	地震モーメント	M_0	$\text{N}\cdot\text{m}$	$4.00\text{E}+22$	気象庁(2011)
	静的応力降下量	$\Delta\sigma$	MPa	1.8	$M_0=16/(7\pi^{3/2})\Delta\sigma S^{3/2}$
	面積	S	km^2	142053.0	$S=S_1+S_2+S_3$
	平均すべり量	D	cm	587	$D=M_0/(\mu S)$
	剛性率	μ	N/m	$4.80\text{E}+10$	$\mu=\rho\beta^2, \rho=3\text{g/cm}^3, \beta=4\text{km/s}$
断層1	地震モーメント	M_{01}	$\text{N}\cdot\text{m}$	$8.00\text{E}+21$	$M_{01}=M_0 \times 1/(1+3+1)$
	静的応力降下量	$\Delta\sigma_1$	MPa	3.0	中央防災会議(2003)
	面積	S_1	km^2	34816.2	$M_{01}=16/(7\pi^{3/2})\Delta\sigma_1 S_1^{3/2}$
	長さ×幅	$L_1 \times W_1$	$\text{km} \times \text{km}$	145×240	$W_1=240\text{km}$ 固定
	平均すべり量	D_1	cm	479	$D_1=M_{01}/(\mu S_1)$
断層2	地震モーメント	M_{02}	$\text{N}\cdot\text{m}$	$2.40\text{E}+22$	$M_{02}=M_0 \times 3/(1+3+1)$
	静的応力降下量	$\Delta\sigma_2$	MPa	3.0	中央防災会議(2003)
	面積	S_2	km^2	72420.6	$M_{02}=16/(7\pi^{3/2})\Delta\sigma_2 S_2^{3/2}$
	長さ×幅	$L_2 \times W_2$	$\text{km} \times \text{km}$	302×240	$W_2=240\text{km}$ 固定
	平均すべり量	D_2	cm	690	$D_2=M_{02}/(\mu S_2)$
断層3	地震モーメント	M_{03}	$\text{N}\cdot\text{m}$	$8.00\text{E}+21$	$M_{03}=M_0 \times 1/(1+3+1)$
	静的応力降下量	$\Delta\sigma_3$	MPa	3.0	中央防災会議(2003)
	面積	S_3	km^2	34816.2	$M_{03}=16/(7\pi^{3/2})\Delta\sigma_3 S_3^{3/2}$
	長さ×幅	$L_3 \times W_3$	$\text{km} \times \text{km}$	145×240	$W_3=240\text{km}$ 固定
	平均すべり量	D_3	cm	479	$D_3=M_{03}/(\mu S_3)$



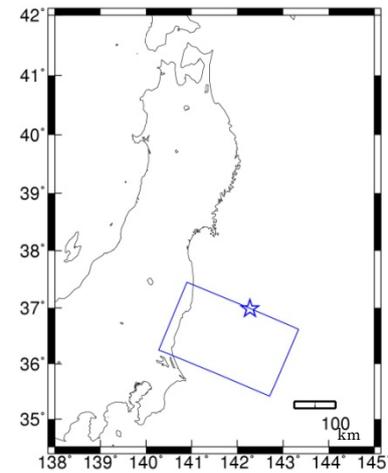
(a) 全断層面



(b) 断層1

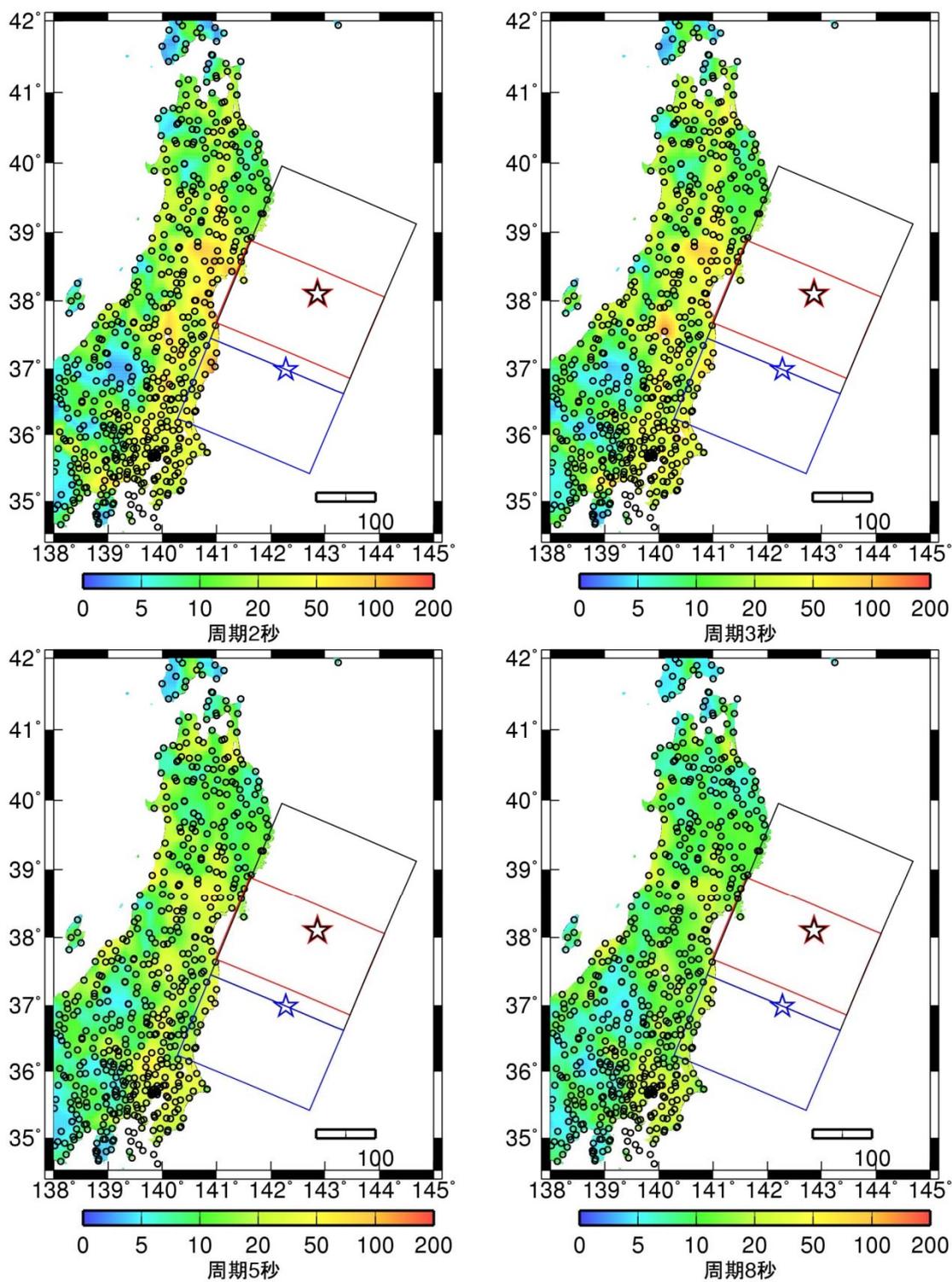


(c) 断層2



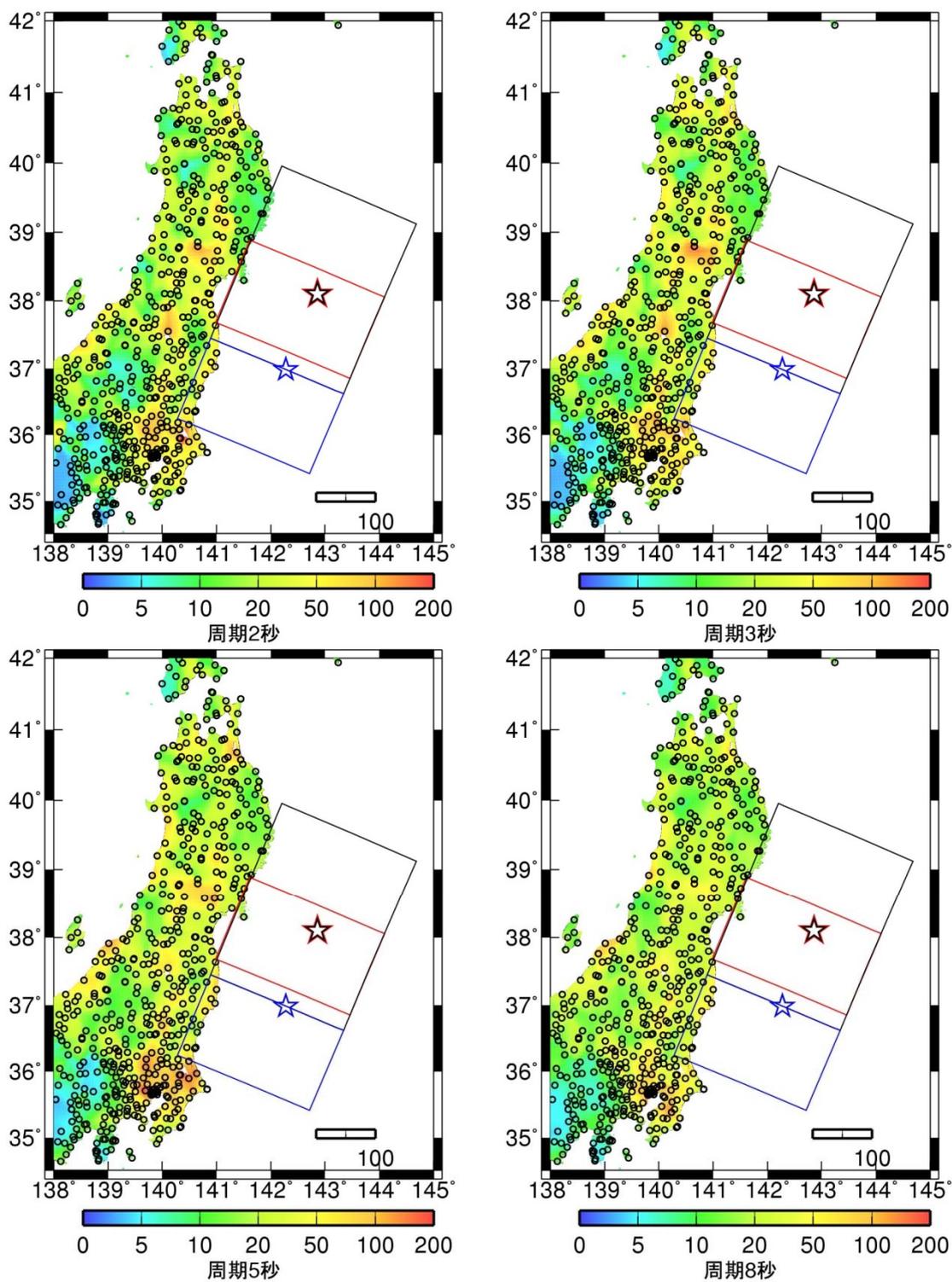
(d) 断層3

図2.2-7 カスケードモデル($\Delta\sigma_i=3.0\text{MPa}$)に基づく断層面位置
(星印は破壊開始点位置)



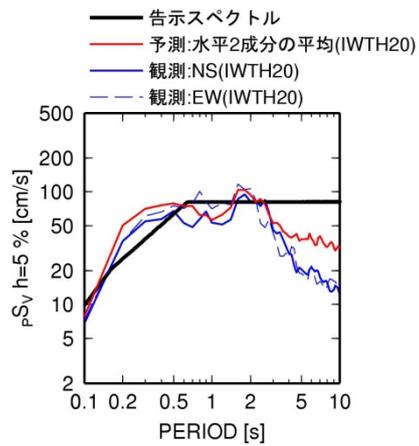
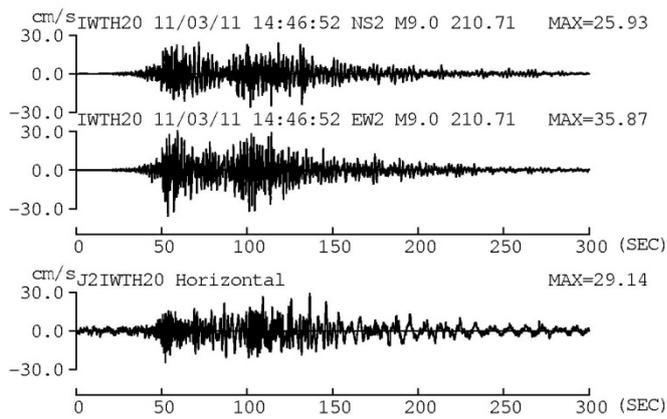
擬似速度応答スペクトル $h=5\%$: 水平成分の平均(観測) [cm/s]

図 2.2-8 東北地方太平洋沖地震の観測擬似速度応答スペクトル分布

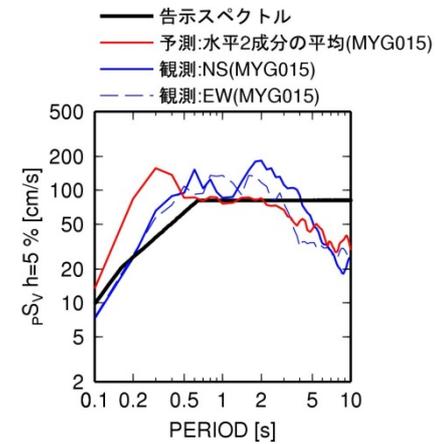
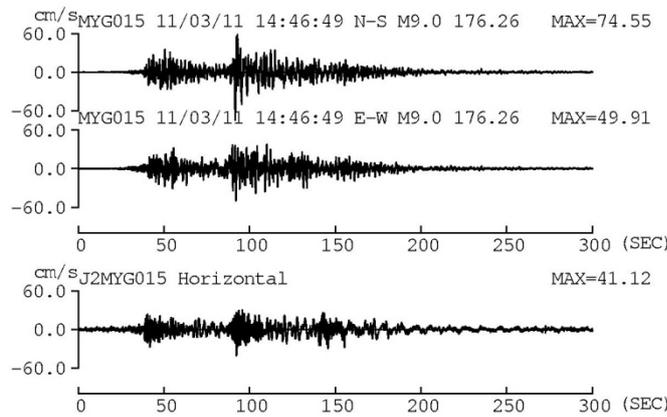


擬似速度応答スペクトル $h=5\%$: 水平成分の平均(予測) [cm/s]

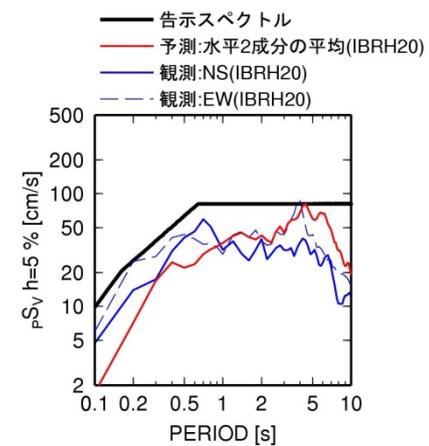
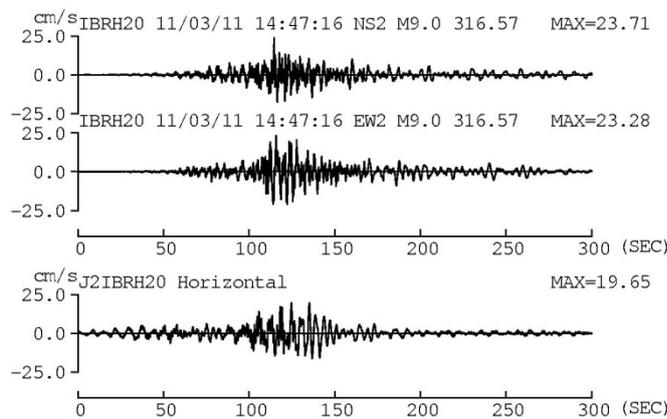
図 2.2-9 旧経験式に基づく東北地方太平洋沖地震の擬似速度応答スペクトル分布



(a) IWTH20(花巻南)



(b) MYG015(岩沼)



(c) IBRH20(波崎)

図 2.2-10 観測と旧経験式による予測の速度波形(左)と擬似速度応答スペクトル

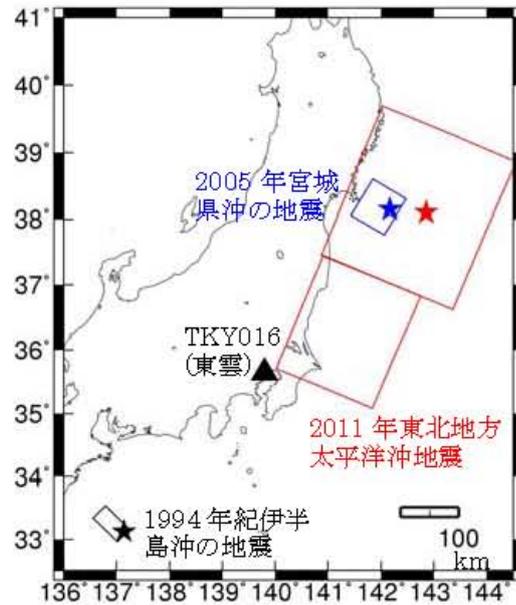


図 2.2-11 3つの地震の震源位置(星印)と断層面(と東雲(TKY016)の位置(矩形は断層面、★は震央位置)(清水建設, 2011)

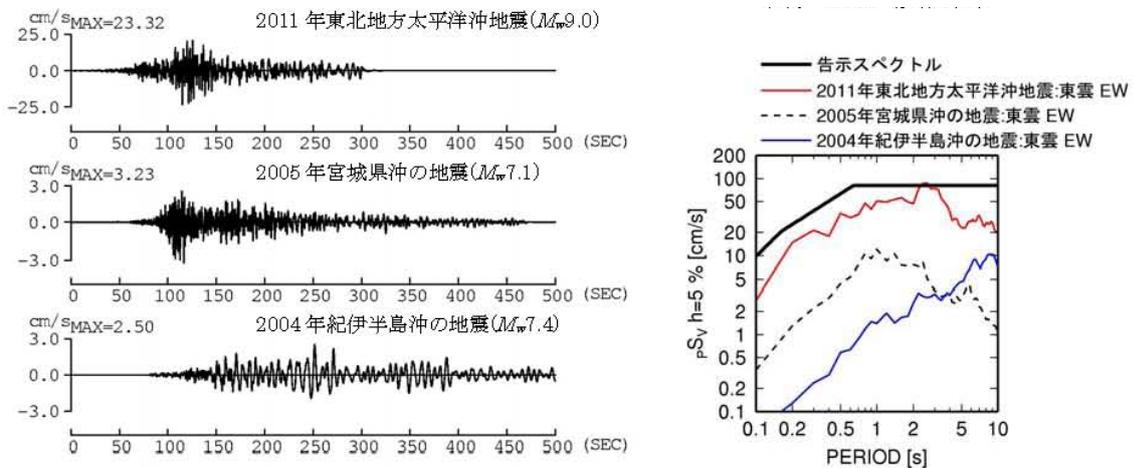


図 2.2-12 K-NET 東雲における震源距離がほぼ同じ3つの地震のEW成分の観測速度波形(左)と擬似速度応答スペクトル(右)の比較(清水建設, 2011)

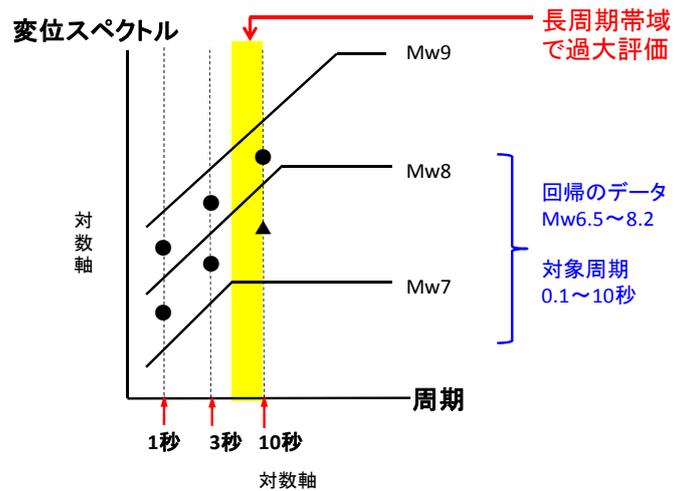


図 2.2-13 ω^2 モデルに基づく震源スペクトルのスケーリング則(福島・田中, 1991 に加筆・修正)

2-3 長周期地震動の経験式の改良

2-3-1 はじめに

2-2 節での、旧経験式による東北地方太平洋沖地震の長周期地震動の試算結果を踏まえ、長周期地震動の経験式の改良を行う。

2-3-2 データと検討方法

(a) データ

旧経験式作成後に発生した 2007 年 8 月から 2011 年 5 月までの海溝型地震について、旧経験式と同じ条件でデータを選択し、追加した。追加した地震の諸元を表 2.3-1 に、震央位置・メカニズム解を図 2.3-1 に示す。太平洋プレートの地震(M_w 6.1~7.8)が 17 個追加された。2011 年 3 月 9 日の宮城県沖の前震、2011 年 3 月 11 日 15 時 8 分の岩手県沖の余震は、気象庁(2011b, 2011c)による震源インバージョンで用いられている断層面を用いて、断層最短距離を計算した。表 2.3-1、表 2.3-2 には、旧経験式作成の際に用いられている地震の諸元を示す(佐藤・他,2010a)。旧経験式の回帰式は、はじめに、これらの地震のデータの KiK-net と K-NET と気象庁 87 型の記録から作成された(佐藤・他,2010a)。その後、2009 年駿河湾の地震の記録が追加され、地盤増幅率とサイト係数が修正されている(佐藤・他,2010b; 国土交通省,2010)。この修正の際には、関東平野では表 2.3-1、表 2.3-2 の地震も含めて気象庁 95 型の記録と新宿・工学院大学の観測点の記録が追加されている。

改良経験式で追加されたデータは、表 2.3-1 の地震の K-NET、KiK-net 観測点と、表 2.3-2、表 2.3-3 の地震、及び 2009 年駿河湾の地震の記録の濃尾平野、大阪平野の気象庁 95 型観測点での水平成分の記録である。

図 2.3-2 には、旧経験式作成に用いた地震と、追加した地震も含めた新データの地震の震央位置を示す。新データの地震数の合計は西側は 9 つ、東側は 42 個である。図 2.3-3 には、海溝型地震の全体と東、西のデータセットの断層最短距離と M_j 、断層最短距離 R と M_w の関係を示す。なお、水平成分のみを対象とした検討を行った。

なお、比較用ケースであるケース 5 と 6 で東北地方太平洋沖地震の記録を用いる際には、図 2.3-4 の気象庁(2011a)の震源モデルに基づき図 2.3-5 のような 1 枚断層面を仮定した。 M_w は 9.0、 $M_0=4 \times 10^{29}$ dyne・cm、長さ×幅は 480km×240km である。震源位置も気象庁の値を用いた。

(b) 加速度応答スペクトル($h=5\%$)の経験式

基本ケース(ケース 1~4)として、2011 年東北地方太平洋沖地震はいれず、経験式を作成する。これは、2011 年東北地方太平洋沖地震の断層モデルの構築が困難であるためである。比較用ケース(ケース 5 と 6)として、2011 年東北地方太平洋沖地震を追加して、経験式を作成する。

旧経験式(ケース 0)は、(1)式でモデル化されている。

固有周期 T での加速度応答スペクトル(減衰定数 5%)を $Y(T)$ とすると、

$$\log_{10}Y(T)=a(T)M_w+b(T)R-\log_{10}(R^{p(T)}+d(T)10^{0.5M_w})+c_0(T)+c_j(T) \quad (1)$$

ここで、 R は断層最短距離距離、 $a(T)$ 、 $b(T)$ 、 $p(T)$ 、 $d(T)$ 、 $c_0(T)$ 、 $c_j(T)$ は回帰係数である。また、 $c_0(T)$ は、周期1秒以上で増幅がないと考えられる地震基盤相当のFKSH19でのサイト係数である。なお、海溝型地震と地殻内地震の経験式を作成し、 $c_j(T)$ は両者の地震数の重み付け平均値としている。周期1~10秒の $10^{c_j(T)}$ を地盤増幅率と呼ぶ。

一方、改良経験式（ケース1~6）は、以下の通りである。

（ケース1） M_w^2 項なし、東と西を分けない：(1)式を用いる。

（ケース2） M_w^2 項あり、東と西を分けない：

（ケース3） M_w^2 項なし、東と西を分ける

（ケース4） M_w^2 項あり、東と西を分ける

（ケース5） M_w^2 項あり、東と西を分ける、本震追加

（ケース6） M_w^2 項あり、東と西を分ける、本震追加、 M_w の頭打ち考慮(周期依存の最大 M_w)

ここで、 M_w^2 項を考慮した式は(2)式とする。

$$\log_{10}Y(T)=a_1(T)M_w+a_2(T)M_w^2+b(T)R-\log_{10}(R^{p(T)}+d(T)10^{0.5M_w})+c_0(T)+c_j(T) \quad (2)$$

東と西は、太平洋プレートの地震とフィリピン海プレートの地震を意味する。東と西を分ける場合は、 $b(T)$ と、関東平野で $Tz3.2 \geq 1.0$ の地点の $c_j(T)$ を区別する。 $Tz3.2$ は、昨年度定義した指標であり、 S 波速度 3.2km/s の地震基盤から工学的基盤までの S 波の伝播時間を意味する。 $Tz3.2$ の4倍が地盤の固有周期に相当する。2つのマグニチュード係数である $a_1(T)$ と $a_2(T)$ は、全国共通である。ケース5と6の $d(T)$ は、ケース4での推定値を用いる。地盤増幅率は、地殻内地震の旧経験式の地盤増幅率と新経験式の見溝型地震の地盤増幅率の地震数の重み付け平均値を基本とする。

(c) 群遅延時間の平均値と分散の経験式

東北地方太平洋沖地震の北側の観測点の記録は、明らかに2つの波群からなっているため、この本震を含めた解析は実施しない。

旧経験式は、中心周波数 f での群遅延時間の平均値 $\mu_{\text{gr}}(f)$ 、分散 $\sigma_{\text{gr}}^2(f)$ を $Z(f)$ として、(3)式でモデル化されている。

$$Z(f)=A(f)M_0^{1/3}+B(f)X+C_j(f) \quad (3)$$

ここで、 M_0 は地震モーメント、 X は震源距離、 $A(f)$ 、 $B(f)$ 、 $C_j(f)$ は回帰係数である。 $C_j(f)$ をサイト係数と呼ぶ。

改良回帰式は、旧経験式と同じ場合(case-a)と、応答スペクトルと同様に $B(f)$ と $C_j(f)$ を2つの震源域で区別した場合(case-b)について検討を行う。

(d) 加速度応答スペクトル($h=1\%$)とエネルギースペクトル

加速度応答スペクトル($h=1\%$)とエネルギースペクトルについては、加速度応答スペクトル($h=5\%$)の回帰式のうち、後述の理由で最適とされたケース4で同様に回帰分析を行う。

2-3-3 回帰結果

(a) 回帰係数

図 2.3-6 には、海溝型地震に対する旧経験式の応答スペクトル(ケース 0)の回帰係数を示す。

図 2.3-7 には、本震を追加していない基本ケース(ケース 1~4)の回帰係数を示す。ケース 0 とケース 1 は、回帰式の形は同じであるため、回帰係数も類似している。ケース 1~4 の方がケース 0 より d が小さく、震源近傍での頭打ちがしにくい式となっている。また、ケース 1、3 の方がケース 0 より a_1 が小さい。すなわち、ケース 1 や 3 の方が、ケース 0 より M_w による違いが小さいことを意味している。ケース 0 とケース 1 は、データセットのみが異なるため、これは、追加した地震の特性を反映したものと考えられる。なお、ケース 0 と比べ、ケース 1~4 の回帰誤差が大きい。これは、1 観測点で 1 地震のみが観測されている場合は、観測記録との誤差が 0 となるためである。すなわち、地震数を増やしたことにより 1 観測点で 1 地震の地点が減少したためである。ケース 3 とケース 4 の b をみると、太平洋プレート(東)の方が、フィリピン海プレート(西)より、周期 5 秒以下で減衰が大きいことがわかる。

図 2.3-8 には、本震を追加した比較用ケース(ケース 5 と 6)の回帰係数と、ケース 4 の回帰係数の比較を示す。これらのケースは、 M_w^2 項を考慮し、伝播経路の違いも考慮している。 d は共通であり、 b もほとんど同じであったため、省略した。図中の m は、最大 M_w であり、 M_w の頭打ちを意味する。 m を 8.2 から 9.0 の範囲で 0.1 刻みで回帰係数を求め、回帰誤差 e が最小となる m を選択した。ただし、この場合、 m が右図の青線のように変動したため、赤線のようにスムーズ化した。長周期ほど最大 M_w は小さくなる。なお、周期 1 秒以下では、 m の違いによる回帰誤差 e の違いが小さいため 8.7 で一定とした。3 つのケースの回帰誤差の違いは小さい。

図 2.3-9 には、ケース 4 の回帰式を用いた場合の、減衰定数 5% の加速度応答スペクトル、減衰定数 1% の加速度応答スペクトル、エネルギースペクトルの回帰係数を示す。

群遅延時間の回帰係数を、旧経験式に対して図 2.3-10 に、ケース a と b の新経験式に対して図 2.3-11 を示す。3 つのケースの違いは小さい。

(b) 地盤増幅率及びサイト係数

図 2.3-12~図 2.3-20 には関東平野、図 2.3-21~図 2.3-23 には濃尾平野、図 2.3-24~図 2.3-26 には大阪平野の地盤増幅率分布を示す。図 2.3-12 はケース 0(旧経験式)の地盤増幅率である。ケース 0 では、海溝型地震と地殻内地震の地盤増幅率の観測点数の重み付け平均値が用いられているため、平均を取る前の、海溝型地震、地殻内地震それぞれに対する地盤増幅率を図 2.3-13、図 2.3-14 に示している。周期 8 秒では、地殻内地震の方が海溝型地震より地盤増幅率が大きい傾向がある。地殻内地震の方が、震源深さが浅いことが一因となっていると考えられる。図 2.3-15、図 2.3-16 には、ケース 1 と 2 の地盤増幅率を示す。この図も含めた図 2.3-15~図 2.3-26 の増幅率は全て、海溝型地震と地殻内地震の地盤増幅率の観測点数の重み付け平均値を用いた場合である。 M_w^2 項を考慮した場合

と考慮しない場合の地盤増幅率の違いはほとんどない。ケース 3 とケース 4 でも地盤増幅率の違いはほとんどなかった。そこで、ケース 4 の場合の地盤増幅率を図 2.3-17～図 2.3-20 に示す。図 2.3-17、図 2.3-18 は、東と西の地震で地盤増幅率が異なる観測点の結果であり、図 2.3-19、図 2.3-20 はこれらに共通の地盤増幅率の観測点を加えたものである。周期 5 秒と 8 秒では、東京都心部や千葉県中部などの堆積層の厚い地域では、西の地震の方で地盤増幅率が大きくなっている。しかし、周期 8 秒では、図 2.3-13、図 2.3-14 の比較で見られた海溝型地震と地殻内地震の地盤増幅率の差ほどの違いではない。

濃尾平野、大阪平野では、ケース 0(旧経験式)と、 M_w^2 項を考慮したケース 2 とケース 4 の地盤増幅率を示している。関東平野と同様に、 M_w^2 項を考慮した場合と考慮しない場合の地盤増幅率の違いは小さいため省略した。全国を一括回帰した場合(ケース 2)と比較して、東と西の伝播経路の違いを考慮した場合の地盤増幅率(ケース 4)の方が大きい傾向がある。なお、ケース 2 とケース 4 では、ケース 0(旧経験式)では含まれていなかった JMA95 型の観測点が追加されたため、ケース 0 の増幅率の分布形状とやや異なっている。

図 2.3-27～図 2.3-32 には、ケース 4 の回帰式を用いた場合の、エネルギースペクトルの増幅率を示す。増幅率の分布形状は、減衰定数 5%の加速度応答スペクトルの増幅率と類似している。

図 2.3-33～図 2.3-38 には、関東平野における群遅延時間の平均値のサイト係数を示す。旧経験式に比べ、ケース a、ケース b とも、地盤増幅率の分布や堆積層厚分布と類似しており、都心部や千葉県中部で大きくなっている。西と東では西がやや大きい。図 2.3-39～図 2.3-41 の濃尾平野における群遅延時間の平均値のサイト係数は、旧経験式と、西と東を分けたケース b が類似している。図 2.3-42～図 2.3-44 の大阪平野における群遅延時間の平均値のサイト係数は、旧経験式に比べて、ケース a と b では観測点が増えた神戸付近で大きくなっている。また、周期 8 秒では、ケース b がケース a より大きい。

図 2.3-45～図 2.3-50 には、関東平野における群遅延時間の標準偏差のサイト係数を示す。群遅延時間の平均値の場合と同様に、旧経験式に比べ、ケース a、ケース b とも、地盤増幅率の分布や堆積層厚分布と類似しており、都心部や千葉県中部で大きくなっている。西と東の違いは小さい。図 2.3-51～図 2.3-53 の濃尾平野における群遅延時間の標準偏差のサイト係数は、ケース a と b ではほぼ同じである。旧経験式に比べ観測点が増えたため、ケース a と b の分布はやや旧経験式と異なっている。図 2.3-54～図 2.3-56 の大阪平野における群遅延時間の標準偏差のサイト係数も、ケース a と b ではほぼ同じである。ケース a と b は旧経験式に比べて、大きい傾向がある。

2-3-4 各ケースの長周期地震動(応答スペクトル)の比較

図 2.3-57～図 2.3-64 には、東雲(TKY016)、新宿(KGIN)、大手町(E4E)、横浜(E56)、津島(AIC003)、名古屋(AIC004)、此花(OSKH02)、大阪(OSK005)での、 $M_w 8.5$ の場合の各ケースの加速度応答スペクトルを示す。各図とも、(a)～(c)が断層最短距離 100km の場合であり、(d)は(b)と同じケースで断層最短距離 200km とした場合である。関東平野の観測点で、 M_w^2 項を考慮し、伝播経路の違いを考慮した

上段の(a)と(b)を比較すると、西の地震の方が東の地震より、スペクトルが大きいか同じであることがわかる。(c)をみても、 M_w^2 項を考慮しない場合でも、西の地震の方が東の地震よりスペクトルが大きい。ただし、 M_w^2 項を考慮しない場合は、考慮した場合より増幅率が大きい傾向がみられる。濃尾平野と大阪平野では、いずれのケースも旧経験式が今回のケースより大きいか同程度である。特に、本震の記録を含めた場合は、旧経験式よりかなり小さくなっている。

図 2.3-65～図 2.3-68 には、地盤増幅率を海溝型地震のみとした場合の東雲(TKY016)、新宿(KGIN)、津島(AIC003)、此花(OSKH02)での、 $M_w 8.5$ の場合の各ケースの加速度応答スペクトルを示す。地盤増幅率を海溝型地震のみとした場合には、西の海溝型地震の増幅率は、増幅率が大きい紀伊半島沖の地震群の影響を大きく受けて、顕著に大きくなることがわかる。紀伊半島沖地震は、プレート境界地震ではなく、トラフより南で発生したアウトワーライズの地震であるため、伝播過程で付加体の影響を大きく受けるため、地盤増幅率が大きくなっているものと考えられる。

2-3-5 経験式と観測記録及び既存の計算波との比較

昨年度までの検討で、旧経験式の経験式は、観測記録や既存の計算波と、平均的には整合していることを確認している。ここでは、その例を再掲載する。図 2.3-69～図 2.3-71 に示した旧経験式の経験式に基づく応答スペクトルは、既存の長周期地震動計算波より大きい場合と小さい場合があるが、平均的には整合している。

図 2.3-72 には、オリジナルの式とケース 4 を用いた、大手町、横浜での計算波の応答スペクトルと、大手町での復元波(Midorikawa et al., 2006)と地震本部の三次元有限差分法による計算波のスペクトルを示す。また、図 2.3-73 には、1944 年東南海地震の大手町、東金、横浜での観測波(古村・中村, 2006)の応答スペクトルを示す。オリジナルの式とケース 4 の違いは小さいが、横浜については、ケース 4 の方が観測に近い。一方、この周期 5～10 秒でさらに大きくなると考えられるケース 1～3 は、観測波を過大評価すると考えられる。

また、これまで、いくつかの地震に対して、オリジナルの式による計算波と三次元有限差分法や経験的グリーン関数法による計算波の比較を行っており、平均的には両者が整合していたことを考えると本震を含めたケース 5 と 6 は、過小評価になる懸念がある。

3-2 節では、地震本部の長周期地震動の計算波と、旧経験式と改良経験式(応答スペクトル=ケース 4、群遅延時間=ケース b)との比較を行うが、断層最短距離 50km 程度以下の震源近傍では、旧経験式が地震調本部の計算波と比べ周期 1～3 秒で小さくなる傾向があるが、改良経験式では同レベルとなっている。この点からも、改良経験式は旧経験式より改善されたものと考えられる。

以上の結果から、ケース 4 が最適な式と考えられる。表 2.3-4 に、加速度応答スペクトルの経験式の検討ケースと評価結果をまとめて示す。

2-3-6 考察

減衰定数 5%の加速度応答スペクトルに対するケース 4、群遅延時間の平均値と標準偏差に対する

ケース b の回帰係数について考察を行う。

図 2.3-74 には、東と西で異なる地盤増幅率が推定されている関東平野の観測点での地盤増幅率と $Tz3.2$ の関係を示す。図 2.3-75 には、東と西で共通の地盤増幅率が推定されている関東平野の観測点での地盤増幅率と $Tz3.2$ の関係を示す。また、図 2.3-76 には、東と西で異なる地盤増幅率が推定されている関東平野の観測点の地盤増幅率の比較を示す。東と西で異なる地盤増幅率が推定されている地点では、周期 8 秒で西の方が倍程度大きく、周期 3 秒でも西の方が大きいことが分かる。図 2.3-77 には、東と西で異なるサイト係数が推定されている関東平野の観測点での群遅延時間の平均値と $Tz3.2$ の関係、図 2.3-78 には、東と西で共通の地盤増幅率が推定されている関東平野の観測点での群遅延時間の平均値と $Tz3.2$ の関係を示す。同様に、図 2.3-79、図 2.3-80 には、群遅延時間の標準偏差を示す。周期 8 秒では、西の方が東より、群遅延時間の平均値、標準偏差のサイト係数とも大きい傾向がみられる。

図 2.3-81 には、オリジナル版とケース 4 の $Mw8.5$ の場合の周期 2 秒、3 秒、5 秒、8 秒での距離減衰特性を示す。周期 5 秒、8 秒では、オリジナル版とケース 4 の違いは小さい。一方、周期 2 秒、3 秒では、断層最短距離 50km 以下ではケース 4 の方が大きく、50km 以上ではケース 4 の方が小さく、特に西の方が小さい。

図 2.3-82 には、オリジナル版とケース 4 の断層最短距離 100km における地震基盤での $Mw7.0$ 、 7.5 、 8.0 、 8.5 の加速度応答スペクトルを示す。ケース 4 の方が、長周期での Mw による違いが大きい。この原因を説明するため、図 2.3-83 には、地震モーメントと短周期レベルの関係を示す。図中のシンボルは、対象としている地震のうち、既往の研究(片岡・他, 2006; 佐藤・他, 2010b; 佐藤, 2012)で短周期レベルが推定されている地震である。佐藤(2010)の経験式は、 $Mw6.6\sim 8.2$ の太平洋プレートのプレート境界地震のデータから短周期レベルが $M_0^{1/3}$ に比例するとして作成されたものである。一方、片岡・他(2006)は、日本全国のプレート境界地震、スラブ内地震それぞれに対して、 M_0 のべき乗もパラメータとして経験式を作成している。図中のシンボルのデータには、 $M_0^{1/3}$ より傾きが大きい傾向がみられる。すなわち、Brune の応力降下量が Mw が大きいほど大きい。これにより、 Mw^2 項を考慮したケース 4 の方が、長周期での Mw による違いが大きいものと考えられる。

2-3-7 まとめ

東北地方太平洋沖地震や、その余震・前震を含めて、加速度応答スペクトル(減衰定数 5%)に対する 6 つのケースの経験式を作成し、オリジナルの経験式との比較を行った。その結果、以下のことがわかった。

- ・ 東北地方太平洋沖地震は含めず、その余震・前震を含めて、 Mw^2 の項を考慮し、東と西の地震の伝播経路の違いを考慮したケース 4 が、最適と考えられる。最適と考えた理由は以下である。
- ・ ケース 4 は、全てのケースのうち 1944 年東南海地震の大手町・横浜の観測波のスペクトルと最もあう。他の本震の記録を含めないケースは、周期 5~10 秒で地震動が大きくなり、1944 年東南海地震の大手町・横浜をかなり過大評価すると考えられる。本震の記録を含めたケースでは、過小

評価となる。

- ・ オリジナルでは、大手町と新宿での地盤増幅率や地震動に大きな違いがみられたが、ケース 4 ではほぼ同じとなり、地下構造が大きく違わないことを考えると合理的な結果と考えられる。
- ・ 太平洋プレート(東)の地震とフィリピン海プレート(西)の地震の、伝播経路の違いを反映した距離減衰特性の違いや関東平野の堆積層の厚い地点での地盤増幅率の違いが考慮できる。
- ・ 本震の記録を含めた場合の式では、オリジナルの式と比べて長周期地震動がかなり小さくなる。オリジナルの式が既往の三次元差分法や経験的 G 関数法による計算波と平均的に整合していたことを考慮すると、過小評価の懸念がある。また、本震の震源モデルを 1 枚断層と仮定しているが、この震源モデルの妥当性や、予測の際の震源モデルとの整合性などの問題が解決されていないため、本震の記録を含めて式を作成するのは難しい。

3-2 節でも、地震本部の東海地震、東南海地震、南海地震の長周期地震動の計算波と、旧経験式と改良経験式(応答スペクトル=ケース 4、群遅延時間=case b)との比較から、改良経験式は旧経験式より改善されていることを示している。

参考文献

- 古村孝志・中村操(2006). 1944 年東南海地震記録の復元と関東の長周期地震動、物理探査、第 59 巻、第 4 号、pp. 337-352.
- 片岡正次郎・佐藤智美・松本俊輔・日下部毅明(2006). 短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式、土木学会論文集 A、Vol. 62、NO. 4、pp. 740-757.
- 釜江克宏・川辺秀憲(2006). 南海地震における近畿圏の強震動予測、第 34 回地盤震動シンポジウム、日本建築学会、pp. 35-40.
- 気象庁(2011a). 「平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震」について(第 28 報)、<http://jma.go.jp/jma/press/1103/25b/kaisetsu201103251730.pdf>
- 気象庁(2011b). 3 月 9 日 三陸沖の地震－遠地実体波および近地強震波形による震源過程解析(暫定)－<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/sourceprocess/event/20110309farandnear.pdf>
- 気象庁(2011c). 3 月 11 日 岩手県沖の地震－近地強震波形による震源過程解析(暫定)－<http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/sourceprocess/event/201103111508near.pdf>
- Midorikawa, S., Akiba, S., Miura, H. and Masatsuki, T. (2006). Long-period Ground Motion at Tokyo during the 1944 Tonankai, Japan Earthquake, Proc. of the Third International Symposium on Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Vol.1, pp. 741-748.
- 宮腰淳一・中田猛・福和伸夫・柴田昭彦・白瀬陽一・斎藤賢二(2006). 名古屋市三の丸地区における耐震改修用の基準地震動の作成、日本地震工学会大会、pp. 394-395.
- 佐藤俊明・藤川智・渡辺基史・久保哲夫・福和伸夫(2006). 愛知県設計用入力地震動研究協議会による想定新東海地震に対する強震動予測、海溝型巨大地震を考える－広帯域強震動の予測 2－シンポジウム

論文集、pp. 101-107.

佐藤智美・大川出・西川孝夫・佐藤俊明・関松太郎(2010a). 応答スペクトルと位相スペクトルの経験式に基づく想定地震に対する長周期時刻歴波形の作成, 日本建築学会構造系論文集, 第 649 号, pp.521-530.

佐藤智美(2010b). 逆断層と横ずれ断層の違いを考慮した日本の地殻内地震の短周期レベルのスケールリング則、日本建築学会構造系論文集、第 651 号、pp. 923-932.

佐藤智美 (2012). 経験的グリーン関数法に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源モデル- プレート境界地震の短周期レベルに着目して - 日本建築学会構造系論文集、第 675 号(掲載予定)

関口春子・吉見雅行・吉田邦一・堀川晴央(2006). 海溝型巨大地震の広帯域地震動予測のためのマルチスケール不均質モデルと南海地震への適用、海溝型巨大地震を考えるー広帯域強震動の予測 2ーシンポジウム論文集、pp. 61-73.

鶴来雅人・趙伯明・Petukhin A.・香川敬生(2005). 東南海・南海地震による大阪での強震動予測事例ー広帯域強震動の予測ーシンポジウム論文集、pp. 73-82.

地震調査研究推進本部(2009). 「長周期地震動予測地図」2009年試作版、

http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_choshuki/choshuki2009_c3.pdf

表 2.3-1 追加した海溝型地震の諸元

年	発震時		深さ km	M_J	地震名 震源域名	地震規模		
	月日	時：分				M_0 [dyne \cdot cm]	M_w	文献
2008	5月8日	1:45	50.6	7.0	茨城県沖	1.97E+26	6.8	F-net
2008	7月19日	11:39	31.6	6.9	福島県沖	2.39E+26	6.9	F-net
2008	9月11日	9:20	30.9	7.1	十勝沖	1.97E+26	6.8	F-net
2008	12月20日	19:29	0.0	6.6	関東東方沖	4.30E+25	6.4	F-net
2009	8月13日	7:48	57.3	6.6	八丈島東方沖	6.60E+25	6.5	F-net
2011	3月9日	11:45	8.3	7.3	宮城県沖	1.34E+27	7.4	気象庁
2011	3月10日	6:23	9.3	6.8	宮城県沖	5.51E+25	6.4	F-net
2011	3月11日	15:08	31.7	7.4	岩手県沖	1.34E+27	7.4	気象庁
2011	3月11日	15:15	43.2	7.7	茨城県沖	5.66E+27	7.8	F-net
2011	3月11日	20:36	24.0	6.7	岩手県沖	8.33E+25	6.5	F-net
2011	3月13日	10:26	11.2	6.6	茨城県沖	2.02E+25	6.1	F-net
2011	3月14日	15:12	7.0	6.5	宮城県沖	1.03E+25	5.9	F-net
2010	3月14日	17:08	39.8	6.7	福島県沖	6.83E+25	6.5	F-net
2011	3月22日	16:18	28.0	6.7	茨城県沖	3.43E+25	6.3	F-net
2011	3月22日	18:44	0.4	6.5	三陸沖	3.01E+25	6.3	F-net
2011	3月28日	7:23	31.7	6.5	宮城県沖	1.66E+25	6.1	F-net
2011	3月29日	19:54	13.4	6.6	宮城県沖	1.99E+25	6.1	F-net

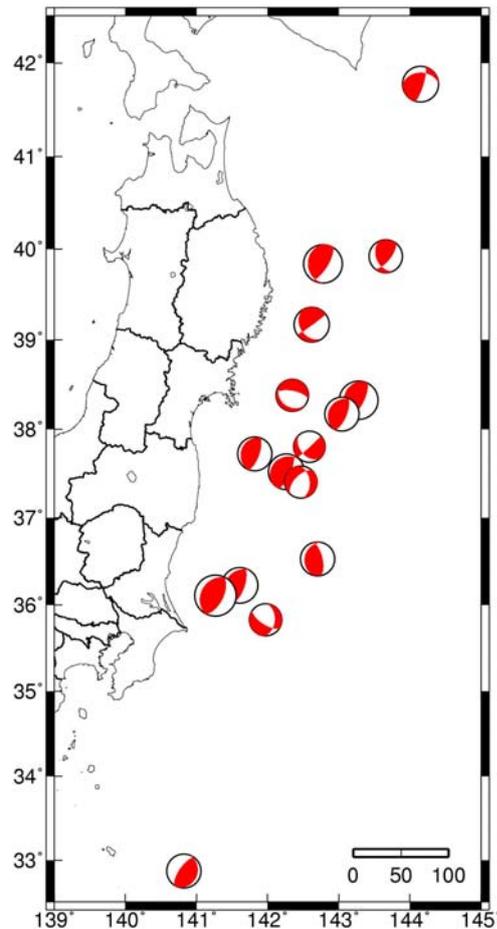


図 2.3-1 追加した海溝型地震の震央位置(気象庁)と CMT 解(F-net)

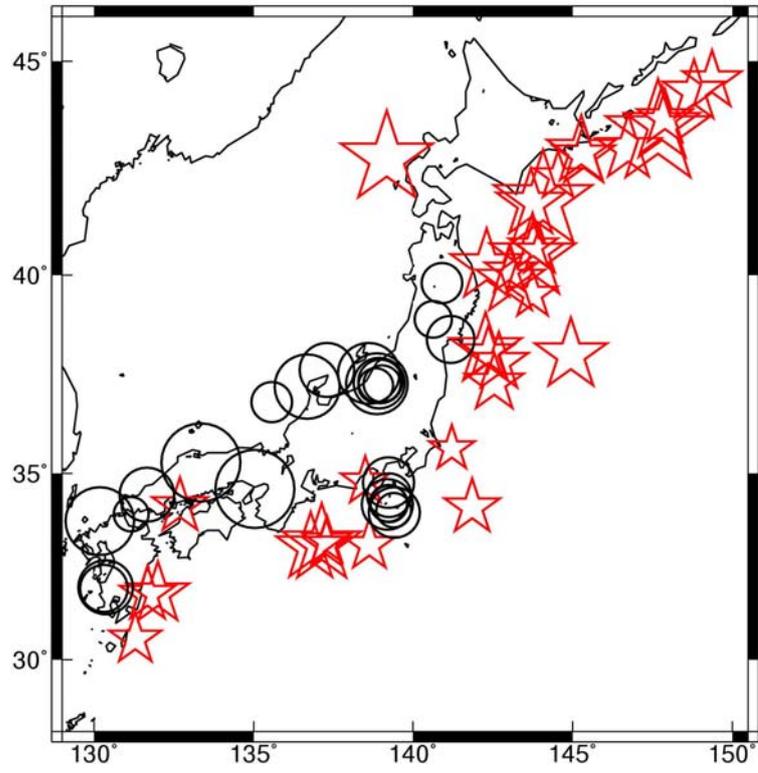
表 2.3-2 旧経験式作成に用いた海溝型地震の地震諸元 (地盤増幅率の推定にはこれに駿河湾地震が追加)

地震番号	発震時		東経			北緯			震源深さ km	M_J	地震名 震源域名	地震規模 (F-net or Harvard)		M_0	観測点 数		
	年	月日	時	分	秒	度	分	秒				度	分			秒	M_r
101	1996	10月19日	23:44	41.4	132	0	30	31	47	55	34.0	6.9	日向灘	1.43E+26	6.7		149
102	1996	12月3日	7:17	58.1	131	40	50	31	46	11	38.0	6.7	日向灘	1.23E+26	6.7		107
103	1999	1月24日	9:37	6.1	131	17	24	30	34	7	40.0	6.6	種子島近海	6.58E+25	6.5		58
104	2000	1月28日	23:21	8.8	146	44	40	43	0	29	58.5	7.0	根室半島南東沖	1.21E+26	6.7		61
105	2001	3月24日	15:27	54.5	132	41	37	34	7	56	46.5	6.7	平成13年(2001年)芸予地震	1.51E+26	6.7	関口・岩田(2002)	465
106	2001	5月25日	9:40	52.9	148	48	48	44	18	58	30.0	6.9	択捉南東沖	8.71E+25	6.6		12
107	2003	9月26日	4:50	7.4	144	4	43	41	46	43	45.1	8.0	平成15年(2003年)十勝沖地震	8.21E+27	7.9	Koketsu et al.(2004)	375
108	2003	9月26日	6:08	1.8	143	41	29	41	42	35	21.4	7.1	同余震	1.15E+27	7.3		366
109	2003	9月29日	11:36	55.1	144	33	11	42	21	35	42.5	6.5	同余震	4.96E+25	6.4		175
110	2003	10月31日	10:06	30.7	142	41	46	37	49	56	33.3	6.8	宮城県沖	1.42E+26	6.7		258
111	2004	9月5日	19:07	7.5	136	47	52	33	1	59	37.6	7.1	紀伊半島沖(三重県南東沖)	7.54E+26	7.2	山中(2005)	524
112	2004	9月5日	23:57	16.8	137	8	29	33	8	15	43.5	7.4	紀伊半島沖(三重県南東沖)	1.69E+27	7.4	山中(2005)	516
113	2004	9月7日	8:29	36.3	137	17	34	33	12	33	41.0	6.5	紀伊半島沖(三重県南東沖)	6.00E+25	6.5		351
114	2004	9月8日	23:58	23.2	137	17	15	33	7	4	36.1	6.5	紀伊半島沖(三重県南東沖)	1.62E+25	6.1		254
115	2004	11月29日	3:32	14.5	145	16	32	42	56	46	48.2	7.1	根室半島沖	3.36E+26	7.0		208
116	2004	12月6日	23:15	11.8	145	20	34	42	50	52	45.8	6.9	根室半島沖	1.41E+26	6.7		199
117	2005	8月16日	11:46	25.7	142	16	40	38	8	58	42.0	7.2	宮城県沖	5.43E+26	7.1	国土地理院(2005)	427
118	2005	11月15日	6:38	51.4	144	56	41	38	1	38	45.0	7.2	三陸はるか沖	4.06E+26	7.0		95
120	2005	12月2日	22:13	7.9	142	21	13	38	4	22	40.3	6.6	宮城県沖	5.39E+25	6.4		255
121	1989	10月29日	14:25	37.8	143	44	36	39	31	6	0.0	6.5	三陸はるか沖	5.76E+25	6.4		8
122	1989	11月2日	3:25	33.5	143	3	24	39	51	18	0.0	7.1	三陸はるか沖	1.36E+27	7.4		13
123	1990	9月24日	6:13	6.7	138	38	0	33	6	12	60.0	6.6	東海地方南方はるか沖	7.08E+25	6.5		16
124	1993	7月12日	22:17	11.7	139	11	0	42	46	48	35.1	7.8	平成5年(1993年)北海道南西沖地震	4.65E+27	7.7	Mendoza et al.(1993)	9
125	1994	4月8日	10:10	41.2	143	57	24	40	34	6	2.5	6.5	三陸はるか沖	4.62E+25	6.4		6
126	1994	10月4日	22:22	56.9	147	40	42	43	22	18	28.0	8.2	平成6年(1994年)北海道東方沖地震	3.00E+28	8.3	菊地・金森(1995)	3
127	1994	10月9日	16:55	39.0	147	48	24	43	33	18	0.0	7.3	北海道東方沖	9.38E+26	7.2		3
128	1994	12月28日	21:19	20.9	143	44	54	40	25	36	0.0	7.6	平成6年(1994年)三陸はるか沖地震	4.89E+27	7.7	Nakamura et al.(1997)	15
129	1994	12月29日	5:52	26.3	143	1	24	40	6	48	0.0	6.5	岩手県北東沖	2.06E+25	6.1		10
130	1995	1月7日	7:37	37.2	142	18	33	40	13	14	47.8	7.2	岩手県北東沖	3.33E+26	6.9		17
131	1995	4月29日	1:30	0.8	147	53	13	43	42	28	3.0	6.7	北海道東方沖	2.77E+26	6.9		2
136	1995	12月30日	21:11	4.8	143	45	22	40	41	52	0.0	6.5	三陸はるか沖	3.61E+25	6.3		5
137	1996	2月17日	0:22	58.2	142	33	4	37	18	23	58.0	6.8	福島県東方沖	1.33E+26	6.7		17
138	1996	9月11日	11:37	14.3	141	13	1	35	38	20	52.0	6.4	銚子付近	1.97E+25	6.1		167

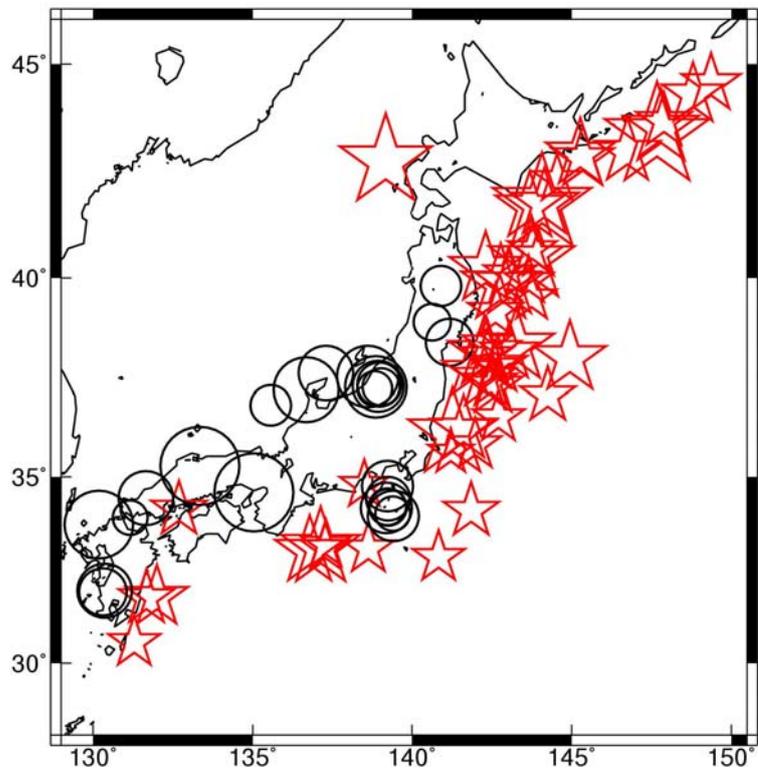
表 2.3-3 旧経験式作成に用いた地殻内地震の地震諸元

地震 番号	発震時			東経			北緯			震源深さ km	M_J	地震名 震源域名	地震規模 (F-net or Harvard)			地震規模 (震源インバージョン) 文献		観測点 数	
	年	月	日	時	分	秒	度	分	秒				度	分	秒	M_w	M_0		M_w
1	1996	8月11日	3:12	18.0	140	38	1	38	54	29	8.6	6.1	秋田県内陸南部	9.51E+24	5.9			88	
2	1997	3月26日	17:31	47.9	130	21	32	31	58	22	11.9	6.6	鹿児島県薩摩地方	1.40E+25	6.0	1.50E+25	6.1	Hotikawa(2001)	123
3	1997	5月13日	14:38	27.6	130	18	10	31	56	54	9.2	6.4	鹿児島県薩摩地方	1.22E+25	6.0			107	
4	1997	6月25日	18:50	12.8	131	39	58	34	26	29	8.3	6.6	山口県北部	5.66E+24	5.8			170	
5	1998	9月3日	16:58	17.2	140	54	4	39	48	22	7.9	6.2	岩手県内陸北部	7.53E+24	5.9			66	
6	2000	6月7日	6:16	43.2	135	33	47	36	49	35	21.3	6.2	石川県西方沖	5.93E+24	5.8			235	
7	2000	7月1日	16:01	56.3	139	11	37	34	11	24	16.1	6.5	新島・神津島近海	2.28E+25	6.2			78	
8	2000	7月9日	3:57	44.9	139	13	50	34	12	43	15.4	6.1	新島・神津島近海	7.79E+24	5.9			51	
9	2000	7月15日	10:30	32.0	139	14	31	34	25	24	9.7	6.3	新島・神津島近海	1.24E+25	6.0			123	
10	2000	7月30日	9:18	2.3	139	24	7	34	1	49	11.1	6.0	三宅島近海	4.28E+24	5.7			30	
11	2000	7月30日	21:25	46.6	139	24	39	33	58	16	17.0	6.5	三宅島近海	5.02E+25	6.4			138	
12	2000	8月18日	10:52	22.6	139	14	26	34	12	5	12.4	6.1	新島・神津島近海	4.65E+24	5.7			30	
13	2000	10月16日	13:30	17.9	133	20	56	35	16	27	9.0	7.3	平成12年(2000年)鳥取県西部地震	8.62E+25	6.6	1.61E+26	6.7	岩田・関口(2002)	431
15	2003	7月26日	7:13	31.5	141	10	16	38	24	18	11.9	6.4	宮城県北部〔宮城県中部〕	1.53E+25	6.1	2.32E+25	6.2		332
16	2004	10月23日	17:56	0.3	138	52	2	37	17	33	13.1	6.8	平成16年(2004年)新潟県中越地震	7.53E+25	6.5	8.80E+25	6.6	Hikima and Koketsu(2005)	574
17	2004	10月23日	18:03	12.7	138	59	0	37	21	14	9.4	6.3	同余震	9.33E+24	5.9	8.50E+24	5.9	Hikima and Koketsu(2005)	447
18	2004	10月23日	18:11	56.8	138	49	46	37	15	11	11.5	6.0	同余震	4.11E+24	5.7			406	
19	2004	10月23日	18:34	5.7	138	55	48	37	18	23	14.2	6.5	同余震	2.93E+25	6.2	3.20E+25	6.3	Hikima and Koketsu(2005)	536
20	2004	10月27日	10:40	50.2	139	2	0	37	17	31	11.6	6.1	同余震	6.34E+24	5.8	7.50E+24	5.9	Hikima and Koketsu(2005)	457
22	2005	3月20日	10:53	40.3	130	10	35	33	44	21	9.2	7.0	福岡県西方沖	7.80E+25	6.5	1.15E+26	6.6	Asano and Iwata(2006)	354
23	2007	3月25日	9:41	57.9	136	41	10	37	13	14	10.7	6.9	平成19年(2007年)能登半島地震	1.36E+26	6.7	1.06E+26	6.6	青井・関口(2007)	542
27	2007	7月16日	10:13	22.5	138	36	34	37	33	25	16.8	6.8	平成19年(2007年)新潟県中越沖地震	9.30E+25	6.6	1.43E+26	6.7	国土地理院(2008)	621
28	1990	2月20日	15:53	39.8	139	14	0	34	45	36	5.8	6.5	伊豆大島近海	4.33E+25	6.4	4.00E+25	6.3	Fukuyama et al.(1993)	25
29	1991	10月28日	10:09	12.8	131	10	0	33	55	12	18.5	6.0	周防灘	7.48E+23	5.2			14	
30	1993	2月7日	22:27	43.7	137	18	0	37	39	12	24.8	6.6	能登半島沖	3.41E+25	6.3			26	
31	1995	1月17日	5:46	51.9	135	2	16	34	35	43	16.1	7.3	平成7年(1995年)兵庫県南部地震	2.43E+26	6.9	3.30E+26	6.9	Sekiguchi et al.(2002)	25

1、28、29、30、31がHarvard, その他はF-net

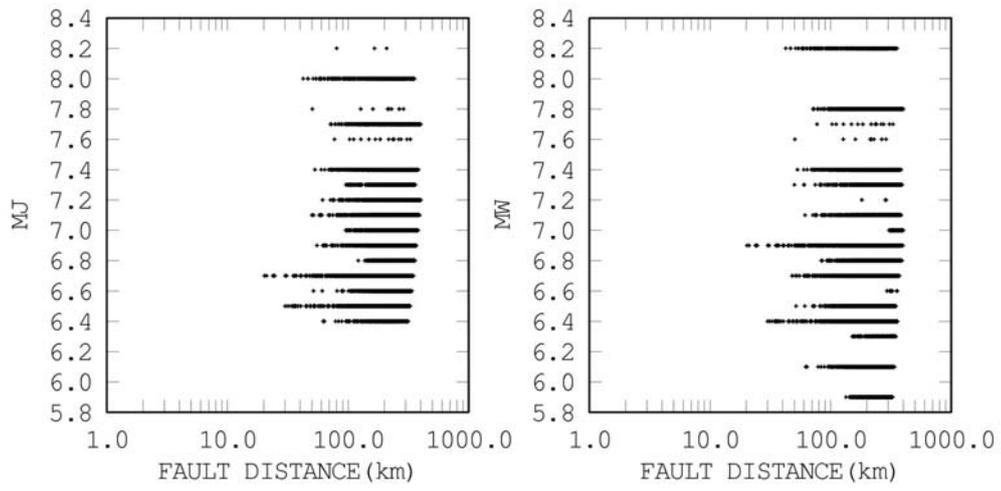


(a) 旧データ (表 2.3-2 と表 2.3-3)

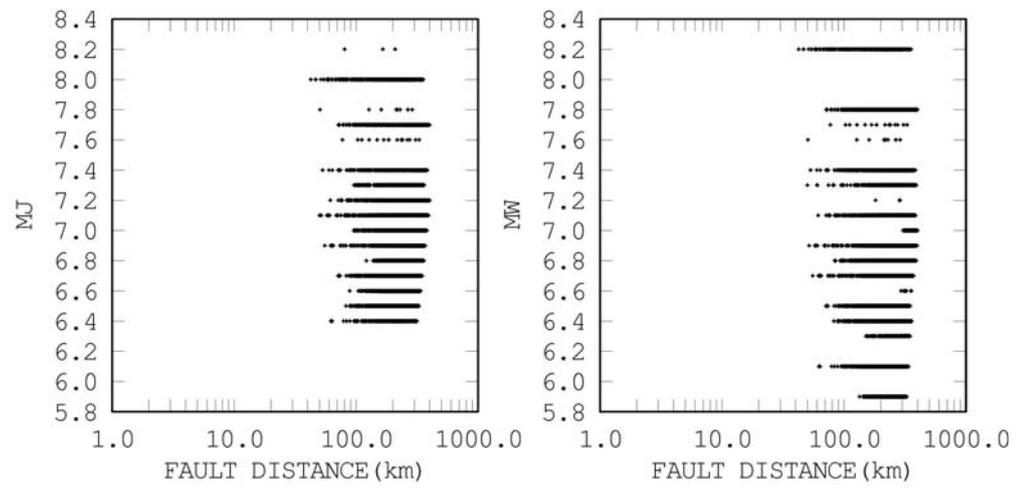


(b) 新データ (表 2.3-1 と表 2.3-2 と表 2.3-3)

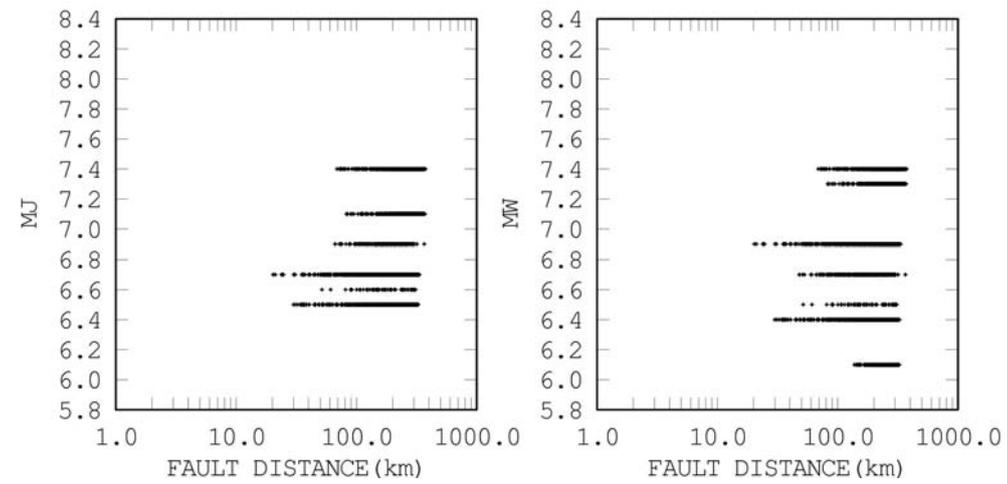
図 2.3-2 震央位置



(a) 全体



(b) 東の地震



(c) 西の地震

図 2.3-3 追加したデータを含めた海溝型地震の新データセット

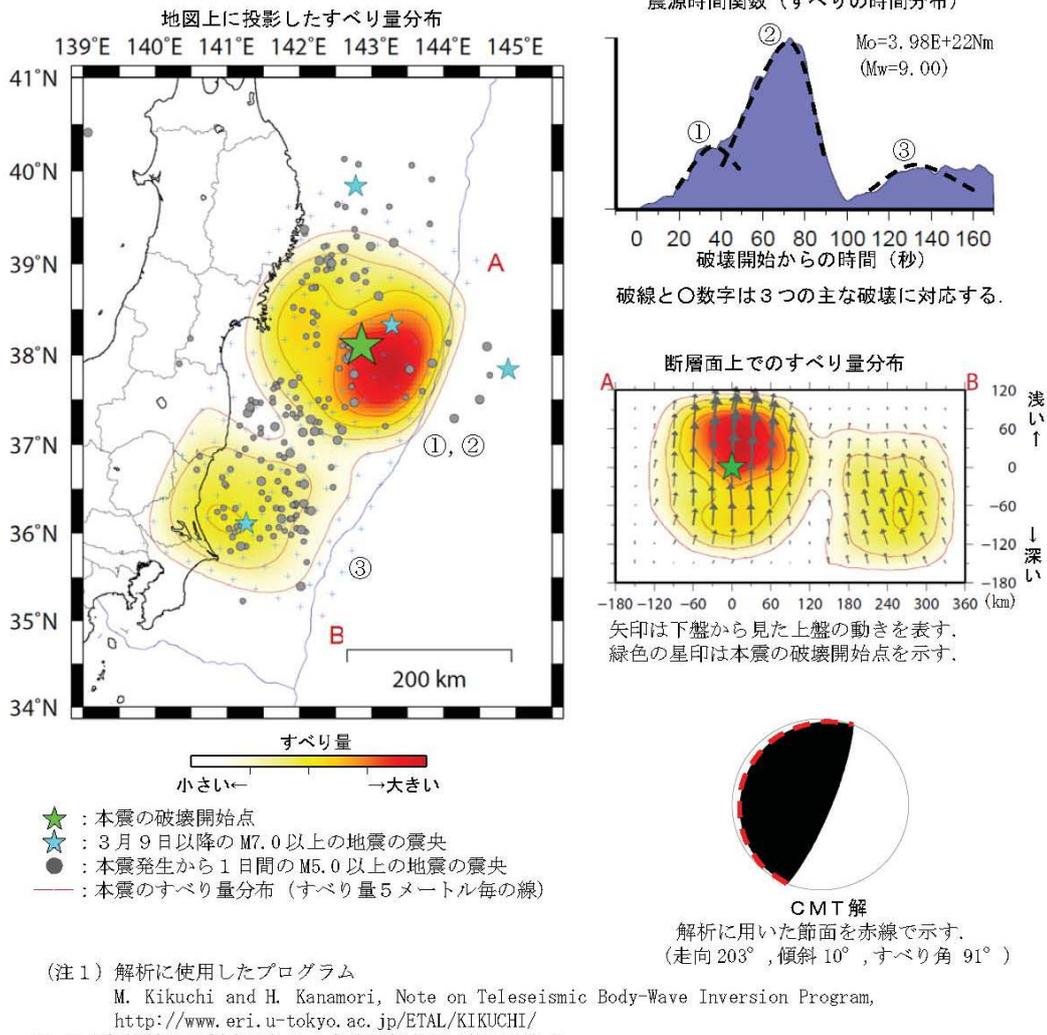


図 2.3-4 気象庁(2011a)の遠地実体波を用いた東北地方太平洋沖地震の震源インバージョン結果

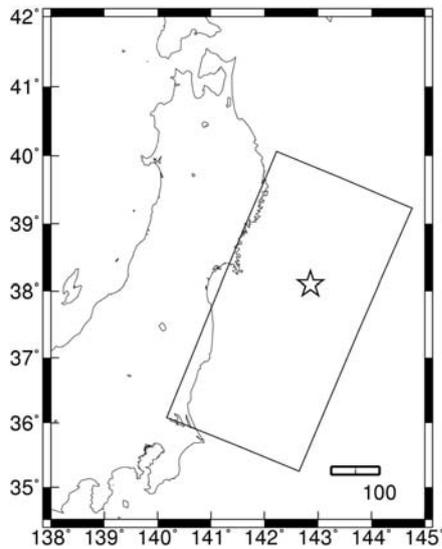


図 2.3-5 気象庁(2011a)の遠地実体波を用いた震源インバージョンの震源モデルに基づき設定した東北地方太平洋沖地震の巨視的断層面(☆は気象庁の震央位置)

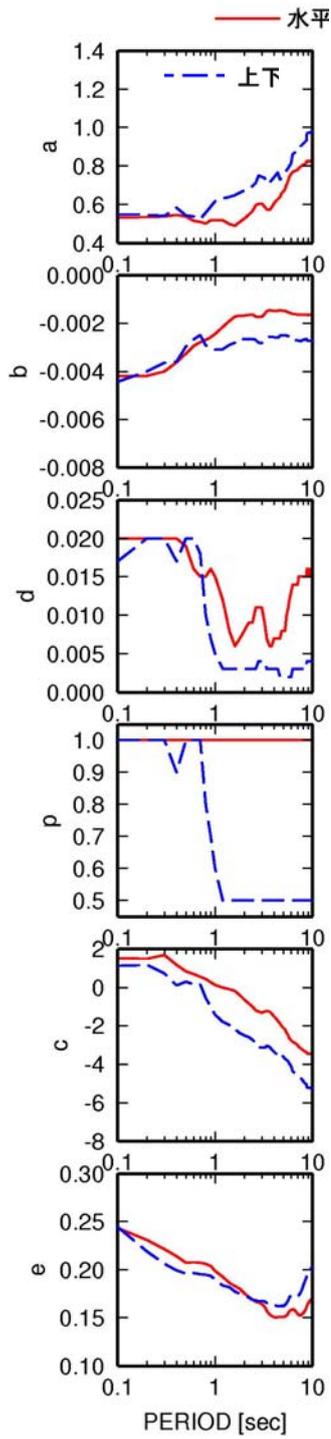
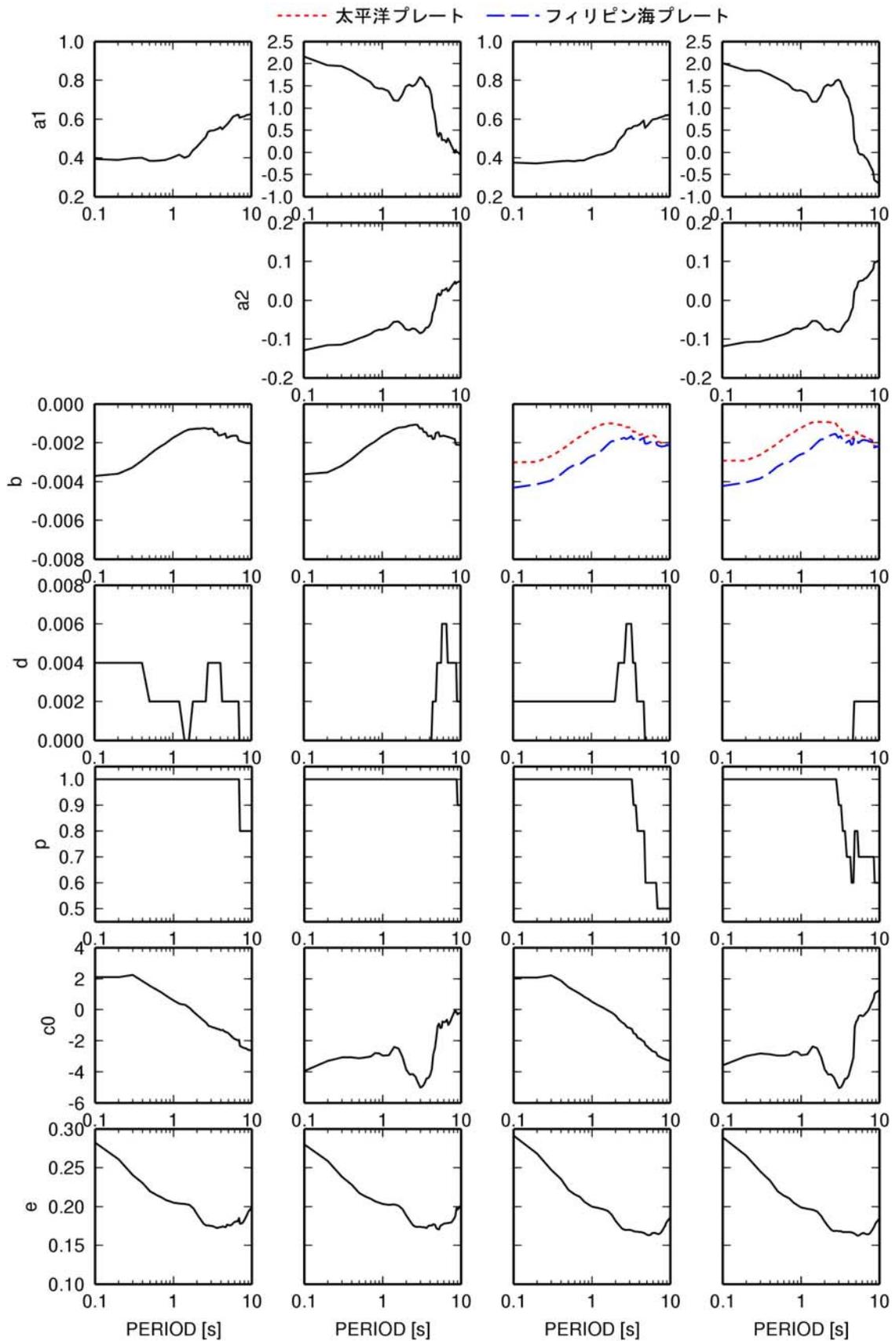


図 2.3-6 旧経験式(ケース 0)の加速度応答スペクトルの経験式の回帰係数(海溝型地震)



ケース 1 (M_w^2 項なし) ケース 2 (M_w^2 項あり) ケース 3 (M_w^2 項なし) ケース 4 (M_w^2 項あり)

(a) 伝播経路の違いなし

(b) 伝播経路の違いあり

図 2.3-7 ケース 1~4(本震をいれない基本ケース)の加速度応答スペクトルの回帰係数

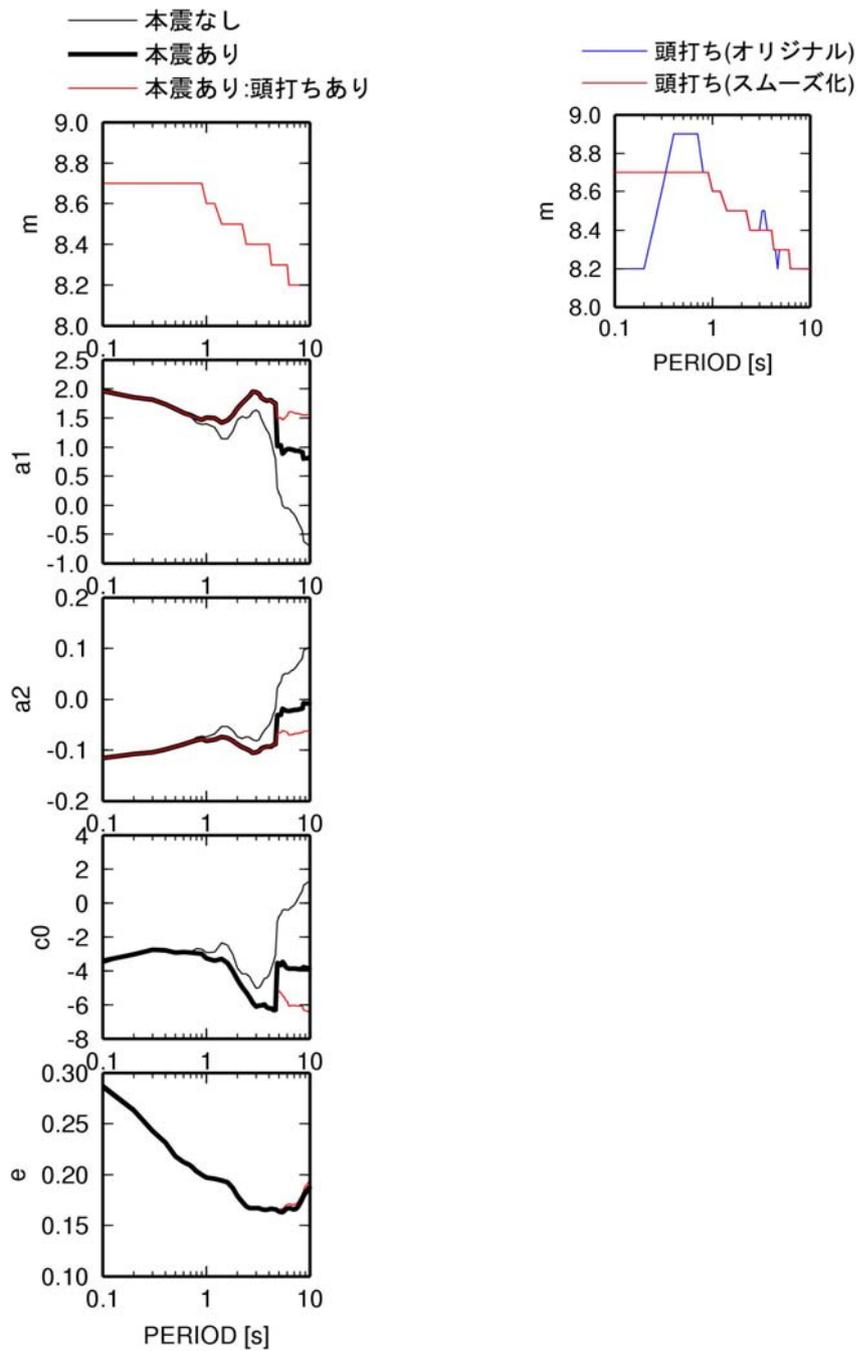
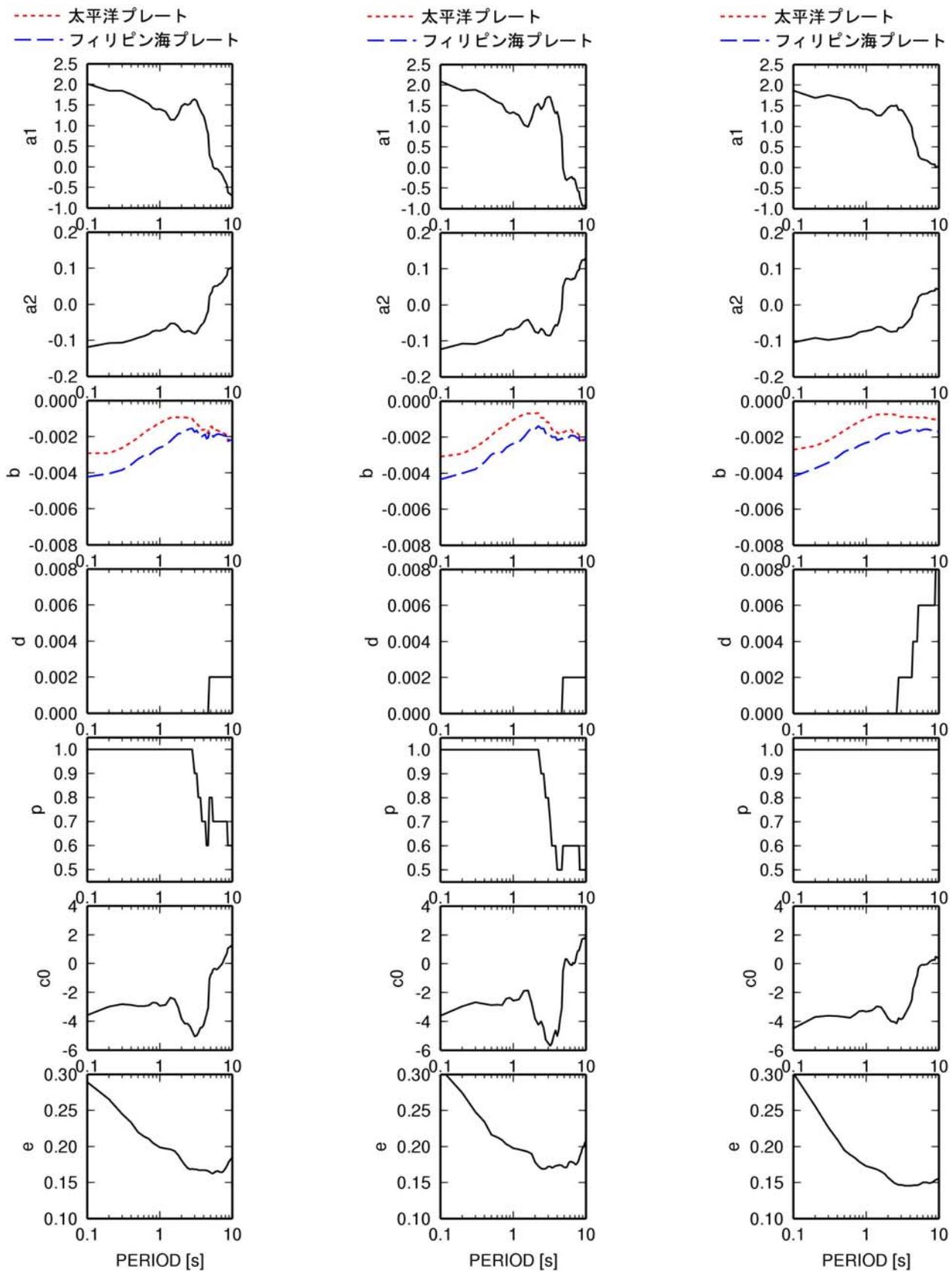


図 2.3-8 ケース 5 と 6 (本震を加え、 M_w^2 項、伝播経路の違いを考慮した比較用ケース) の加速度応答スペクトルの回帰係数 (m は最大 M_w)

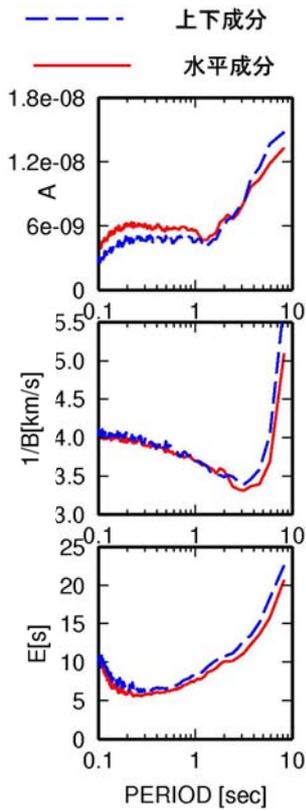


(a) $h=5\%$ の Sa

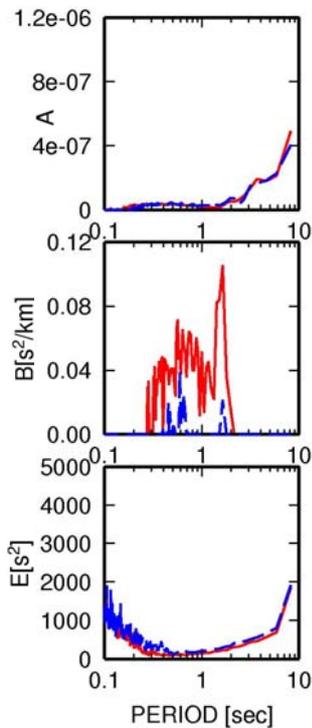
(b) $h=1\%$ の Sa

(c) エネルギースペクトル

図 2.3-9 ケース 4 の経験式の回帰係数

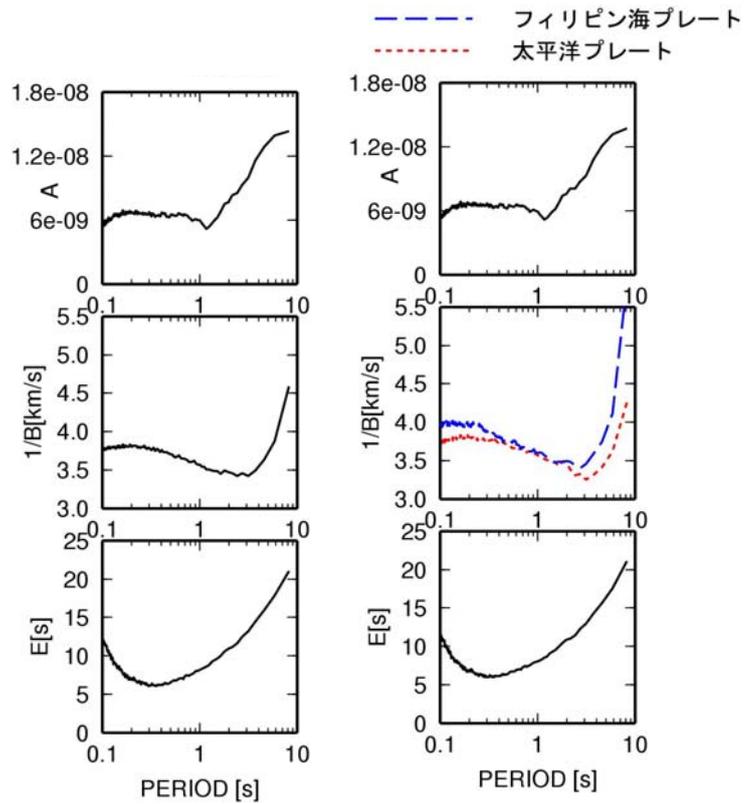


(a) 平均値 $\mu_{t_{gr}}$

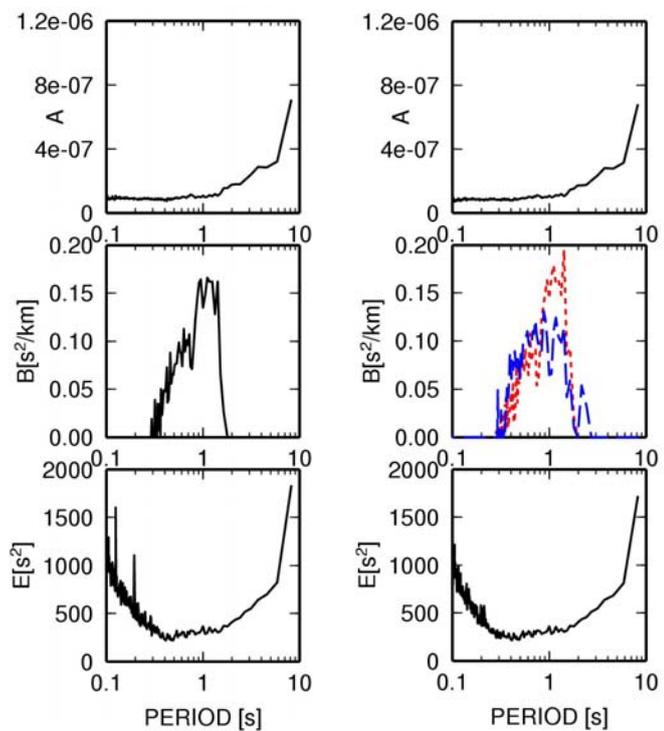


(b) 分散 $\sigma_{t_{gr}}^2$

図 2.3-10 旧経験式の群遅延時間の回帰係数



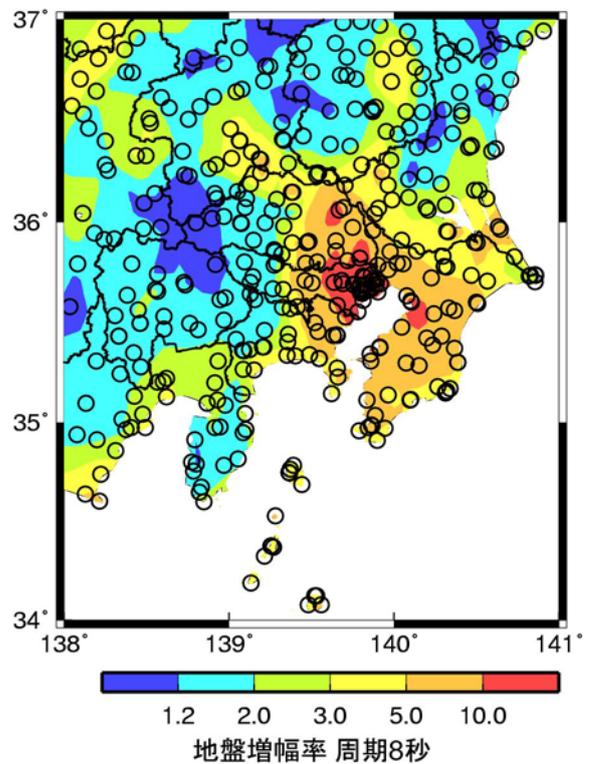
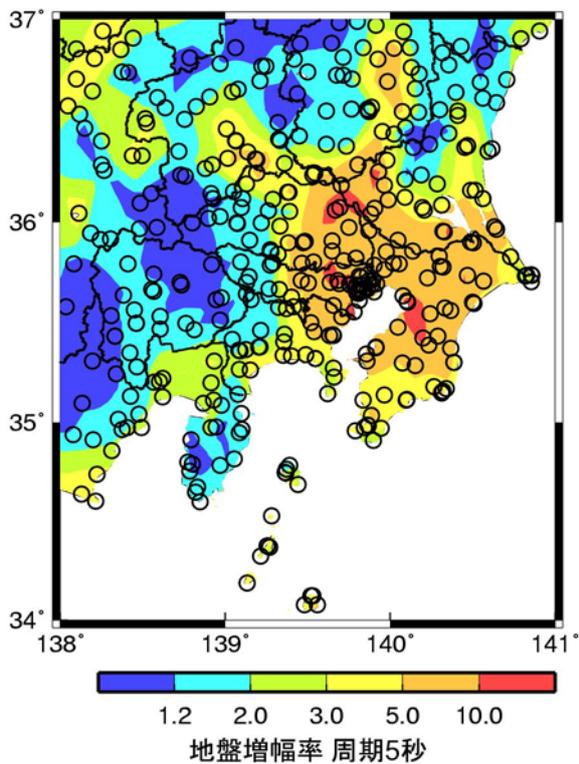
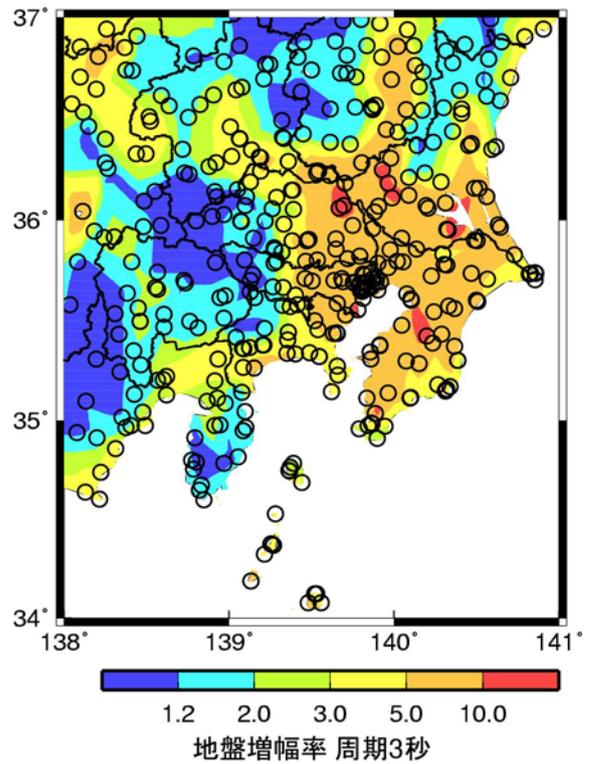
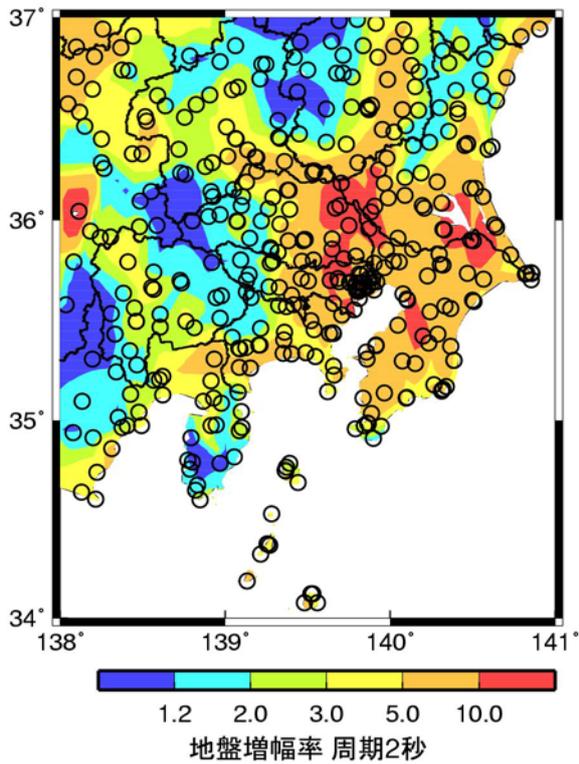
(a) 平均値 $\mu_{t_{gr}}$



(b) 分散 $\sigma_{t_{gr}}^2$

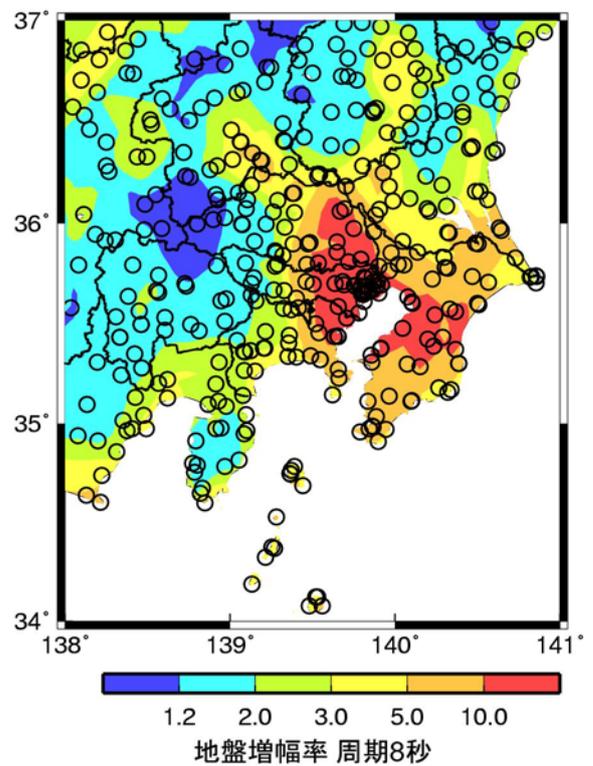
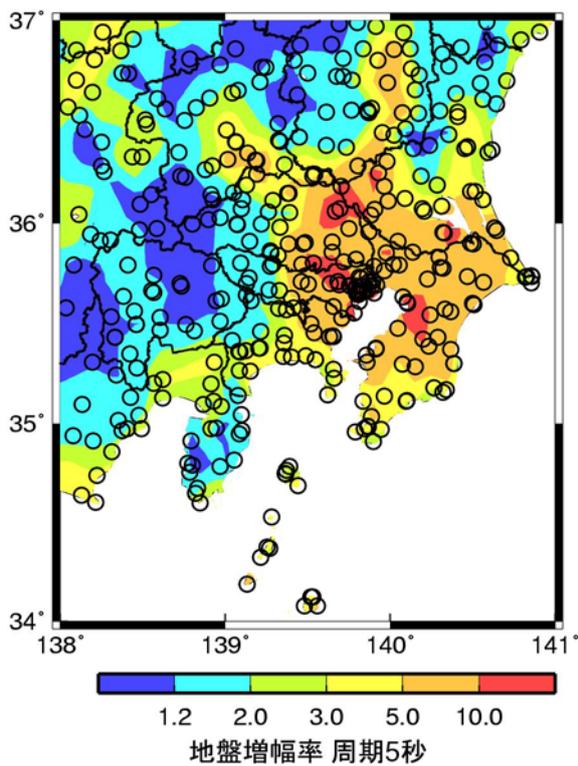
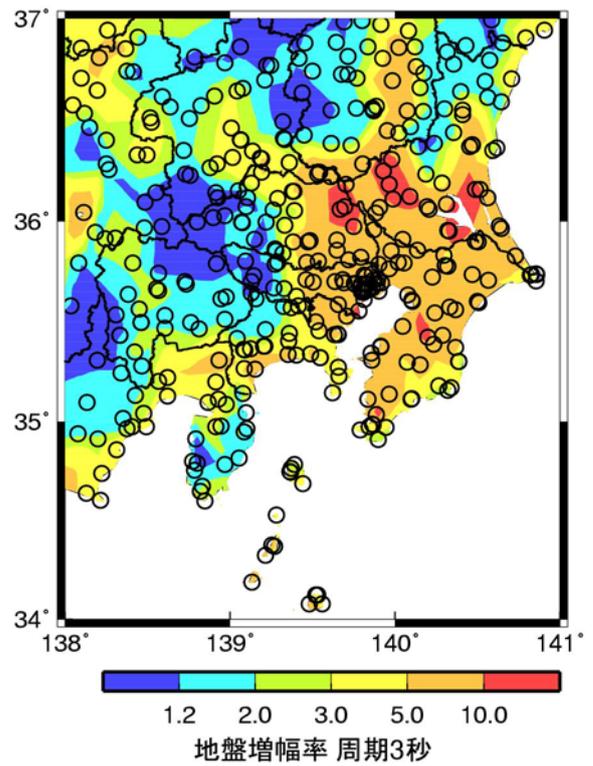
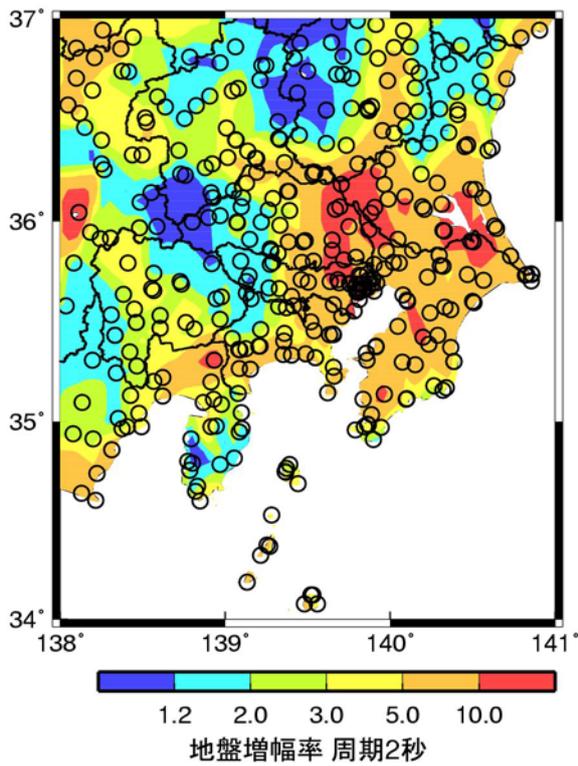
伝播経路の違いなし(ケース a) 伝播経路の違いあり(ケース b)

図 2.3-11 改良経験式の群遅延時間の回帰係数



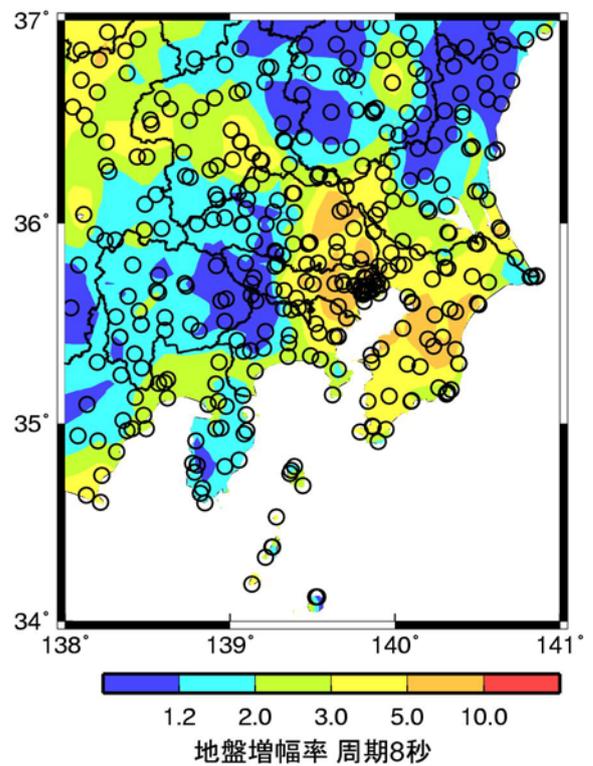
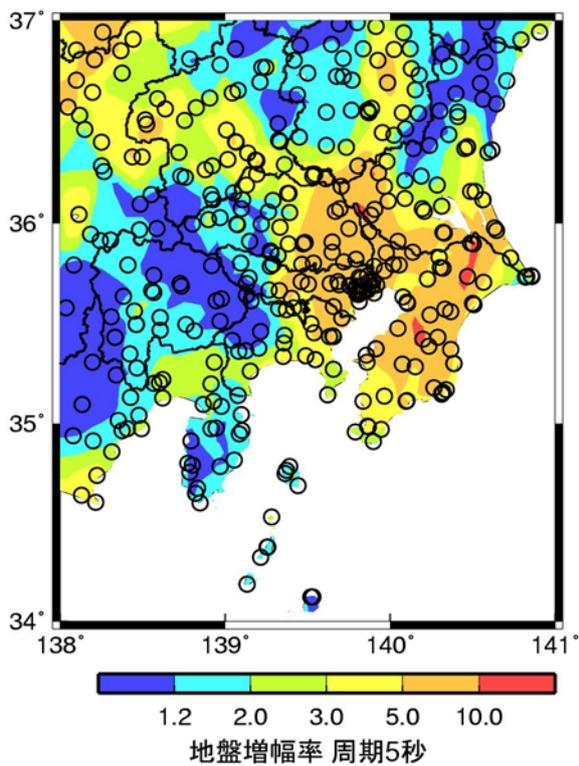
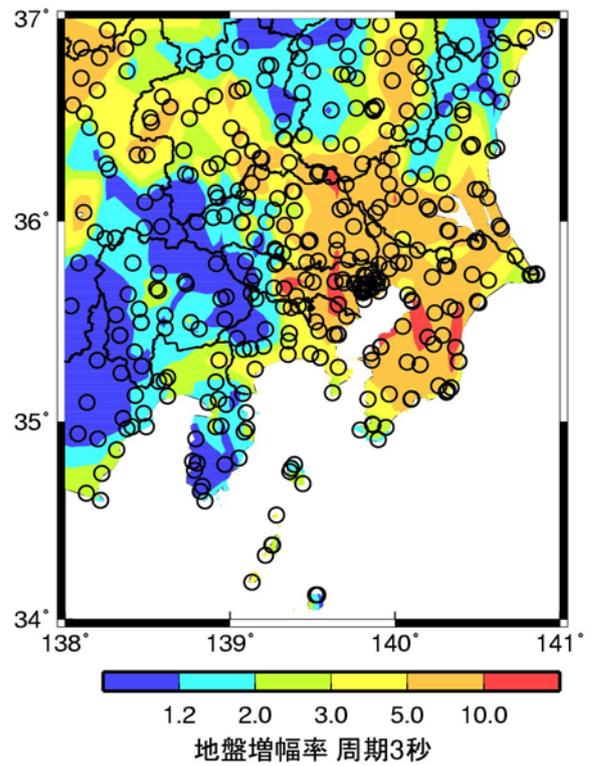
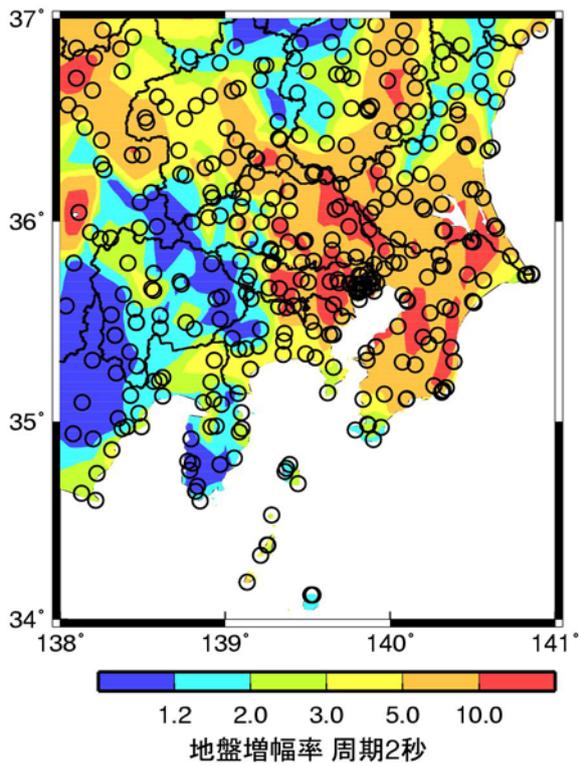
S_A h=5 %: 水平成分(Mw : 海溝型+地殻内全て,2010版)

図 2.3-12 ケース 0(旧経験式)の応答スペクトルの関東平野における地盤増幅率



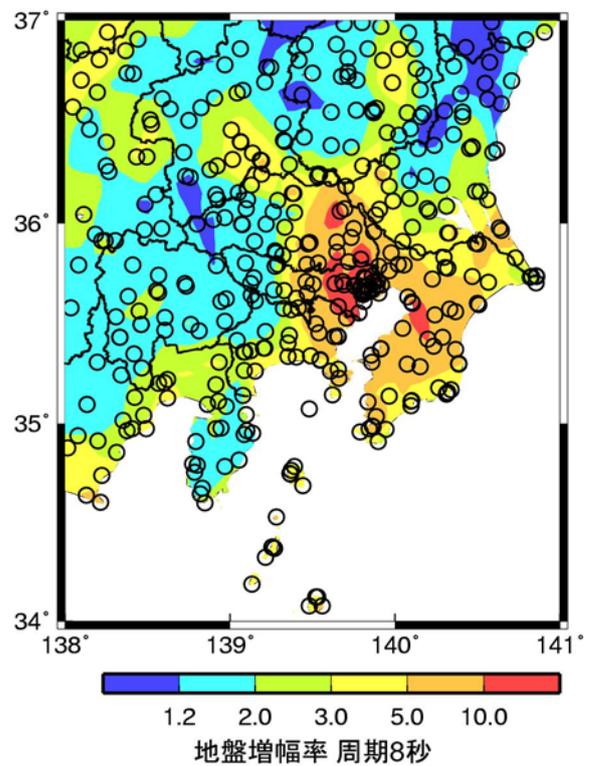
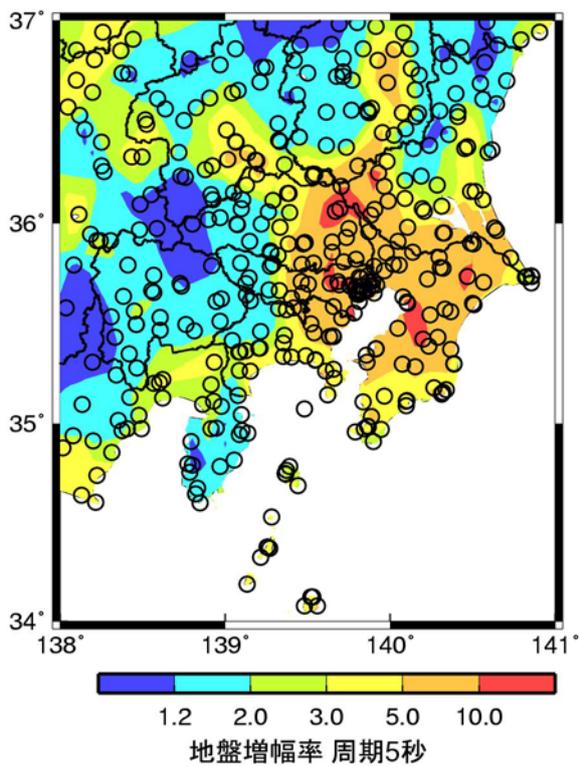
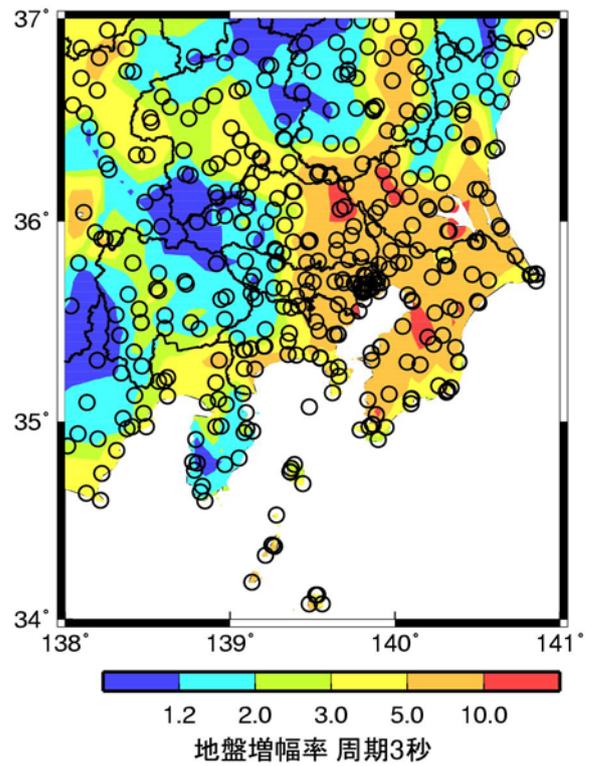
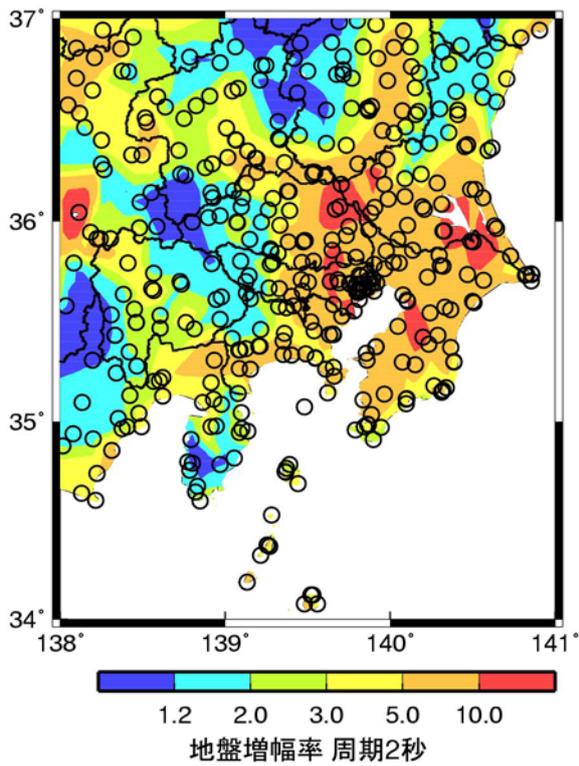
S_A h=5 %: 水平成分(Mw :地殻内地震, 2010版)

図 2.3-13 ケース0(旧経験式)の応答スペクトルの地盤増幅率のうち地殻内地震のみの関東平野における増幅率



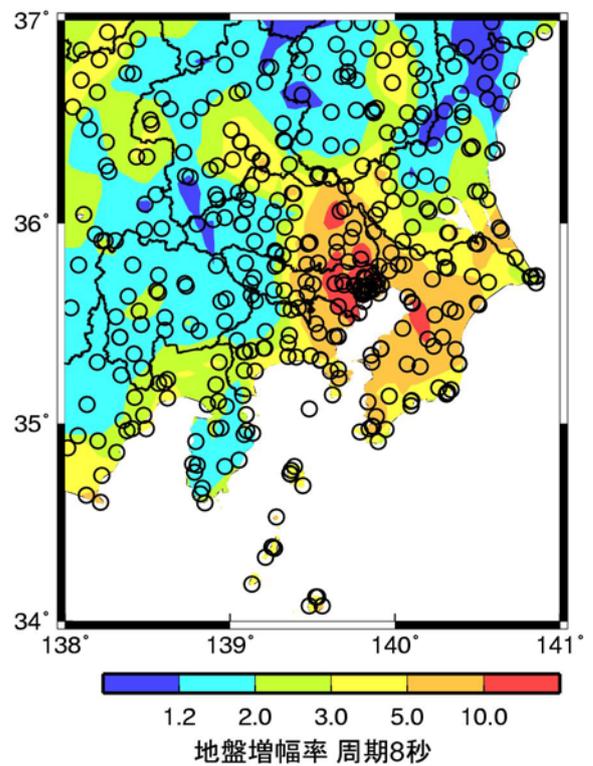
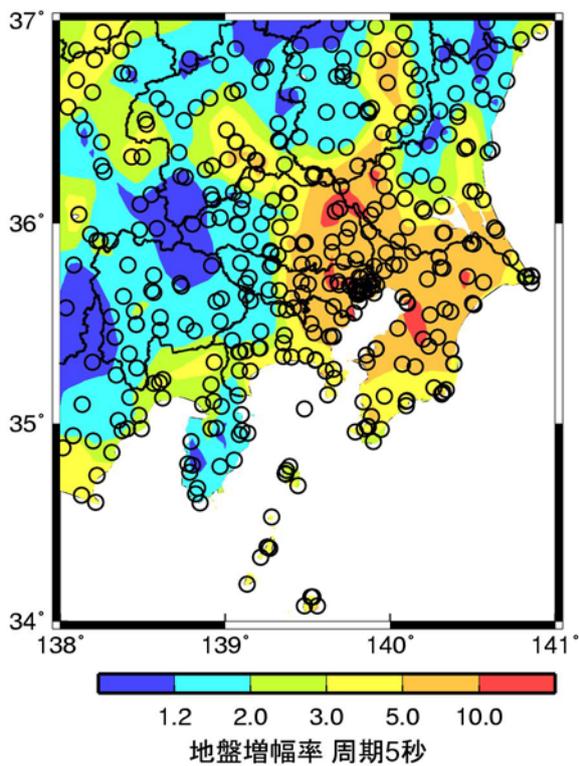
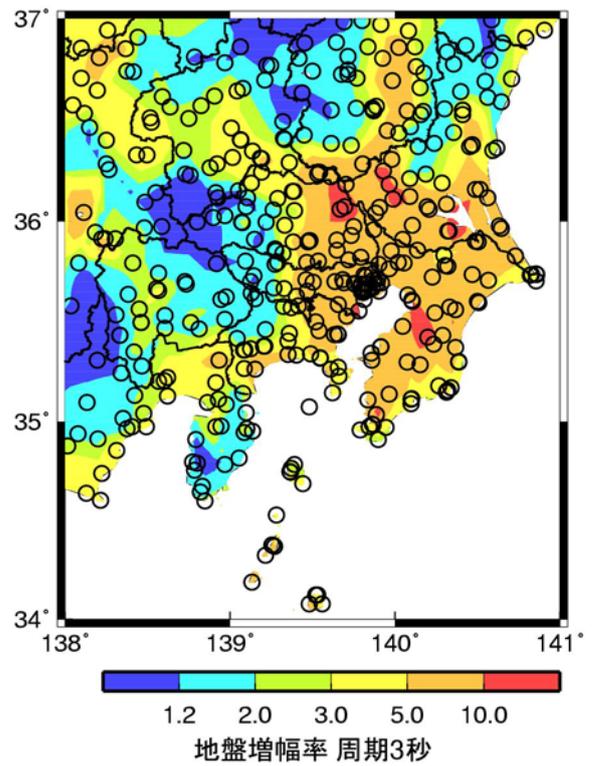
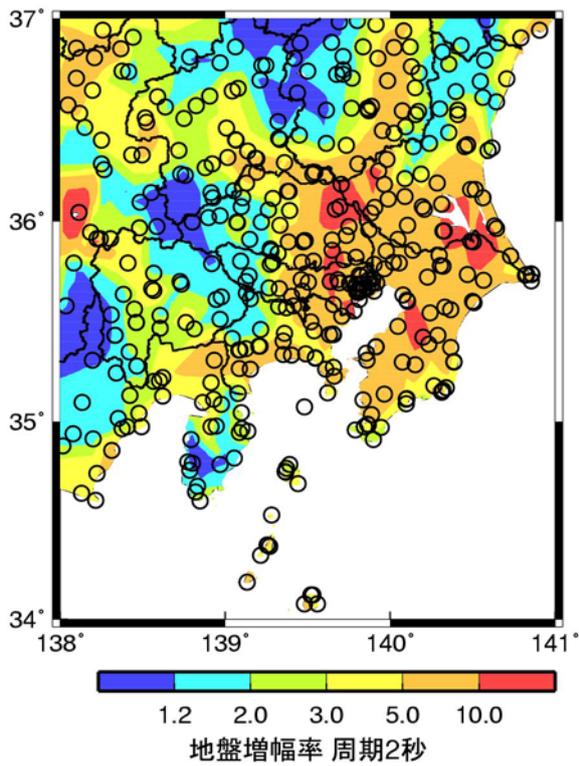
S_A h=5 %: 水平成分(Mw :海溝型地震, 2010版)

図 2.3-14 ケース0(旧経験式)の応答スペクトルの地盤増幅率のうち海溝型地震のみの関東平野における幅率



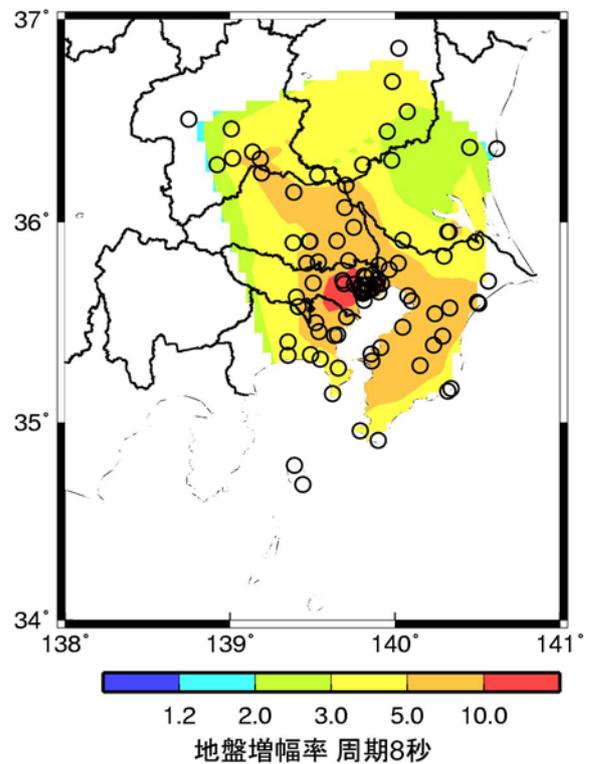
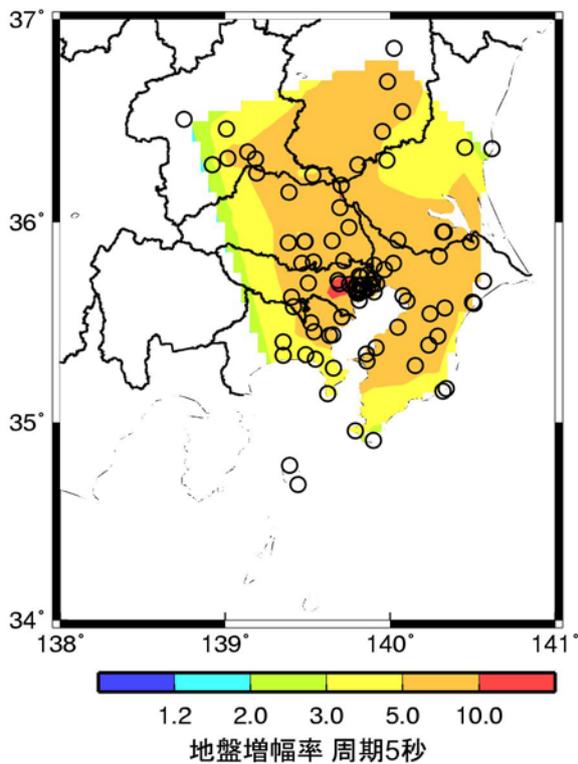
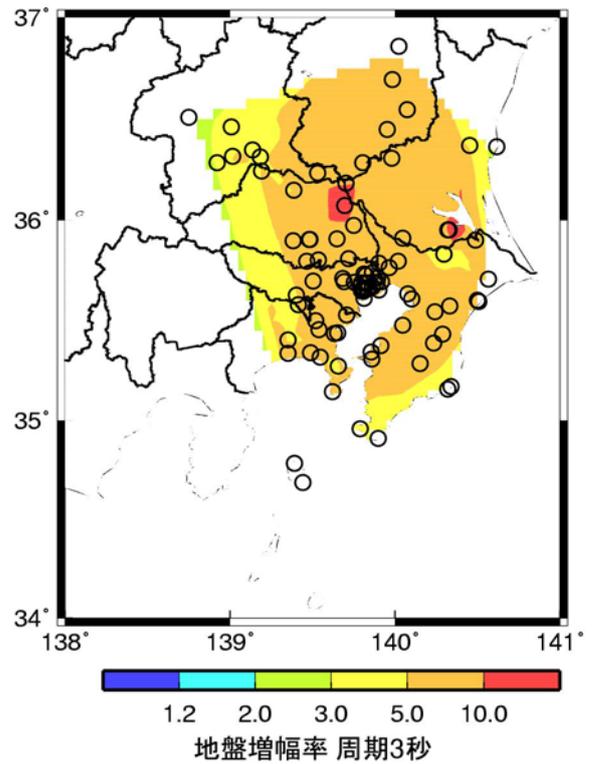
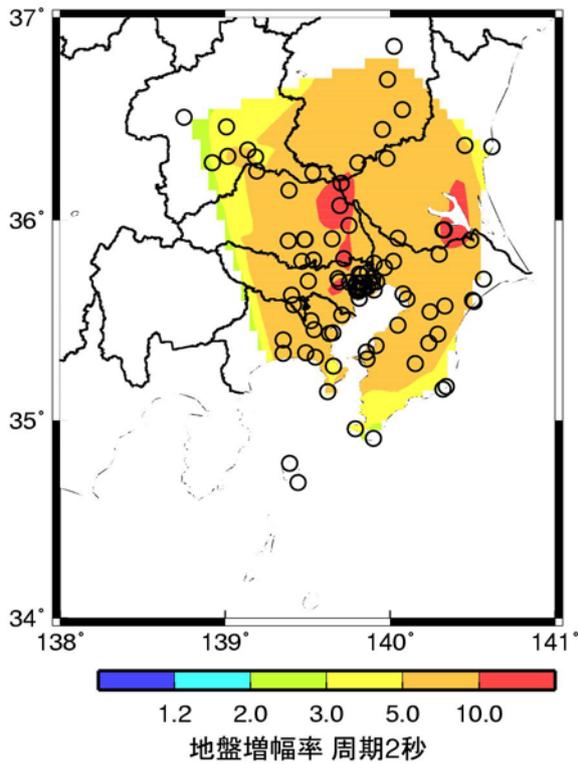
S_A h=5 %: 水平成分(Mw : 海溝型地震全て+地殻内地震)

図 2.3-15 ケース 1 の応答スペクトルの関東平野における地盤増幅率



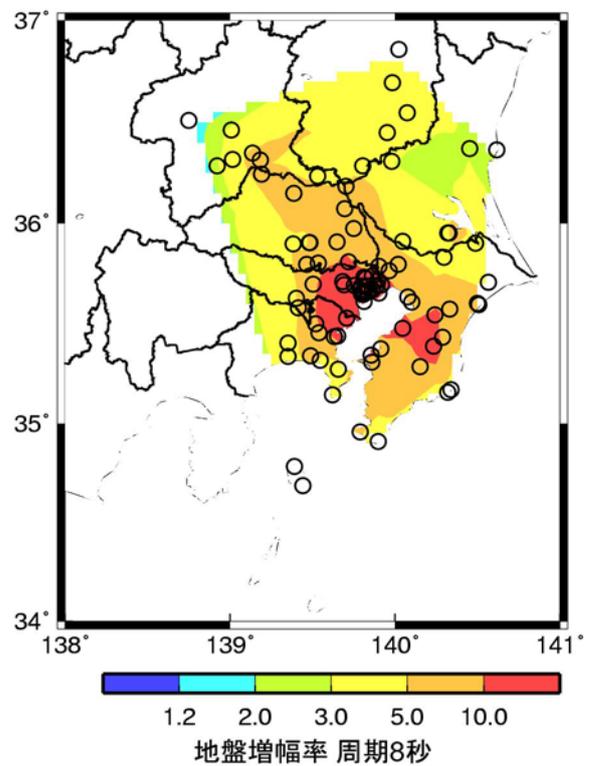
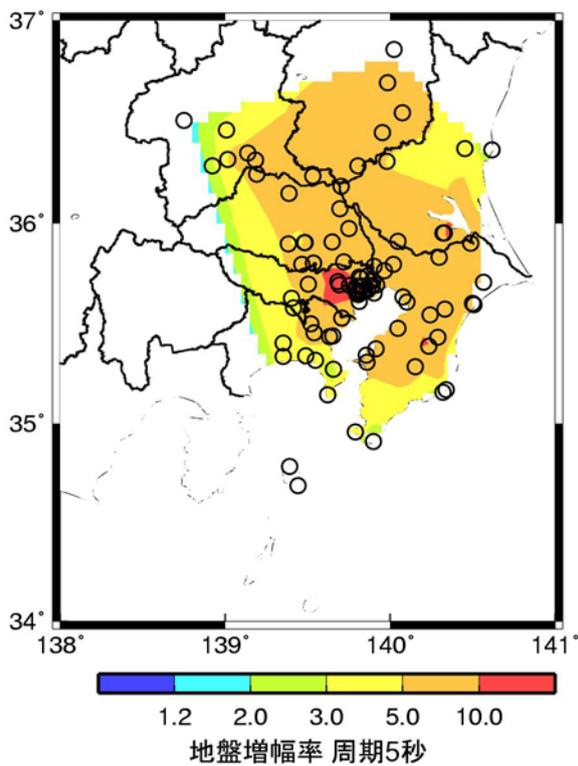
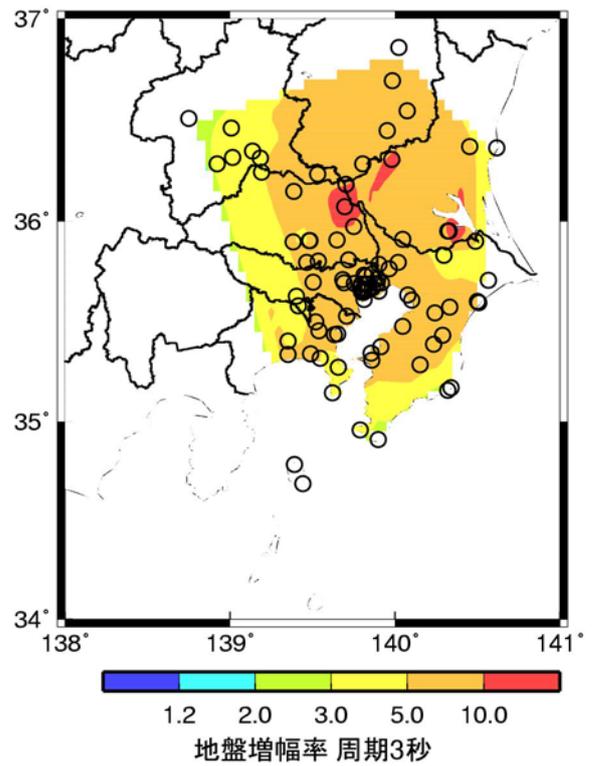
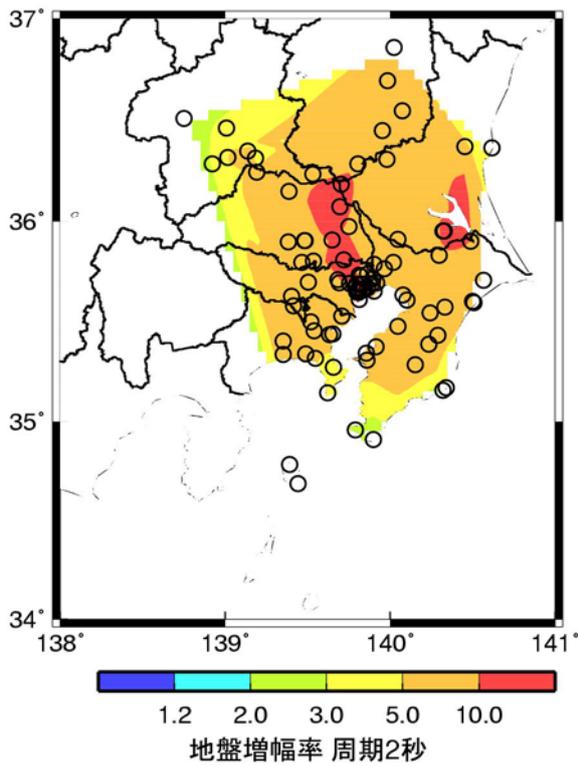
S_A $h=5\%$: 水平成分(Mw2: 海溝型地震全て+地殻内地震)

図 2.3-16 ケース 2 の応答スペクトルの関東平野における地盤増幅率



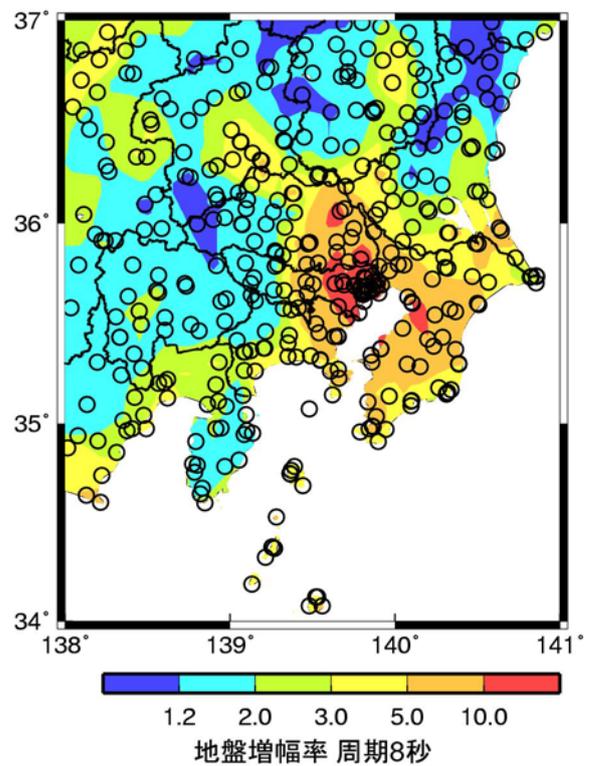
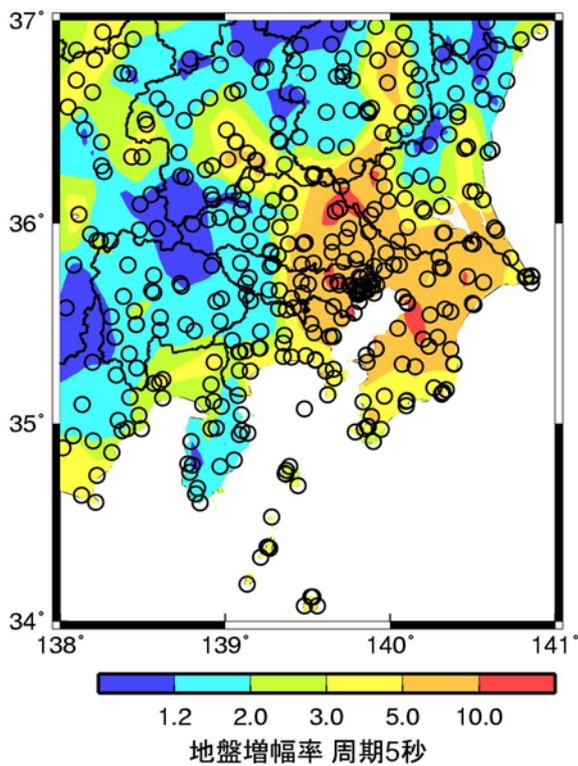
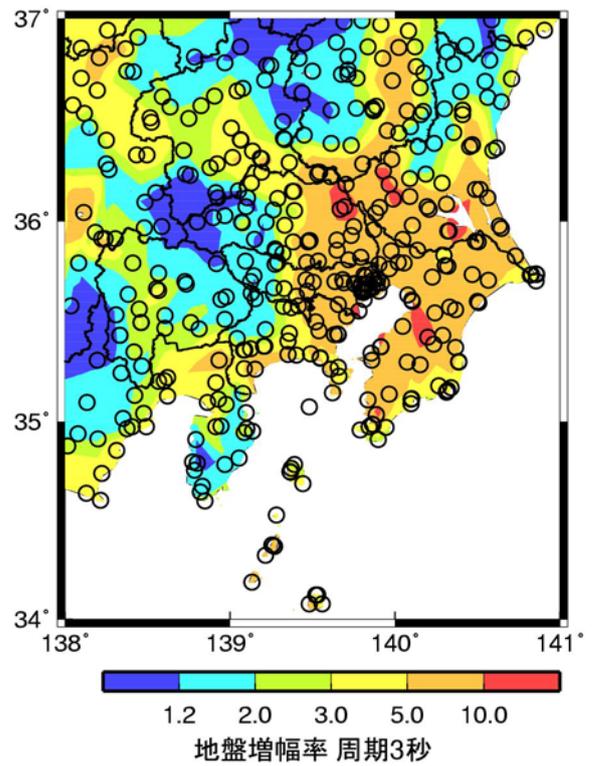
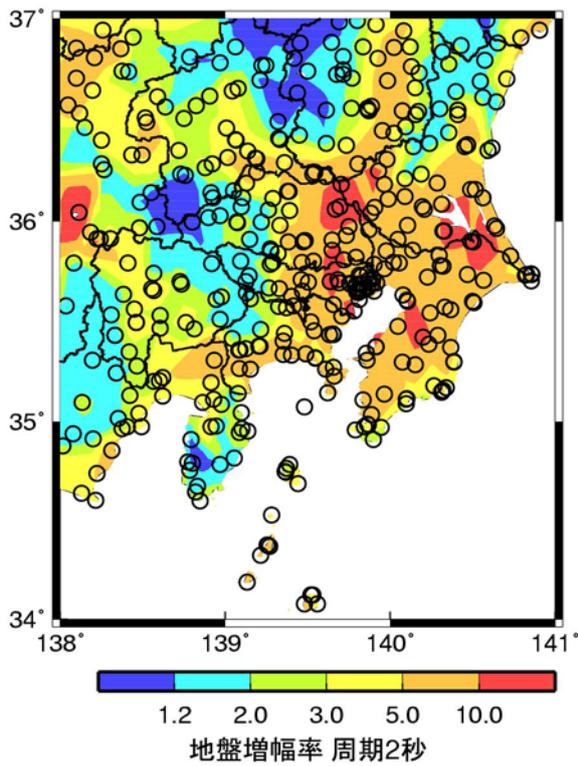
S_A h=5 %: 水平成分(Mw2: 海溝型地震は伝播経路東のみ+地殻内地震)

図 2.3-17 ケース 4 の応答スペクトルの関東平野における地盤増幅率のうち東の地震のみに対する
地盤増幅率



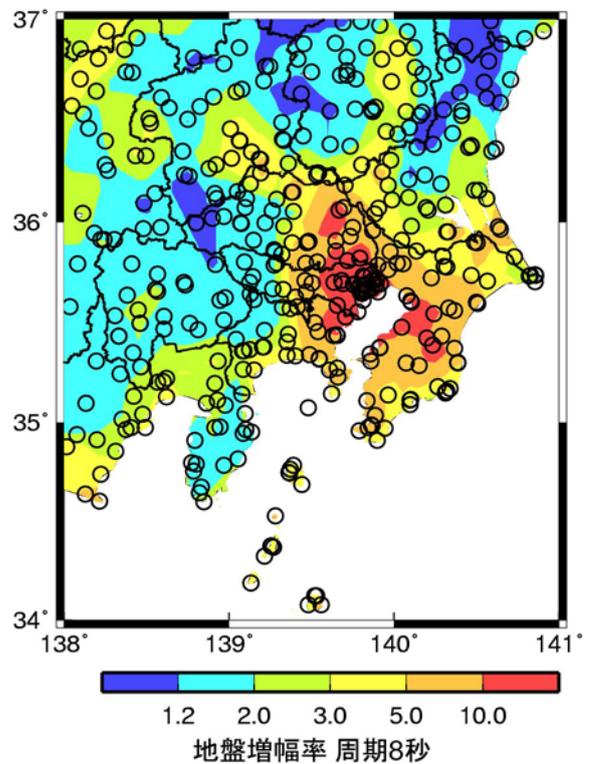
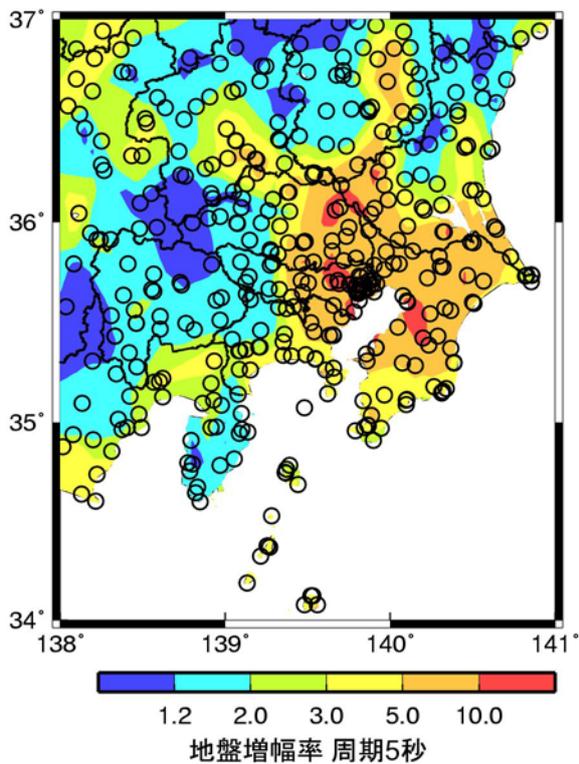
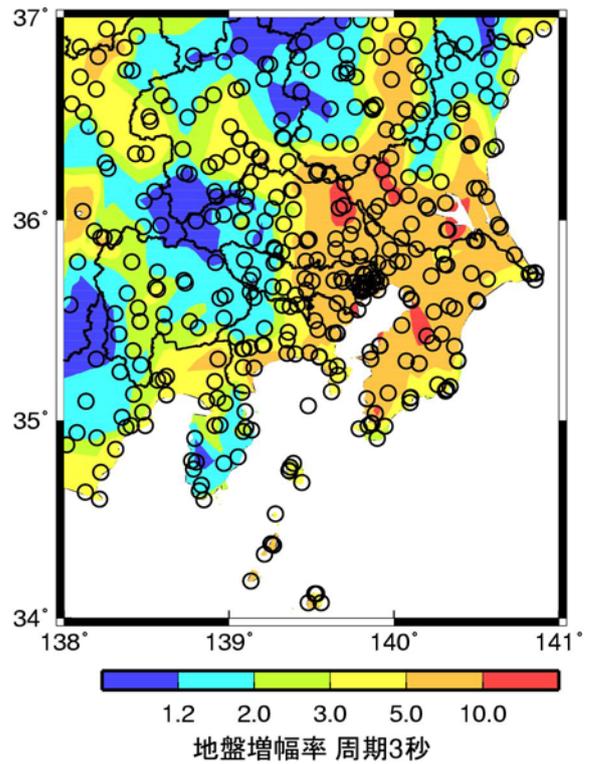
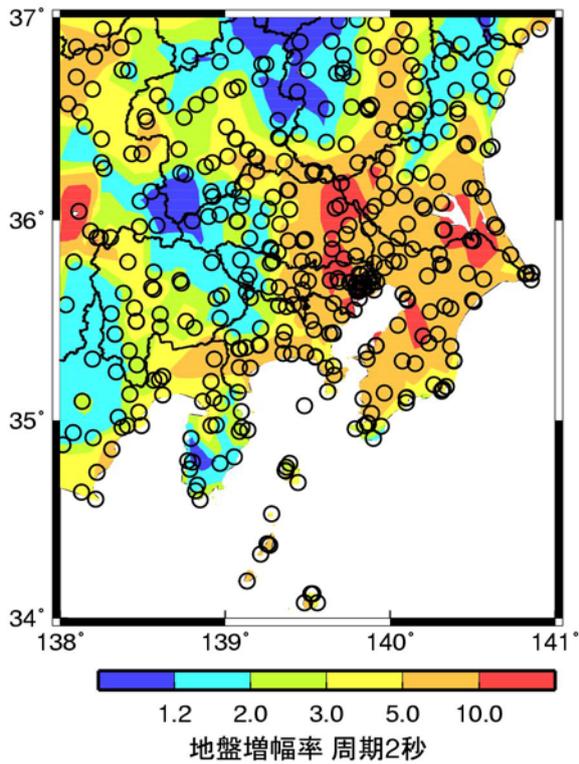
S_A h=5 %: 水平成分(Mw2: 海溝型地震は伝播経路西のみ+地殻内地震)

図 2.3-18 ケース 4 の応答スペクトルの関東平野における地盤増幅率のうち西の地震のみに対する地盤増幅率



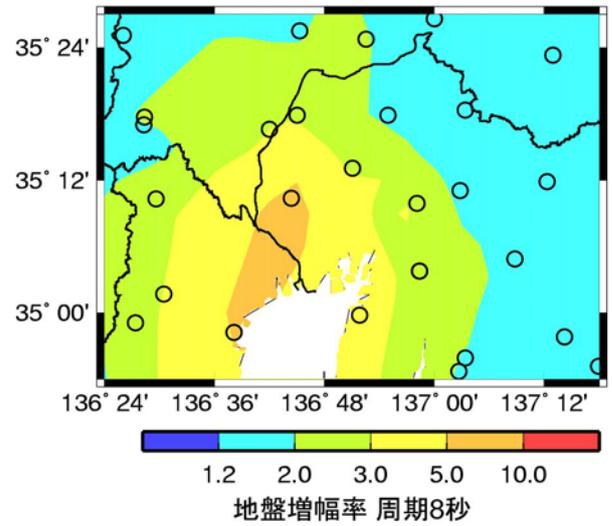
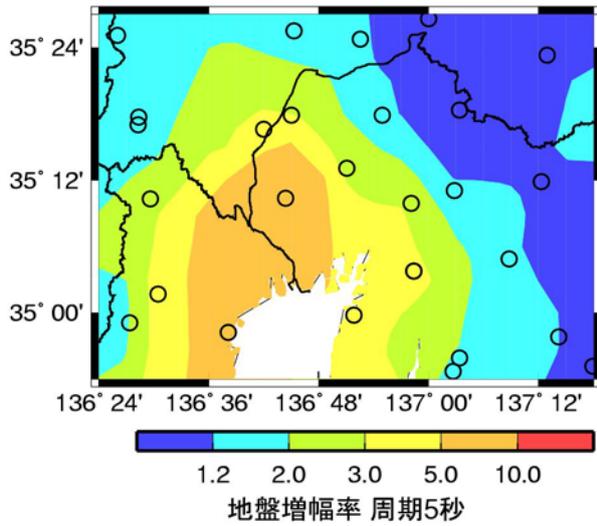
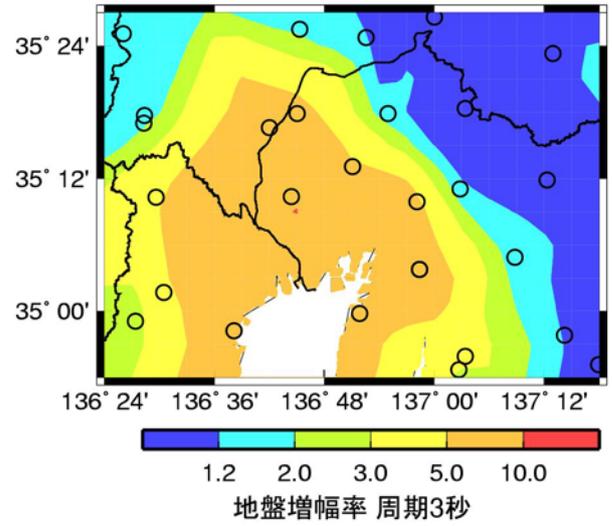
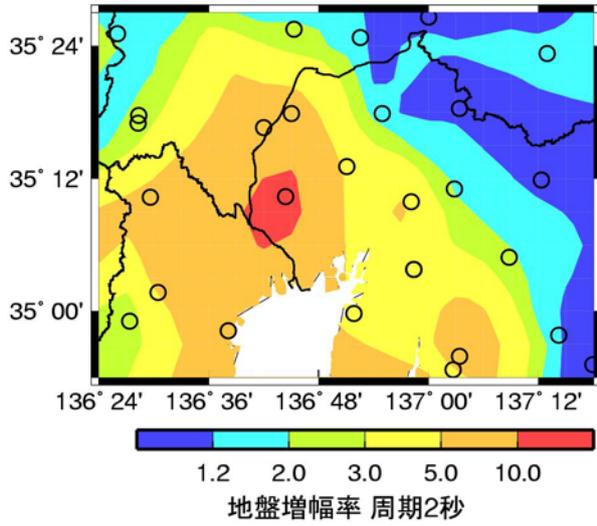
S_A h=5 %: 水平成分(Mw2: 海溝型地震は伝播経路東+地殻内地震)

図 2.3-19 ケース 4 の応答スペクトルの関東平野における地盤増幅率のうち東の地震に対する地盤増幅率



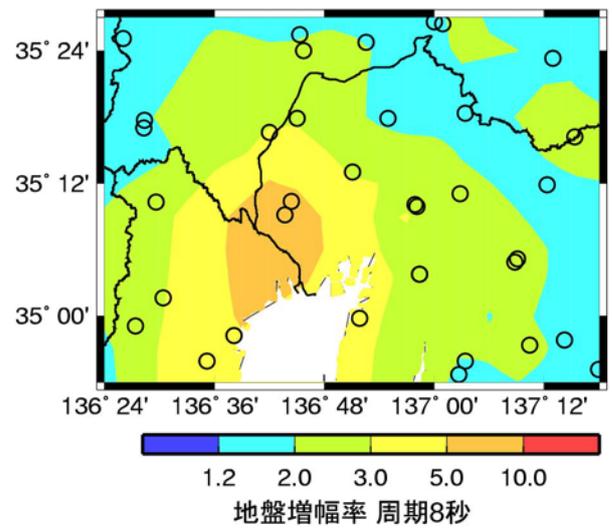
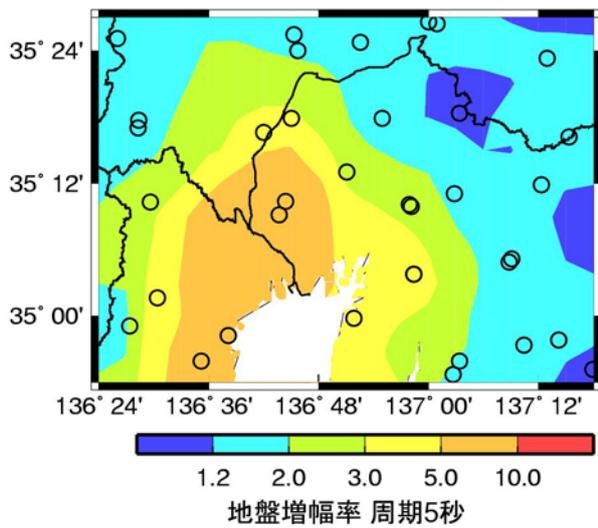
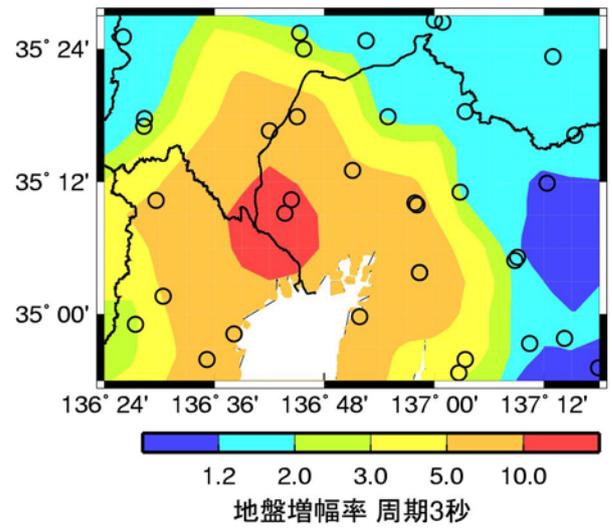
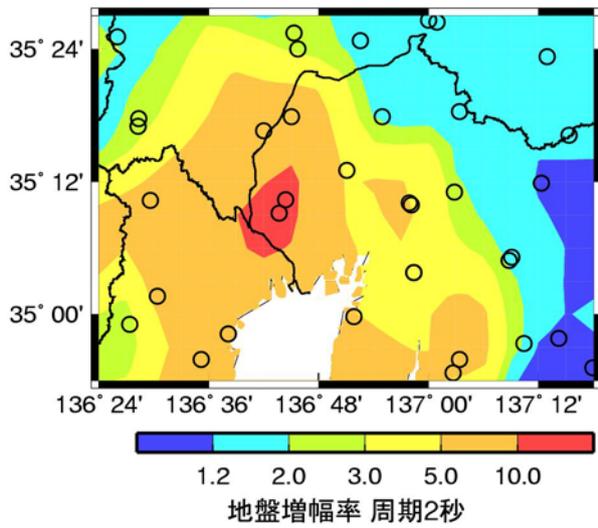
S_A h=5 %: 水平成分(Mw2: 海溝型地震全ては伝播経路西+地殻内地震)

図 2.3-20 ケース 4 の応答スペクトルの関東平野における地盤増幅率のうち西の地震のみに対する
地盤増幅率



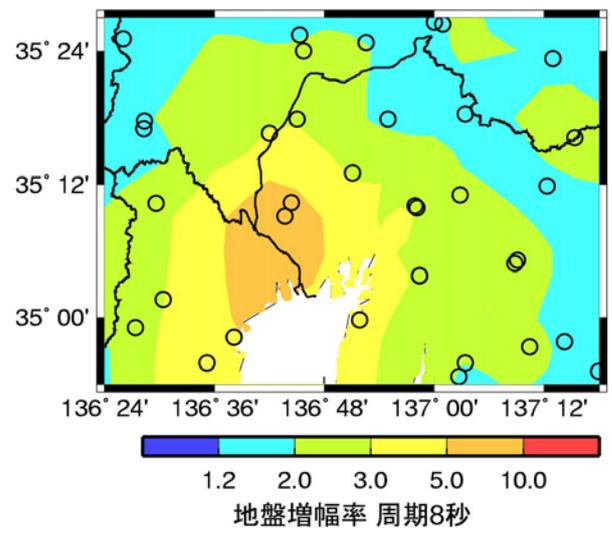
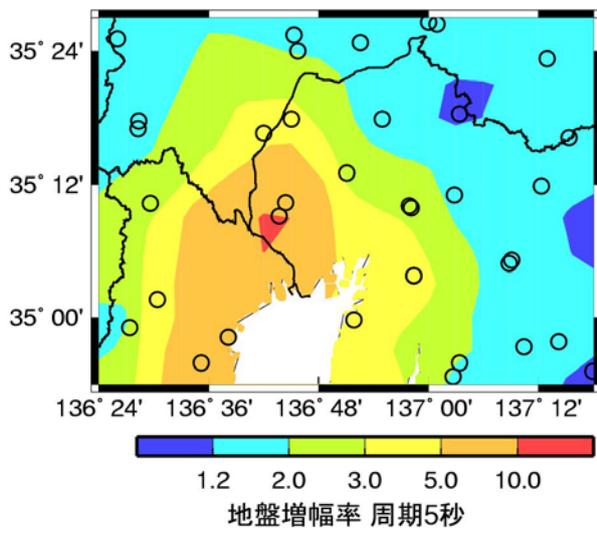
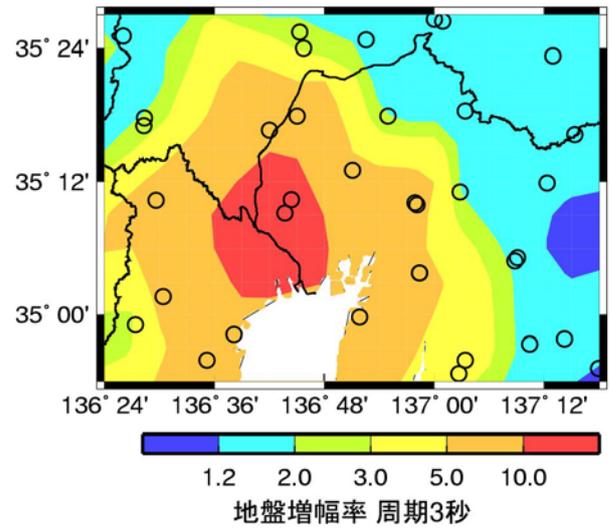
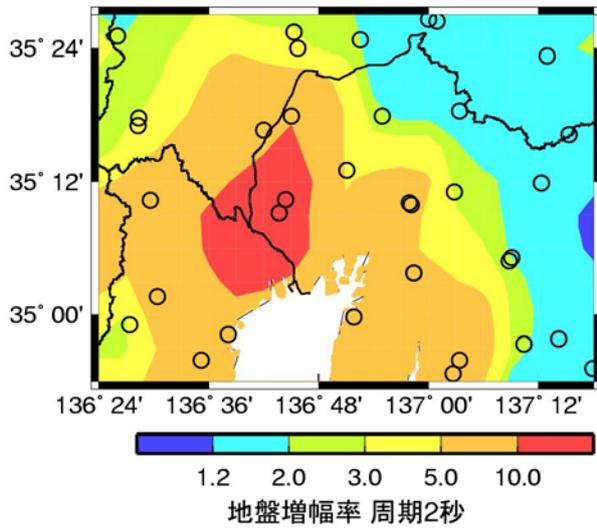
S_A h=5 %: 水平成分(Mw : 海溝型+地殻内全て,2010版)

図 2.3-21 ケース 0(旧経験式)の応答スペクトルの濃尾平野における地盤増幅率



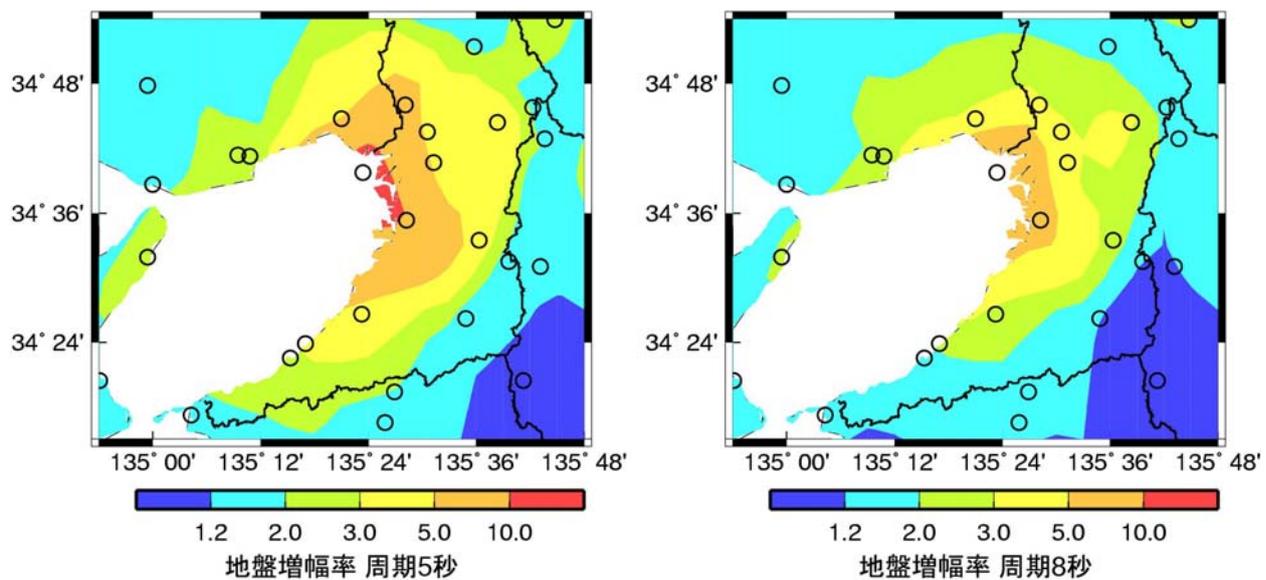
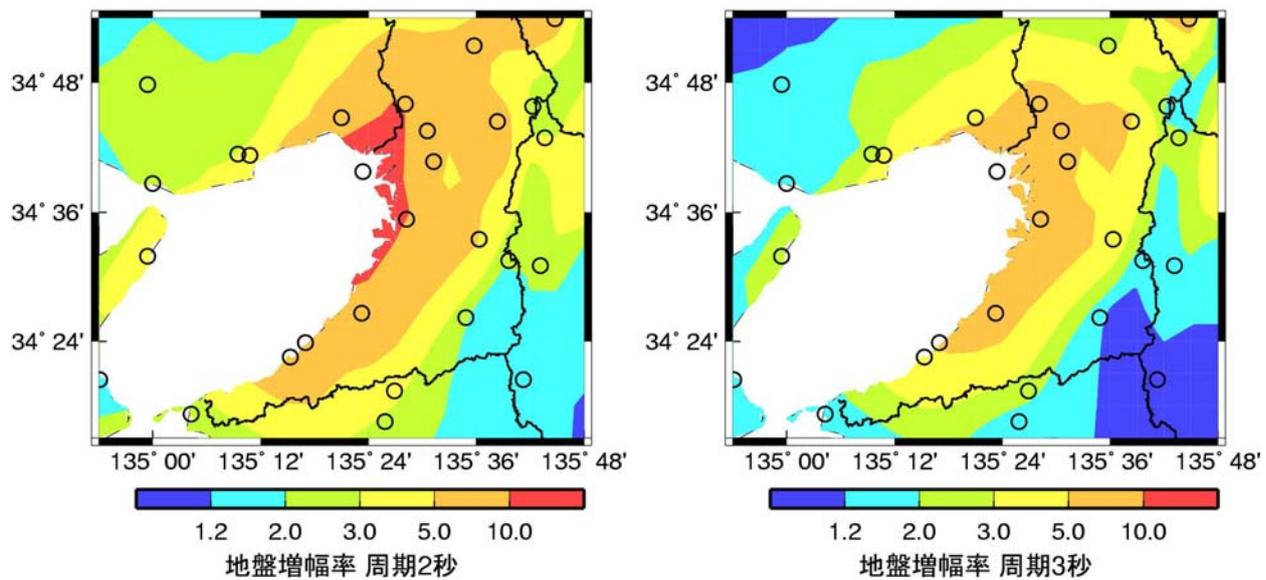
S_A h=5 %: 水平成分(Mw2: 海溝型全て+地殻内地震)

図 2.3-22 ケース 2 の応答スペクトルの濃尾平野における地盤増幅率



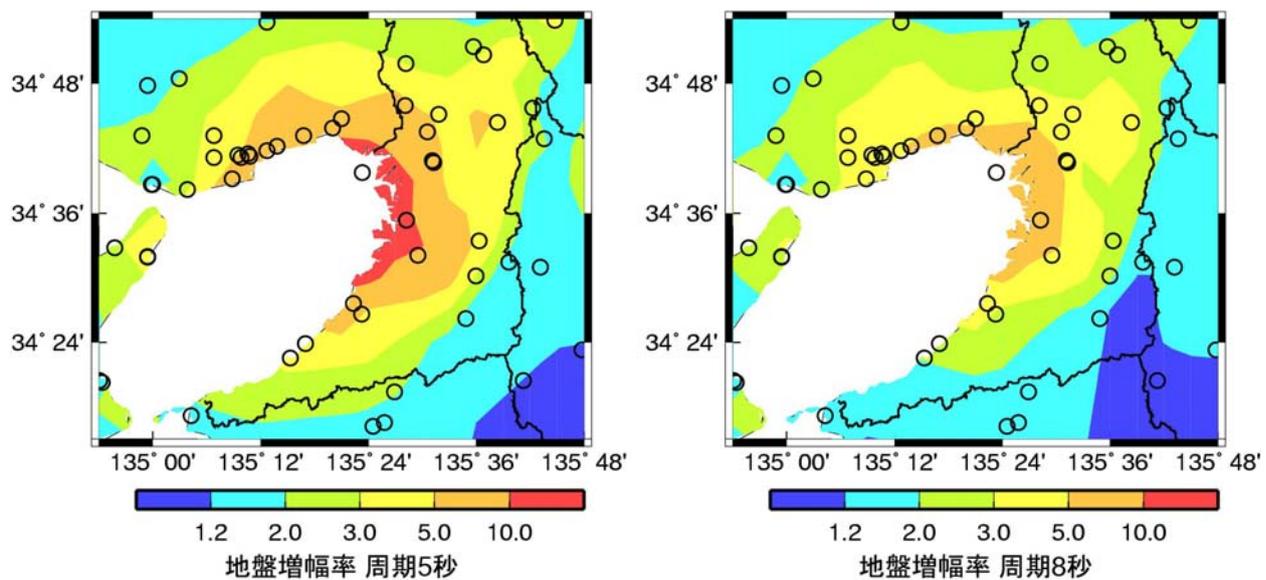
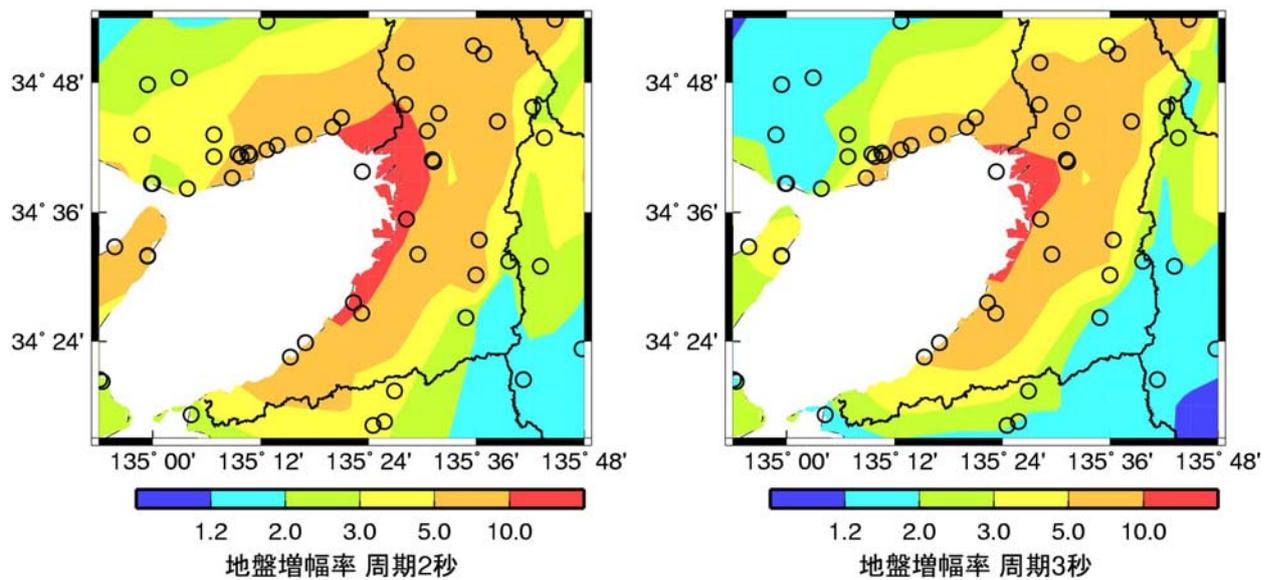
S_A $h=5\%$: 水平成分(Mw2: 海溝型地震は伝播経路西+地殻内地震)

図 2.3-23 ケース 4 の応答スペクトルの濃尾平野における地盤増幅率



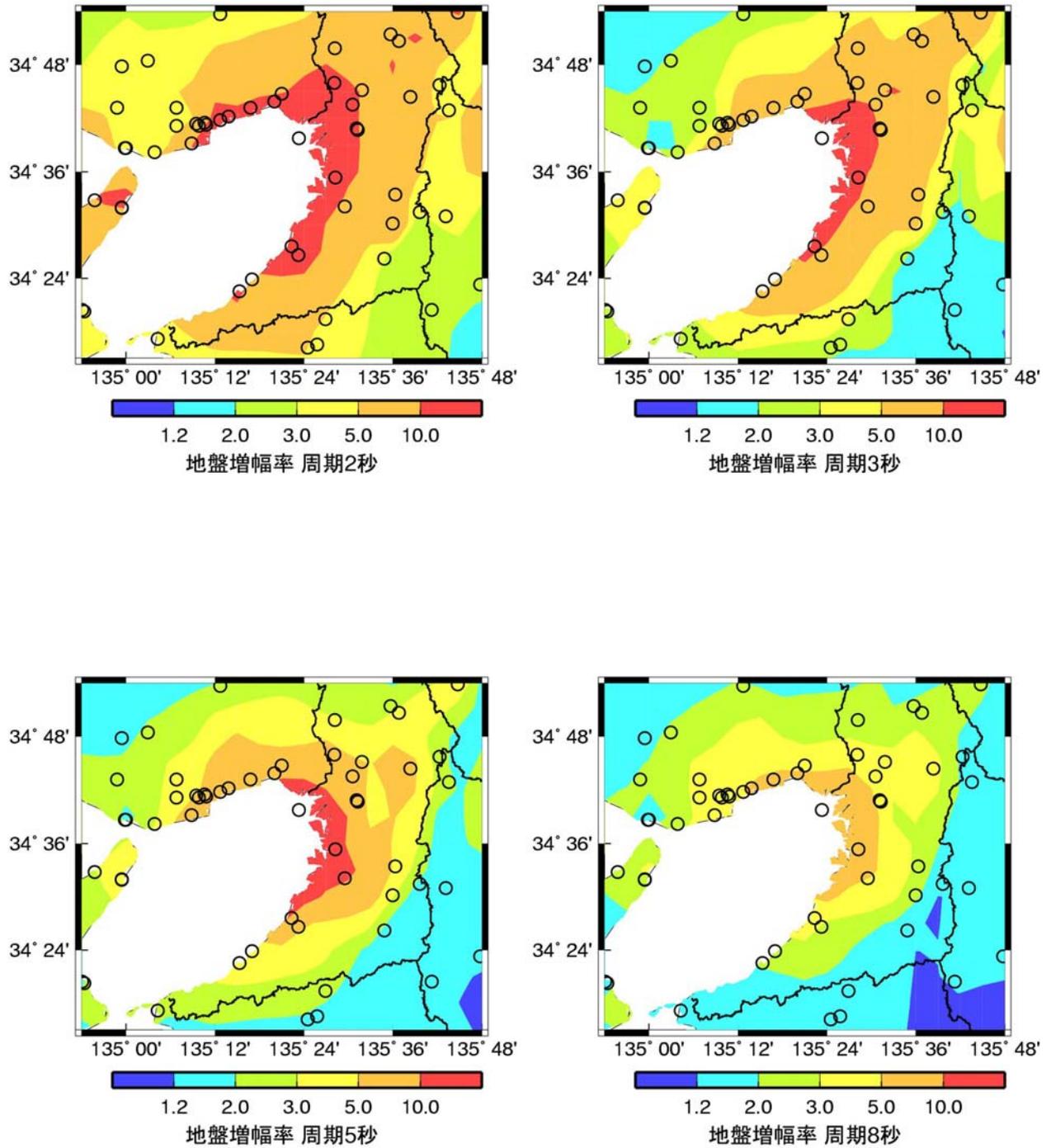
S_A $h=5\%$: 水平成分(Mw : 海溝型+地殻内全て,2010版)

図 2.3-24 ケース 0(旧経験式)の応答スペクトルの大阪平野における地盤増幅率



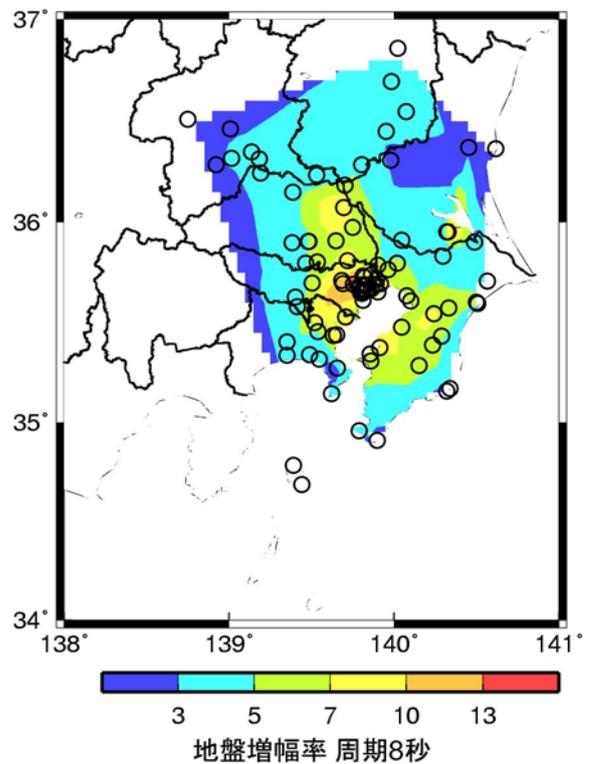
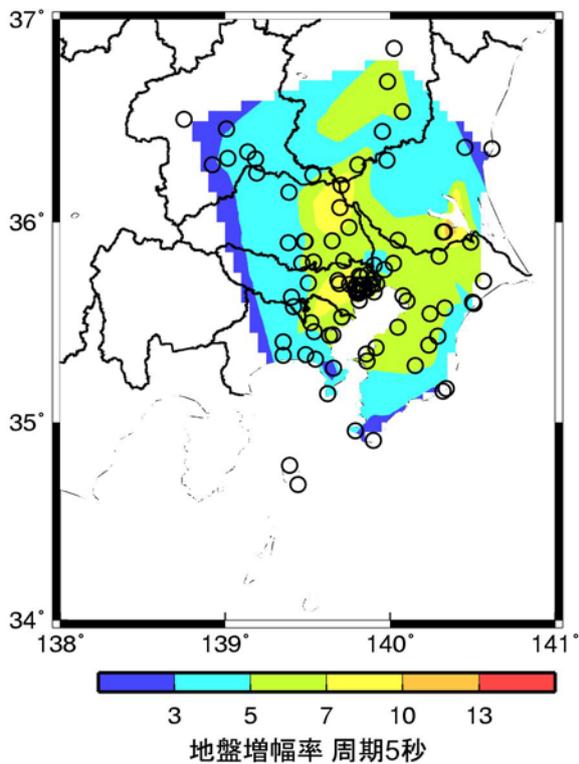
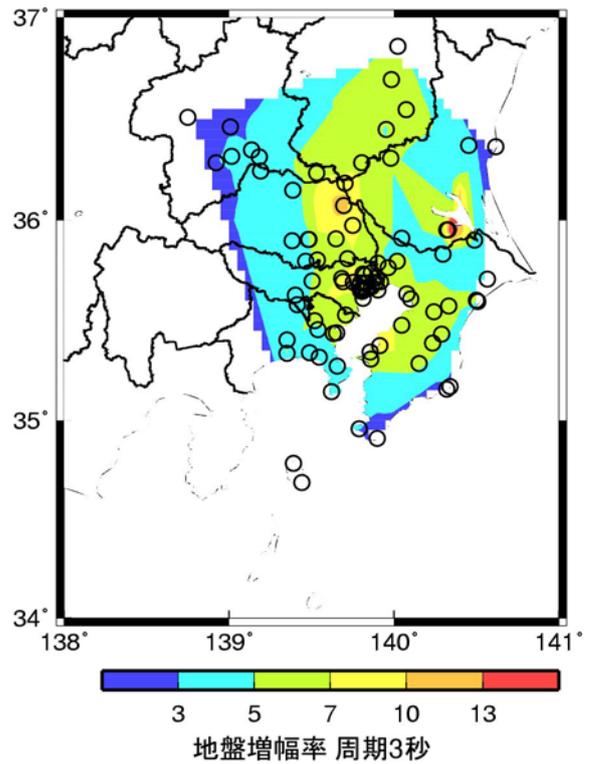
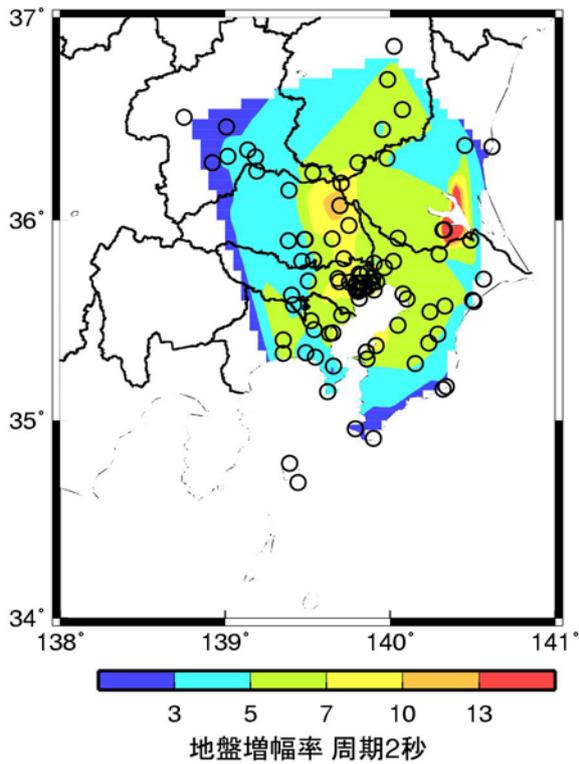
S_A h=5 %: 水平成分(Mw2: 海溝型全て+地殻内地震)

図 2.3-25 ケース 2 の応答スペクトルの大阪平野における地盤増幅率



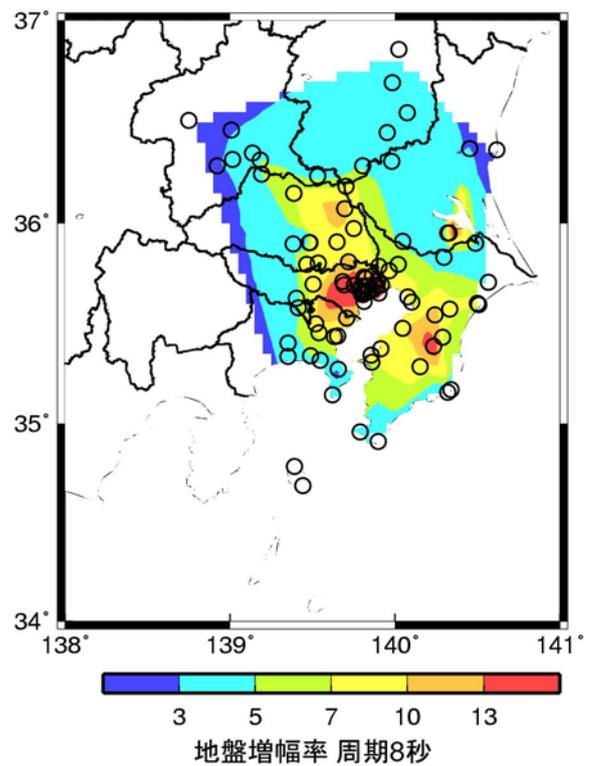
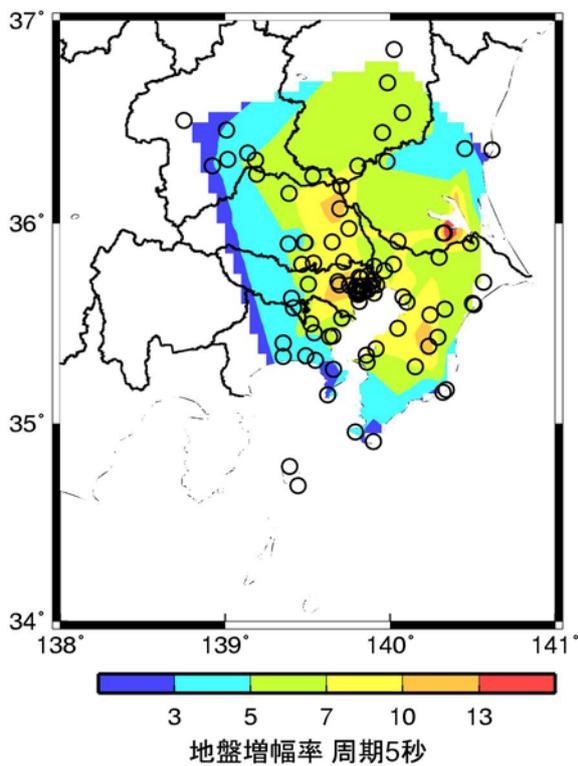
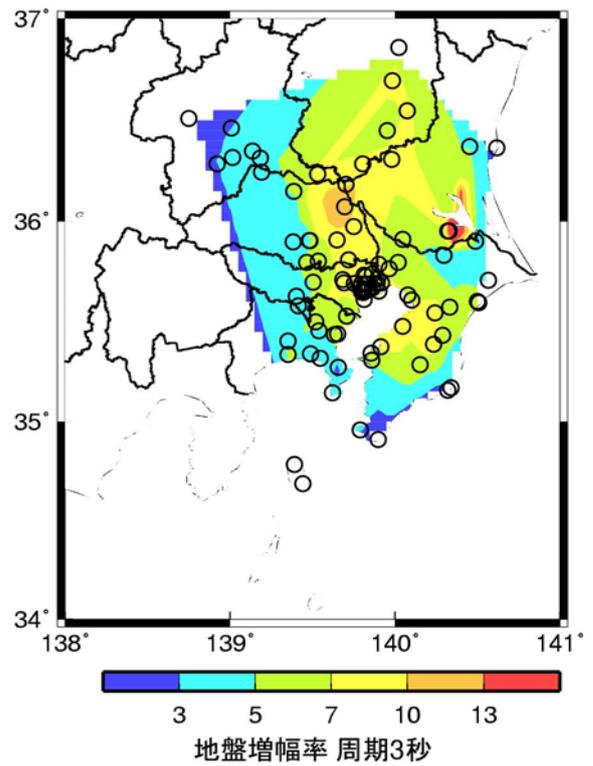
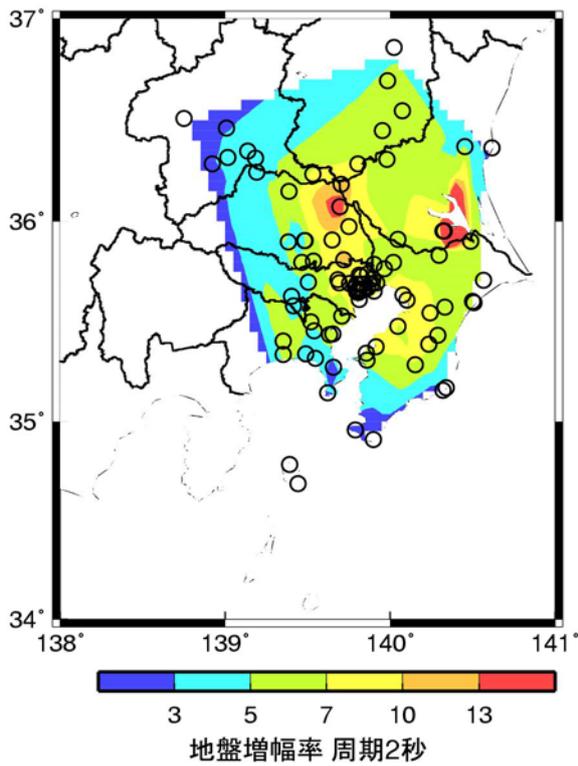
S_A h=5 %: 水平成分(Mw2:海溝型地震は伝播経路西十地殻内地震)

図 2.3-26 ケース 4 の応答スペクトルの大阪平野における地盤増幅率



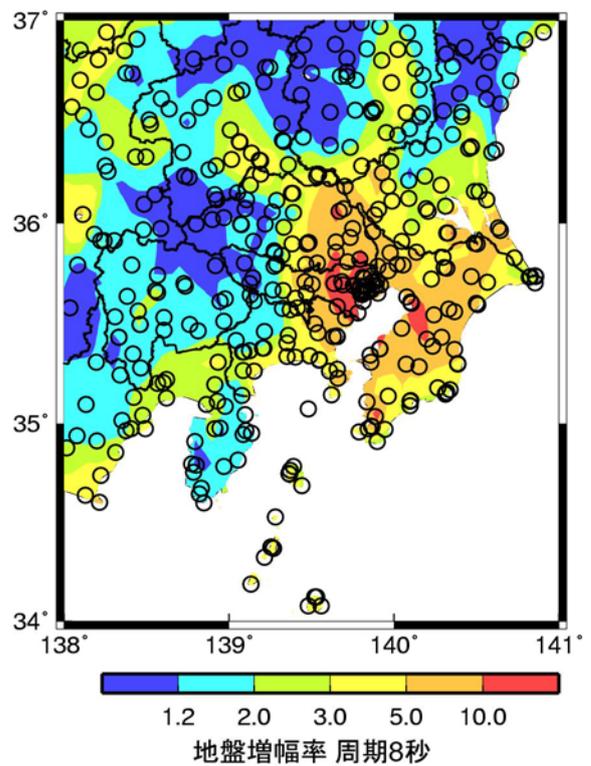
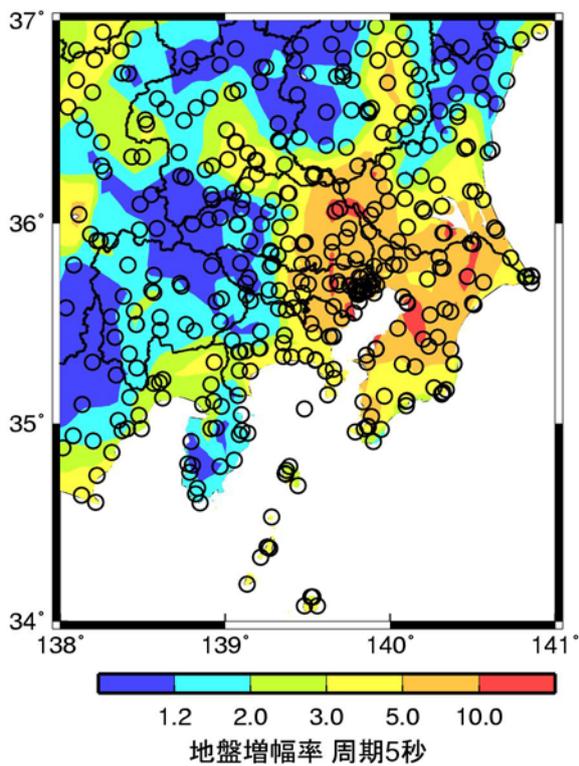
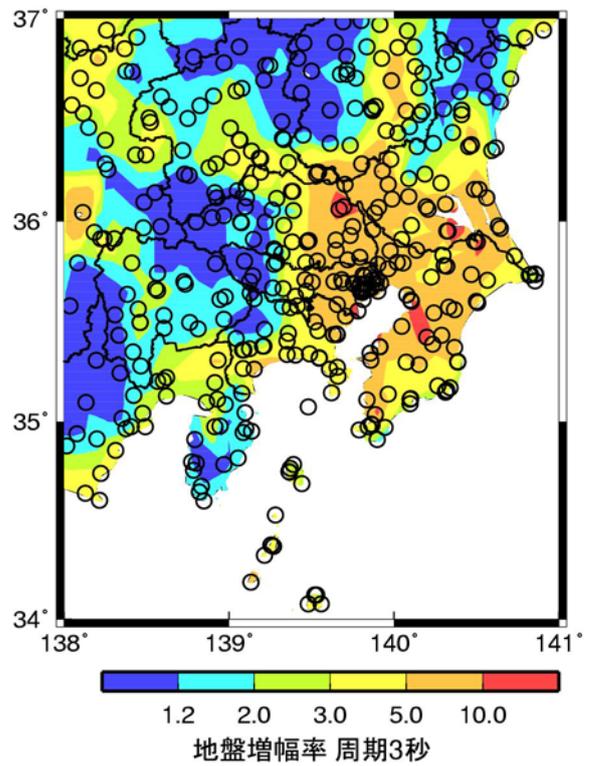
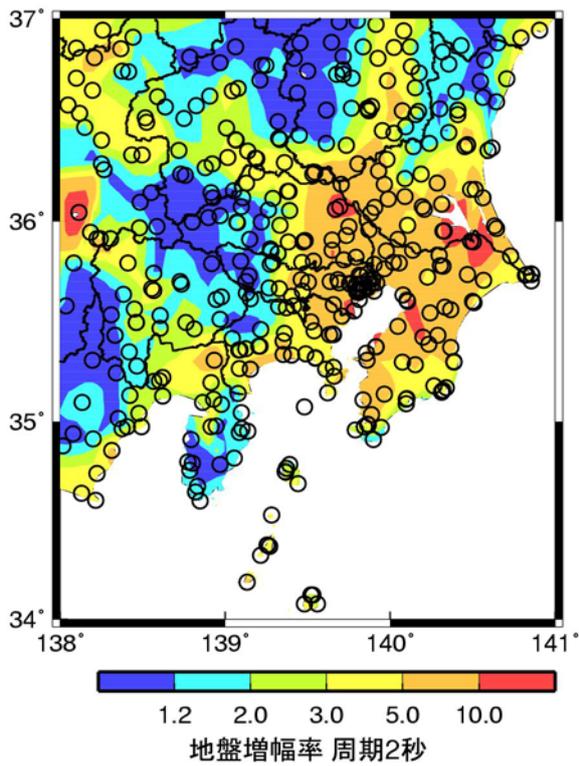
V_E : 水平成分(Mw2: 海溝型地震は伝播経路東のみ+地殻内地震)

図 2.3-27 ケース 4 のエネルギースペクトルの関東平野における地盤増幅率のうち東の地震のみに対する地盤増幅率



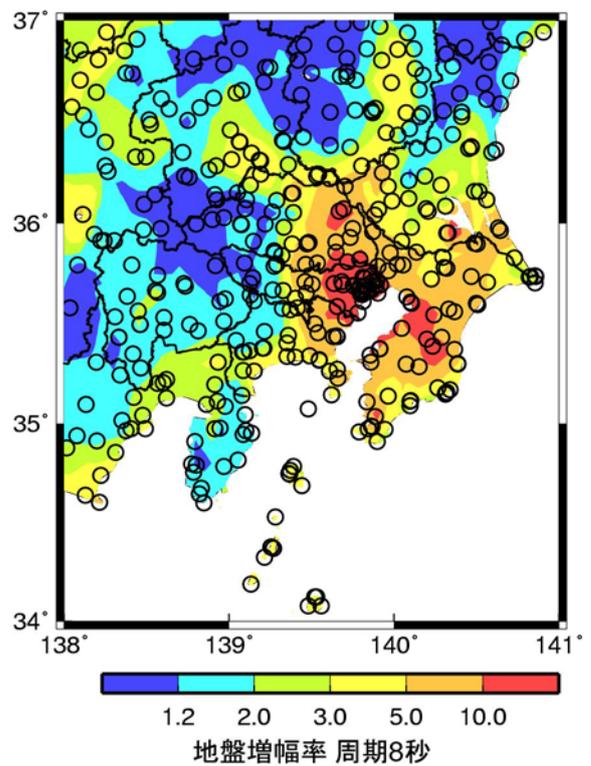
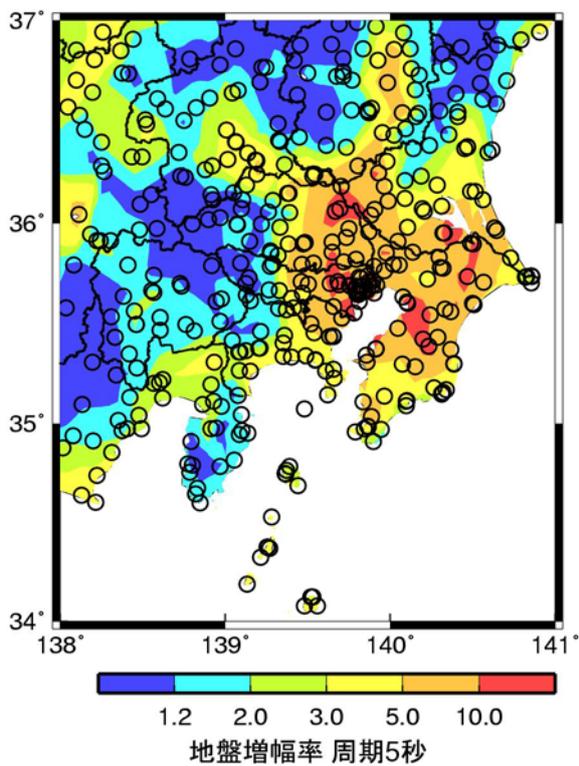
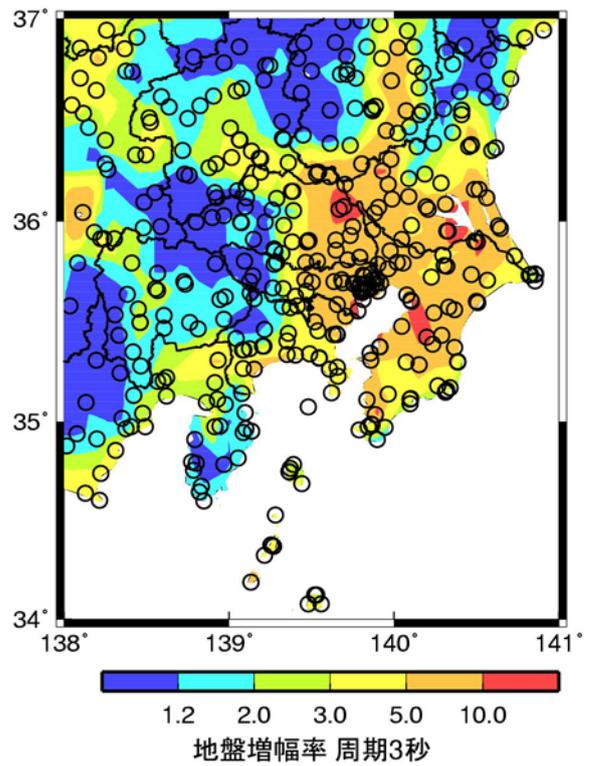
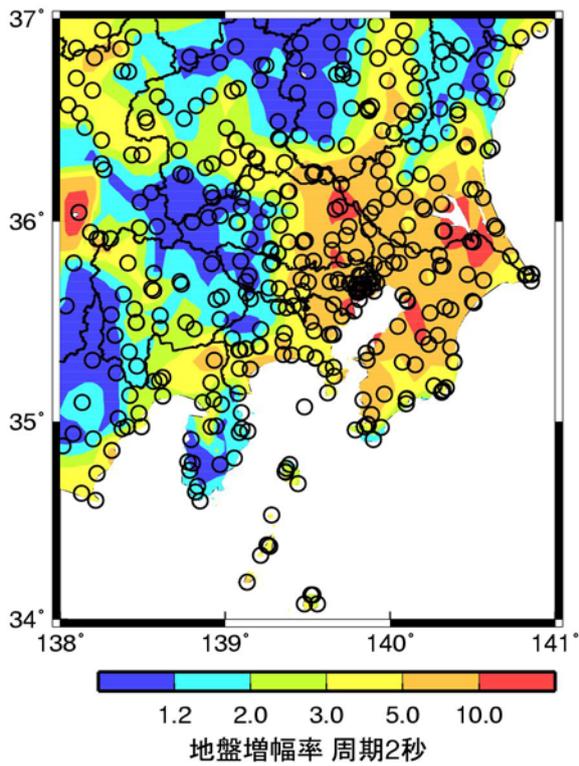
V_E : 水平成分(Mw2: 海溝型地震は伝播経路西のみ+地殻内地震)

図2.3-28 ケース4のエネルギースペクトルの関東平野における地盤増幅率のうち西の地震のみに対する地盤増幅率



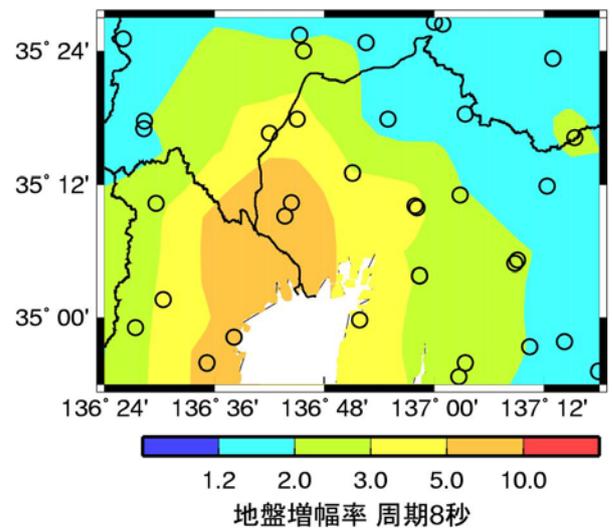
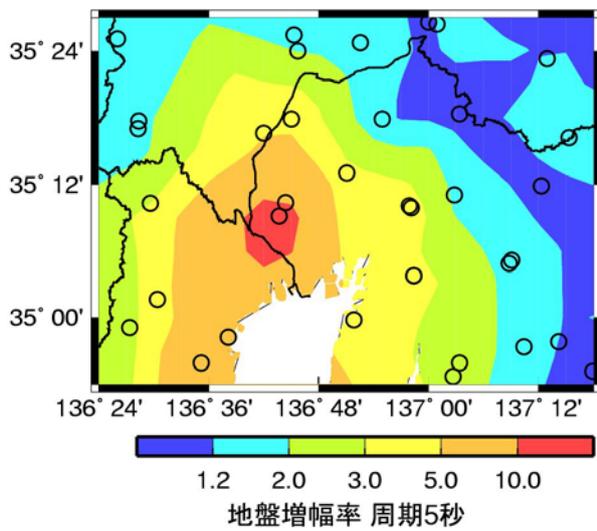
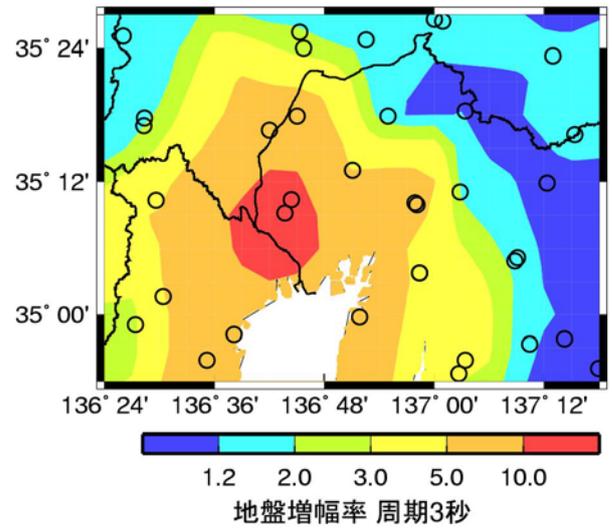
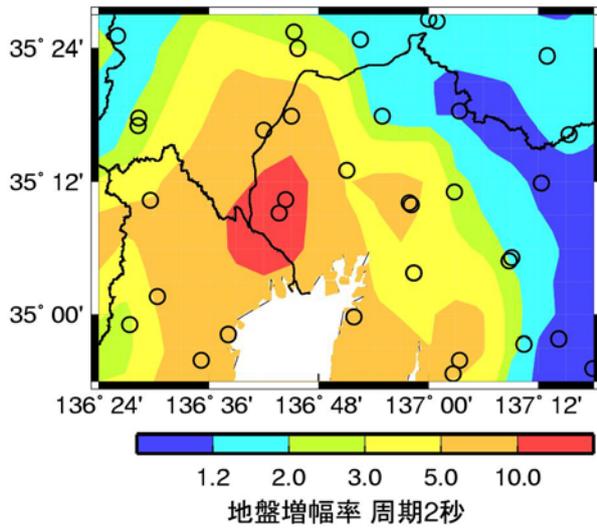
V_E : 水平成分(Mw2: 海溝型地震は伝播経路東+地殻内地震)

図2.3-29 ケース4のエネルギースペクトルの関東平野における地盤増幅率のうち東の地震に対する地盤増幅率



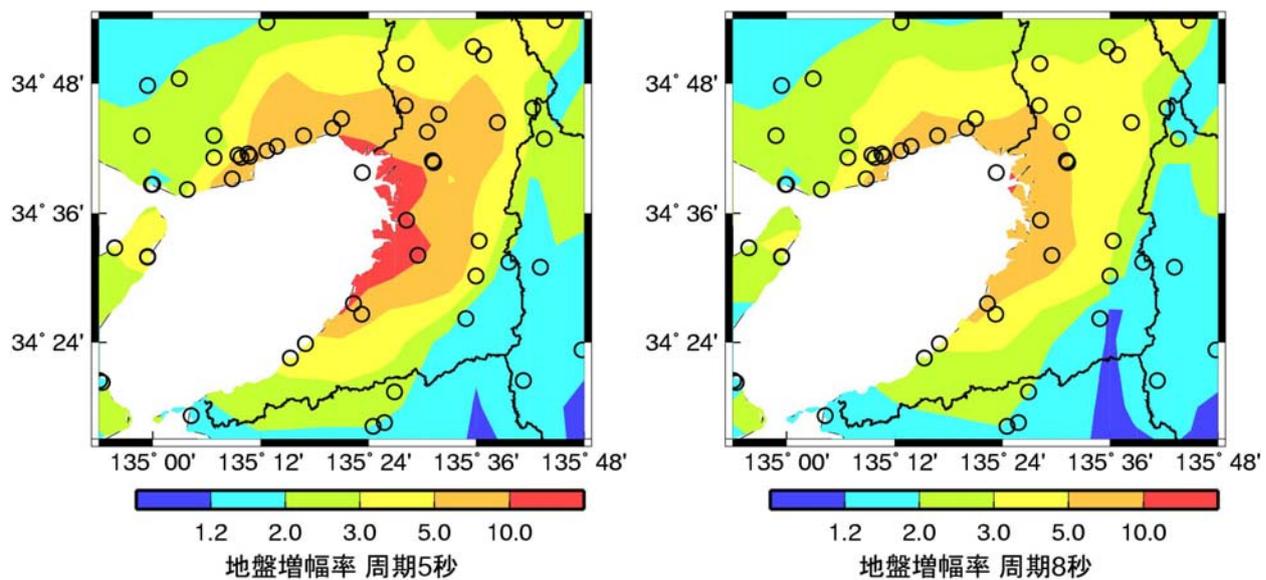
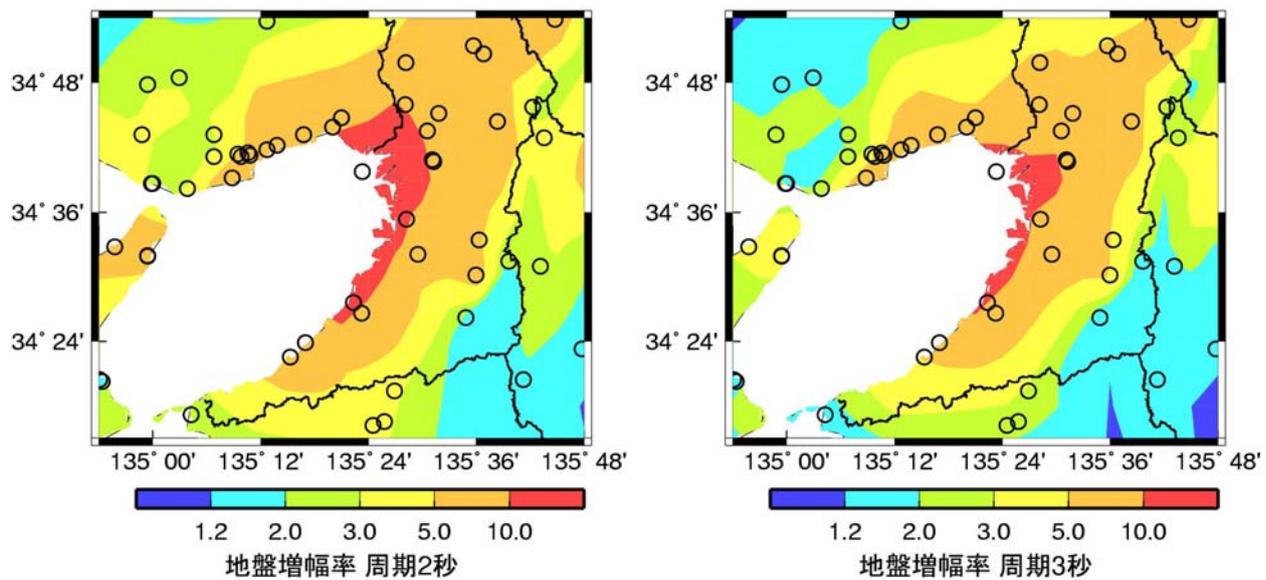
V_E : 水平成分(Mw2: 海溝型地震全ては伝播経路西+地殻内地震)

図2.3-30 ケース4のエネルギースペクトルの関東平野における地盤増幅率のうち西の地震に対する地盤増幅率



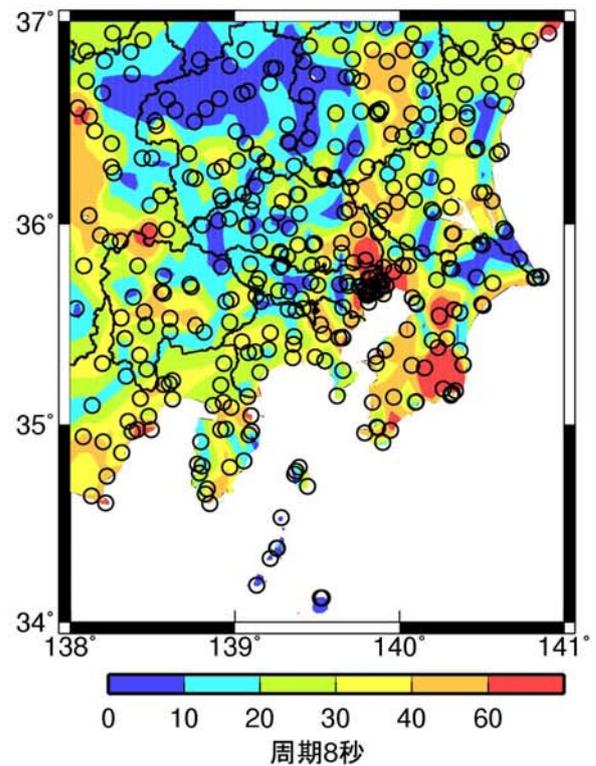
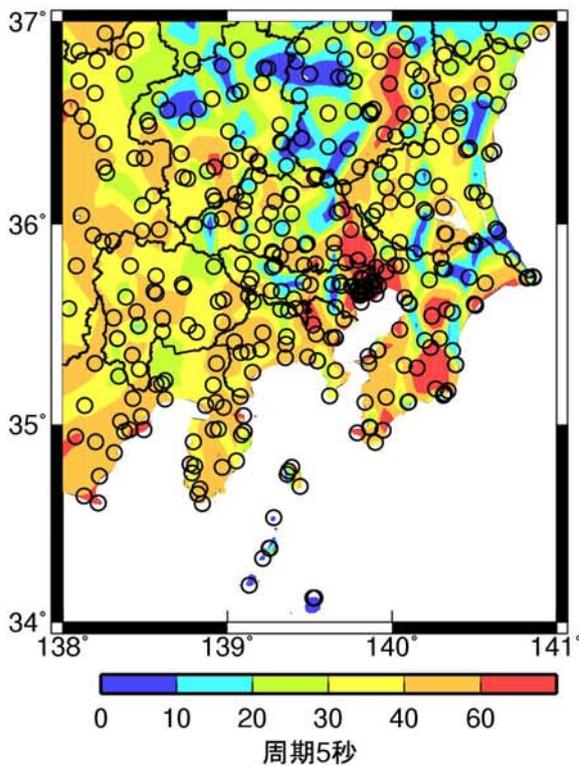
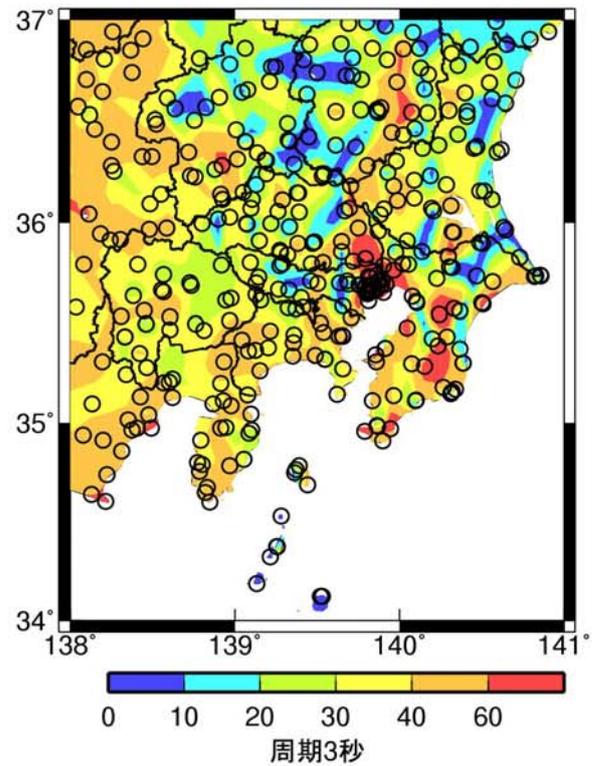
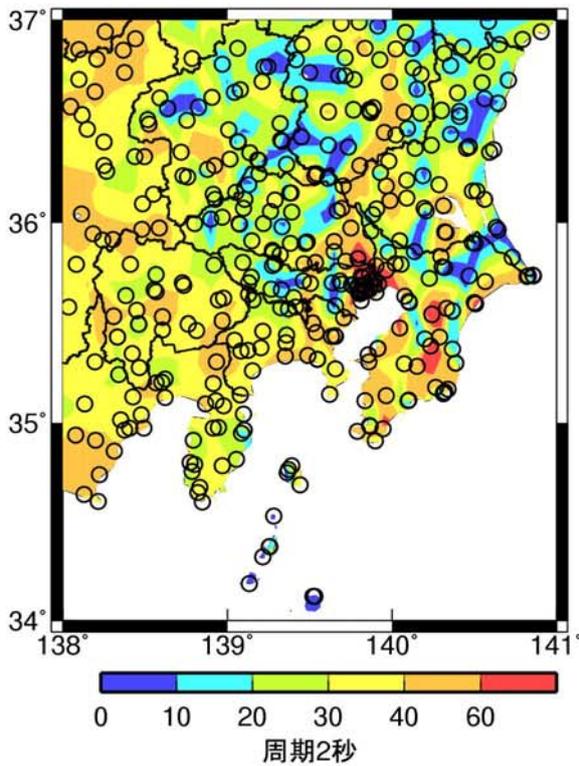
V_E : 水平成分(Mw2: 海溝型地震は伝播経路西十地殻内地震)

図 2.3-31 ケース 4 のエネルギースペクトル濃尾平野における地盤増幅率



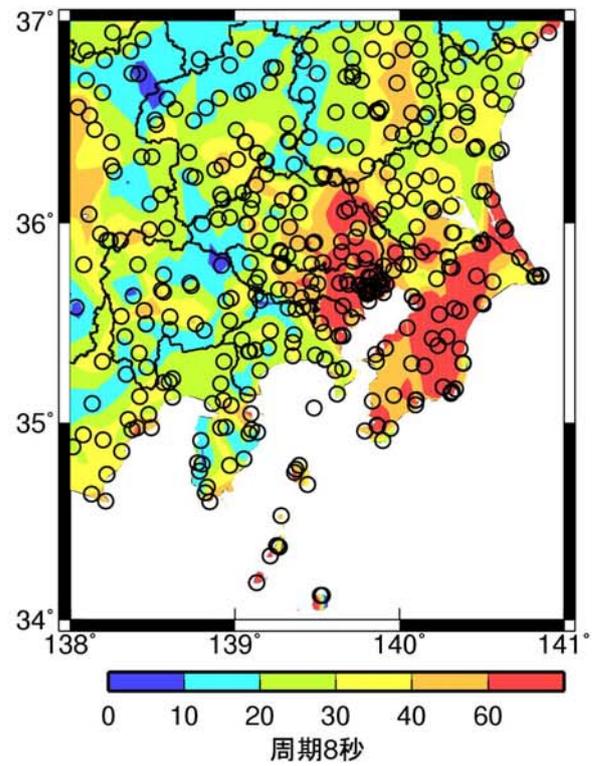
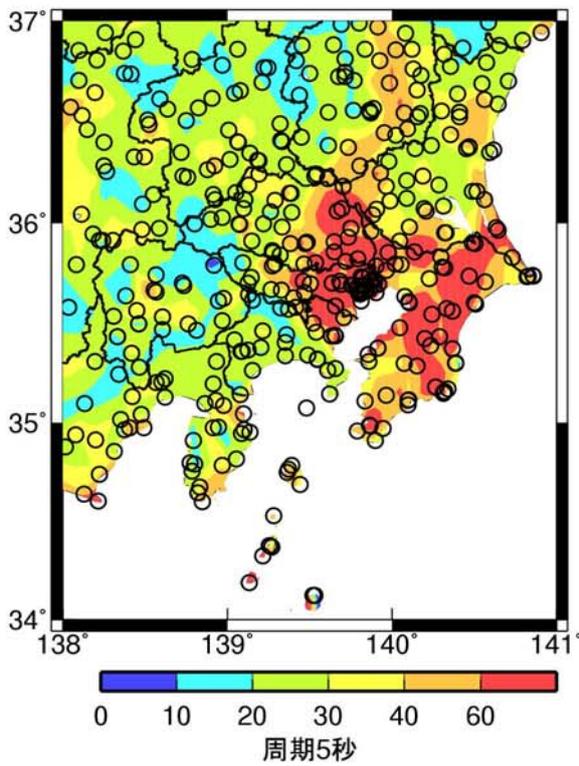
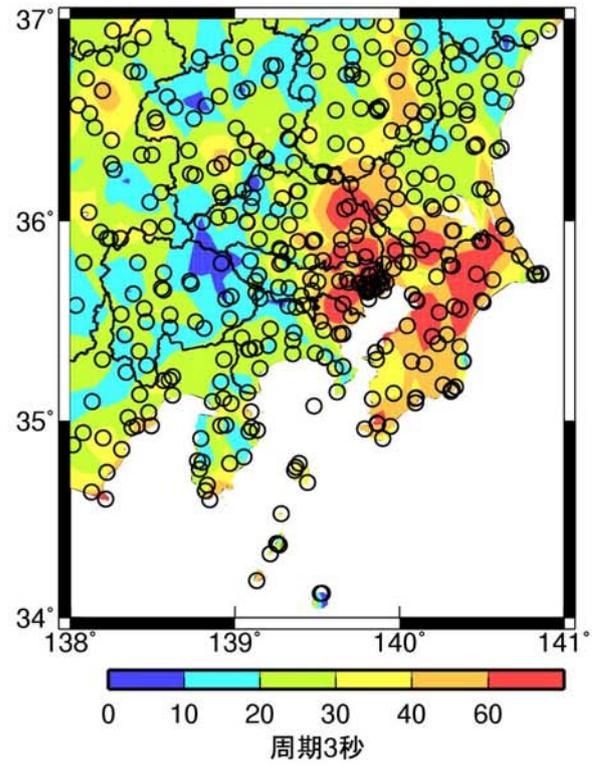
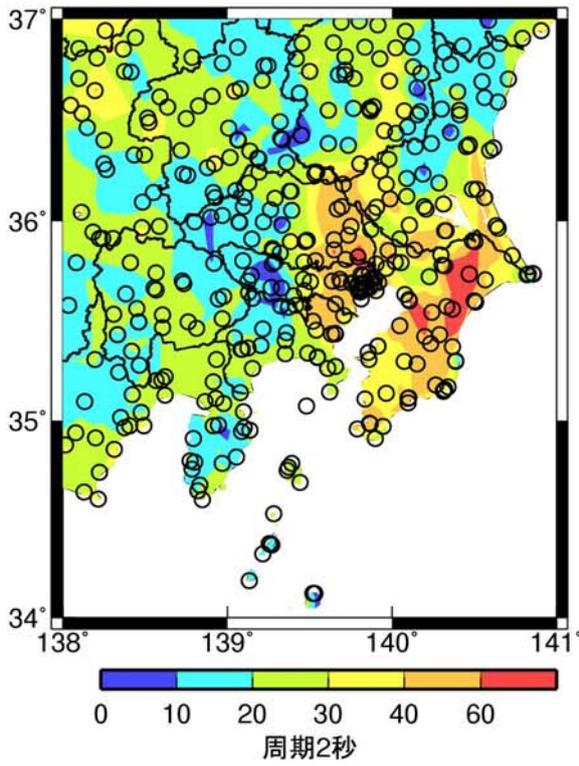
V_E : 水平成分(Mw2:海溝型地震は伝播経路西+地殻内地震)

図 2.3-32 ケース 4 のエネルギースペクトル大阪平野における地盤増幅



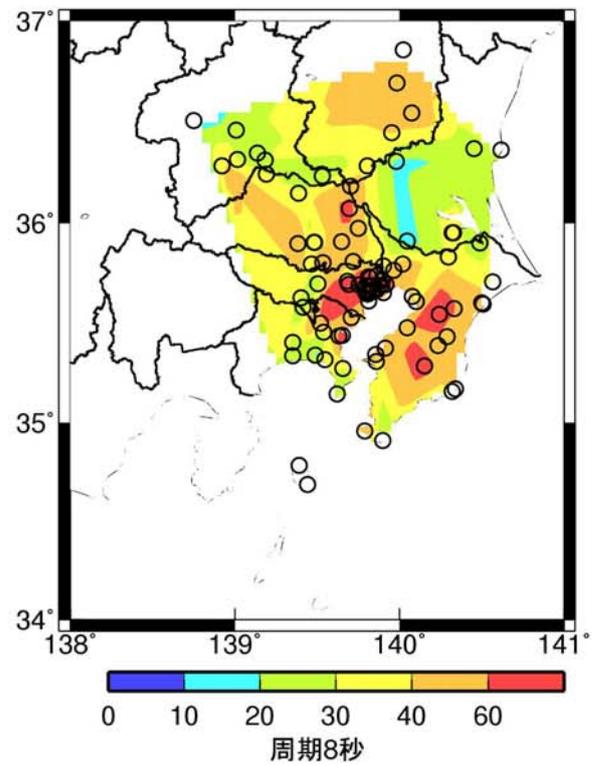
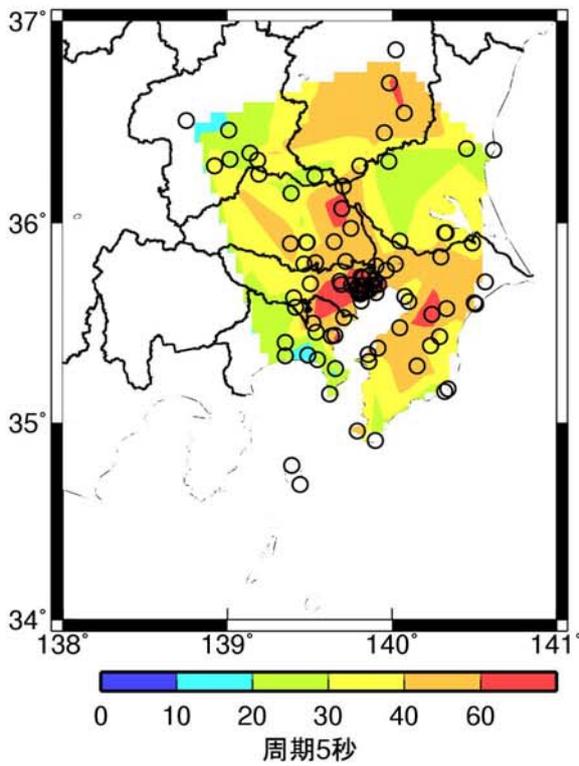
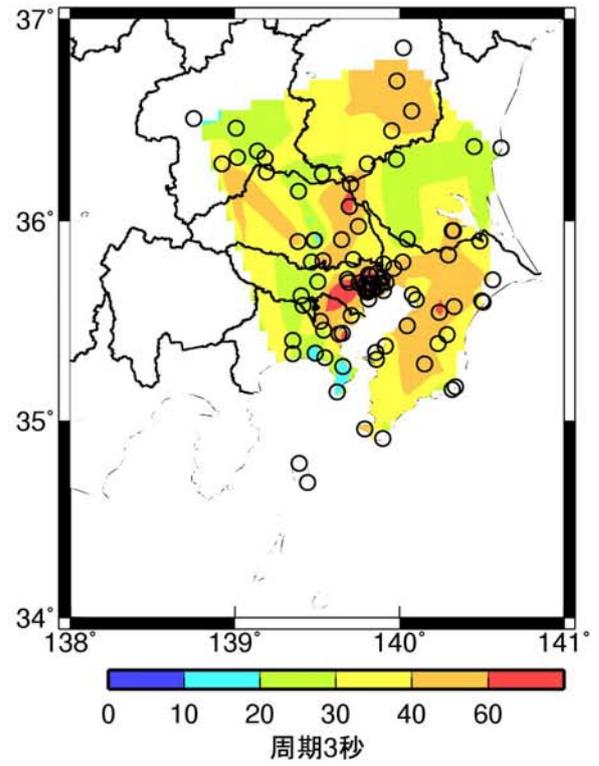
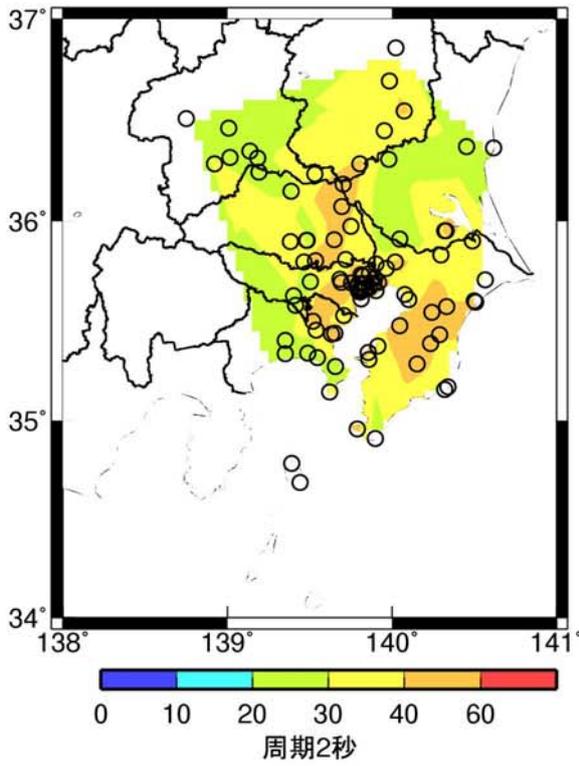
群遅延時間の平均値:2010版

図 2.3-33 旧経験式の群遅延時間の平均値の関東平野におけるサイト係数



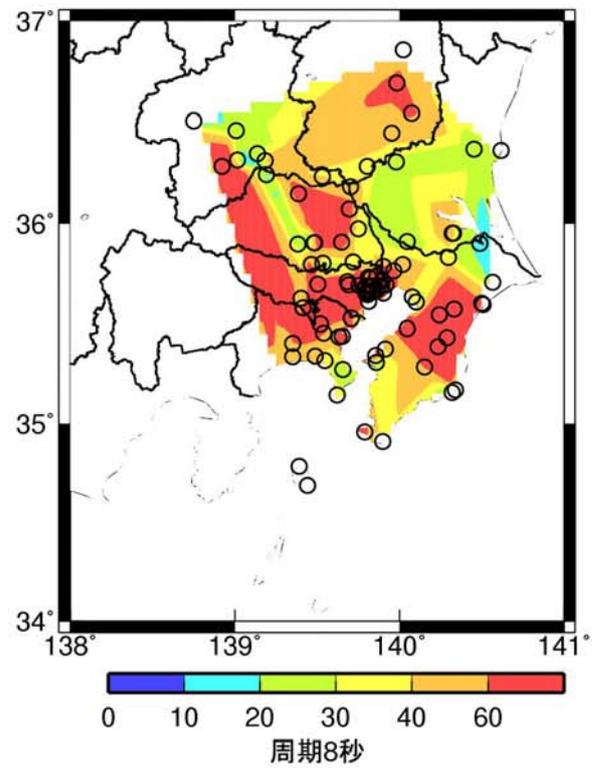
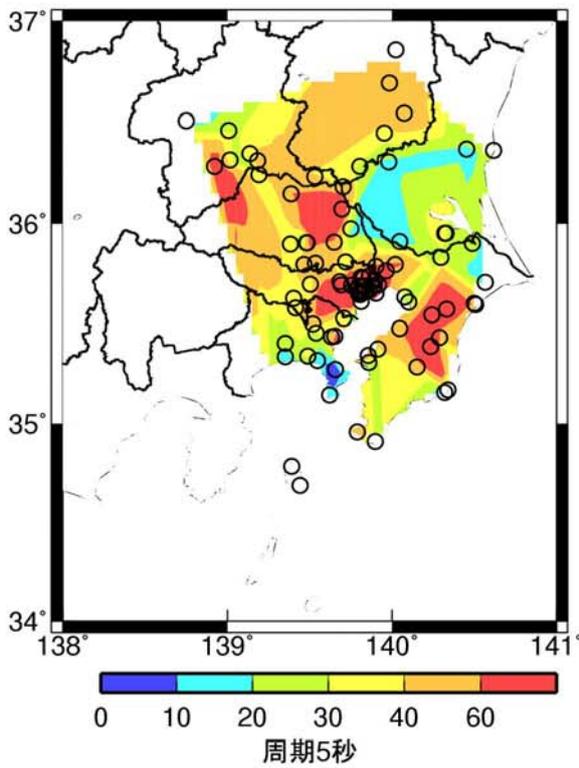
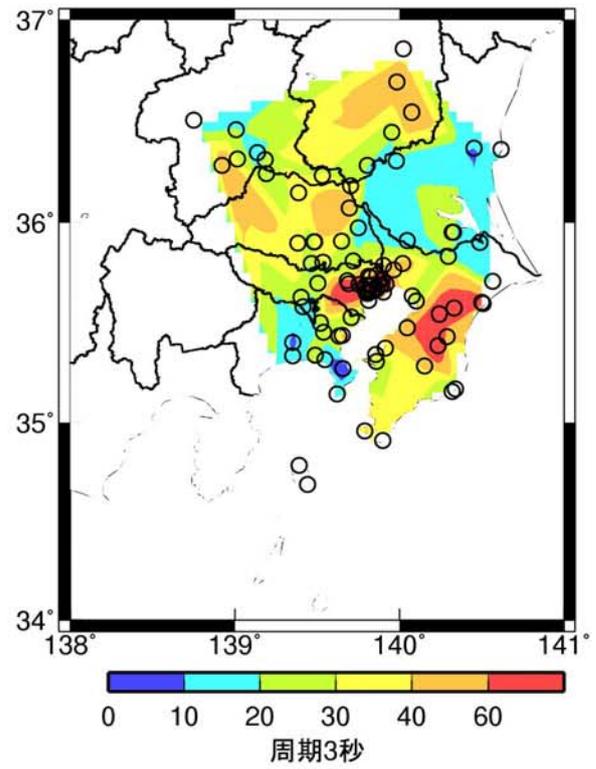
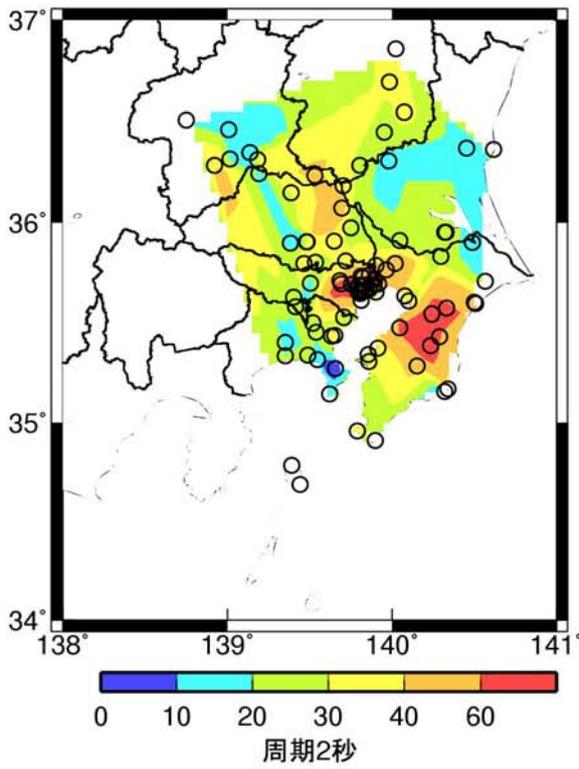
群遅延時間の平均値: 水平成分(海溝型地震全て)

図 2.3-34 ケース a の群遅延時間の平均値の関東平野におけるサイト係数



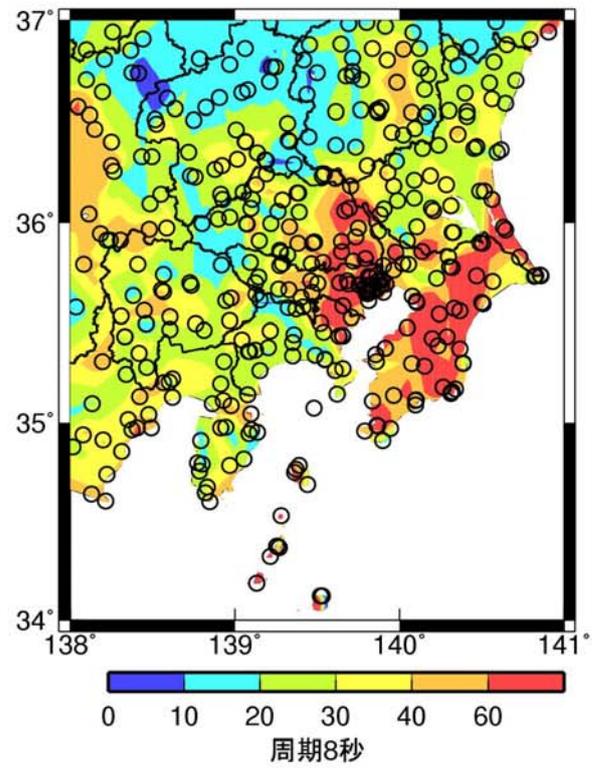
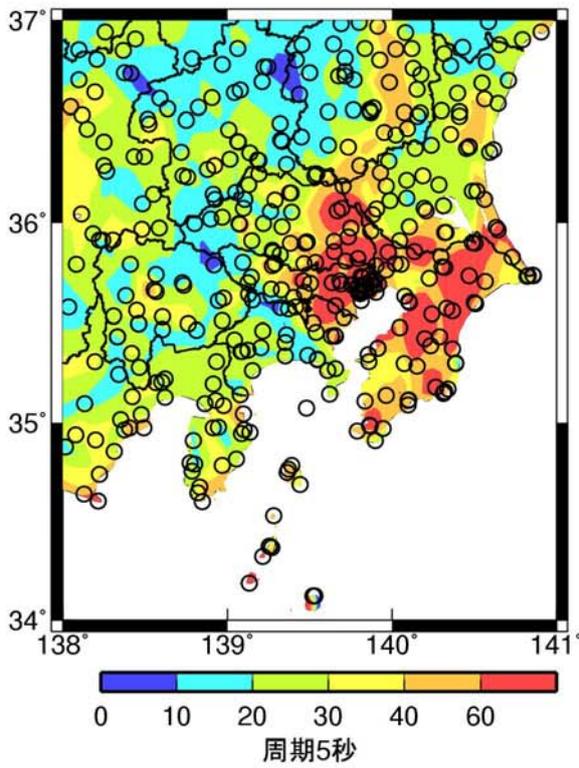
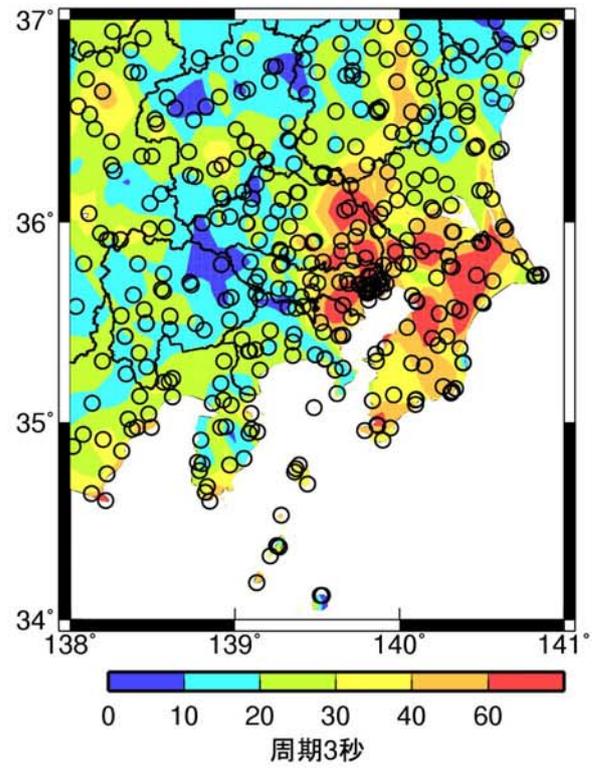
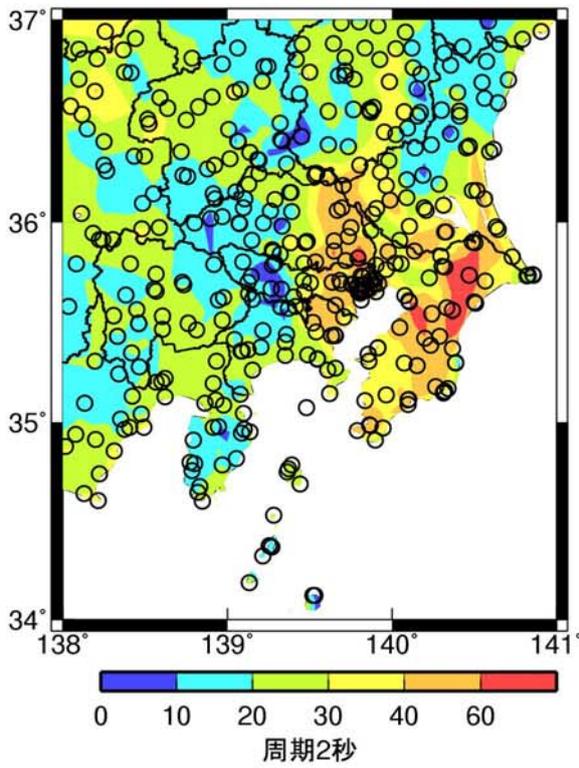
群遅延時間の平均値: 水平成分(伝播経路東のみ)

図 2. 3-35 ケース b の群遅延時間の平均値の関東平野におけるサイト係数のうち東の地震のみに対するサイト係数



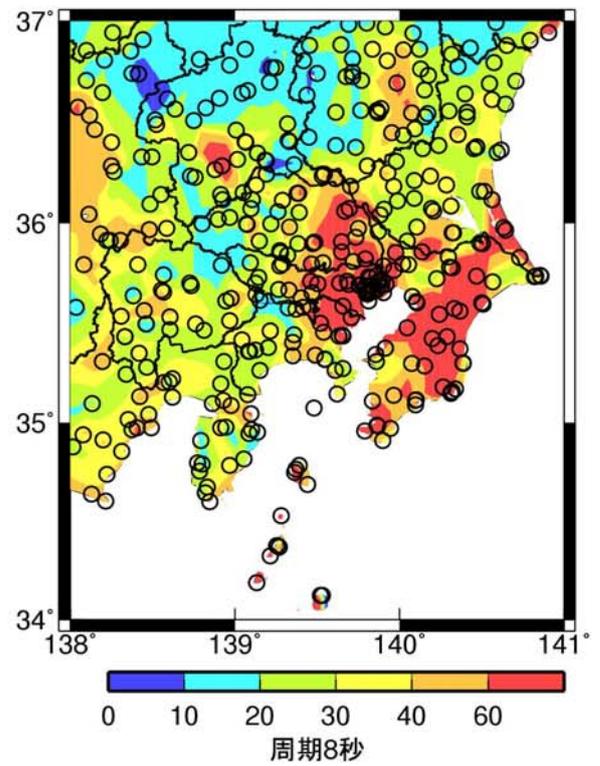
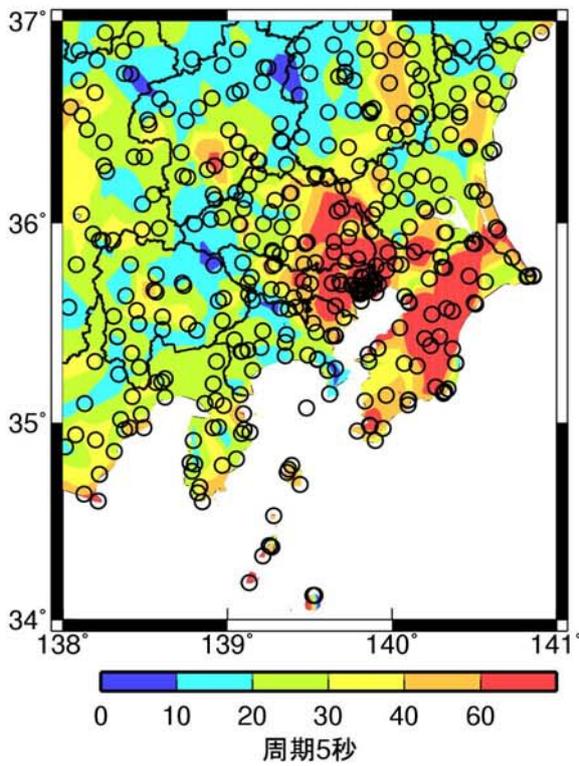
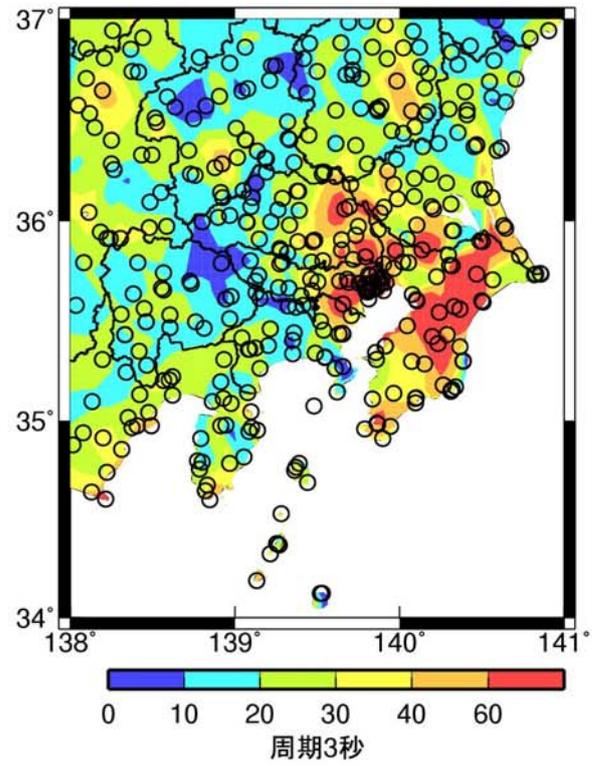
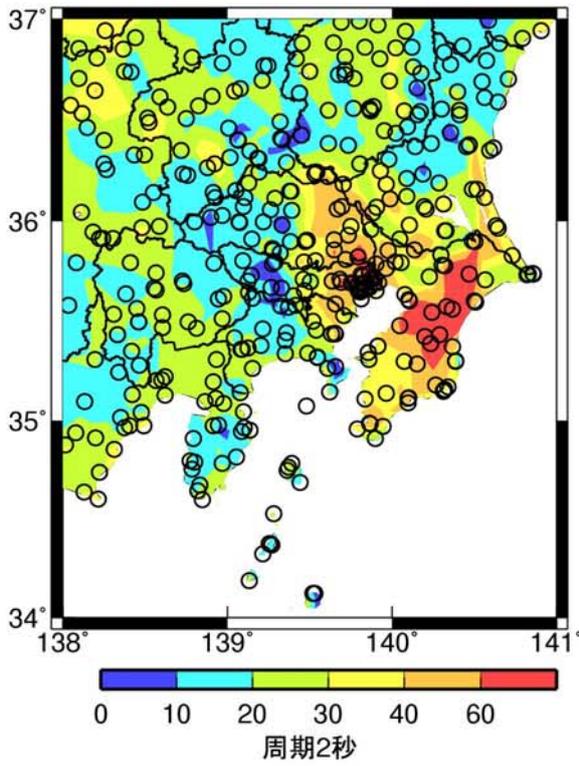
群遅延時間の平均値: 水平成分(伝播経路西のみ)

図 2. 3-36 ケース b の群遅延時間の平均値の関東平野におけるサイト係数のうち西の地震のみに対するサイト係数



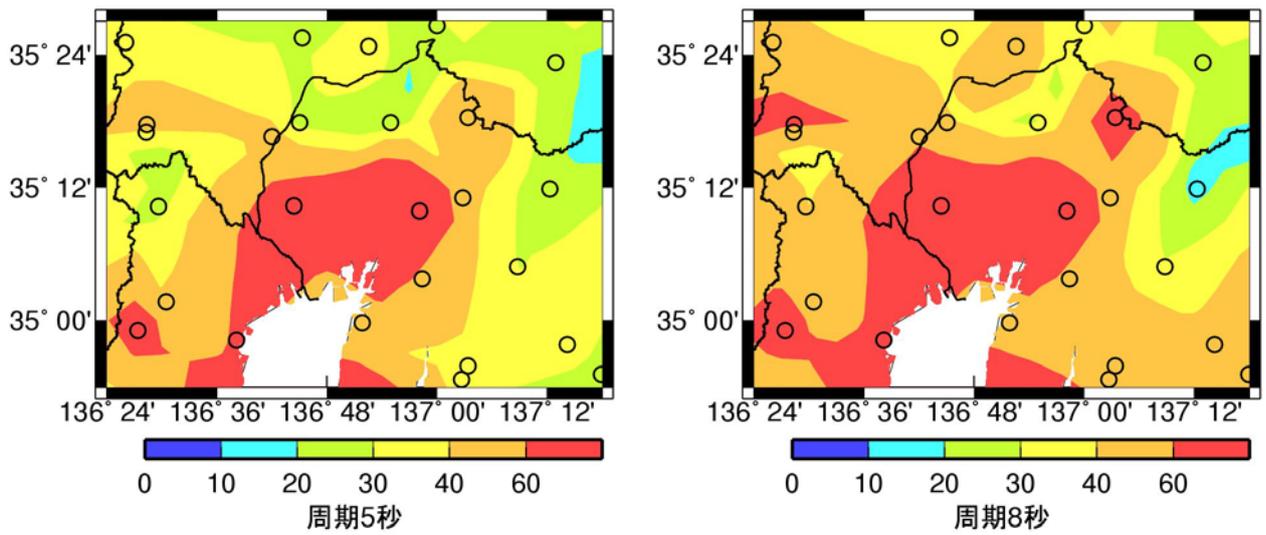
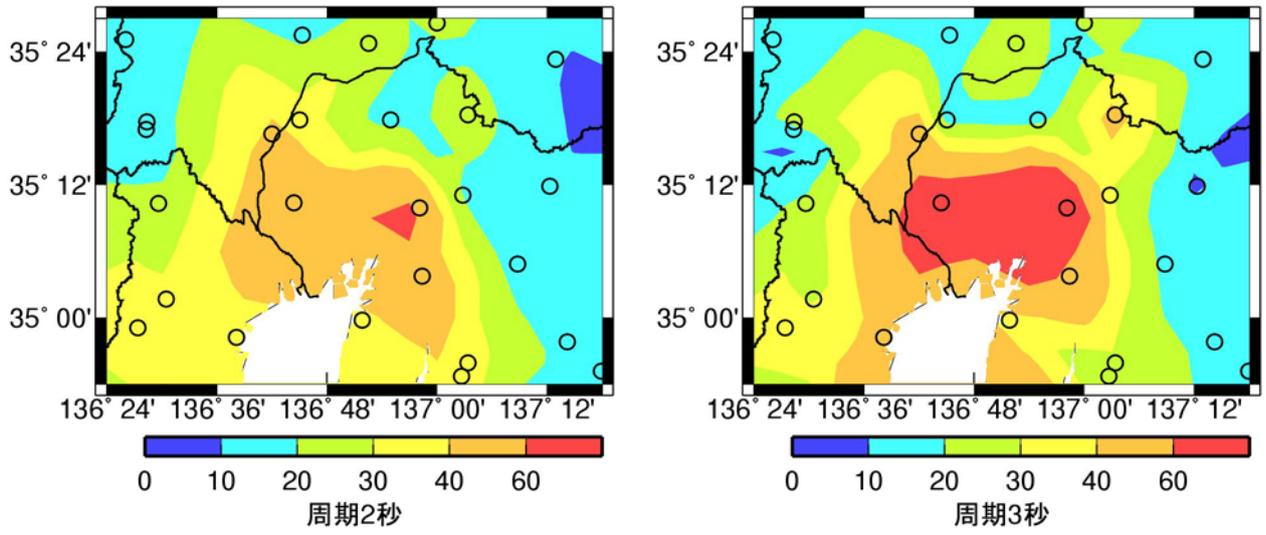
群遅延時間の平均値: 水平成分(伝播経路東)

図 2. 3-37 ケース b の群遅延時間の平均値の関東平野におけるサイト係数のうち東の地震に対する
サイト係数



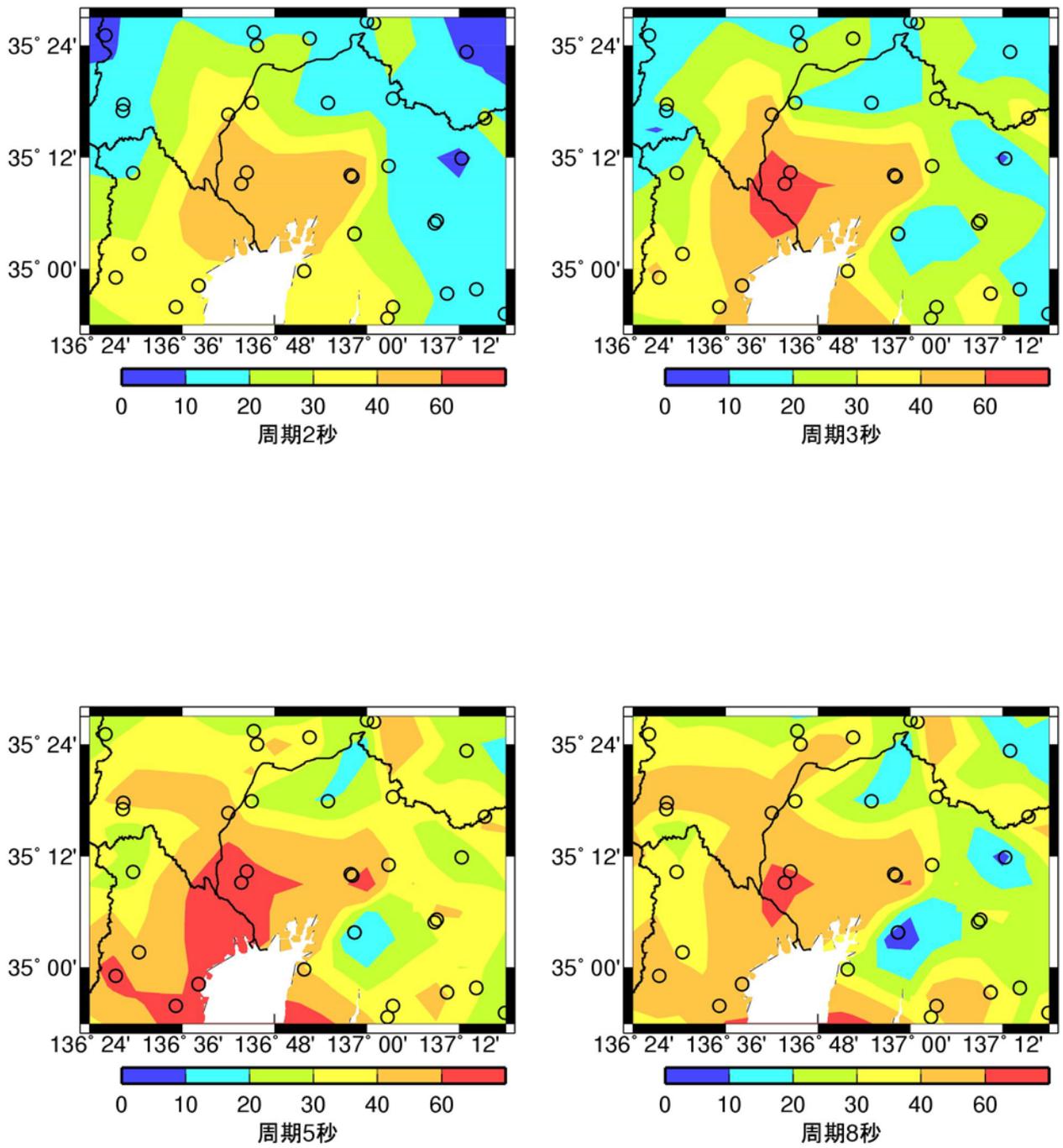
群遅延時間の平均値: 水平成分(伝播経路西)

図 2. 3-38 ケース b の群遅延時間の平均値の関東平野におけるサイト係数のうち西の地震に対する
サイト係数



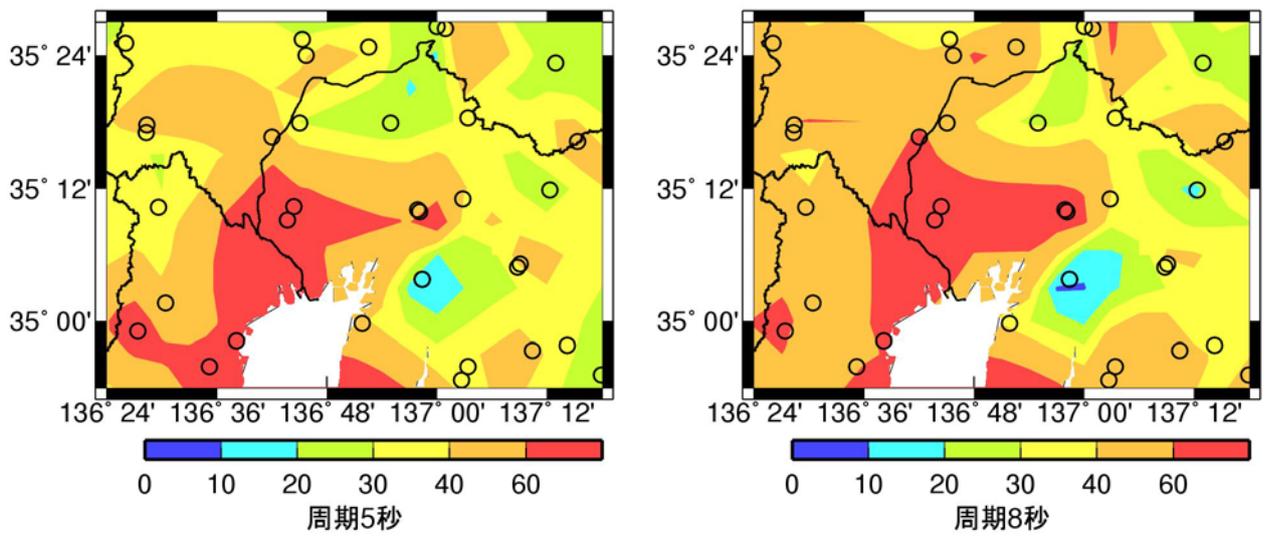
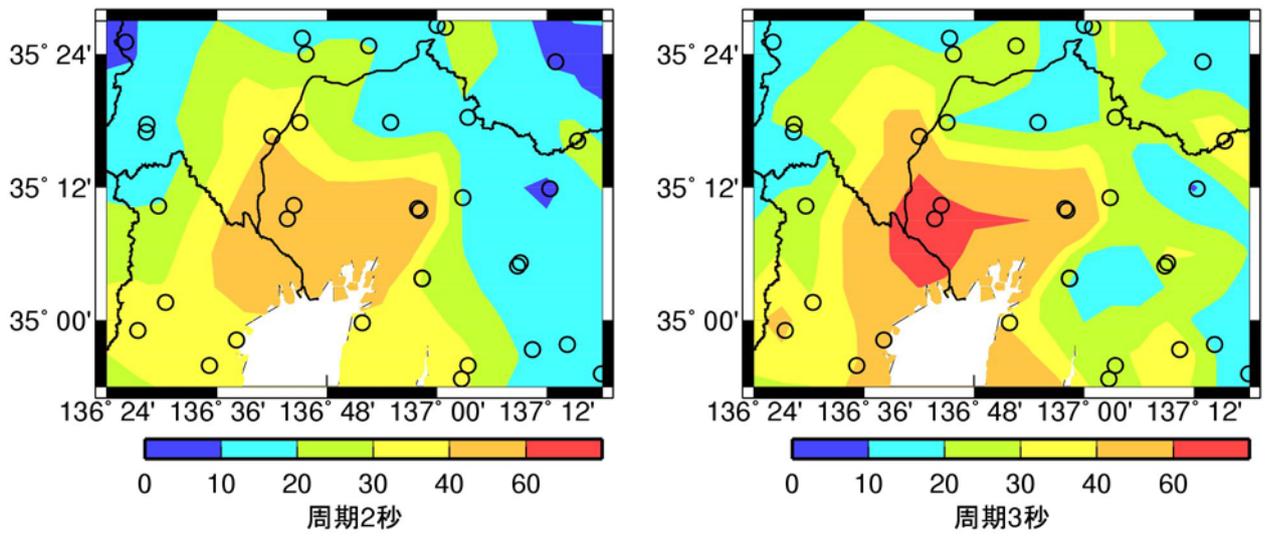
群遅延時間の平均値:2010版

図 2.3-39 旧経験式の群遅延時間の平均値の濃尾平野におけるサイト係数



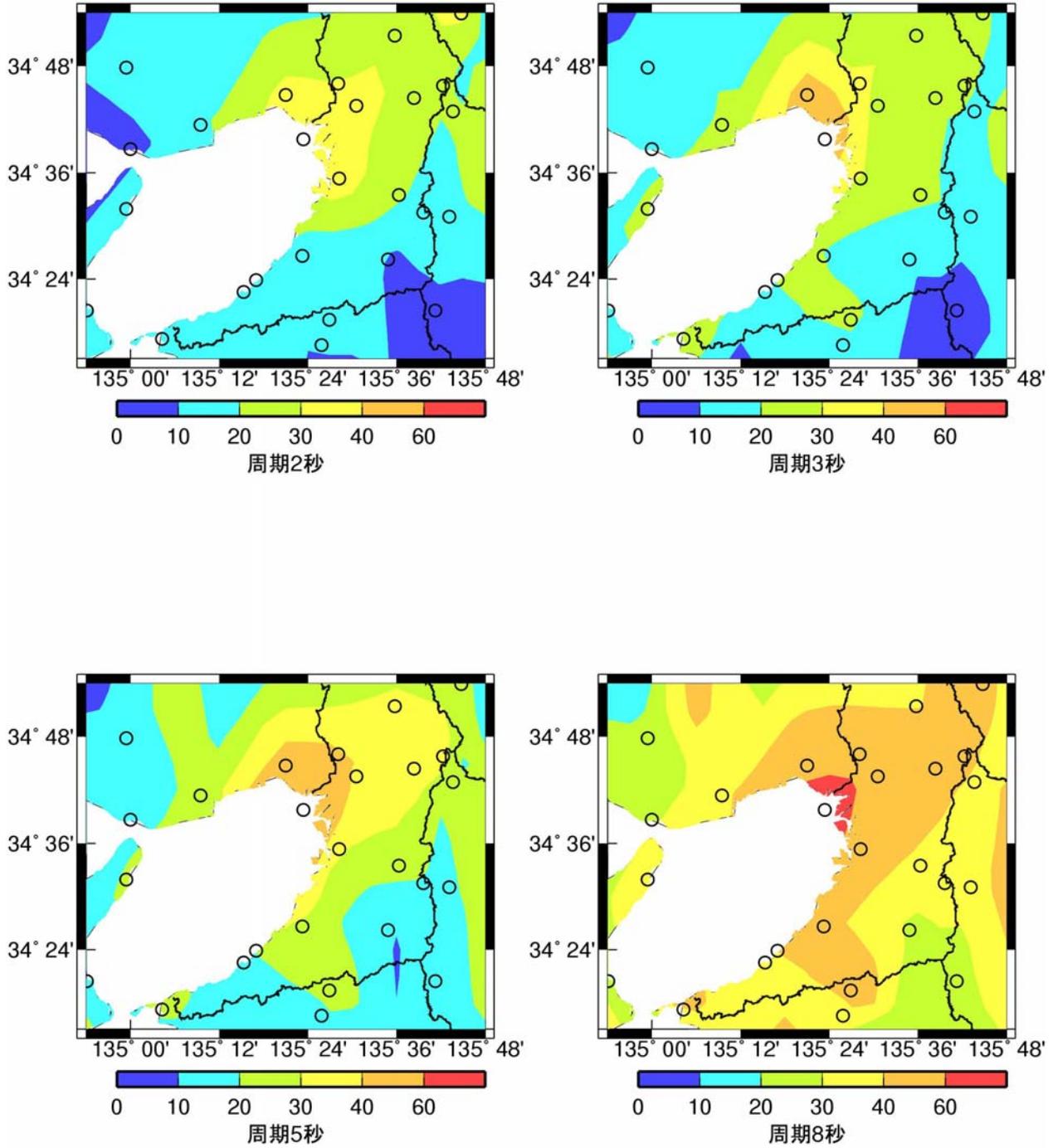
群遅延時間の平均値: 水平成分(海溝型地震全て)

図 2.3-40 ケース a の群遅延時間の平均値の濃尾平野におけるサイト係数



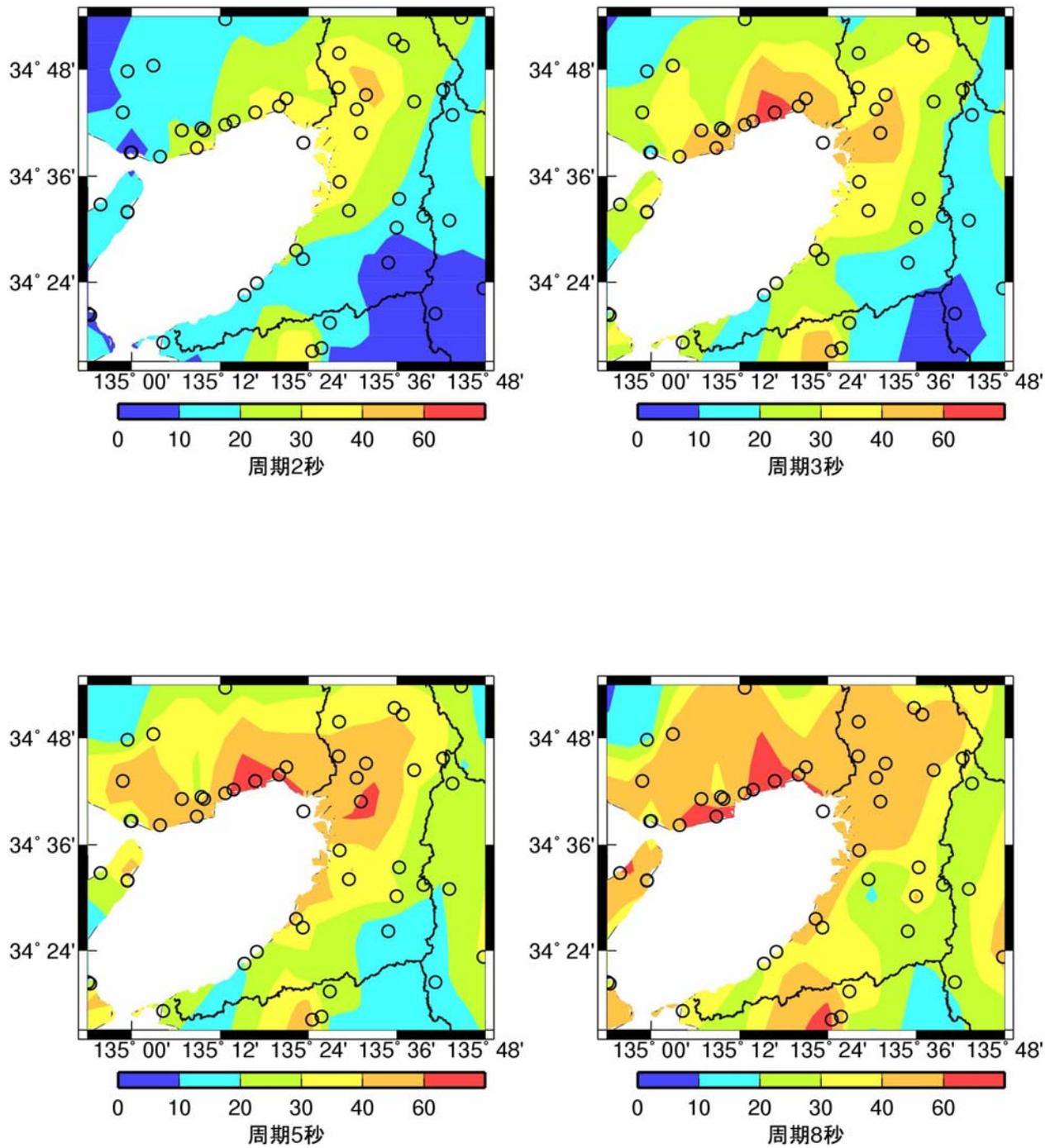
群遅延時間の平均値: 水平成分(伝播経路西)

図 2.3-41 ケース b の群遅延時間の平均値の濃尾平野におけるサイト係数



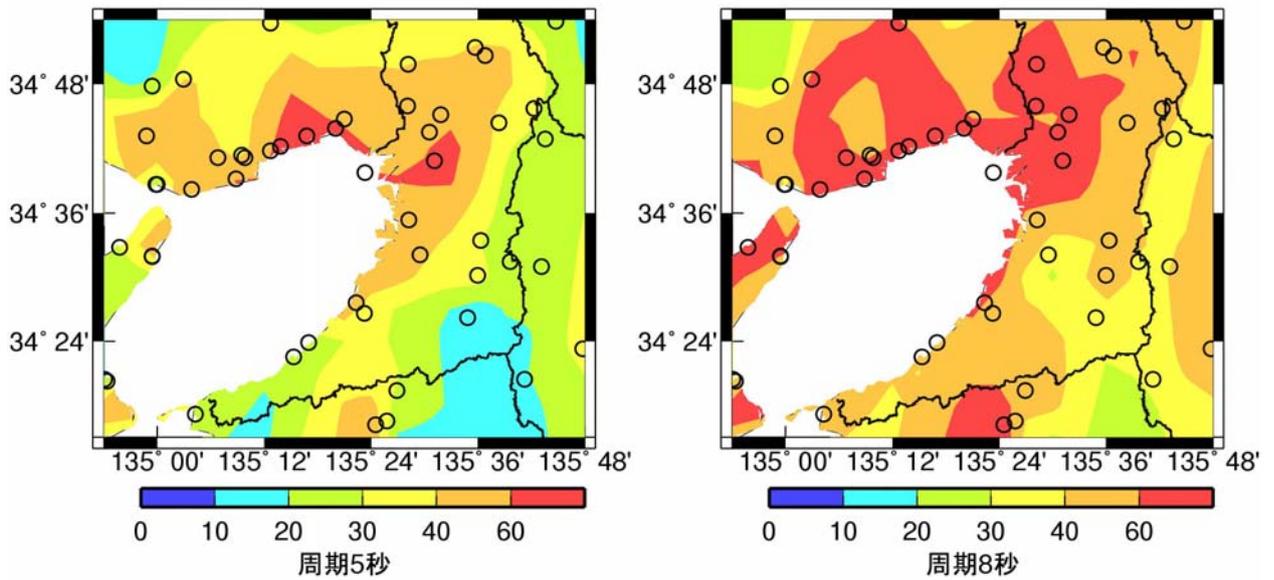
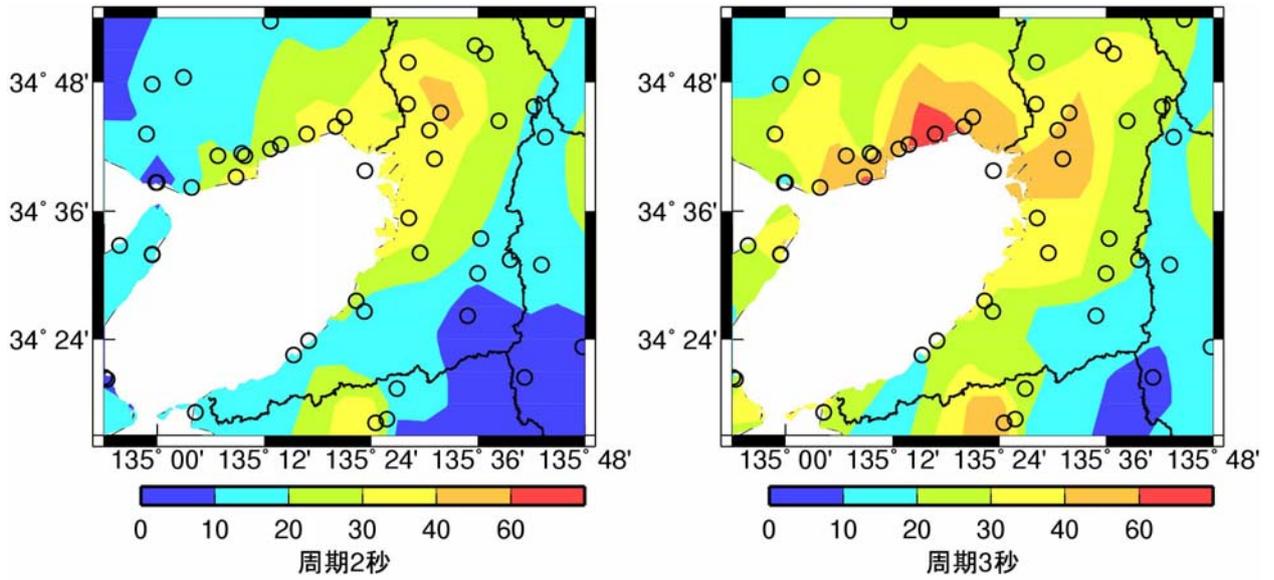
群遅延時間の平均値:2010版

図 2.3-42 旧経験式の群遅延時間の平均値の大阪平野におけるサイト係数



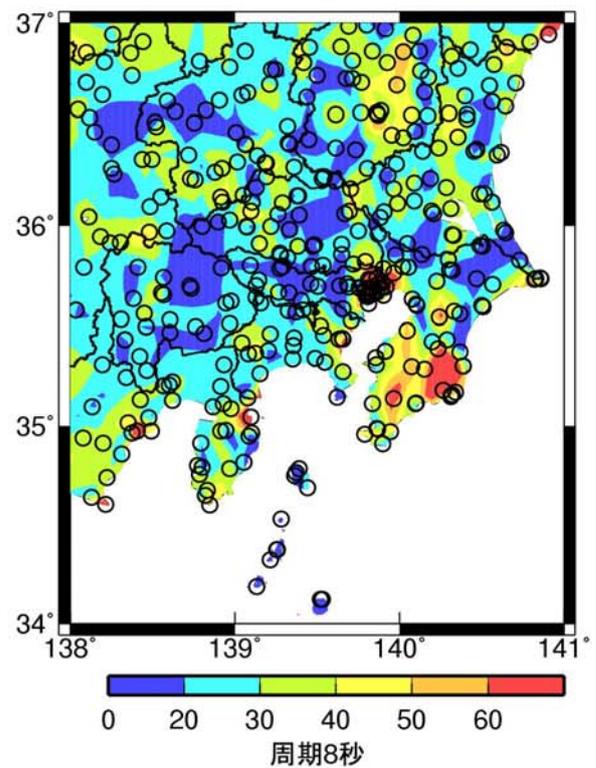
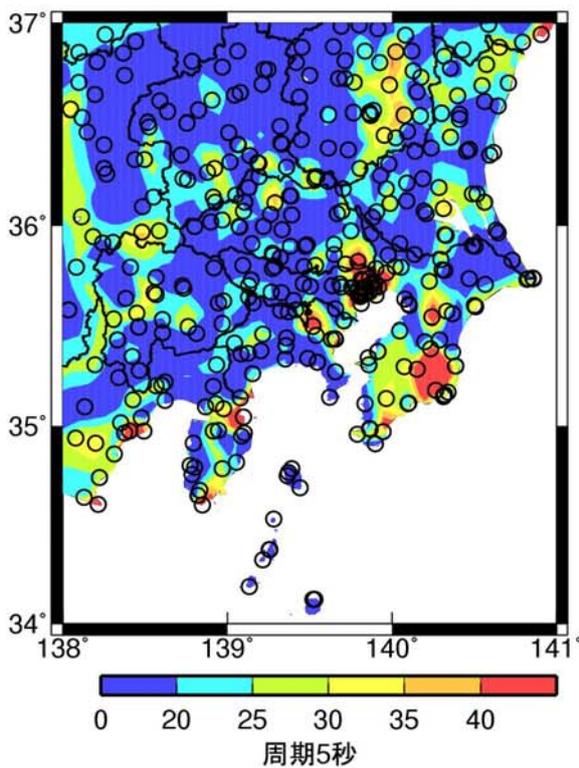
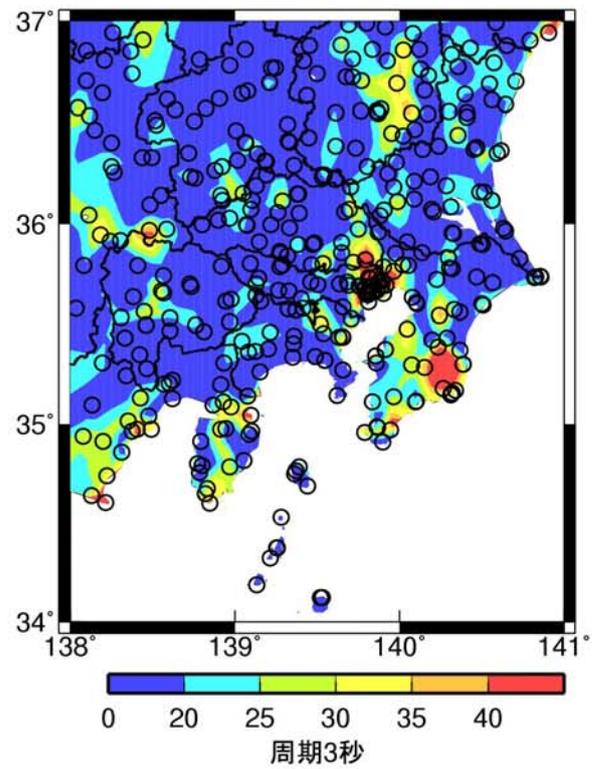
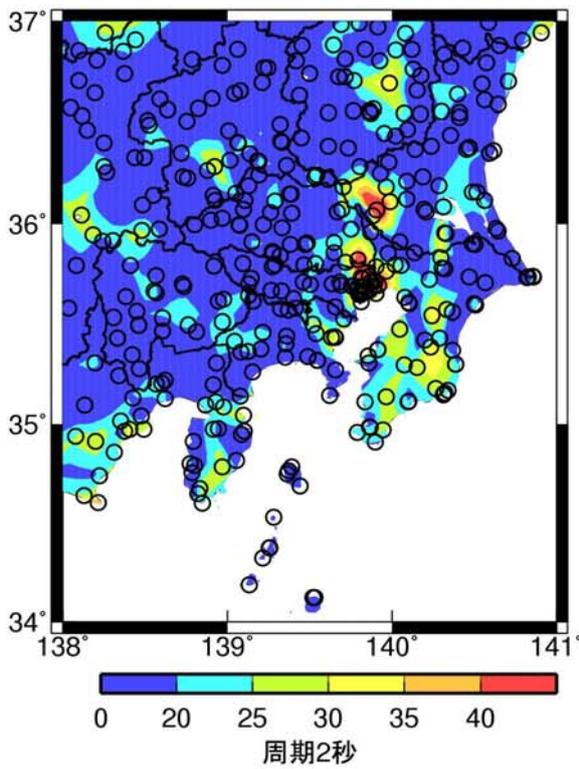
群遅延時間の平均値: 水平成分(海溝型地震全て)

図 2.3-43 ケース a の群遅延時間の平均値の大阪平野におけるサイト係数



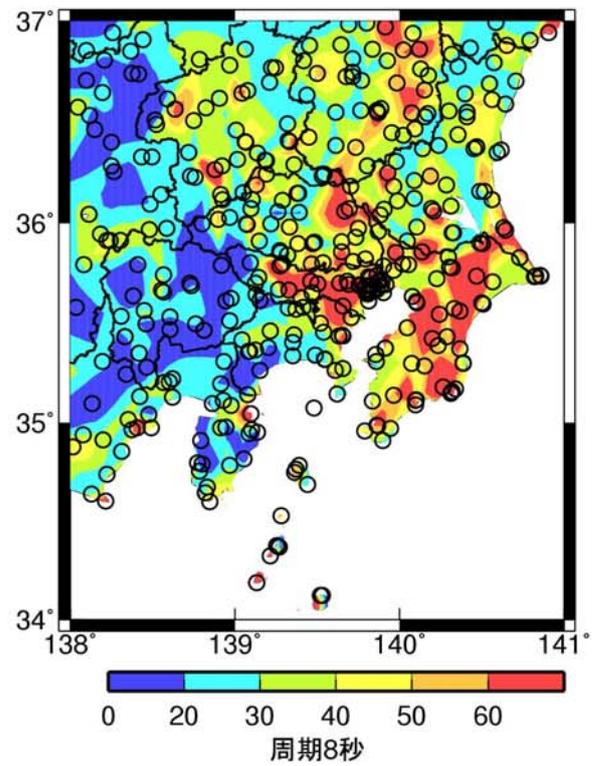
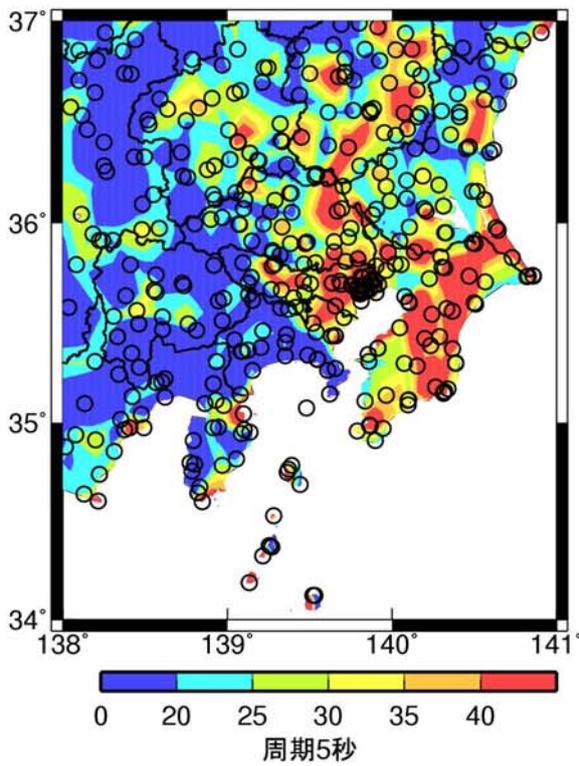
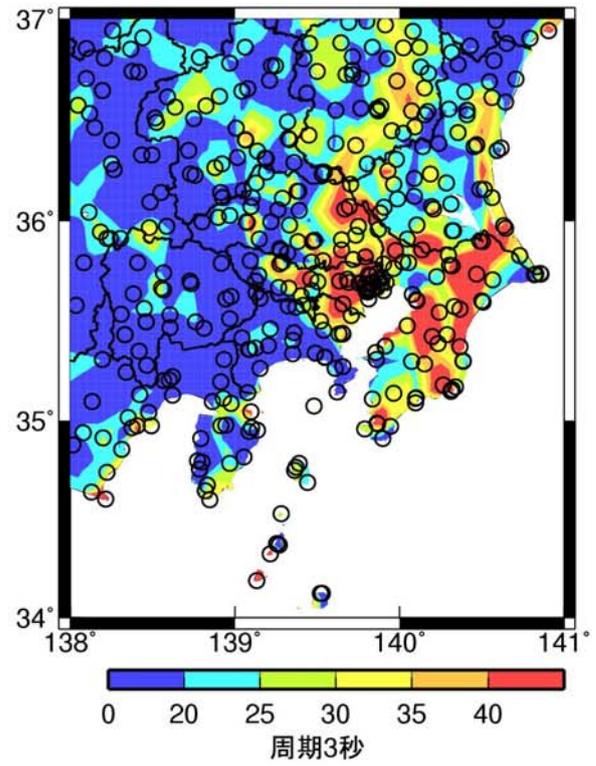
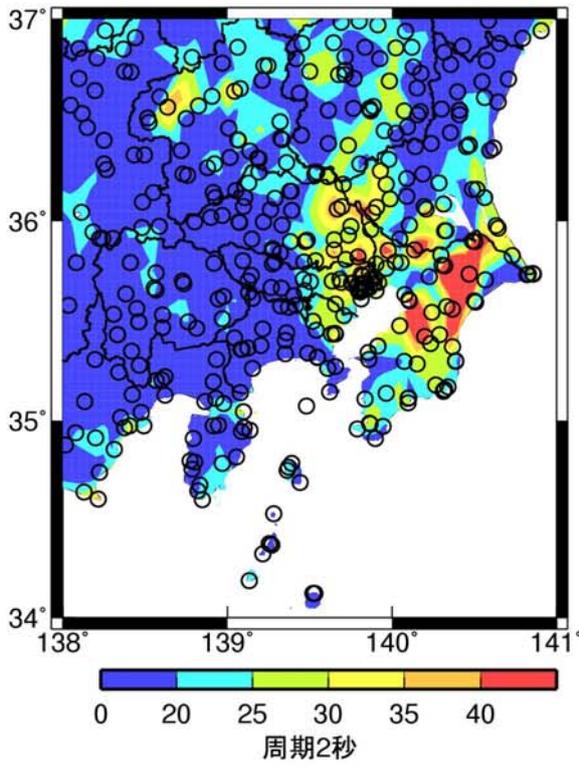
群遅延時間の平均値: 水平成分(伝播経路西)

図 2.3-44 ケース b の群遅延時間の平均値の大阪平野におけるサイト係数



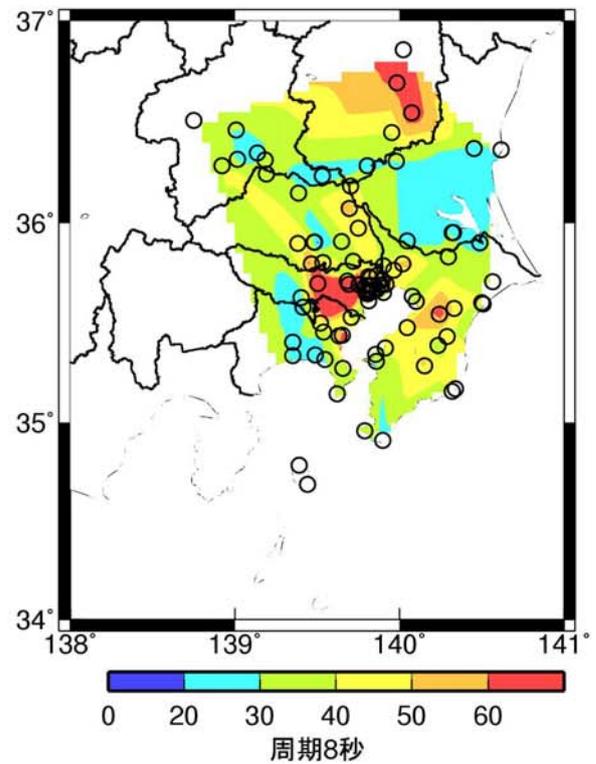
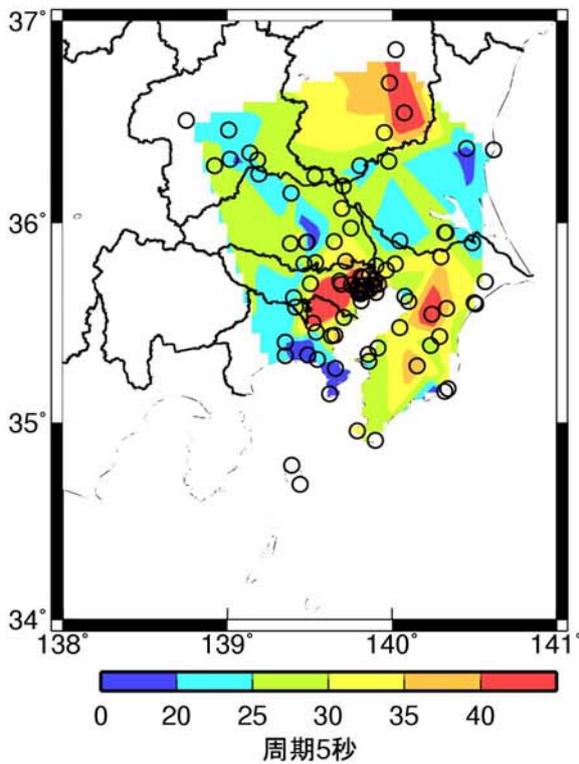
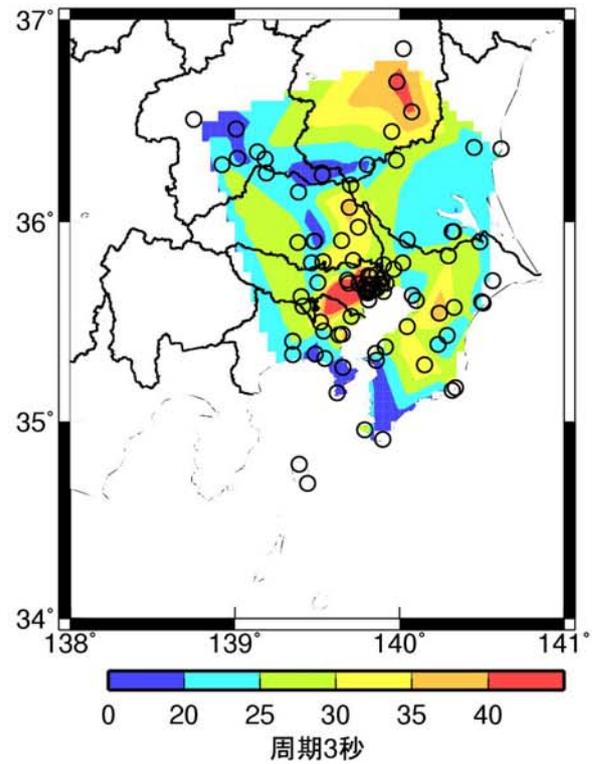
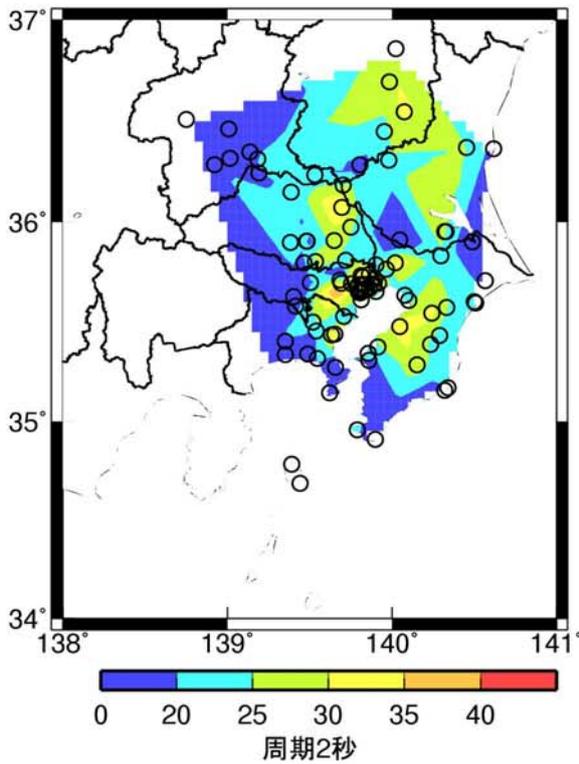
群遅延時間の標準偏差:2010版

図 2.3-45 旧経験式の群遅延時間の標準偏差の関東平野におけるサイト係数



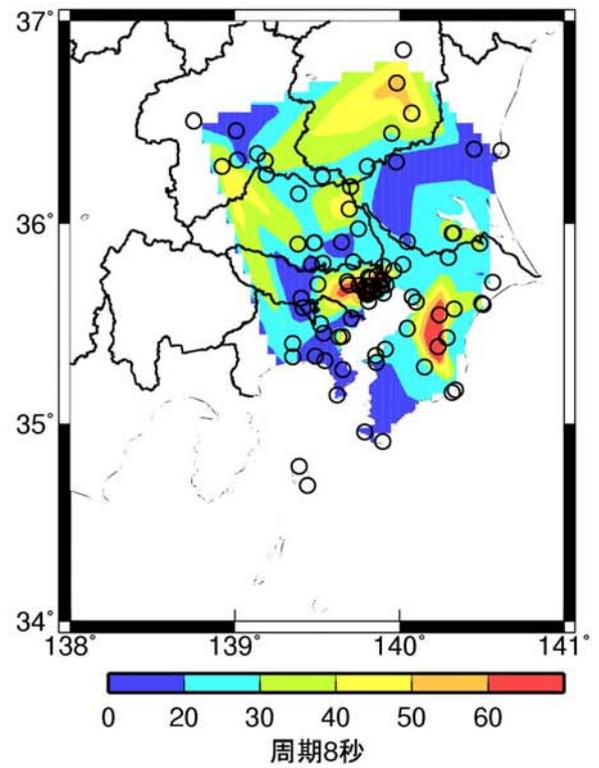
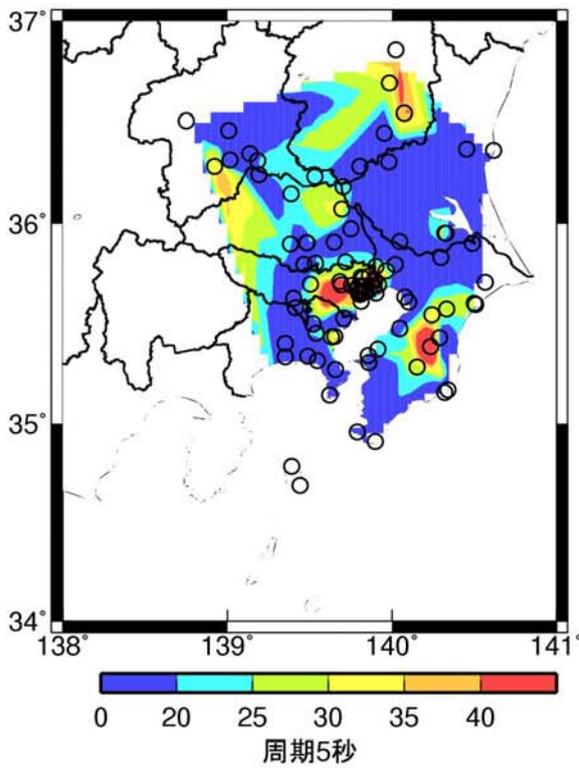
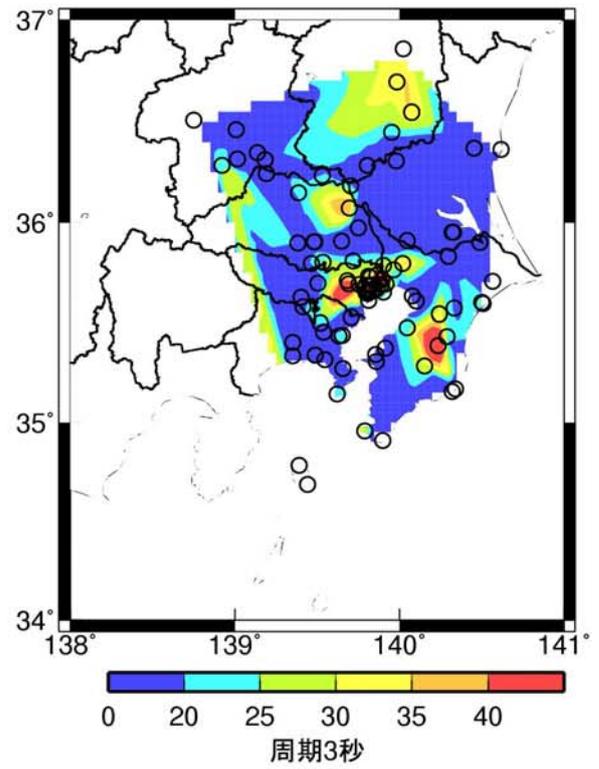
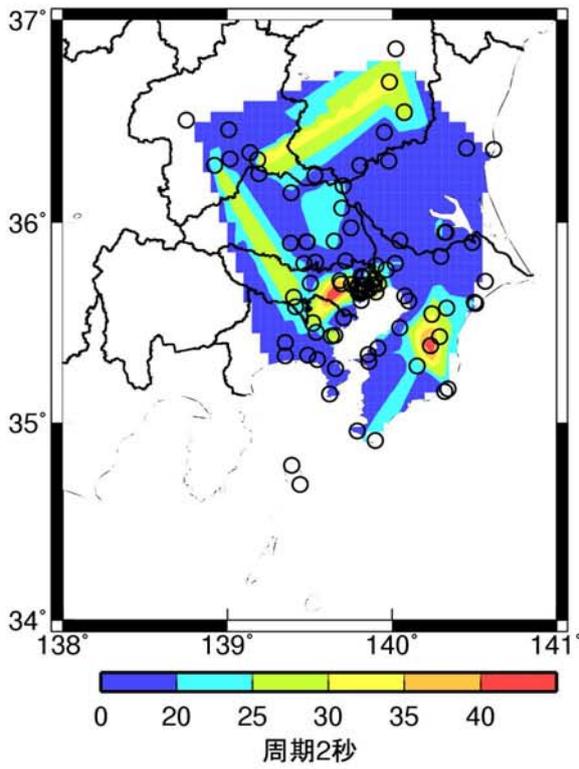
群遅延時間の標準偏差: 水平成分(海溝型地震全て)

図 2.3-46 ケース a の群遅延時間標準偏差の関東平野におけるサイト係数



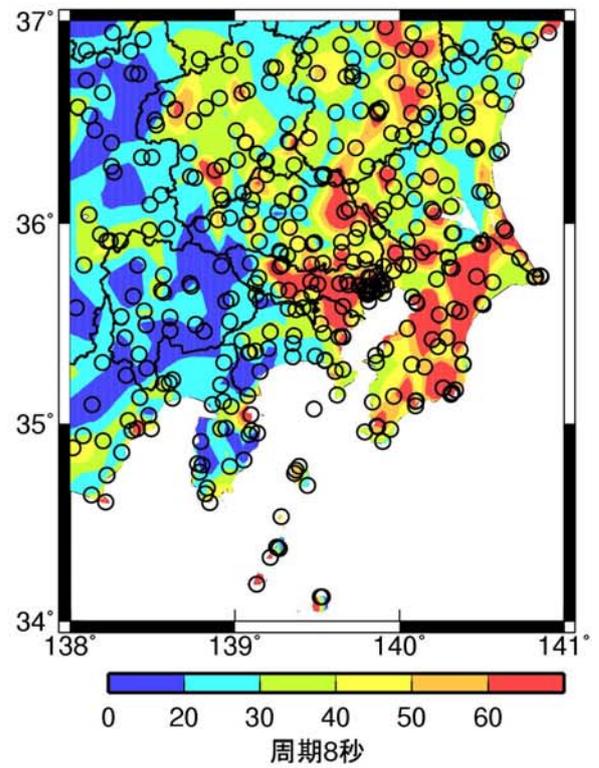
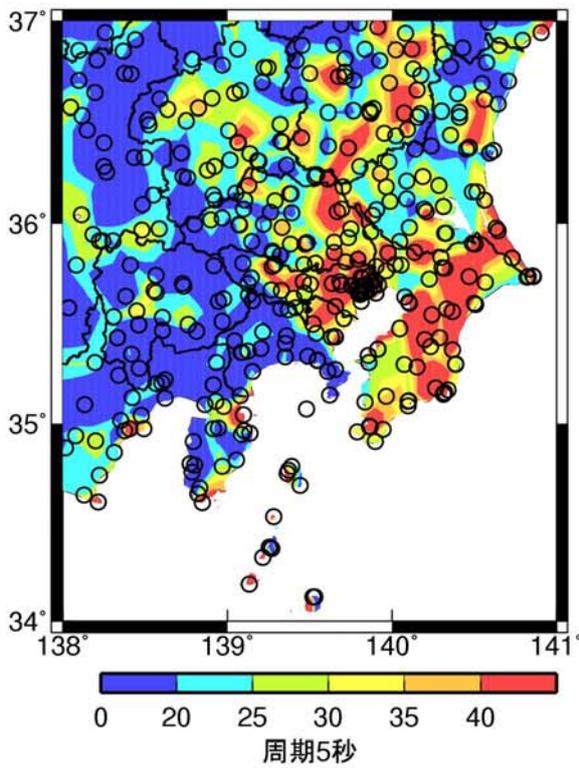
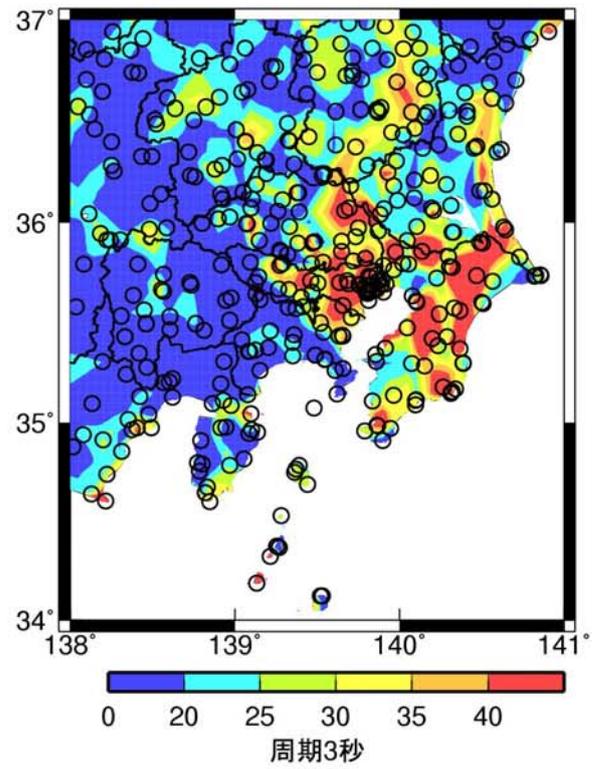
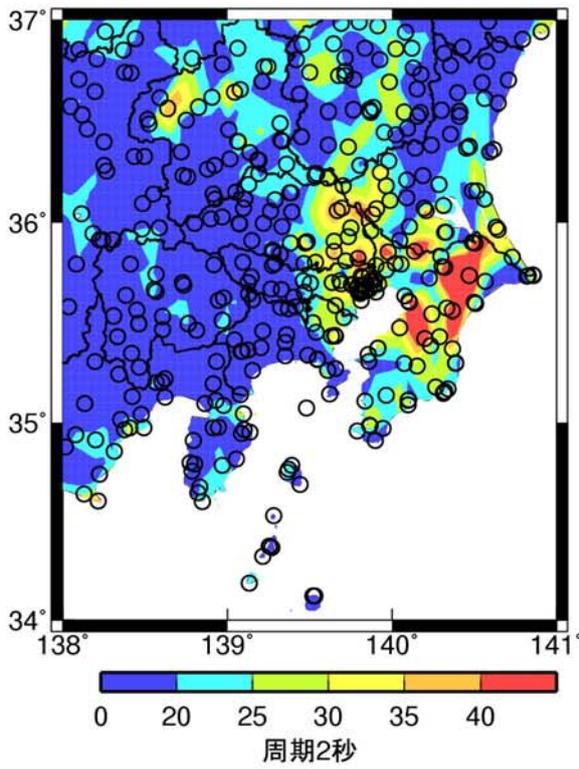
群遅延時間の標準偏差: 水平成分(伝播経路東のみ)

図 2. 3-47 ケース b の群遅延時間の標準偏差の関東平野におけるサイト係数のうち東の地震のみに
対するサイト係数



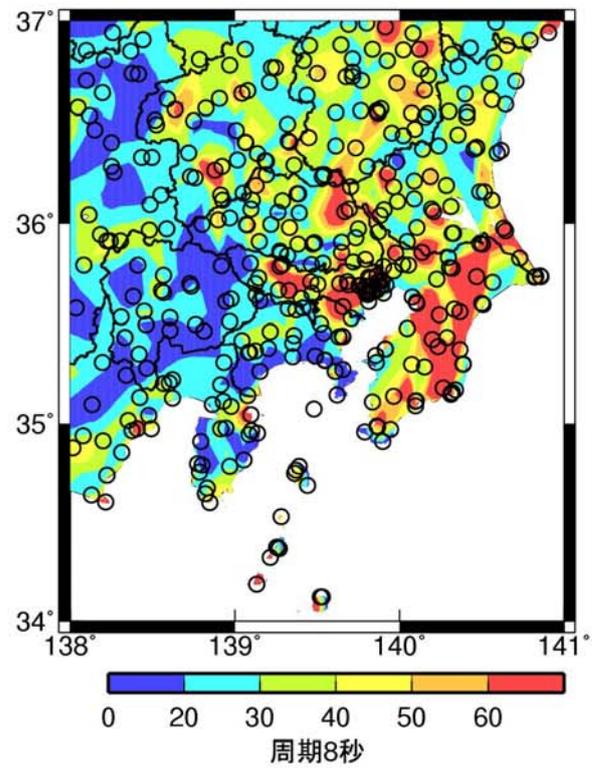
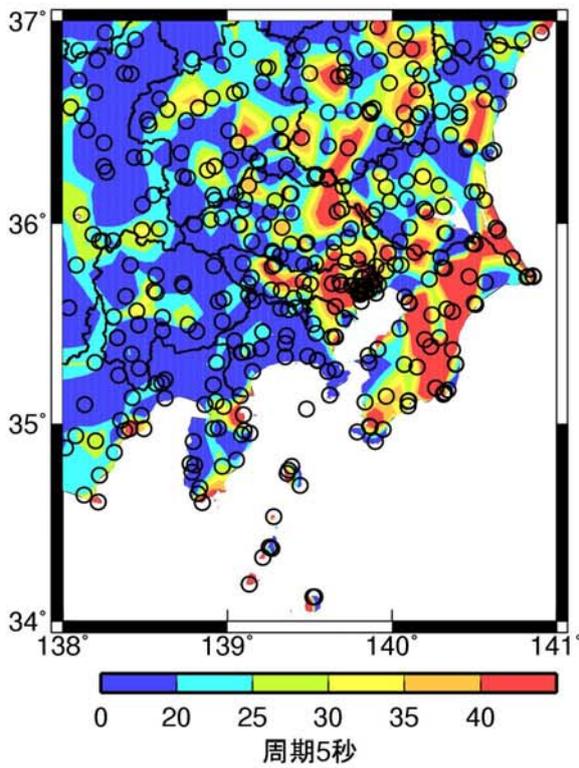
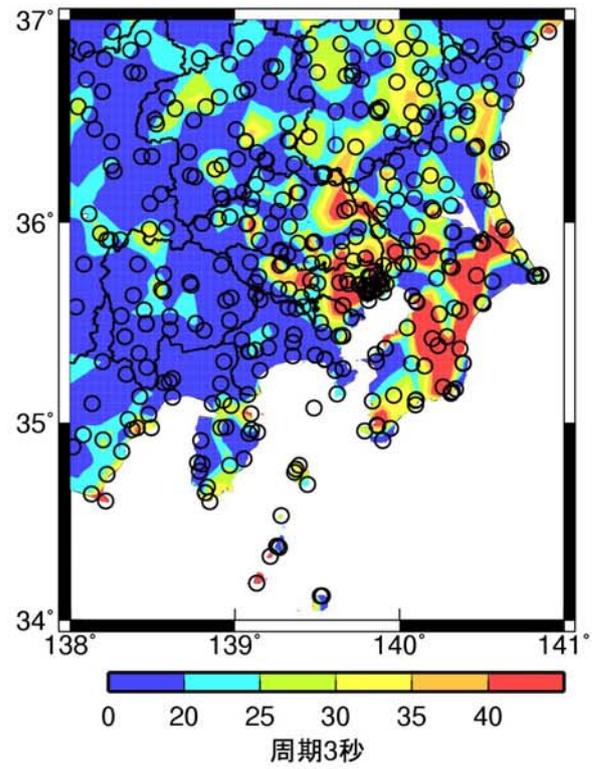
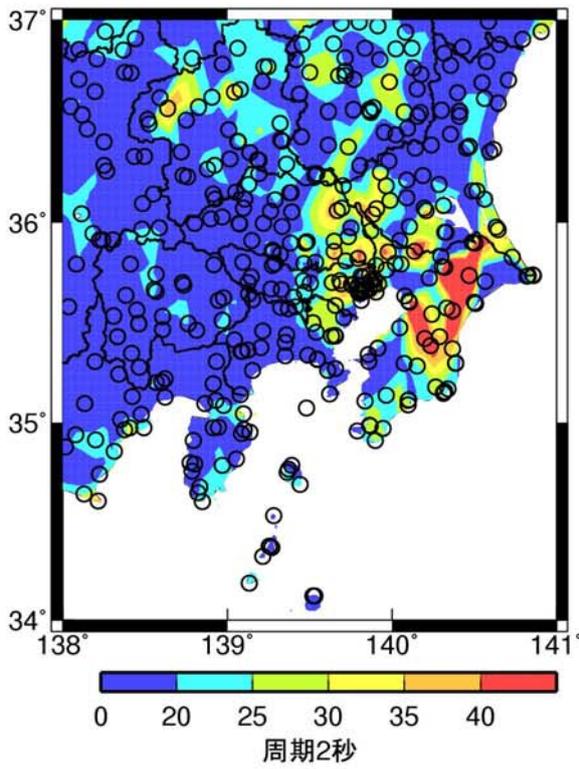
群遅延時間の標準偏差: 水平成分(伝播経路西のみ)

図 2. 3-48 ケース b の群遅延時間の標準偏差の関東平野におけるサイト係数のうちとう西の地震のみに対するサイト係数



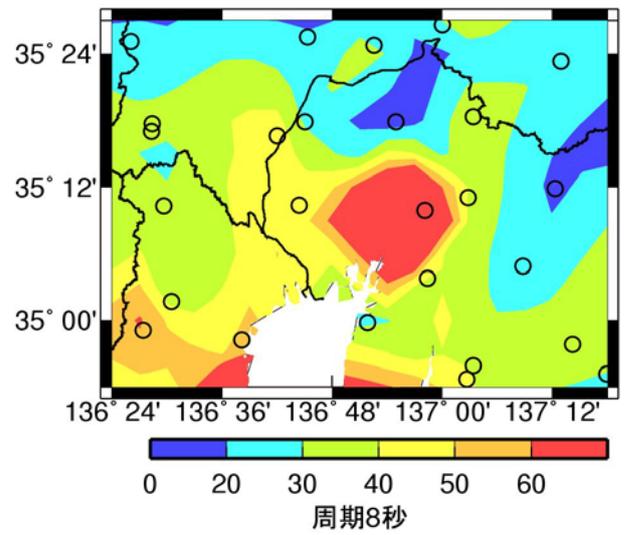
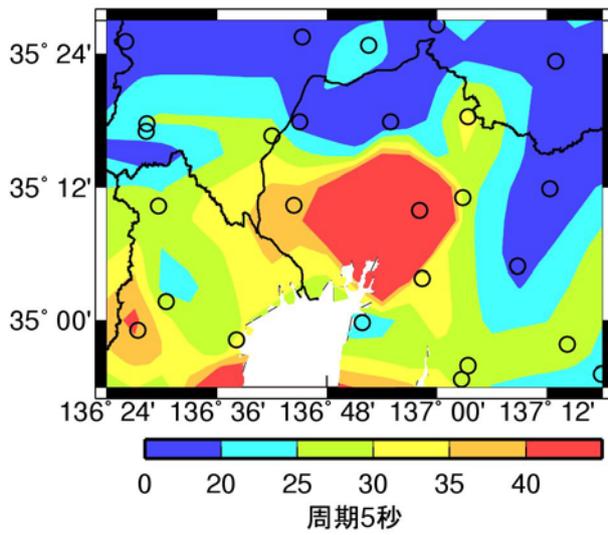
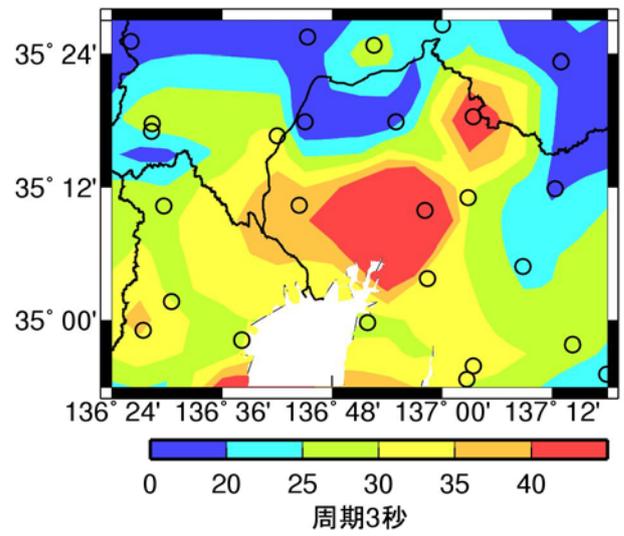
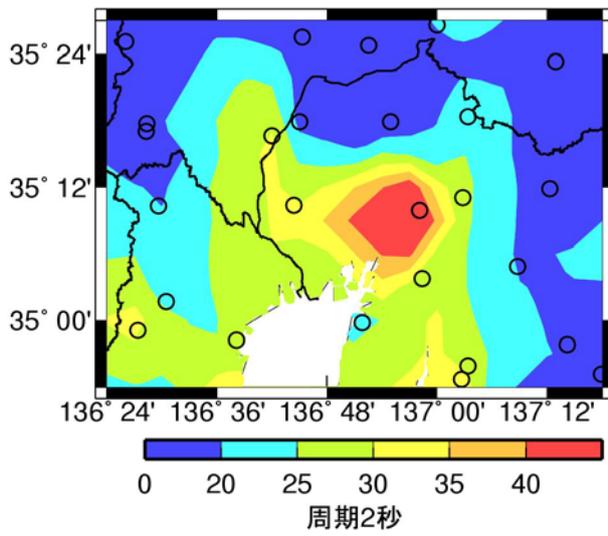
群遅延時間の標準偏差: 水平成分(伝播経路東)

図 2. 3-49 ケース b の群遅延時間の標準偏差の関東平野におけるサイト係数のうち東の地震に対するサイト係数



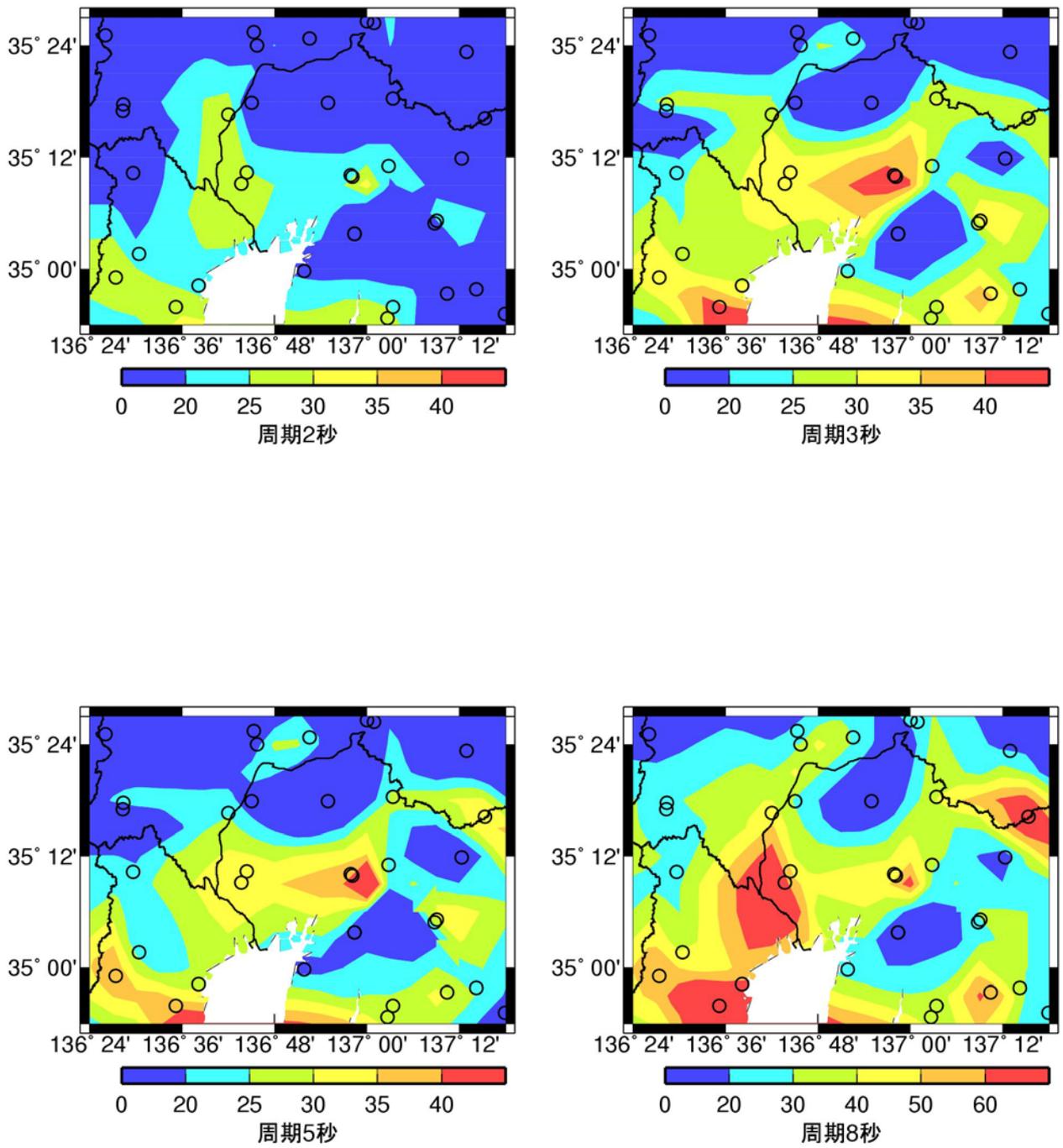
群遅延時間の標準偏差: 水平成分(伝播経路西)

図 2. 3-50 ケース b の群遅延時間の標準偏差の関東平野におけるサイト係数のうち西の地震に対するサイト係数



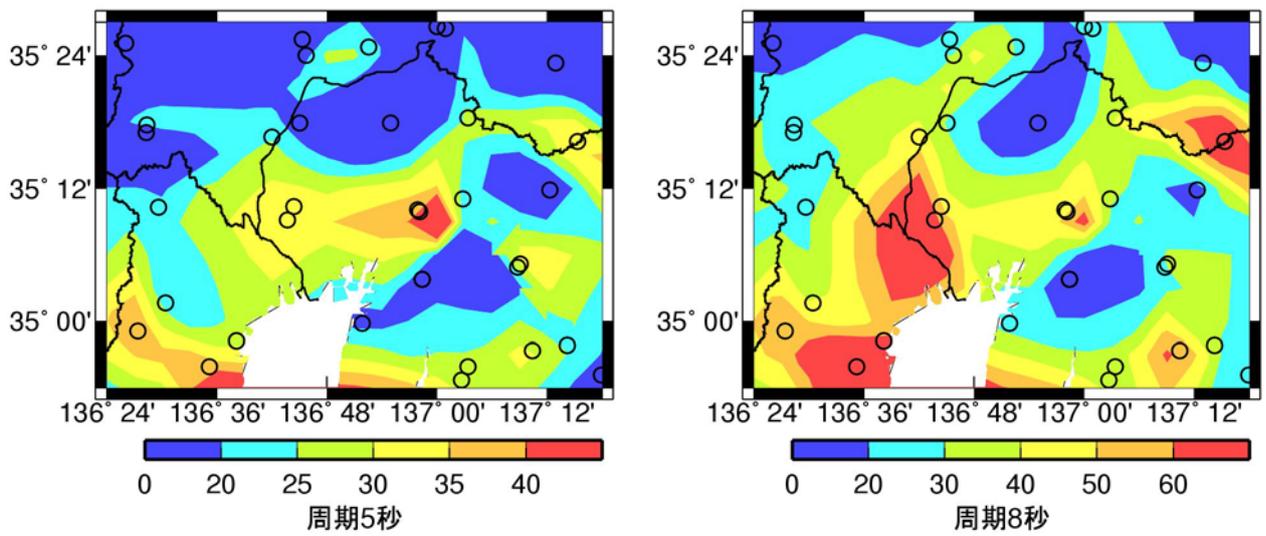
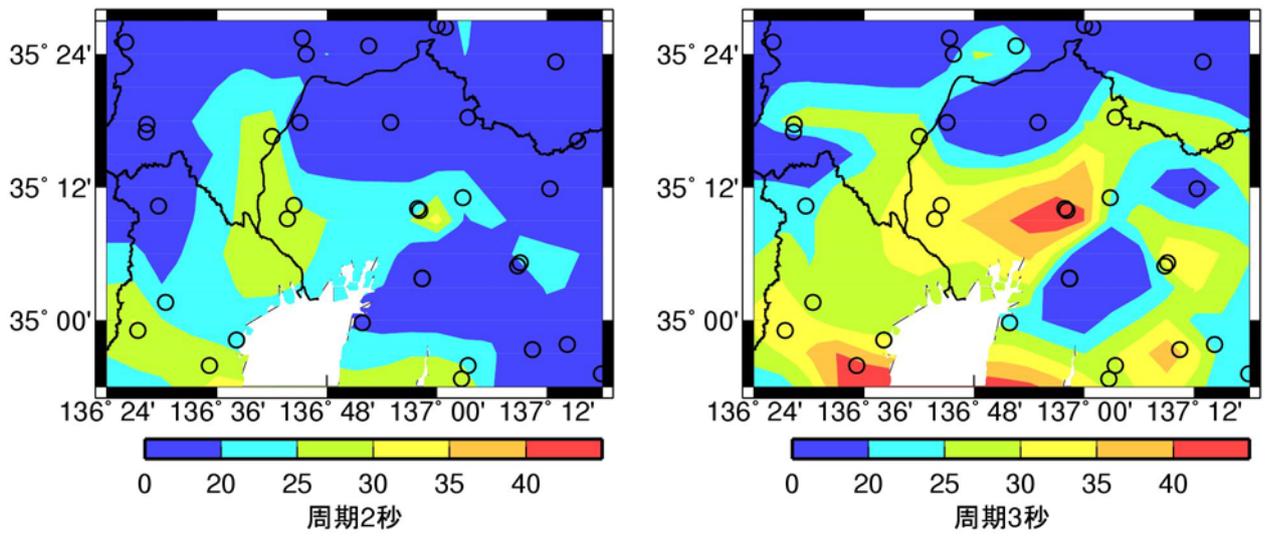
群遅延時間の標準偏差: 水平成分

図 2.3-51 旧経験式の群遅延時間の標準偏差の濃尾平野におけるサイト係数



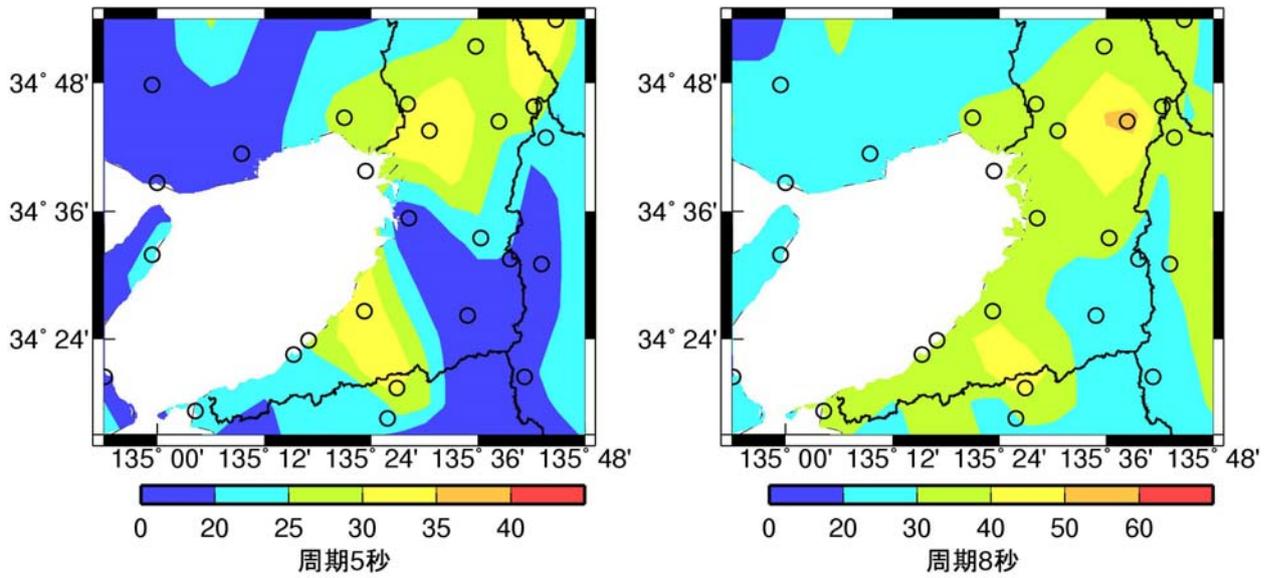
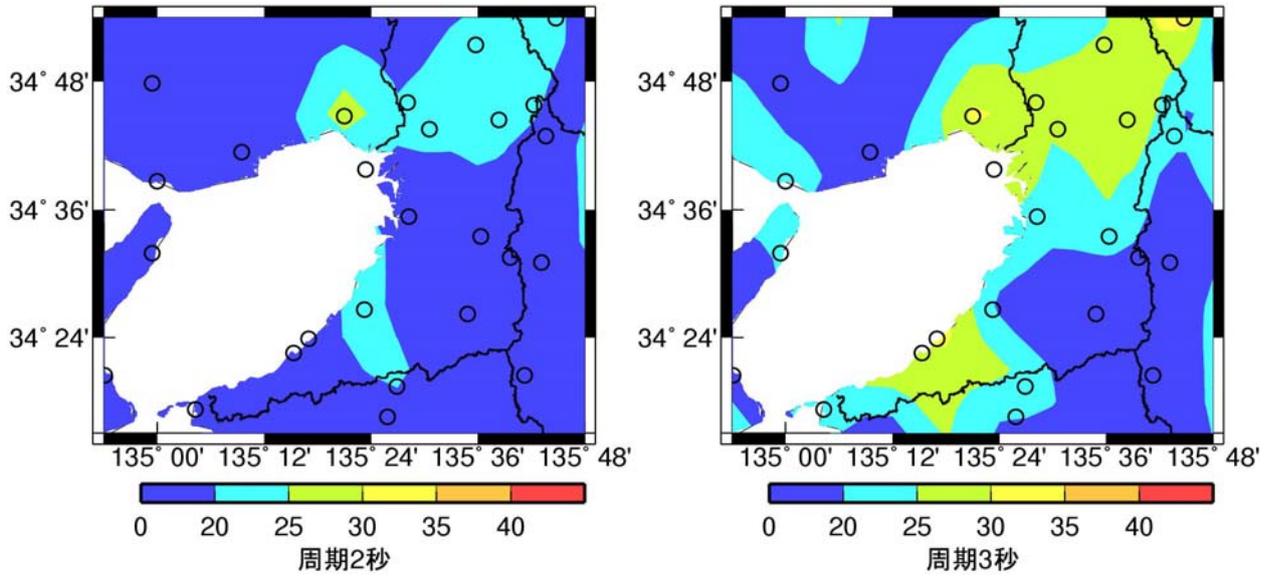
群遅延時間の標準偏差: 水平成分(海溝型地震全て)

図 2.3-52 ケース a の群遅延時間の標準偏差の濃尾平野におけるサイト係数



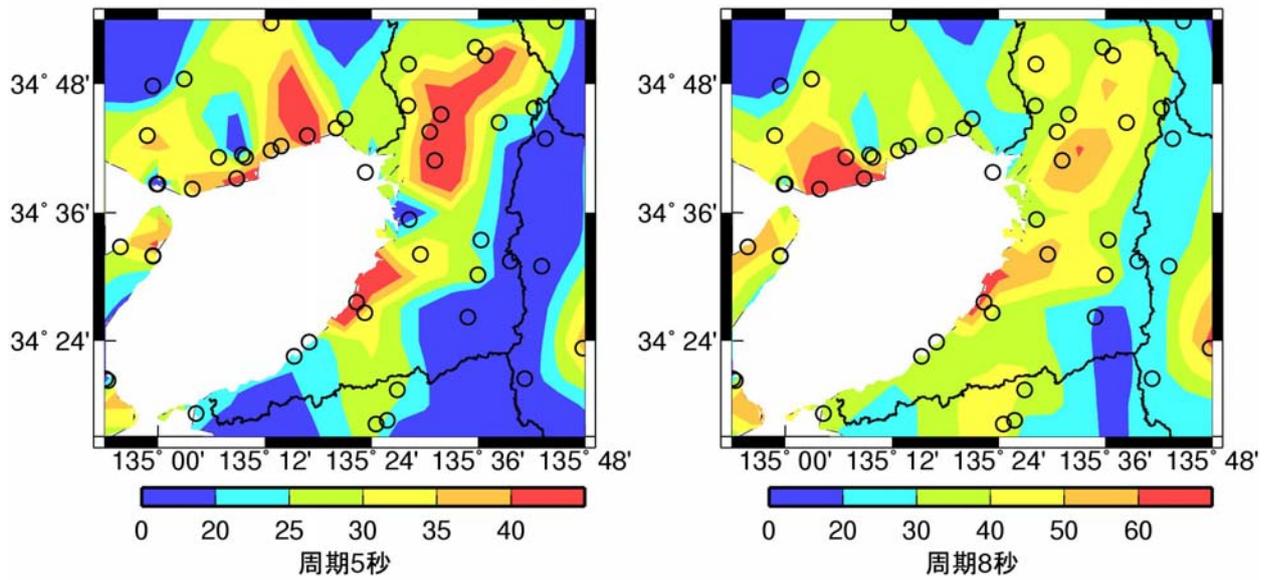
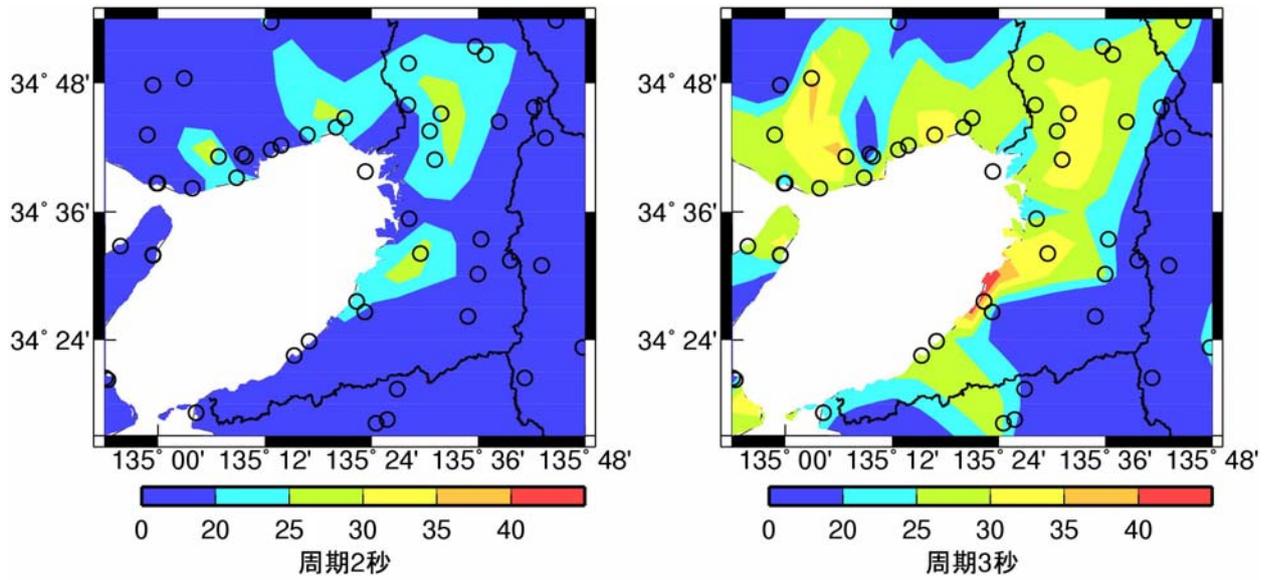
群遅延時間の標準偏差: 水平成分(伝播経路西)

図 2.3-53 ケース b の群遅延時間の標準偏差の濃尾平野におけるサイト係数



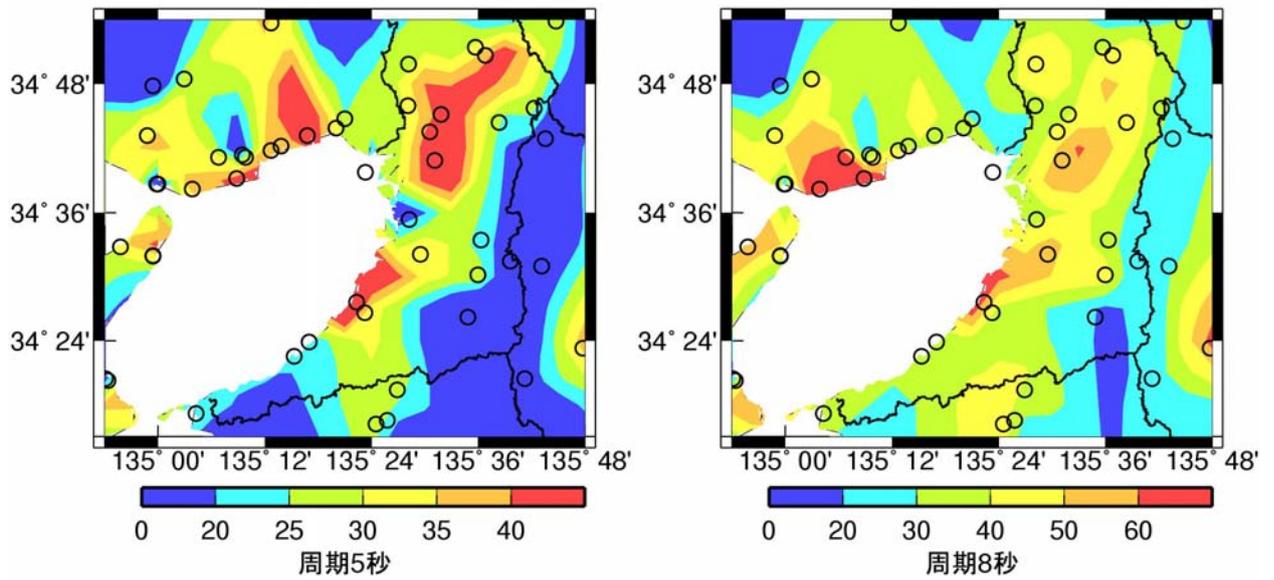
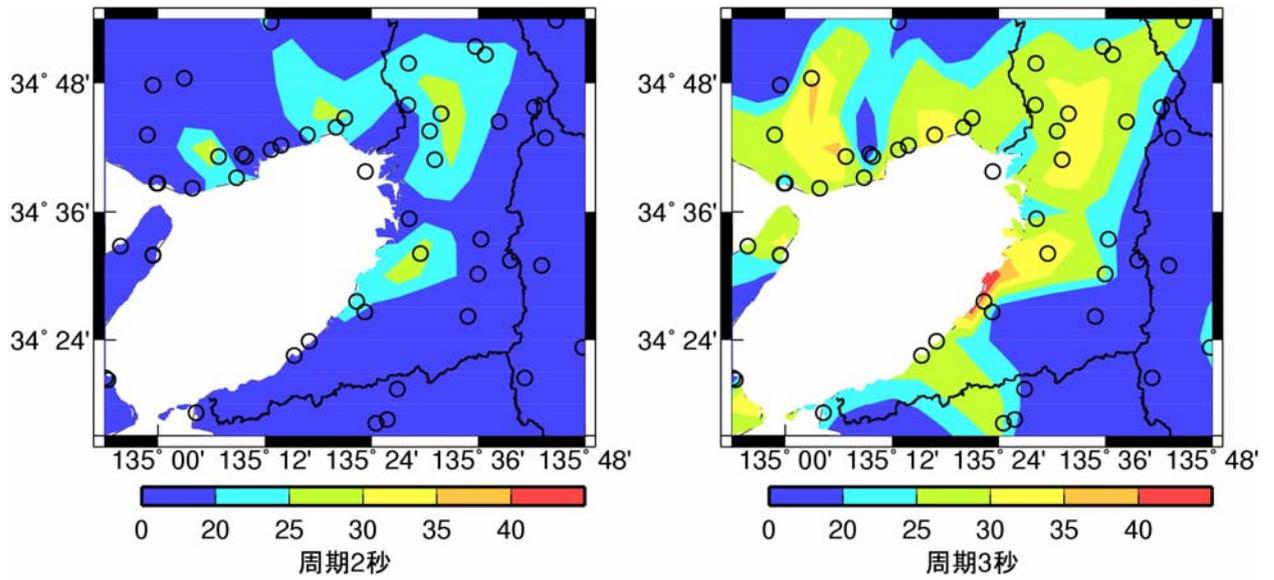
群遅延時間の標準偏差:2010版

図 2.3-54 旧経験式の群遅延時間の標準偏差の大阪平野におけるサイト係数



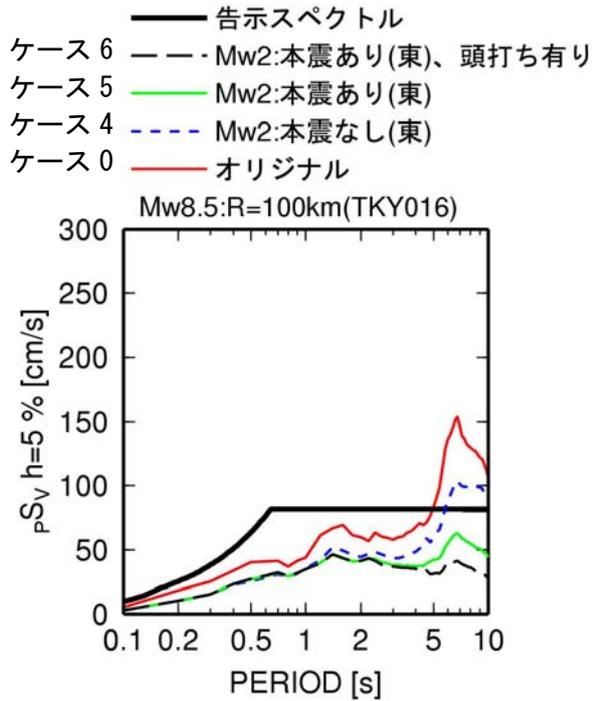
群遅延時間の標準偏差: 水平成分(海溝型地震全て)

図 2.3-55 ケース a の群遅延時間の標準偏差の大阪平野におけるサイト係数

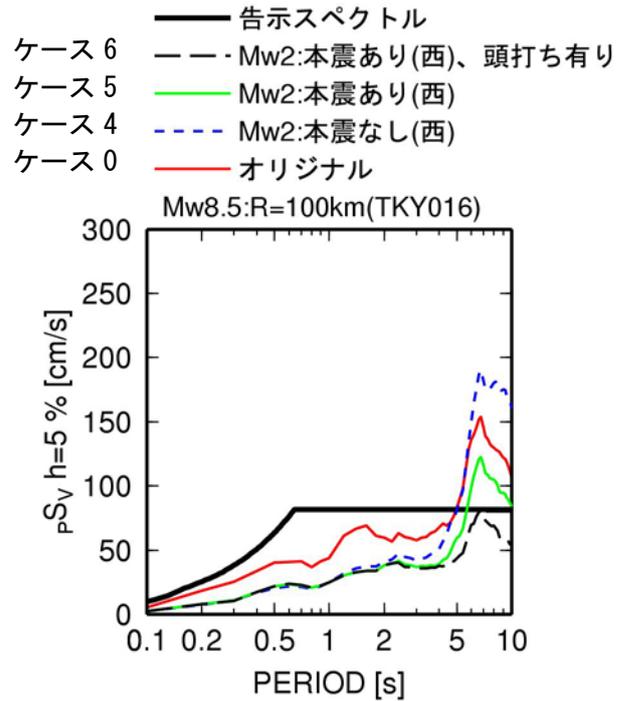


群遅延時間の標準偏差: 水平成分(伝播経路西)

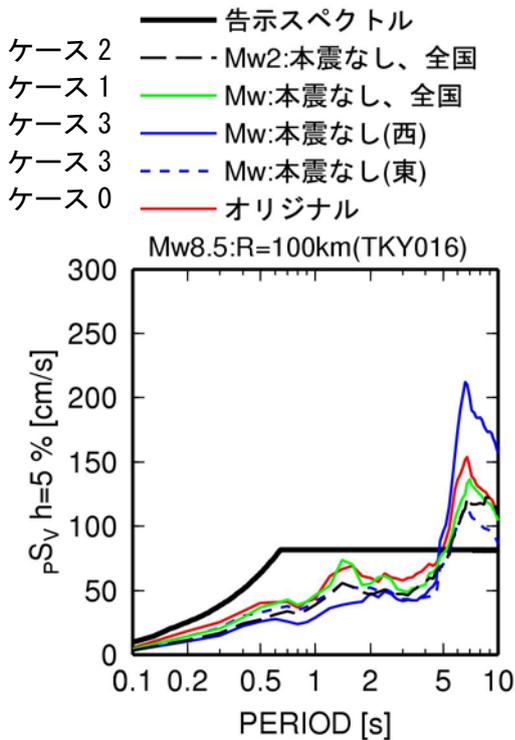
図 2.3-56 ケース b の群遅延時間の標準偏差の大阪平野におけるサイト係数



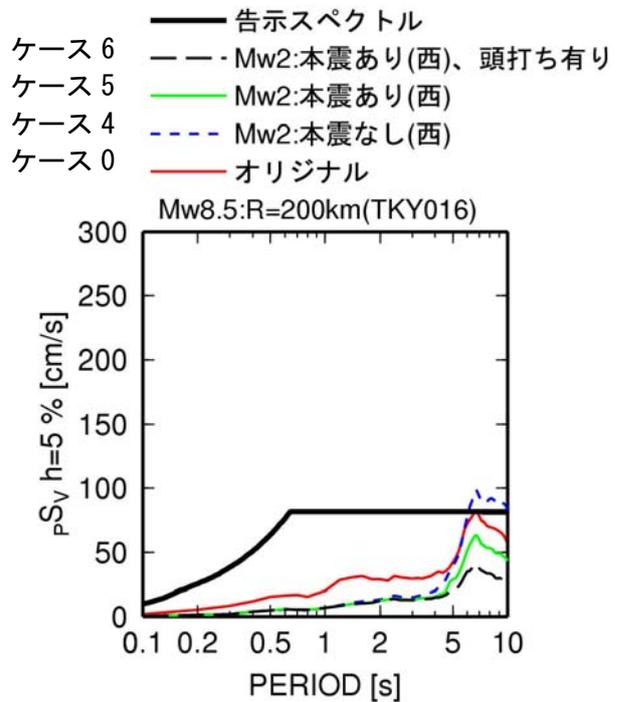
(a) ケース 0, 4, 5, 6 の東の地震 (R=100km)



(b) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震 (R=100km)

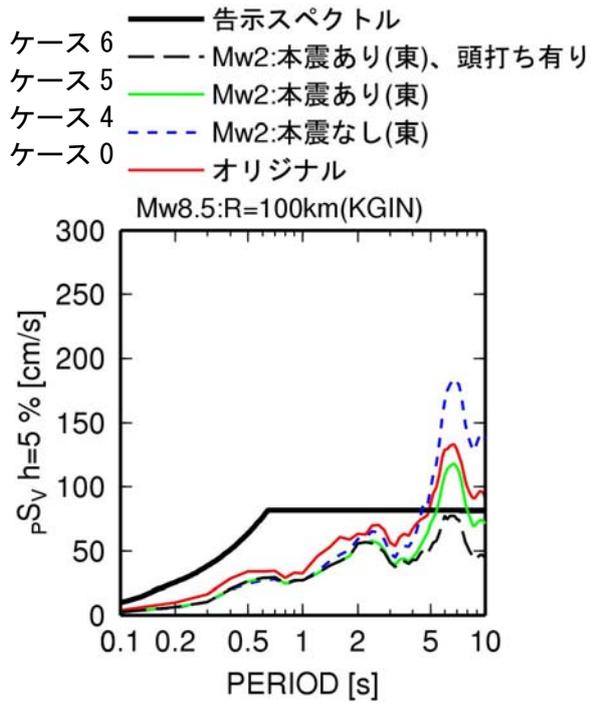


(c) ケース 0, 1, 2, 3 (R=100km)

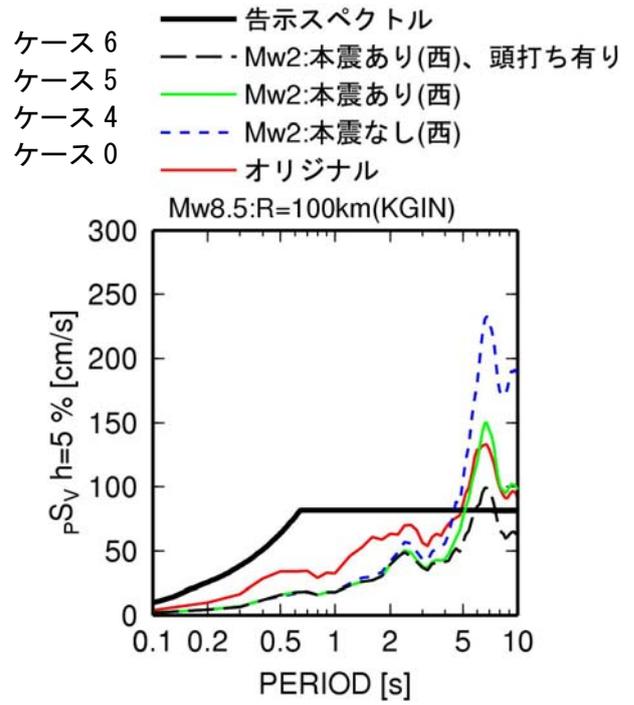


(b) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震 (R=200km)

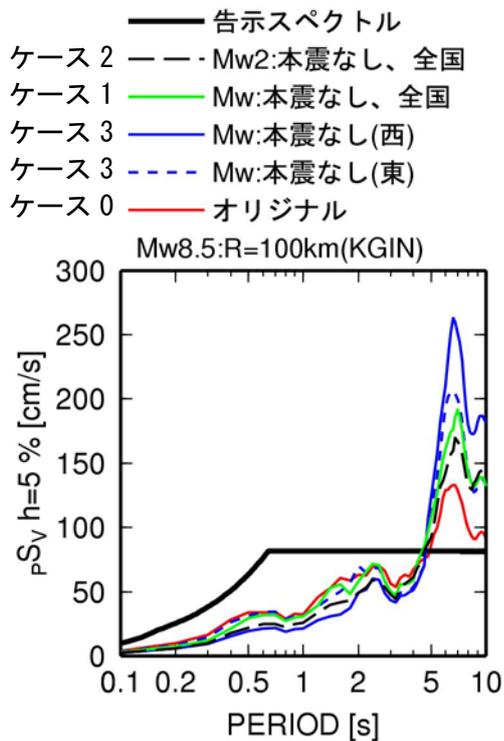
図 2.3-57 東雲(TKY016)における Mw8.5 の場合の各ケースの擬似速度応答スペクトル



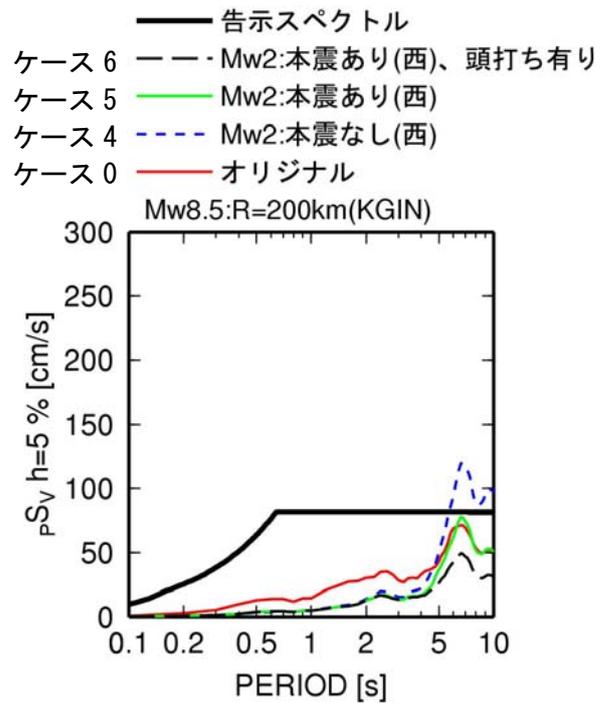
(a) ケース 0, 4, 5, 6 の東の地震 (R=100km)



(b) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震 (R=100km)

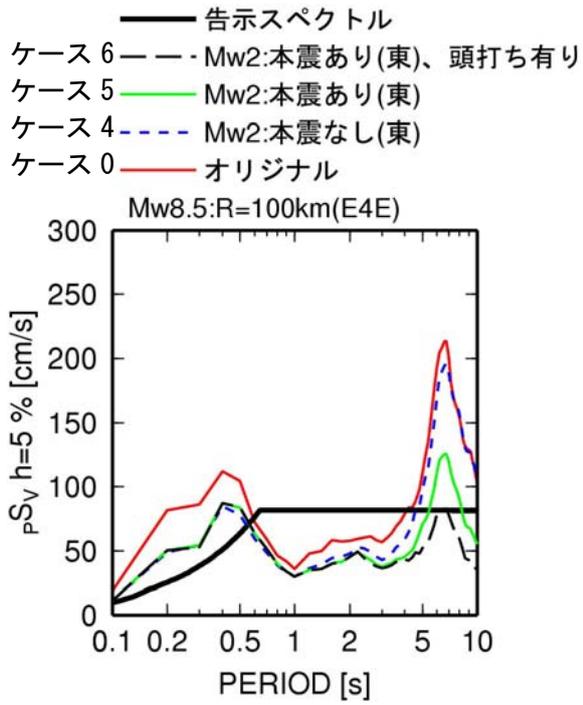


(c) ケース 0, 1, 2, 3 (R=100km)

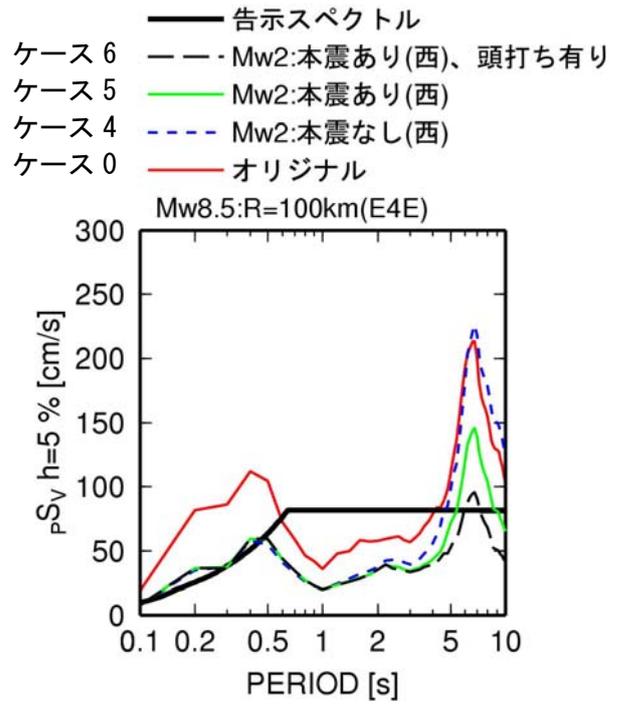


(b) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震 (R=200km)

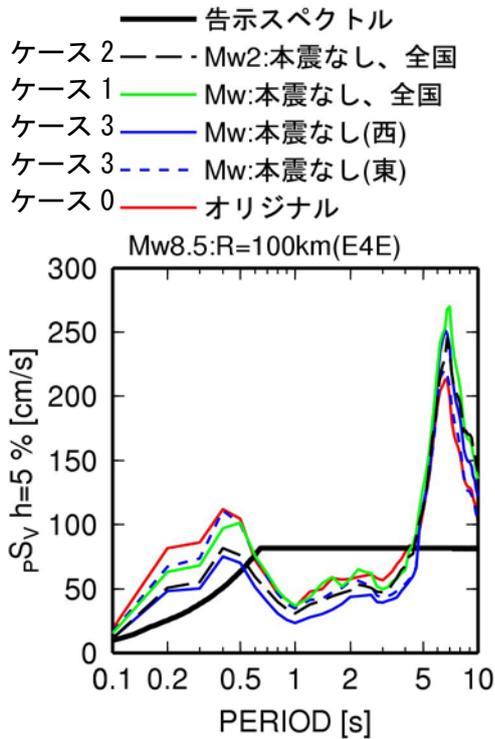
図 2.3-58 新宿(KGIN)における Mw8.5 の場合の各ケースの擬似速度応答スペクトル



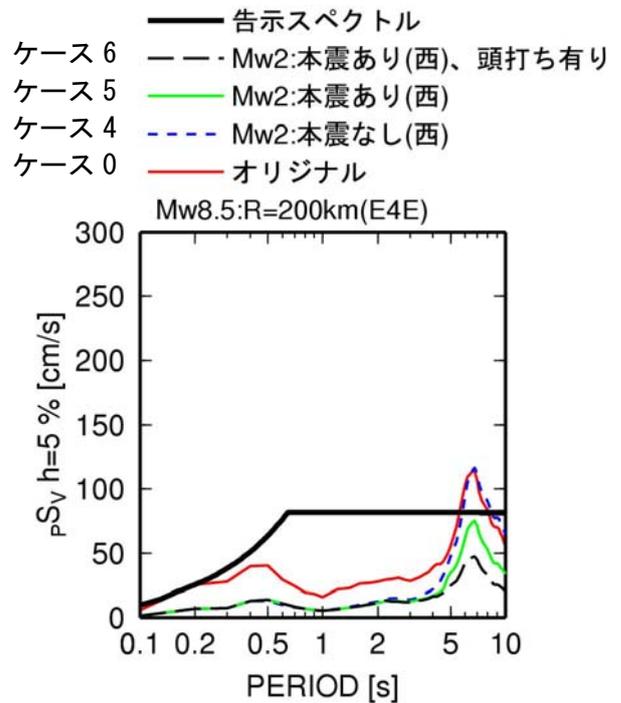
(a) ケース 0, 4, 5, 6 の東の地震 (R=100km)



(b) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震 (R=100km)

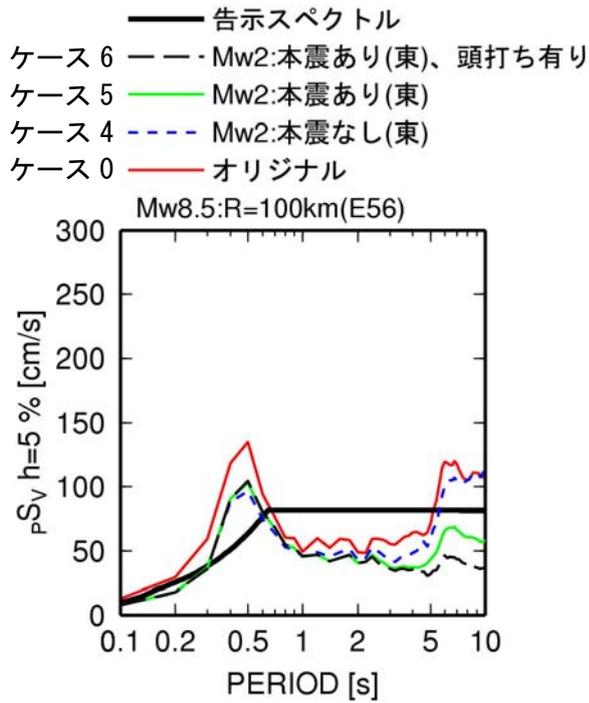


(c) ケース 0, 1, 2, 3 (R=100km)

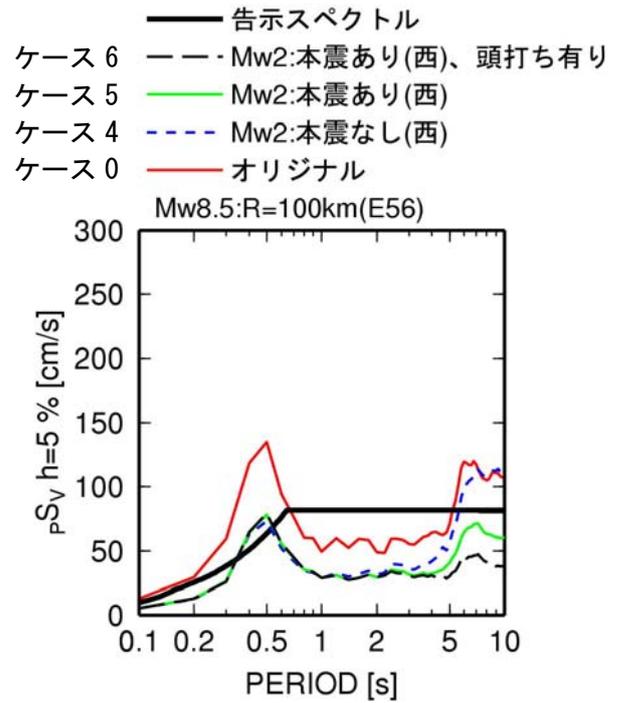


(b) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震 (R=200km)

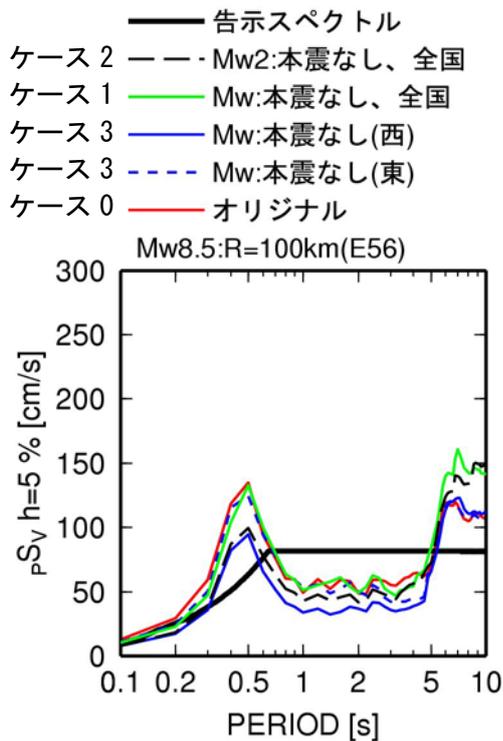
図 2.3-59 大手町 (E4E) における Mw8.5 の場合の各ケースの擬似速度応答スペクトル



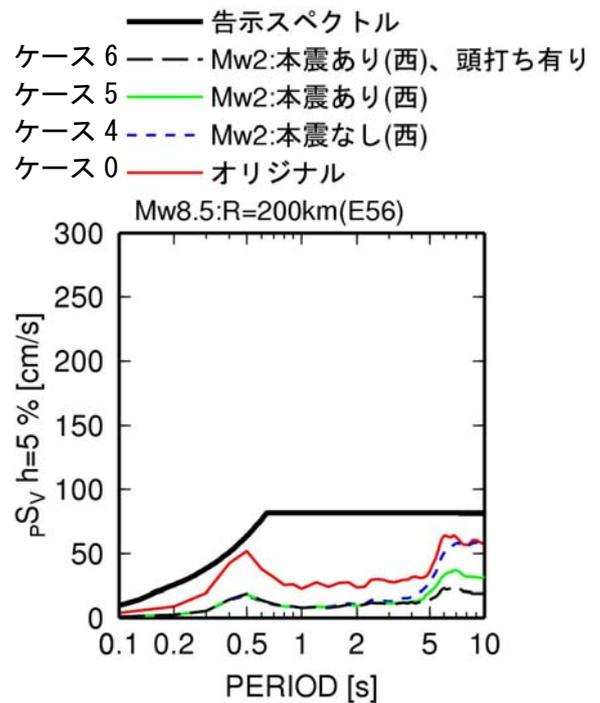
(a) ケース 0, 4, 5, 6 の東の地震 (R=100km)



(b) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震 (R=100km)

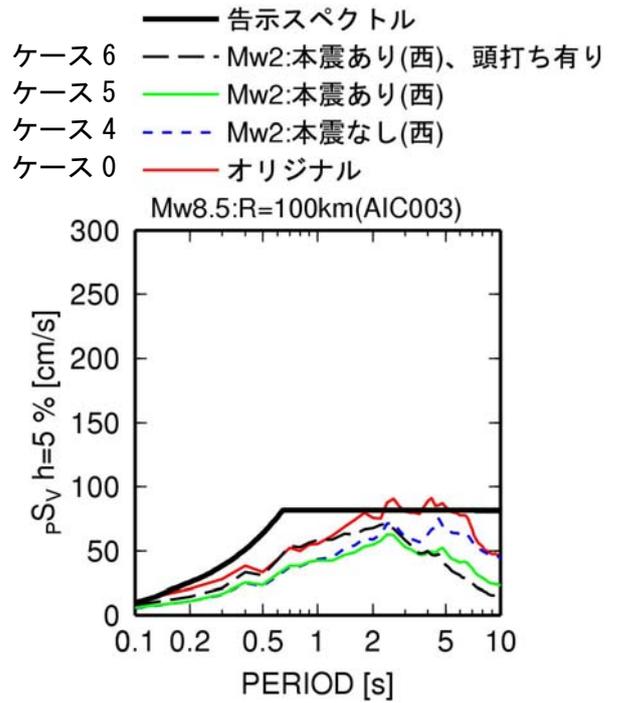


(c) ケース 0, 1, 2, 3 (R=100km)

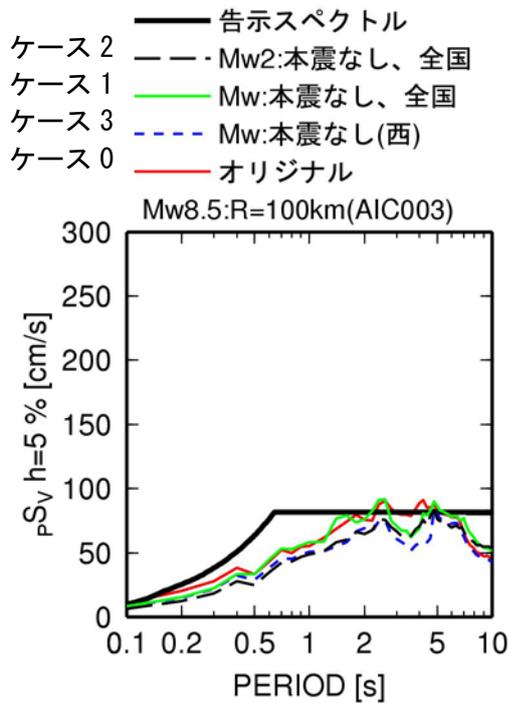


(b) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震 (R=200km)

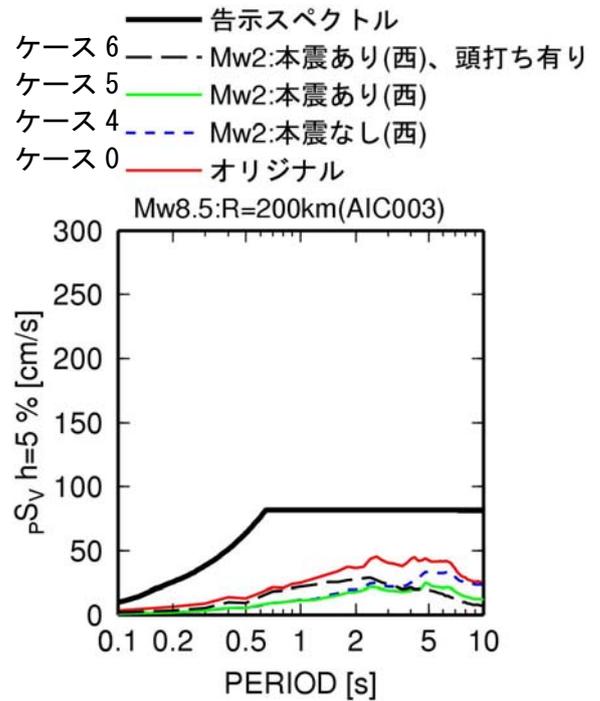
図 2.3-60 横浜 (E56) における Mw8.5 の場合の各ケースの擬似速度応答スペクトル



(b) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震(R=100km)

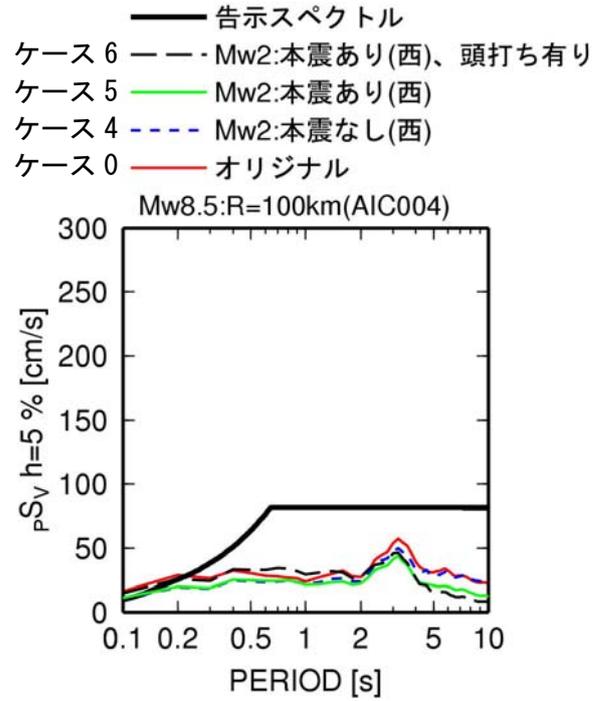


(c) ケース 0, 1, 2, 3 (R=100km)

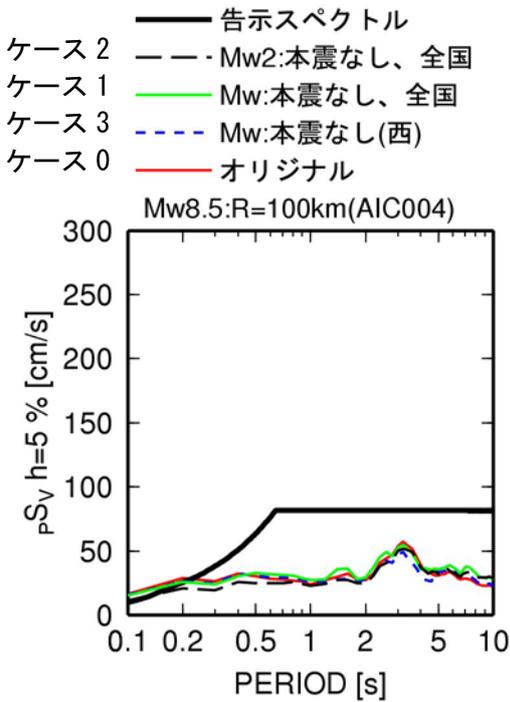


(b) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震(R=200km)

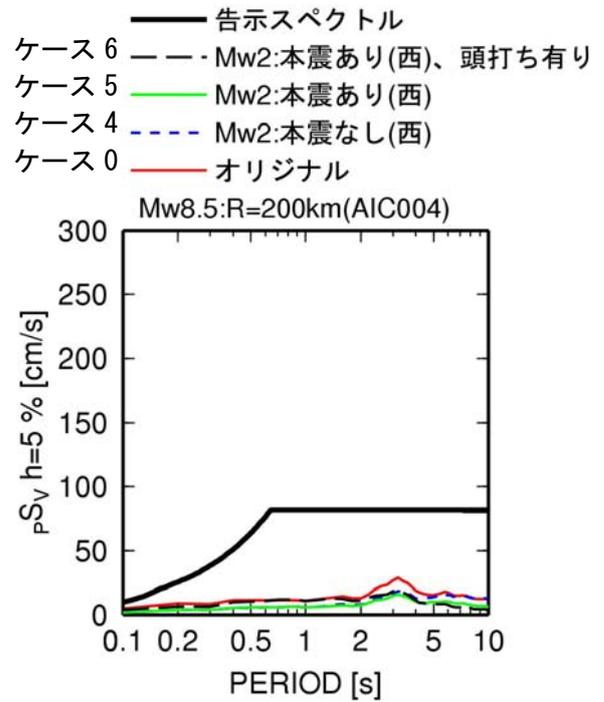
図 2.3-61 津島(AIC003)における Mw8.5 の場合の各ケースの擬似速度応答スペクトル



(b) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震(R=100km)



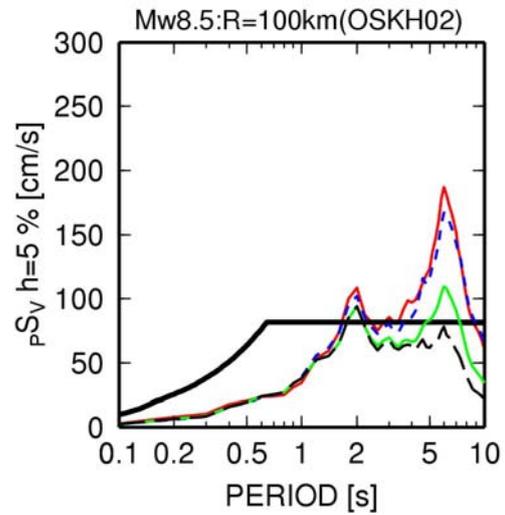
(c) ケース 0, 1, 2, 3 (R=100km)



(b) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震(R=200km)

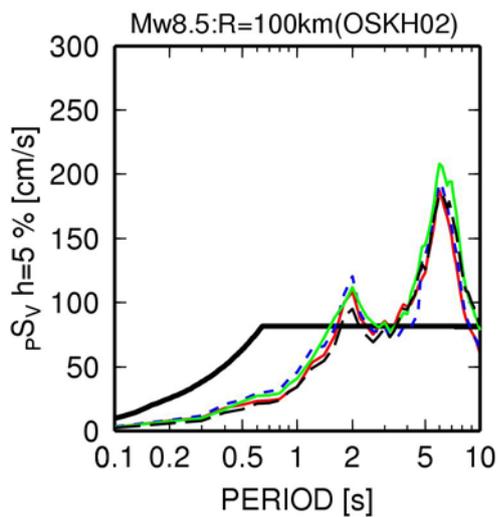
図 2.3-62 名古屋(AIC004)における Mw8.5 の場合の各ケースの擬似速度応答スペクトル

- 告示スペクトル
- ケース 6 --- Mw2:本震あり(西)、頭打ち有り
- ケース 5 — Mw2:本震あり(西)
- ケース 4 - - - Mw2:本震なし(西)
- ケース 0 ——— オリジナル



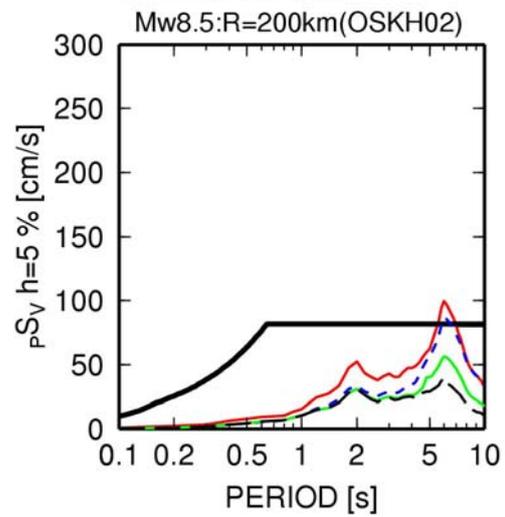
(b) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震 (R=100km)

- 告示スペクトル
- ケース 2 --- Mw2:本震なし、全国
- ケース 1 — Mw:本震なし、全国
- ケース 3 - - - Mw:本震なし(西)
- ケース 0 ——— オリジナル



(c) ケース 0, 1, 2, 3 (R=100km)

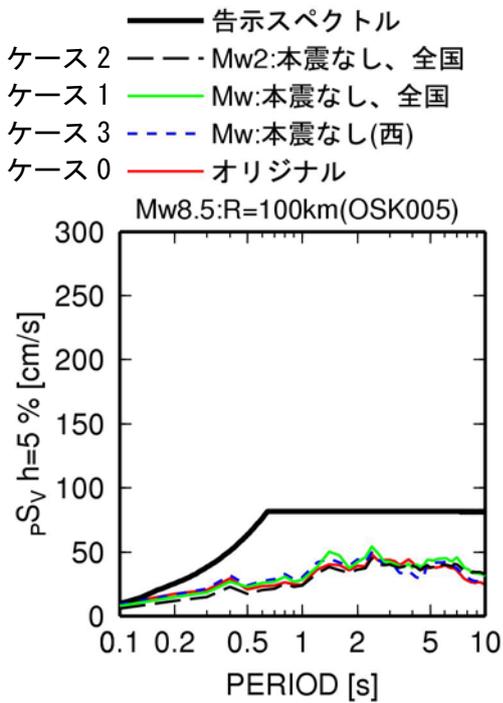
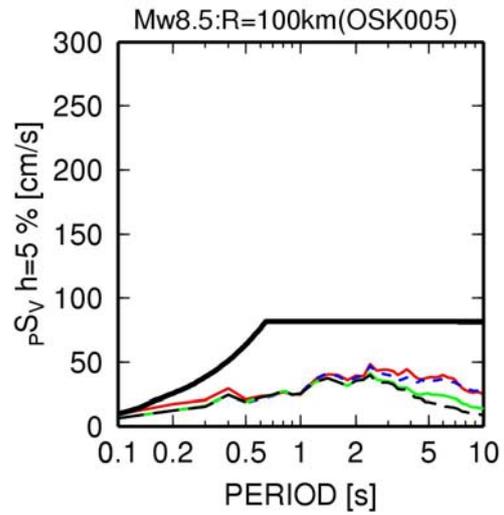
- 告示スペクトル
- ケース 6 --- Mw2:本震あり(西)、頭打ち有り
- ケース 5 — Mw2:本震あり(西)
- ケース 4 - - - Mw2:本震なし(西)
- ケース 0 ——— オリジナル



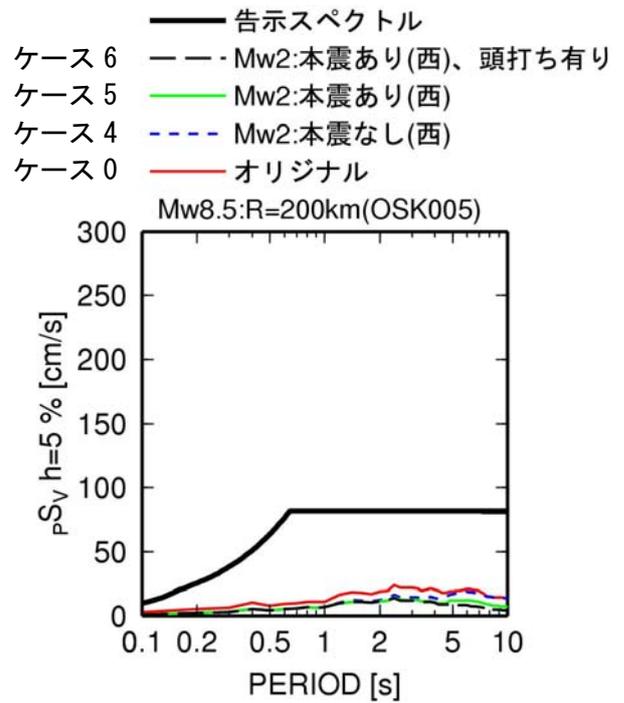
(d) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震 (R=200km)

図 2.3-63 此花(OSKH02)における Mw8.5 の場合の各ケースの擬似速度応答スペクトル

- 告示スペクトル
- ケース 6 - - - Mw2:本震あり(西)、頭打ち有り
- ケース 5 ——— Mw2:本震あり(西)
- ケース 4 - - - Mw2:本震なし(西)
- ケース 0 ——— オリジナル



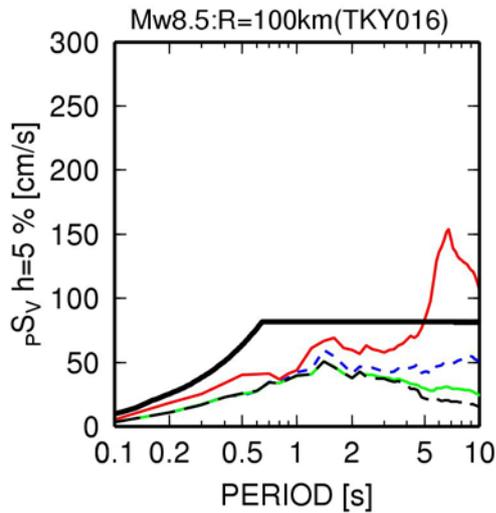
(c) ケース 0, 1, 2, 3 (R=100km)



(d) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震 (R=200km)

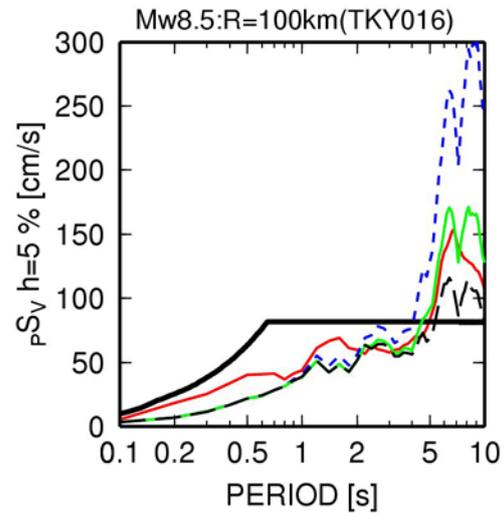
図 2.3-64 大阪(OSK005)における Mw8.5 の場合の各ケースの擬似速度応答スペクトル

- 告示スペクトル
- ケース 6 - - - Mw2:本震あり(東)、頭打ち有り
- ケース 5 ——— Mw2:本震あり(東)
- ケース 4 - - - Mw2:本震なし(東)
- ケース 0 ——— オリジナル



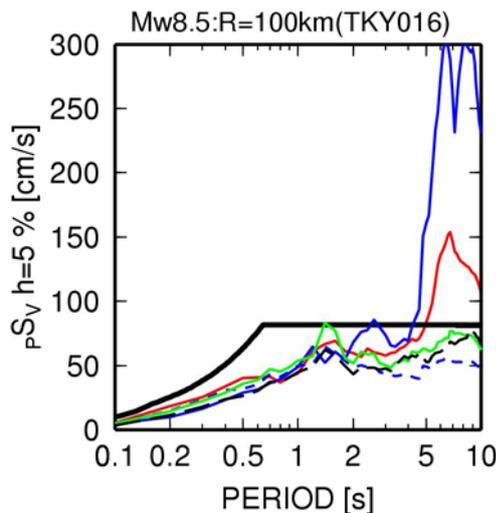
(a) ケース 0, 4, 5, 6 の東の地震 (R=100km)

- 告示スペクトル
- ケース 6 - - - Mw2:本震あり(西)、頭打ち有り
- ケース 5 ——— Mw2:本震あり(西)
- ケース 4 - - - Mw2:本震なし(西)
- ケース 0 ——— オリジナル



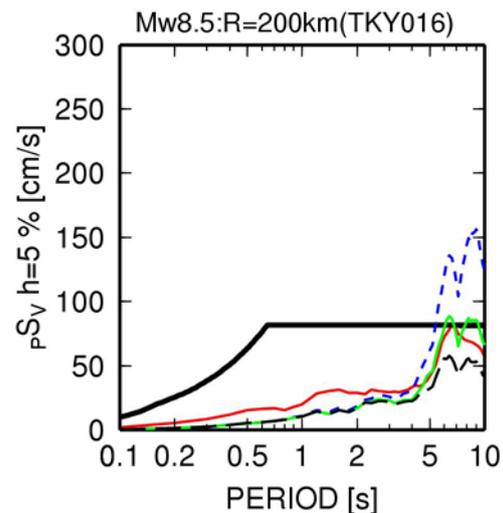
(b) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震 (R=100km)

- 告示スペクトル
- ケース 2 - - - Mw2:本震なし、全国
- ケース 1 ——— Mw:本震なし、全国
- ケース 3 ——— Mw:本震なし(西)
- ケース 3 - - - Mw:本震なし(東)
- ケース 0 ——— オリジナル



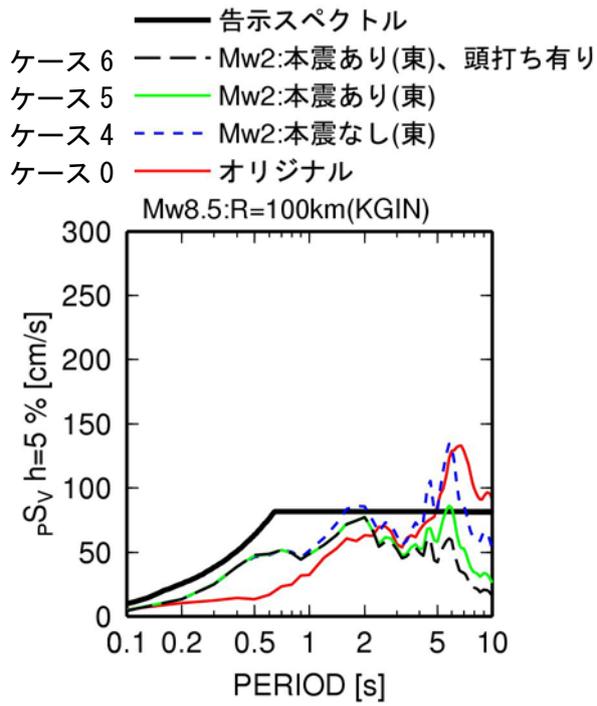
(c) ケース 0, 1, 2, 3 (R=100km)

- 告示スペクトル
- ケース 6 - - - Mw2:本震あり(西)、頭打ち有り
- ケース 5 ——— Mw2:本震あり(西)
- ケース 4 - - - Mw2:本震なし(西)
- ケース 0 ——— オリジナル

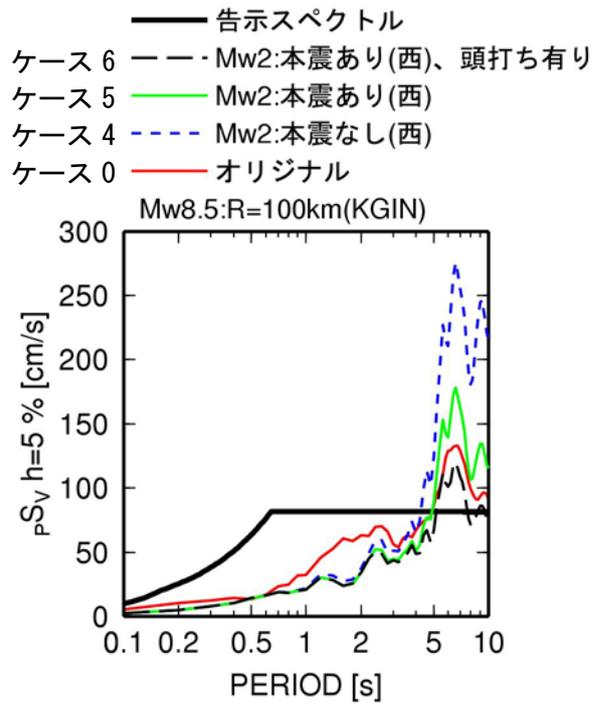


(b) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震 (R=100km)

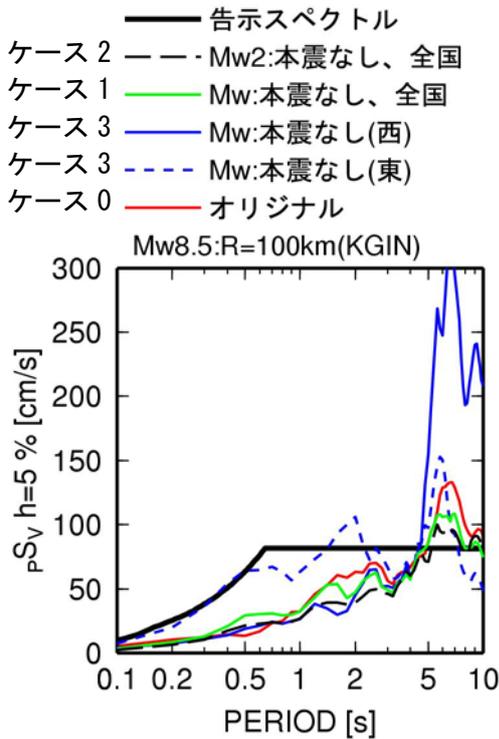
図 2.3-65 東雲(TKY016)における Mw8.5 の場合の各ケースの擬似速度応答スペクトル
(地盤増幅率が海溝型地震のみの場合)



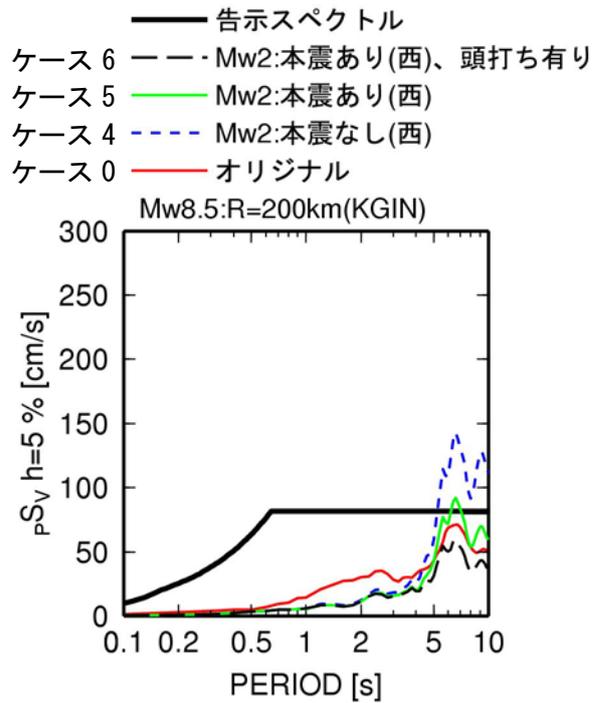
(a) ケース 0, 4, 5, 6 の東の地震 (R=100km)



(b) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震 (R=100km)

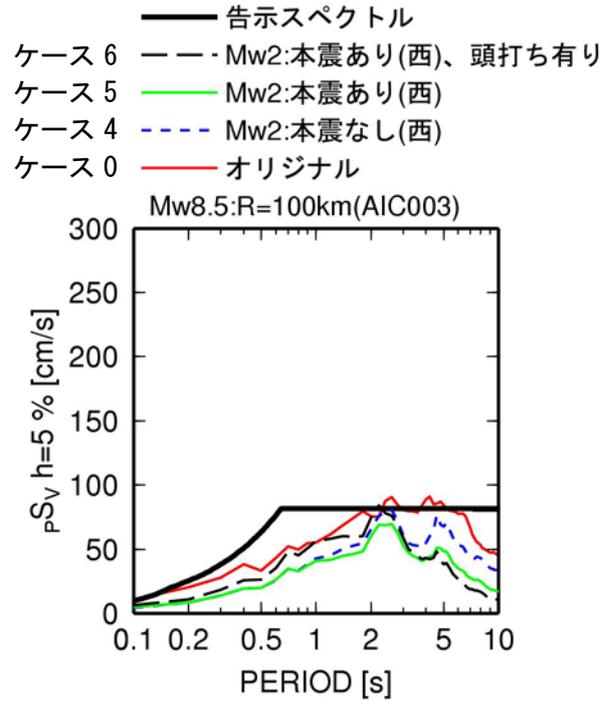


(c) ケース 0, 1, 2, 3 (R=100km)

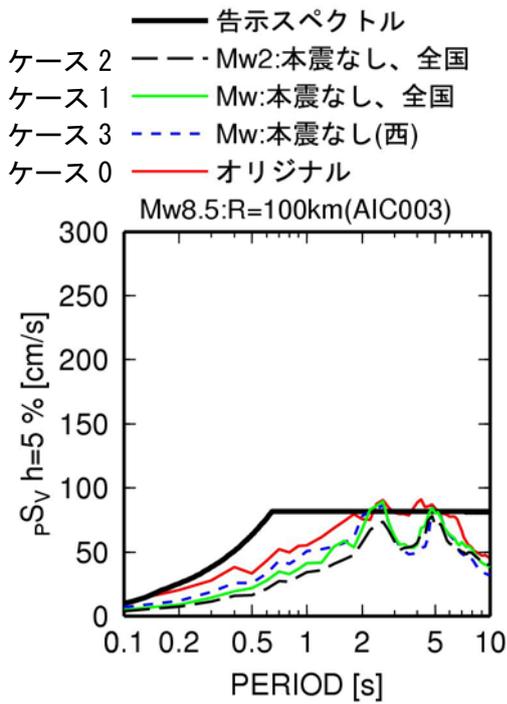


(b) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震 (R=200km)

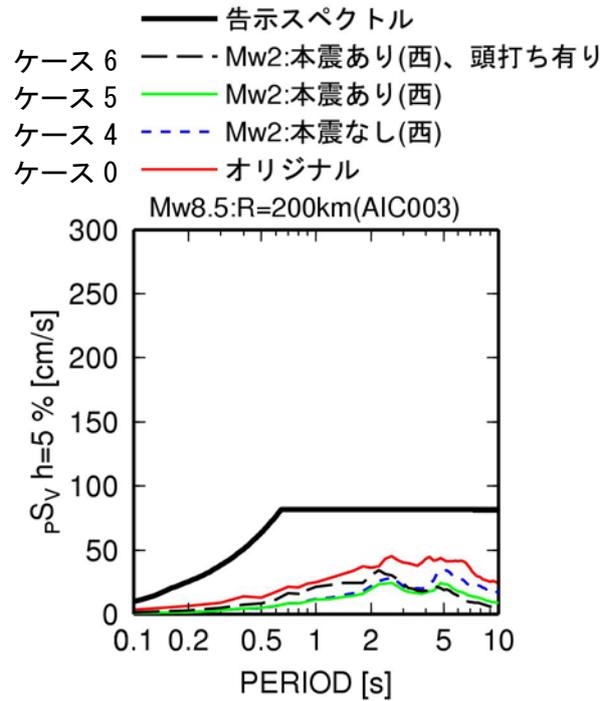
図 2.3-66 新宿(KGIN)における Mw8.5 の場合の各ケースの擬似速度応答スペクトル
(地盤増幅率が海溝型地震のみの場合)



(b) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震 (R=100km)



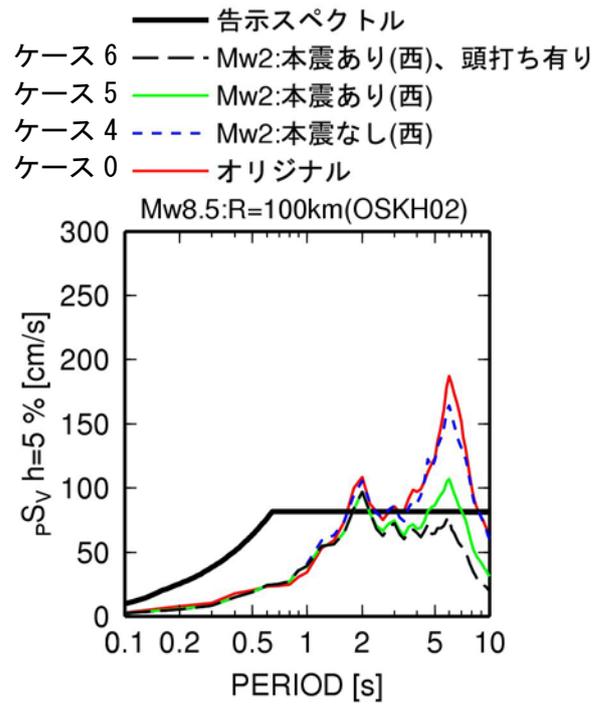
(c) ケース 0, 1, 2, 3 (R=100km)



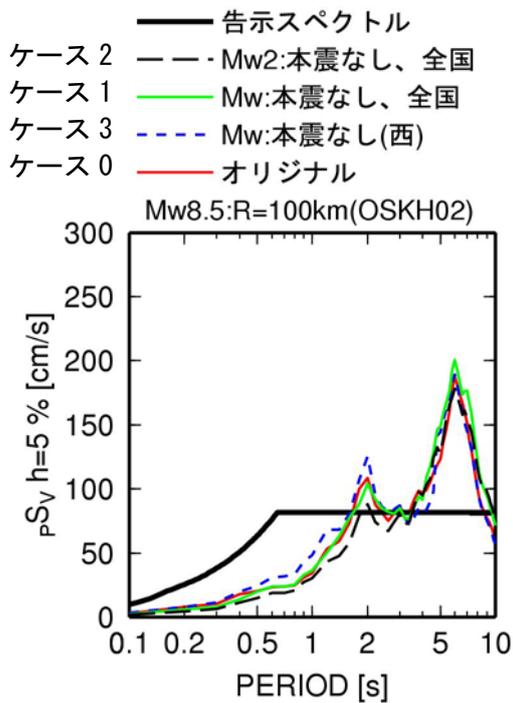
(b) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震 (R=100km)

図 2.3-67 津島 (AIC003) における Mw8.5 の場合の各ケースの擬似速度応答スペクトル

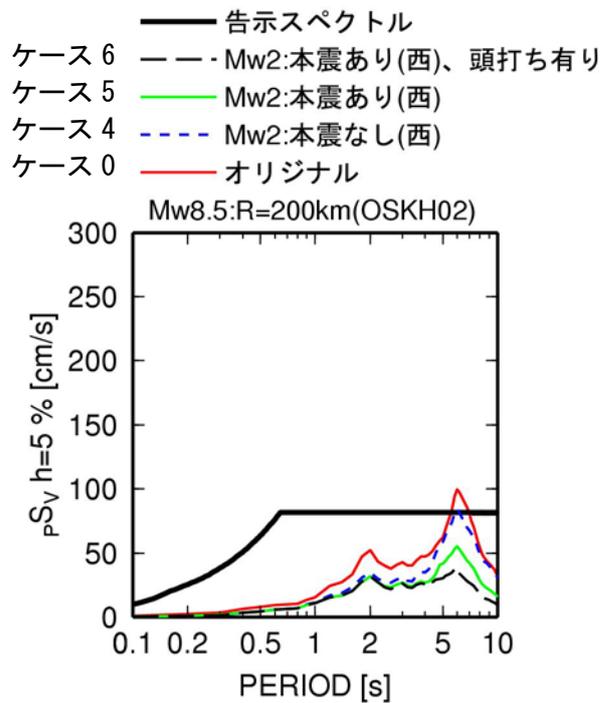
(地盤増幅率が海溝型地震のみの場合)



(b) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震 (R=100km)



(c) ケース 0, 1, 2, 3 (R=100km)



(d) ケース 0, 4, 5, 6 の西の地震 (R=100km)

図 2.3-68 此花 (OSKH02) における Mw8.5 の場合の各ケースの擬似速度応答スペクトル
(地盤増幅率が海溝型地震のみの場合)

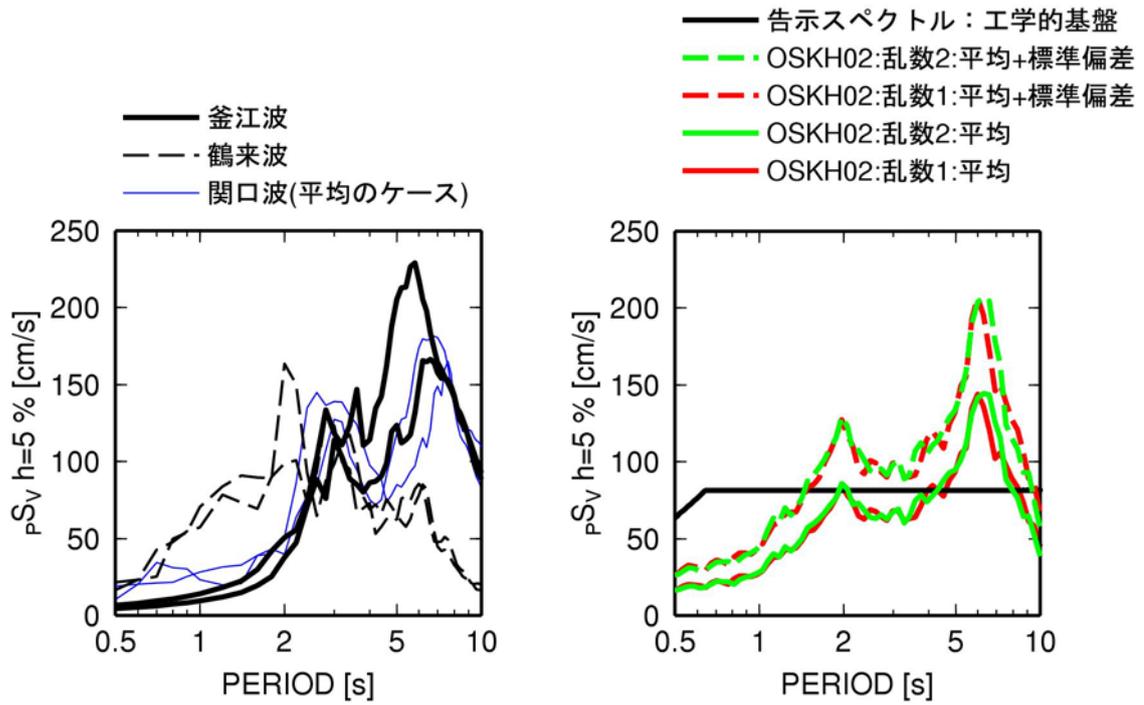


図 2.3-69 南海地震(Mw8.6)の既往の計算波(鶴来・他, 2005;釜江・川辺, 2006;関口・他, 2006)とオリジナルの経験式による此花(OSKH02)での擬似速度応答スペクトルの比較

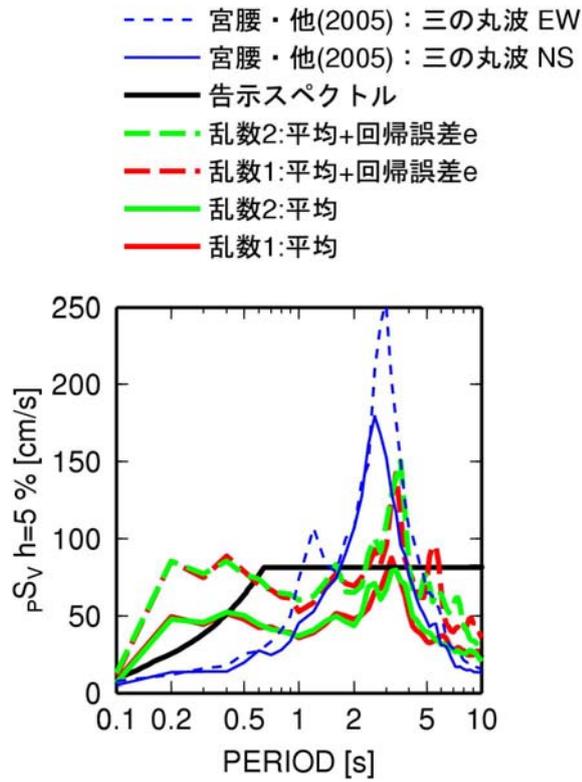


図 2.3-70 東海・東南海地震(Mw8.6)の既往の計算波(宮腰・他, 2005)とオリジナル(ケース0)の名古屋(AIC004)での擬似速度応答スペクトルの比較

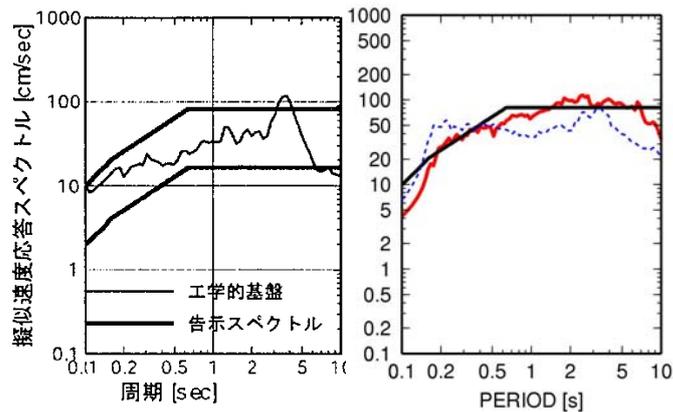
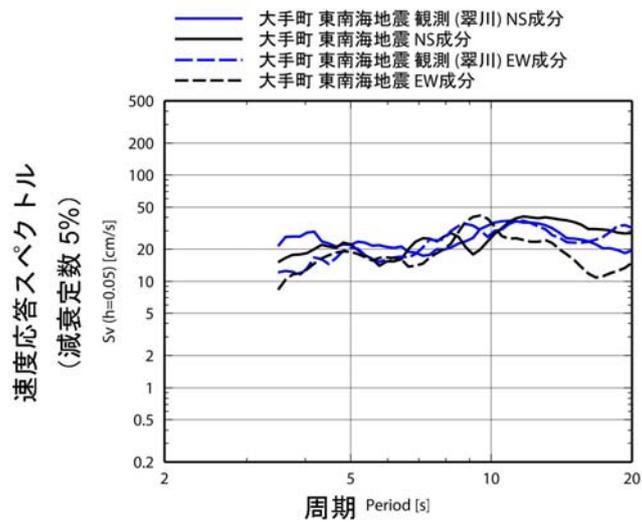
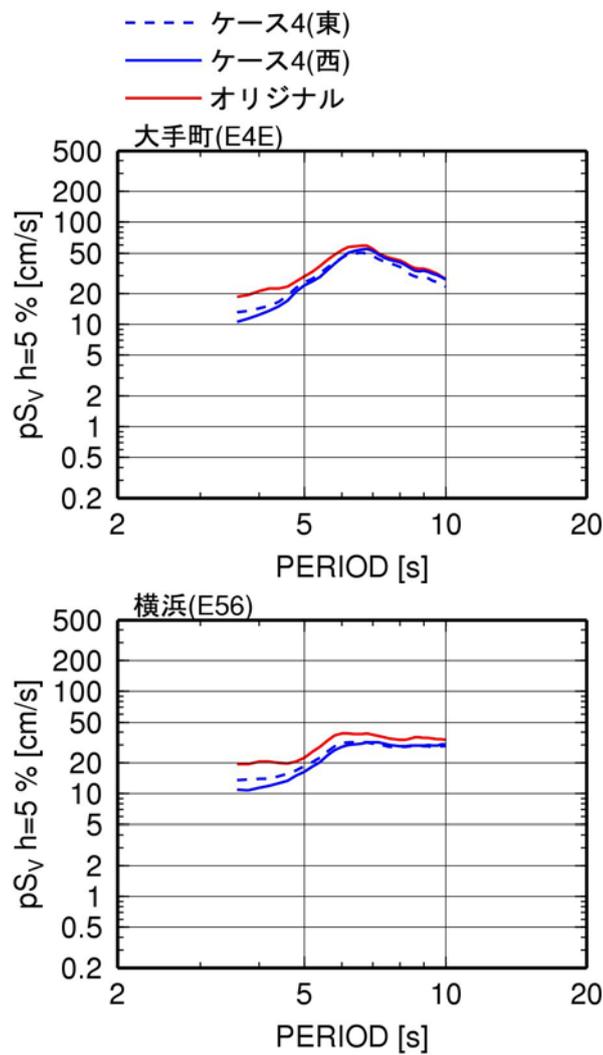


図 2.3-71 東海・東南海地震(Mw8.6)の既往の計算波(佐藤・他, 2006)とオリジナル(ケース0)の名古屋(AIC004)での擬似速度応答スペクトルの比較



(a) 地震本部:大手町と Midorikawa et al. (2006)の復元波



(b) 本検討: 大手町 (E4E) と横浜 (E56)

図 2.3-72 東南海地震の地震本部の大手町での予測波及び翠川(Midorikawa et al., 2006)の大手町での復元波の速度応答スペクトル(減衰定数5%)及と本検討の大手町 (E4E) と横浜 (E56)での計算波の擬似速度応答スペクトルの比較

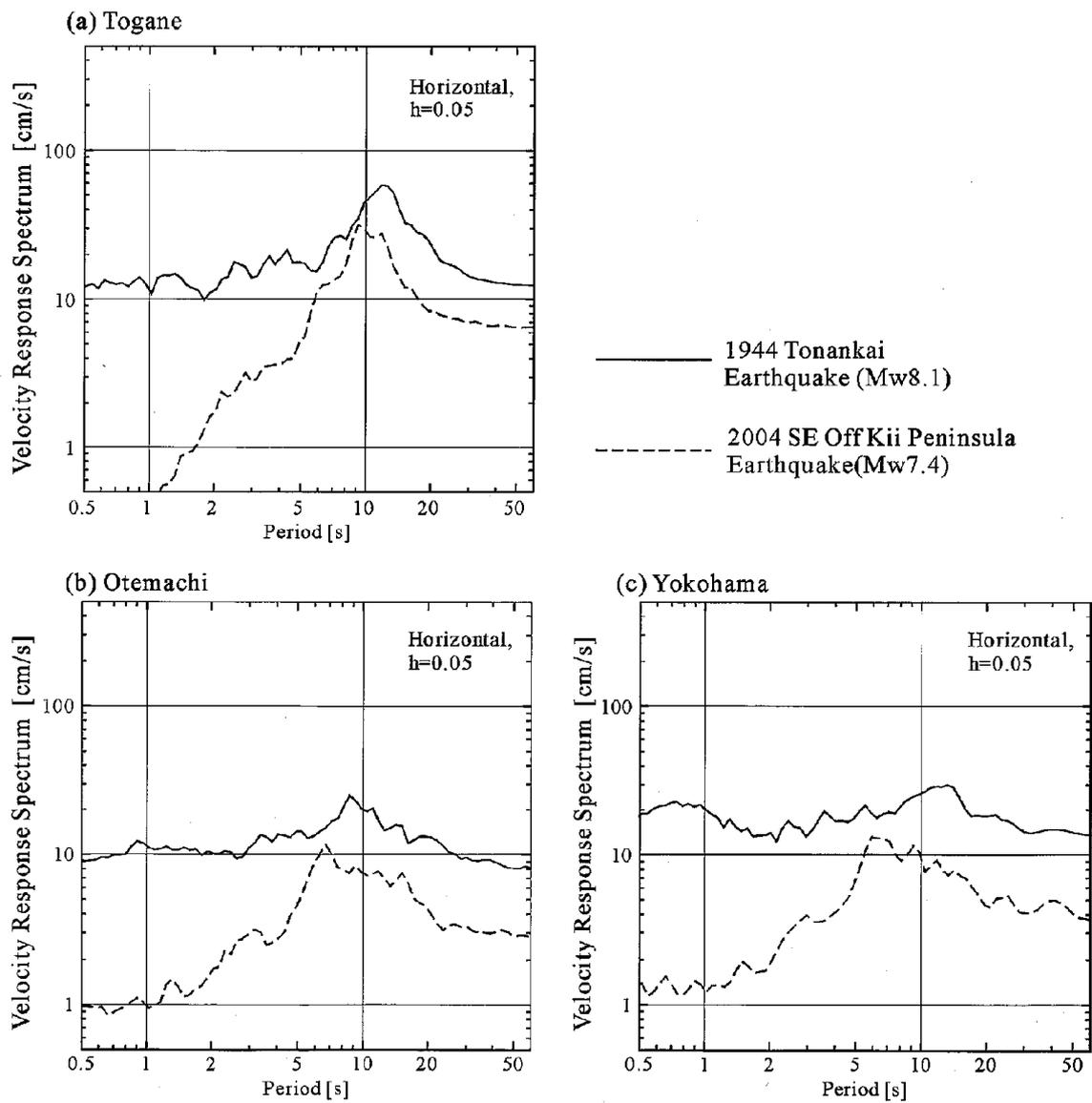


Fig. 12 Velocity response spectra of horizontal ground motions at (a) Togane, (b) Otemachi and (c) Yokohama during the 1944 Tonankai earthquake (solid lines) and the 2004 SE Off Kii Peninsula earthquake (broken lines).

図 2.3-73 1944 年の東南海地震の復元記録と 2004 年紀伊半島沖地震の記録の速度応答スペクトル (減衰定数 5%) (古村・中村, 2006)

表 2.3-4 加速度応答スペクトルの経験式の検討ケースと評価結果

ケース	Mw ² 項	東と西の 違い	余震 等	本震	Mwの頭 打ち	オリジナルとの関係	1944年東南海 地震の観測波 との対応関係	地震本部 の波との 比較	設計用の 式として の評価
0	×	×	×	×	×	オリジナル(パプコメ2010年度版)	○	○	○
1	×	×	○	×	×	・オリジナルと類似 ・関東平野では周期5秒以上で大きい ・新宿と大手町での違いが残る			○
2	○	×	○	×	×	・オリジナルと類似 ・関東平野では周期5秒以上で大きい ・新宿と大手町での違いが残る			○
3	×	○	○	×	×	・関東では、フィリピン海プレート 地震でかなり大きい ・震源近傍で大きく、遠方で小さい。			△
4	○	○	○	×	×	・関東では、フィリピン海プレート 地震でやや大きいか同じ ・フィリピン海プレート地震に対す る大手町ではほぼ同じであり、新宿 と大手町での違いが小さくなった ・震源近傍で大きく、遠方で小さい	○	◎	◎
5	○	○	○	○	×	・Mw大きいと小さい			×
6	○	○	○	○	○	・Mw大きいとかなり小さい			×

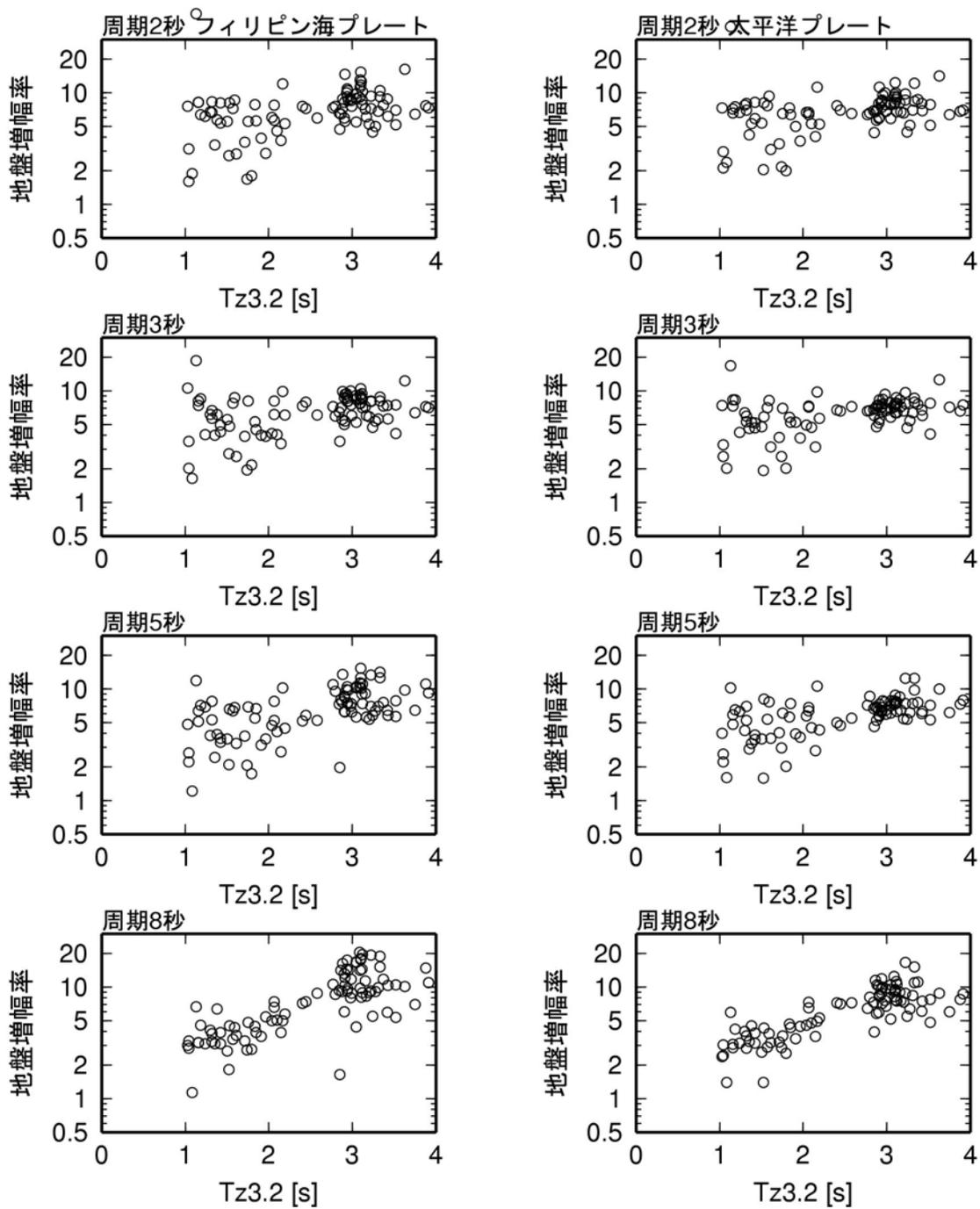


図 2.3-74 関東平野の地盤増幅率と $T_{z3.2}$ の関係 (東と西で異なる地盤増幅率が推定されている地点)

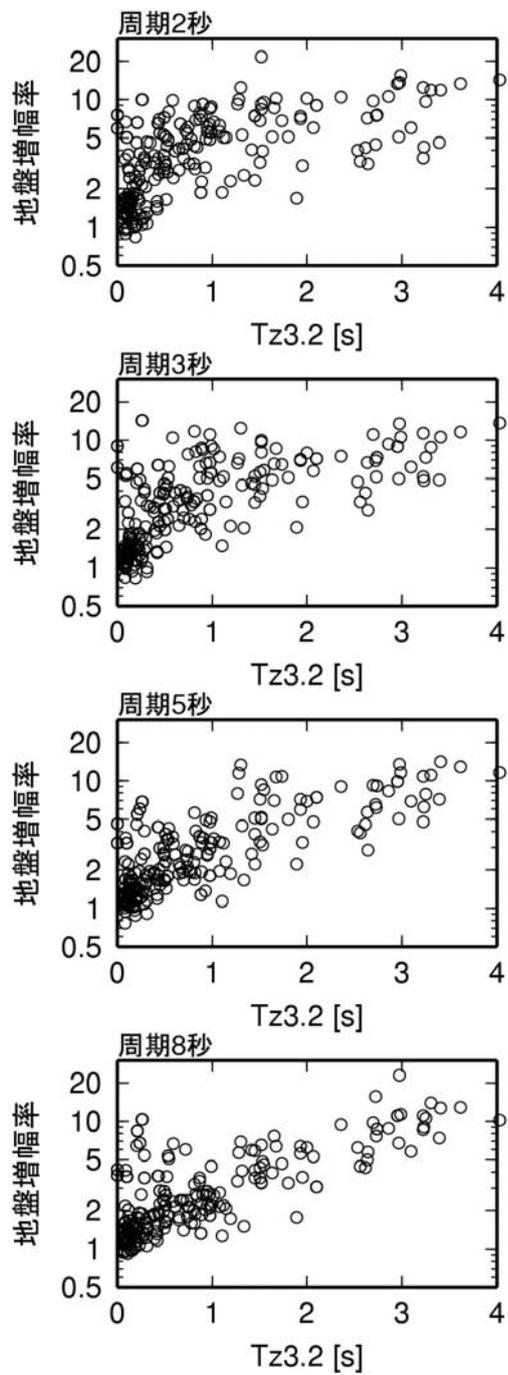


図 2.3-75 関東平野の地盤増幅率と Tz3.2 の関係 (東と西で共通の地盤増幅率が推定されている地点)

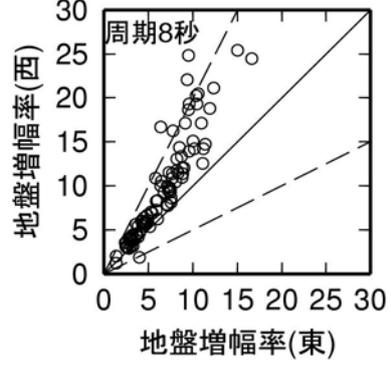
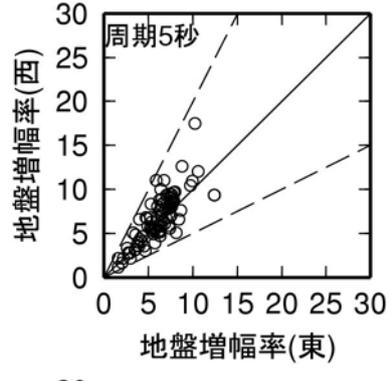
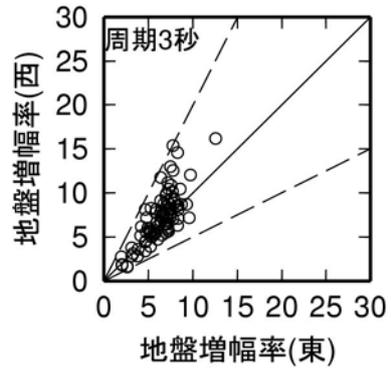
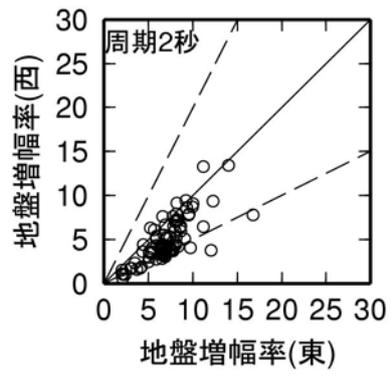


図 2.3-76 東と西で異なる地盤増幅率が推定されている地点での増幅率の比較

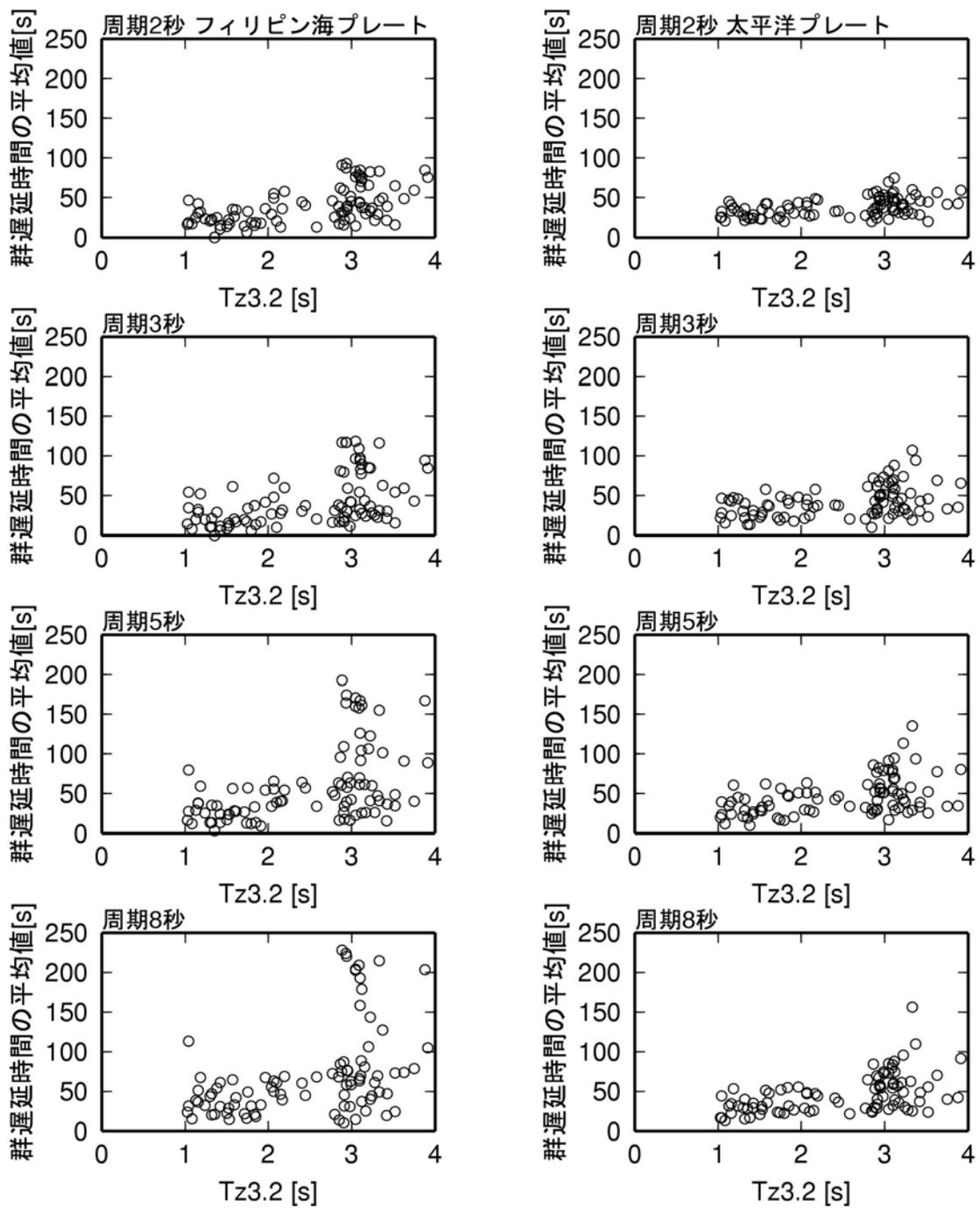


図 2.3-77 関東平野の群遅延時間の平均値のサイト係数と $Tz_{3.2}$ の関係 (東と西で異なる地盤増幅率が推定されている地点)

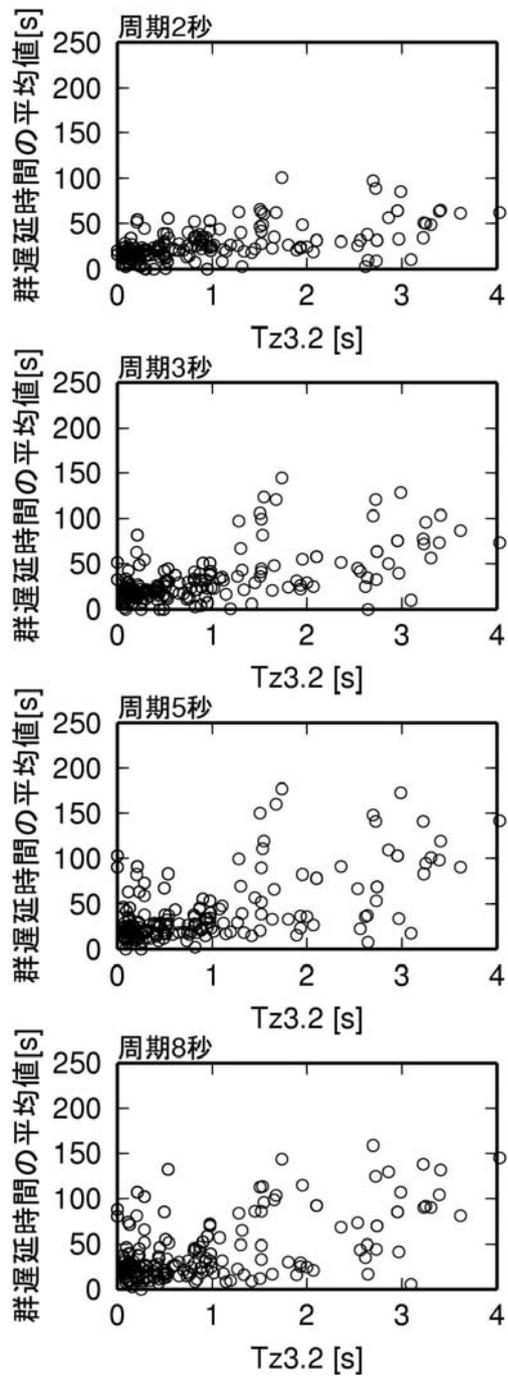


図 2.3-78 関東平野の群遅延時間のひょうじゅんへんさ平均値のサイト係数と $Tz3.2$ の関係 (東と西で共通の地盤増幅率が推定されている地点)

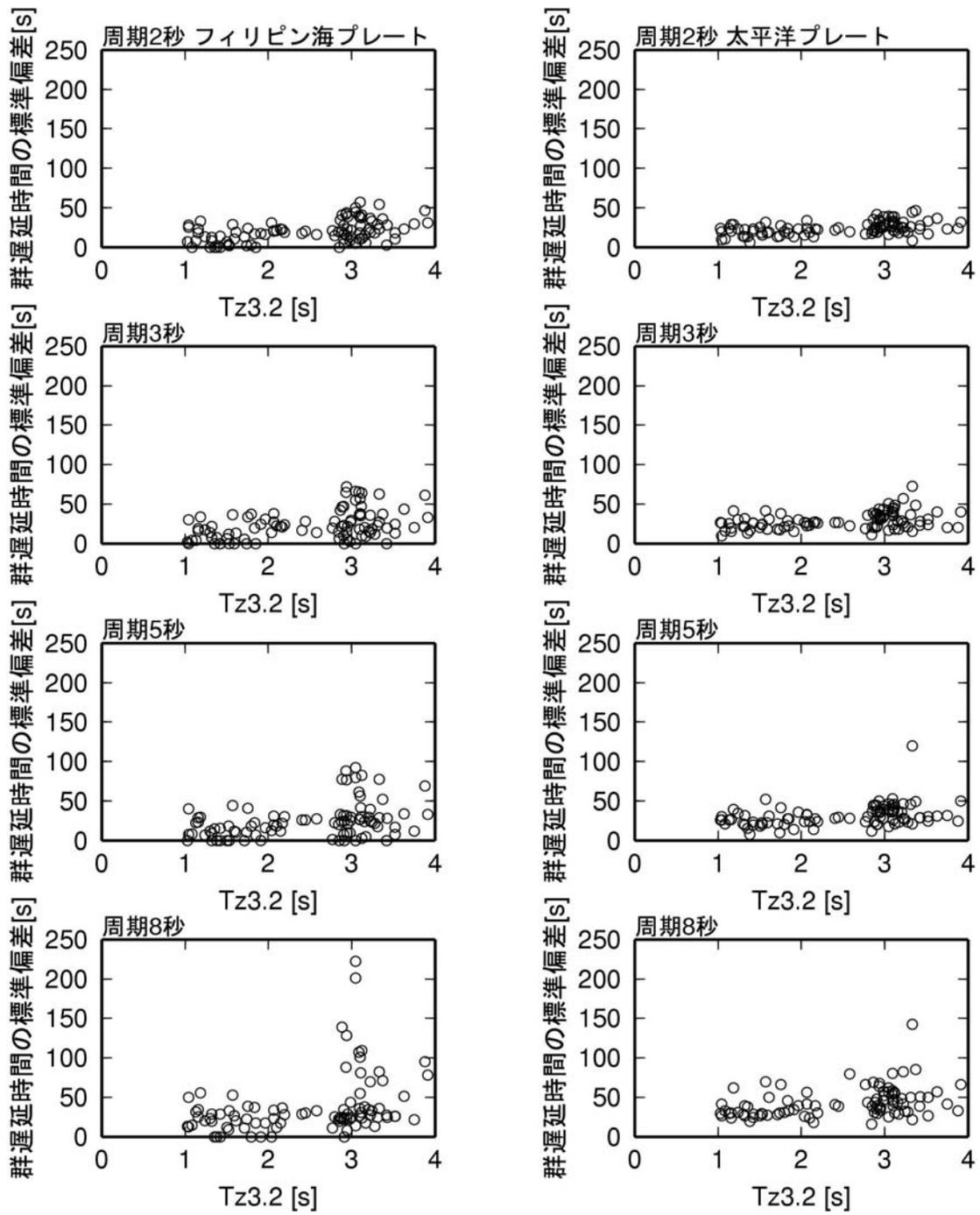


図 2.3-79 関東平野の群遅延時間の標準偏差のサイト係数と Tz3.2 の関係（東と西で異なる地盤増幅率が推定されている地点）

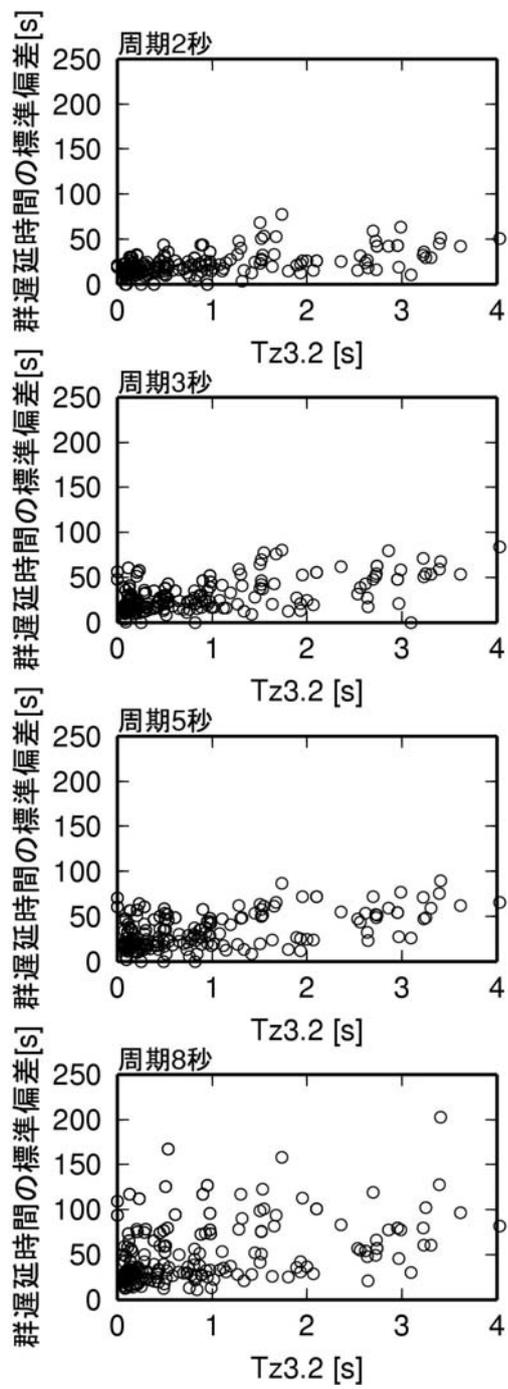


図 2.3-80 関東平野の群遅延時間の標準偏差のサイト係数と $Tz_{3.2}$ の関係（東と西で共通の地盤増幅率が推定されている地点）

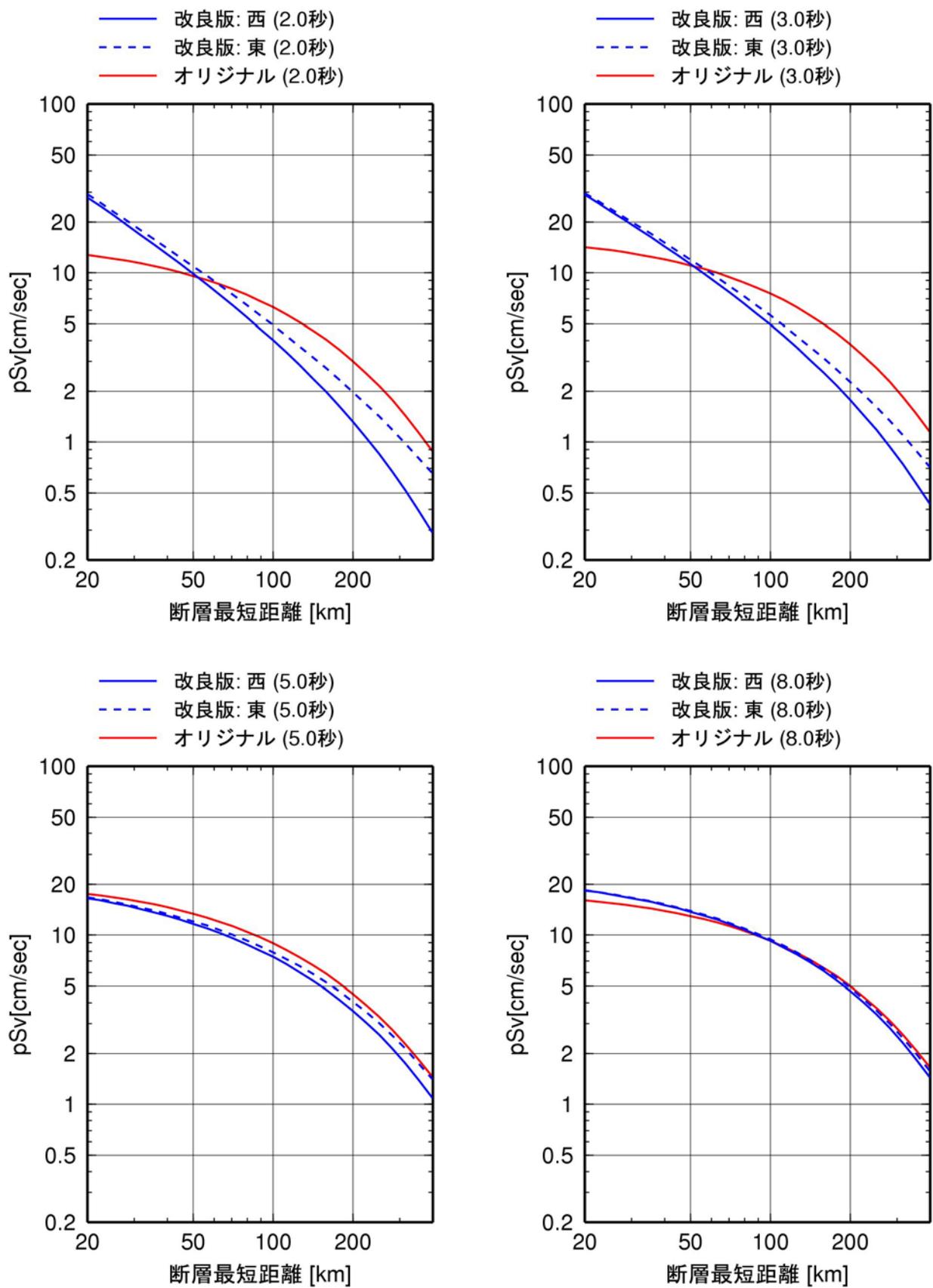


図 2.3-81 オリジナルの式(ケース 0)と改良版(ケース 4)の擬似速度応答スペクトルの距離減衰特性 (Mw8.5 の場合)

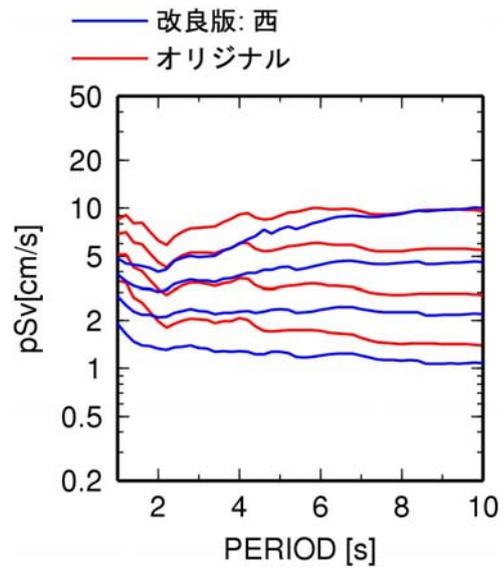
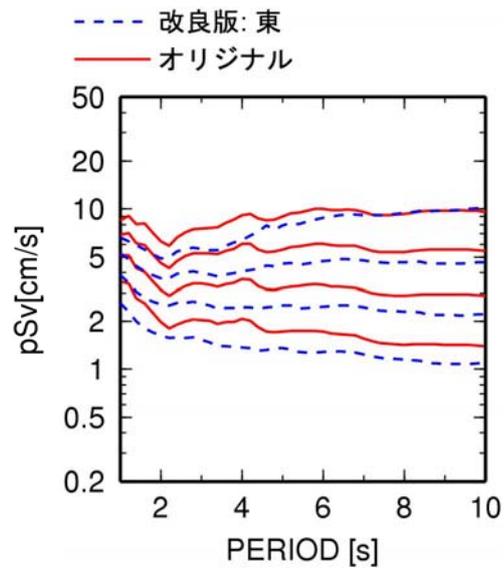


図 2.3-82 Mw7.0、Mw7.5、Mw8.0、Mw8.5 の断層最短距離 100km における地震基盤での擬似速度応答スペクトル(減衰定数 5%)

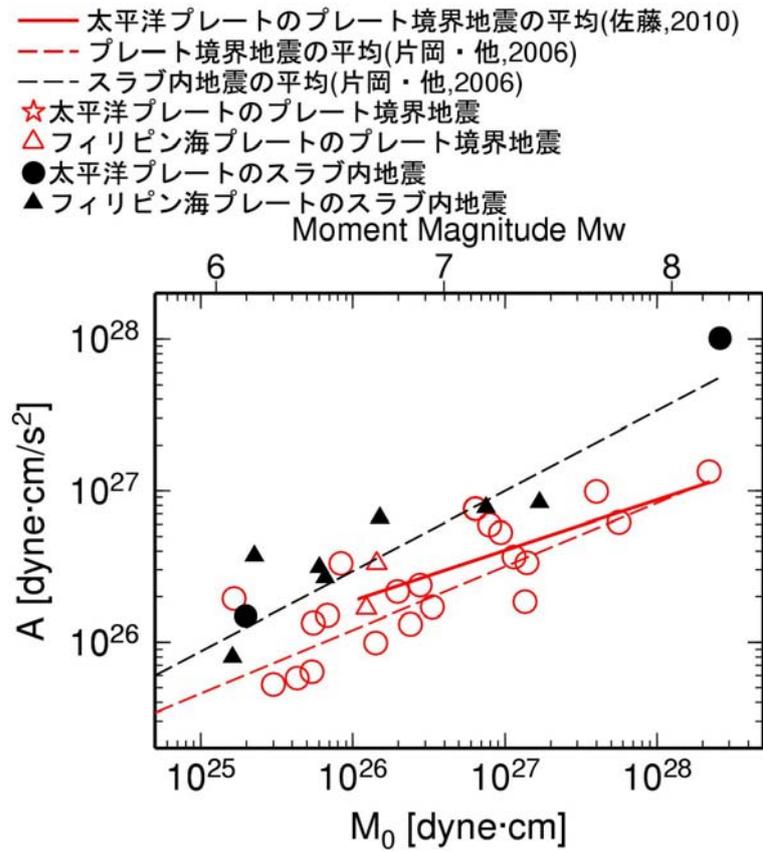


図 2.3-83 地震モーメント M_0 と短周期レベル A の関係(片岡・他, 2006; 佐藤・他, 2010b; 佐藤, 2012)

2-4 改良経験式による東北地方太平洋沖地震の長周期地震動のシミュレーション

2-4-1 はじめに

改良した経験式(新経験式)と、昨年度までの経験式(旧経験式)を用いて、3月9日の三陸沖の前震(Mw7.4)、最大余震である3月11日15時15分の茨城県沖の余震(Mw7.8)、東北地方太平洋沖地震の長周期地震動のシミュレーションを行い、経験式の適用性を検討する。

2-4-2 断層モデルの設定

経験式に基づく長周期地震動作成フローを図 2.4-1 に示す。連動型地震に対して、ある地点で長周期地震動を計算するために必要なパラメータは、各断層の地震モーメント M_0 、各断層からの断層最短距離、各断層の破壊開始点からの震源距離、各断層の破壊開始時間差である。

(a) 前震、余震の断層パラメータ

3月9日の三陸沖の前震(Mw7.4)については、図 2.4-2 に示すように、気象庁(2011)により震源過程解析がなされているため、この地震規模と破壊開始点、断層面を用いた。

3月11日15時15分の余震については、震源過程解析がなされていないため、 M_0 と M_w は F-net を用いた。F-net の傾斜角 49° はプレートの沈みこみ角度に比べ大きいと考えられるため、Harvard 大学の CMT 解に基づき断層の走向、傾斜角を設定した。また、破壊開始点は、気象庁の震源位置とした。断層面積は、静的応力降下量 3MPa(中央防災会議,2003)を仮定して計算し、正方形断層として断層長さ l と幅 w を決めた。破壊開始点は中心においた。

表 2.4-1 に、これら2つの地震の断層パラメータをまとめて示す。

(b) 本震の断層パラメータ

本震は、佐藤(2012)の経験的 G 関数法に基づく震源モデルに基づき、巨視的断層を設定し、それぞれの巨視的断層のパラメータを地震本部(2009)のレシピに基づき設定した。表 2.4-2、図 2.4-3 に佐藤(2012)の震源モデルを示す。佐藤(2012)の震源モデルの第3、第4強震動生成領域は、ほぼ同じ時間に破壊していることから、1つの断層に2つの強震動生成領域があると仮定した。すなわち、3連動モデルを仮定した。静的応力降下量は中央防災会議(2003)の東海・東南海・南海地震の3連動地震の震源モデルと同じ 3MPa とした。表 2.4-3 に設定した震源モデルを示す。

経験式の最大 M_w は 8.2 であることから、 $M_w 8.2$ 以上では外挿となる。 M_w^2 項が考慮されているものの、この回帰係数も $M_w 8.2$ までのデータで求められており、 $M_w 8.2$ 以上での拘束がない。そこで、 M_w の頭打ちを 8.2~8.8 まで 0.1 刻みで与えてシミュレーションを実施した。その結果、 $M_w 8.4$ 程度で、本震の長周期地震動がほぼ説明できることから、改良経験式では頭打ちの M_w を 8.4 とした。この頭打ちが必要となるのは、 $M_w 8.8$ となる断層面 2 である。

各断層のパラメータの設定方法は以下の通りである。各断層の巨視的断層面の面積 S は、静的応力降下量 $\Delta\sigma$ と、強震動生成領域の面積 S_a と応力降下量 $\Delta\sigma_a$ を用いて、次式により設定する。

$$\Delta\sigma S = \Delta\sigma_a S_a \quad (1)$$

断層は正方形を基本とし、断層幅が 200km を超える場合には、断層幅を 200km として長さを計算した。断層の位置は、長さ方向は強震動生成領域が中心となるように設定し、幅方向は陸側に接するように設定した。

巨視的断層面の地震モーメント M_0 は、(2)式により計算する(Eshelby, 1957)。

$$M_0 = 16/(7\pi^{3/2})\Delta\sigma S^{3/2} \quad (2)$$

2-4-3 長周期地震動のシミュレーション

長周期地震動のシミュレーションは、経験式で地盤増幅率が得られている K-NET、KIK-net(地表)観測点で実施した。周期 2、3、5、8 秒における減衰定数 5%の擬似速度応答スペクトル分布で比較を行った。

図 2.4-4、図 2.4-5、図 2.4-6 には、それぞれ、3月9日の地震の観測、旧経験式、新経験式に基づく擬似速度応答スペクトル分布を示す。矩形が断層面、星印が破壊開始点である。同様に、3月11日の茨城県沖の最大余震の結果を、図 2.4-7、図 2.4-8、図 2.4-9 に示す。いずれの地震の場合も、旧経験式によるものがやや大きめであるのに対して、新経験式の方が観測をより再現している。

同様に、太平洋沖地震の結果を、図 2.4-10、図 2.4-11、図 2.4-12 に示す。長周期側で、いずれの経験式もやや過大評価であるが新経験式の方が観測により合っている。特に、旧経験式が関東平野で過大評価になる傾向があるのに対して、新経験式では、それがやや改善されている。

図 2.4-13 には、太平洋沖地震の観測とシミュレーションの比較を行う観測点と周期 3 秒での地盤増幅率分布を示す。長周期が比較的大きい観測点を選択した。図 2.4-14 には、観測とシミュレーションの擬似速度応答スペクトルと速度波形(周期 0.1~10 秒)の比較を示す。地盤の非線形性の影響が大きいと考えられる MYG006 と TCGH16 では、本震時の表層地盤の非線形性野影響を考慮した補正を行った結果を示す。MYG006 では、経験式作成に用いたデータの H/V と本震(経験式作成には用いていない)の第 2 波群の H/V の比で断層 2 に対するターゲット応答スペクトルを補正し、シミュレーション波を作成した。TCGH16 では、経験式作成に用いたデータの H/V と本震の H/V の比でシミュレーション波の応答スペクトルを補正し、シミュレーション波の位相を使って、補正シミュレーション波を作成した。TCGH16 では、地中に対する地表のスペクトル比を用いた補正シミュレーション波を作成した。いずれもの観測点でも、スペクトル形状はほぼ再現している。非線形性の大きい 2 つの観測点では、波形の形状の再現性がやや良くないが、それ以外の観測点ではほぼ波形形状を再現している。

図 2.4-15 には、TKY018 での新経験式と旧経験式の地盤増幅率の比較を示す。新経験式のフィリピン海プレートの地震に対する増幅率が一番大きく、旧経験式の地盤増幅率は中間レベルになっている。図 2.4-14 の TKY018 のシミュレーション結果は長周期でやや過大評価であるが、地盤増幅率とフィリピン海プレートと太平洋プレートで区別したことで、改善されていると考えられる。

2-4-4 まとめ

旧経験式と新経験式で、3月9日の地震(Mw7.4)と3月11日の茨城県沖の最大余震(Mw7.7)、東北地方太平洋沖地震の長周期地震動シミュレーションを実施した。東北地方太平洋沖地震は、3連動を仮定し、静的応力降下量を3MPaとするとともに、Mw8.5で頭打ちを考慮した。いずれの3地震も、旧経験式より新経験式の方が観測をよく表現できることがわかった。特に、本震では、関東平野で過大評価となる傾向が、新経験式では改善される方向の結果となった。

参考文献

中央防災会議(2003). 東南海・南海地震等に関する専門調査会. 第16回、資料3 図表集、pp.18-20.

<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/nankai>

Eshelby, J. D. (1957), The determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems, *Proceedings of the Royal Society*, A241, pp.376-396.

気象庁(2011). 3月9日 三陸沖の地震－遠地実体波および近地強震波形による震源過程解析(暫定)－, <http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/sourceprocess/event/20110309farandnear.pdf>

佐藤智美 (2012). 経験的グリーン関数法に基づく2011年東北地方太平洋沖地震の震源モデル-プレート境界地震の短周期レベルに着目して-, 日本建築学会構造系論文集, 第675号(掲載予定)

地震調査研究推進本部(2009). 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

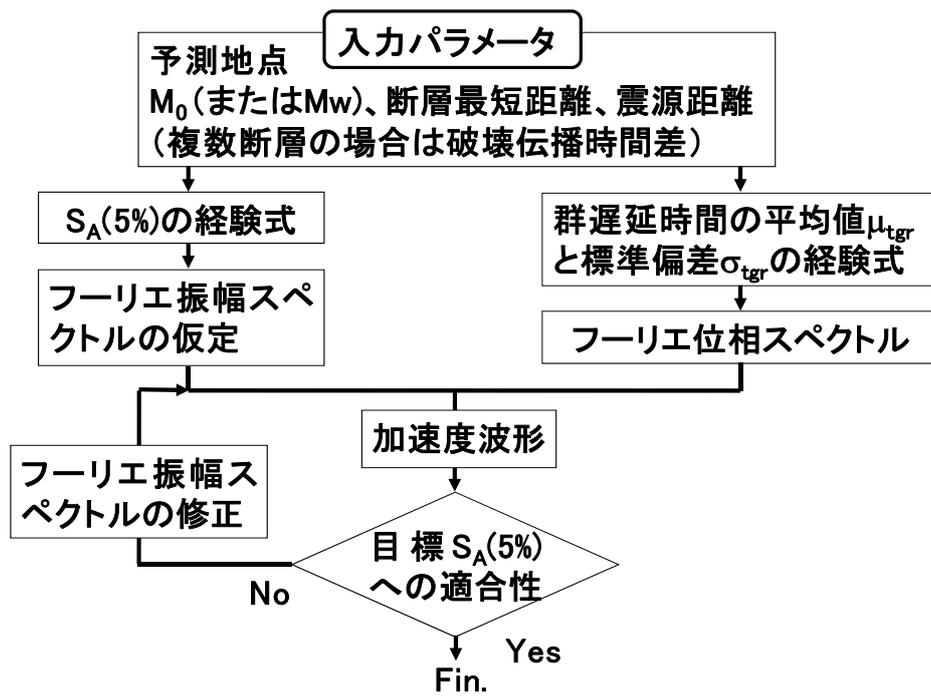


図 2. 4-1 経験式に基づく長周期地震動作成フロー

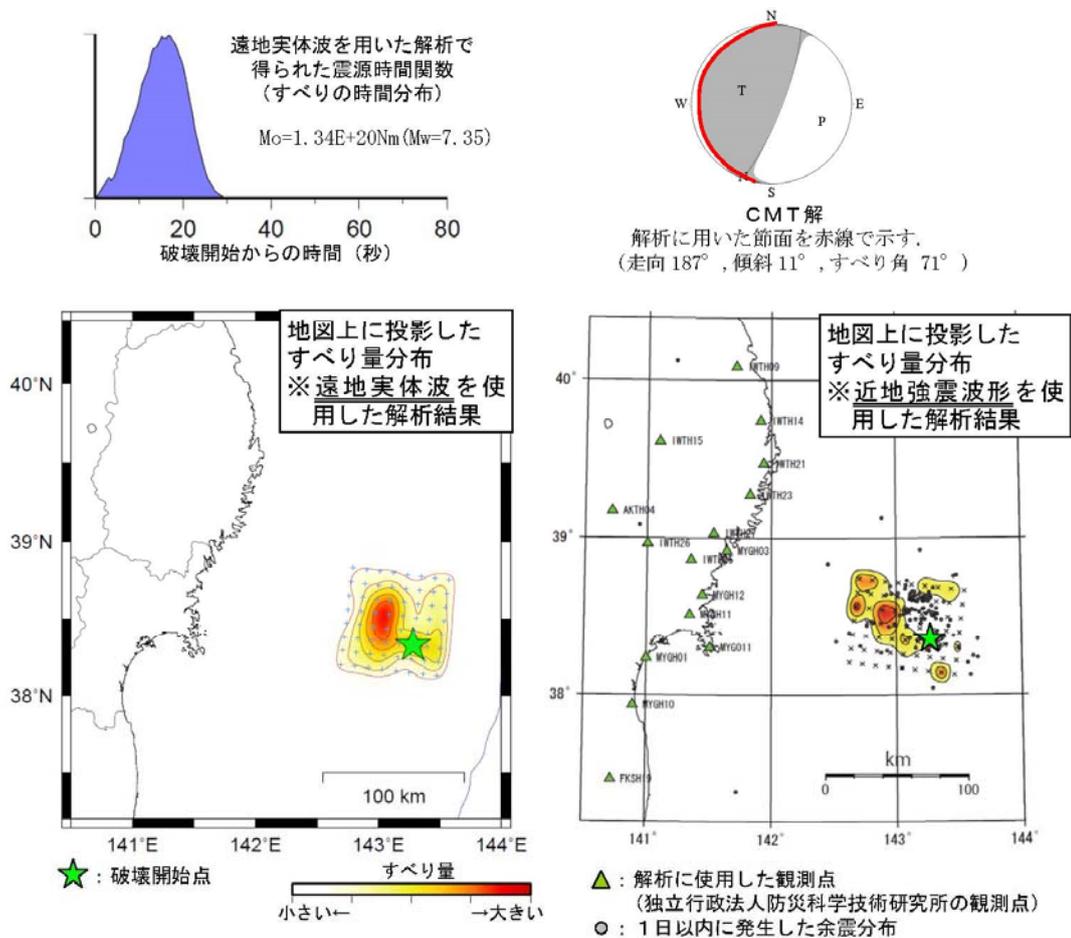


図 2.4-2 長周期波形インバージョンに基づく 3 月 9 日の地震の震源モデル(気象庁)

表 2.4-1 巨視的断層モデル

		3月9日三陸 沖の地震	3月11日の 茨城県沖の 最大余震
M_0	Nm	$1.34E+20$	$5.66E+27$
M_w		7.4	7.8
面積		4900	5960
長さ	km	70	77.2
幅	km	70	77.2
走向	$^\circ$	187	199
傾斜角	$^\circ$	11	17

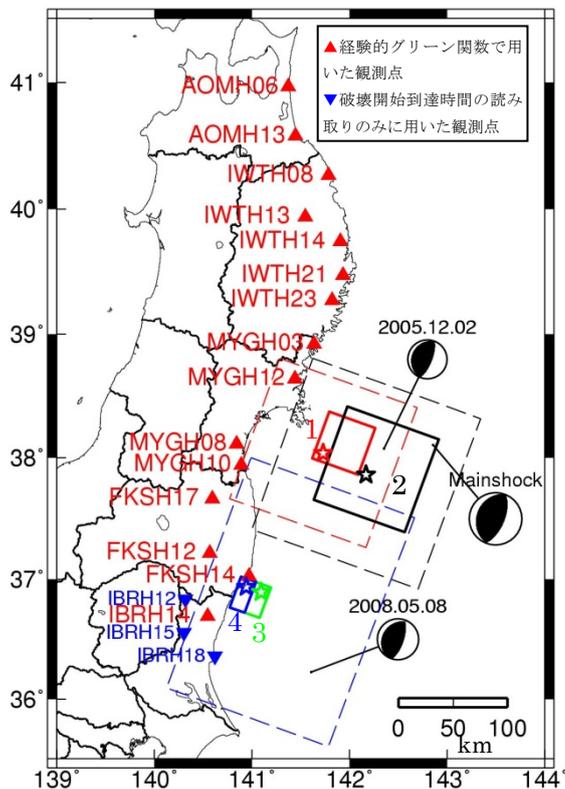


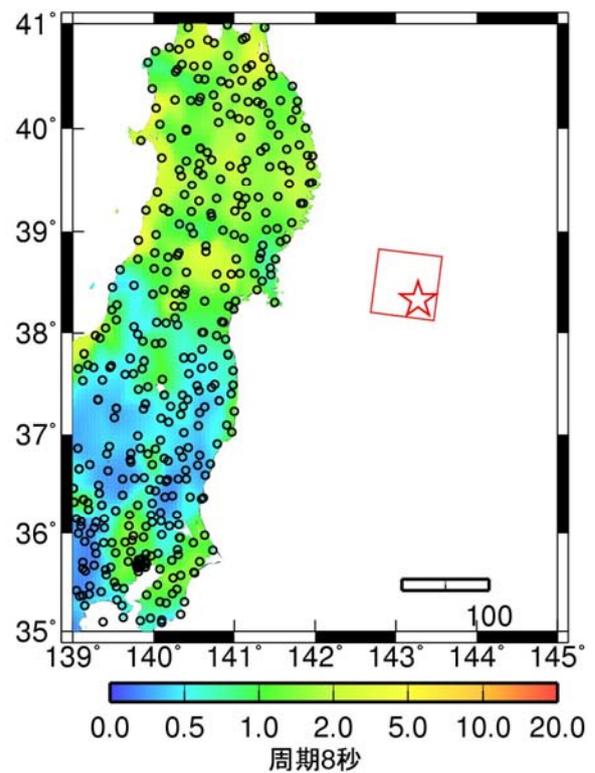
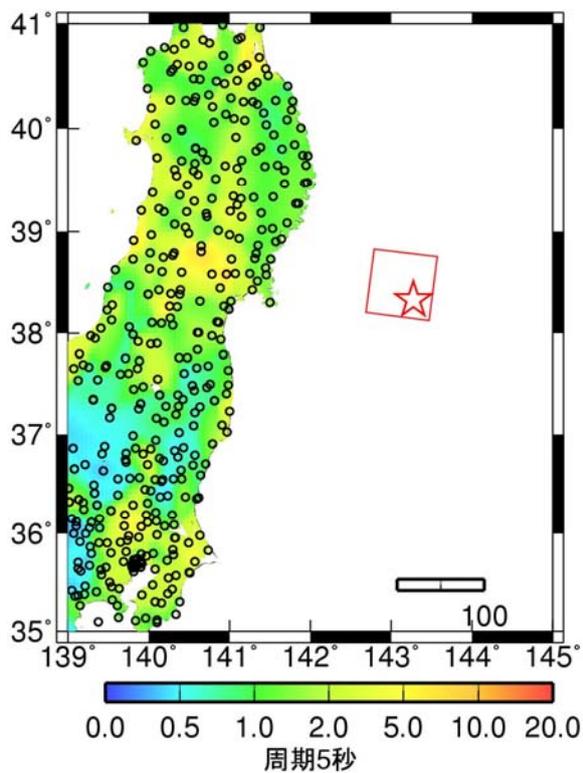
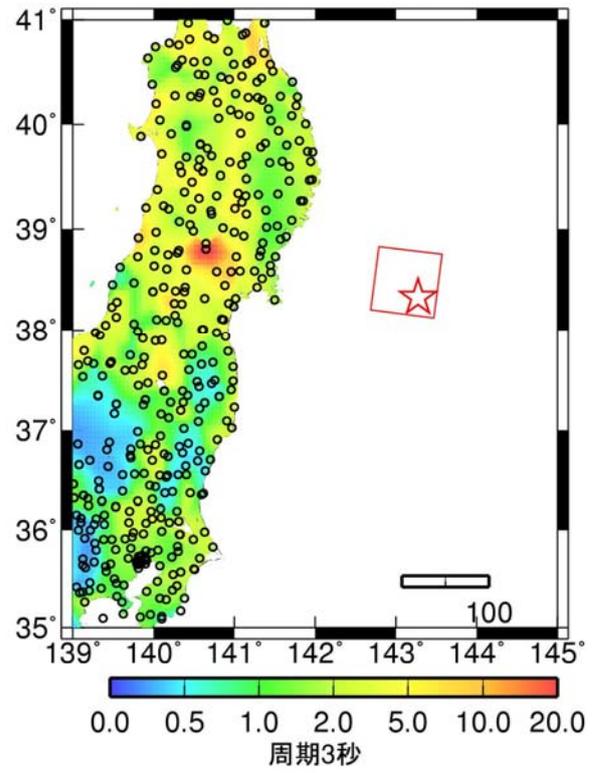
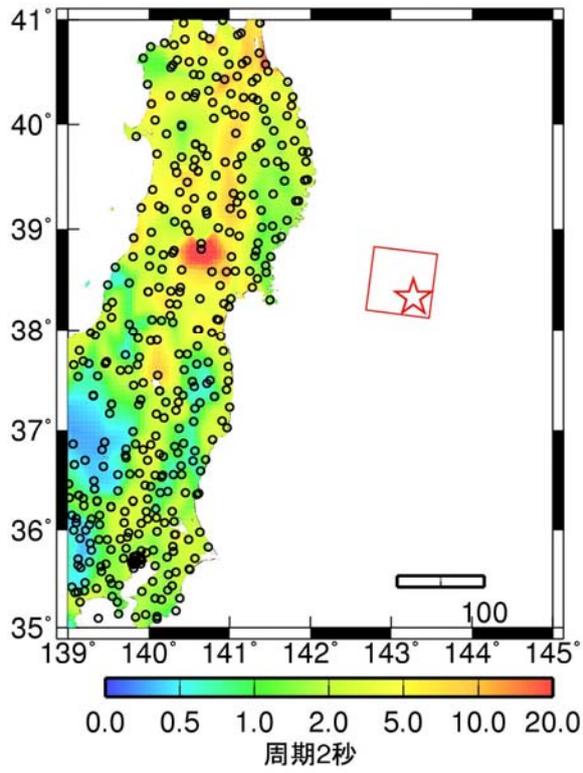
図 2.4-3 佐藤(2012)の経験的 G 関数法に基づく 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源モデル
(実線の矩形が強震動生成領域 1~4、星印が破壊開始点)

表 2.4-2 佐藤(2012)の震源モデルのパラメータ

パラメータ	強震動生成領域1	強震動生成領域2	強震動生成領域3	強震動生成領域4	強震動生成領域全体	
長さ [km]	45.0	90.0	30.0	15.0	—	
幅 [km]	45.0	90.0	30.0	30.0	—	
面積 [km ²]	2025.0	8100.0	900.0	450.0	11475.0	
地震モーメント [dyne・cm]	1.49E+28	7.73E+28	3.23E+27	8.06E+26	9.63E+28	
応力降下量 [bar]	397.7	258.5	291.0	205.7	—	
すべり量 [cm]	1530.3	1989.5	746.6	373.2	—	
短周期レベル [dyne・cm/s ²]	2.03E+27	2.64E+27	9.90E+26	4.95E+26	3.51E+27	
破壊開始時間 [s]	28.0	58.0	103.4	107.9	—	
破壊伝播速度 [km/s]	3.0	2.0	2.0	2.0	—	
破壊開始点	経度 [度]	141.729	142.168	141.093	140.941	—
	緯度 [度]	38.036	37.863	36.892	36.937	—
	深さ [km]	48.0	36.6	50.9	54.8	—

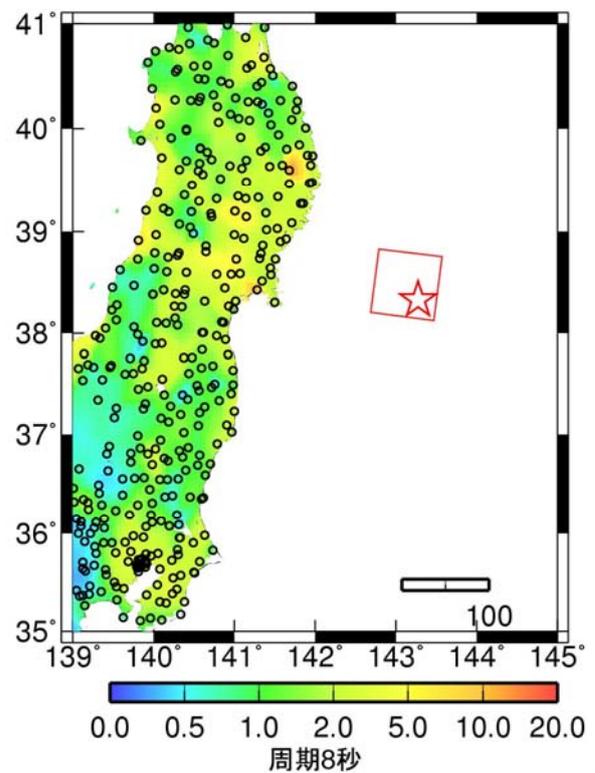
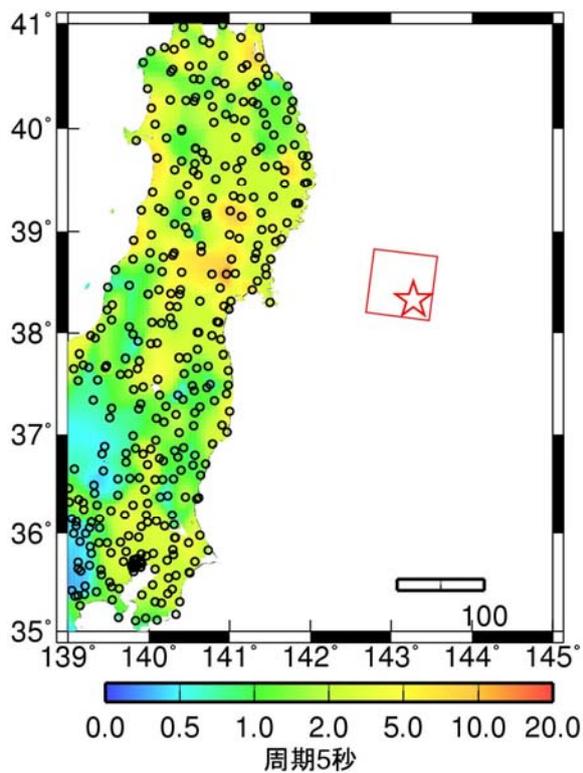
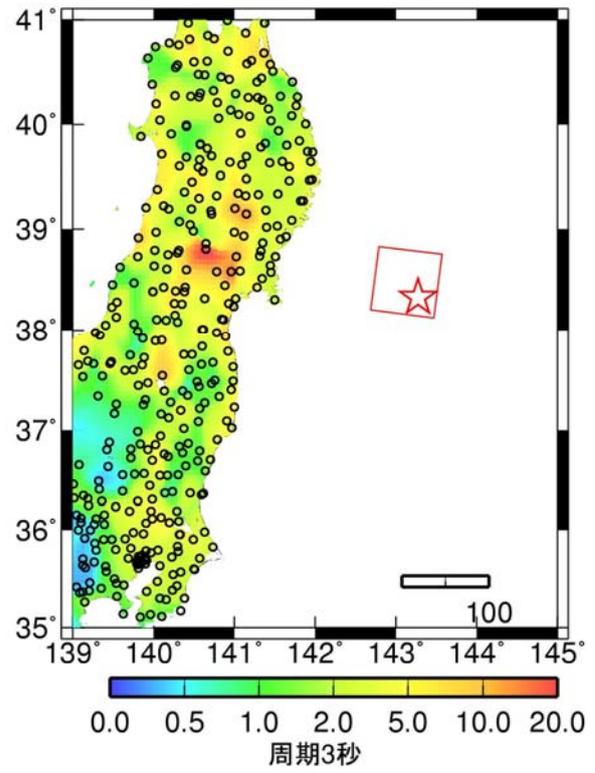
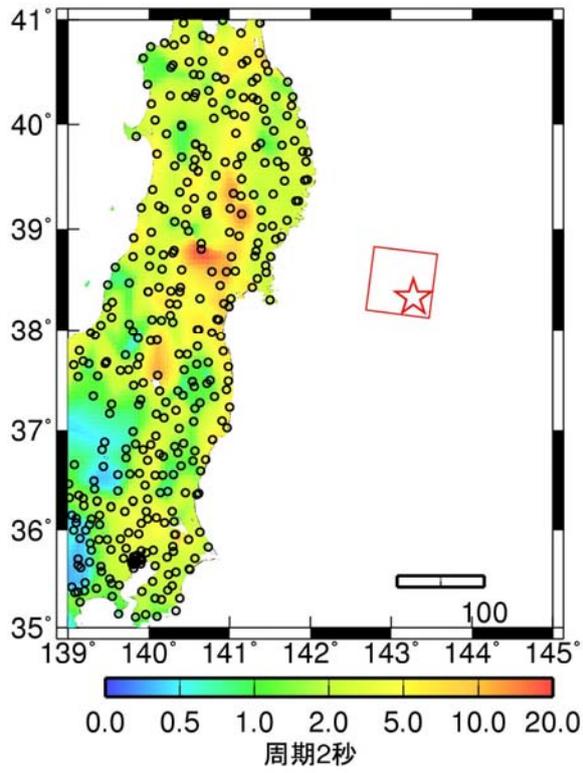
表 2.4-3 静的応力降下量 3MP a を仮定し
 佐藤(2012)に基づき 3つの断層を仮定した本震の震源モデル
 (改良経験式では頭打ちを考慮したカッコ内の値を使用)

	パラメータ	単位	本震
全体	M ₀	dyne・cm	2.97E+29 (1.20E+29)
	M _w		8.9 (8.7)
	走向	°	200.0
	傾斜角	°	15.0
断層1	M ₀	dyne・cm	5.42E+28
	M _w		8.4
	面積	km ²	26844.8
	長さ	km	163.8
	幅	km	163.8
断層2	M ₀	dyne・cm	2.27E+29 (5.01E+28)
	M _w		8.8 (8.4)
	面積	km ²	69795.0
	長さ	km	349.0
	幅	km	200.0
断層3	M ₀	dyne・cm	1.58E+28
	M _w		8.1
	面積	km ²	11815.5
	長さ	km	108.7
	幅	km	108.7



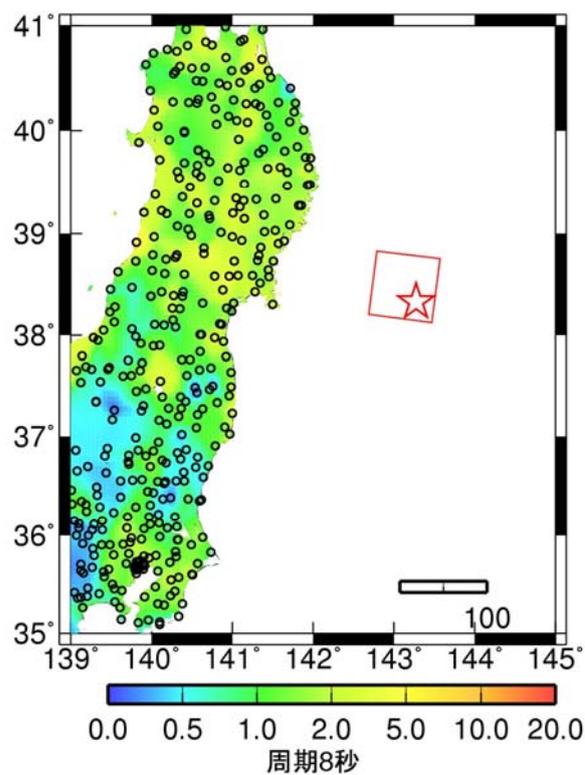
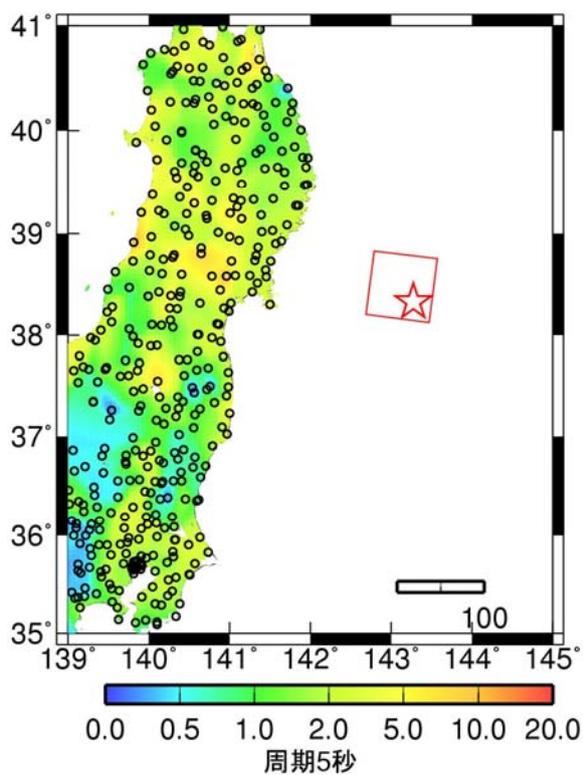
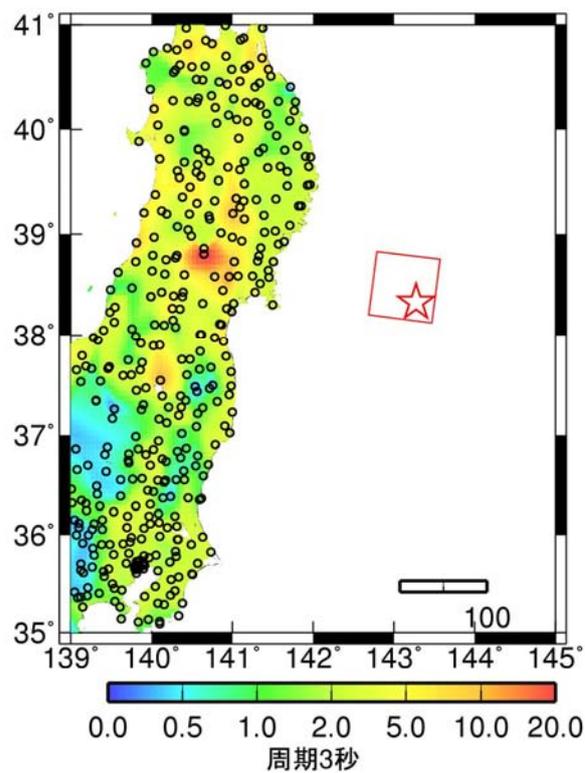
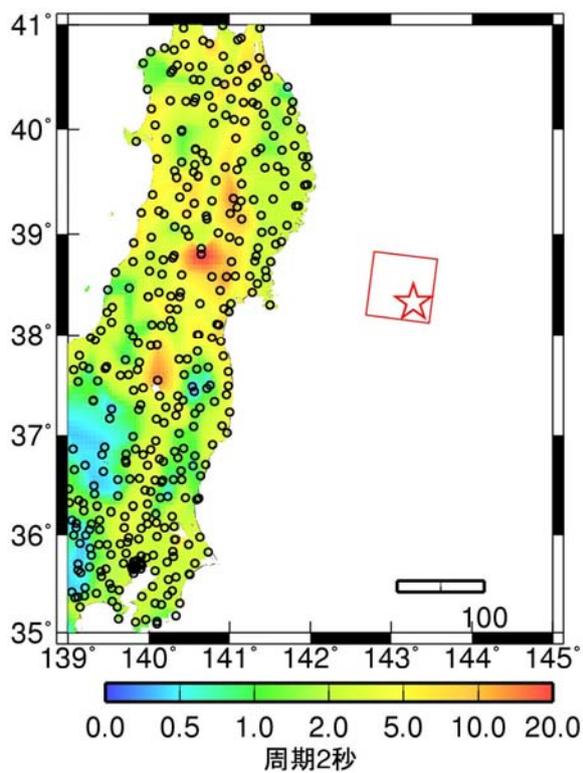
擬似速度応答スペクトル $h=5\%$:(観測) [cm/s]

図 2.4-4 3月9日の地震の観測擬似速度応答スペクトル分布



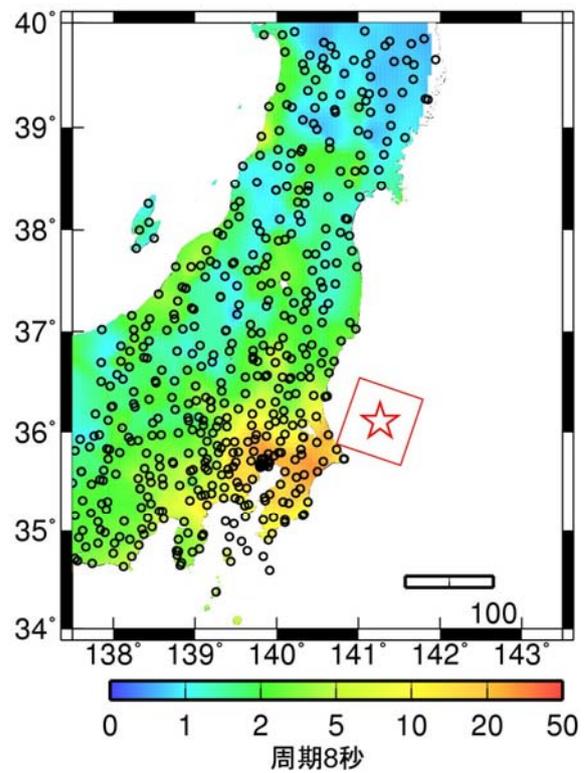
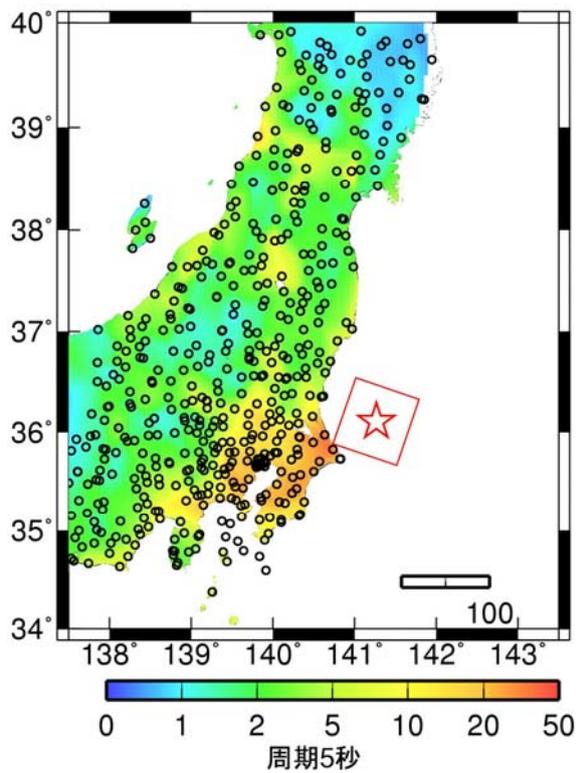
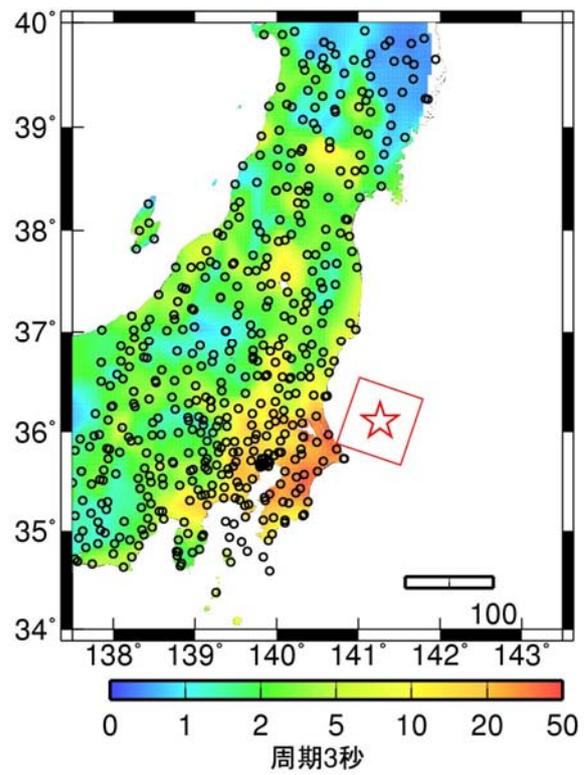
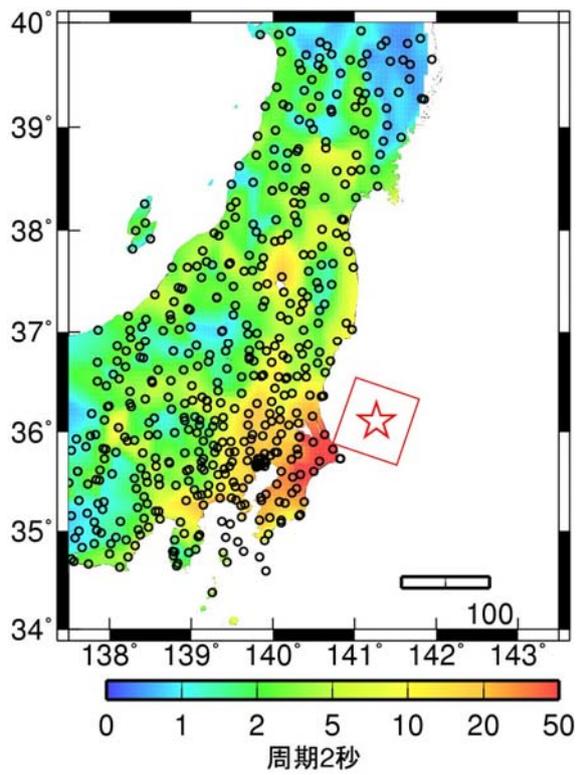
擬似速度応答スペクトル $h=5\%$:(予測) 旧 [cm/s]

図 2.4-5 3月9日の地震の旧経験式に基づく擬似速度応答スペクトル分布



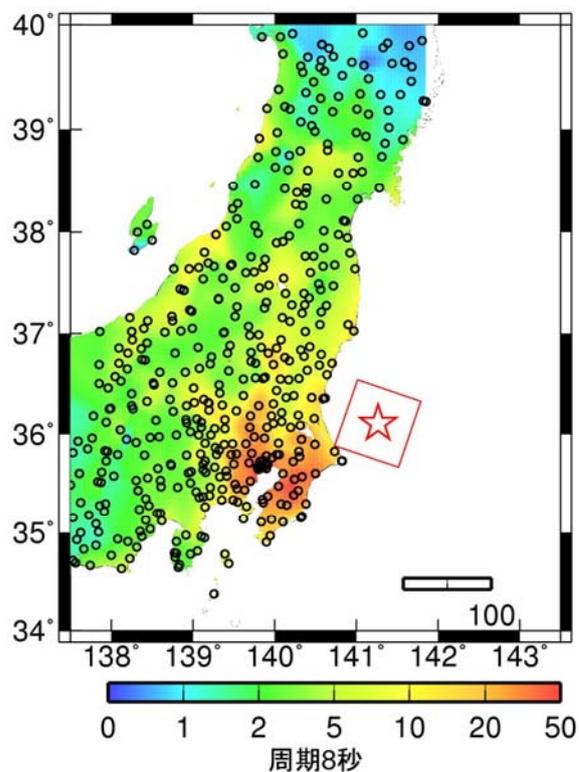
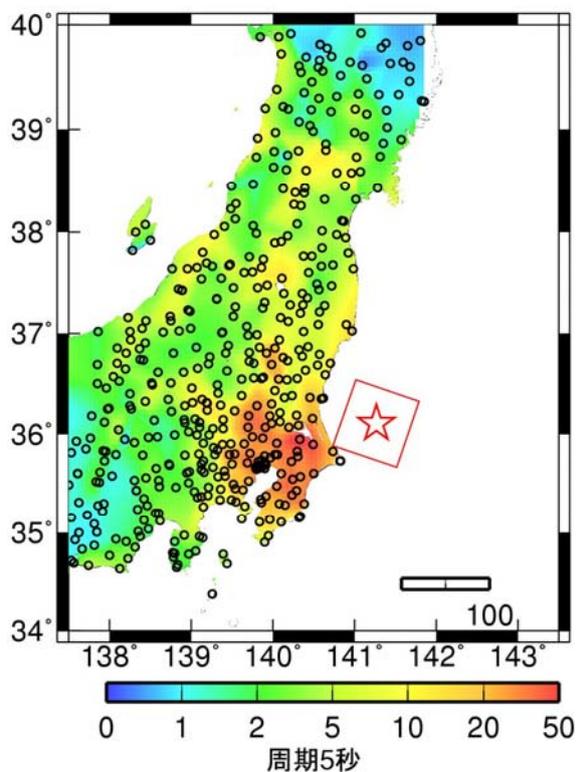
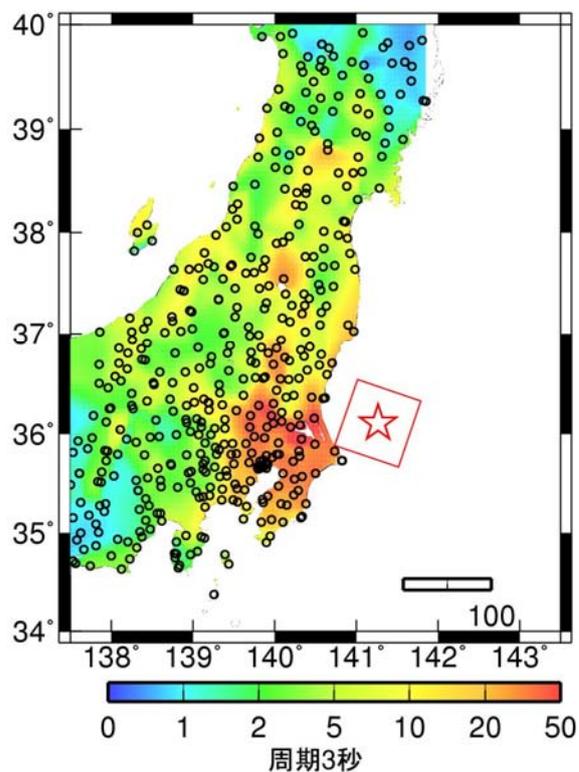
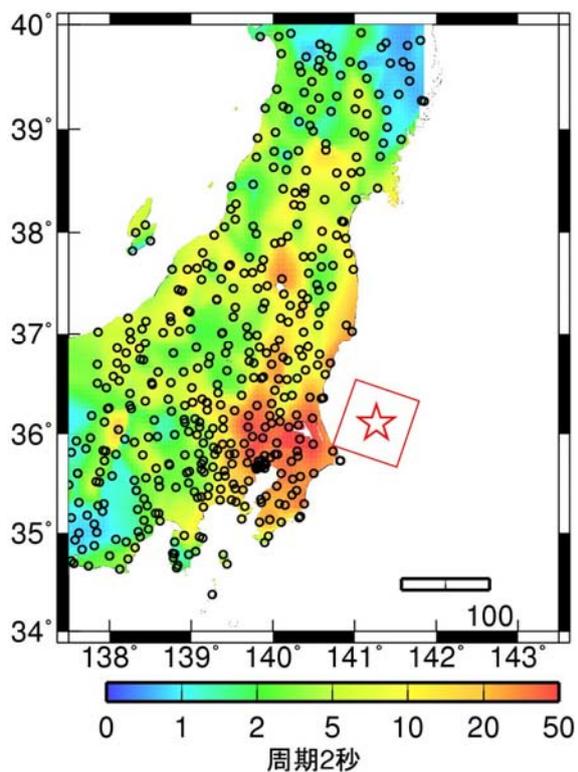
擬似速度応答スペクトル $h=5\%$:(予測) 新 [cm/s]

図 2.4-6 3月9日の地震の新経験式に基づく擬似速度応答スペクトル分布



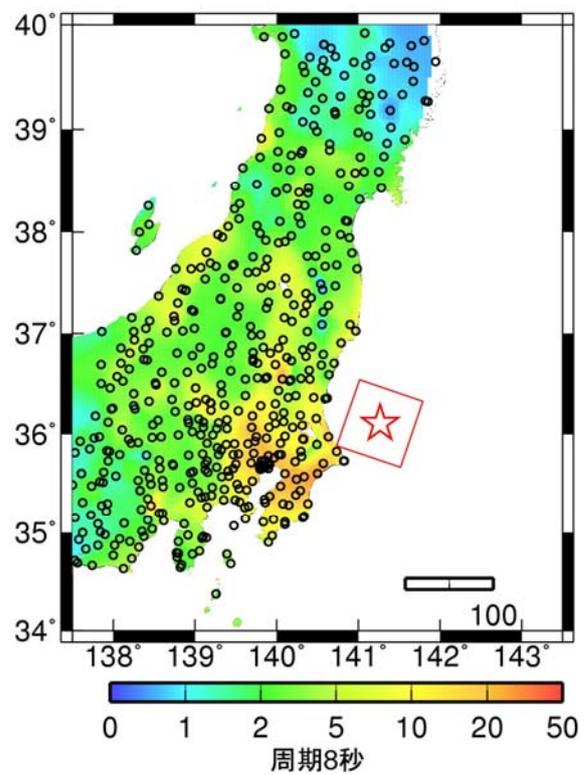
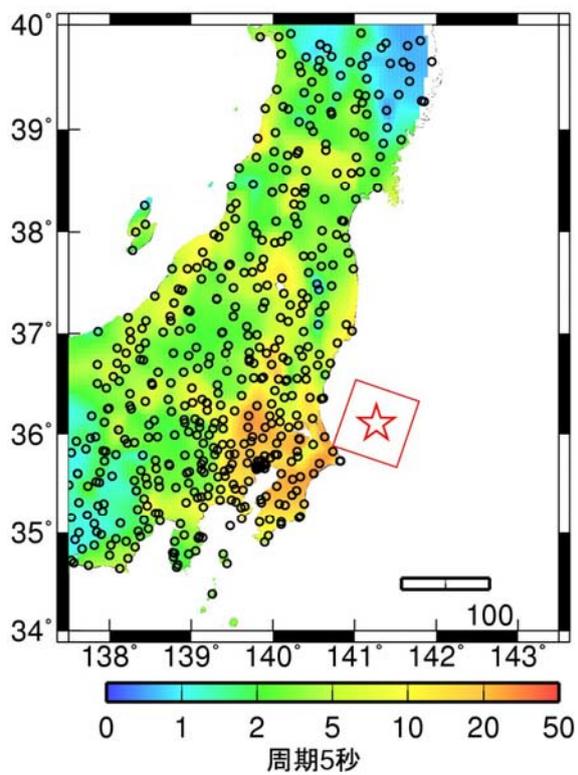
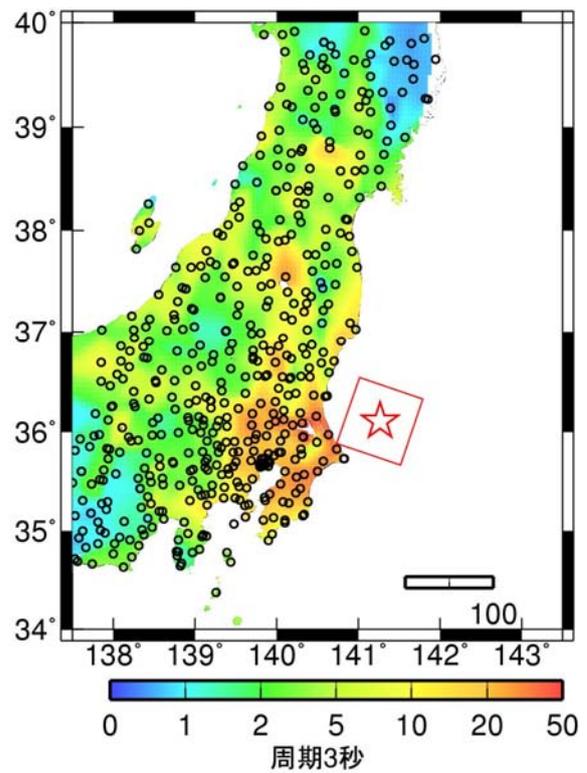
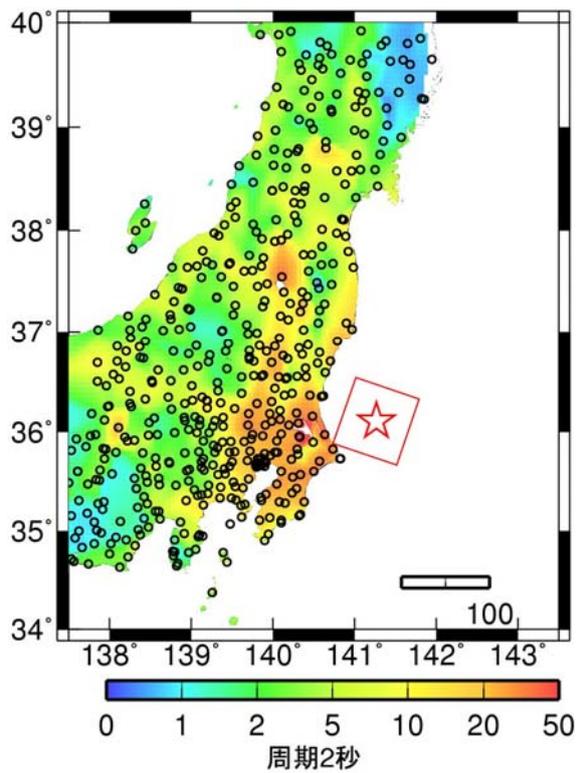
擬似速度応答スペクトル $h=5\%$:(観測) [cm/s]

図 2.4-7 3月11日の最大余震の観測擬似速度応答スペクトル分布



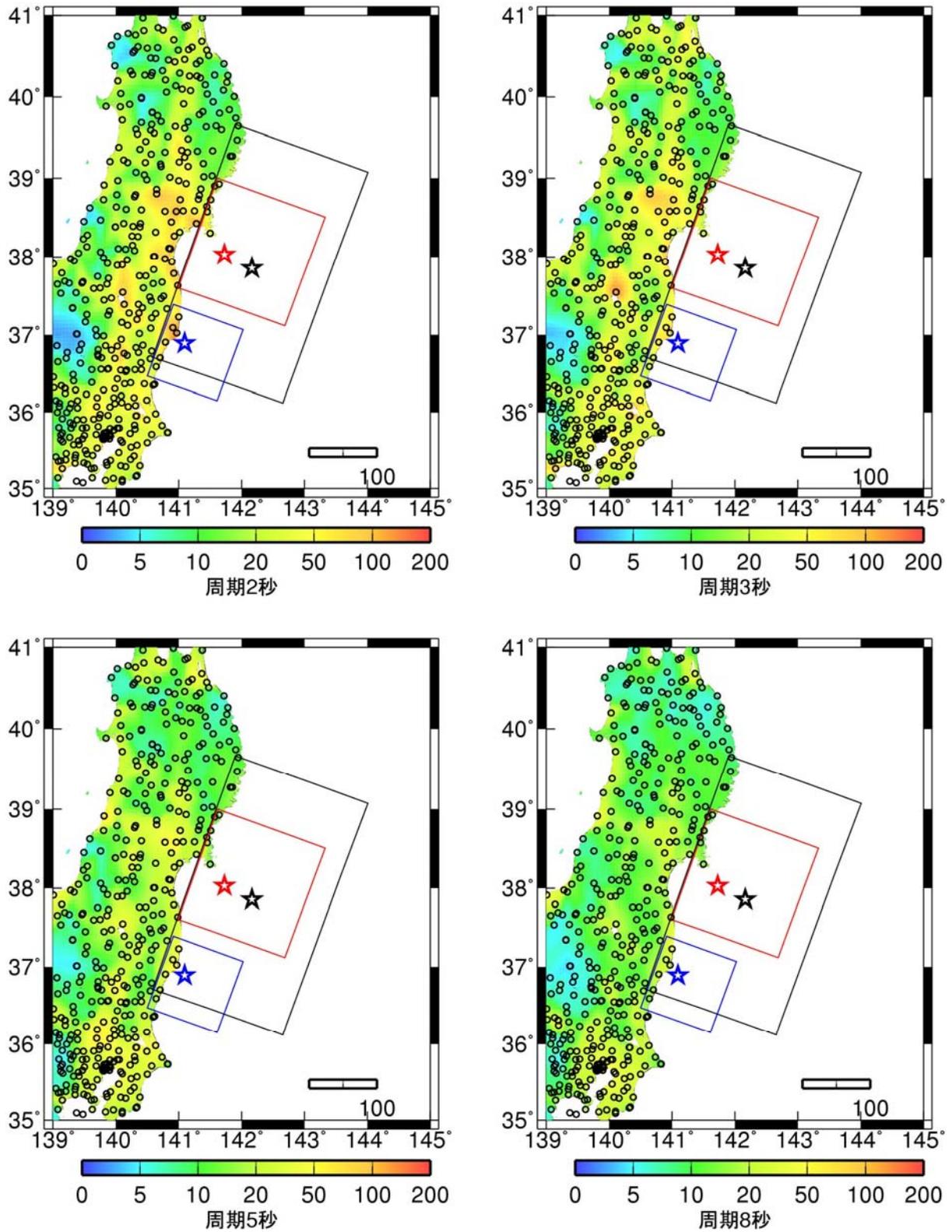
擬似速度応答スペクトル $h=5\%$:(予測) 旧 [cm/s]

図 2.4-8 3月11日の最大余震の旧経験式に基づく擬似速度応答スペクトル分布



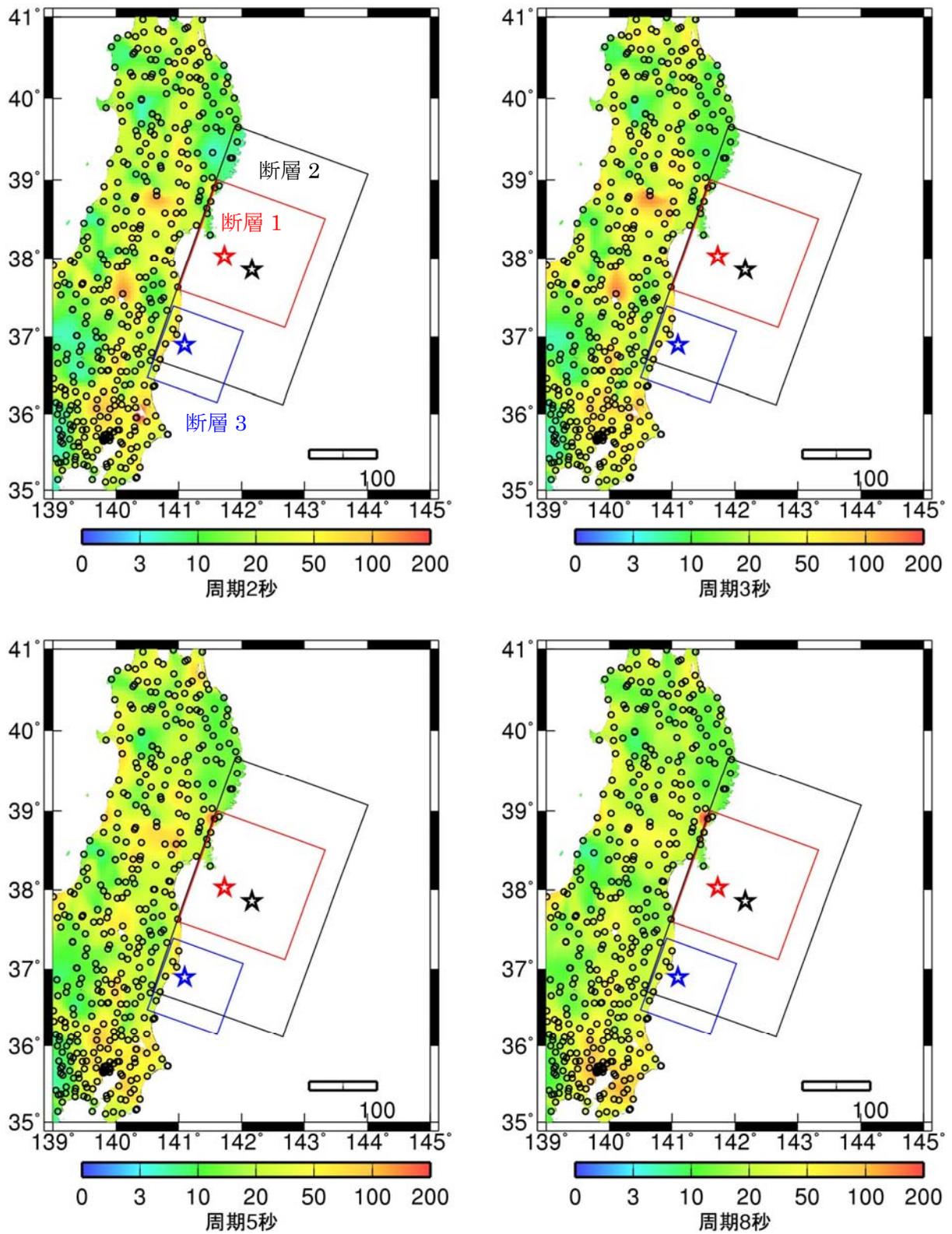
擬似速度応答スペクトル $h=5\%$:(予測) 新[cm/s]

図 2.4-9 3月11日の最大余震の新経験式に基づく擬似速度応答スペクトル分布



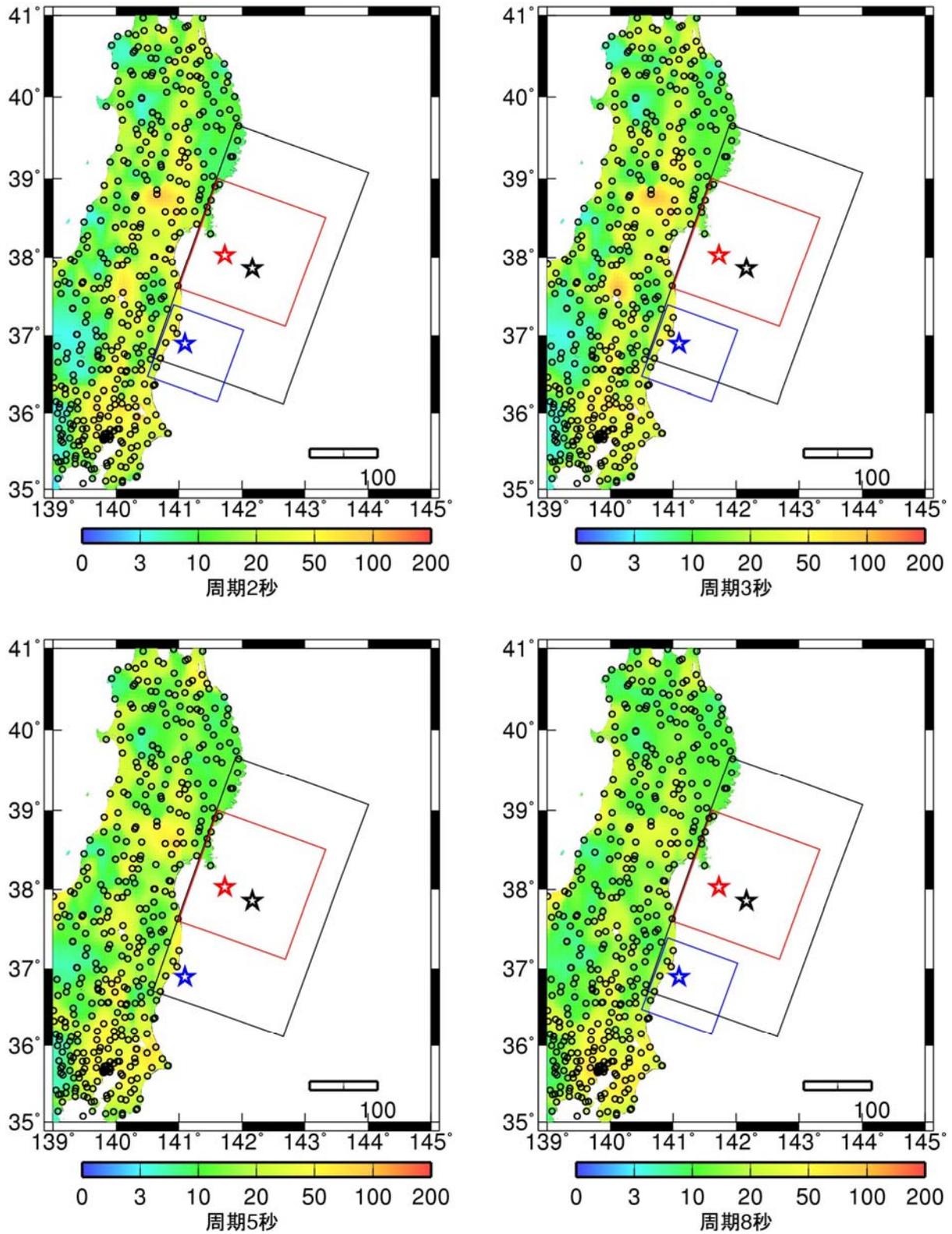
擬似速度応答スペクトル $h=5\%$:(観測) [cm/s]

図 2.4-10 東北地方太平洋沖地震の観測擬似速度応答スペクトル分布



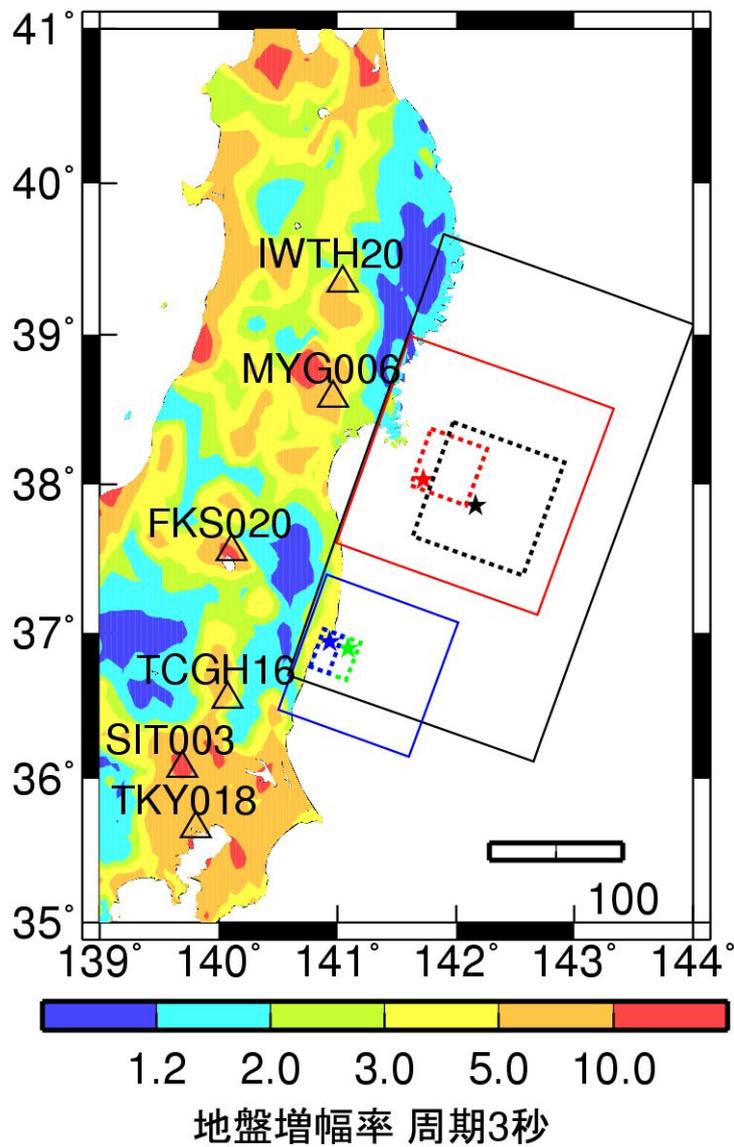
擬似速度応答スペクトル $h=5\%$:(予測) 旧 [cm/s]

図 2.4-11 太平洋沖地震の旧経験式に基づく擬似速度応答スペクトル分布



擬似速度応答スペクトル $h=5\%$:(予測) 新 [cm/s]

図 2.4-12 太平洋沖地震の新経験式に基づく擬似速度応答スペクトル分布(Mw の頭打ちあり)



破線の矩形と星印（佐藤(2012)の強震動生成領域と破壊開始点）

実線の矩形（本業務で設定した巨視的断層面）

図 2.4-13 観測とシミュレーションの比較を行う観測点と周期 3 秒での地盤増幅率分布

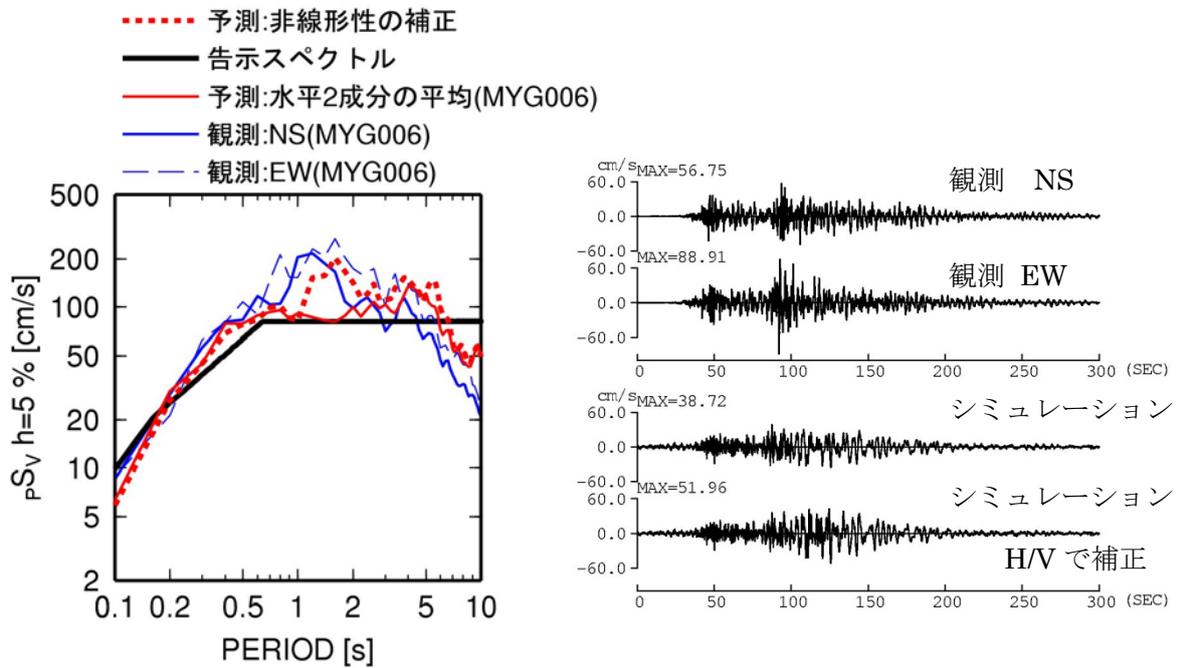
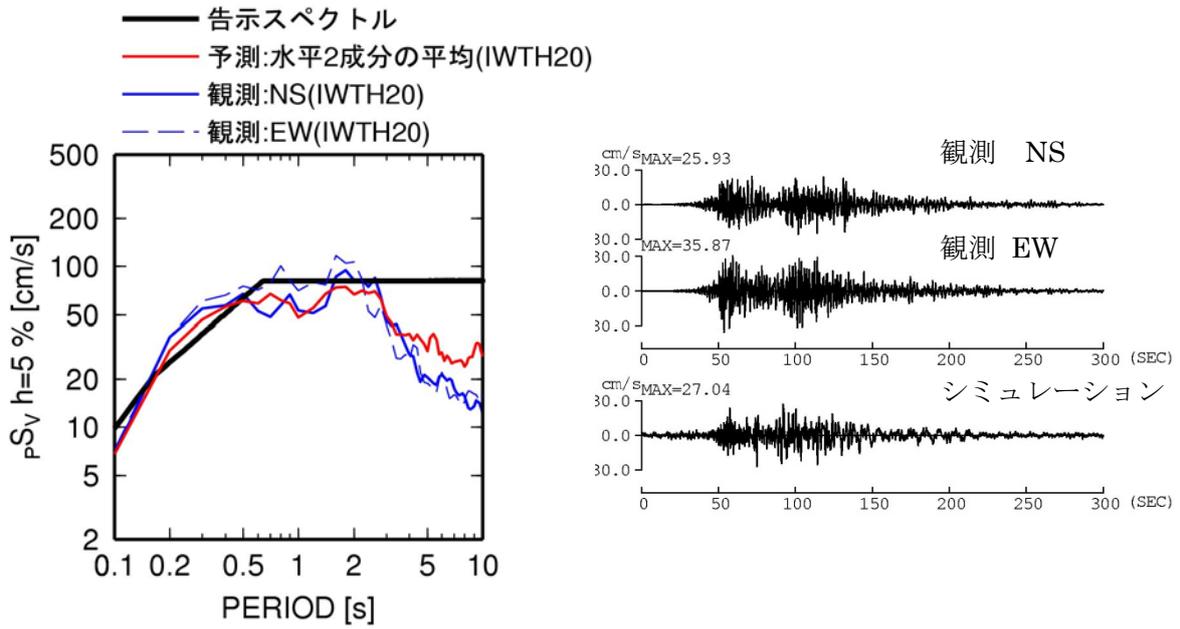


図 2.4-14 観測とシミュレーションの擬似速度応答スペクトルと速度波形の比較

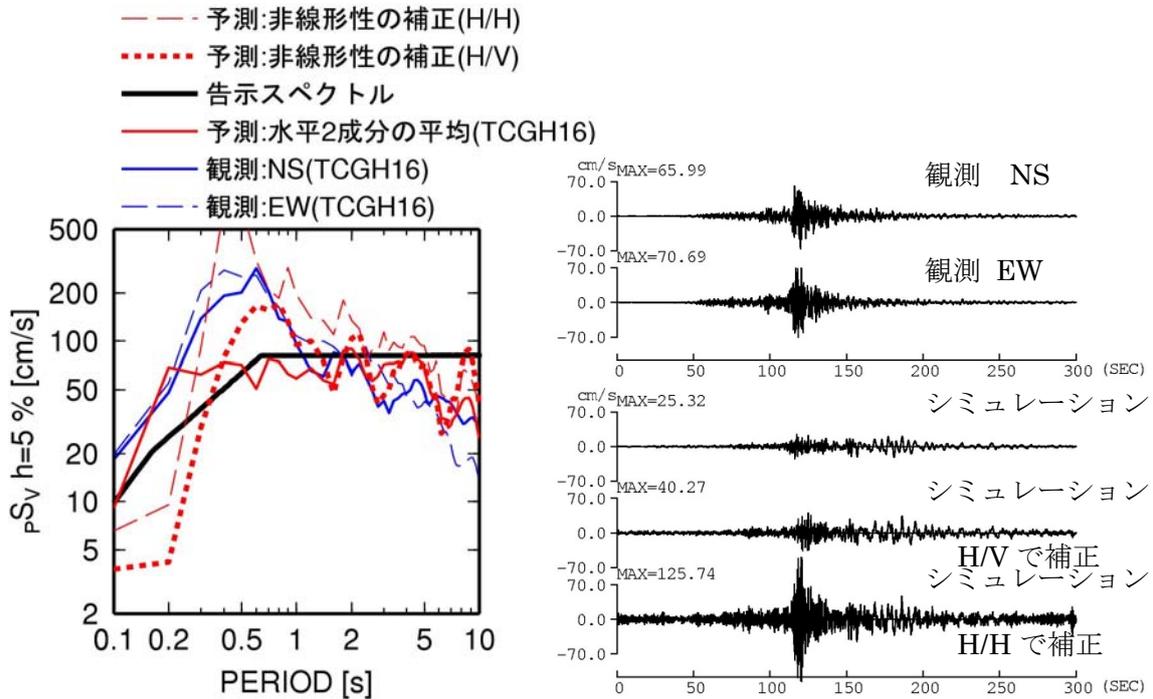
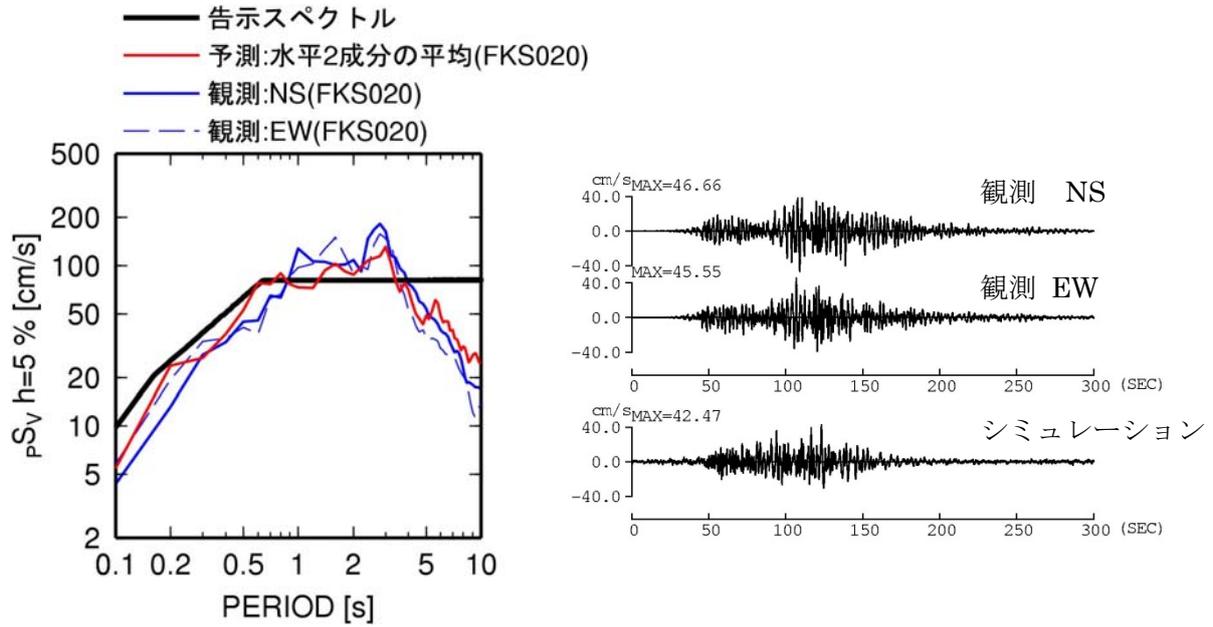


図 2.4-14 観測とシミュレーションの擬似速度応答スペクトルと速度波形の比較(続き)

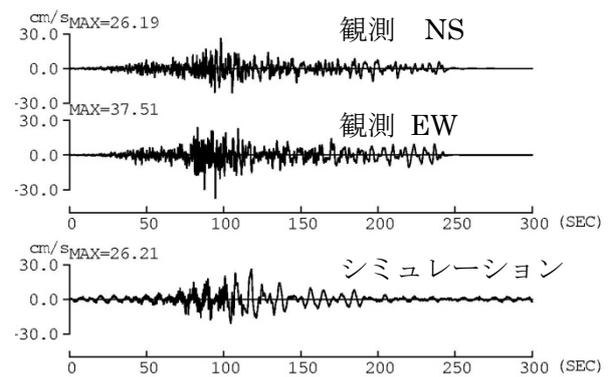
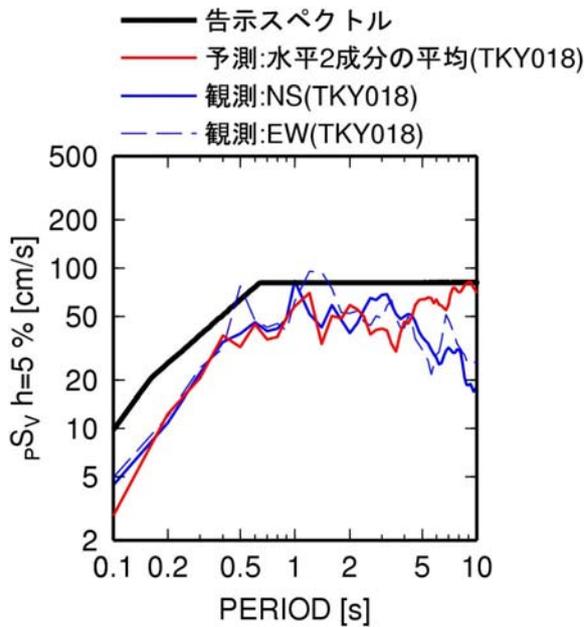
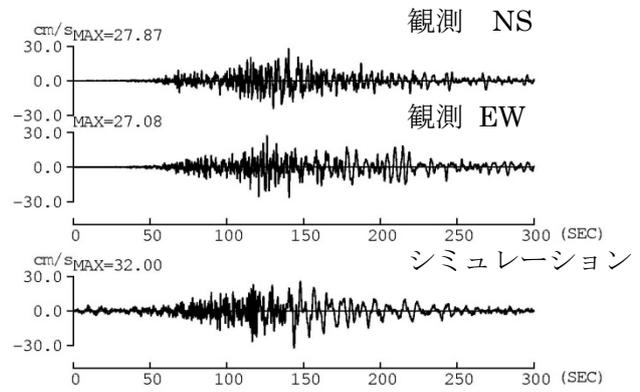
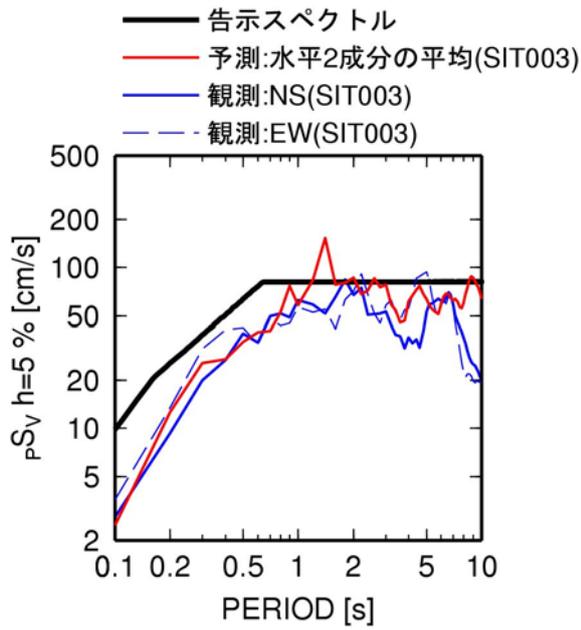


図 2.4-14 観測とシミュレーションの擬似速度応答スペクトルと速度波形の比較(続き)

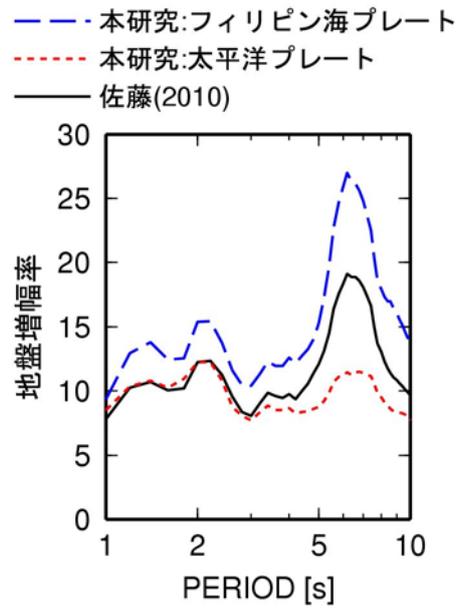


図 2.4-15 TKY018 での地盤増幅率

2-5 工学的基盤のパラメータ・地震動と建物入力地震動について

2-5-1 はじめに

2-4 節までは、地表での長周期地震動作成のための経験式について記述した。

現行では、稀または極めて稀な地震動として、工学的基盤における地震動に表層地盤の影響を考慮している。

本検討の”長周期地震動”については、地表観測記録を用いた分析結果が評価法の基本資料となっているので、上記と同様に表層地盤の影響を考慮できるように、工学的基盤への適用方法を検討している。その考え方は下記のとおりである。

国交省発表資料「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案について」（平成22年12月21日）

別紙5 2. 3 工学的基盤のサイト係数の算定方法

「超高層建築物などは、工学的基盤などの剛強地盤に建物を支持させることが一般的である。したがって、入力地震動も工学的基盤面で設定することが求められる。ただし、工学的基盤以浅の地盤による増幅は一般に短周期部分が対象であるので、ここでは周期1秒以上については、地震基盤から工学的基盤への増幅は地震基盤から地表面への増幅と等しいものと仮定した。また、回帰式(2-1)を求めるのに用いた地震データの観測地点から工学的基盤相当と考えられる観測地点を選び、それらの平均的な地盤増幅率を工学的基盤のサイト増幅率とした。工学的基盤から地表までの増幅は周期1秒以下に対しては考慮するものとした。その結果、周期0.5秒までは地震基盤から平均的な工学的基盤への地盤増幅率として全国一律に与えることとした。また、周期0.5秒から1秒は、全国一律からサイト固有の増幅特性の遷移領域として、後述するマッチングフィルターにより滑らかに接続することとした。」

実際の適用方法を次に例を使って説明する。

2-5-2 適用方法と設定例

本事業提案の建物の応答評価に用いる”長周期地震動”としての入力地震動は図2-5-1のように設定する。Step-1で工学的基盤の模擬地震動を設定する。Step-2では工学的基盤以浅の表層地盤の影響を考慮するために地盤応答解析を行う。

Step-1の工学的基盤の地盤増幅率とサイト係数は、上記平成22年国交省資料では別紙3の付録に用意された。また、東海地震または東南海地震を対象とした区域を代表する模擬地震動の例も同別紙2に用意された。ただし、上記の考え方から周期1秒以上では地表面と同等の地震動とできる。これは、地震動の長周期成分が深い地盤（地震基盤以浅）の影響が特に大きいと考えられていることによる。Step-2の地盤応答解析を周期1秒以下のみで行うことはできないのでStep-1の $a_1(t)$ を用いるが、その結果の $a_2(t)$ をそのまま用いずに、上記考え方から $a_1(t)$ と $a_2(t)$ のフーリエスペクトルに再度マッチングフィルターを通して接続した地震動を用いることができる。ただし、 $a_2(t)$ をそのまま用いることは安全側と考えることができるので許容される。

図2.5-2以後に図2.5-1の流れに従った計算例を示す。

本検討で用いた観測データは、すべて地表面で記録されたものである。観測地点により地盤条件が異なり、表層部分が軟弱な観測点もあれば、地震基盤のような硬い地盤上の観測点もある。それらのうち、工学的基盤相当とみなされる観測地点に対応した、地震基盤から地表面(この場合は工学的基盤相当になる)へのサイト増幅率および群遅延時間に関するサイト係数において、周期 0.5 秒以下(振動数 2 Hz 以上)については全国共通の係数として与える。また周期 1 秒以上(振動数 1 Hz 以下)については、本検討で求めた地震基盤—地表面のサイト増幅率および群遅延時間に関するサイト係数と同等とする。さらに周期 0.5 秒～1 秒(振動数 1～2 Hz)については、端部でそれぞれの係数と滑らかにつながるよういわずのマッチングフィルター(図 2.5-5)を適用することとした。このようにして、工学的基盤における地震動(応答スペクトルと時刻歴)を求めた上で、さらに工学的基盤以浅の表層地盤による増幅を考慮することになるが、周期 1 秒以上は、工学的基盤と地表面とが同等としているので、増幅を無視してもよいが、周期 1 秒以上に影響する増幅特性をそのまま用いてもよい。

2-5-3 改良経験式の工学的基盤の地盤増幅率とサイト係数

これまで算出している観測点毎の地盤増幅率や、群遅延時間の平均値・標準偏差のサイト係数は、地表でのものである。そこで、旧経験式と同じ手法により、K-NET、KiK-net 観測点での S 波検層結果を用いて、工学的基盤での地盤増幅率・サイト係数の算出を行った。

はじめに、K-NET、KiK-net 観測点での S 波検層結果に S 波速度 400m/s 以上の基盤が存在し、この層上面からの 1 次周期が 0.067 秒以下(15Hz 以上)の観測点を工学的基盤の観測点として選択した。これは、本検討では 0.1～10Hz を対象としていることから、この範囲では工学的基盤から地表までの増幅がほとんど無視できると考えられるためである。図 2-5-6 には、旧経験式と新経験式のスペクトルの地盤増幅率が求められている工学的基盤の観測点の分布を示す。図 2-5-7 には、群遅延時間のサイト係数が求められている工学的基盤の観測点の分布を示す。旧経験式と新経験式の工学的基盤の観測点はほぼ同じである。

旧経験式と新経験式の工学的基盤補正係数を図 2.5-8、図 2.5-9 に示す。スペクトルの地盤増幅率、群遅延時間のサイト係数とも旧経験式と新経験式の違いは小さい。

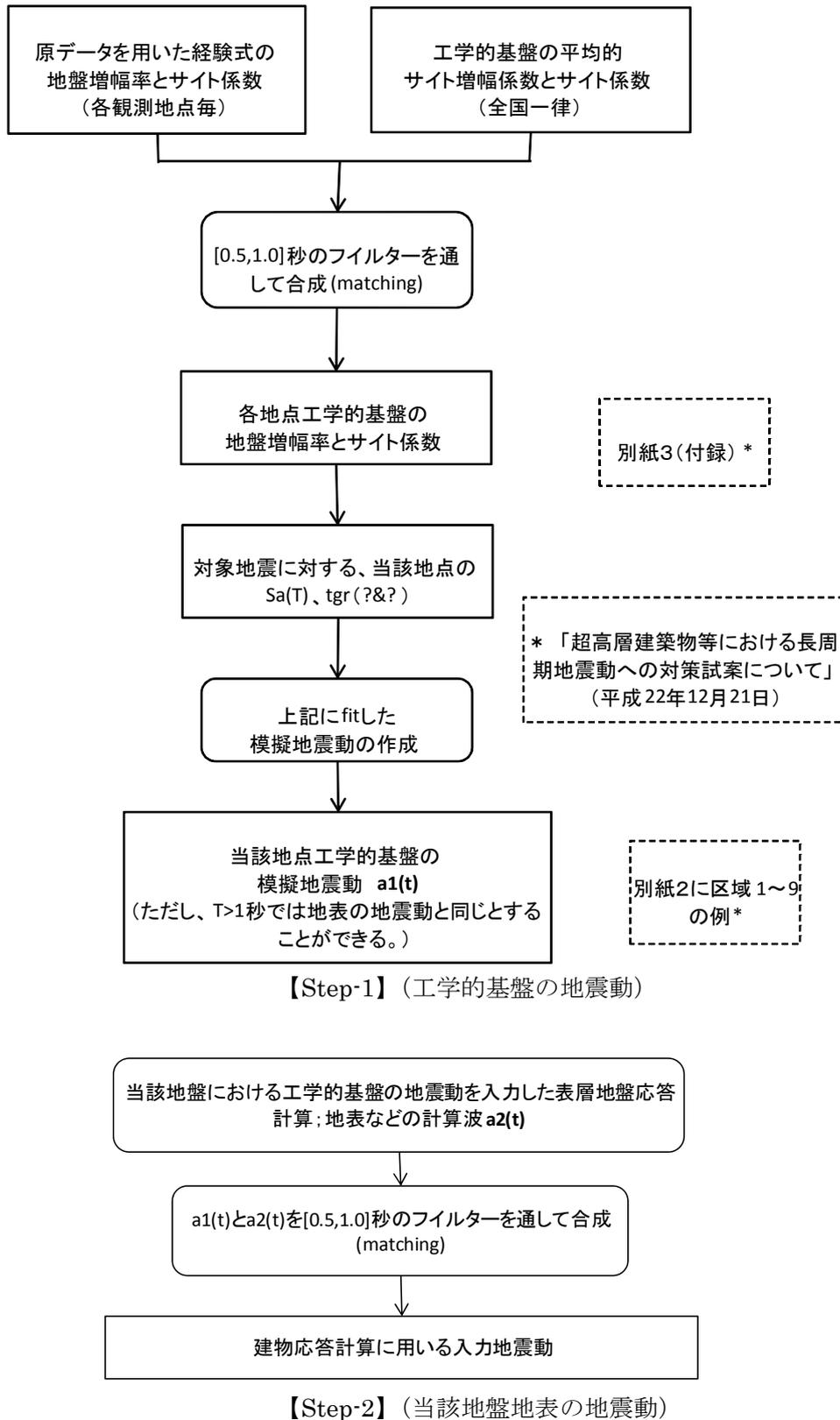


図 2.5-1 工学的基盤および当該地盤地表地震動設定の流れ

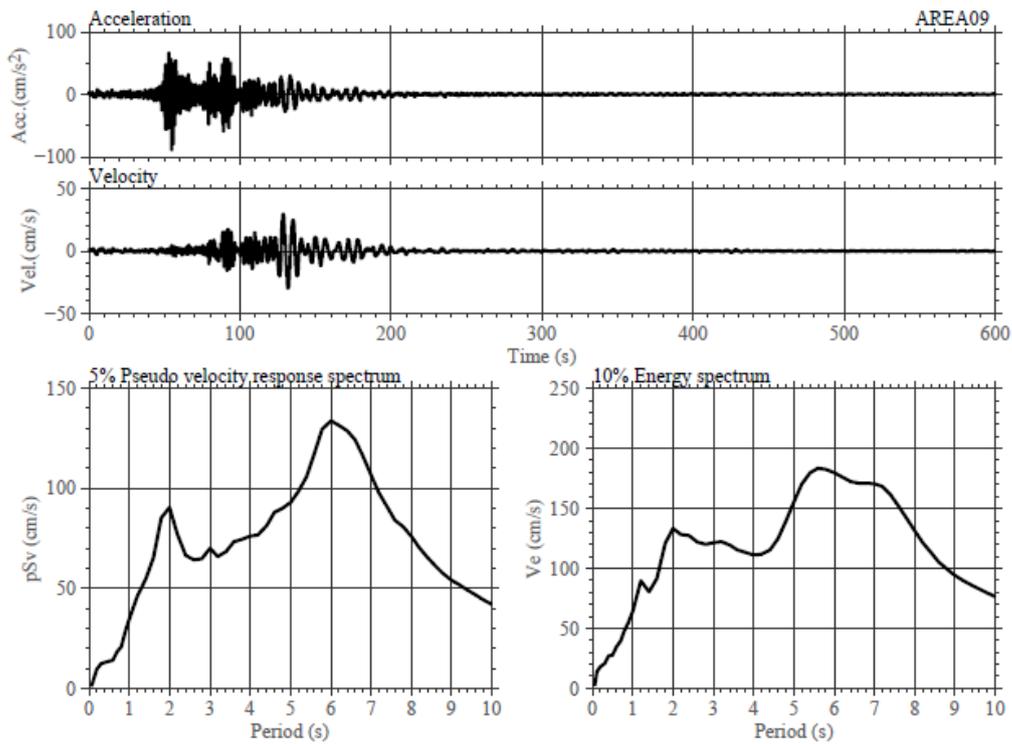


図 9(b) 区域 9 の設計用長周期地震動の加速度波形(上段)、速度波形(中段)、減衰定数 5% の擬似速度応答スペクトル(下段左)、及び減衰定数 10% のエネルギースペクトル(下段右)

図 2.5-2 Step-1 の結果の例 (平成 22 年 12 月 21 日) ; 工学的基盤波 (パプコメ公表波) a1(t)

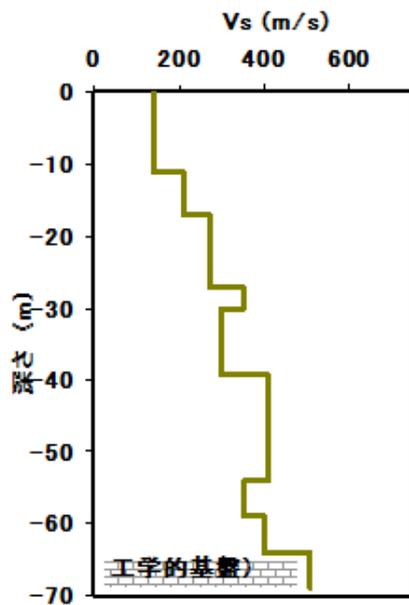


図 2.5-3 Step-2 の計算例に用いた地盤 (T=0.73 秒)

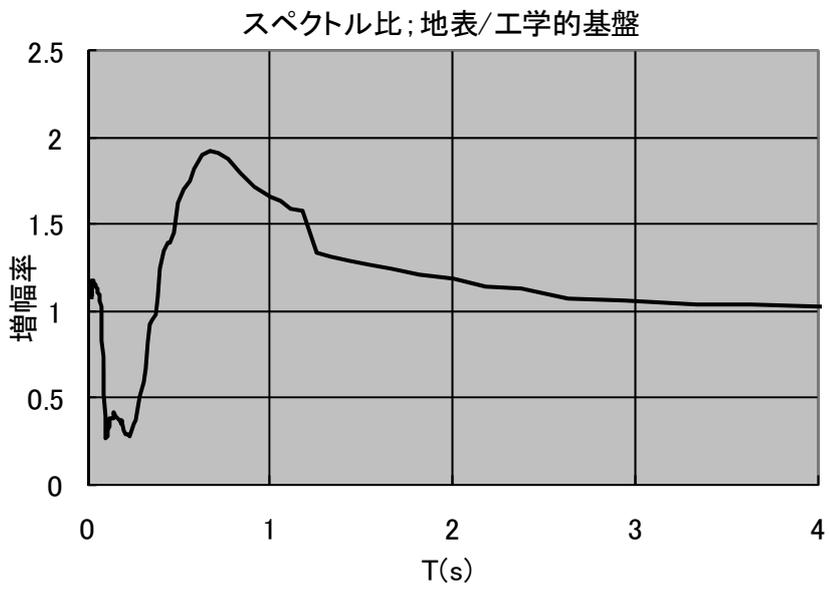
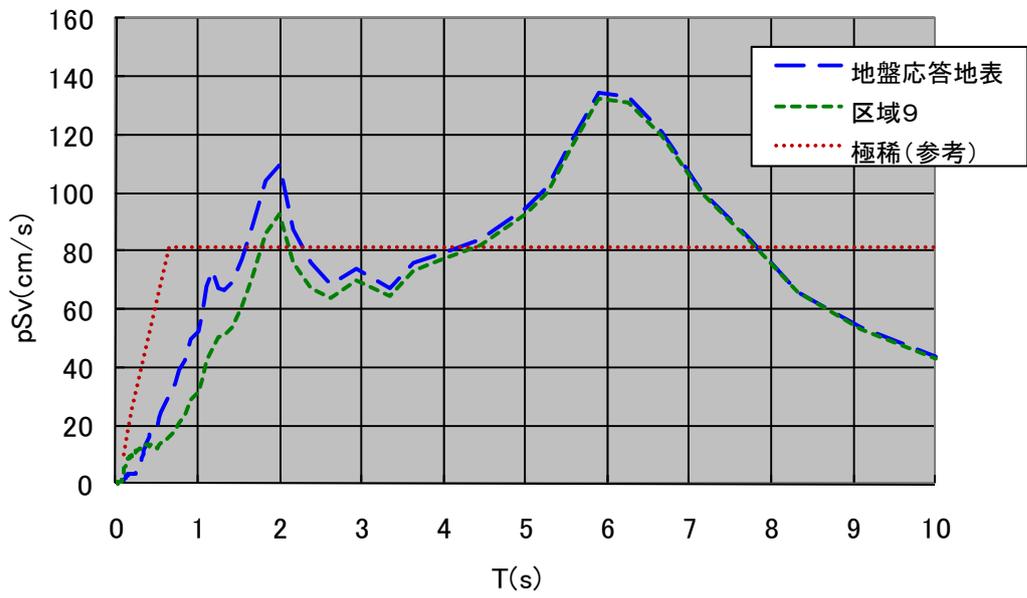


図 2.5-4 地盤応答計算例; 地表の地震動 $a_2(t)$

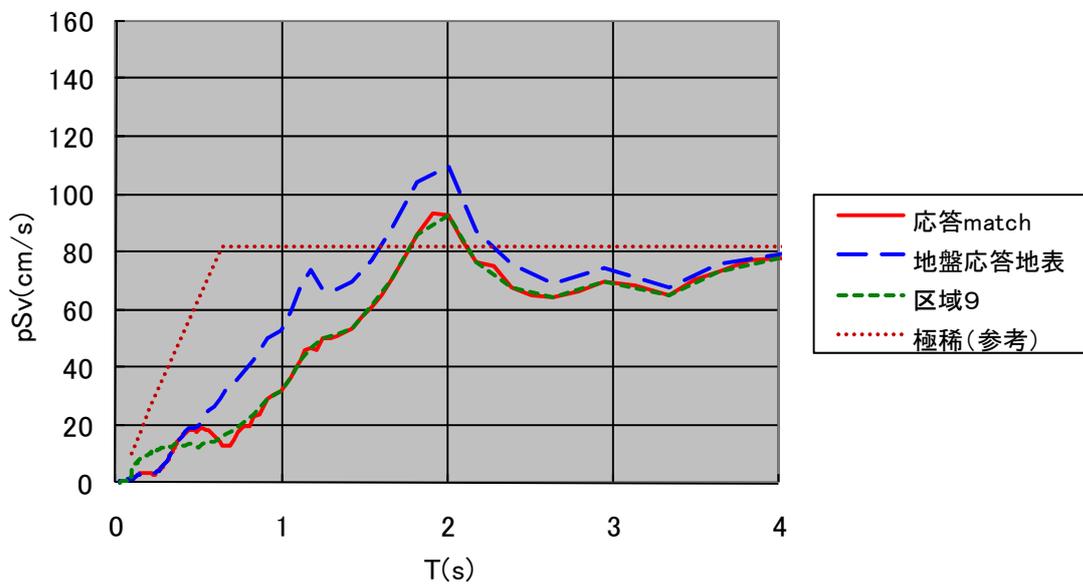
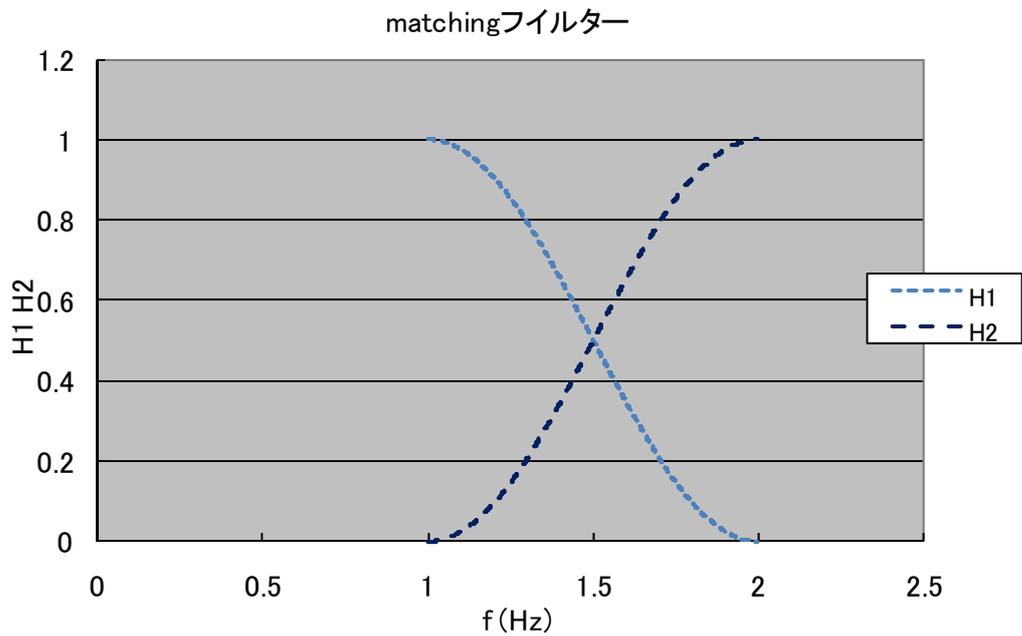
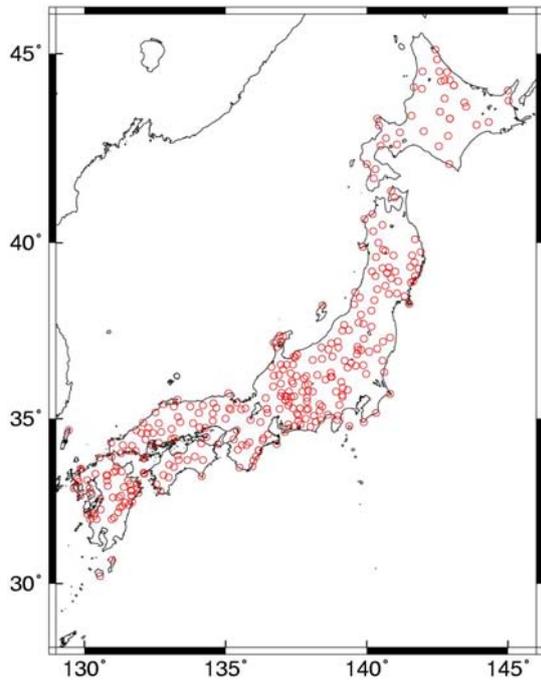
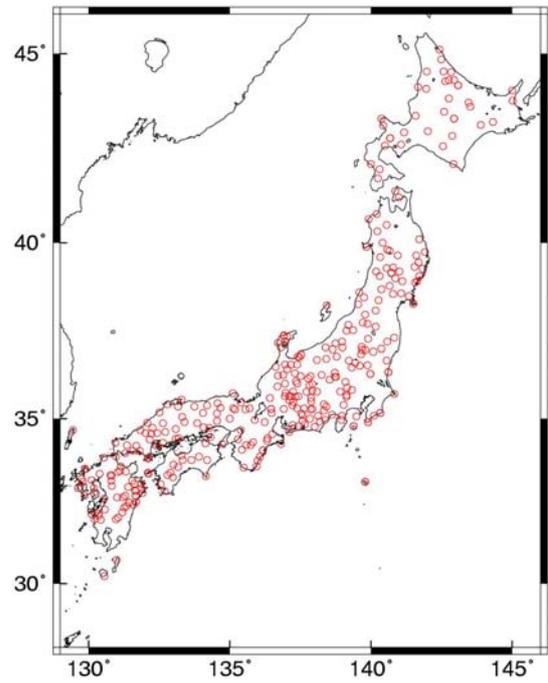


図 2.5-5 Step2 の結果 ; マッチングフィルターで接続した、建物用入力地震動の設定結果

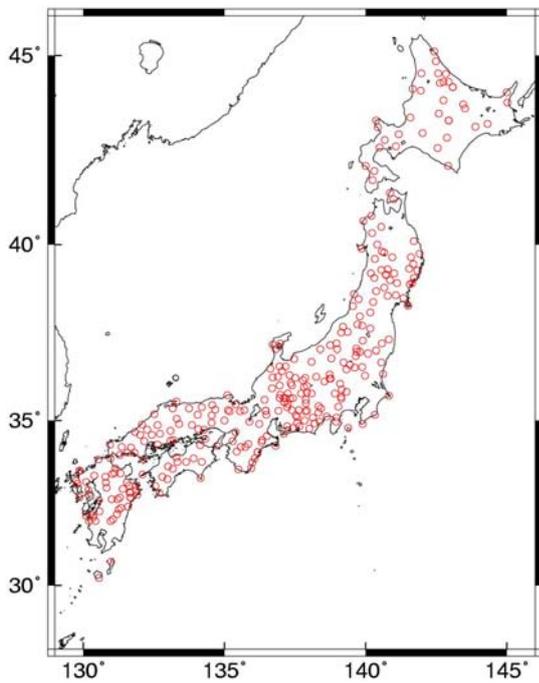


(a) 旧経験式

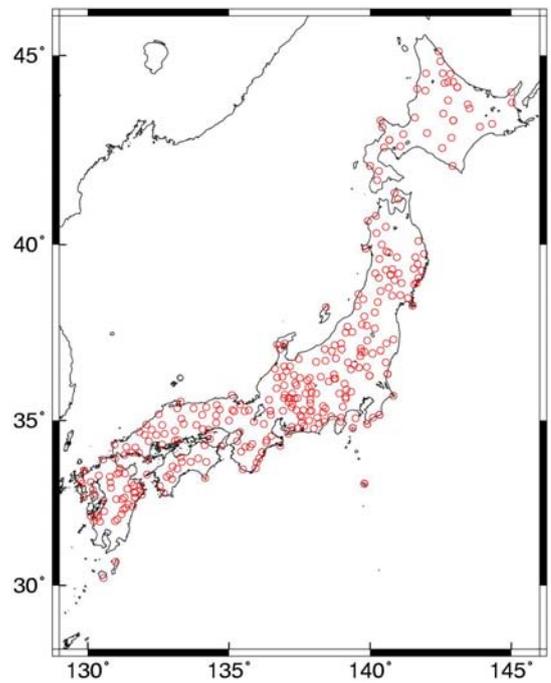


(b) 新経験式

図 2.5-6 スペクトルの工学的基盤の地盤増幅率のサイト係数算出に用いた工学的基盤の観測点



(a) 旧経験式



(b) 新経験式

図 2.5-7 群遅延時間のサイト係数算出に用いた工学的基盤の観測点

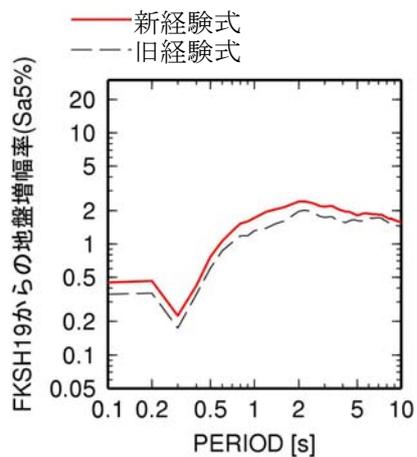


図 2.5-8 スペクトルの経験式の工学的基盤での地盤増幅率

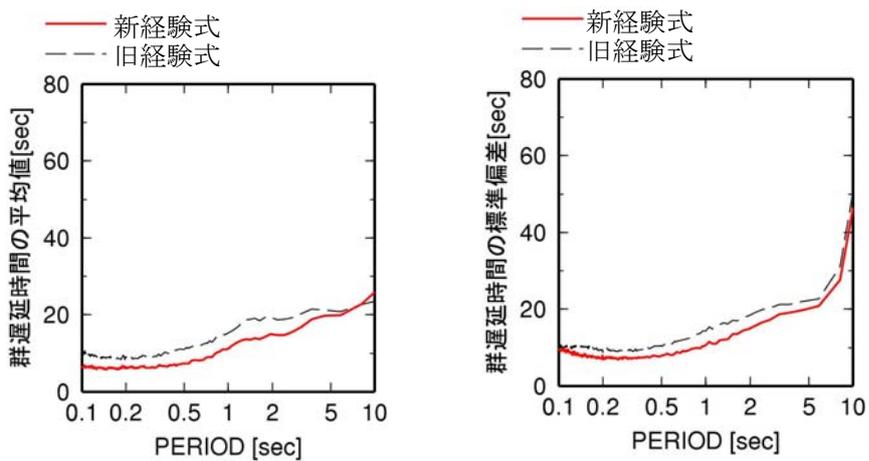


図 2.5-9 群遅延時間の経験式の工学的基盤でのサイト係数