

4. 断層モデルを用いた地震動評価手法の工学的検証

4.1 2016 年熊本地震本震の震源断層周辺のサイト増幅特性の推定

4.1.1 強震観測点（主に K-NET）のサイト増幅特性

4.1.1(1) 概要

ここでは、K-NET の各サイトにおけるサイト増幅特性検討に用いる地盤モデルの作成を試みた。K-NET サイトは孔中観測点を持たないので、モデルの検証には表面波の H/V スペクトル比の観測と理論計算の比較を用いるものとした。具体的には地震記録の後続部分の Radial 成分と上下動成分のスペクトル比と、水平成層構造を仮定して計算されるレーリー波の水平/上下(R/V)比とを対比してモデルの検証・修正を行った（小林・儘田、2010）。なお、レーリー波の理論計算には DISPER80（Saito, 1988）を用いた。

地盤モデルは K-NET のウェブサイトで公開されている各観測点の土質データと、J-SHIS で公開の地域メッシュ毎の深部構造をつなぐ格好で初期モデルを作成し、R/V スペクトル計算値が観測値に近づくようチューニングした。モデルの検討は 0.5 から 10Hz の周波数成分を対象とした。

4.1.1(2) 観測記録の収集・整理

まず、気象庁一元化震源にあたり、2016/4/14 から 7/13 までの 3 か月間で発生した地震の内、発生地域に Kumamoto の文字を含む M4.5~5.5 の地震を検索した。マグニチュードの下限は観測点数の確保、上限は点震源としての扱いを勘案して設定した。熊本地震の震源域から離れたものは外し、23 地震を選定した。

図 4.1.1-1 に検討に用いた地震の震央位置、表 4.1.1-1 に各地震の諸元と観測点毎の観測状況を示す。図 4.1.1-1 の番号は表 4.1.1-1 の番号に対応している。なお、観測地震数が 5 に満たない観測点は検討から外した。図 4.1.1-2 に地盤モデルの検討を実施した観測点の位置を AVS30 の分布と合わせて示す。

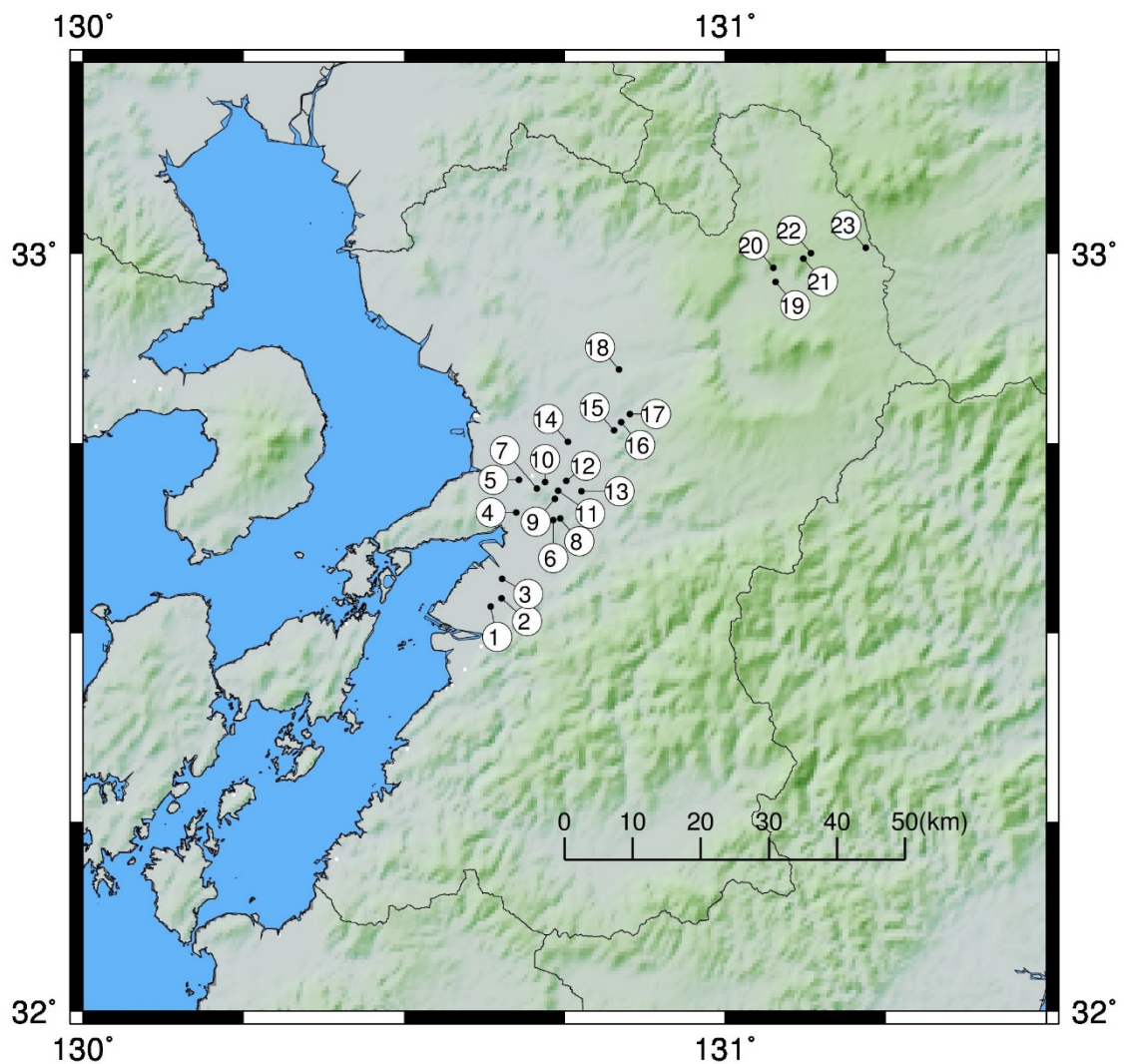


図 4.1.1-1 検討に用いた地震の震央位置.

表 4.1.1-1 検討に用いた地震の諸元

地震の諸元						観測記録の有無										
						KMM001	KMM004	KMM005	KMM006	KMM007	KMM008	KMM009	KMM010	KMM011	KMM012	KMMH16
No.	年月日時分	東経	北緯	深さ(km)	Mj											
1	201604191752	130.635	32.535	10.0	5.5						●		●	●	●	
2	201604160916	130.652	32.546	7.0	4.5				●		●		●	●	○	
3	201604192047	130.653	32.572	10.8	5.0				●		●		●	●	○	●
4	201604250044	130.675	32.659	11.5	4.5				●		●	●	●	●	●	●
5	201604160820	130.679	32.702	12.5	4.6			●	●		○	●	●	●	●	●
6	201604161038	130.732	32.649	9.6	4.5				●		●	●		●	●	●
7	201606182046	130.707	32.691	10.1	4.6			●	●		●	●	●	●	●	●
8	201604161427	130.743	32.651	7.7	4.6			●	○		●	●	●	●	●	○
9	201604142238	130.735	32.677	11.1	5.0			●	●		●	●	●	●	●	●
10	201604161602	130.720	32.699	12.3	5.4			●	●		●	●	●	●	●	
11	201604142222	130.740	32.688	12.1	4.6			●	●		●	●	●	●	●	●
12	201604150153	130.753	32.701	11.6	4.8			●	●		●	●	●	●	●	●
13	201604170446	130.776	32.687	10.3	4.5			○	○		○	●	●	●	●	
14	201604162105	130.755	32.752	17.6	4.5			●	●		●	●	●	●		
15	201604142343	130.827	32.767	14.2	5.1			●	●	●	●	●		●		●
16	201604142329	130.838	32.778	12.8	4.8			●	●	●	●	●		●		
17	201604142328	130.852	32.789	13.0	4.6		●	●	○	○	○	○		○		●
18	201604160948	130.835	32.847	15.9	5.4		●	●	●	●	●	●		●		●
19	201604170014	131.079	32.962	8.9	4.8	●	●	●		●						
20	201604160424	131.075	32.981	11.9	4.6	●	●			●						
21	201605051040	131.122	32.993	10.8	4.9	●	●	●		●						
22	201605051031	131.134	33.000	11.2	4.6	●	●			●						
23	201604161403	131.219	33.007	8.7	4.6	●	●			●						
						●使用可能な記録。○後続波などで使用不可。										

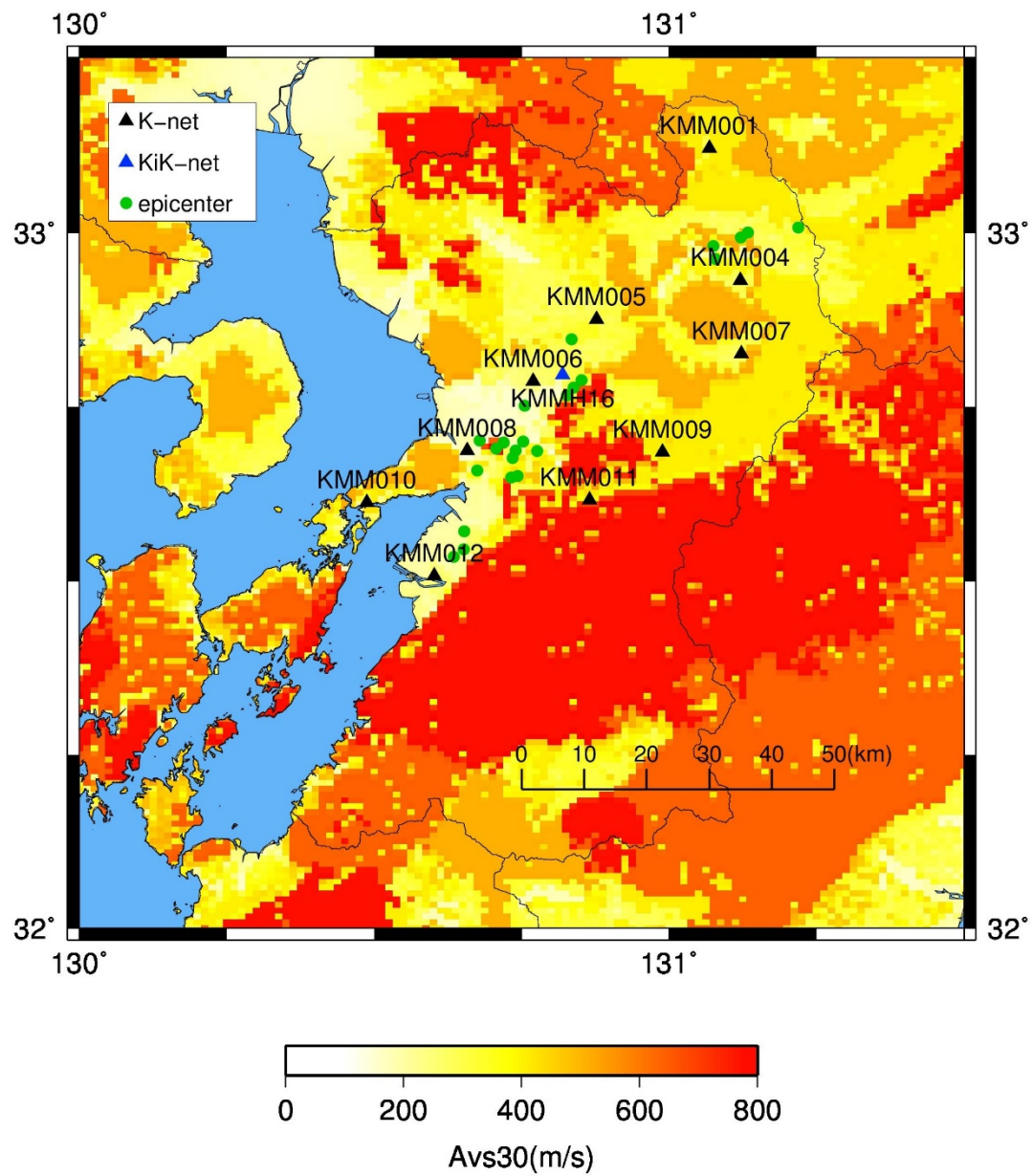


図 4.1.1-2 地盤モデルの検討を実施した観測点の位置.

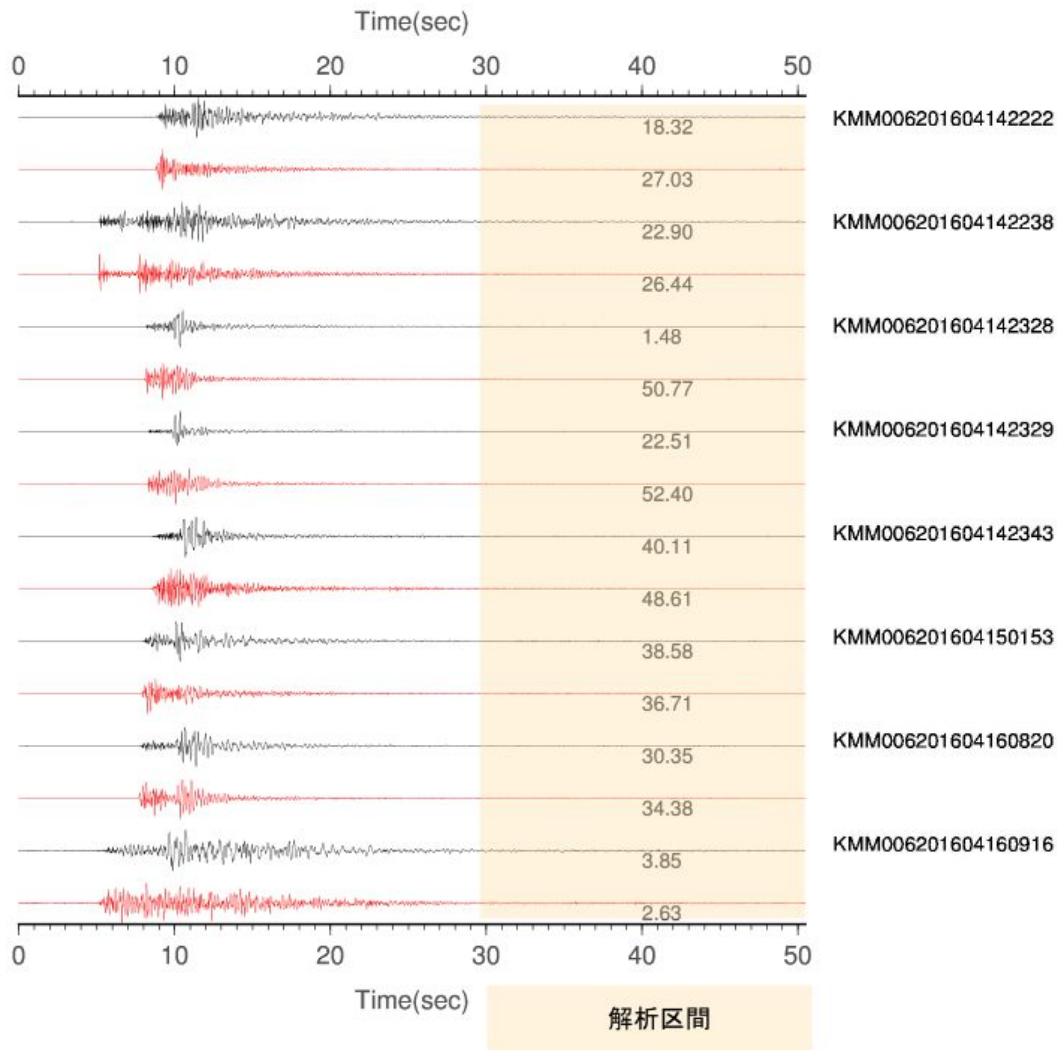


図 4.1.1-3 地震動解析区間の一例.

表面波を対象とすることから図 4.1.1-3 に示すように、観測記録の主要動から暫く経た時間帯（既往研究：小林・儘田[2010]を参考に S 波主要動後 20 秒以降）の波形を用いるものとした。図 4.1.1-4 に解析区間の振幅を拡大して示す。この図の KMM006201604142328 のように別の地震と思われるフェーズが見られる記録がいくつかあり、これらを除いたデータセットで検討を実施した。

表 4.1.1-1 の各地震・各記録について S 波主要動後の状況を概観したところ安定して信号が得られるのは 20 秒程度と判断されたので、記録長は 20 秒とした。

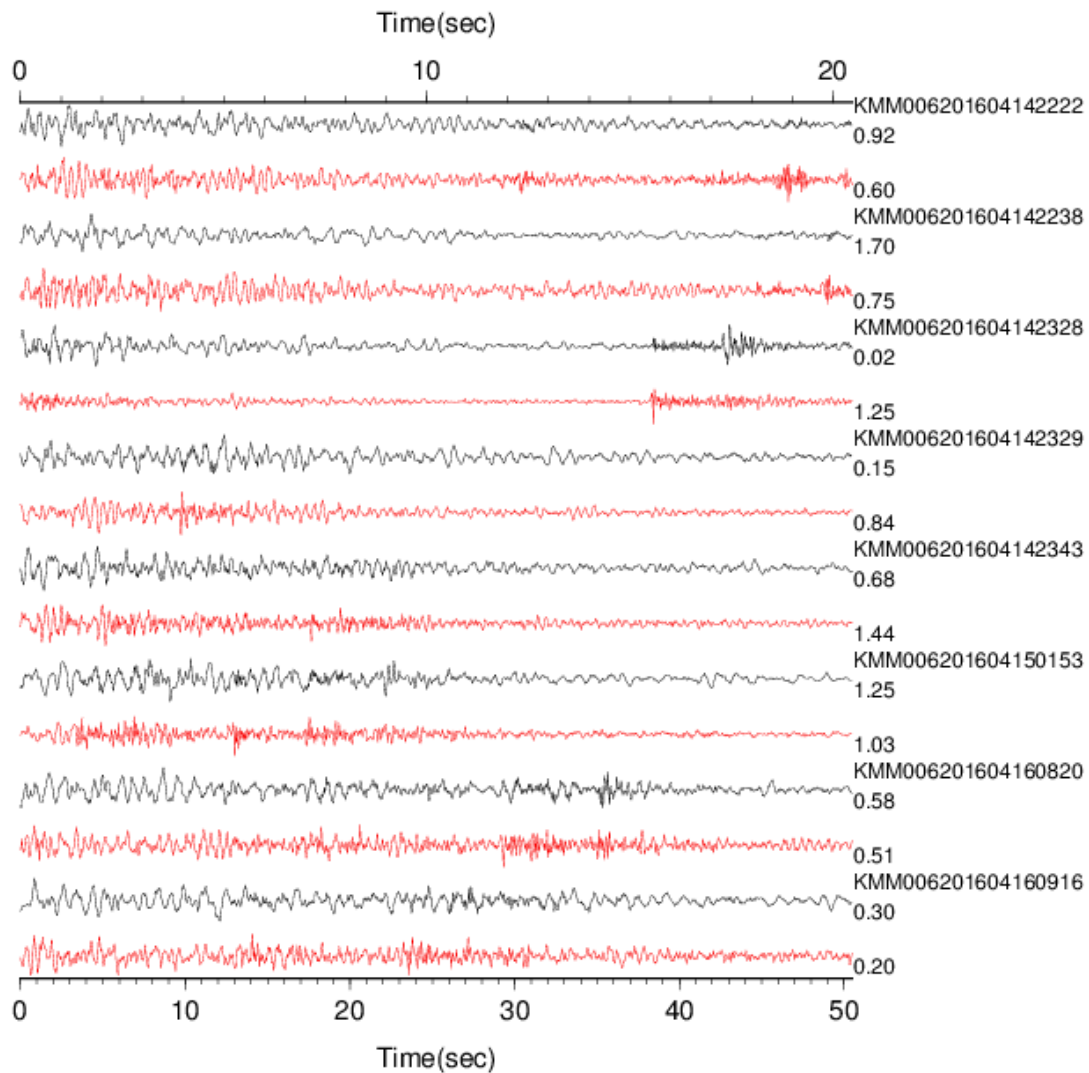


図 4.1.1-4 解析区間の波形例.

使用する波形の記録長を 20 秒としたことの影響を見る目的で、主要動後の記録が長い波形を探し、20 秒で切った場合とできるだけ長い記録長とした場合の比較を行った。図 4.1.1-5 に実質の記録長が 20 秒の場合と 50 秒弱の場合の R/V スペクトル比を比較して示す。周波数間隔を揃えるため、両者とも 0 詰めて 8192 データとしている。実質の記録長の 1/10 でテーパーを施した。スペクトル比の概要に大きな変化は見られない。

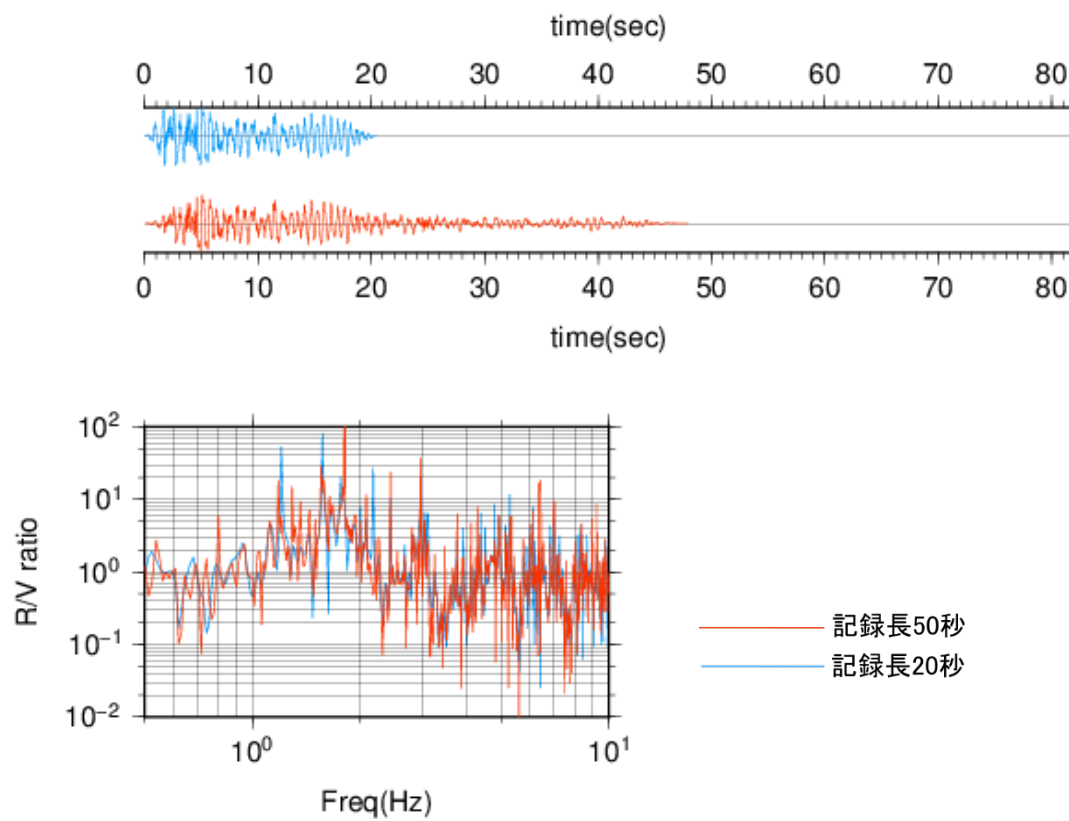


図 4.1.1-5 実質の記録長が 20 秒の場合と 50 秒弱の場合の R/V スペクトル比の比較
(使用記録 : KMM010 201604191752).

4.1.1(3) KiK-net サイトにおける手法の検証

表面波を用いた地盤特性の検討手法の検証を孔中観測点がある KiK-net サイトの記録を用いて実施した。

図 4.1.1-6, 7 にチューニング前後の R/V スペクトル比を示す。観測に見られる二つのピークがあまり目立たなくなった。図 4.1.1-8, 9 にチューニング前後の地盤モデルを示す。初期モデルはボーリングデータを適当な仮定で J-SHIS の深部構造データに繋いだものである。深度 10～15m のやや大きな V_p , V_s を廃し, 250m～650m の V_p , V_s を深部構造の値に変えた結果, R/V スペクトル比の形状が改善された。

この地表/孔中のスペクトル比を観測とチューニング前後の計算結果と比較して図 4.1.1-10 に示す。スペクトル比をターゲットにした同定に比較するとチューニング前後の変化は少ないものと思われる。

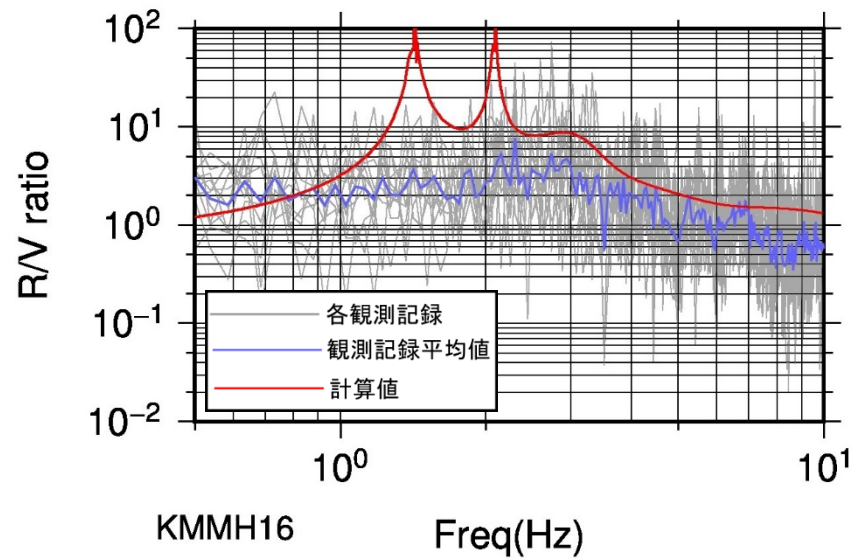
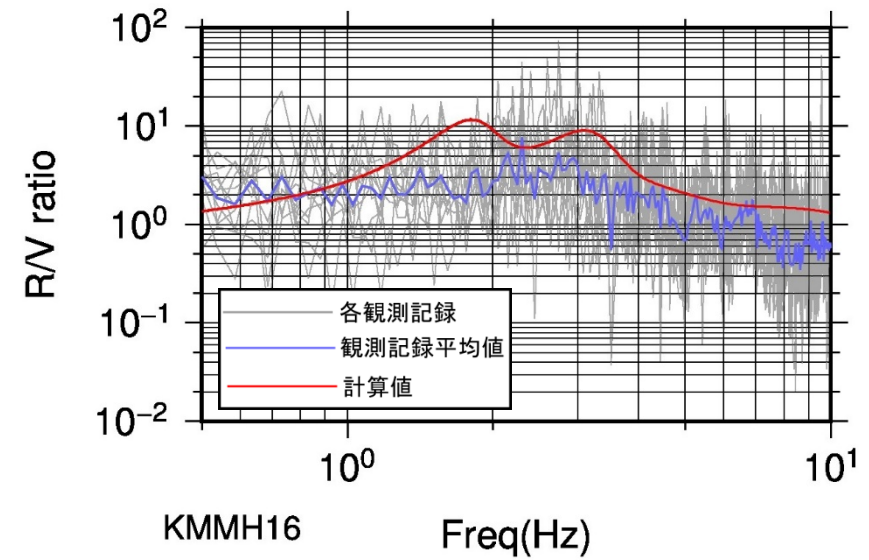


図 4.1.1-6 KMMH16 の R/V スペクトル比 (初期モデル).

図 4.1.1-7 KMMH16 の R/V スペクトル比.
(チューニング後モデル)

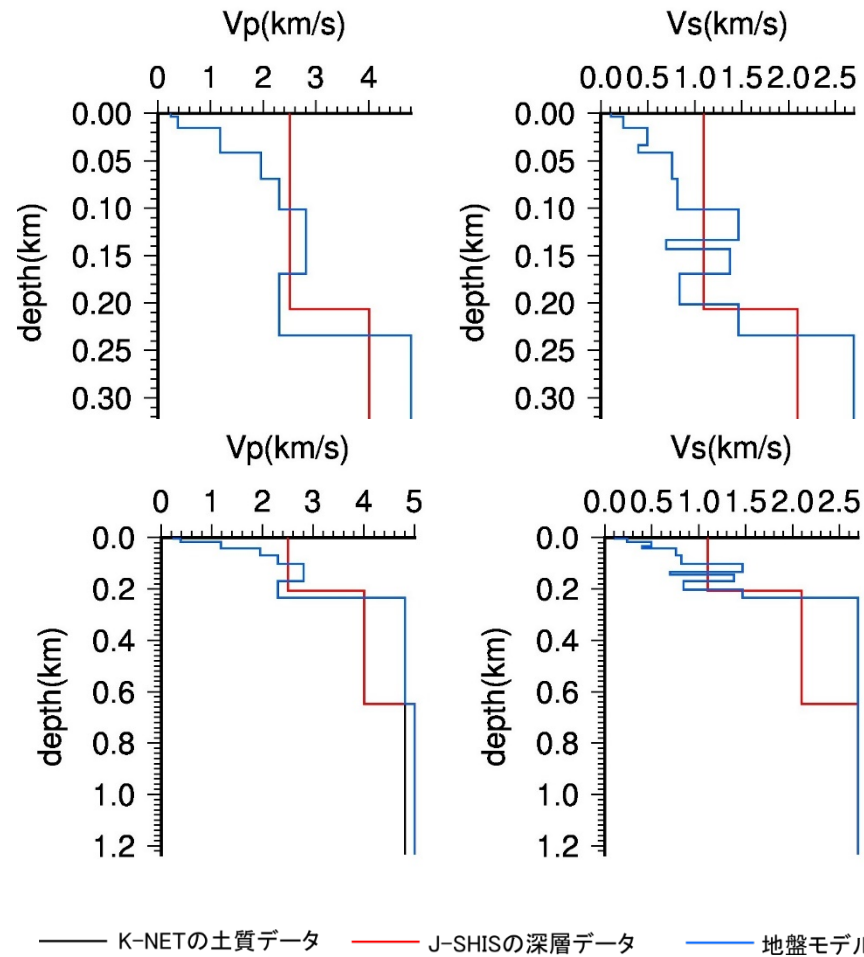


図 4.1.1-8 KMMH16 地盤モデル (初期モデル).

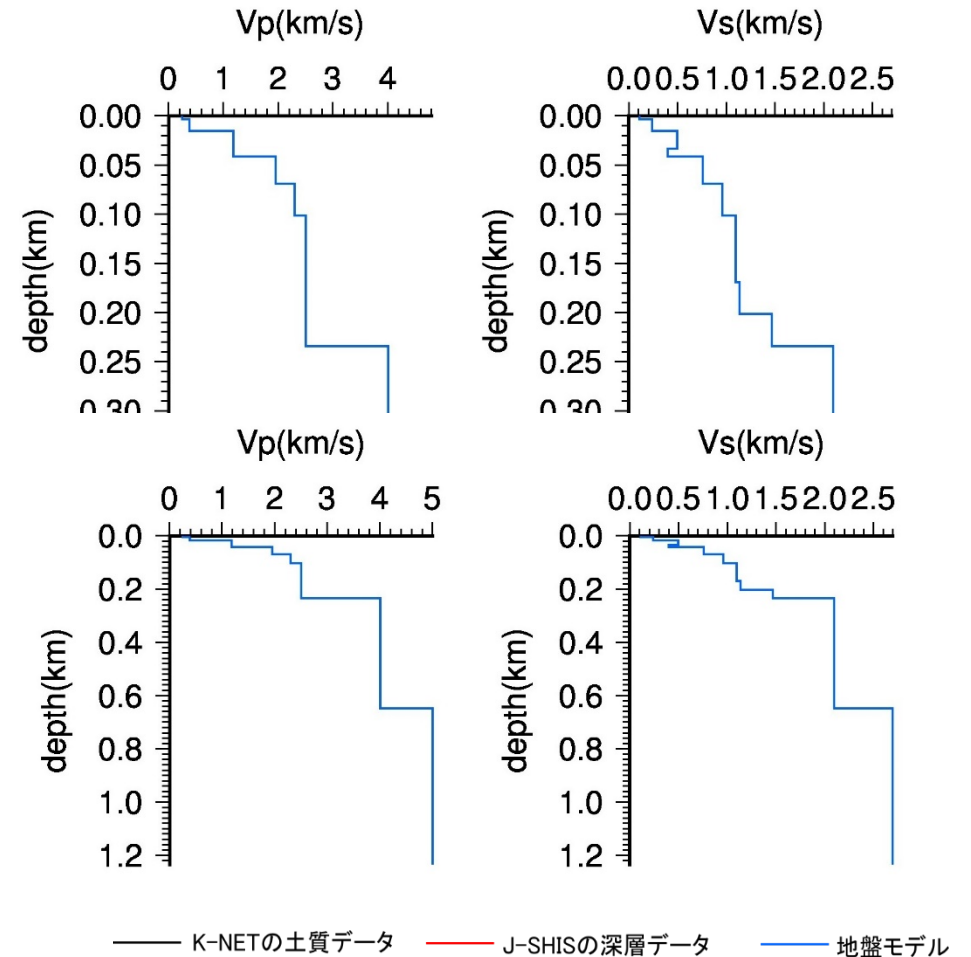


図 4.1.1-9 KMMH16 地盤モデル (チューニング後).

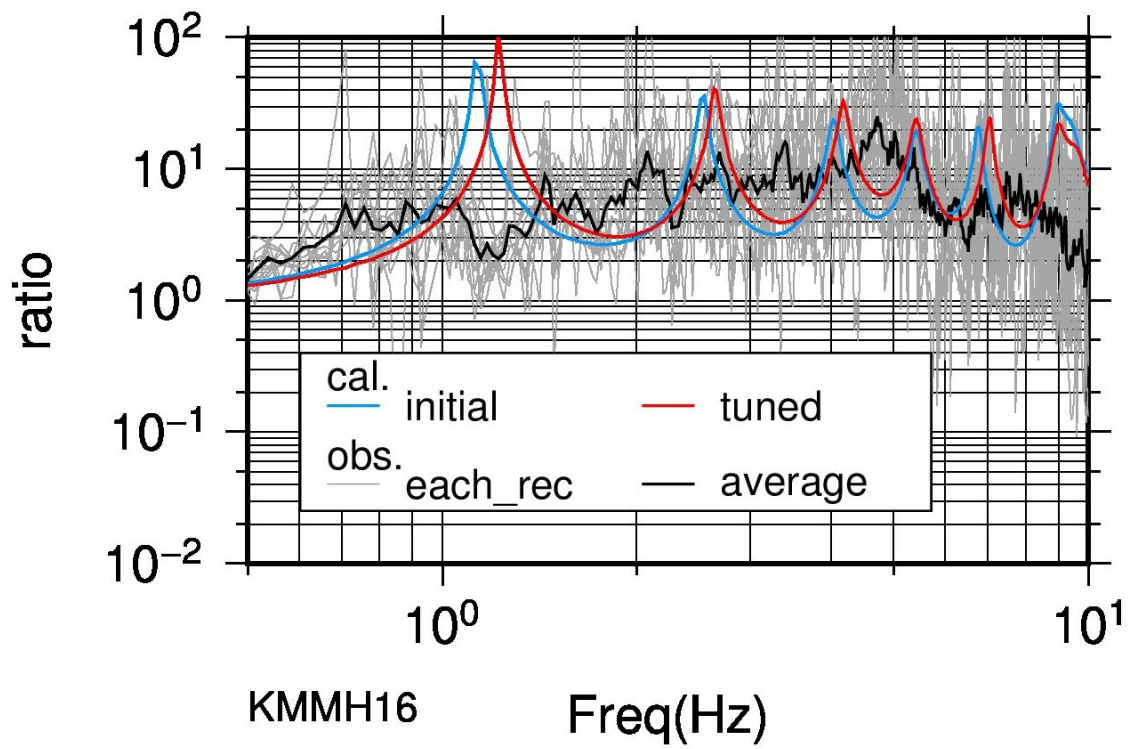


図 4.1.1-10 地表/孔中のスペクトル比、比較.

4.1.1(4) K-NET サイトにおける地盤モデルの推定

①KMM001

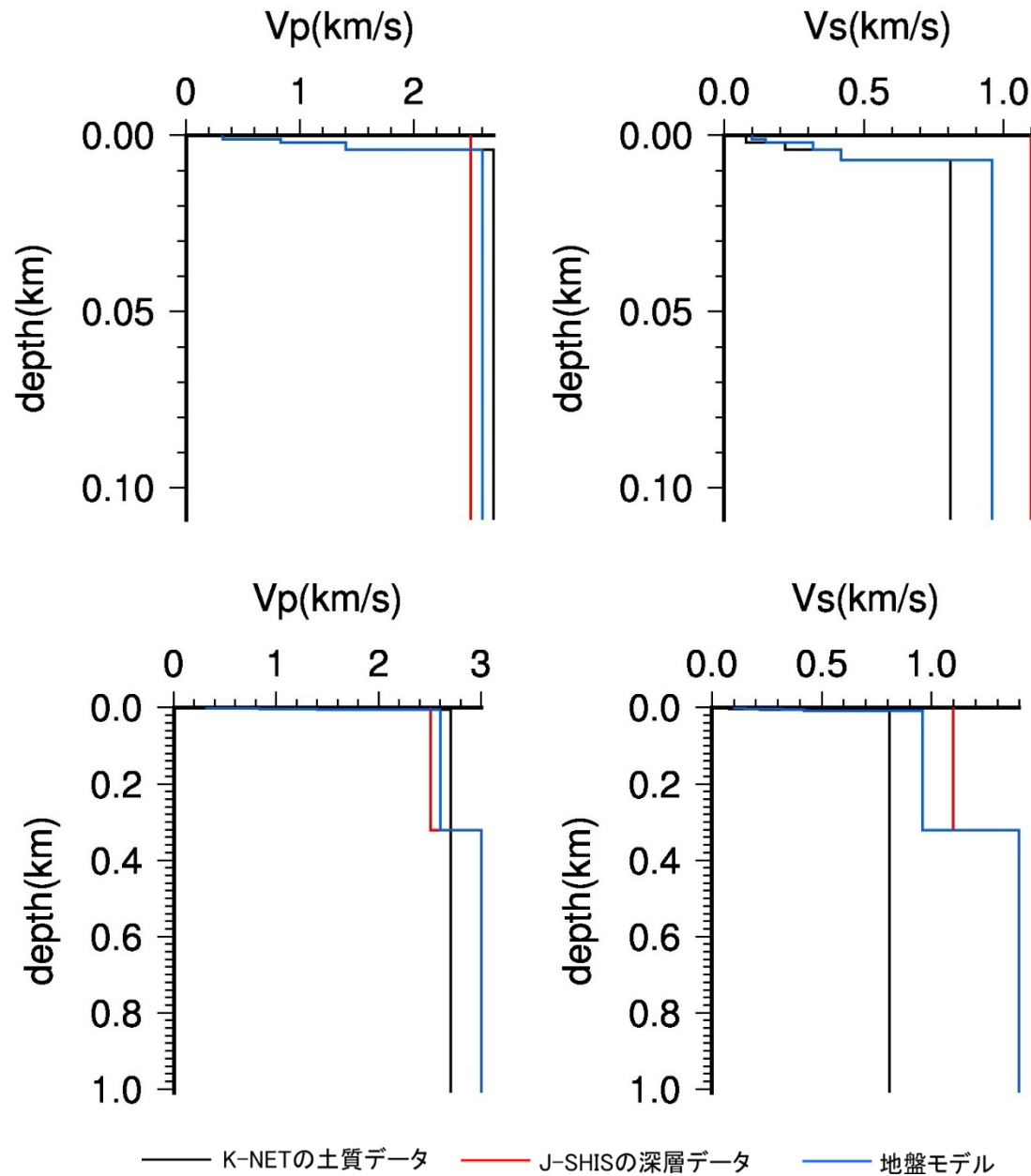


図 4.1.1-11 KMM001 地盤モデル.

表 4.1.1-2 KMM001 地盤モデルデータ

層厚(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	ρ (g/cm ³)
1	320	100	1.31
1	830	150	1.66
2	1400	320	1.90
3	2600	420	2.21
313	2600	960	2.21
981	3000	1400	2.29
—	5000	2700	2.61

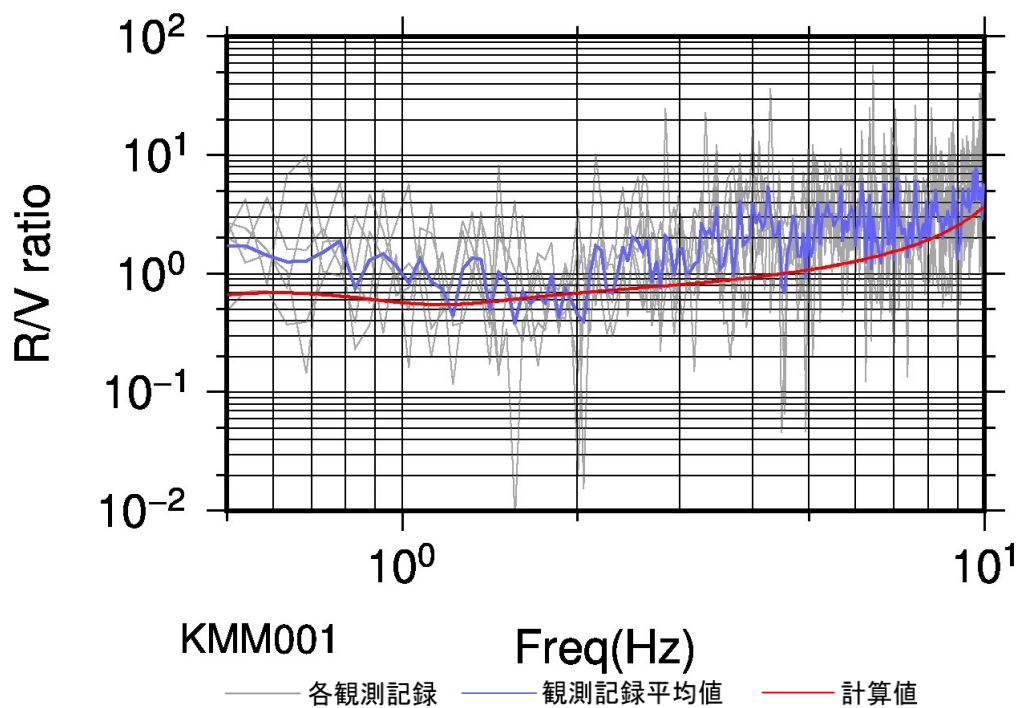


図 4.1.1-12 R/V スペクトル比：観測値と計算値比較(KMM001).

図 4.1.1-11 および表 4.1.1-2 に KMM001 についてチューニングした地盤モデルを，図 4.1.1-12 にこのモデルによる R/V スペクトル比を観測と比較して示す．観測スペクトル比に目立ったピークがないため，対象サイトは硬質地盤であることが示唆される．

②KMM004

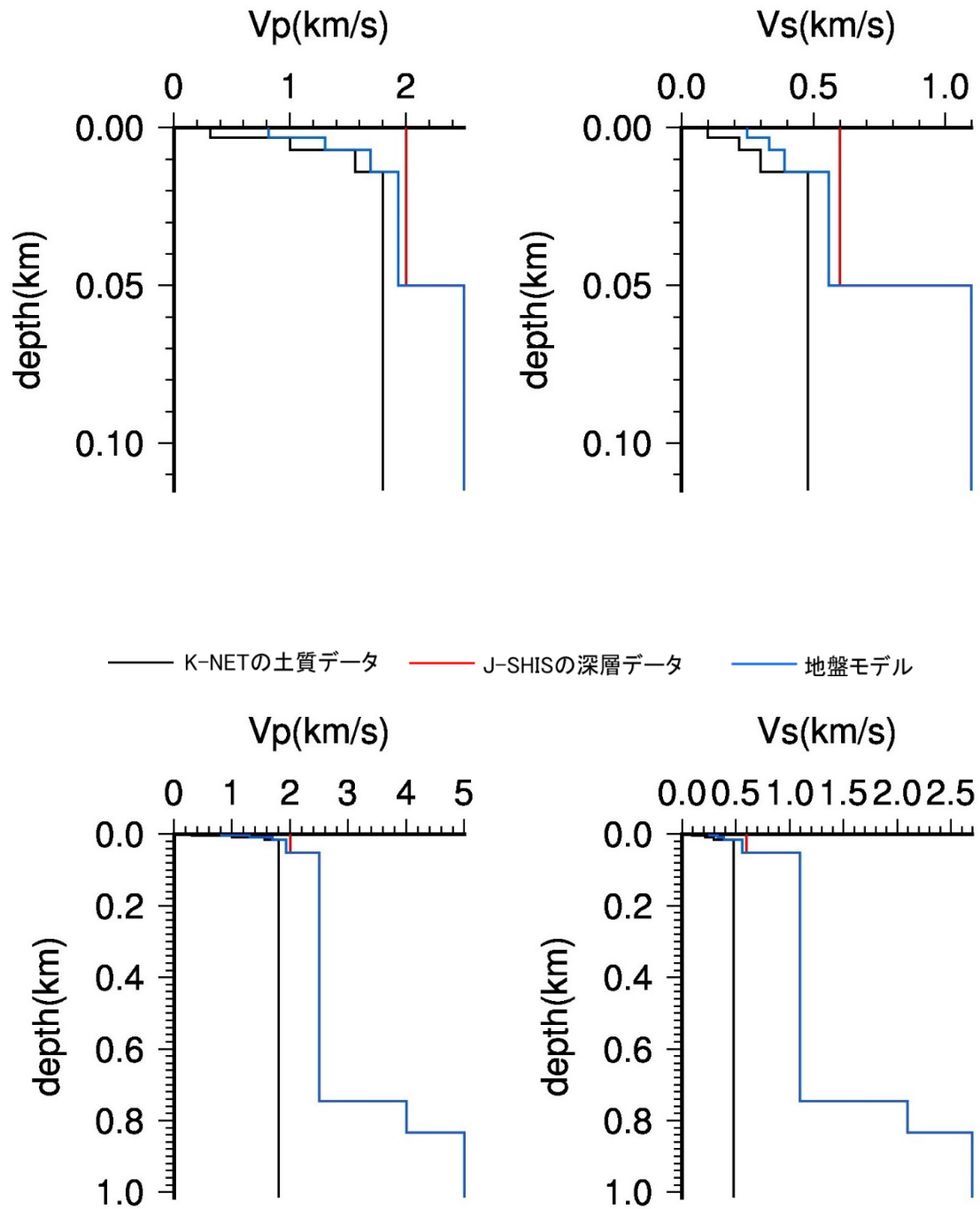


図 4.1.1-13 KMM004 地盤モデル.

表 4.1.1-3 KMM004 地盤モデルデータ

層厚(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	ρ (g/cm ³)
3	817	250	1.66
4	1300	334	1.86
7	1692	390	1.99
36	1930	558	2.05
696	2500	1100	2.19
86	4000	2100	2.47
—	5000	2700	2.61

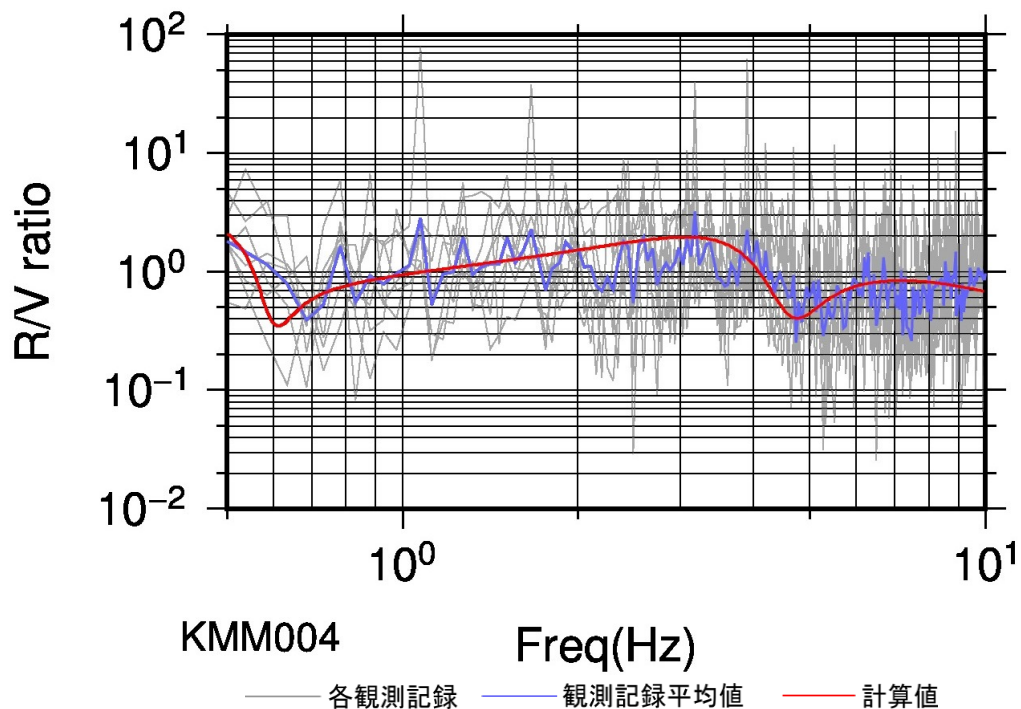


図 4.1.1-14 R/V スペクトル比：観測値と計算値比較(KMM004).

図 4.1.1-13 および表 4.1.1-3 に KMM004 についてチューニングした地盤モデルを，図 4.1.1-14 にこのモデルによる R/V スペクトル比を観測と比較して示す．浅い地盤については地震波速度が若干速くなっている．

③KMM005

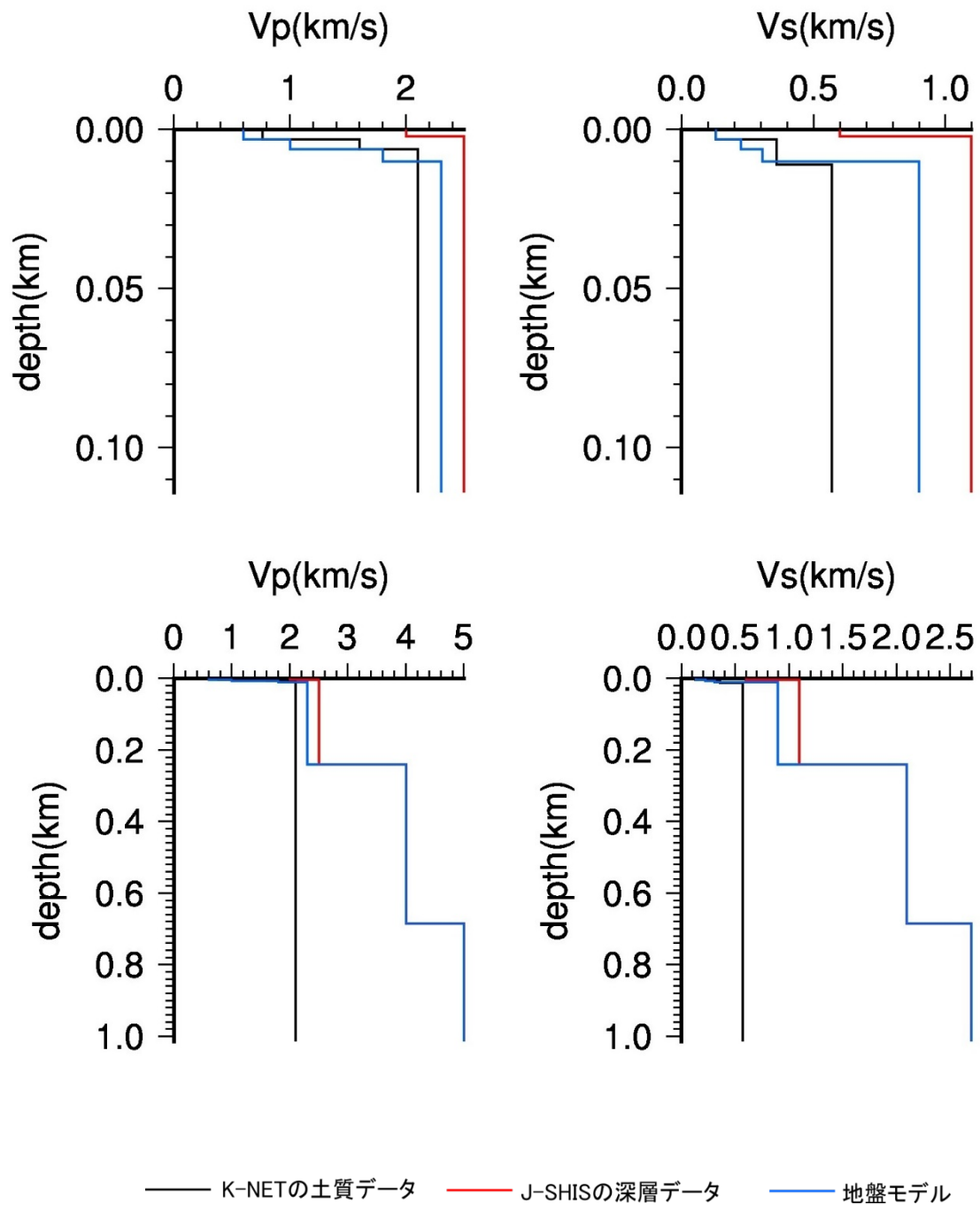


図 4.1.1-15 KMM005 地盤モデル.

表 4.1.1-4 KMM005 地盤モデルデータ

層厚(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	ρ (g/cm ³)
3	600	130	1.53
3	1000	225	1.74
4	1800	308	2.02
1	2300	900	2.15
4	2300	900	2.15
224	2300	900	2.15
445	4000	2100	2.40
—	5000	2700	2.50

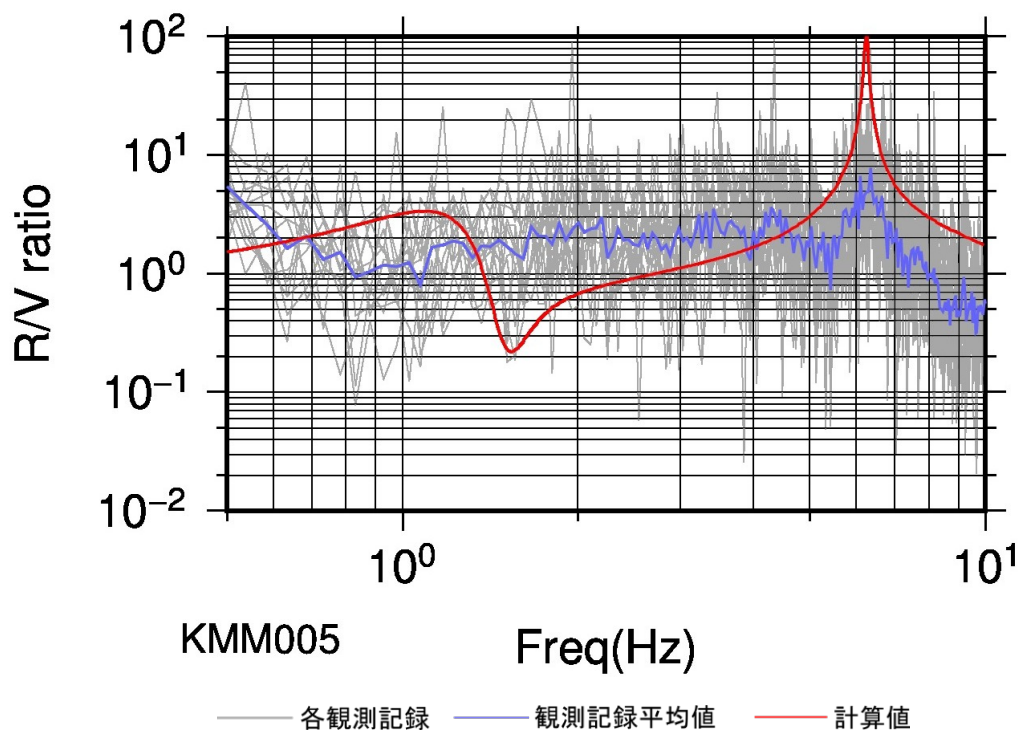


図 4.1.1-16 R/V スペクトル比：観測値と計算値比較(KMM005).

図 4.1.1-15 および表 4.1.1-4 に KMM005 についてチューニングした地盤モデルを，図 4.1.1-16 にこのモデルによる R/V スペクトル比を観測と比較して示す．その結果，観測スペクトル比に見られる 6Hz 付近のピークの再現が可能であった．なお，2Hz 以下の成分については十分な再現結果が得られていない．

④ KMM006

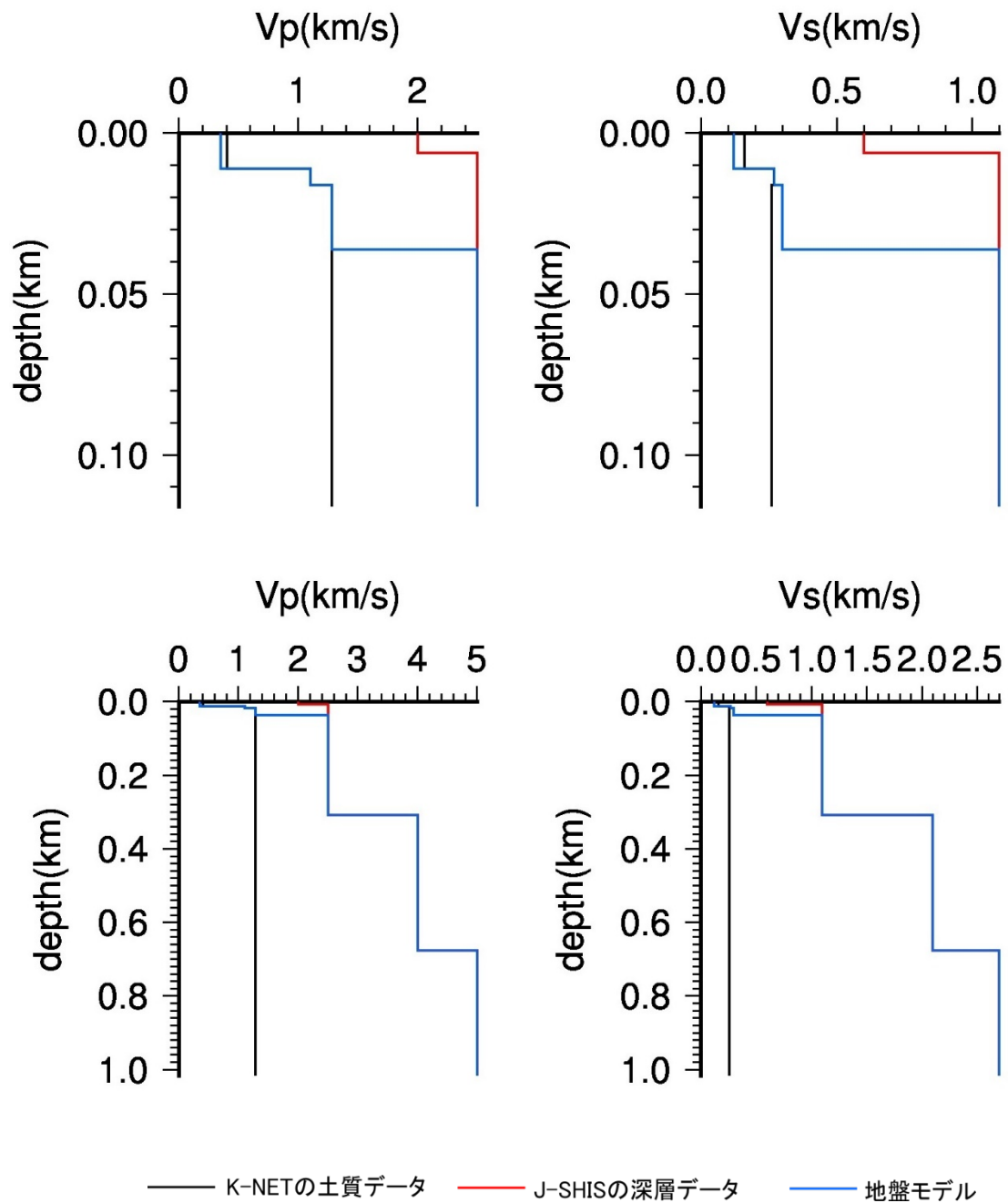


図 4.1.1-17 KMM006 地盤モデル.

表 4.1.1-5 KMM006 地盤モデルデータ

層厚(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	ρ (g/cm ³)
11	350	120	1.34
5	1100	270	1.79
20	1280	300	1.85
272	2500	1100	2.19
11	4000	2100	2.47
357	4000	2100	2.47
—	5000	2700	2.61

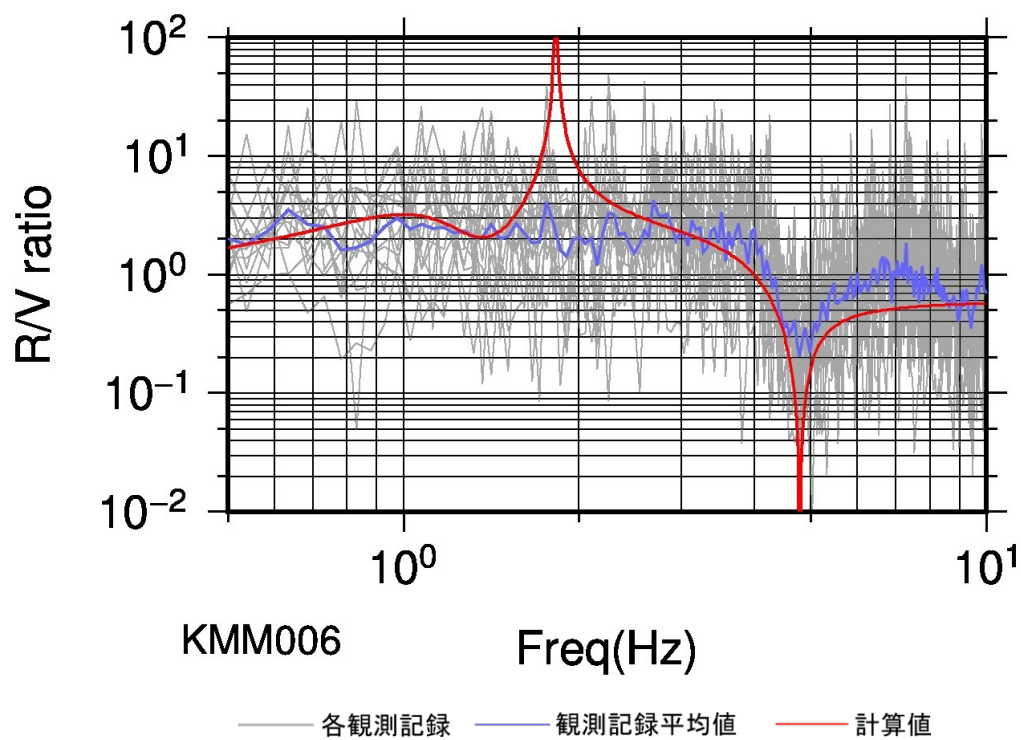


図 4.1.1-18 R/V スペクトル比：観測値と計算値比較(KMM006).

図 4.1.1-17 および表 4.1.1-5 に KMM006 についてチューニングした地盤モデルを，図 4.1.1-18 にこのモデルによる R/V スペクトル比を観測と比較して示す．観測スペクトル比に見られる 5Hz 付近の落ち込みの再現が可能であった．

⑤KMM007

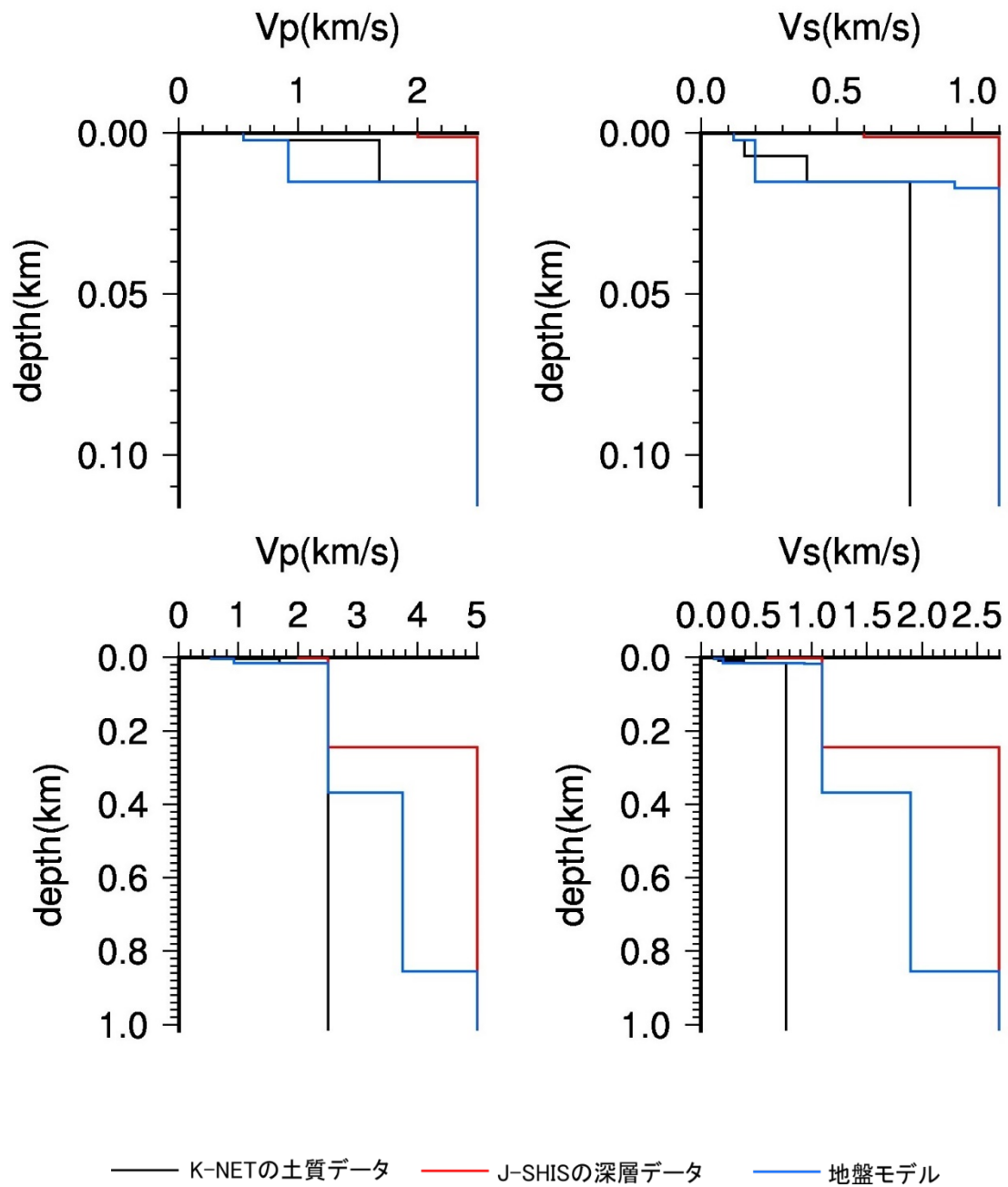


図 4.1.1-19 KMM007 地盤モデル.

表 4.1.1-6 KMM007 地盤モデルデータ

層厚(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	ρ (g/cm ³)
2	540	120	1.49
5	917	201	1.71
8	917	201	1.71
2	2500	935	2.19
351	2500	1100	2.19
486	3750	1900	2.43
—	5000	2700	2.50

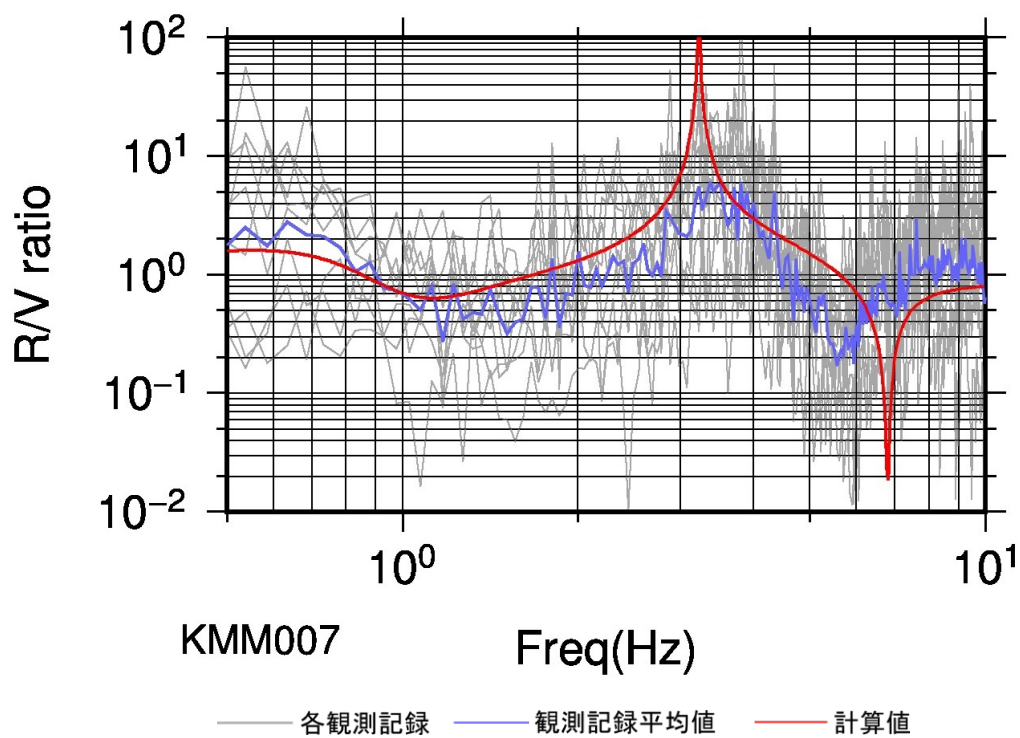


図 4.1.1-20 R/V スペクトル比：観測値と計算値比較(KMM007).

図 4.1.1-19 および表 4.1.1-6 に KMM007 についてチューニングした地盤モデルを，図 4.1.1-20 にこのモデルによる R/V スペクトル比を観測と比較して示す．観測と計算スペクトル比の傾向はよく一致している．

⑥KMM008

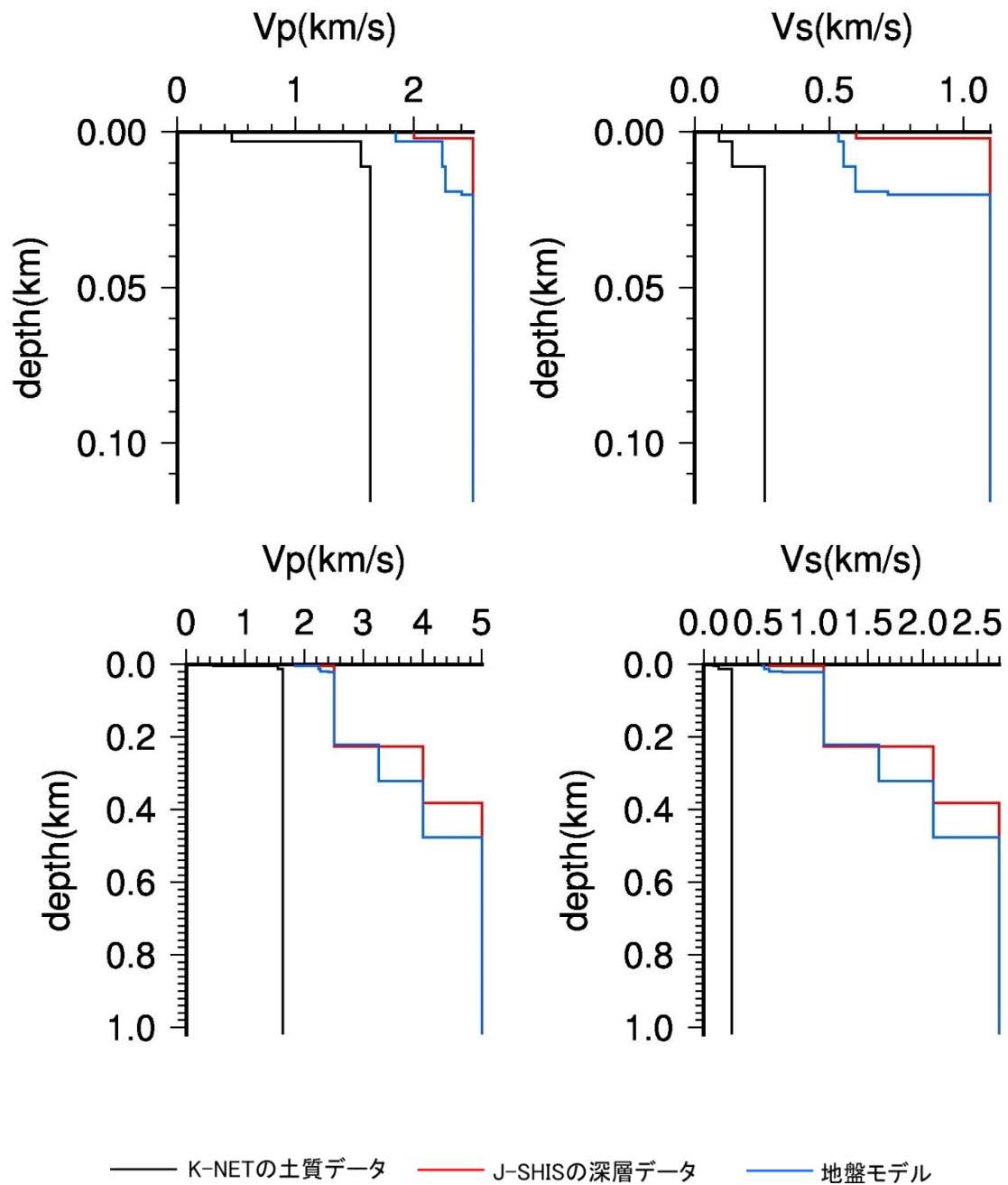


図 4.1.1-21 KMM008 地盤モデル.

表 4.1.1-7 KMM008 地盤モデルデータ

層厚(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	ρ (g/cm ³)
3	1846	536	2.03
8	2238	554	2.13
8	2267	598	2.14
1	2400	720	2.17
200	2500	1100	2.15
100	3250	1600	2.34
156	4000	2100	2.40
—	5000	2700	2.50

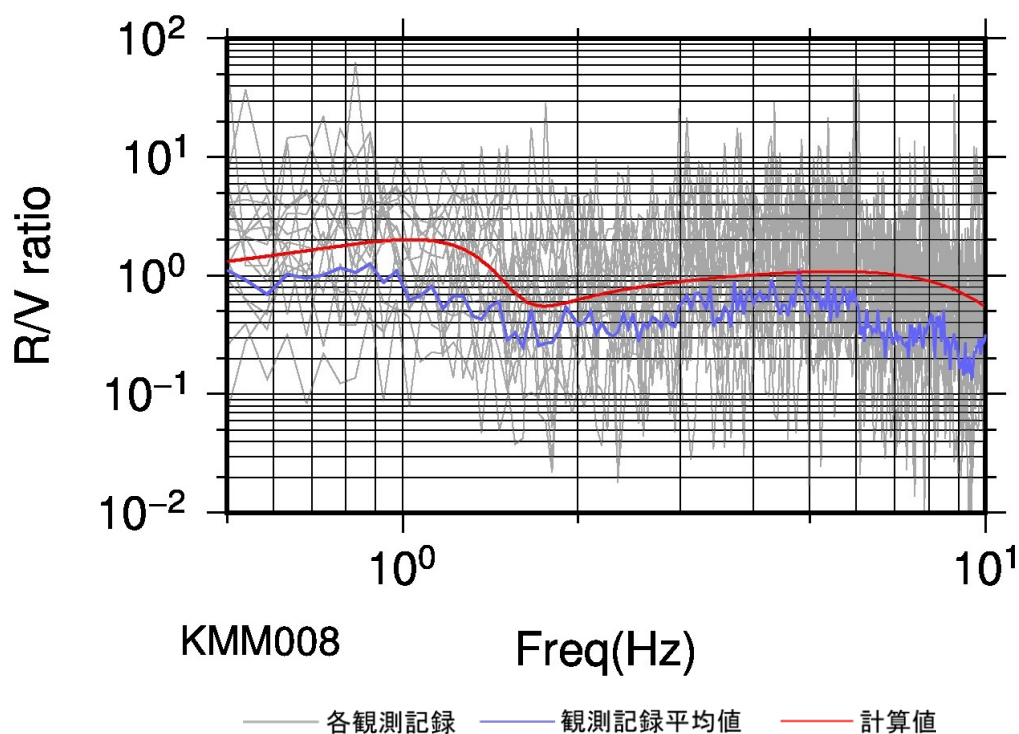
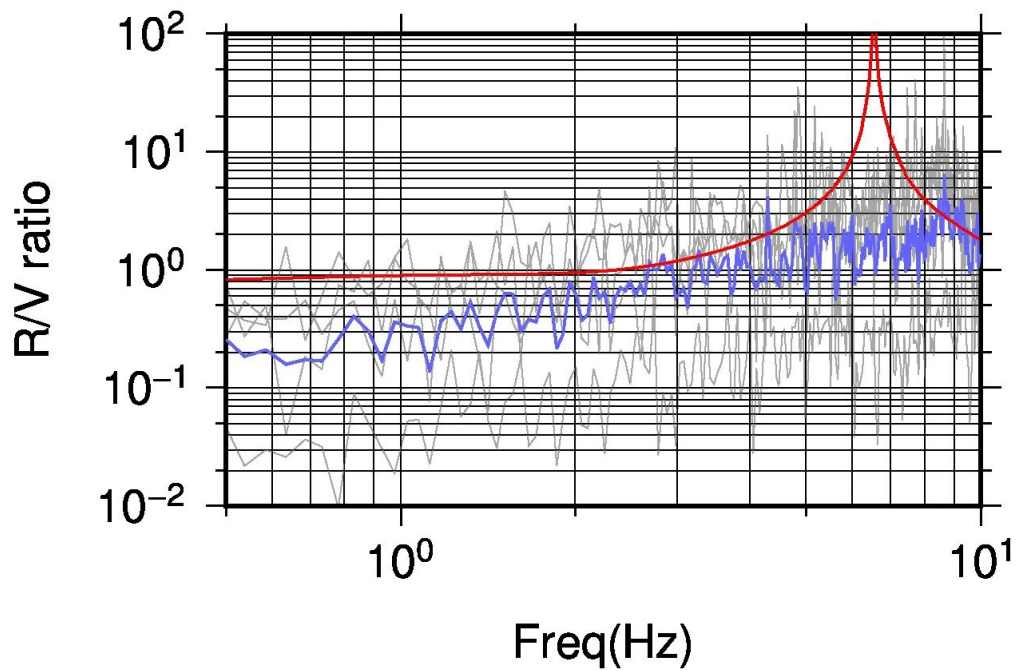


図 4.1.1-22 R/V スペクトル比：観測値と計算値比較(KMM008).

図 4.1.1-21 および表 4.1.1-7 に KMM008 についてチューニングした地盤モデルを，図 4.1.1-22 にこのモデルによる R/V スペクトル比を観測と比較して示す．観測スペクトル比に目立ったピークがないため，対象サイトは硬質地盤であることが示唆される．

⑦KMM009



kmm009_uw.txt

—— 各観測記録 — 観測記録平均値 — 計算値

図 4.1.1-23 R/V スペクトル比：観測値と計算値比較(KMM009).

KMM009 は観測データのバラつきが大きく、明瞭な R/V スペクトル比の傾向の把握が困難であった。このため、検証・チューニングができないため、地盤構造モデルの表示は行っていない。

⑧KMM010

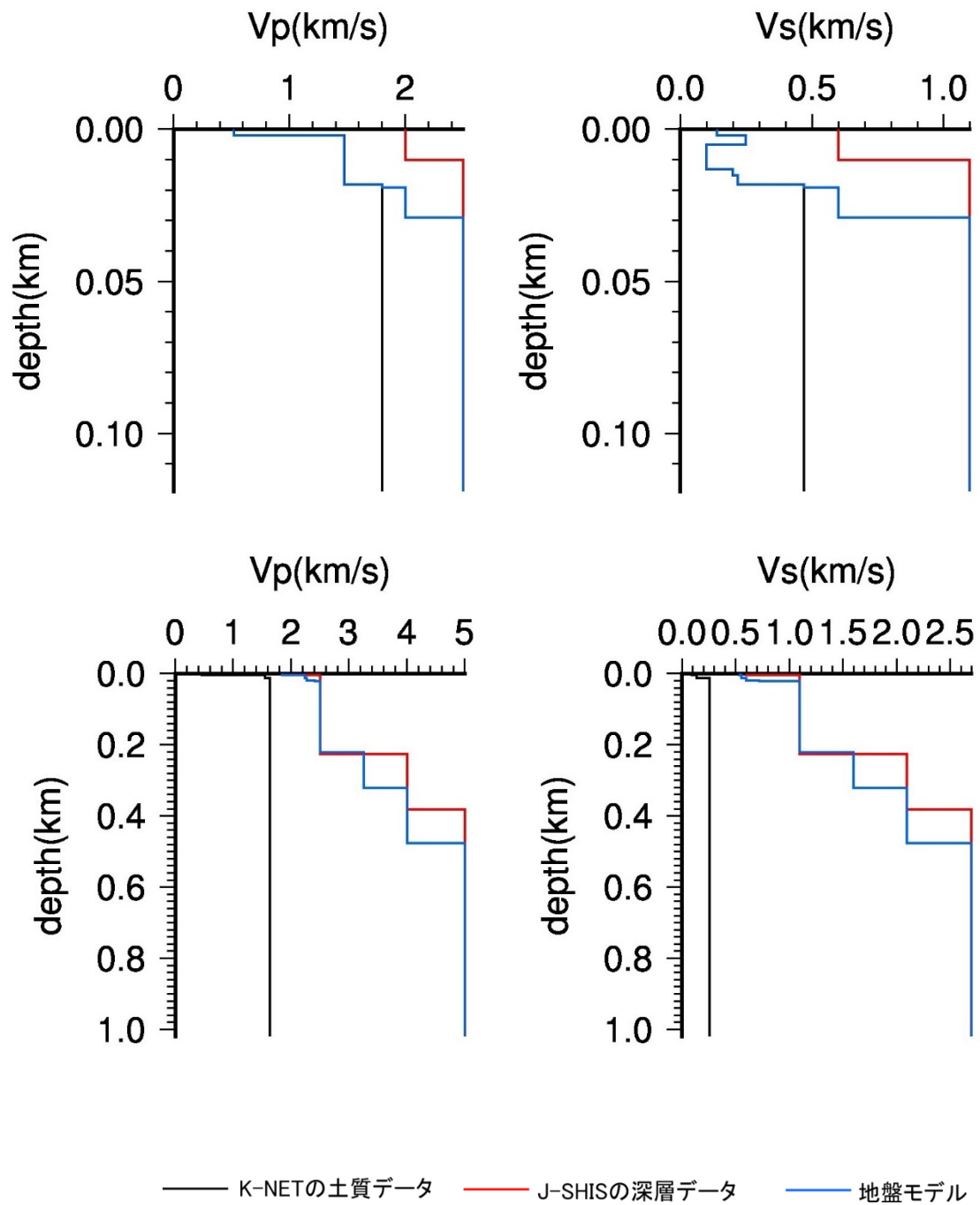


図 4.1.1-24 KMM010 地盤モデル.

表 4.1.1-8 KMM010 地盤モデルデータ

層厚(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	ρ (g/cm ³)
2	520	140	1.48
3	1470	250	1.92
8	1470	100	1.92
2	1470	200	1.92
3	1470	220	1.92
1	1800	470	2.02
10	2000	600	2.07
100	2500	1100	2.19
781	4000	2100	2.47
—	5000	2700	1.50

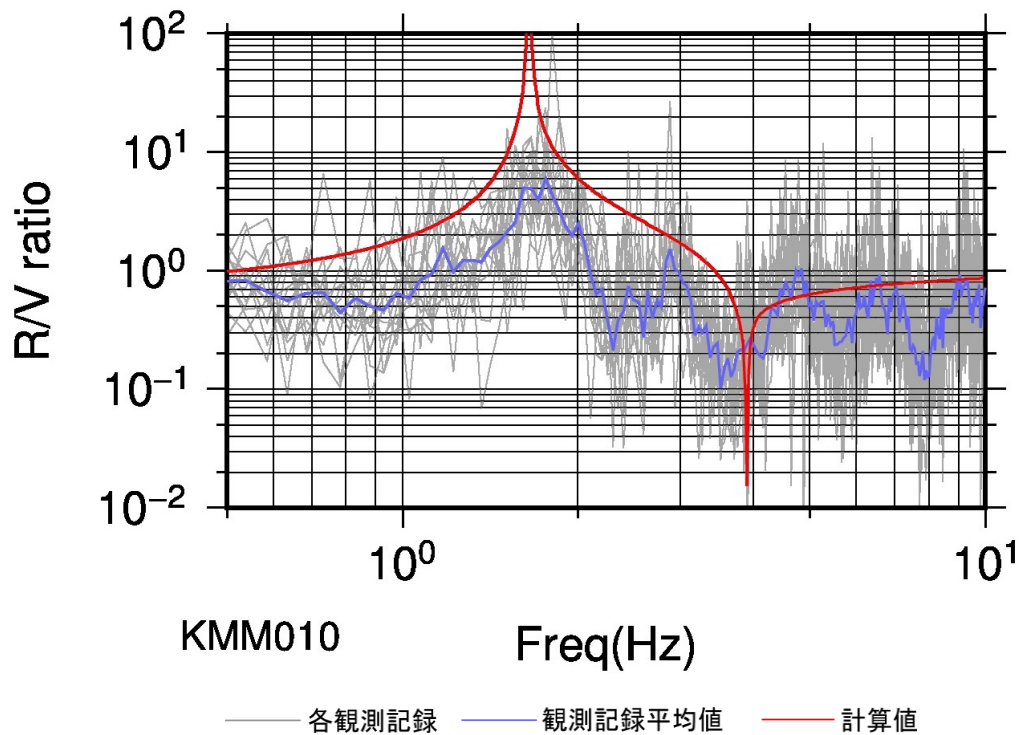


図 4.1.1-25 R/V スペクトル比：観測値と計算値比較(KMM010).

図 4.1.1-24 および表 4.1.1-8 に KMM010 についてチューニングした地盤モデルを，図 4.1.1-25 にこのモデルによる R/V スペクトル比を観測と比較して示す．観測と計算スペクトル比の傾向はよく一致している．

⑨KMM011

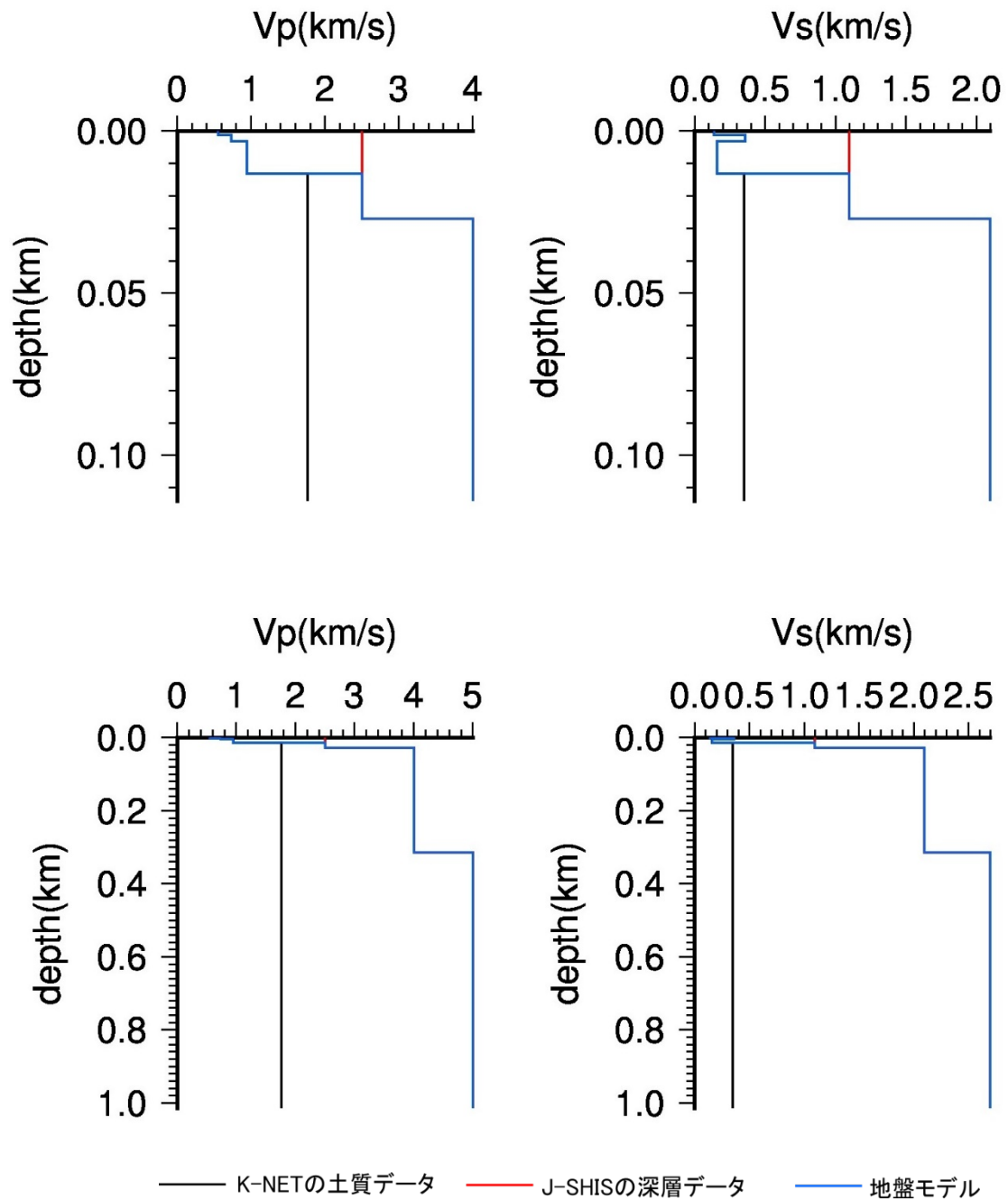


図 4.1.1-26 KMM011 地盤モデル.

表 4.1.1-9 KMM011 地盤モデルデータ

層厚(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	ρ (g/cm ³)
1	550	140	1.50
2	730	360	1.61
10	940	160	1.72
14	2500	1100	2.19
67	4000	2100	2.47
219	4000	2100	2.47
—	5000	2700	2.61

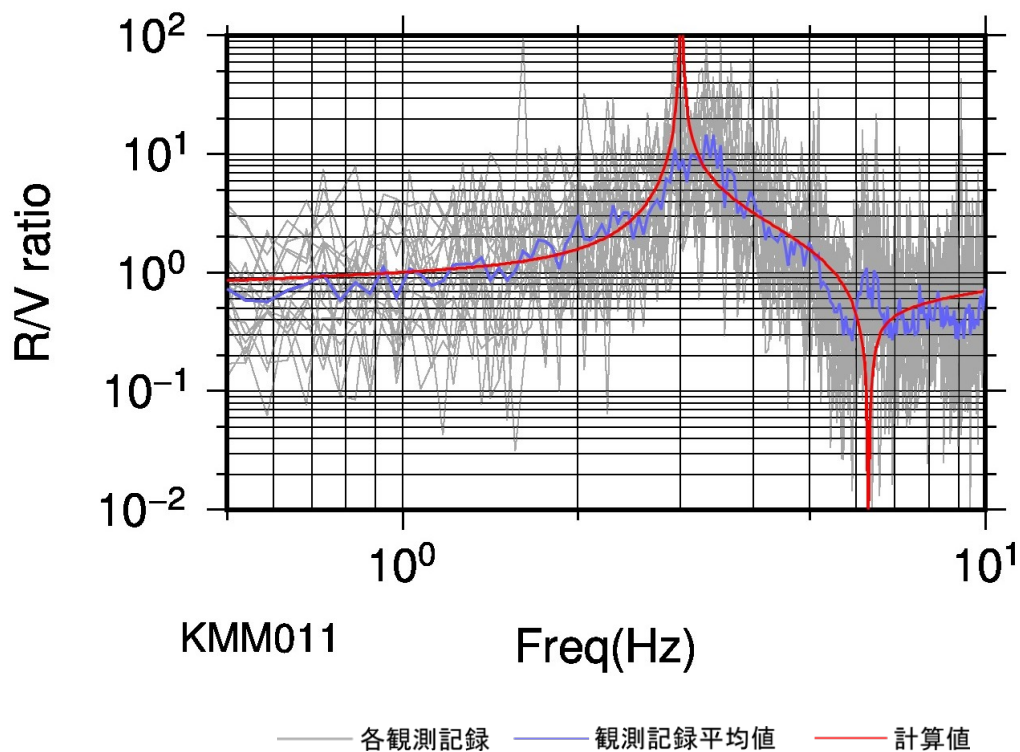


図 4.1.1-27 R/V スペクトル比：観測値と計算値比較(KMM011).

図 4.1.1-26 および表 4.1.1-9 に KMM011 について浅部構造、深部構造から作成した地盤モデルを、図 4.1.1-27 にこのモデルによる R/V スペクトル比を観測と比較して示す。特にチューニング等を行わずに、観測と計算スペクトル比の傾向はよく一致している。

⑩ KMM012

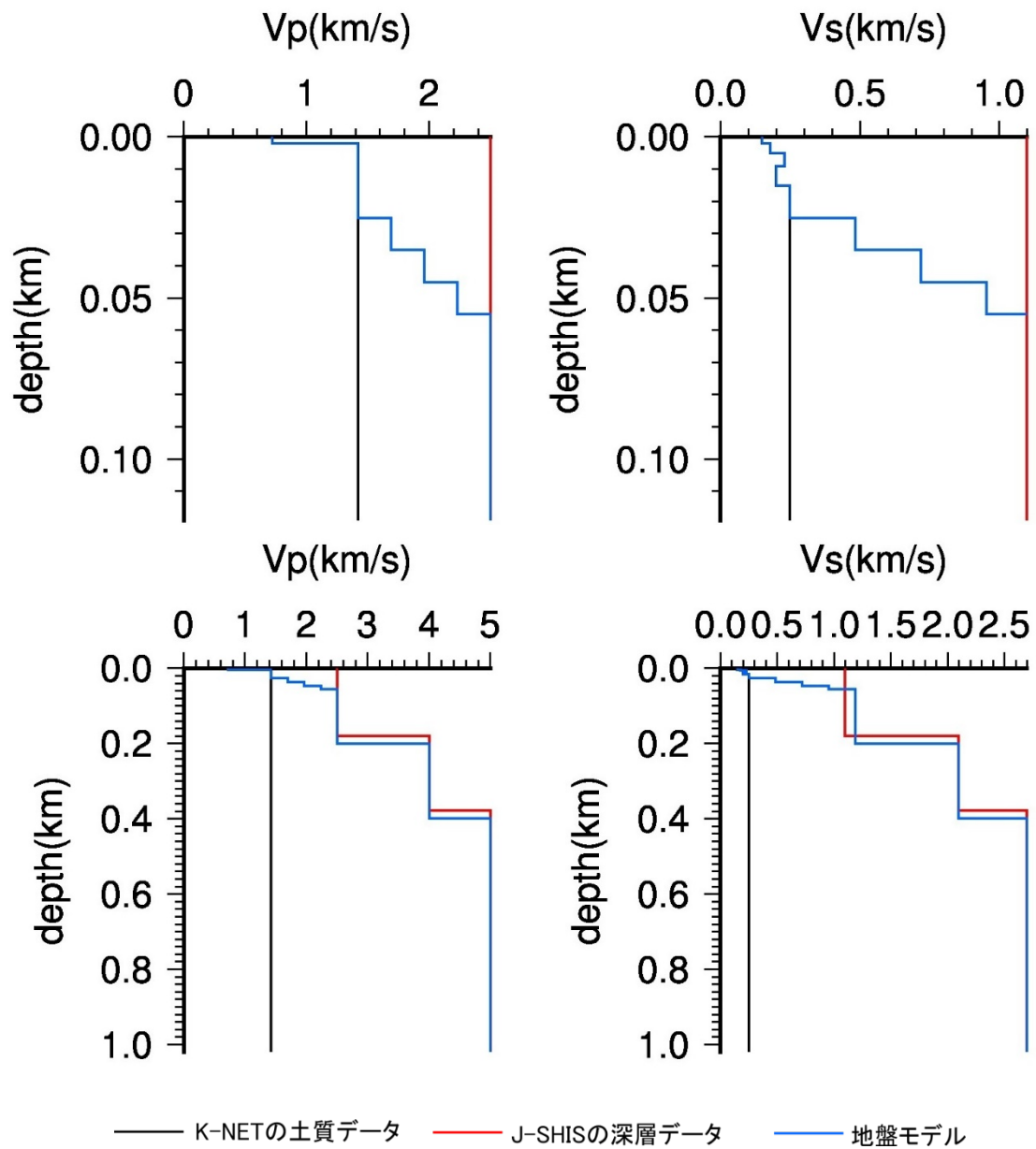


図 4.1.1-28 KMM012 地盤モデル.

表 4.1.1-10 KMM012 地盤モデルデータ

層厚(m)	Vp(m/s)	Vs(m/s)	ρ (g/cm ³)
2	720	150	1.61
3	1420	180	1.90
4	1420	230	1.90
6	1420	200	1.90
10	1420	250	1.90
10	1690	485	1.99
10	1960	720	2.06
10	2230	955	2.13
144	2500	1190	2.19
198	4000	2100	2.40
—	5000	2700	2.50

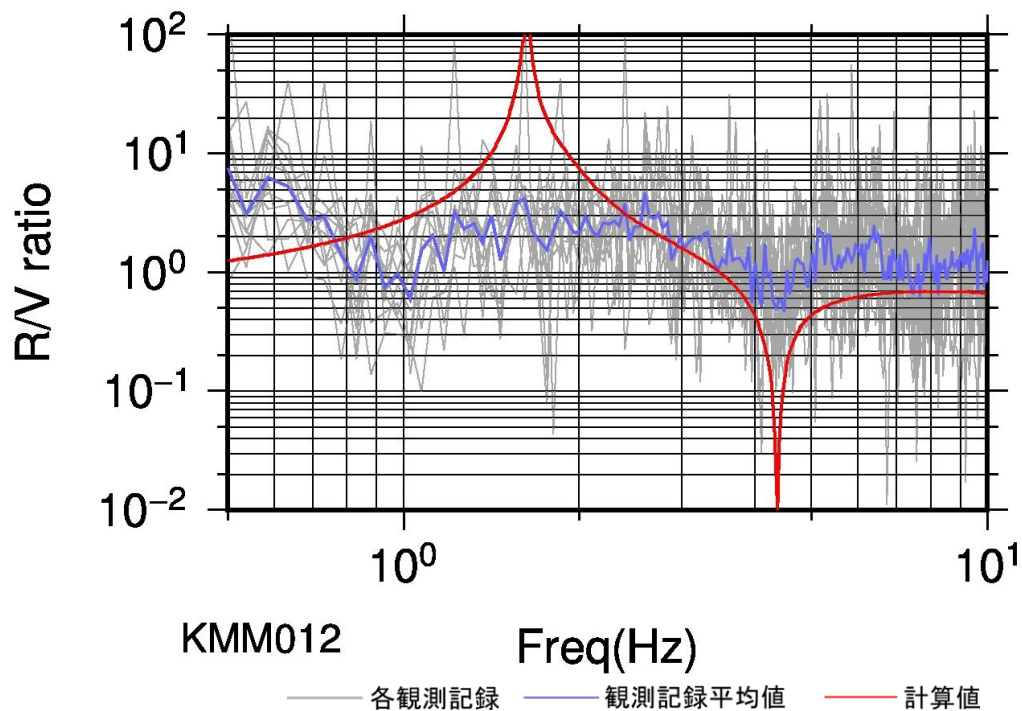


図 4.1.1-29 R/V スペクトル比：観測値と計算値比較(KMM012).

図 4.1.1-28 および表 4.1.1-10 に KMM012 についてチューニングした地盤モデルを，図 4.1.1-29 にこのモデルによる R/V スペクトル比を観測と比較して示す．その結果，観測スペクトル比に見られる 4Hz 付近のピークの再現が可能であった．

4.1.1(5) 参考文献

小林源裕・儘田豊 (2010), コーダ波 H/V スペクトルの逆解析に基づく S 波速度構造の推定
日本地震工学会論文集第 10 巻, 第 1 号

Saito, M. (1988), DISPER80 A Subroutine Package for the Calculation of Seismic
Normal-Mode Solutions, Seismological Algorithms, Academic Press Inc.

4.1.2 強震観測点（主に KiK-net）のサイト増幅特性

4.1.2.1 はじめに

ここでは、2016 年熊本地震本震（4 月 16 日 1 時 25 分 $M_{JMA}7.3$ ，以降，「熊本地震本震」と記す）の地震動シミュレーションの高精度化のために，震源域周辺の KiK-net 観測点において工学的検証で重要な周期帯である周期約 1 秒以下のサイト増幅特性について，対象観測点の地盤情報（検層データ）や中小地震記録を用いて KiK-net 地中地震計以浅（浅部地盤モデル）のサイト増幅特性を推定する．KiK-net 地中地震計以深（深部地盤モデル）は 3.1.1.2 の震源インバージョンの際にチューニングされた地盤モデルを使用し，地震基盤から地表までの地盤モデルを作成する．図 4.1.2.1-1 に浅部地盤モデルと深部地盤モデルの結合方法の模式図を示す．さらに，推定されたサイト増幅特性の検証として，推定された地盤モデルを用いて中小地震を対象に統計的グリーン関数を作成し，それと観測記録との比較を行う．

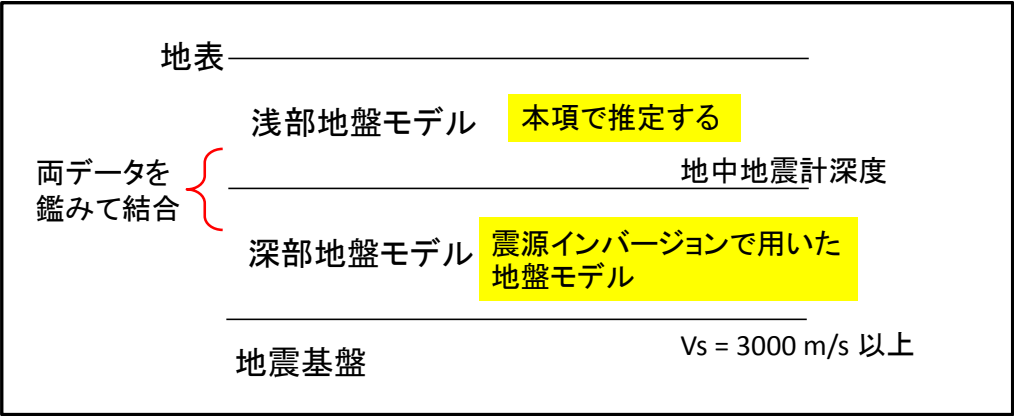


図 4.1.2.1-1 地震基盤から地表までの地盤モデルの作成方法の模式図.

4.1.2.2 サイト増幅特性の推定

ここでは、地表地震計と地中地震計が設置されている KiK-net 観測点において、KiK-net 地中地震計以浅（浅部地盤モデル）を対象に、地盤物性値（ V_s , Q_s ）の同定を行う。同定に用いるターゲットスペクトルは、観測記録の Transverse 成分を SH 波とし、式 4.1.2.2-1 で表される地表／地中スペクトル比とする。

$$R_{\text{Target}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{SH_{\text{sur}}(i)}{SH_{\text{down}}(i)} \quad (4.1.2.2-1)$$

ここで、

R_{Target} : SH 波の地表／地中スペクトル比の全中小地震平均（ターゲットスペクトル）

$SH_{\text{sur}}(i)$: 中小地震 i の SH 波の地表フーリエスペクトル

$SH_{\text{down}}(i)$: 中小地震 i の SH 波の地中フーリエスペクトル

N : 使用した中小地震の個数

(1) ターゲットスペクトル作成に用いた観測記録の整理

地盤同定の対象とする観測点は、KiK-net 観測点のうち、3.1.1.2 において震源インバージョンで使用するための深部地盤モデルが同定されている全 10 観測点とした。図 4.1.2.2-1 に地盤同定の対象とした KiK-net 10 観測点の位置を示す。

全 10 観測点のうち、KMMH04 を除く 9 観測点では、熊本地震本震の前に発生した中小地震を使用してターゲットスペクトルを作成した。図 4.1.2.2-2 に熊本地震本震の震央とターゲットスペクトルの作成に使用した中小地震の震央の位置関係を示す。入射角が本震に近い中小地震を選択することを目的に、熊本地震本震の震源域周辺で発生した中小地震（全 41 地震）の観測記録を使用した。表 4.1.2.2-1 に使用した中小地震のリストと各観測点での中小地震観測記録の最大加速度を示す（KMMH04 は除く）。ここで、利用する観測記録には地盤の非線形性の影響が含まれていないことが望ましいことから、地表観測記録の最大加速度が 100 cm/s^2 未満の観測記録のみを利用した。なお、観測点によっては、全 41 中小地震のうちいくつかの地震が観測されていない場合もあることから、使用している中小地震数は観測点によって異なる。

KMMH04 に関しては、2013 年以降地中地震計に異常があり、2016 年のデータを用いてターゲットスペクトルを作成することができない（KMMH04 における 2013 年以降のデータは防災科学技術研究所の強震観測網サイトからはダウンロードできず、計器に異常があるデータをまとめた未選別データサイトからダウンロードできる）。そこで、2013 年以前の中小地震を使用してターゲットスペクトルを作成した。図 4.1.2.2-3 に熊本地震本震の震央と

KMMH04 のターゲットスペクトルの作成に使用した中小地震の震央の位置関係を示す。ここでも前述のように入射角が本震に近い中小地震を選択することを目的に、熊本地震本震の震源域周辺で発生した中小地震の観測記録を使用した。表 4.1.2.2-2 に使用した中小地震のリストと各観測点での中小地震観測記録の最大加速度を示す。ターゲットスペクトルは全 32 中小地震の記録を用いて作成した。

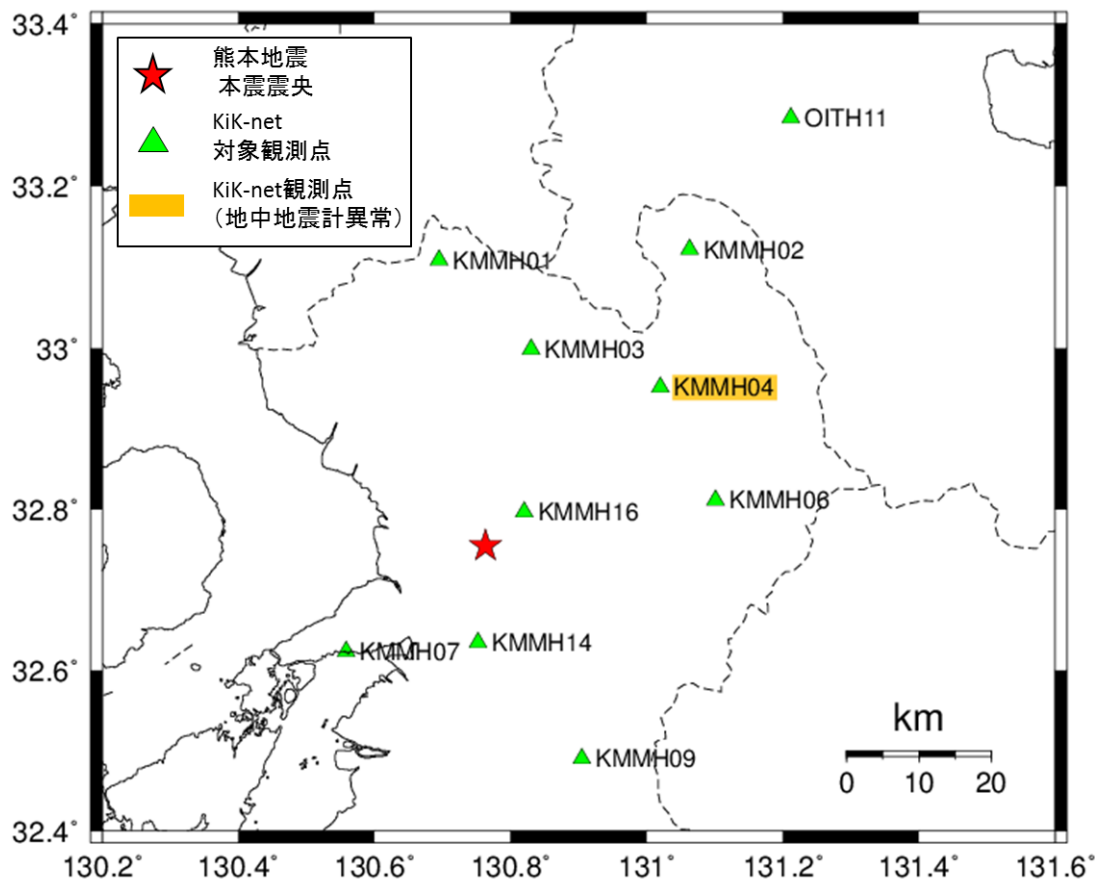


図4.1.2.2-1 地盤同定の対象とした KiK-net 観測点 (▲で示す10観測点を対象としている)。

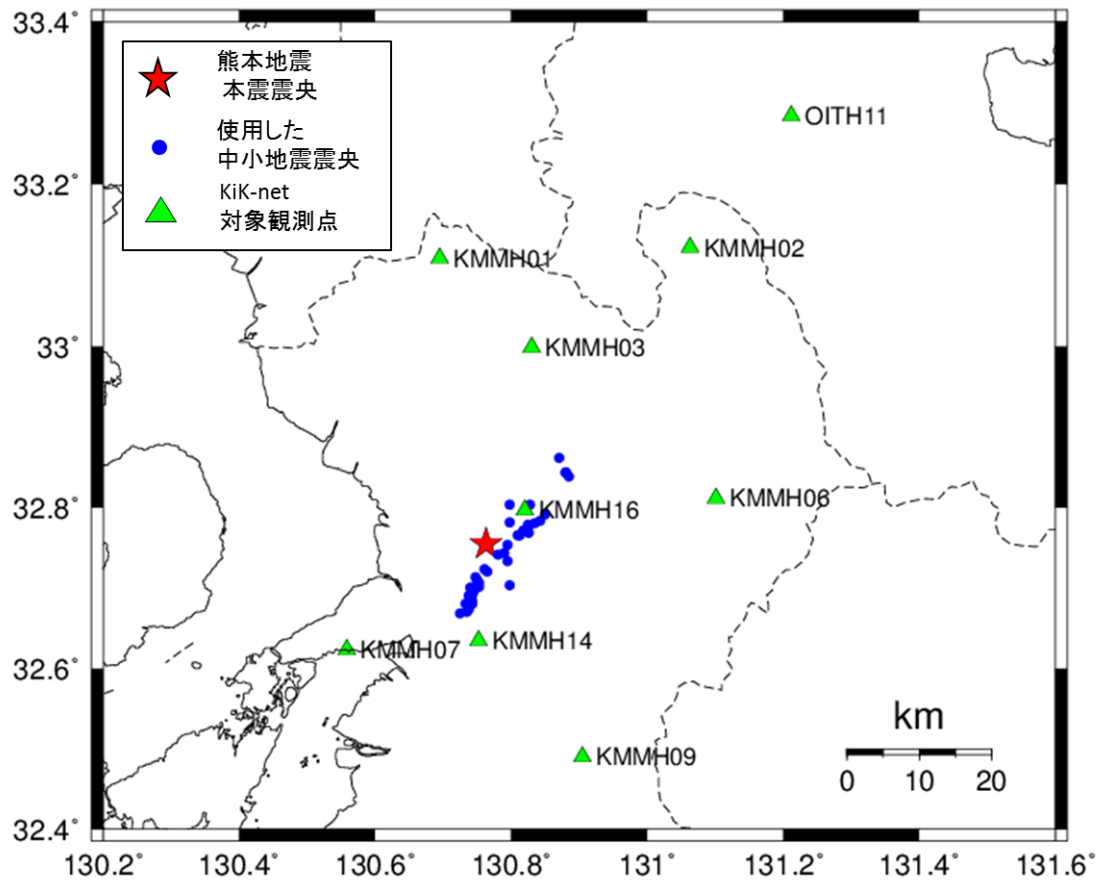


図 4.1.2.2-2 地盤同定の対象とした Kik-net 観測点 (▲は地中・地表地震計共に異常のない 9 観測点を示す) と、熊本地震本震およびターゲットスペクトルの作成に使用した中小地震の震央の位置関係.

表 4.1.2.2-1 ターゲットスペクトル作成に使用した観測記録と最大加速度
(KMMH04 は除く)

No.	Date (yy/mm/dd)	Time (hh:mm)	Mj	最大加速度[cm/s ²] (NS or EW の最大値)								
				KMMH01	KMMH02	KMMH03	KMMH06	KMMH07	KMMH09	KMMH14	KMMH16	OITH11
1	16/04/14	21:33	3.1	2.8	1.6	5.4	3.2	3.9	11.5	22.7	27.0	N/A
2	16/04/14	21:37	3.9	6.1	5.6	5.6	5.6	3.3	4.6	11.4	70.5	1.2
3	16/04/14	21:42	4.9	8.4	14.7	11.5	9.2	40.6	45.1	> 100	81.1	8.7
4	16/04/14	21:55	3.9	9.8	9.2	6.9	5.7	5.0	7.2	26.8	78.4	4.2
5	16/04/14	22:15	3.5	N/A	3.4	7.6	3.2	5.5	7.6	N/A	> 100	1.5
6	16/04/14	22:18	4.0	N/A	34.3	18.7	5.5	3.0	5.3	7.7	55.6	13.4
7	16/04/14	22:22	4.6	14.4	9.4	15.4	8.5	19.4	14.6	31.0	40.6	5.3
8	16/04/14	22:26	3.5	N/A	2.0	6.9	N/A	2.3	3.7	6.2	41.6	1.6
9	16/04/14	22:38	5.0	12.0	23.1	15.2	14.0	62.1	30.8	> 100	79.4	13.2
10	16/04/14	22:43	4.4	3.7	6.7	9.1	7.9	15.8	25.4	> 100	71.2	2.9
11	16/04/14	22:47	3.6	N/A	2.9	5.9	1.8	N/A	4.1	9.8	86.7	2.8
12	16/04/14	22:51	3.6	N/A	3.9	2.6	2.6	8.1	7.4	24.8	18.3	1.8
13	16/04/14	23:02	3.8	9.4	4.4	7.3	2.6	7.0	3.5	N/A	32.6	2.1
14	16/04/14	23:28	4.4	31.3	N/A	41.0	20.7	10.4	29.8	32.7	> 100	N/A
15	16/04/14	23:29	4.6	36.9	52.9	64.4	12.9	N/A	N/A	39.9	> 100	13.1
16	16/04/14	23:43	5.0	32.5	85.4	40.7	24.3	26.3	74.5	67.3	> 100	34.8
17	16/04/14	23:45	3.7	12.3	25.7	21.1	5.3	5.0	5.4	N/A	68.7	9.4
18	16/04/15	00:13	3.5	6.8	3.3	8.4	N/A	6.5	10.0	18.5	17.7	1.9
19	16/04/15	00:20	3.9	2.1	2.7	5.3	4.1	6.7	11.7	22.6	18.5	1.6
20	16/04/15	00:34	4.5	8.2	9.9	15.5	15.6	21.2	20.8	93.0	> 100	3.6
21	16/04/15	00:50	4.2	13.7	9.4	14.4	7.3	N/A	N/A	24.6	44.4	3.6
22	16/04/15	00:53	3.9	6.7	3.6	8.8	3.3	3.3	4.4	6.6	> 100	1.5
23	16/04/15	01:04	3.9	N/A	16.7	13.0	4.6	3.1	3.1	15.8	18.7	4.1
24	16/04/15	01:21	3.8	N/A	2.6	4.4	2.6	8.1	5.0	32.4	17.6	N/A
25	16/04/15	01:53	4.8	11.5	13.0	22.6	10.6	21.1	24.2	> 100	> 100	3.7
26	16/04/15	01:59	3.6	4.9	2.3	3.2	3.2	5.5	2.9	3.8	14.6	N/A
27	16/04/15	02:14	4.2	14.6	10.2	17.7	5.0	6.2	8.9	27.9	58.8	5.5
28	16/04/15	03:37	4.1	3.6	4.7	5.6	8.0	14.4	15.0	87.3	21.7	1.9
29	16/04/15	05:01	3.5	N/A	1.3	2.4	2.4	3.8	7.7	17.9	11.6	N/A
30	16/04/15	05:10	4.6	N/A	39.0	18.7	15.4	9.9	14.3	19.1	89.4	11.4
31	16/04/15	07:20	3.5	N/A	4.5	2.7	2.6	5.8	8.8	25.1	8.4	1.5
32	16/04/15	07:30	4.2	10.8	21.2	25.8	5.8	12.1	4.5	17.1	> 100	8.4
33	16/04/15	07:46	4.4	7.9	14.2	25.8	15.7	13.0	17.0	50.3	> 100	3.2
34	16/04/15	09:53	3.9	1.9	1.5	2.5	1.5	9.0	11.4	15.5	10.1	N/A
35	16/04/15	12:46	3.6	5.6	3.1	5.8	4.4	4.5	9.3	12.8	19.1	N/A
36	16/04/15	13:50	4.0	7.1	6.7	9.6	5.4	8.1	18.5	25.0	65.2	2.8
37	16/04/15	15:27	4.2	N/A	28.3	28.3	10.5	4.7	7.3	7.1	45.8	10.8
38	16/04/15	17:39	3.6	3.7	6.6	10.3	1.3	10.2	7.1	25.7	12.6	2.5
39	16/04/15	18:48	3.9	2.1	1.8	4.0	2.8	11.9	6.9	19.0	24.7	1.0
40	16/04/15	20:15	3.8	2.7	5.7	5.2	1.6	7.8	4.3	23.1	32.1	1.6
41	16/04/15	23:17	3.6	4.7	7.6	5.2	2.9	1.4	1.9	2.7	28.0	3.3
使用した中小地震数[個]				30	40	41	39	38	39	34	32	34

(表中の N/A : 観測記録なし, > 100 : 地表観測記録の最大値が 100 cm/s² 以上であるためターゲットスペクトル作成に使用しない)

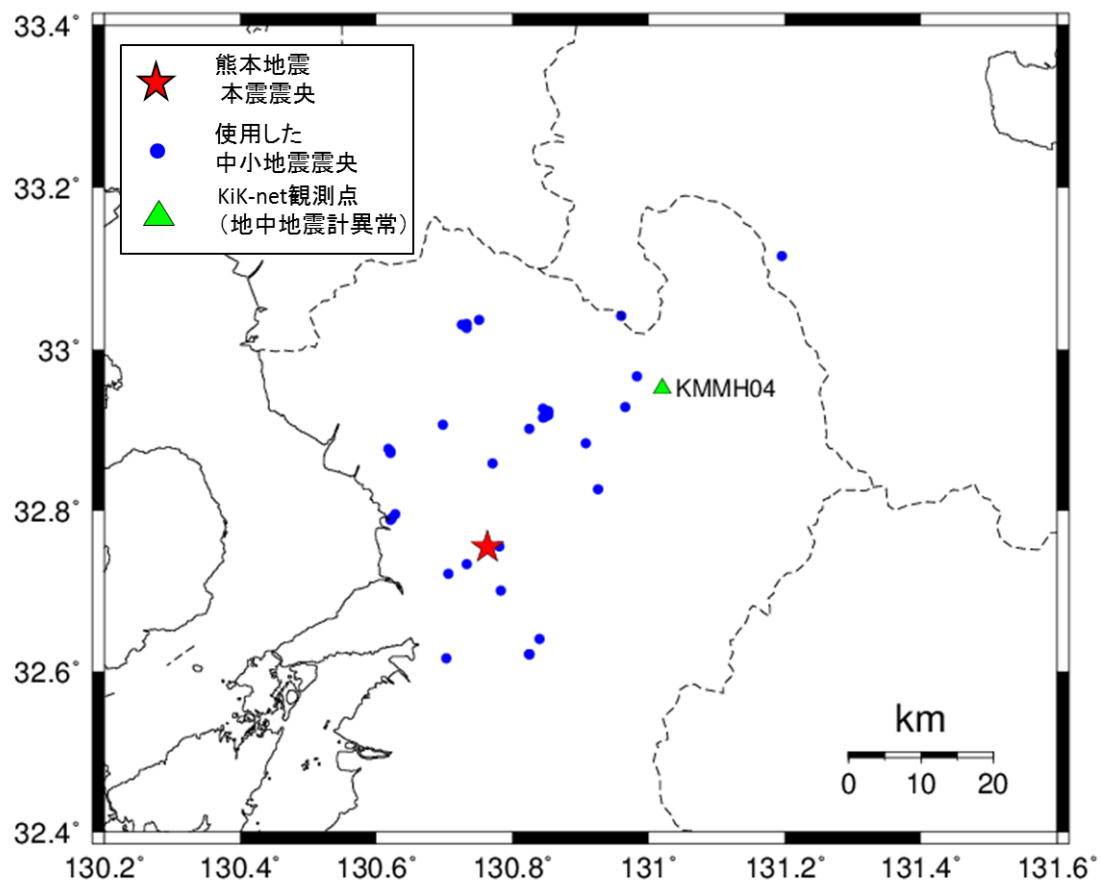


図 4.1.2.2-3 2013 年以降地中地震計に異常のある KMMH04 観測点と熊本地震本震, KMMH04 のターゲットスペクトルの作成に使用した 2013 年以前の中小地震の震央の位置関係.

表 4.1.2.2-2 KMMH04 のターゲットスペクトル作成に使用した観測記録と最大加速度

No.	Date (yy/mm/dd)	Time (hh:mm)	Mj	最大加速度[cm/s ²] (NS or EW の最大値)
				KMMH04
1	04/07/26	15:26	3.6	2.0
2	05/01/15	15:42	4.1	1.7
3	05/08/27	09:51	3.3	11.2
4	06/03/22	01:49	3.4	2.0
5	06/05/15	22:28	3.4	1.2
6	06/06/28	11:11	3.1	1.3
7	06/07/21	09:17	3.4	13.7
8	06/09/24	15:51	3.4	1.4
9	07/02/19	09:57	3.4	12.7
10	07/03/22	18:27	4.0	2.5
11	07/03/23	22:37	4.1	1.8
12	07/04/20	02:33	3.8	6.2
13	07/10/18	10:21	3.2	1.0
14	08/04/30	13:10	3.2	1.7
15	08/10/28	20:31	3.1	1.9
16	08/12/07	02:03	3.6	3.8
17	09/02/09	11:59	3.3	0.9
18	09/08/01	06:09	2.9	1.5
19	10/03/21	01:08	3.2	2.0
20	11/04/22	03:44	3.8	6.9
21	11/04/23	20:51	3.5	41.6
22	11/04/25	02:48	4.1	7.6
23	11/06/28	21:18	4.2	28.2
24	11/08/13	13:31	3.5	25.3
25	11/09/07	15:24	3.6	14.1
26	11/10/05	23:33	4.5	60.1
27	11/10/09	02:20	3.1	3.6
28	12/02/03	05:16	3.2	3.6
29	12/03/01	23:48	3.4	3.6
30	12/03/09	01:18	3.1	1.7
31	12/03/12	07:58	3.9	9.2
32	12/05/02	20:19	3.4	21.0

(2) ターゲットスペクトル作成方法

KiK-net の地中地震計は設置時に方位が回転してしまうことがあり、防災科学技術研究所のサイトで地中地震計が回転している場合には回転角が公開されている。本検討で対象とした全ての観測点は地中地震計の回転角が 5 度以下であったため、その影響は小さいと判断して方位修正は加えていない。対象観測点における地中地震計の方位を再度確認するために、観測された地震の変位波形を用いて地中と地表地震計の初動のパーティクルモーションを比較した。ここで、KMMH04 以外の 9 観測点については熊本地震本震の観測記録を用い、KMMH04 については 2005 年福岡県西方沖地震の本震（2005 年 2 月 20 日 10 時 53 分 $M_{JMA}7.0$ ）の観測記録を用いた。図 4.1.2.2-4 に KMMH04 以外の 9 観測点における地表・地中の水平成分のパーティクルモーションを、図 4.1.2.2-5 に KMMH04 における地表・地中の水平成分のパーティクルモーションを示す。これらを見ると、全 10 観測点において初動の方向が地中・地表で似た傾向であり、地中・地表の地震計の設置方位が概ね同一であることが確認できる。

ターゲットスペクトル作成時には、対象とする NS, EW の観測記録から S 波到達時刻を目視で読み取り、S 波到達時刻から 5 秒間のデータを使用した。データの前にはテーパー処理を施した上で、データ長が 40.96 秒となるように波形の前後にゼロデータを挿入した。

その後、加工した NS, EW の地震波形データを、中小地震の震央から各観測点への方位角を用いて Radial/Transverse 方向に回転し、Transverse 成分をターゲットスペクトルの作成に使用した。以上のように加工した地震波形のフーリエスペクトルに中心周波数の 3 %幅で平滑化をかけた後、地表／地中のスペクトル比を計算し、算出した全中小地震記録の地表／地中スペクトル比の平均を求め、これをターゲットスペクトルとして利用した。

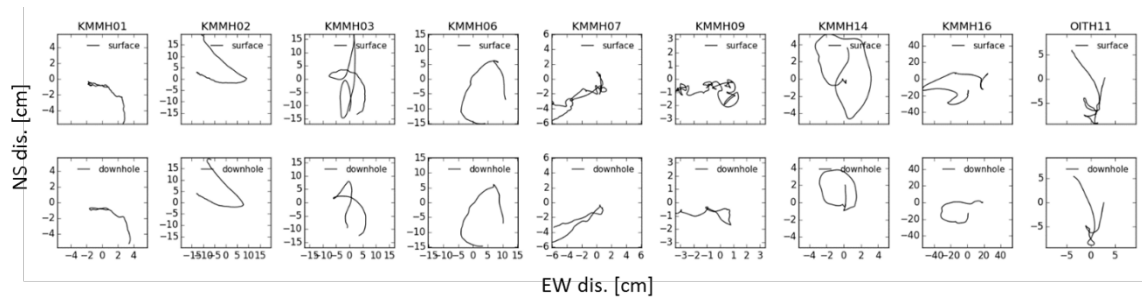


図 4.1.2.2-4 KMMH04 以外の 9 観測点における熊本地震本震のパーティクルモーション(変位)．上段は地表地震計，下段は地中地震計の結果を示す．

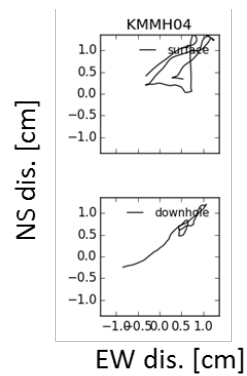


図 4.1.2.2-5 KMMH04 観測点における 2005 年福岡県西方沖の地震本震のパーティクルモーション(変位)．上段は地表地震計，下段は地中地震計の結果を示す．

(3) 地盤同定手法

地盤同定の対象とする地盤物性値は V_s , Q_s とし, 層厚は PS 検層の結果で, 密度は Gardner *et al.* (1974) の式により PS 検層の V_p から計算された値で, 入射角は鉛直入射でそれぞれ固定とした. また, Q_s は周波数に依存しないこととした. V_s の初期値は PS 検層結果の値を使用した. Q_s の初期値は V_s との経験式 ($Q_s = V_s [\text{m/s}] / 15$) から得られる値を使用した.

探索する周波数は 0.5 ~ 20 Hz とした. ただし, KMMH04 においては, 1 次の卓越周期が 0.4 Hz 付近にあるため, 探索周波数は 0.3 ~ 20 Hz とした. 同定は試行錯誤の結果, 以下に示す 2 段階に分けて行った.

① 卓越周期を合わせることを目的とした V_s の探索

V_s の探索範囲は試行錯誤の結果, 初期値の $\pm 20\%$ とし, Q_s は探索せず V_s との経験式 ($Q_s = V_s [\text{m/s}] / 15$) から得られる値とした. 遺伝的アルゴリズムを用いて式 4.1.2.2-2 に示す適合度 (Fitness_ V_s) が最大になる地盤物性値 (V_s) を探索した. 特に, 1 次の卓越周期を合わせるために, 低周波数側に重みがつくように同定を行った.

$$\text{Fitness}_{V_s} = \frac{1}{n_f} \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_f} \left[\frac{R_{\text{Target}}(f_i) - R_{\text{Calc}}(f_i)}{f_i} \right]^2} \quad (4.1.2.2-2)$$

ここで,

$R_{\text{Target}}(f_i)$: ターゲットスペクトル

$R_{\text{Calc}}(f_i)$: 同定された地盤モデルを用いて計算された伝達関数

f : 周波数(Hz)

n_f : 周波数の分割数

② 増幅率を合わせることを目的とした Q_s の探索

Q_s の探索範囲は試行錯誤の結果, 最小は 5, 最大は①で最終的に求められた $Q_s + 20\%$ の範囲で探索を行った. その際, V_s は①で探索された値で固定とした. 遺伝的アルゴリズムを用いて式 4.1.2.2-3 に示す適合度 (Fitness_ Q_s) が最大になる地盤物性値 (Q_s) を探索した.

$$\text{Fitness}_{Q_s} = 1.0F \times 1.0S \times J \quad (4.1.2.2-3)$$

F は式 4.1.2.2-4 で示すターゲットと理論による伝達関数の残差である. ここで, ①の

ターゲットと理論による伝達関数の残差に、式 4.1.2.2-2 のように低周波数側に重みをつけた場合、 Q_s が 1 次の卓越周期の増幅率を合わせるために大きくなってしまい、それに伴い高周波数側の増幅率が小さくなってしまう傾向があった。そのため、 Q_s の同定の際には低周波数側に重みをつけず式 4.1.2.2-4 のように残差を評価することとした。 S は式 4.1.2.2-5 で示すターゲットと理論による伝達関数のセンブランスである。 J は深くなるほど Q_s が大きくなる傾向を持つ結果の適合度を高くすることを目的に、試行錯誤で設定したパラメータであり、式 4.1.2.2-6 に示す条件式で与えられる。これは、上下の層で Q_s を比較し、深い層の Q_s が浅い層の Q_s の 70 % 以上という関係を満たす場合に適合度が高くなるという条件である。

$$F = \frac{1}{n_f} \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_f} [R_{\text{Target}}(f_i) - R_{\text{Calc}}(f_i)]^2} \quad (4.1.2.2-4)$$

$$S = \frac{1}{n_f} \frac{\sum_{i=1}^{n_f} [R_{\text{Target}}(f_i) + R_{\text{Calc}}(f_i)]^2}{\sum_{i=1}^{n_f} [R_{\text{Target}}(f_i)^2 + R_{\text{Calc}}(f_i)^2]} \quad (4.1.2.2-5)$$

$$Q_{s_Deep} \geq Q_{s_Shallow} \times 0.7 \quad (\text{真} : J = 1.0, \text{偽} : J = 0.01) \quad (4.1.2.2-6)$$

ここで、

$R_{\text{Target}}(f_i)$: ターゲットスペクトル

$R_{\text{Calc}}(f_i)$: 同定された地盤モデルを用いて計算された伝達関数

f : 周波数(Hz)

n_f : 周波数の分割数

Q_{s_Deep} : 上下の層で比較した際の下層の Q_s

$Q_{s_Shallow}$: 上下の層で比較した際の上層の Q_s

(4) 地盤同定結果

図 4.1.2.2-6 にターゲットスペクトルと同定前後の地盤モデルによる伝達関数の比較を、表 4.1.2.2-3a～f に同定前後の地盤モデルの比較を示す。図 4.1.2.2-6 の地盤同定結果を見ると、ほとんどの観測点において、増幅率のレベルは同定後の方がターゲットスペクトルに近づく傾向にあることが確認できる。しかし、3 観測点 (KMMH02, KMMH04, OITH11) においては高周波数側 (6～10 Hz 付近) の卓越周期がうまく説明できていない。さらに、OITH11 はターゲットには見られない 1 Hz 付近のピークが同定後の伝達関数にみられている。

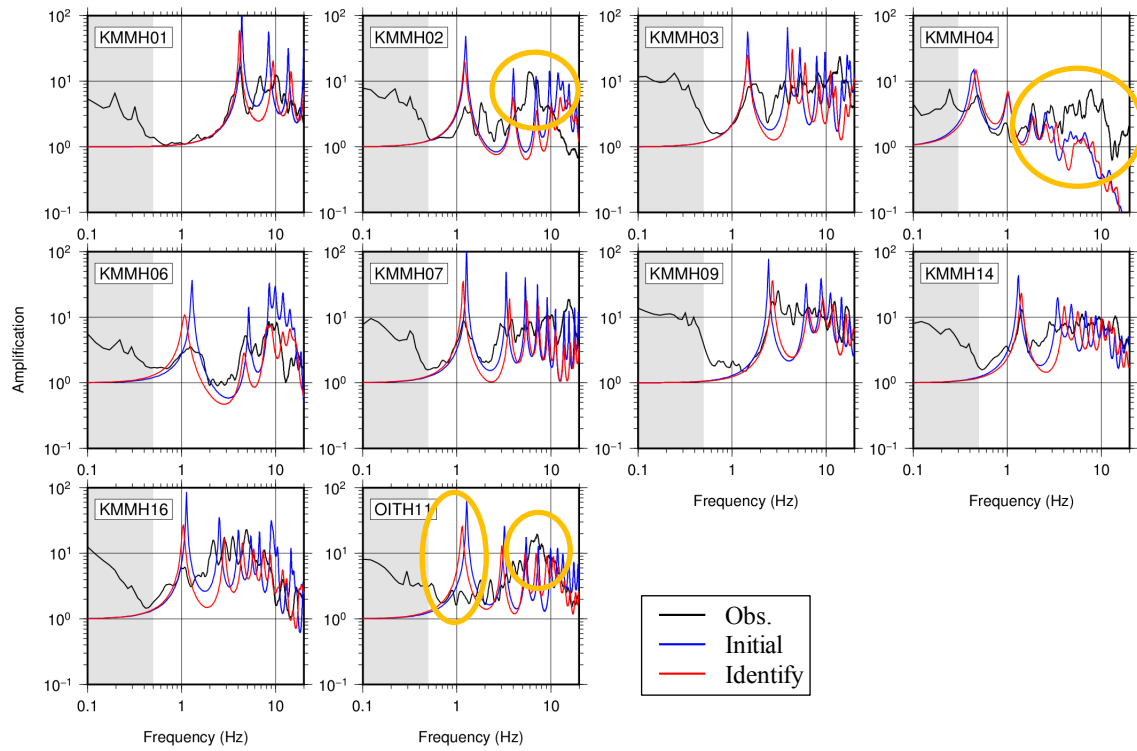
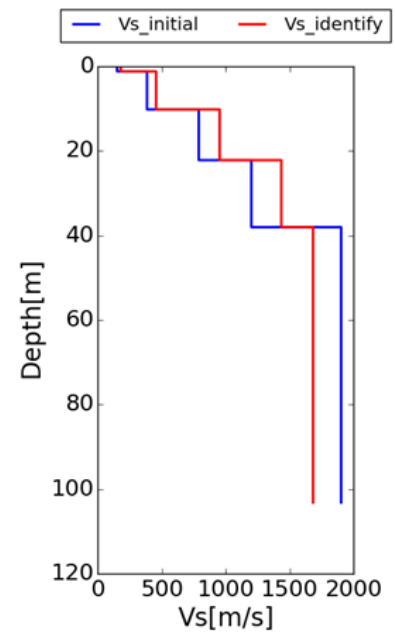


図 4.1.2.2-6 ターゲットスペクトルと同定前後の伝達関数の比較 (グレー部分は同定対象外の帯域を、黄色丸は同定結果とターゲットの乖離が大きい帯域を示す)。

表 4.1.2.2-3a 同定前後の地盤モデルと速度構造モデルの比較 (1/6)

KMMH01

KMMH01			同定前		同定後	
層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	V_s (m/s)	Q_s	V_s (m/s)	Q_s
1	1	1.2	150	10	180	6
9	10	1.9	380	25	460	11
12	22	2.2	790	53	950	27
16	38	2.3	1200	80	1430	36
—	—	2.5	1900	127	1680	42



KMMH02

KMMH02			同定前		同定後	
層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	V_s (m/s)	Q_s	V_s (m/s)	Q_s
2	2	1.2	120	8	140	5
4	6	1.6	370	25	440	14
16	22	2.2	1100	73	1320	34
20	42	2.2	800	53	960	25
—	—	2.0	630	42	610	17

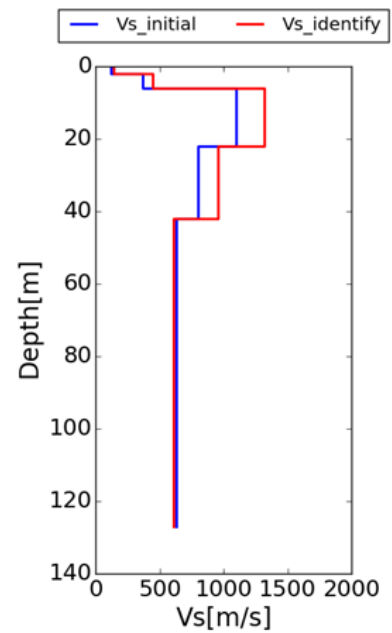
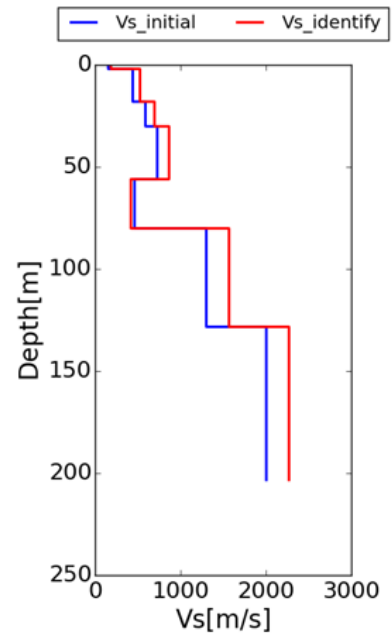


表 4.1.2.2-3b 同定前後の地盤モデルと速度構造モデルの比較 (2/6)

KMMH03

KMMH03			同定前		同定後	
層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	V_s (m/s)	Q_s	V_s (m/s)	Q_s
2	2	1.3	150	10	180	7
16	18	1.6	430	29	520	35
12	30	1.9	580	39	700	24
26	56	2.2	720	48	860	22
24	80	2.1	460	31	410	16
48	128	2.3	1300	87	1560	40
—	—	2.5	2000	133	2270	57



KMMH04

KMMH04			同定前		同定後	
層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	V_s (m/s)	Q_s	V_s (m/s)	Q_s
2	2	1.1	80	5	80	6
2	4	1.9	80	5	100	7
8	12	1.9	220	15	260	9
24	36	1.9	110	7	90	6
22	58	1.9	150	10	180	13
18	76	1.9	280	19	340	25
20	96	1.9	200	13	240	18
—	—	1.9	330	22	400	29

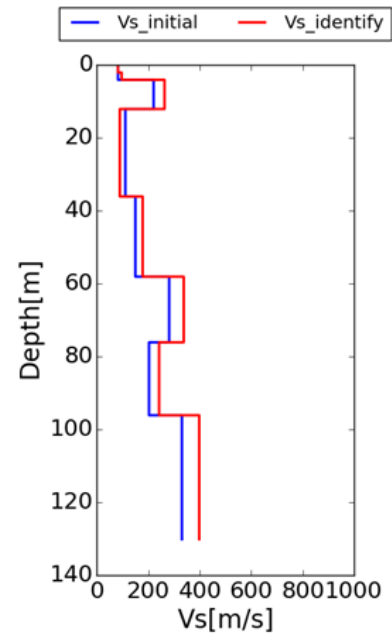
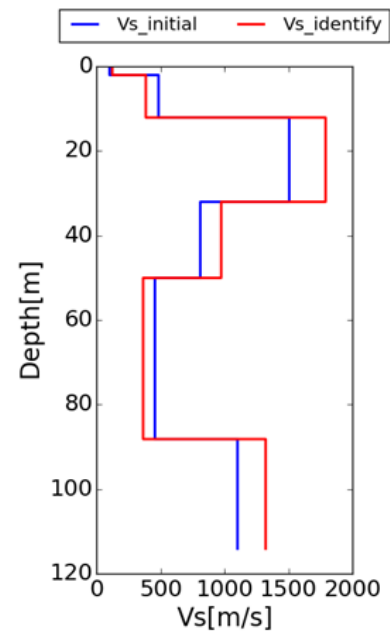


表 4.1.2.2-3c 同定前後の地盤モデルと速度構造モデルの比較 (3/6)

KMMH06

KMMH06			同定前		同定後	
層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	V_s (m/s)	Q_s	V_s (m/s)	Q_s
2	2	1.2	100	7	120	5
10	12	1.7	480	32	380	10
20	32	2.4	1500	100	1790	56
18	50	2.4	810	54	970	25
38	88	2.0	450	30	360	9
—	—	2.2	1100	73	1320	34



KMMH07

KMMH07			同定前		同定後	
層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	V_s (m/s)	Q_s	V_s (m/s)	Q_s
5	5	1.9	600	40	710	43
25	30	2.0	810	54	960	41
50	80	2.1	1000	67	1200	31
20	100	2.2	1300	87	1480	39
15	115	2.1	1100	73	1290	36
105	220	2.2	1300	87	1050	27
15	235	2.5	1700	113	1810	82
—	—	2.5	2000	133	2330	60

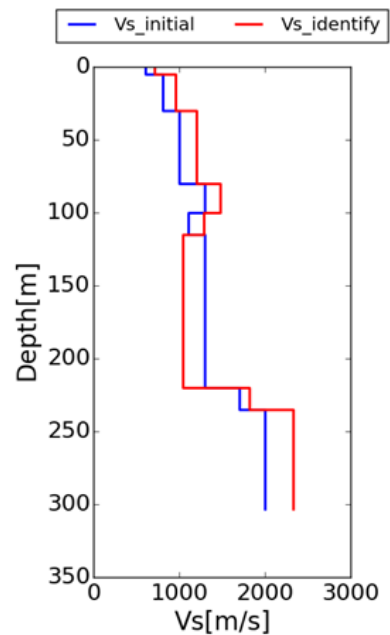
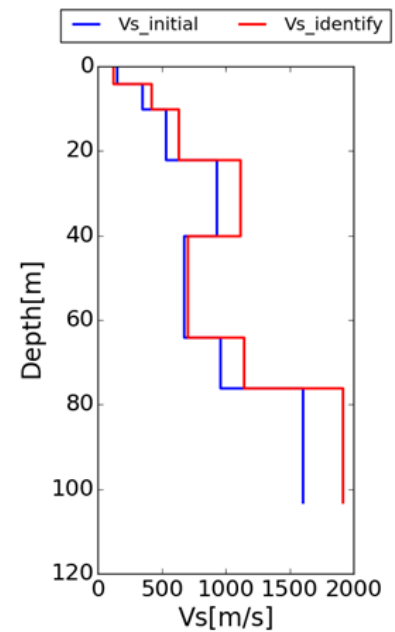


表 4.1.2.2-3d 同定前後の地盤モデルと速度構造モデルの比較 (4/6)

KMMH09

KMMH09			同定前		同定後	
層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	V_s (m/s)	Q_s	V_s (m/s)	Q_s
4	4	1.3	150	10	120	6
6	10	1.6	350	23	420	27
12	22	1.8	530	35	630	20
18	40	2.0	930	62	1120	29
24	64	2.0	670	45	700	20
12	76	2.1	960	64	1140	29
—	—	2.3	1600	107	1920	62



KMMH14

KMMH14			同定前		同定後	
層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	V_s (m/s)	Q_s	V_s (m/s)	Q_s
4	4	1.2	110	7	130	11
6	10	1.3	180	12	220	9
10	20	2.0	330	22	400	28
38	58	2.0	480	32	580	20
30	88	2.0	480	32	480	15
12	100	2.2	690	46	810	35
—	—	2.3	1540	103	1850	138

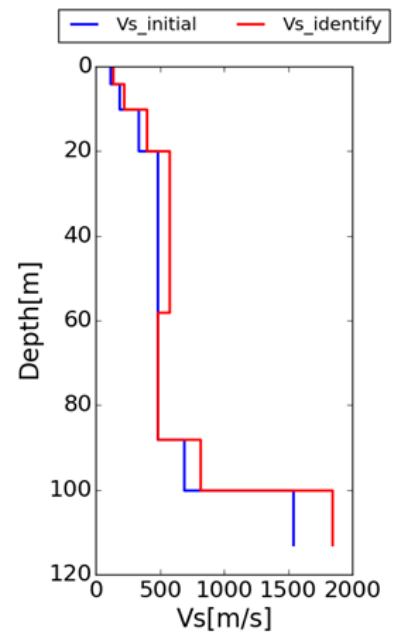


表 4.1.2.2-3e 同定前後の地盤モデルと速度構造モデルの比較 (5/6)

KMMH16

KMMH16			同定前		同定後	
層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	V_s (m/s)	Q_s	V_s (m/s)	Q_s
3	3	1.2	110	7	120	5
12	15	1.4	240	16	290	15
18	33	1.8	500	33	600	20
8	41	1.8	400	27	480	21
28	69	2.1	760	51	900	26
32	101	2.1	820	55	980	50
32	133	2.3	1470	98	1650	82
10	143	2.3	700	47	560	15
26	169	2.3	1380	92	1250	33
32	201	2.1	840	56	680	17
33	234	2.1	1470	98	1640	45
—	—	2.6	2700	180	2910	91

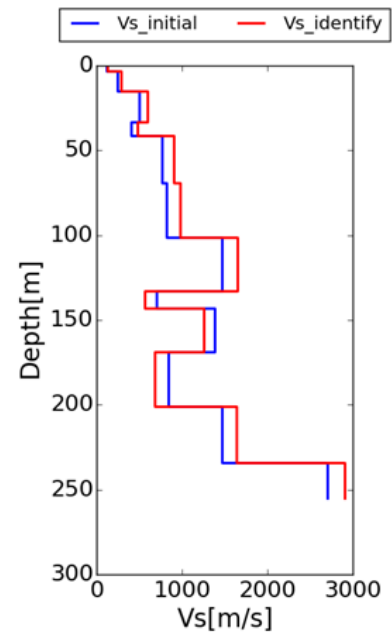
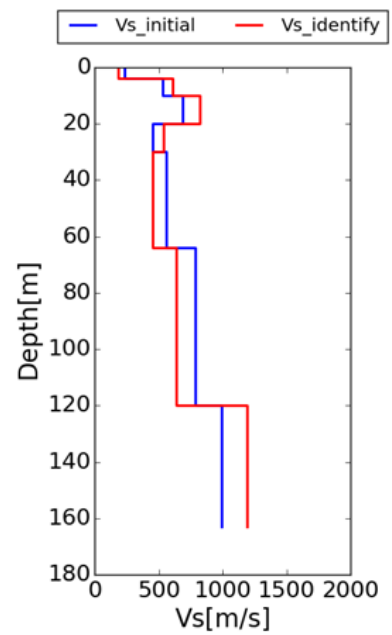


表 4.1.2.2-3f 同定前後の地盤モデルと速度構造モデルの比較 (6/6)

OITH11

OITH11			同定前		同定後	
層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	V_s (m/s)	Q_s	V_s (m/s)	Q_s
4	4	1.6	230	15	190	14
6	10	2.1	530	35	610	35
10	20	2.1	690	46	820	35
10	30	2.0	450	30	540	29
34	64	2.1	560	37	450	21
56	120	2.1	790	53	640	16
—	—	2.2	990	66	1190	87



4.1.2.3 推定されたサイト増幅特性の検証

ここでは、サイト増幅特性の検証を2段階に分けて実施した。

(1) 浅部地盤モデルの検証

4.1.2.2 で求めた浅部地盤モデルの妥当性を検証するために、KiK-net 地中地震計で観測された中小地震記録を推定した浅部地盤モデルを用いて Haskell のマトリックス法で地表に引き上げ、KiK-net 地表地震計の観測記録との比較を行った。

(2) 地震基盤から地表までの地盤モデルの検証

次に、浅部・深部を結合した地震基盤から地表までの地盤モデルを検証するために、推定された浅部地盤モデルに震源インバージョンの際にチューニングされた深部地盤モデルを結合して地盤モデルを作成し、2016 年 4 月 14 日 23 時 43 分の地震（3.1.1.2 の経験的グリーン関数として使用された地震）を点震源と仮定して統計的グリーン関数を作成し、地表地震計の観測記録との比較を行った。なお、伝播経路の Q 値は全観測点で一律の値を使用している。

4.1.2.3(1) 浅部地盤モデルの検証

① 浅部地盤モデルの検証方法

浅部地盤モデルの検証は地盤同定を行った全観測点を対象に行った。検証には 2016 年 4 月 14 日 23 時 43 分の地震（表 4.1.2.2-1 の No.16）を用い、地中地震計で観測された Transverse 成分の地震動を同定前後の地盤モデルを用いて Haskell のマトリックス法で地表に引き上げ、地表地震計の観測記録と比較した。なお、KMMH04 については 2013 年以降地中地震計のデータに異常があるため、2011 年 10 月 5 日 23 時 33 分（表 4.1.2.2-2 の No.26）の地震を用いて検証を行った。対象観測点と使用した中小地震（2016 年 4 月 14 日 23 時 43 分、2011 年 10 月 5 日 23 時 33 分）の位置関係を図 4.1.2.3-1 に示す。

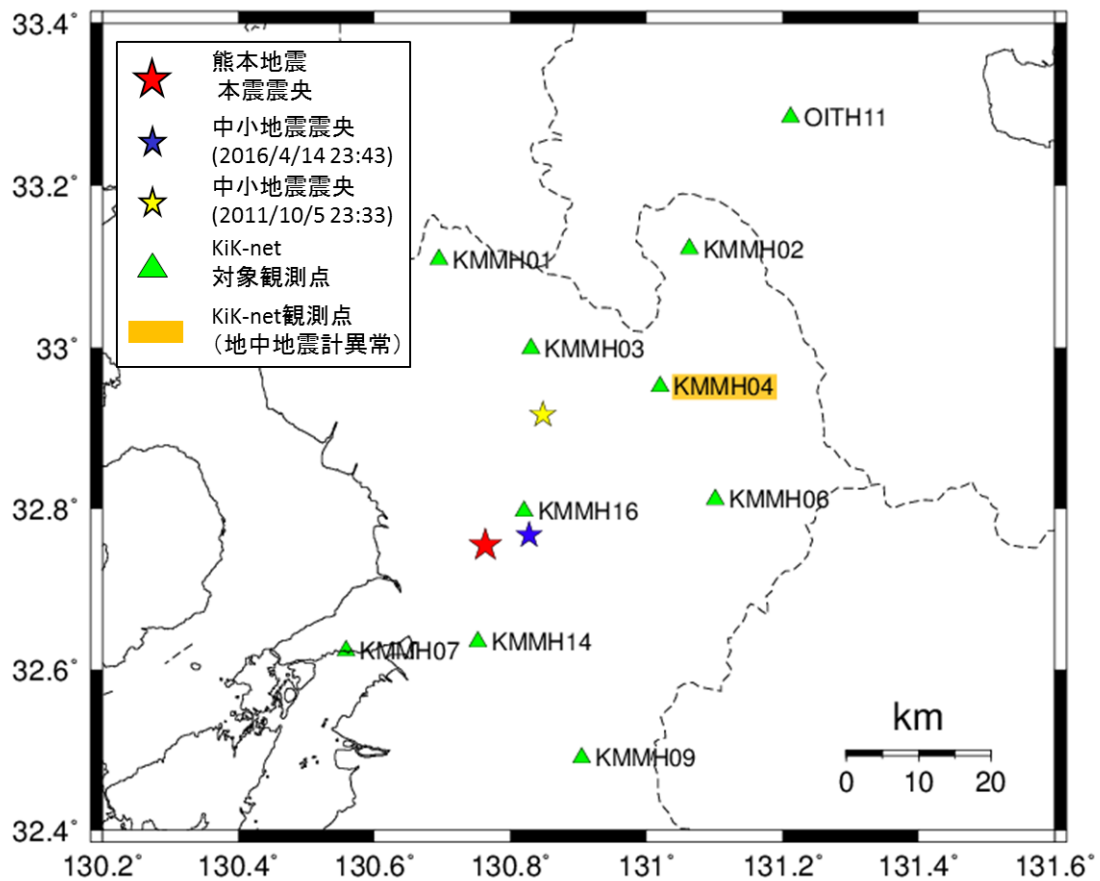


図 4.1.2.3-1 浅部地盤モデルの検証に使用した中小地震の震央と対象とした KiK-net 観測点の位置関係.

② 浅部地盤モデルの検証結果

同定前後の地盤モデルの増幅率を用いて地表に引き上げた地震動と地表地震計の観測記録との加速度波形による比較を図 4.1.2.3-2a～c に示す。これを見ると、すべての観測点において、同定前よりも同定後の地盤モデルを用いることで最大加速度だけでなく後続波の振幅・形状も観測記録に近いものとなった。加速度フーリエスペクトルで比較した結果を図 4.1.2.3-3 に示す。これを見ると、今回同定を行った KiK-net 地中地震計より浅い地盤で決まる数 Hz 以上の周波数帯域（地盤モデルによって異なるが、図中グレーで示していない周波数帯域を指す）では、同定を行うことによって、シミュレーション結果はより観測に近づく結果となった。

しかし、いくつかの観測点では、6 ～ 10 Hz 付近の周波数帯域において、浅部地盤の同定結果が良好ではなかった。これらの観測点では、地震基盤から地表までの地盤モデルを用いた場合のシミュレーション結果でも同様に同じ周波数帯域での観測記録の説明性が良好ではなかった。このことから、浅部地盤のモデル化の精度が向上すれば、さらに多くの観測点で数 Hz 以上の周波数帯域の説明性が向上する可能性があると言える。

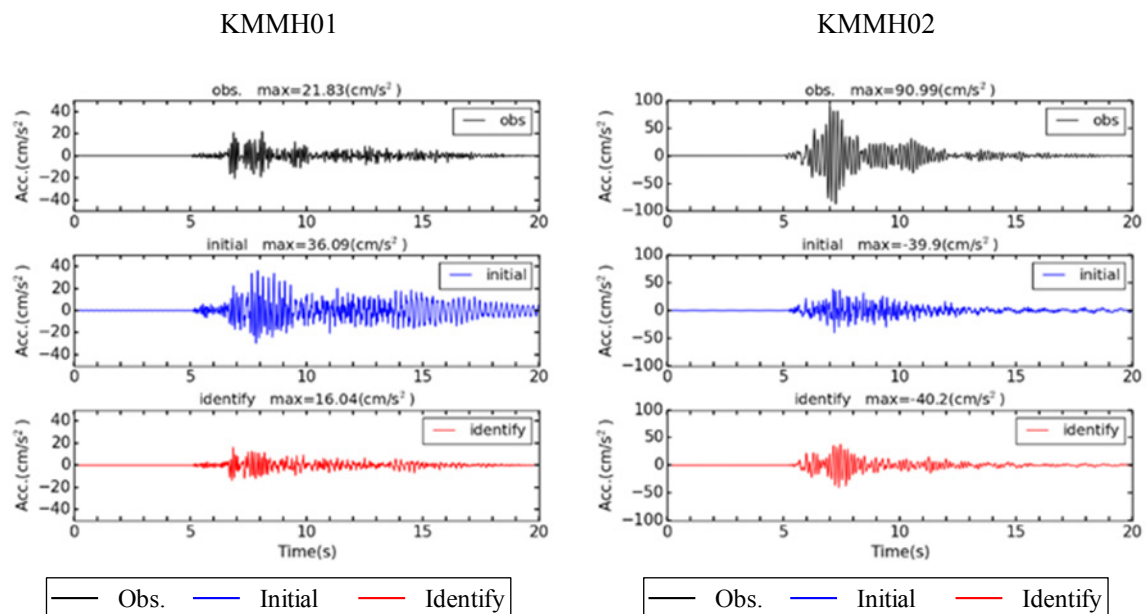
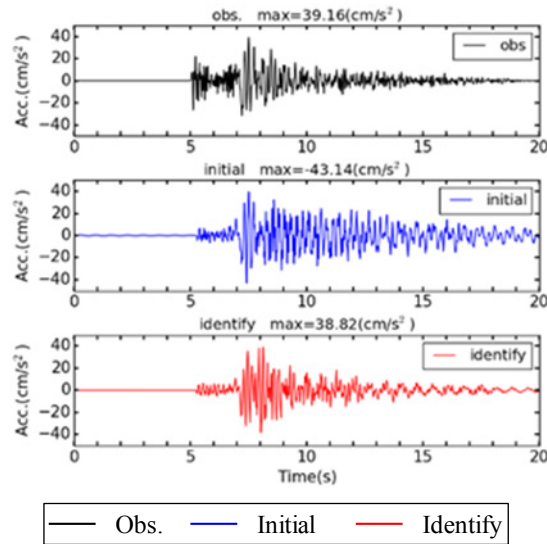
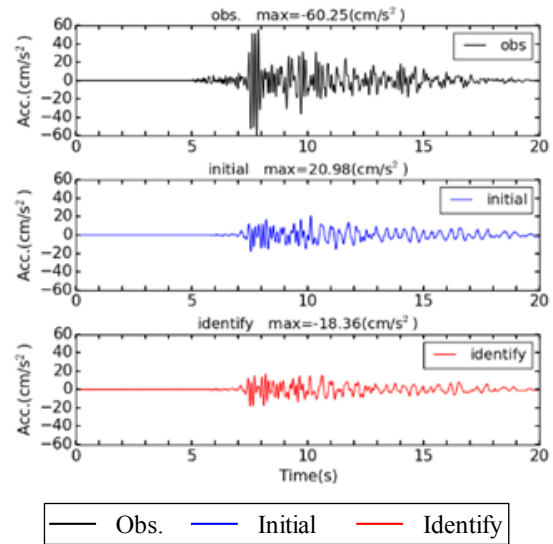


図 4.1.2.3-2a 地中地震計の観測記録を同定前後の浅部地盤モデルを用いて地表に引き上げた地震動と地表地震計の観測記録との加速度波形による比較 (1/3)。

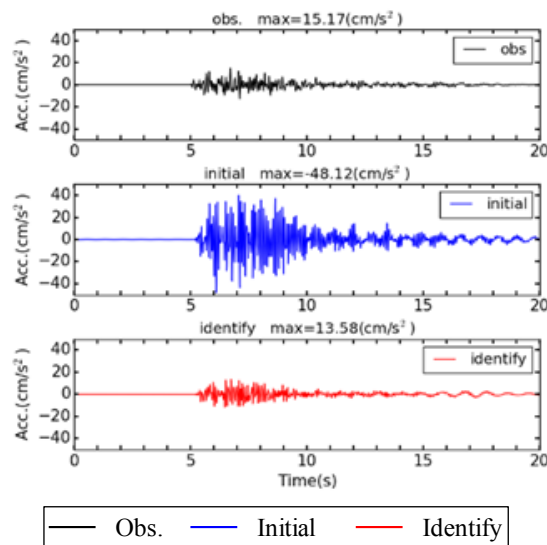
KMMH03



KMMH04



KMMH06



KMMH07

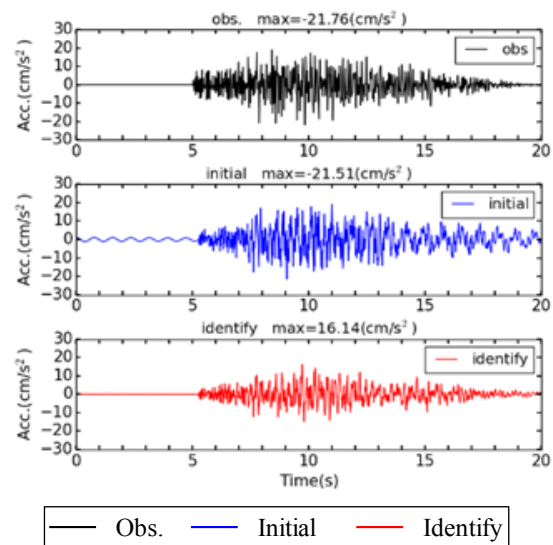


図 4.1.2.3-2b 地中地震計の観測記録を同定前後の浅部地盤モデルを用いて地表に引き上げた地震動と地表地震計の観測記録との加速度波形による比較 (2/3).

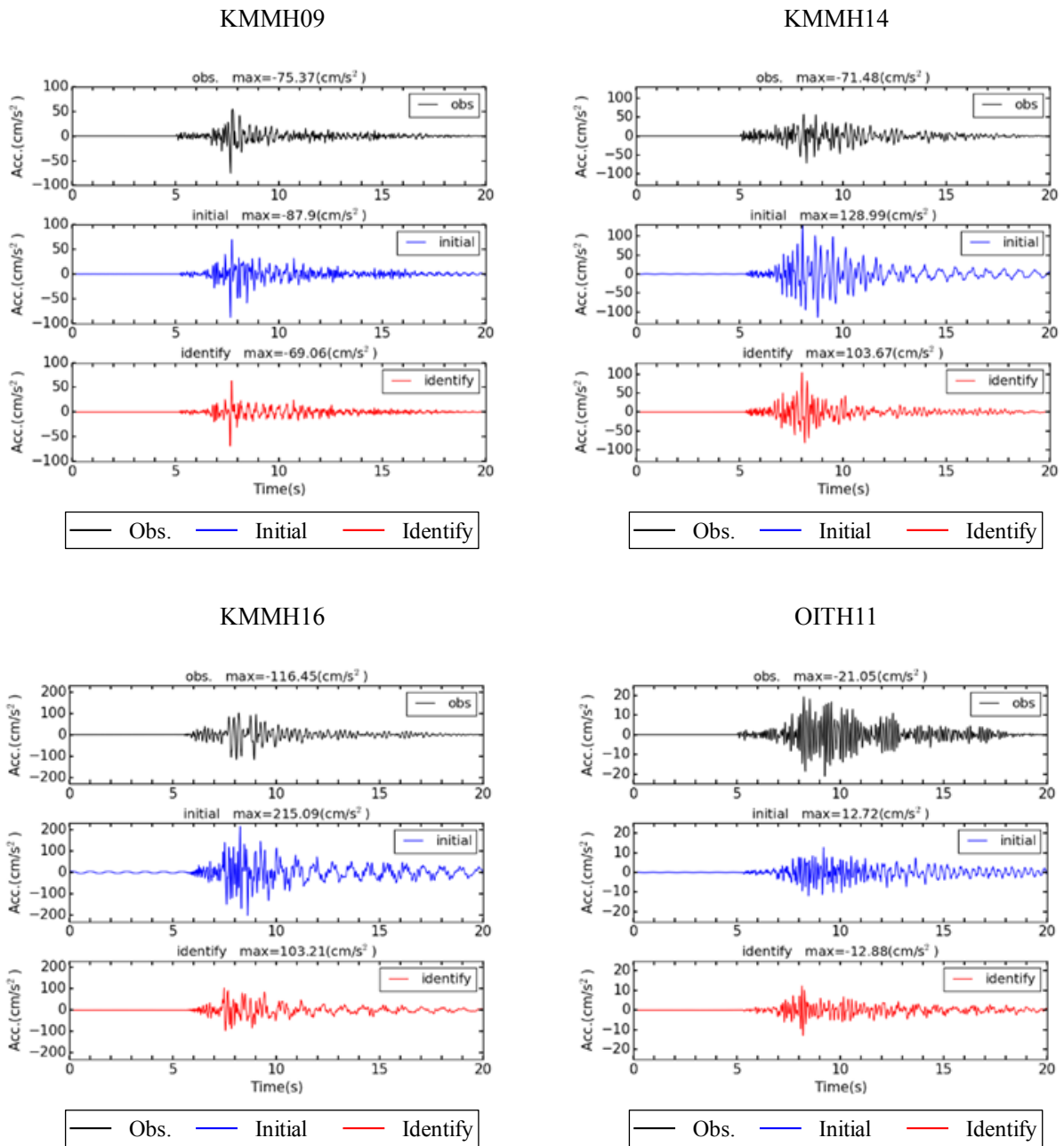


図 4.1.2.3-2c 地中地震計の観測記録を同定前後の浅部地盤モデルを用いて地表に引き上げた地震動と地表地震計の観測記録との加速度波形による比較 (3/3).

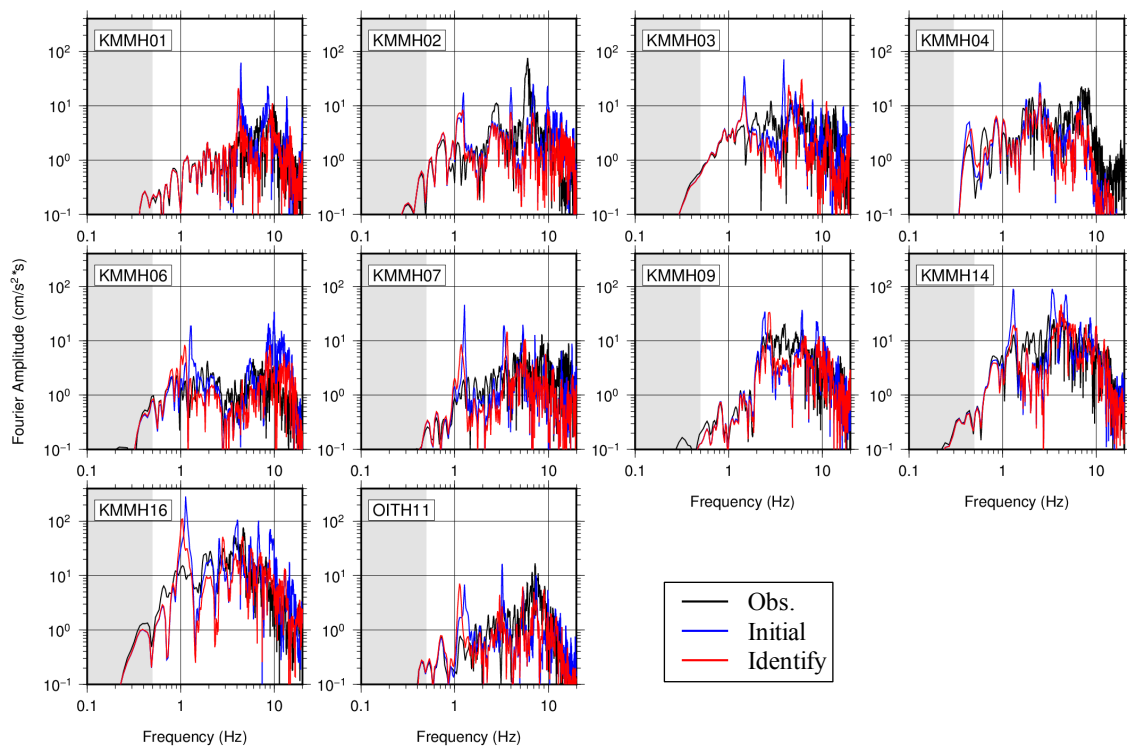


図 4.1.2.3-3 地中地震計の観測記録を同定前後の浅部地盤モデルを用いて地表に引き上げた地震動と地表地震計の観測記録との加速度フーリエスペクトルによる比較（グレー部分は検討対象外の帯域を示す）。

4.1.2.3(2) 浅部・深部地盤モデルの検証

① 浅部・深部地盤モデルの検証方法

浅部・深部両方を含めた地震基盤から地表までの地盤モデルの検証には、同定前後の地盤モデルを用いて中小地震の統計的グリーン関数を作成し観測記録と比較した。検証には2016年4月14日23時43分の地震（表4.1.2.2-1のNo.16）を用いた。この地震は、3.1.1.2において経験的グリーン関数として使用された地震である。図4.1.2.3-4に熊本地震本震の震央、検証に用いた中小地震の震央と検証を実施した観測点の位置関係を示す。検証に用いた中小地震の震源パラメータを表4.1.2.3-1に示す。ここでは、中小地震の震源を点震源と考え、等方的な放射特性を仮定した地震動の計算を行った。

今回利用したKiK-net観測点の地中地震計は、ほとんどの観測点において深度100~300 mに設置されており、最下層の V_s は400~2000 m/s前後と、地震基盤相当(3000 m/s程度以上)には到達していない。そこで、KiK-net地中地震計以深は3.1.1.2の震源インバージョンの際にチューニングされた深部地盤モデルを、KiK-net地中地震計以浅は4.1.2.2で同定された浅部地盤モデルを結合して地震基盤から地表までの地盤モデルを作成した。表4.1.2.3-2a~jに浅部地盤モデルと深部地盤モデルを結合して作成した全観測点の地盤モデルをまとめる。また、高周波数遮断特性($f_{\max}$)は、3.2における2016年4月14日23時43分の地震(表4.1.2.2-1のNo.16)の評価結果である11.1 Hzを用い、フィルターは式4.1.2.3-1に示すBoore (1983)の関数形を用いた。

$$\{1 + (f/f_{\max})^{2s}\}^{-\frac{1}{2}} \quad (4.1.2.3-1)$$

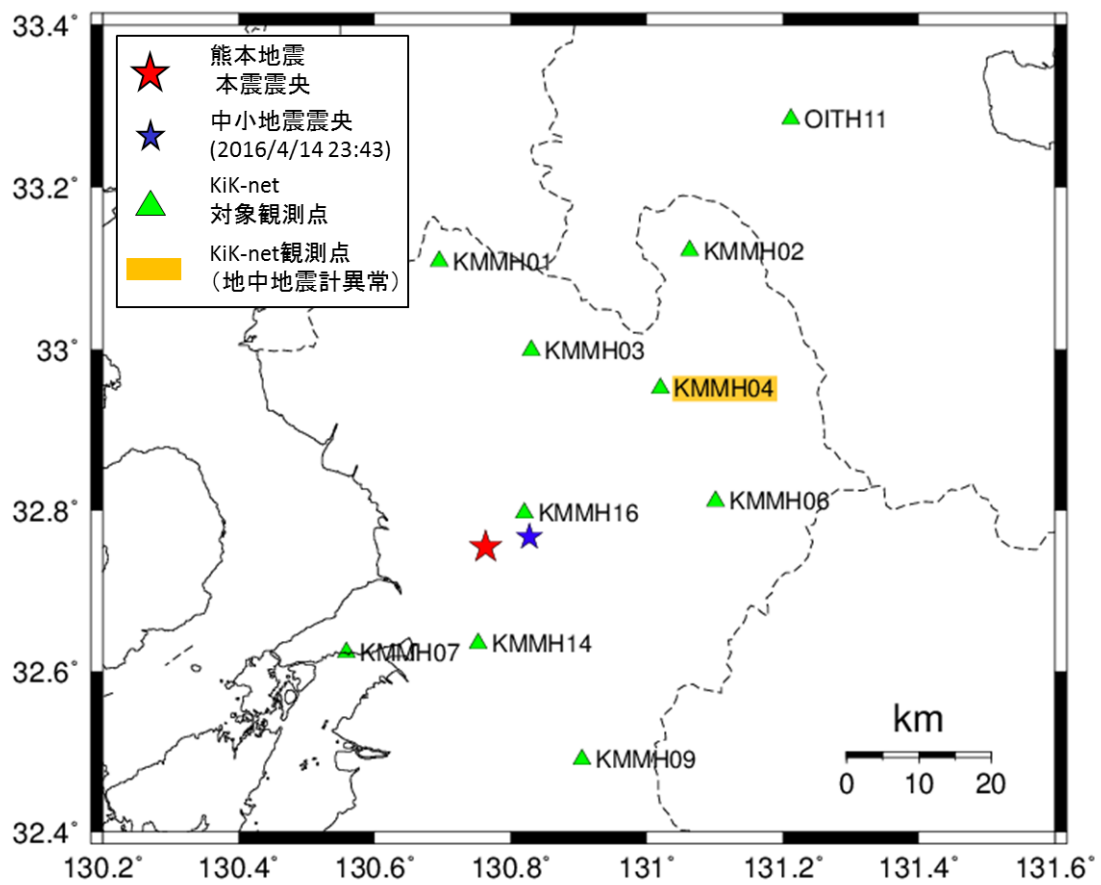


図 4.1.2.3-4 浅部・深部地盤モデルの検証に使用した中小地震（2016 年 4 月 14 日 23 時 43 分）の震央と対象とした KiK-net 観測点（緑三角）の位置関係.

表 4.1.2.3-1 浅部・深部地盤モデルの検証に使用した中小地震
(2016 年 4 月 14 日 23 時 43 分) の震源パラメータ

断層パラメータ		単位	値	設定方法
震源位置	Lat.	°	32.7670	気象庁
	Lon.	°	130.8273	
	Depth	km	8.0	F-net
地震モーメント	M_0	Nm	2.71E+16	
モーメント マグニチュード	M_w	-	4.89	$M_w = (\log M_0 - 9.1) / 1.5$
応力降下量	$\Delta\sigma$	MPa	10.3	$\Delta\sigma = (7/16) * M_0 * (f_c / 0.37 \beta)^3$
ライズタイム	T_r	s	0.15	3.1.1.2 より
S 波速度	β	km/s	3.4	J-SHIS 全国共通の値
密度	ρ	g/cm ³	2.7	
高周波遮断周波数	f_{max}	Hz	11.1	3.2 より
フィルター関数 (式 4.1.2.3-1) の指数	s	—	1.74	
Q 値	Q	—	$62f^{0.87}$	佐藤 (2016)

表 4.1.2.3-2a 浅部・深部地盤モデルを接続して作成した地盤モデル (KMMH01)

①浅部同定前 (PS検層)					②浅部のみ同定					③深部のみ同定(3.1.1.2)					④設定モデル					備考
層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	
1	1	1.2	150	10	1	1	1.2	180	6	—	—	—	—	—	1	1	1.2	180	6	②のパラメータ使用
9	10	1.9	380	25	9	10	1.9	460	11	10	10	1.8	390	60	9	10	1.9	460	11	②のパラメータ使用
12	22	2.2	790	53	12	22	2.2	950	27	8	18	2.0	790	100	12	22	2.2	950	27	②のパラメータ使用
16	38	2.3	1200	80	16	38	2.3	1430	36	17	35	2.1	1300	150	16	38	2.3	1430	36	②のパラメータ使用
65	103	2.5	1900	127	65	103	2.5	1680	42	68	103	2.3	1900	200	65	103	2.5	1680	42	②のパラメータ使用 下面深度が③と同じ になるように層厚を設定
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	197	300	2.7	2620	200	197	300	2.7	2620	200	③のパラメータ使用
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	700	1000	2.7	2710	200	700	1000	2.7	2710	200	③のパラメータ使用
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1000	2000	2.7	3200	200	—	—	2.7	3200	200	半無限層として設定

表 4.1.2.3-2b 浅部・深部地盤モデルを結合して作成した地盤モデル (KMMH02)

①浅部同定前 (PS検層)					②浅部のみ同定					③深部のみ同定(3.1.1.2)					④設定モデル					備考
層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	
2	2	1.2	120	8	2	2	1.2	140	5	—	—	—	—	—	2	2	1.2	140	5	②のパラメータ使用
4	6	1.6	370	25	4	6	1.6	440	14	—	—	—	—	—	4	6	1.6	440	14	②のパラメータ使用
16	22	2.2	1100	73	16	22	2.2	1320	34	—	—	—	—	—	16	22	2.2	1320	34	②のパラメータ使用
20	42	2.2	800	53	20	42	2.2	960	25	41	41	2.2	950	150	20	42	2.2	960	25	②のパラメータ使用
85	127	2.0	630	42	85	127	2.0	610	17	79	120	2.2	630	150	78	120	2.0	610	17	②のパラメータ使用 下面深度が③と同じ になるように層厚を設定
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	130	250	2.2	1280	150	130	250	2.2	1280	150	③のパラメータ使用
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	250	500	2.3	1410	150	250	500	2.3	1410	150	③のパラメータ使用
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	500	1000	2.3	1750	150	500	1000	2.3	1750	150	③のパラメータ使用
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1000	2000	2.7	3200	200	—	—	2.7	3200	200	半無限層として設定

表 4.1.2.3-2c 浅部・深部地盤モデルを結合して作成した地盤モデル (KMMH03)

①浅部同定前 (PS検層)					②浅部のみ同定					③深部のみ同定(3.1.1.2)					④設定モデル					備考
層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	
2	2	1.3	150	10	2	2	1.3	180	7	—	—	—	—	—	2	2	1.3	180	7	②のパラメータ使用
16	18	1.6	430	29	16	18	1.6	520	35	—	—	—	—	—	16	18	1.6	520	35	②のパラメータ使用
12	30	1.9	580	39	12	30	1.9	700	24	—	—	—	—	—	12	30	1.9	700	24	②のパラメータ使用
26	56	2.2	720	48	26	56	2.2	860	22	19	19	1.8	430	150	26	56	2.2	860	22	②のパラメータ使用
24	80	2.1	460	31	24	80	2.1	410	16	11	30	2.0	580	150	24	80	2.1	410	16	②のパラメータ使用
48	128	2.3	1300	87	48	128	2.3	1560	40	98	128	2.0	1000	150	48	128	2.3	1560	40	②のパラメータ使用
75	203	2.5	2000	133	75	203	2.5	2270	57	72	200	2.3	2000	150	72	200	2.5	2270	57	②のパラメータ使用 下面深度が③と同じ になるように層厚を設定
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	195	395	2.4	2780	150	195	395	2.4	2780	150	③のパラメータ使用
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1605	2000	2.7	3080	200	—	—	2.7	3080	200	半無限層として設定

表 4.1.2.3-2d 浅部・深部地盤モデルを結合して作成した地盤モデル (KMMH04)

①浅部同定前 (PS検層)					②浅部のみ同定					③深部のみ同定(3.1.1.2)					④設定モデル					備考
層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	
2	2	1.1	80	5	2	2	1.1	80	6	—	—	—	—	—	2	2	1.1	80	6	②のパラメータ使用
2	4	1.9	80	5	2	4	1.9	100	7	—	—	—	—	—	2	4	1.9	100	7	②のパラメータ使用
8	12	1.9	220	15	8	12	1.9	260	9	—	—	—	—	—	8	12	1.9	260	9	②のパラメータ使用
24	36	1.9	110	7	24	36	1.9	90	6	—	—	—	—	—	24	36	1.9	90	6	②のパラメータ使用
22	58	1.9	150	10	22	58	1.9	180	13	—	—	—	—	—	22	58	1.9	180	13	②のパラメータ使用
18	76	1.9	280	19	18	76	1.9	340	25	—	—	—	—	—	18	76	1.9	340	25	②のパラメータ使用
20	96	1.9	200	13	20	96	1.9	240	18	—	—	—	—	—	20	96	1.9	240	18	②のパラメータ使用
34	130	1.9	330	22	34	130	1.9	400	29	120	120	1.8	200	100	24	120	1.9	400	29	②のパラメータ使用 下面深度が③と同じ になるように層厚を設定
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	130	250	2.1	1090	150	130	250	2.1	1090	150	③のパラメータ使用
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	250	500	2.4	2240	200	250	500	2.4	2240	200	③のパラメータ使用
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	500	1000	2.4	2290	200	500	1000	2.4	2290	200	③のパラメータ使用
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1000	2000	2.7	3110	200	—	—	2.7	3110	200	半無限層として設定

表 4.1.2.3-2e 浅部・深部地盤モデルを結合して作成した地盤モデル (KMMH06)

①浅部同定前 (PS検層)					②浅部のみ同定					③深部のみ同定(3.1.1.2)					④設定モデル					備考
層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	
2	2	1.2	100	7	2	2	1.2	120	5	—	—	—	—	—	2	2	1.2	120	5	②のパラメータ使用
10	12	1.7	480	32	10	12	1.7	380	10	—	—	—	—	—	10	12	1.7	380	10	②のパラメータ使用
20	32	2.4	1500	100	20	32	2.4	1790	56	—	—	—	—	—	20	32	2.4	1790	56	②のパラメータ使用
18	50	2.4	810	54	18	50	2.4	970	25	—	—	—	—	—	18	50	2.4	970	25	②のパラメータ使用
38	88	2.0	450	30	38	88	2.0	360	9	111	111	2.0	470	60	38	88	2.0	360	9	②のパラメータ使用
26	114	2.2	1100	73	26	114	2.2	1320	34	139	250	2.2	900	150	162	250	2.2	1320	34	②のパラメータ使用 下面深度が③と同じ になるように層厚を設定
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	250	500	2.3	830	200	250	500	2.3	830	200	③のパラメータ使用
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	500	1000	2.4	2250	200	500	1000	2.4	2250	200	③のパラメータ使用
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1000	2000	2.7	3200	200	—	—	2.7	3200	200	半無限層として設定

表 4.1.2.3-2f 浅部・深部地盤モデルを結合して作成した地盤モデル (KMMH07)

①浅部同定前 (PS検層)					②浅部のみ同定					③深部のみ同定(3.1.1.2)					④設定モデル					備考
層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	
5	5	1.9	600	40	5	5	1.9	710	43	—	—	—	—	—	5	5	1.9	710	43	②のパラメータ使用
25	30	2.0	810	54	25	30	2.0	960	41	—	—	—	—	—	25	30	2.0	960	41	②のパラメータ使用
50	80	2.1	1000	67	50	80	2.1	1200	31	—	—	—	—	—	50	80	2.1	1200	31	②のパラメータ使用
20	100	2.2	1300	87	20	100	2.2	1480	39	—	—	—	—	—	20	100	2.2	1480	39	②のパラメータ使用
15	115	2.1	1100	73	15	115	2.1	1290	36	30	30	1.9	810	100	15	115	2.1	1290	36	②のパラメータ使用
105	220	2.2	1300	87	105	220	2.2	1050	27	50	80	1.9	1000	100	105	220	2.2	1050	27	②のパラメータ使用
15	235	2.5	1700	113	15	235	2.5	1810	82	140	220	2.2	1300	150	15	235	2.5	1810	82	②のパラメータ使用
68	303	2.5	2000	133	68	303	2.5	2330	60	260	480	2.4	2000	200	245	480	2.5	2330	60	②のパラメータ使用 下面深度が③と同じ になるように層厚を設定
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1520	2000	2.7	3200	200	—	—	2.7	3200	200	半無限層として設定

表 4.1.2.3-2g 浅部・深部地盤モデルを結合して作成した地盤モデル（KMMH09）

①浅部同定前（PS検層）					②浅部のみ同定					③深部のみ同定(3.1.1.2)					④設定モデル					備考
層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	
4	4	1.3	150	10	4	4	1.3	120	6	—	—	—	—	—	4	4	1.3	120	6	②のパラメータ使用
6	10	1.6	350	23	6	10	1.6	420	27	10	10	1.7	350	50	6	10	1.6	420	27	②のパラメータ使用
12	22	1.8	530	35	12	22	1.8	630	20	12	22	1.9	530	100	12	22	1.8	630	20	②のパラメータ使用
18	40	2.0	930	62	18	40	2.0	1120	29	18	40	2.0	930	100	18	40	2.0	1120	29	②のパラメータ使用
24	64	2.0	670	45	24	64	2.0	700	20	24	64	2.0	670	100	24	64	2.0	700	20	②のパラメータ使用
12	76	2.1	960	64	12	76	2.1	1140	29	12	76	2.1	960	100	12	76	2.1	1140	29	②のパラメータ使用
27	103	2.3	1600	107	27	103	2.3	1920	62	74	150	2.2	1600	150	74	150	2.3	1920	62	②のパラメータ使用 下面深度が③と同じ になるように層厚を設定
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	350	500	2.4	2100	200	350	500	2.4	2100	200	③のパラメータ使用
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	500	1000	2.7	2640	200	500	1000	2.7	2640	200	③のパラメータ使用
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1000	2000	2.7	3030	200	—	—	2.7	3030	200	半無限層として設定

表 4.1.2.3-2h 浅部・深部地盤モデルを結合して作成した地盤モデル (KMMH14)

①浅部同定前 (PS検層)					②浅部のみ同定					③深部のみ同定					④設定モデル					備考
層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	
4	4	1.2	110	7	4	4	1.2	130	11	—	—	—	—	—	4	4	1.2	130	11	②のパラメータ使用
6	10	1.3	180	12	6	10	1.3	220	9	10	10	1.6	170	60	6	10	1.3	220	9	②のパラメータ使用
10	20	2.0	330	22	10	20	2.0	400	28	10	20	2.0	330	60	10	20	2.0	400	28	②のパラメータ使用
38	58	2.0	480	32	38	58	2.0	580	20	38	58	2.0	480	60	38	58	2.0	580	20	②のパラメータ使用
30	88	2.0	480	32	30	88	2.0	480	15	30	88	2.0	480	60	30	88	2.0	480	15	②のパラメータ使用
12	100	2.2	690	46	12	100	2.2	810	35	12	100	2.1	690	100	12	100	2.2	810	35	②のパラメータ使用
13	113	2.3	1540	103	13	113	2.3	1850	138	150	250	2.1	1810	200	150	250	2.3	1850	138	②のパラメータ使用 下面深度が③と同じ になるように層厚を設定
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	250	500	2.2	1940	200	250	500	2.2	1940	200	③のパラメータ使用
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	500	1000	2.2	2170	200	500	1000	2.2	2170	200	③のパラメータ使用
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1000	2000	2.7	3200	200	—	—	2.7	3200	200	半無限層として設定

表 4.1.2.3-2i 浅部・深部地盤モデルを結合して作成した地盤モデル (KMMH16)

①浅部同定前 (PS検層)					②浅部のみ同定					③深部のみ同定(3.1.1.2)					④設定モデル					備考
層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	
3	3	1.2	110	7	3	3	1.2	120	5	—	—	—	—	—	3	3	1.2	120	5	②のパラメータ使用
12	15	1.4	240	16	12	15	1.4	290	15	—	—	—	—	—	12	15	1.4	290	15	②のパラメータ使用
18	33	1.8	500	33	18	33	1.8	600	20	—	—	—	—	—	18	33	1.8	600	20	②のパラメータ使用
8	41	1.8	400	27	8	41	1.8	480	21	—	—	—	—	—	8	41	1.8	480	21	②のパラメータ使用
28	69	2.1	760	51	28	69	2.1	900	26	—	—	—	—	—	28	69	2.1	900	26	②のパラメータ使用
32	101	2.1	820	55	32	101	2.1	980	50	—	—	—	—	—	32	101	2.1	980	50	②のパラメータ使用
32	133	2.3	1470	98	32	133	2.3	1650	82	—	—	—	—	—	32	133	2.3	1650	82	②のパラメータ使用
10	143	2.3	700	47	10	143	2.3	560	15	—	—	—	—	—	10	143	2.3	560	15	②のパラメータ使用
26	169	2.3	1380	92	26	169	2.3	1250	33	—	—	—	—	—	26	169	2.3	1250	33	②のパラメータ使用
32	201	2.1	840	56	32	201	2.1	680	17	70	70	2.4	750	200	32	201	2.1	680	17	②のパラメータ使用
33	234	2.1	1470	98	33	234	2.1	1640	45	164	234	2.1	1000	200	33	234	2.1	1640	45	②のパラメータ使用
21	255	2.6	2700	180	21	255	2.6	2910	91	266	500	2.4	2460	200	266	500	2.6	2910	91	②のパラメータ使用 下面深度が③と同じ になるように層厚を設定
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	500	1000	2.4	1210	200	500	1000	2.4	1210	200	③のパラメータ使用
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1000	2000	2.4	3000	200	—	—	2.4	3000	200	半無限層として設定

表 4.1.2.3-2j 浅部・深部地盤モデルを結合して作成した地盤モデル (OITH11)

①浅部同定前 (PS検層)					②浅部のみ同定					③深部のみ同定(3.1.1.2)					④設定モデル					備考
層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	層厚 (m)	下面 深度 (m)	密度 (g/cm ³)	Vs (m/s)	Qs	
4	4	1.6	230	15	4	4	1.6	190	14	—	—	—	—	—	4	4	1.6	190	14	②のパラメータ使用
6	10	2.1	530	35	6	10	2.1	610	35	—	—	—	—	—	6	10	2.1	610	35	②のパラメータ使用
10	20	2.1	690	46	10	20	2.1	820	35	—	—	—	—	—	10	20	2.1	820	35	②のパラメータ使用
10	30	2.0	450	30	10	30	2.0	540	29	—	—	—	—	—	10	30	2.0	540	29	②のパラメータ使用
34	64	2.1	560	37	34	64	2.1	450	21	—	—	—	—	—	34	64	2.1	450	21	②のパラメータ使用
56	120	2.1	790	53	56	120	2.1	640	16	120	120	1.9	600	100	56	120	2.1	640	16	②のパラメータ使用
43	163	2.2	990	66	43	163	2.2	1190	87	643	763	2.2	1100	150	643	763	2.2	1190	87	②のパラメータ使用 下面深度が③と同じ になるように層厚を設定
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1237	2000	2.7	3200	200	—	—	2.7	3200	200	半無限層として設定

② 浅部・深部地盤モデルの検証結果

同定前後のシミュレーション結果と地表観測記録を加速度・速度波形を用いて比較した結果を図 4.1.2.3-5a～e に示す．ここでは，同定前のモデルは表 4.1.2.3-2a～j 中の①と③を結合したモデルを，同定後のモデルは表 4.2.2.3-2a～j 中の④モデルを使用している．

これを見ると，ほとんどの観測点において同定前よりも同定後の地盤モデルを用いることで最大加速度・速度が観測に近づく傾向にあった．

表 4.1.2.3-3a および 3b に同定後の地盤モデルを用いたシミュレーション結果と観測記録との最大加速度，最大速度の比をまとめている．シミュレーション結果の最大値は，観測記録の最大値に対してやや大きめである傾向が見られる．このことは，全体的に同定結果の Q_s 値がやや大きめ（減衰が小さい）である可能性を示唆している．この最大値の推定精度の向上については， Q_s 値の関数形，つまり周波数依存性の考慮の必要性も含めて，今後の課題である．

加速度フーリエスペクトルで比較した結果を図 4.1.2.3-6 に示す．これを見ると，今回同定を行った KiK-net 地中地震計より浅い地盤で決まる数 Hz 以上の周波数帯域（地盤モデルによって異なるが，図中グレーで示していない周波数帯域を指す）では，ほとんどの観測点において同定を行うことによって，シミュレーション結果はより観測に近づく結果となった．しかし，同定の結果が良好でない3観測点（KMMH02, KMMH04, OITH11）においては，高周波数側（6～10 Hz 付近）でシミュレーション結果は観測をよく説明できていない．これらの観測点では，浅部地盤の同定の際にも同じ周波数帯域（6～10 Hz 付近）で同定結果の伝達関数がターゲットをよく説明できていないことから，観測記録をよく説明できない要因が浅部地盤の影響であることが示唆される．

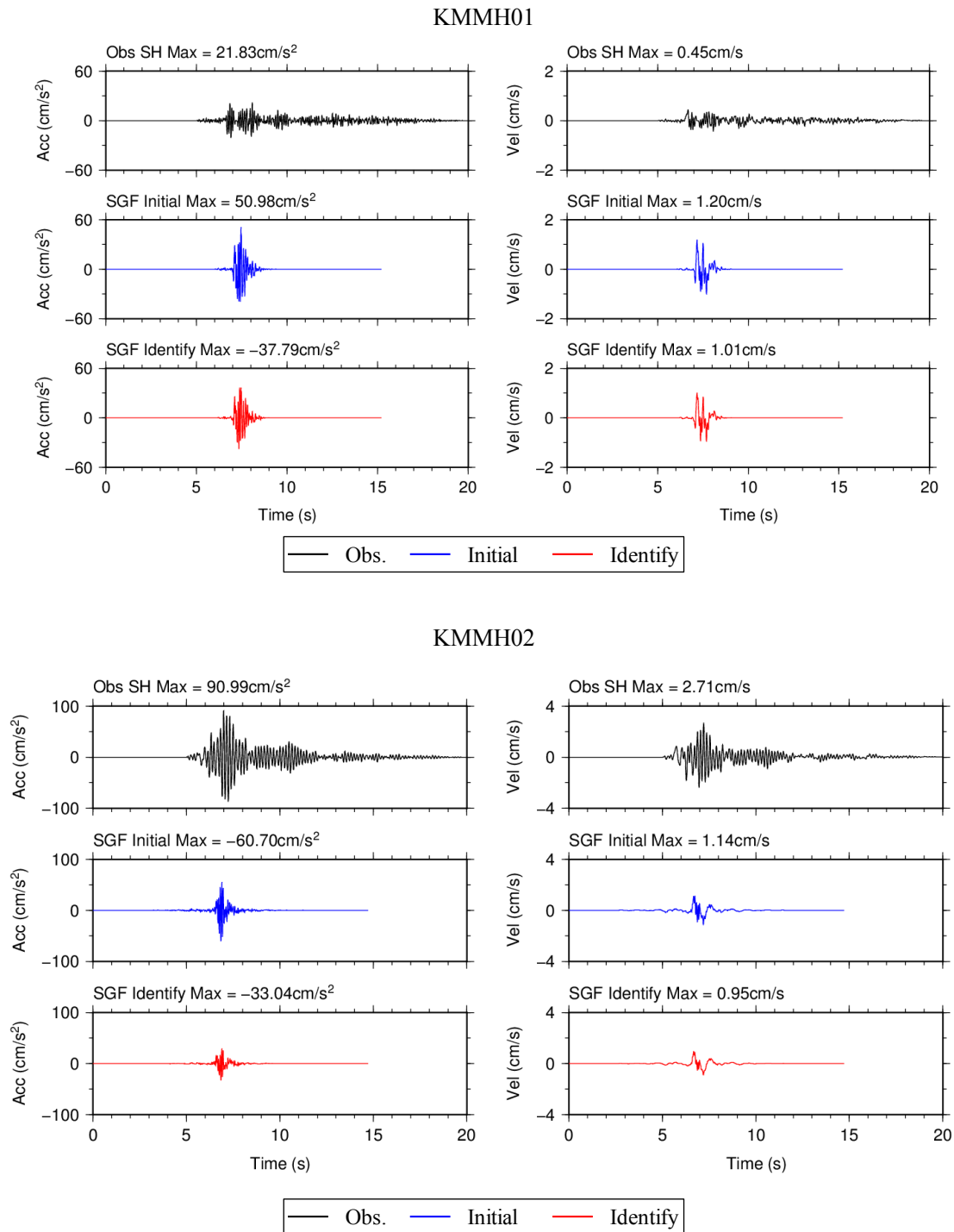
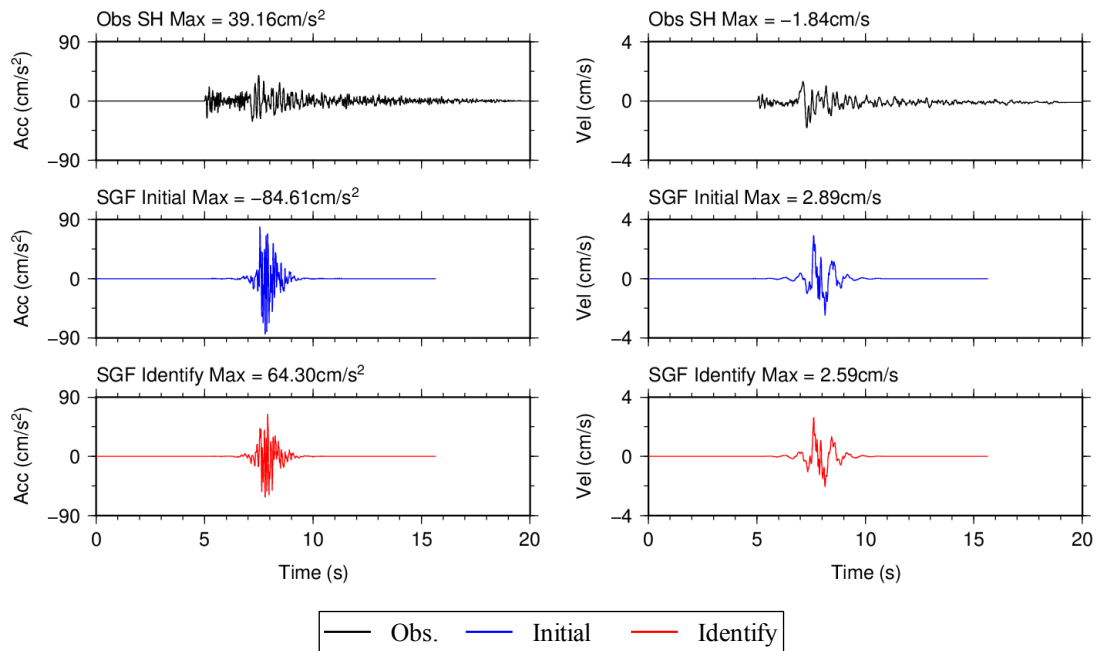


図 4.1.2.3-5a 同定前後の浅部・深部地盤モデルを用いたシミュレーション結果と観測記録の加速度波形（左）・速度波形（右）による比較（1/5）.

KMMH03



KMMH04

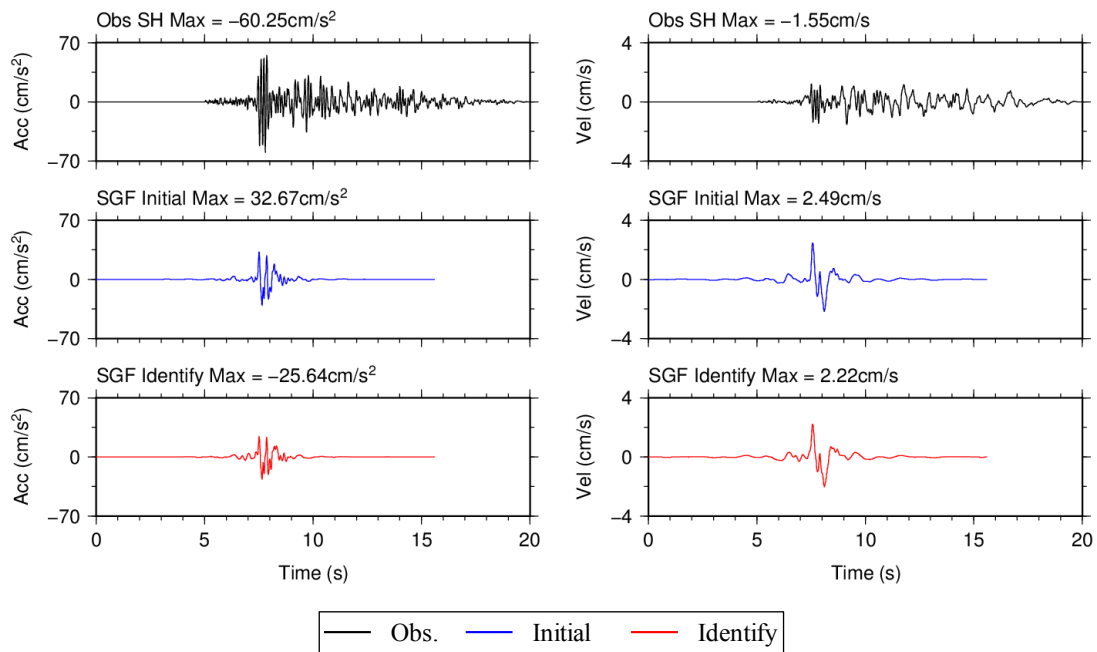


図 4.1.2.3-5b 同定前後の浅部・深部地盤モデルを用いたシミュレーション結果と観測記録の加速度波形（左）・速度波形（右）による比較（2/5）.

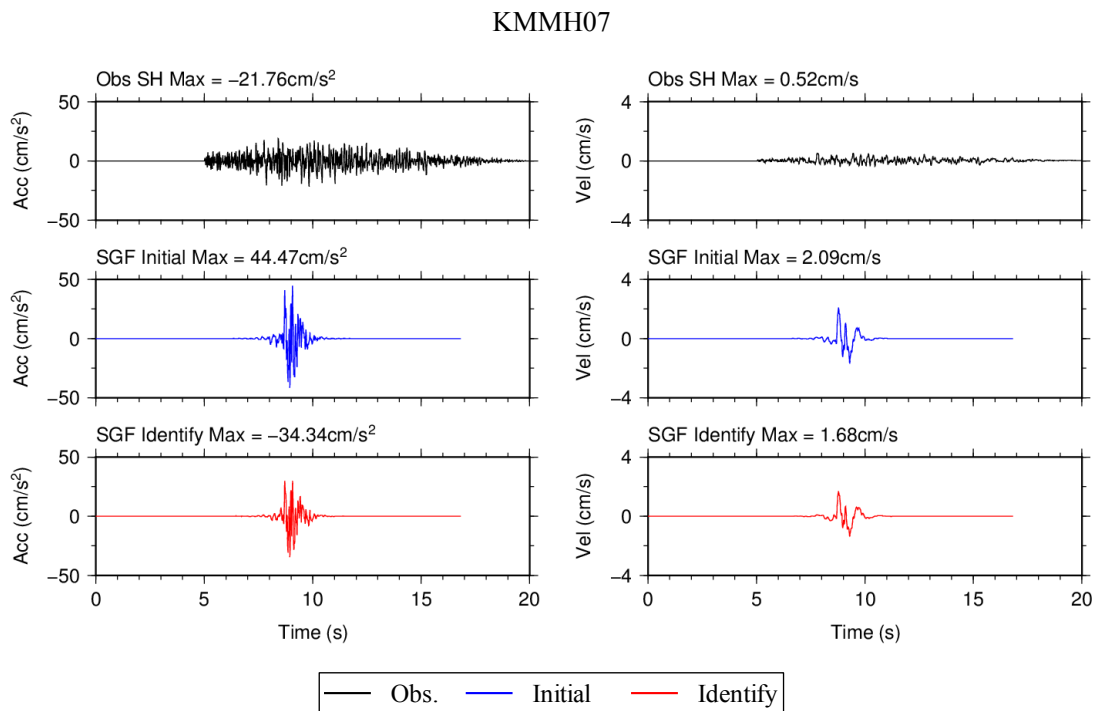
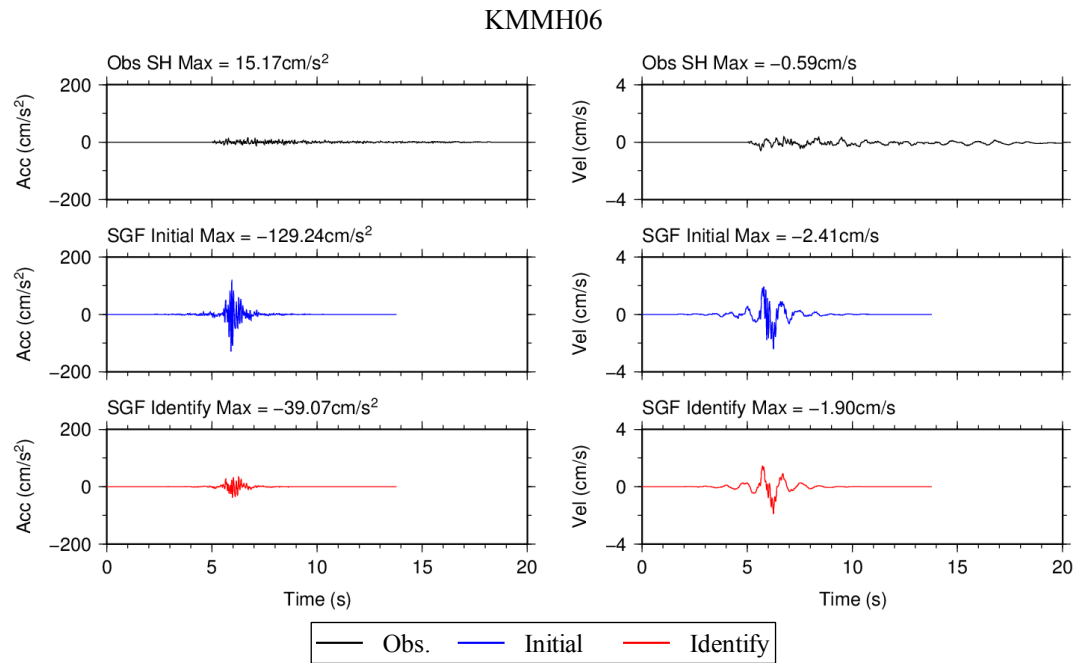
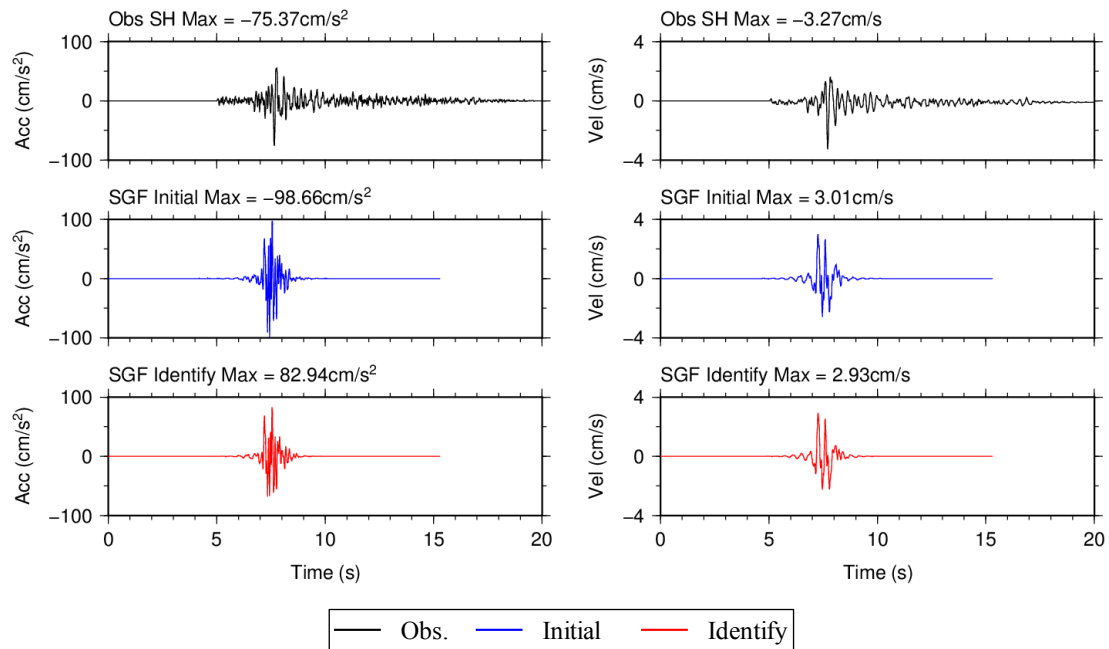


図 4.1.2.3-5c 同定前後の浅部・深部地盤モデルを用いたシミュレーション結果と観測記録の加速度波形（左）・速度波形（右）による比較（3/5）.

KMMH09



KMMH14

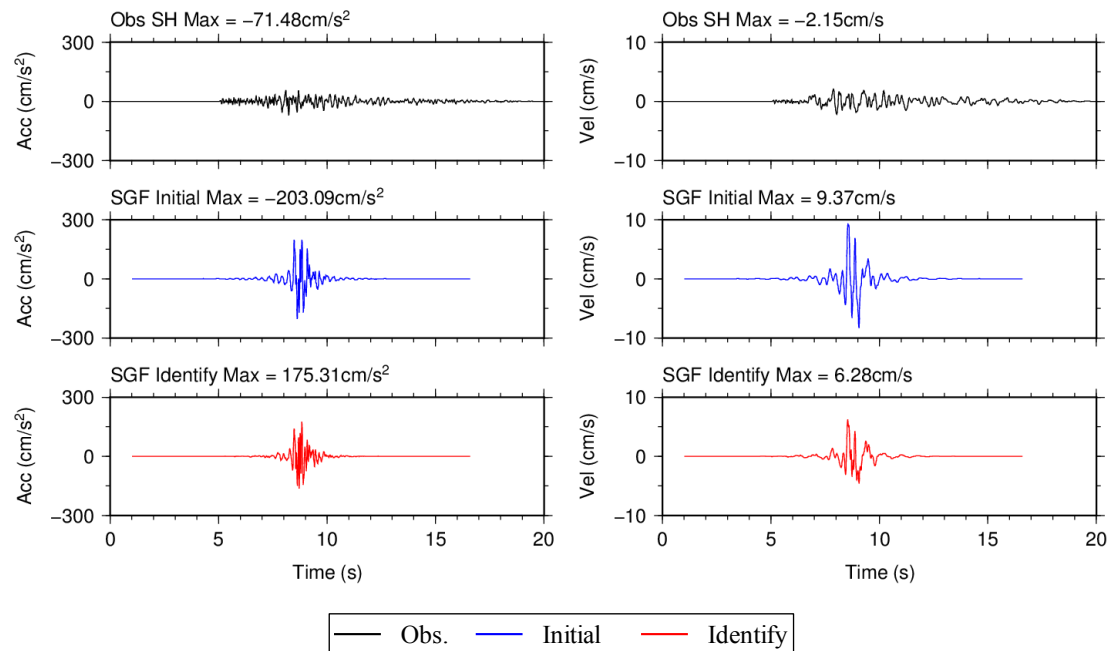
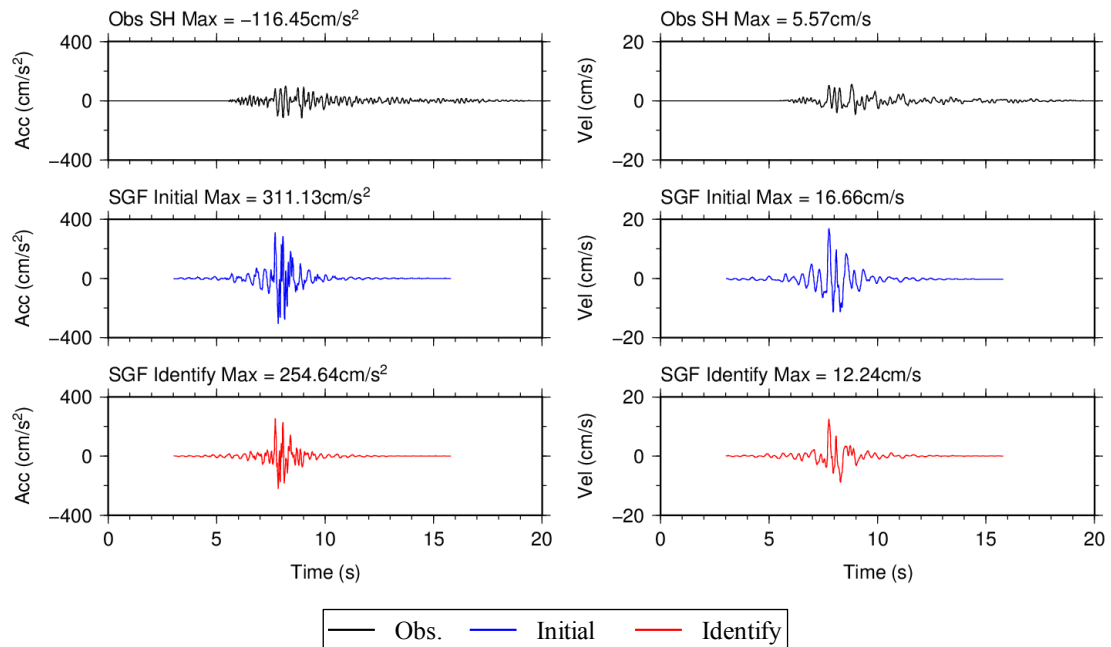


図 4.1.2.3-5d 同定前後の浅部・深部地盤モデルを用いたシミュレーション結果と観測記録の加速度波形（左）・速度波形（右）による比較（4/5）.

KMMH16



OITH11

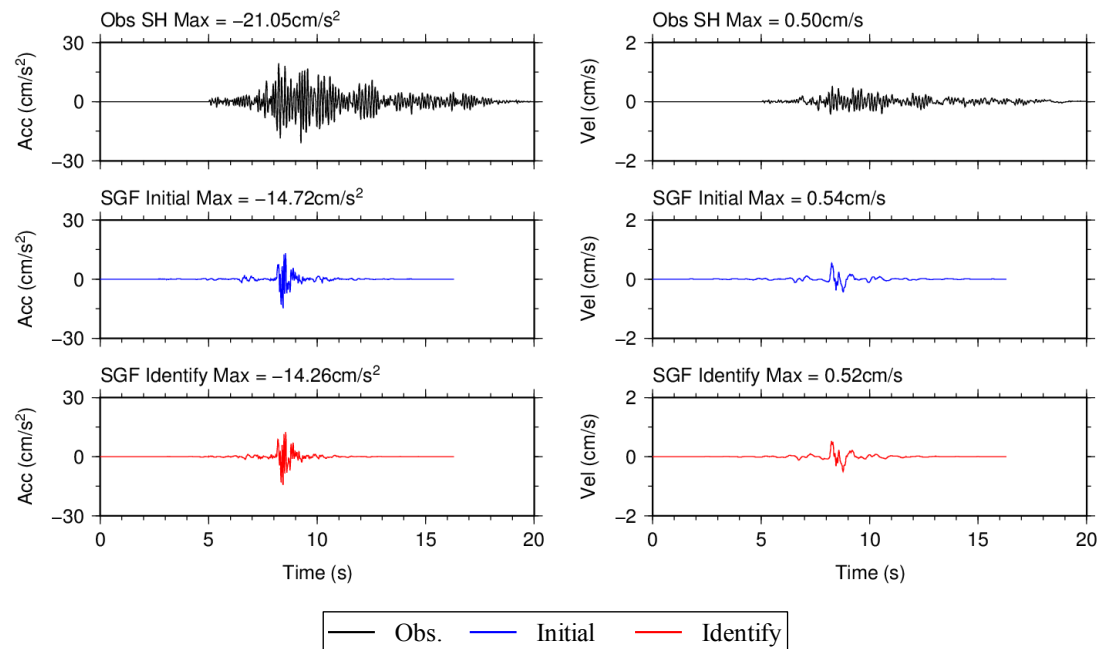


図 4.1.2.3-5e 同定前後の浅部・深部地盤モデルを用いたシミュレーション結果と観測記録の加速度波形（左）・速度波形（右）による比較（5/5）.

表 4.1.2.3-3a シミュレーション結果と観測記録の比較（最大加速度）

最大加速度 (cm/s ²)	KMMH01	KMMH02	KMMH03	KMMH04	KMMH06	KMMH07	KMMH09	KMMH14	KMMH16	OITH11
①Obs.(SH)	21.8	91.0	39.2	60.3	15.2	21.8	75.4	71.5	116.5	21.1
②Sim.	51.0	33.0	64.3	25.6	39.1	34.3	82.9	175.3	254.6	14.3
②／①	2.3	0.4	1.6	0.4	2.6	1.6	1.1	2.5	2.2	0.7

表 4.1.2.3-3b シミュレーション結果と観測記録の比較（最大速度）

最大速度 (cm/s)	KMMH01	KMMH02	KMMH03	KMMH04	KMMH06	KMMH07	KMMH09	KMMH14	KMMH16	OITH11
①Obs.(SH)	0.4	2.7	1.8	1.5	0.6	0.5	3.3	2.1	5.6	0.5
②Sim.	1.0	1.0	2.6	2.2	1.9	1.7	2.9	6.3	12.2	0.5
②／①	2.5	0.4	1.4	1.5	3.2	3.4	0.9	3.0	2.2	1.0

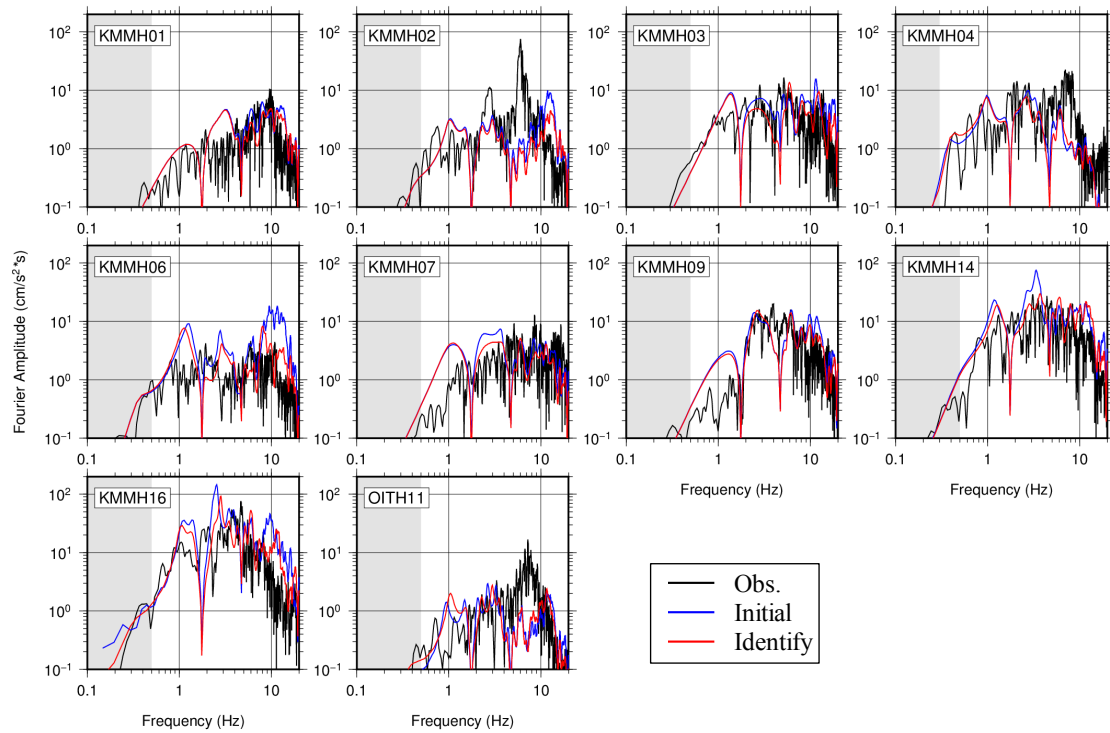


図 4.1.2.3-6 同定前後の浅部・深部地盤モデルを用いたシミュレーション結果と観測記録の加速度フーリエスペクトルによる比較（グレー部分は検討対象外の帯域を示す）。

4.1.2.4 おわりに

ここでは、2016 年熊本地震本震（4 月 16 日 1 時 25 分 $M_{JMA}7.3$ ）の地震動シミュレーションの高精度化を目的に地盤同定を実施し、KiK-net 地中地震計以浅（浅部地盤モデル）のサイト増幅特性を推定した。得られた地盤モデルは中小地震の観測記録を用いて検証を行った。

はじめに、同定前後の地盤モデルより得られる伝達関数を KiK-net 地中記録に掛け合わせた結果と、地表観測記録とを比較した。その結果、同定後の地盤モデルを用いたシミュレーション結果は、同定前の地盤モデルを用いる場合よりも地表観測記録をよく説明できることが確認できた。

次に、同定した浅部地盤モデルと 3.1.1.2 でチューニングされた地盤モデルを結合し、地震基盤から地表までの地盤モデルを作成した。この地盤モデルを用いて中小地震を対象に統計的グリーン関数を作成し、シミュレーション結果と観測記録との比較を行った。その結果、KiK-net 地中地震計以浅の地盤の影響が大きい数 Hz 以上の周波数帯域では、多くの観測点で同定を行うことによって、より観測に近いシミュレーション結果が得られることが確認できた。

しかし、いくつかの観測点では、6 ～ 10 Hz 付近の周波数帯域において、浅部地盤の同定結果が良好ではなかった。これらの観測点では、地震基盤から地表までの地盤モデルを用いた場合のシミュレーション結果でも同様に同じ周波数帯域での観測記録の説明性が良好ではなかった。このことから、浅部地盤のモデル化の精度が向上すれば、さらに多くの観測点で数 Hz 以上の周波数帯域の説明性が向上する可能性があると言える。

4.1.2.5 参考文献

- Boore, D. M. (1983), Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.* 73, 6, 1865–1894.
- 防災科学技術研究所, 強震観測網 (KiK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> (2016 年 5 月 17 日確認)
- 防災科学技術研究所, 強震観測網 (KiK-net 未選別データ), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/> (2016 年 5 月 17 日確認)
- 防災科学技術研究所, 観測点設置方位, http://www.hinet.bosai.go.jp/st_info/detail/ (2016 年 5 月 17 日確認)
- 防災科学技術研究所, 広帯域地震観測網, <http://www.fnet.bosai.go.jp/> (2016 年 5 月 17 日確認)
- Gardner, G. H. F., Gardner, L. W., and Gregory, A. R. (1974), Formation velocity and density – The diagnostic basics for stratigraphic traps, *Geophysics*, 39(6), 770-780.
- 気象庁, 震源データ, <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/hypo.html> (2016 年 5 月 17 日確認)
- 佐藤智美 (2016), スペクトルインバージョンに基づく熊本地震と前震・余震等の震源・伝播・サイト特性, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, MIS34-P71.

4.2 震源インバージョン結果等に基づく特性化震源モデルによる強震動評価

ここでは、3.1.1.2 の経験的グリーン関数法による震源モデリングで得られた特性化震源モデル（以降、「SMGA モデル」と呼ぶ）を基に、工学的検証のためにレシピ（地震調査研究推進本部、2016）を参考にして新たに構築する特性化震源モデルと、4.1 で検証された地盤モデルを用いて、ハイブリッド合成手法による地震動シミュレーションを行う。ハイブリッド合成では、0.5 ～ 1 Hz を遷移周波数帯域として、高周波数側は統計的グリーン関数法、低周波数側は理論的手法（波数積分法（久田，1997））を用いて地震動を評価し、波形合成を行う。このように評価された対象観測点における地震動を工学的に重要な周期帯域に着目しながら観測地震動との比較検証を行い、工学的検証のために CGOF（Dreger *et al.*, 2015）を用いて合成地震動と観測地震動の差を定量的に評価する。

次に、ここで構築した特性化震源モデルを参考に、ハイブリッド合成手法を用いて工学的基盤における面的な地震動評価を実施し、既往の地震動予測式との比較検証を実施する。

また、KMMH16 の永久変位の再現性を確認することを目的に、ここで構築した特性化震源モデルを用いて、波数積分法による地震動シミュレーション結果と観測記録との比較を行う。

4.2.1 震源インバージョン結果等に基づく特性化震源モデルの構築

① はじめに

表 4.2.1-1 に 3.1.1.2 で得られた SMGA モデルの主なパラメータを示す. SMGA モデルは 3 個の SMGA のみで構成され, 背景領域は考慮されていない. 全 SMGA の地震モーメントの総和は 9.65×10^{18} Nm であるのに対し, F-net の地震モーメントは 4.42×10^{19} Nm であり, そのモーメント比は約 22 % である. 一方, レシピによると, 内陸地震によるアスペリティ総面積の占める割合は断層総面積の平均 22 % (Somerville *et al.*, 1999) や 15 % ~ 27 % (宮腰・他, 2001), アスペリティ全体の平均すべり量は Somerville *et al.* (1999) や 石井・他 (2000) を基に震源断層全体の平均すべり量の 2 倍が示されている. 従って, レシピを参考にするとアスペリティのモーメント比は 44 %, あるいは 30 % ~ 54 % 程度になることが期待されるが, SMGA モデルの全 SMGA のモーメント比はそれらに比べてやや小さい.

そこで, 工学的検証では, SMGA モデルを基に, レシピを参考に一部のパラメータを調整した特性化震源モデルを構築し, それを用いることとする.

表 4.2.1-1 3.1.1.2 で得られた SMGA モデルの主なパラメータ

	SMGA1	SMGA2	SMGA3
Area (km ²)	51.8	51.8	100.0
M_0 (Nm)	2.08×10^{18}	2.08×10^{18}	5.49×10^{18}
Rise Time (s)	0.6	0.6	0.6
$\Delta\sigma$ (MPa)	13.6	13.6	13.4
V_r (km/s)	2.8	2.8	2.8

② 工学的検証に用いる特性化震源モデルの構築

ここでは、工学的検証に用いる特性化震源モデルの構築を行う。構築は SMGA モデルを基にレシピを参考に SMGA の地震モーメントを調整した後に、背景領域のパラメータを設定する。以下に、工学的検証に用いる特性化震源モデルの SMGA と背景領域の構築方針を示す。

SMGA

各 SMGA の地震モーメントは以下の手順で評価する。

- 1) 震源断層全体の平均すべり量 D を式 4.2.1-1 により求める。

$$D = M_0 / (\mu \cdot S) \quad (4.2.1-1)$$

ここで、 μ は剛性率、 M_0 は震源断層全体の地震モーメント、 S は震源断層全体の面積で、 μ は $3.12 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ 、 M_0 は F-net の $4.42 \times 10^{19} \text{ Nm}$ 、 S は 3.1.1.2 の震源インバージョン結果に基づいてトリミングされた 792 km^2 を用いる。

- 2) SMGA の平均すべり量 D_{SMGA} は Somerville *et al.* (1999) や石井・他 (2000) を基に、式 4.2.1-2 により求める。

$$D_{\text{SMGA}} = \xi \cdot D \quad (4.2.1-2)$$

ここで、 ξ は 2 とする。

- 3) SMGA $_i$ のすべり量 D_{SMGA_i} を式 4.2.1-3 により求める。

$$D_{\text{SMGA}_i} = (\gamma_i / \Sigma \gamma_i^3) \cdot D_{\text{SMGA}} \quad (4.2.1-3)$$

ここで、 γ_i は r_i/r であり、 r_i は SMGA $_i$ の等価半径、 r は SMGA 全体の等価半径である。なお、SMGA の面積は SMGA モデルで得られた値を用いる。

- 4) SMGA $_i$ の地震モーメント $M_{0_SMGA_i}$ を式 4.2.1-4 により求める。

$$M_{0_SMGA_i} = \mu \cdot D_{\text{SMGA}_i} \cdot S_{\text{SMGA}_i} \quad (4.2.1-4)$$

ここで、 S_{SMGA_i} は SMGA $_i$ の面積である。

このようにして求められた SMGA 全体の地震モーメントは, 2.27×10^{19} Nm であり, F-net の地震モーメントの 51 %に相当する. これはレシピから期待される地震モーメント比と概ね調和的である.

SMGA の地震モーメント以外のパラメータについては, 破壊伝播速度 V_r は SMGA モデルの値を用いた. ライズタイムは短周期側を対象にした統計的グリーン関数法による評価では SMGA モデルの値を用い, 長周期側を対象にした理論的手法による評価では $\alpha \cdot W_{SMGA_i} / V_r$ ($\alpha = 0.5$, W_{SMGA_i} は SMGA i の幅) で評価される値を用いた.

背景領域

背景領域の面積, 地震モーメント, すべり量は以下の手順で評価する.

- 1) 背景領域の面積 S_b を式 4.2.1-5 により求める.

$$S_b = S - S_{SMGA} \quad (4.2.1-5)$$

ここで, S_{SMGA} は全 SMGA の面積の総和である.

- 2) 背景領域の地震モーメント M_{0b} を式 4.2.1-6 により求める.

$$M_{0b} = M_0 - M_{0_SMGA} \quad (4.2.1-6)$$

ここで, M_{0_SMGA} は全 SMGA の地震モーメントの総和で, 先の手順で求めた 2.27×10^{19} Nm である.

- 3) 背景領域のすべり量 D_b を式 4.2.1-7 により求める.

$$D_b = M_{0b} / (\mu \cdot S_b) \quad (4.2.1-7)$$

背景領域の面積, 地震モーメント, すべり量以外のパラメータについては, 破壊伝播速度 V_r は SMGA モデルの値, ライズタイムは周期帯に関わらず $\alpha \cdot W / V_r$ ($\alpha = 0.5$, W は震源断層の幅) で評価される値を用いた.

その他

SMGA と背景領域で共通なパラメータとして, すべり角は表 3.1.1.2(1)-4 で示された震源インバージョン結果に基づく特性化震源モデルのすべり角 (3 個の HRA の平均値は 201 度, 3 個の HRA に off HRA を含めた平均値は 198 度) や地震調査研究推進本部 (2014) による布

田川断層布田川区間や日奈久断層日奈久区間の強震動予測のための断層モデルのすべり角（「南東側隆起の上下成分を伴う右横ずれ断層」であることを考慮して 200 度）を参考に、断層全体で一律に 200 度とした。 Q 値は佐藤 (2016) の $62f^{0.87}$ ， $f_{\max}$ はレシピに従って 6 Hz（鶴来・他, 1997）を用いた。

表 4.2.1-2 に工学的検証に用いる特性化震源モデルの震源パラメータを示す。図 4.2.1-1 に特性化震源モデルの地表投影と地震動評価の対象とする観測点の分布を示し、図 4.2.1-2 に断層モデル図を示す。

表 4.2.1-2 工学的検証に用いる特性化震源モデルの震源パラメータ

パラメータ		単位	日奈久	布田川			合計	根拠
			H	(西)	(中央)	(東)		
				F3	F2	F1		
走向	θ	°	205	226	236	40	—	3.1.1.2
傾斜角	δ	°	72	77	65	75	—	3.1.1.2
すべり角	λ	°	200	200	200	200	—	3.1.1.2や地震調査研究推進本部(2014)を参考
長さ	L	km	8	12	12	12	44	3.1.1.2
幅	W	km	18	18	18	18	18	3.1.1.2
面積	S	km ²	144	216	216	216	792	3.1.1.2
上端深さ	H _s	km	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	3.1.1.2
地震モーメント	M ₀	Nm	—	—	—	—	4.42E+19	F-net
パラメータ		単位	SM GA					根拠
			SM GA1	SM GA2	SM GA3	—	合計	
長さ	L _a	km	7.2	7.2	10	—	—	3.1.1.2
幅	W _a	km	7.2	7.2	10	—	—	3.1.1.2
面積	S _a	km ²	51.84	51.84	100	—	203.68	3.1.1.2
すべり量	D _{ai}	m	3.00	3.00	4.17	—	3.58	$D = M_0 / \mu S$ $D_a = \xi \cdot D, \xi = 2$ $D_{ai} = (\gamma_i / \sum \gamma_i^3) \cdot D_a, \gamma_i = r_i / r$
地震モーメント	M _{0ai}	Nm	4.86E+18	4.86E+18	1.30E+19	—	2.27E+19	$M_{0i} = \mu D_{ai} S_{ai}$
応力降下量	$\Delta \sigma_{ai}$	MPa	13.6	13.6	13.4	—	13.5	3.1.1.2 合計は $(\sum S_{ai} \times \Delta \sigma_{ai}) / \sum S_{ai}$ を仮定
ライズタイム(短周期)	T _{ra}	s	0.6	0.6	0.6	—	—	3.1.1.2
ライズタイム(長周期)	T _{rb}	s	1.29	1.29	1.79	—	—	$T_{ra} = \alpha W_a / V_r, \alpha = 0.5$
パラメータ		単位	背景領域					根拠
面積	S _b	km ²	588.32					$S_b = S - S_a$
地震モーメント	M _{0b}	Nm	2.15E+19					$M_{0b} = M_0 - M_{0a}$
すべり量	D _b	m	1.17					$D_b = M_{0b} / \mu S_b$
応力降下量	$\Delta \sigma_b$	MPa	2.1					$\sigma_b = (D_b / W_b) \cdot (\pi^{0.5} / D_a) \cdot r \cdot \sum \gamma_i^3 \cdot \sigma_a$
ライズタイム(短周期)	T _{rb}	s	3.21					$T_{rb} = \alpha \cdot W_b / V_r, \alpha = 0.5$
ライズタイム(長周期)	T _{rb}	s	3.21					$T_{rb} = \alpha \cdot W_b / V_r, \alpha = 0.5$
パラメータ		単位	その他					根拠
S波速度	β	km/s	3.4					3.1.1.2で仮定
密度	ρ	g/cm ³	2.7					仮定
剛性率	μ	N/m ²	3.12E+10					$\rho = \mu \beta^2$
Q値	Q	—	62 ^{0.87}					佐藤 (2016)
高周波遮断振動数	f _{max}	Hz	6					鶴来・他 (1997)
破壊伝播速度	V _r	km/s	2.8					SM GAモデルのV _r を背景領域にも適用した
破壊伝播形式	—	—	マルチハイポセンター、同心円状					仮定

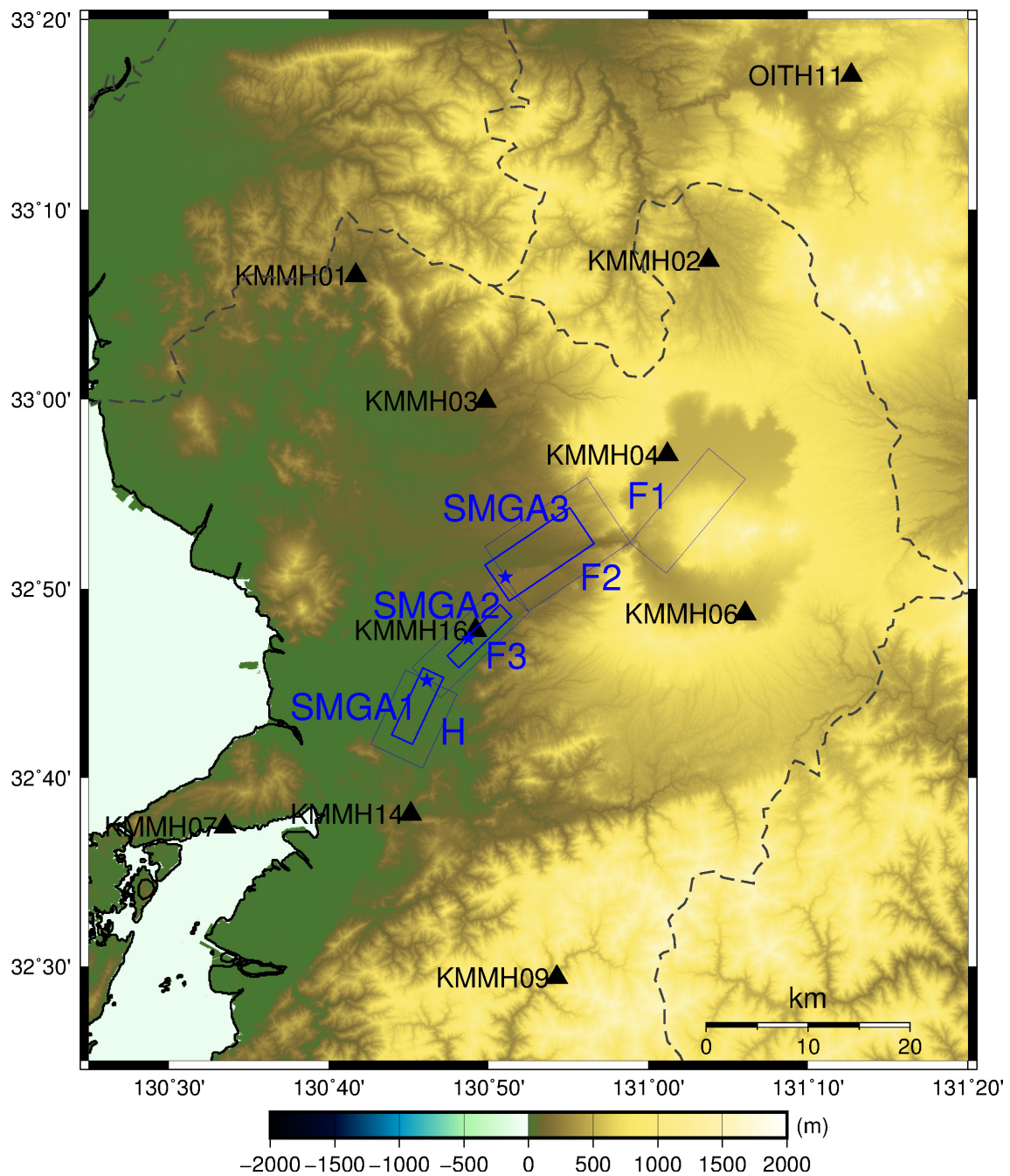


図 4.2.1-1 工学的検証に用いる特性化震源モデルの地表投影と地震動評価の対象とする観測点の分布。青色の矩形は工学的検証に用いる特性化震源モデルの地表投影（細線は断層面全体，太線は SMGA），青色の星印は SMGA の破壊開始点，黒色の三角印は地震動評価の対象とする観測点を表す。

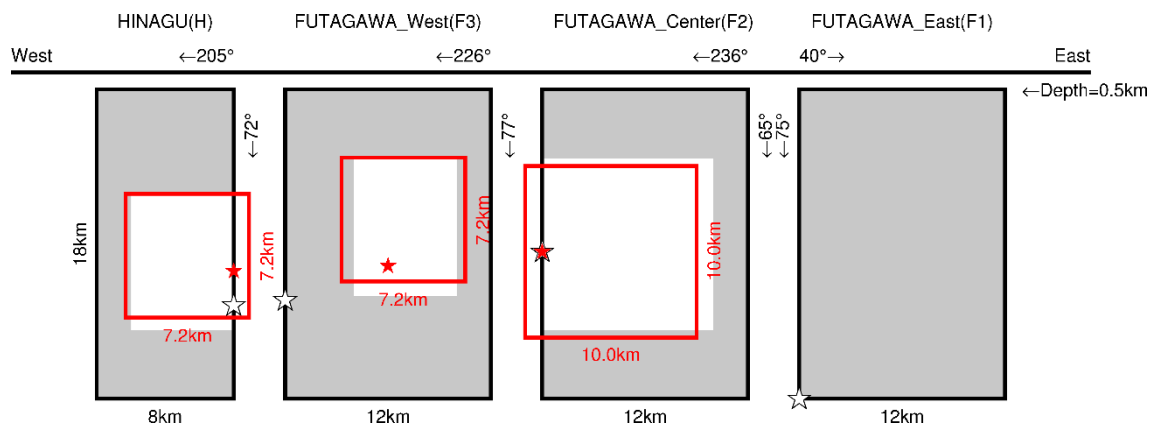


図 4.2.1-2 工学的検証に用いる特性化震源モデルの断層モデル図. 黒色の矩形は断層面全体, 赤色の矩形は SMGA, 赤色の星印は SMGA の破壊開始点, 黒色の星印は背景領域の破壊開始点を表す.

③ おわりに

3.1.1.2 で得られた SMGA モデルは、3 個の SMGA のみで構成され背景領域は考慮されていない。また、全 SMGA の地震モーメントは F-net の地震モーメントの約 22 %であり、これはレシピで示されているアスペリティの面積比やすべり量から得られる地震モーメントに比べて小さい傾向にある。そこで、SMGA モデルを基に、レシピを参考に工学的検証に用いる特性化震源モデルを新たに構築した。構築した特性化震源モデルは背景領域も有し、全 SMGA の地震モーメントは F-net の地震モーメントの 51 %である。この割合は、レシピから期待される地震モーメントの割合と調和的である。

④ 参考文献

- Dreger, D. S., Beroza, G. C., Day, S. M., Goulet, C. A., Jordan, T. H., Spudich, P. A., and Stewart, J.P. (2015), Validation of the SCEC Broadband Platform V14.3 Simulation Methods Using Pseudospectral Acceleration Data, *Seism. Res. Lett.*, 86(1), 39-47.
- 久田嘉章, (1997), 成層地盤における正規モード解及びグリーン関数の効率的な計算法, 日本建築学会構造系論文集, 501, 49-56.
- 石井 透・佐藤俊明・P. G. Somerville (2000), 強震動評価のための不均質断層モデルの主破壊領域の抽出, 日本建築学会構造系論文集, 527, 61-70.
- 地震調査研究推進本部 (2014), 全国地震動予測地図 2014 年版～全国の地震動ハザードを概観して～,
http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/shm_report/shm_report_2014/, (2017 年 3 月 1 日確認)
- 地震調査研究推進本部 (2016), 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/16_yosokuchizu/recipe.pdf (2017 年 3 月 1 日確認)
- 宮腰 研・関口春子・岩田知孝 (2001), すべりの空間的不均質性の抽出, 平成 12 年度科学振興調整費「地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究」研究成果報告書, 99-109.
- 佐藤智美 (2016), スペクトルインバージョンに基づく熊本地震と前震・余震等の震源・伝播・サイト特性, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, MIS34-P71.
- Somerville, P., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N., and Kowada, A. (1999), Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seism. Res. Lett.*, 70, 59-80.
- 鶴来雅人・香川敬生・入倉孝次郎・古和田 明 (1997), 近畿地方で発生する地震の f_{max} に関する基礎的検討, 地球惑星科学関連学会合同大会予稿集, 103.

4.2.2 特性化震源モデルによる地震動シミュレーション

① はじめに

ここでは、4.2.1 で構築した特性化震源モデルと、4.1 で検証した地盤モデルを用いて、ハイブリッド合成手法による地震動シミュレーションを行う。ハイブリッド合成では 0.5 ~ 1 Hz を遷移周波数帯域として、短周期側は統計的グリーン関数法、長周期側は理論的手法（波数積分法）を用いて地震動を評価し波形合成を行う。このように評価した評価対象地点における合成地震動を、工学的に重要な周波数帯域に着目しながら観測地震動と比較検証を行う。最後に、工学的検証のために CGOF を用いて合成地震動と観測地震動の差を定量的に評価する。

② 評価対象地点

地震動シミュレーションの評価地点は震源断層を囲むように KiK-net10 地点とし、地表を対象にした。対象とした観測点を表 4.2.2-1、及び図 4.2.1-1 に示す。

表 4.2.2-1 評価対象地点

Station Code	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Network	Location
KMMH16	32.7967	130.8199	KiK-net	Mashiki
KMMH04	32.9514	131.0199	KiK-net	Aso
KMMH14	32.6345	130.7521	KiK-net	Toyono
KMMH06	32.8114	131.1010	KiK-net	Hakusui
KMMH03	32.9984	130.8301	KiK-net	Kikuchi
KMMH02	33.1220	131.0629	KiK-net	Oguni
KMMH07	32.6234	130.5584	KiK-net	Misumi
KMMH09	32.4901	130.9046	KiK-net	Izumi
KMMH01	33.1089	130.6949	KiK-net	Kahoku
OITH11	33.2844	131.2118	KiK-net	Kokonoe

③ 地盤モデル

地震動シミュレーションで用いる地盤モデルを表 4.2.2-2a ～ j に示す。

理論的手法による長周期側の評価では 3.1.1.2 の震源インバージョンで用いた地盤モデルを用い、統計的グリーン関数法による短周期側の評価では 4.1 で検証された地盤モデルを用いる。長周期側の評価で用いる地盤モデルの最浅層の S 波速度は大部分の観測点で 350 m/s 以上（一部の観測点では 170 m/s, あるいは 200 m/s）である。短周期側の評価で用いる地盤モデルは長周期側の評価で用いる地盤モデルを基本としているが、最深層は地震基盤層に相当する $V_s = 3000$ m/s 以上の層を半無限層とし、表層付近は 4.1 の地盤同定で得られた浅部地盤モデルを結合したモデルである。

表 4.2.2-2a 地震動シミュレーションで用いる地盤モデル (KMMH16)
 (上：理論的手法による評価で使用, 下：統計的グリーン関数法による評価で使用)

KMMH16

Depth (m)	Thickness (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (g/cm ³)	Qs	Qp
0 - 70	70	750	1500	2.40	200	200
70 - 234	164	1000	2300	2.10	200	200
234 - 500	266	2458.1	4227.7	2.40	200	200
500 - 1000	500	1209.3	2633.6	2.40	200	200
1000 - 2000	1000	3000	5300	2.40	200	200
2000 - 5000	3000	3350	5800	2.70	200	400
5000 - 10000	5000	3460	6000	2.73	200	400
10000 - 15000	5000	3520	6100	2.74	200	400
15000 - 20000	5000	3690	6400	2.76	400	800
20000 - 25000	5000	3750	6500	2.78	400	800
25000 - 30000	5000	3900	6800	2.80	500	1000
30000 -	-	4600	8000	3.45	1000	2000

KMMH16

Depth (m)	Thickness (m)	Vs (m/s)	ρ (g/cm ³)	Qs
0 - 3	3	120	1.2	5
3 - 15	12	290	1.4	15
15 - 33	18	600	1.8	20
33 - 41	8	480	1.8	21
41 - 69	28	900	2.1	26
69 - 101	32	980	2.1	50
101 - 133	32	1650	2.3	82
133 - 143	10	560	2.3	15
143 - 169	26	1250	2.3	33
169 - 201	32	680	2.1	17
201 - 234	33	1640	2.1	45
234 - 500	266	2910	2.6	91
500 - 1000	500	1210	2.4	200
1000 -	-	3000	2.4	200

表 4.2.2-2b 地震動シミュレーションで用いる地盤モデル (KMMH04)
 (上：理論的手法による評価で使用, 下：統計的グリーン関数法による評価で使用)

KMMH04

	Depth (m)	Thickness (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (g/cm ³)	Qs	Qp
0	– 120	120	200	1500	1.80	100	100
120	– 250	130	1085.9	2494.1	2.10	150	150
250	– 500	250	2238.4	3869.2	2.40	200	200
500	– 1000	500	2285.4	3941.4	2.40	200	200
1000	– 2000	1000	3113.7	5390.2	2.70	200	400
2000	– 5000	3000	3350	5800	2.70	200	400
5000	– 10000	5000	3460	6000	2.73	200	400
10000	– 15000	5000	3520	6100	2.74	200	400
15000	– 20000	5000	3690	6400	2.76	400	800
20000	– 25000	5000	3750	6500	2.78	400	800
25000	– 30000	5000	3900	6800	2.80	500	1000
30000	–	–	4600	8000	3.45	1000	2000

KMMH04

	Depth (m)	Thickness (m)	Vs (m/s)	ρ (g/cm ³)	Qs
0	– 2	2	80	1.1	6
2	– 4	2	100	1.9	7
4	– 12	8	260	1.9	9
12	– 36	24	90	1.9	6
36	– 58	22	180	1.9	13
58	– 76	18	340	1.9	25
76	– 96	20	240	1.9	18
96	– 120	24	400	1.9	29
120	– 250	130	1090	2.1	150
250	– 500	250	2240	2.4	200
500	– 1000	500	2290	2.4	200
1000	–	–	3110	2.7	200

表 4.2.2-2c 地震動シミュレーションで用いる地盤モデル (KMMH14)
 (上：理論的手法による評価で使用, 下：統計的グリーン関数法による評価で使用)

KMMH14

Depth (m)			Thickness (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (g/cm ³)	Qs	Qp
0	–	10	10	170	300	1.60	60	120
10	–	20	10	330	1580	2.00	60	120
20	–	58	38	480	1580	2.00	60	120
58	–	88	30	480	1870	2.00	60	120
88	–	100	12	690	2580	2.10	100	150
100	–	250	150	1811.7	3333.9	2.10	200	200
250	–	500	250	1942.6	3496.1	2.20	200	200
500	–	1000	500	2165.4	3724	2.20	200	200
1000	–	2000	1000	3200	5500	2.70	200	400
2000	–	5000	3000	3350	5800	2.70	200	400
5000	–	10000	5000	3460	6000	2.73	200	400
10000	–	15000	5000	3520	6100	2.74	200	400
15000	–	20000	5000	3690	6400	2.76	400	800
20000	–	25000	5000	3750	6500	2.78	400	800
25000	–	30000	5000	3900	6800	2.80	500	1000
30000	–	–	–	4600	8000	3.45	1000	2000

KMMH14

Depth (m)			Thickness (m)	Vs (m/s)	ρ (g/cm ³)	Qs
0	–	4	4	130	1.2	11
4	–	10	6	220	1.3	9
10	–	20	10	400	2.0	28
20	–	58	38	580	2.0	20
58	–	88	30	480	2.0	15
88	–	100	12	810	2.2	35
100	–	250	150	1850	2.3	138
250	–	500	250	1940	2.2	200
500	–	1000	500	2170	2.2	200
1000	–	–	–	3200	2.7	200

表 4.2.2-2d 地震動シミュレーションで用いる地盤モデル (KMMH06)
 (上：理論的手法による評価で使用, 下：統計的グリーン関数法による評価で使用)

KMMH06

Depth (m)	Thickness (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (g/cm ³)	Qs	Qp
0 - 111	111	465.4	1812.5	2.00	60	120
111 - 250	139	898.4	2292.4	2.15	150	150
250 - 500	250	825.9	2212.6	2.30	200	200
500 - 1000	500	2249.2	3925.5	2.40	200	400
1000 - 2000	1000	3200	5500	2.70	200	400
2000 - 5000	3000	3350	5800	2.70	200	400
5000 - 10000	5000	3460	6000	2.73	200	400
10000 - 15000	5000	3520	6100	2.74	200	400
15000 - 20000	5000	3690	6400	2.76	400	800
20000 - 25000	5000	3750	6500	2.78	400	800
25000 - 30000	5000	3900	6800	2.80	500	1000
30000 -	-	4600	8000	3.45	1000	2000

KMMH06

Depth (m)	Thickness (m)	Vs (m/s)	ρ (g/cm ³)	Qs
0 - 2	2	120	1.2	5
2 - 12	10	380	1.7	10
12 - 32	20	1790	2.4	56
32 - 50	18	970	2.4	25
50 - 88	38	360	2.0	9
88 - 250	162	1320	2.2	34
250 - 500	250	830	2.3	200
500 - 1000	500	2250	2.4	200
1000 -	-	3200	2.7	200

表 4.2.2-2e 地震動シミュレーションで用いる地盤モデル (KMMH03)
 (上：理論的手法による評価で使用, 下：統計的グリーン関数法による評価で使用)

KMMH03

Depth (m)	Thickness (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (g/cm ³)	Qs	Qp
0 - 19	19	430	800	1.80	150	150
19 - 30	11	580	1500	1.95	150	150
30 - 128	98	1000	2500	2.00	150	150
128 - 200	72	2000	4100	2.30	150	150
200 - 395	195	2781	4716.7	2.40	150	150
395 - 2000	1605	3076.3	5353	2.70	200	400
2000 - 5000	3000	3350	5800	2.70	200	400
5000 - 10000	5000	3460	6000	2.73	200	400
10000 - 15000	5000	3520	6100	2.74	200	400
15000 - 20000	5000	3690	6400	2.76	400	800
20000 - 25000	5000	3750	6500	2.78	400	800
25000 - 30000	5000	3900	6800	2.80	500	1000
30000 -	-	4600	8000	3.45	1000	2000

KMMH03

Depth (m)	Thickness (m)	Vs (m/s)	ρ (g/cm ³)	Qs
0 - 2	2	180	1.3	7
2 - 18	16	520	1.6	35
18 - 30	12	700	1.9	24
30 - 56	26	860	2.2	22
56 - 80	24	410	2.1	16
80 - 128	48	1560	2.3	40
128 - 200	72	2270	2.5	57
200 - 395	195	2780	2.4	150
395 -	-	3080	2.7	200

表 4.2.2-2f 地震動シミュレーションで用いる地盤モデル (KMMH02)
 (上：理論的手法による評価で使用, 下：統計的グリーン関数法による評価で使用)

KMMH02								
Depth (m)			Thickness (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (g/cm ³)	Qs	Qp
0	–	41	41	950	2700	2.15	150	150
41	–	120	79	630	1900	2.15	150	150
120	–	250	130	1279.6	2679.7	2.15	150	150
250	–	500	250	1413.2	2844.8	2.25	150	150
500	–	1000	500	1745.3	3223.8	2.25	150	150
1000	–	2000	1000	3200	5500	2.70	200	400
2000	–	5000	3000	3350	5800	2.70	200	400
5000	–	10000	5000	3460	6000	2.73	200	400
10000	–	15000	5000	3520	6100	2.74	200	400
15000	–	20000	5000	3690	6400	2.76	400	800
20000	–	25000	5000	3750	6500	2.78	400	800
25000	–	30000	5000	3900	6800	2.80	500	1000
30000	–		–	4600	8000	3.45	1000	2000

KMMH02						
Depth (m)			Thickness (m)	Vs (m/s)	ρ (g/cm ³)	Qs
0	–	2	2	140	1.2	5
2	–	6	4	440	1.6	14
6	–	22	16	1320	2.2	34
22	–	42	20	960	2.2	25
42	–	120	78	610	2.0	17
120	–	250	130	1280	2.2	150
250	–	500	250	1410	2.3	150
500	–	1000	500	1750	2.3	150
1000	–		–	3200	2.7	200

表 4.2.2-2g 地震動シミュレーションで用いる地盤モデル (KMMH07)
 (上：理論的手法による評価で使用, 下：統計的グリーン関数法による評価で使用)

KMMH07

Depth (m)			Thickness (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (g/cm ³)	Qs	Qp
0	–	30	30	810	1800	1.90	100	100
30	–	80	50	1000	2300	1.90	100	100
80	–	220	140	1300	2700	2.20	150	150
220	–	480	260	2000	4000	2.40	200	200
480	–	2000	1520	3200	5500	2.70	200	400
2000	–	5000	3000	3350	5800	2.70	200	400
5000	–	10000	5000	3460	6000	2.73	200	400
10000	–	15000	5000	3520	6100	2.74	200	400
15000	–	20000	5000	3690	6400	2.76	400	800
20000	–	25000	5000	3750	6500	2.78	400	800
25000	–	30000	5000	3900	6800	2.80	500	1000
30000	–		–	4600	8000	3.45	1000	2000

KMMH07

Depth (m)			Thickness (m)	Vs (m/s)	ρ (g/cm ³)	Qs
0	–	5	5	710	1.9	43
5	–	30	25	960	2.0	41
30	–	80	50	1200	2.1	31
80	–	100	20	1480	2.2	39
100	–	115	15	1290	2.1	36
115	–	220	105	1050	2.2	27
220	–	235	15	1810	2.5	82
235	–	480	245	2330	2.5	60
480	–		–	3200	2.7	200

表 4.2.2-2h 地震動シミュレーションで用いる地盤モデル (KMMH09)
 (上：理論的手法による評価で使用, 下：統計的グリーン関数法による評価で使用)

KMMH09

Depth (m)			Thickness (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (g/cm ³)	Qs	Qp
0	–	10	10	350	700	1.70	50	100
10	–	22	12	530	1100	1.90	100	100
22	–	40	18	930	1800	2.00	100	100
40	–	64	24	670	1700	2.00	100	100
64	–	76	12	960	2300	2.10	100	100
76	–	150	74	1600	3300	2.20	150	150
150	–	500	350	2103.6	3612.1	2.40	200	200
500	–	1000	500	2639.9	4536.4	2.70	200	400
1000	–	2000	1000	3026.2	5121.4	2.70	200	400
2000	–	5000	3000	3320	5800	2.70	200	400
5000	–	10000	5000	3410	5900	2.73	200	400
10000	–	15000	5000	3520	6100	2.74	200	400
15000	–	20000	5000	3690	6400	2.76	400	800
20000	–	25000	5000	3750	6500	2.78	400	800
25000	–	30000	5000	3900	6800	2.80	500	1000
30000	–		–	4600	8000	3.45	1000	2000

KMMH09

Depth (m)			Thickness (m)	Vs (m/s)	ρ (g/cm ³)	Qs
0	–	4	4	120	1.3	6
4	–	10	6	420	1.6	27
10	–	22	12	630	1.8	20
22	–	40	18	1120	2.0	29
40	–	64	24	700	2.0	20
64	–	76	12	1140	2.1	29
76	–	150	74	1920	2.3	62
150	–	500	350	2100	2.4	200
500	–	1000	500	2640	2.7	200
1000	–		–	3030	2.7	200

表 4.2.2-2i 地震動シミュレーションで用いる地盤モデル (KMMH01)

(上：理論的手法による評価で使用，下：統計的グリーン関数法による評価で使用)

KMMH01

Depth (m)			Thickness (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (g/cm ³)	Qs	Qp
0	–	10	10	390	1500	1.80	60	60
10	–	18	8	790	2400	2.00	100	100
18	–	35	17	1300	3300	2.10	150	150
35	–	103	68	1900	4200	2.30	200	200
103	–	300	197	2622.8	4523.4	2.70	200	400
300	–	1000	700	2708.3	4775.4	2.70	200	400
1000	–	2000	1000	3200	5500	2.70	200	400
2000	–	5000	3000	3350	5800	2.70	200	400
5000	–	10000	5000	3460	6000	2.73	200	400
10000	–	15000	5000	3520	6100	2.74	200	400
15000	–	20000	5000	3690	6400	2.76	400	800
20000	–	25000	5000	3750	6500	2.78	400	800
25000	–	30000	5000	3900	6800	2.80	500	1000
30000	–	–	–	4600	8000	3.45	1000	2000

KMMH01

Depth (m)			Thickness (m)	Vs (m/s)	ρ (g/cm ³)	Qs
0	–	1	1	180	1.2	6
1	–	10	9	460	1.9	11
10	–	22	12	950	2.2	27
22	–	38	16	1430	2.3	36
38	–	103	65	1680	2.5	42
103	–	300	197	2620	2.7	200
300	–	1000	700	2710	2.7	200
1000	–	–	–	3200	2.7	200

表 4.2.2-2j 地震動シミュレーションで用いる地盤モデル (OITH11)
 (上：理論的手法による評価で使用, 下：統計的グリーン関数法による評価で使用)

OITH11

Depth (m)	Thickness (m)	Vs (m/s)	Vp (m/s)	ρ (g/cm ³)	Qs	Qp
0 - 120	120	600	2000	1.90	100	100
120 - 763	643	1100	2500	2.15	150	150
763 - 2000	1237	3200	5500	2.70	200	400
2000 - 5000	3000	3350	5800	2.70	200	400
5000 - 10000	5000	3460	6000	2.73	200	400
10000 - 15000	5000	3520	6100	2.74	200	400
15000 - 20000	5000	3690	6400	2.76	400	800
20000 - 25000	5000	3750	6500	2.78	400	800
25000 - 30000	5000	3900	6800	2.80	500	1000
30000 -	-	4600	8000	3.45	1000	2000

OITH11

Depth (m)	Thickness (m)	Vs (m/s)	ρ (g/cm ³)	Qs
0 - 4	4	190	1.6	14
4 - 10	6	610	2.1	35
10 - 20	10	820	2.1	35
20 - 30	10	540	2.0	29
30 - 64	34	450	2.1	21
64 - 120	56	640	2.1	16
120 - 763	643	1190	2.2	87
763 -	-	3200	2.7	200

⑤ 地震動シミュレーションの実施

4.2.1 で構築した特性化震源モデルと、表 4.2.2-2a ～ j で示した地盤モデルを用いて地震動シミュレーションを行う。地震動シミュレーションは水平動のみを対象とした。評価手法はハイブリッド合成手法とし、周波数 0.5 ～ 1 Hz を遷移周波数帯域として、短周期側は統計的グリーン関数法、長周期側は理論的手法（波数積分法）を用いた。なお、統計的グリーン関数法での放射係数は S 波の全震源球面上の平均値である 0.63 を水平 2 成分の二乗和であると考え、0.63 を $1/2^{0.5}$ で除した 0.445 を用いた。理論的手法で用いたすべり速度時間関数は中村・宮武 (2000) とした。

図 4.2.2-1a ～ j にハイブリッド合成手法で評価した合成地震動と観測地震動の比較を示す。図は上段から観測加速度波形、合成加速度波形、観測速度波形、合成速度波形、擬似速度応答スペクトル（減衰 5 %）を示し、最下段の左側は Boore (2010) の RotD50 による加速度応答スペクトル、右側は RotD50 の加速度応答スペクトルの合成に対する観測の比を示す。上下動はシミュレーションの対象外であるが、参考として観測地震動の水平動と上下動の比較ができるように図示している。以下に各観測点の結果の概要を示す。

・ KMMH16 (図 4.2.2-1a)

短周期側が過大評価、長周期側は概ね観測と同程度である。短周期側が過大評価となる理由として、観測は地盤の非線形性により短周期側が減衰していると考えられるが、合成は地盤の非線形性が考慮されていないためと考えられる。

・ KMMH04 (図 4.2.2-1b)

短周期側が過大評価となっている。短周期側が過大評価となる理由は KMMH16 と同様に地盤の非線形性が考えられる。また、観測加速度の水平成分の振幅は上下成分の約 1/3 程度と顕著に小さく、さらに KMMH04 のデータは未選別データ（通常のデータ公開にはそぐわないと考えられるもの）であることから、観測記録の精査も必要である。

・ KMMH14 (図 4.2.2-1c)

短周期側が過大評価となっている。長周期側は NS 成分が過小評価であるのに対し、EW 成分は過大評価で、成分間で傾向が異なる。短周期側が過大評価となる理由は KMMH16 や KMMH04 と同様に地盤の非線形性が考えられる。長周期側については、合成のスペクトルは SMGA1 の走向にほぼ直交する EW 成分が NS 成分よりも大きく、これは SMGA1 の Forward Directivity 効果が強く現われたと考えられる。しかし、観測のスペクトルで NS 成分が EW 成分よりも大きいといった傾向は見られない。このことから、震源モデルに揺らぎを与えること等により合成の Forward Directivity 効果を低減することができれば、観測記録の再現性が向上する可能性がある。

- KMMH06 (図 4.2.2-1d)

広帯域で観測記録と調和的である。

- KMMH03 (図 4.2.2-1e)

観測記録の水平成分において、NS 成分が EW 成分の 3 倍程度の振幅があり、さらに NS 成分のみに周期 1 秒付近に明瞭な卓越が確認でき、強い異方性があるように見える。しかし、本震後の余震記録ではそのような傾向が確認できないため、このような現象は本震固有の特徴であると言える。観測記録の再現性の改善のためには、まずはこのような強い異方性が生じた要因を理解する必要があると考えられる。

- KMMH02 (図 4.2.2-1f)

短周期側が過小評価、長周期側は観測記録と概ね調和的である。図 4.1.2.3-6 で示した KMMH02 の統計的グリーン関数を用いた地盤モデルの検証では、観測で見られる 6 Hz 前後の卓越の再現性が芳しくなかった。図 4.2.2-1f のスペクトルではそれに対応する周期帯で観測と合成に乖離が見られる。このことから浅部の地盤モデルが改善できれば、短周期側の過小評価の改善も期待できる。

- KMMH07 (図 4.2.2-1g)

短周期側が過小評価、長周期側は観測記録と概ね調和的である。また、KMMH07 のデータは KMMH04 と同様に未選別データであることから、観測記録の精査も必要である。

- KMMH09 (図 4.2.2-1h)

広帯域で観測記録と調和的である。

- KMMH01 (図 4.2.2-1i)

広帯域で観測記録と調和的である。

- OITH11 (図 4.2.2-1j)

短周期側が過小評価、長周期側は観測記録と概ね調和的である。図 4.1.2.3-6 で示した OITH11 の統計的グリーン関数を用いた地盤モデルの検証では、観測で見られる 7 Hz 前後の卓越の再現性が芳しくなかった。図 4.2.2-1j のスペクトルではそれに対応する周期帯で観測と合成に乖離が見られる。このことから KMMH02 と同様に浅部の地盤モデルが改善できれば、短周期側の過小評価の改善も期待できる。

以上をまとめると、短周期側については、震源断層に近い KMMH16, KMMH04, KMMH14

の 3 地点は過大評価であり、その要因は合成には地盤の非線形性が考慮されていないためと考えられる。これらの観測点については、地盤の非線形性を考慮することで改善が期待できる。例えば、地盤の非線形性については後藤・他 (2016)は KMMH16 の地盤の非線形モデルを構築し、その非線形モデルに地中記録を入力として評価された地表の応答波形は観測波形をよく再現できている。KMMH02, OITH11 の 2 地点は浅部の地盤モデルが改善できれば、観測の再現性向上が期待できる。KMMH06, KMMH09, KMMH01 の 3 地点は観測を概ね再現できている。KMMH04 と KMMH03 の 2 地点は観測記録の水平成分が上下成分に比べて顕著に振幅レベルが小さい、あるいは水平 2 成分間で強い異方性が確認できる等、観測記録の詳細な検討が必要と考えられる。また、未選別データである KMMH04 や KMMH07 は観測記録そのものの精査も必要である。

長周期側については、KMMH16, KMMH06, KMMH02, KMMH07, KMMH09, KMMH01, OITH11 の 7 地点は観測記録と概ね調和的である。KMMH04 と KMMH03 は短周期側と同様に観測記録の詳細な検討が必要と考えられる。KMMH14 は合成で Forward Directivity 効果が強く現われているが、観測はそこまで顕著ではない。このことから、震源モデルに揺らぎを与えること等により合成の Forward Directivity 効果を低減することができれば、観測の再現性が向上する可能性がある。また、前述の通り、未選別データである KMMH04 や KMMH07 は観測記録そのものの精査も必要である。

図 4.2.2-2a ~ d に RotD50 の加速度応答スペクトルについて、4 つの周期レンジ内 (0.05 ~ 0.1 秒, 0.1 ~ 1 秒, 1 ~ 3 秒, 3 ~ 10 秒。これらの周期レンジは後に示す CGOF の周期レンジに対応している) での合成に対する観測の比の平均の空間分布を示す。図中の三角印は各周期レンジ内の合成に対する観測の比の平均値に応じて色分けしている (色分けのイメージ図は図 4.2.2-3 に示す)。空間分布図より、短周期側 (0.05 ~ 1 秒。図 4.2.2-2a と 2b に対応) と長周期側 (1 ~ 10 秒。図 4.2.2-2c と 2d に対応) で比較すると、長周期側の方が倍半分以上に対応する橙色, 黄色, 緑色が多い。また、短周期側は震源断層に近い観測点で過大評価となっている点が多く見られ、これは合成に非線形性が考慮されていないためと考えられる。

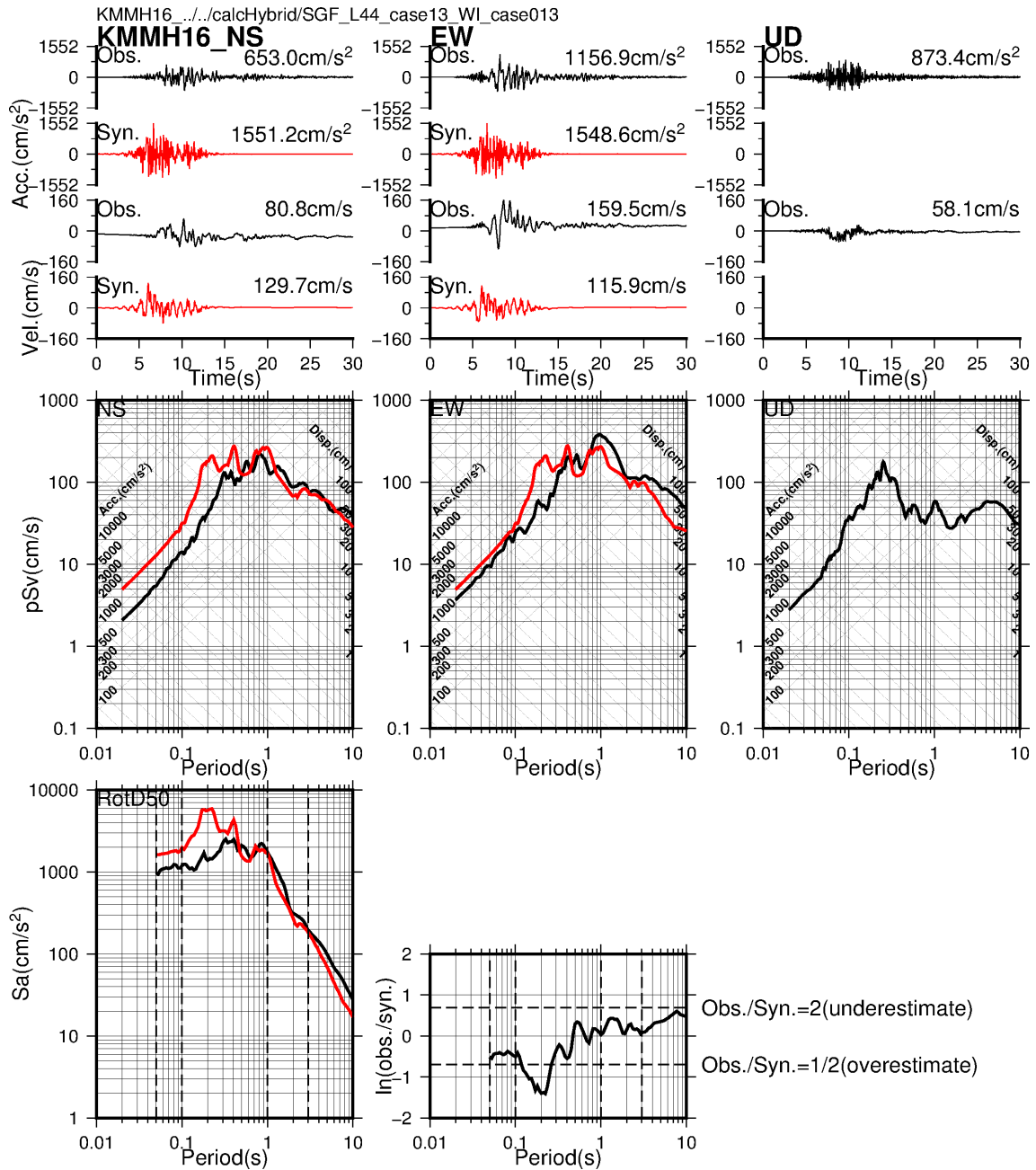


図 4.2.2-1a 地震動評価結果 (KMMH16). 上段より観測加速度波形, 合成加速度波形, 観測速度波形, 合成速度波形, 擬似速度応答スペクトル (黒色は観測, 赤色は合成). 最下段の左側は RotD50 の加速度応答スペクトル (黒色は観測, 赤色は合成), 最下段の右側は RotD50 の加速度応答スペクトルの観測に対する合成の比を表す.

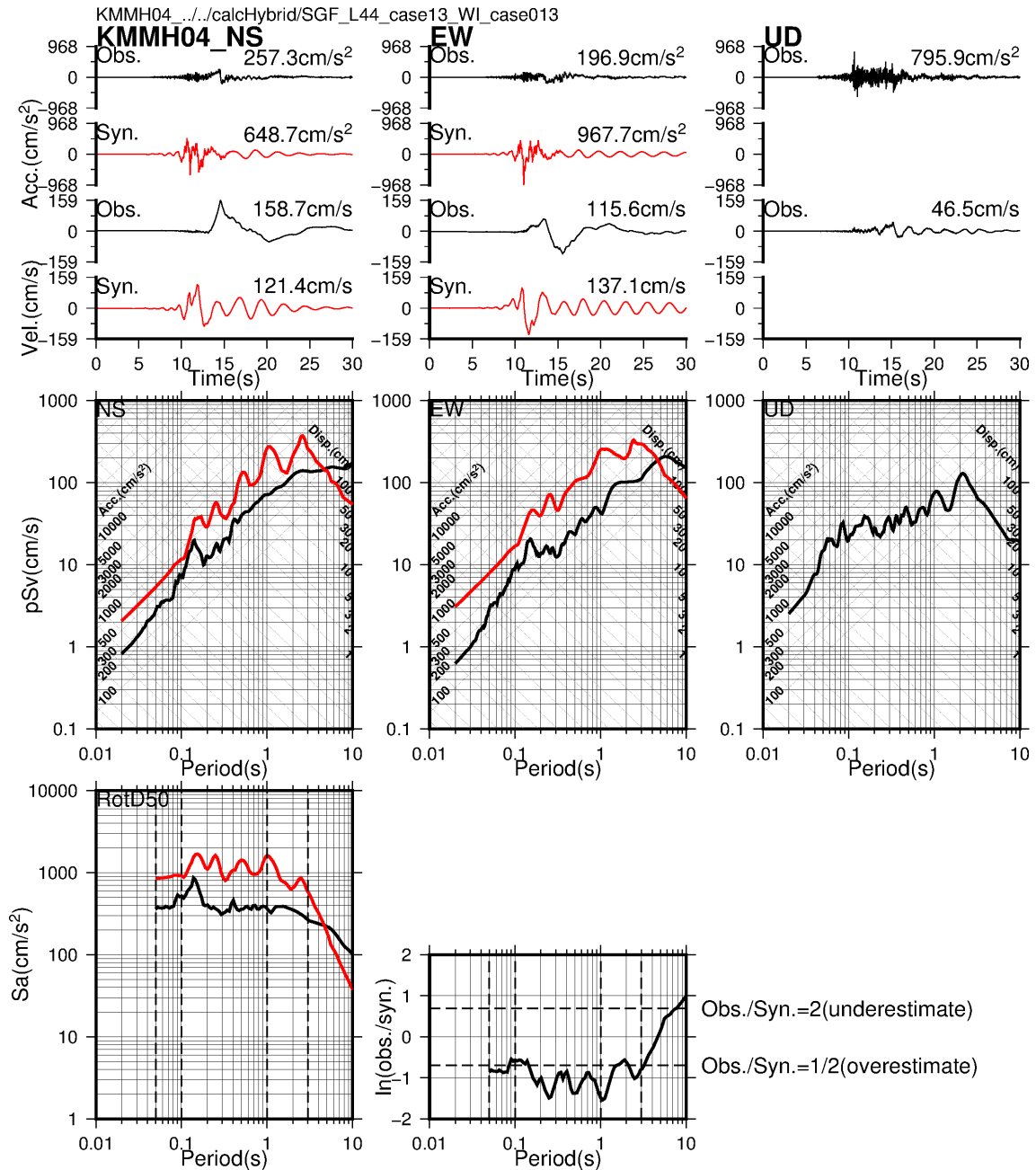


図 4.2.2-1b 地震動評価結果 (KMMH04). 上段より観測加速度波形, 合成加速度波形, 観測速度波形, 合成速度波形, 擬似速度応答スペクトル (黒色は観測, 赤色は合成). 最下段の左側は RotD50 の加速度応答スペクトル (黒色は観測, 赤色は合成), 最下段の右側は RotD50 の加速度応答スペクトルの観測に対する合成の比を表す.

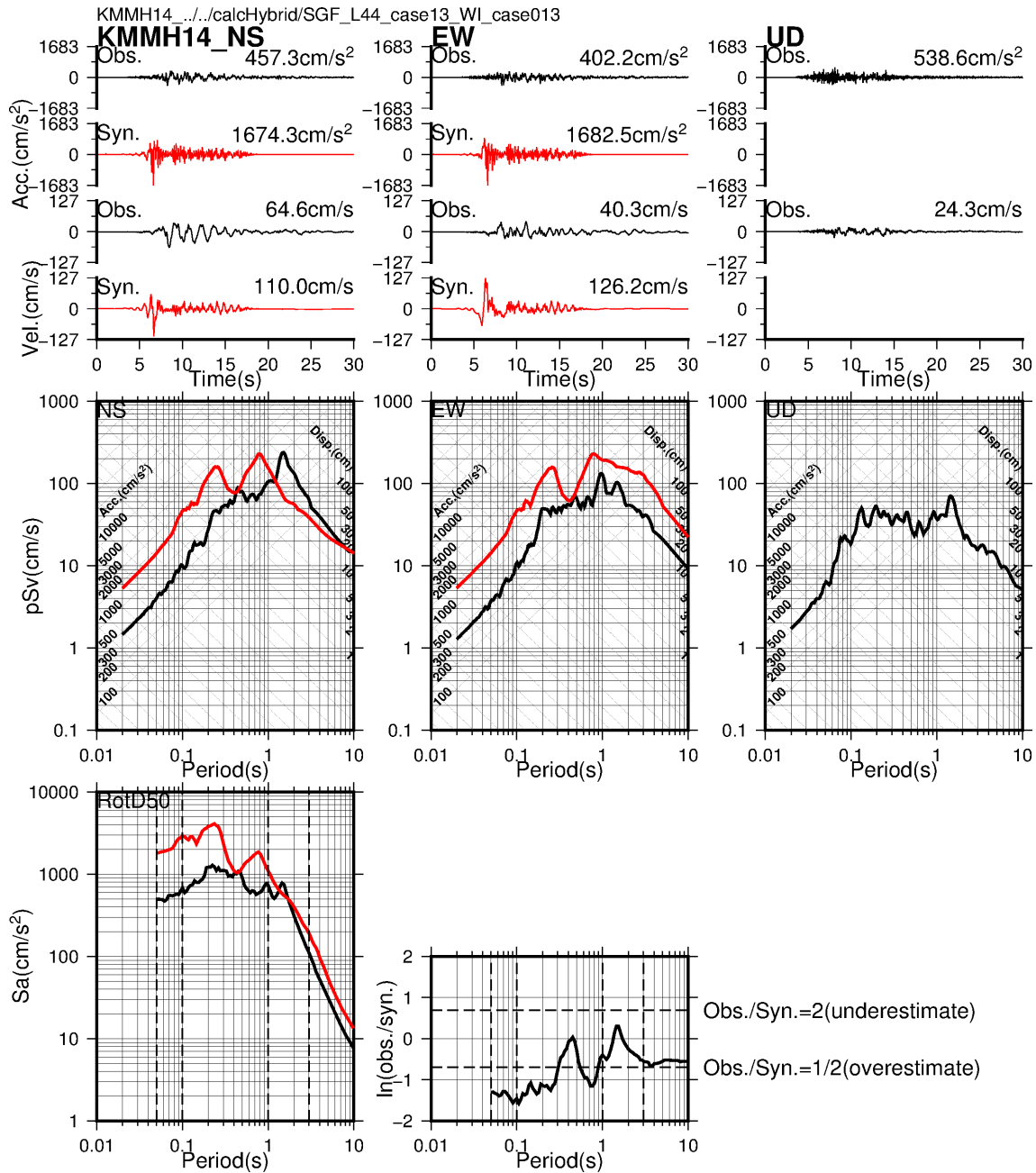


図 4.2.2-1c 地震動評価結果 (KMMH14). 上段より観測加速度波形, 合成加速度波形, 観測速度波形, 合成速度波形, 擬似速度応答スペクトル (黒色は観測, 赤色は合成). 最下段の左側は RotD50 の加速度応答スペクトル (黒色は観測, 赤色は合成), 最下段の右側は RotD50 の加速度応答スペクトルの観測に対する合成の比を表す.

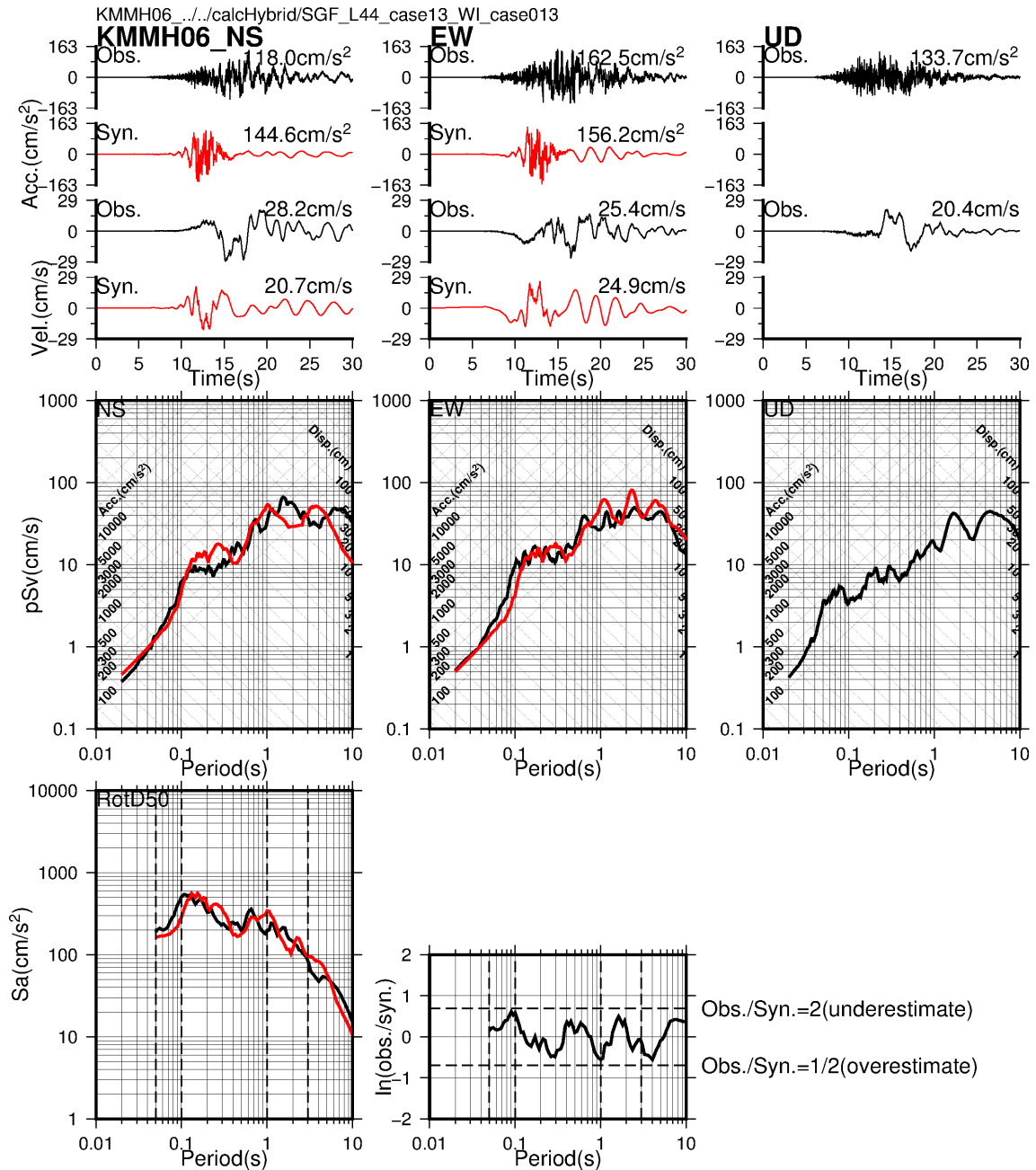


図 4.2.2-1d 地震動評価結果 (KMMH06). 上段より観測加速度波形, 合成加速度波形, 観測速度波形, 合成速度波形, 擬似速度応答スペクトル (黒色は観測, 赤色は合成). 最下段の左側は RotD50 の加速度応答スペクトル (黒色は観測, 赤色は合成), 最下段の右側は RotD50 の加速度応答スペクトルの観測に対する合成の比を表す.

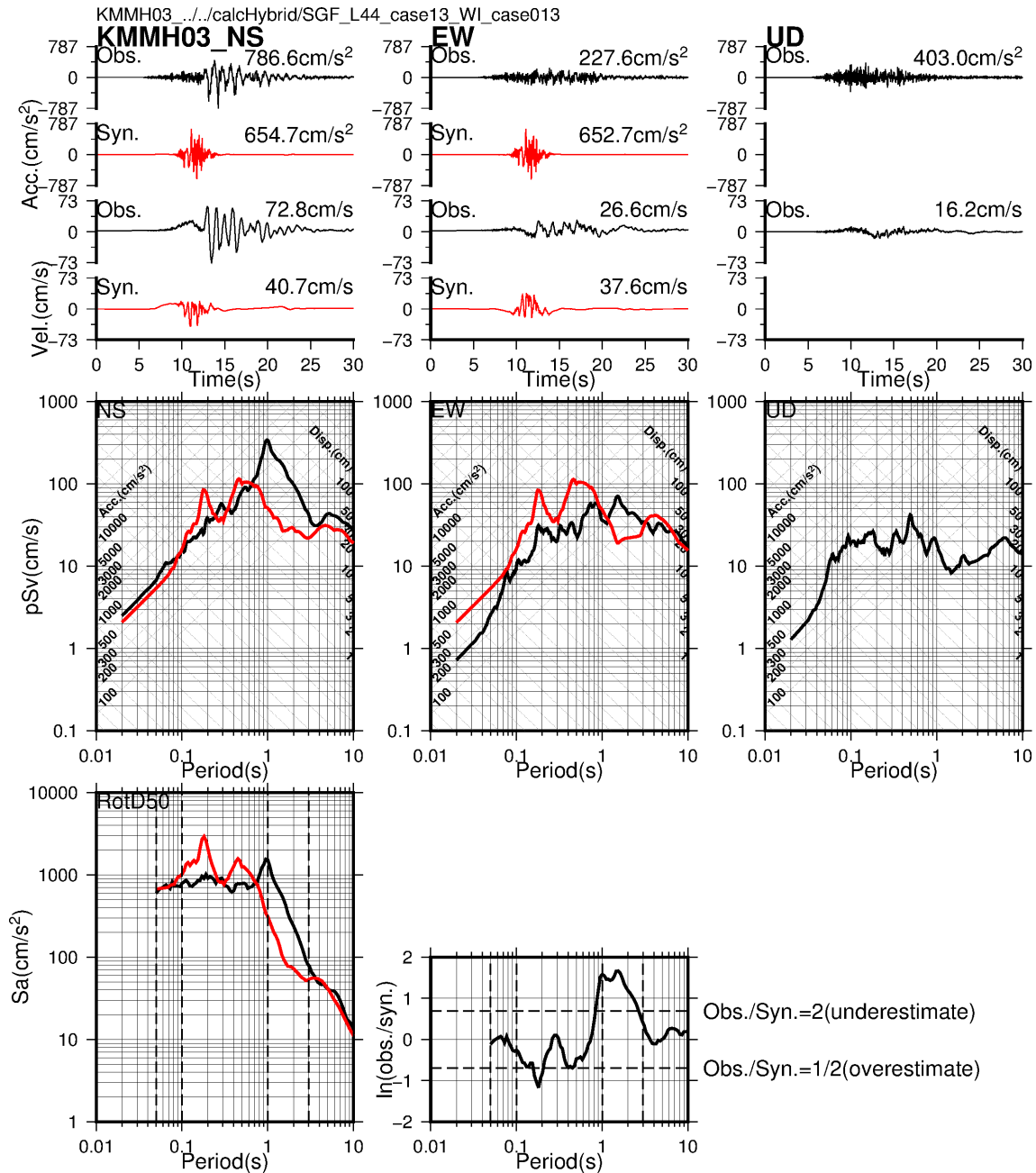


図 4.2.2-1e 地震動評価結果 (KMMH03). 上段より観測加速度波形, 合成加速度波形, 観測速度波形, 合成速度波形, 擬似速度応答スペクトル (黒色は観測, 赤色は合成). 最下段の左側は RotD50 の加速度応答スペクトル (黒色は観測, 赤色は合成), 最下段の右側は RotD50 の加速度応答スペクトルの観測に対する合成の比を表す.

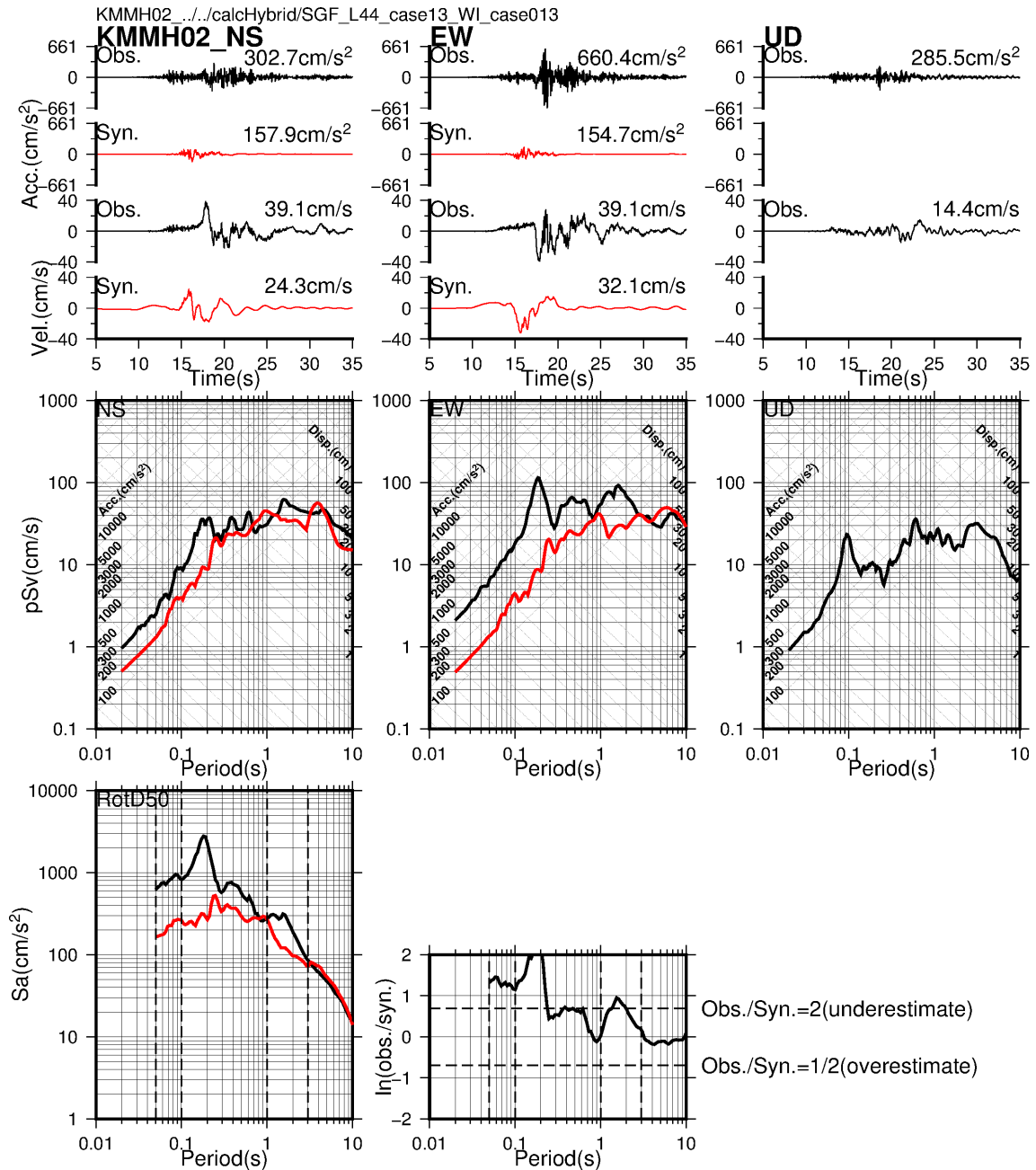


図 4.2.2-1f 地震動評価結果 (KMMH02). 上段より観測加速度波形, 合成加速度波形, 観測速度波形, 合成速度波形, 擬似速度応答スペクトル (黒色は観測, 赤色は合成). 最下段の左側は RotD50 の加速度応答スペクトル (黒色は観測, 赤色は合成), 最下段の右側は RotD50 の加速度応答スペクトルの観測に対する合成の比を表す.

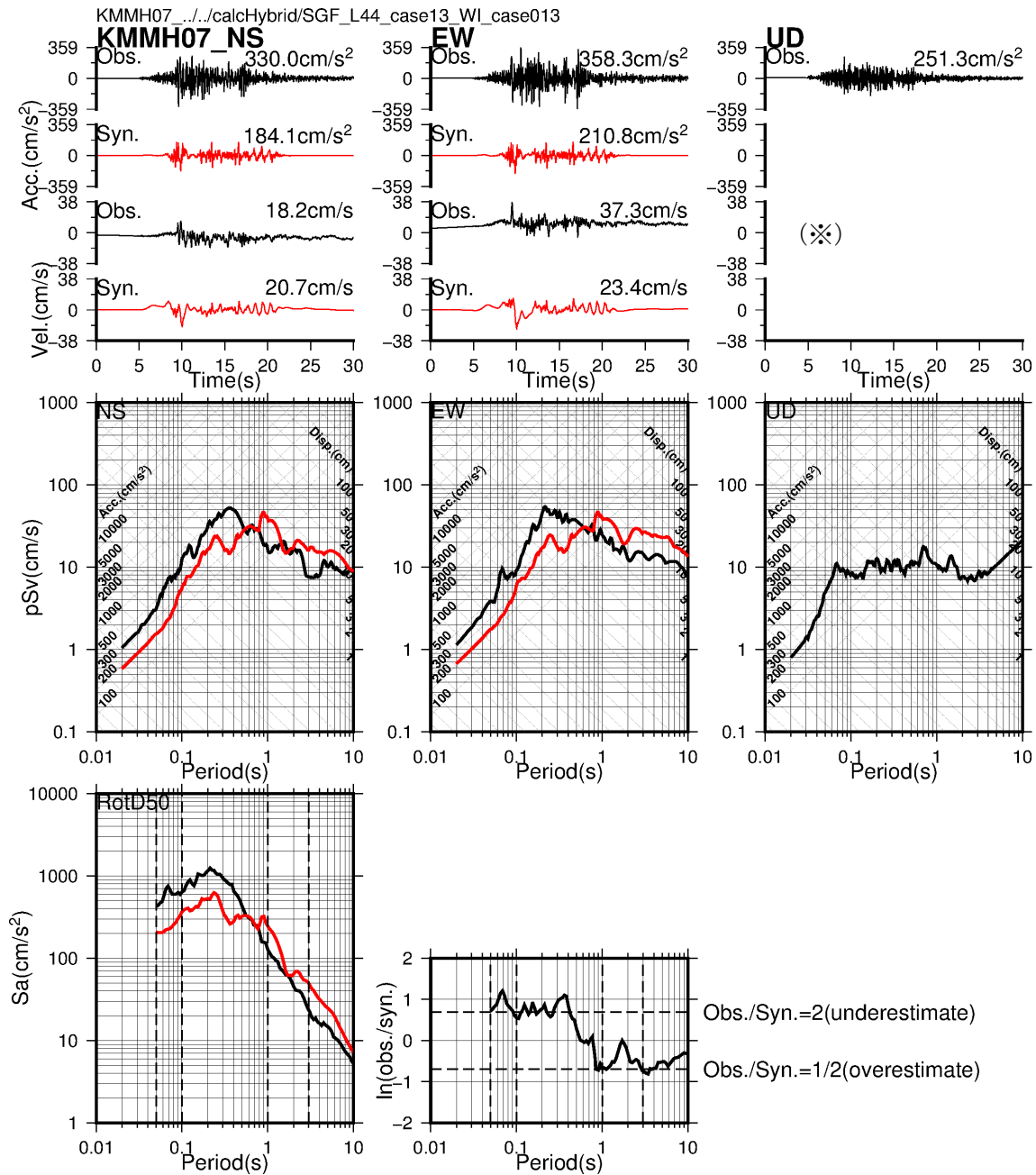


図 4.2.2-1g 地震動評価結果 (KMMH07). 上段より観測加速度波形, 合成加速度波形, 観測速度波形, 合成速度波形, 擬似速度応答スペクトル (黒色は観測, 赤色は合成). 最下段の左側は RotD50 の加速度応答スペクトル (黒色は観測, 赤色は合成), 最下段の右側は RotD50 の加速度応答スペクトルの観測に対する合成の比を表す. (※) UD 成分の速度波形は発散するため, ここでは掲載していない (KMMH07 は未選別データである).

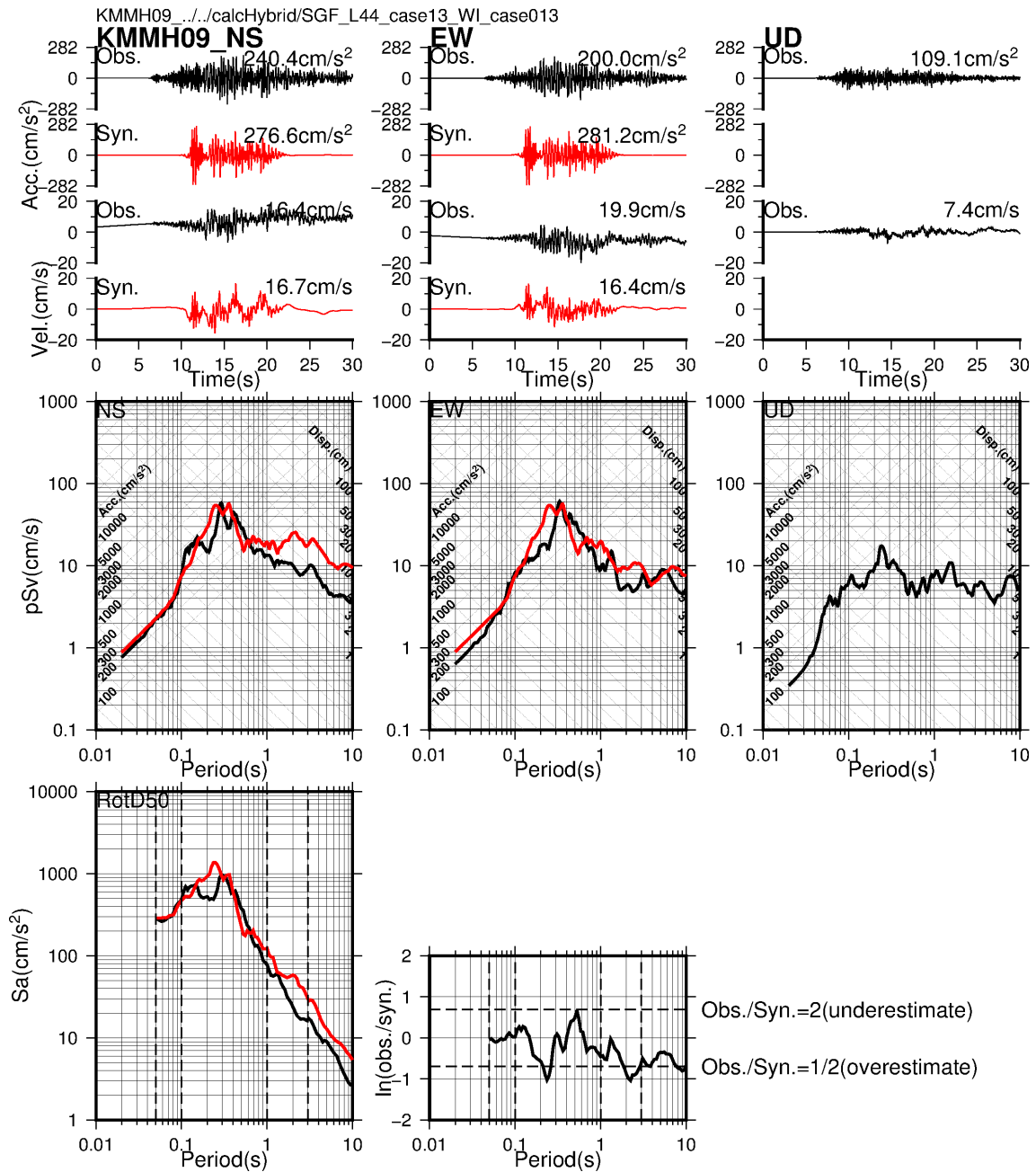


図 4.2.2-1h 地震動評価結果 (KMMH09). 上段より観測加速度波形, 合成加速度波形, 観測速度波形, 合成速度波形, 擬似速度応答スペクトル (黒色は観測, 赤色は合成). 最下段の左側は RotD50 の加速度応答スペクトル (黒色は観測, 赤色は合成), 最下段の右側は RotD50 の加速度応答スペクトルの観測に対する合成の比を表す.

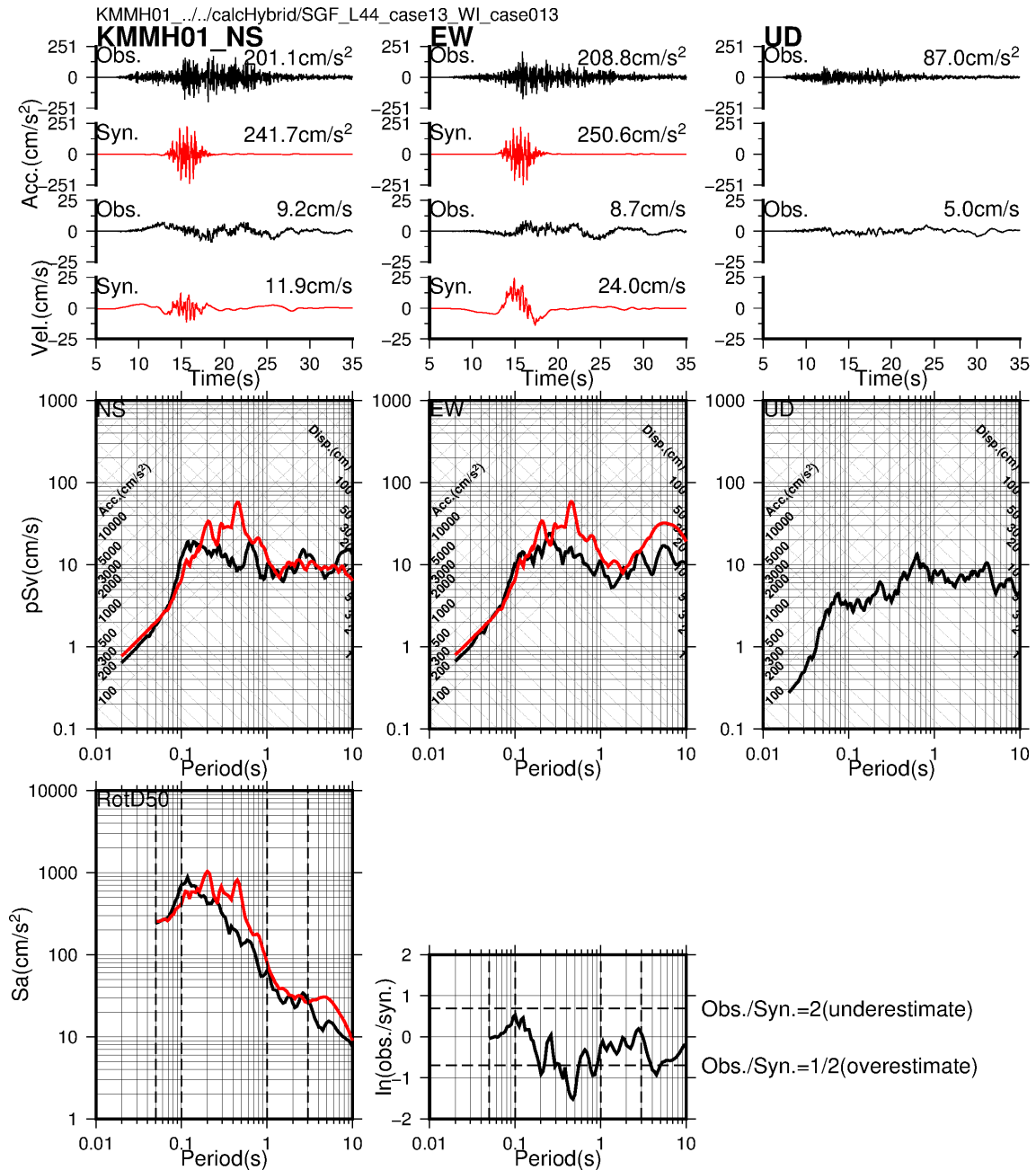


図 4.2.2-1i 地震動評価結果 (KMMH01). 上段より観測加速度波形, 合成加速度波形, 観測速度波形, 合成速度波形, 擬似速度応答スペクトル (黒色は観測, 赤色は合成). 最下段の左側は RotD50 の加速度応答スペクトル (黒色は観測, 赤色は合成), 最下段の右側は RotD50 の加速度応答スペクトルの観測に対する合成の比を表す.

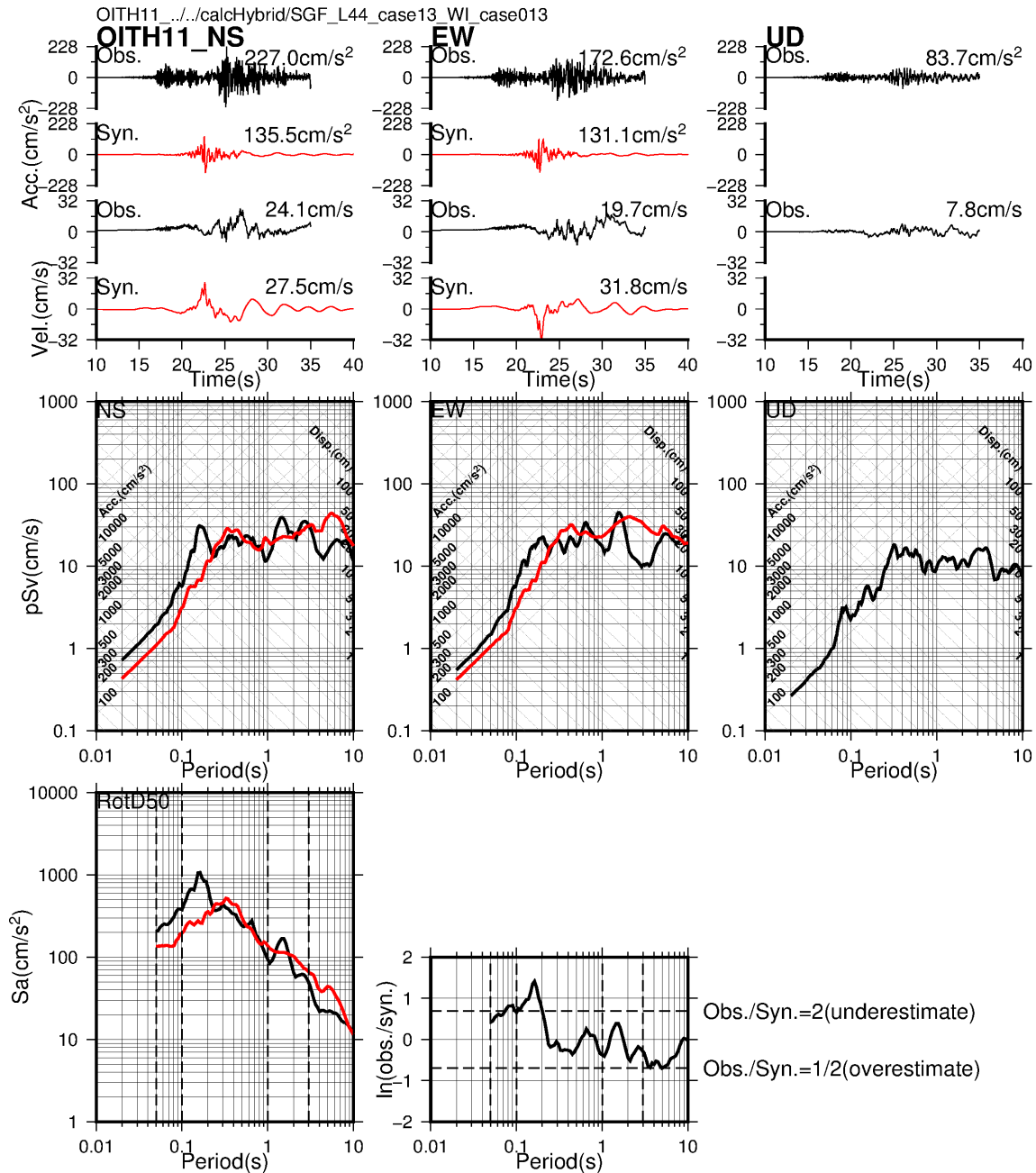
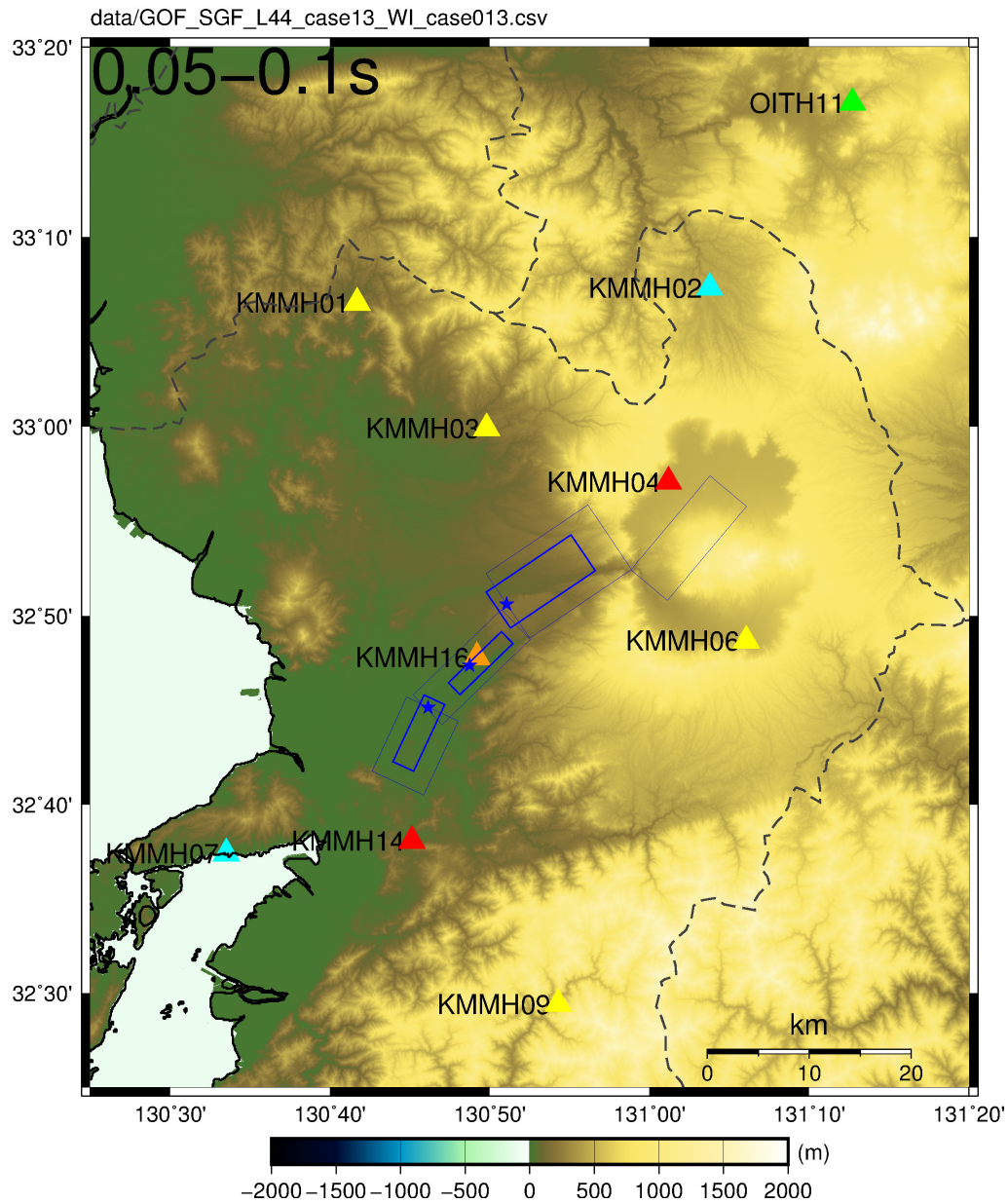
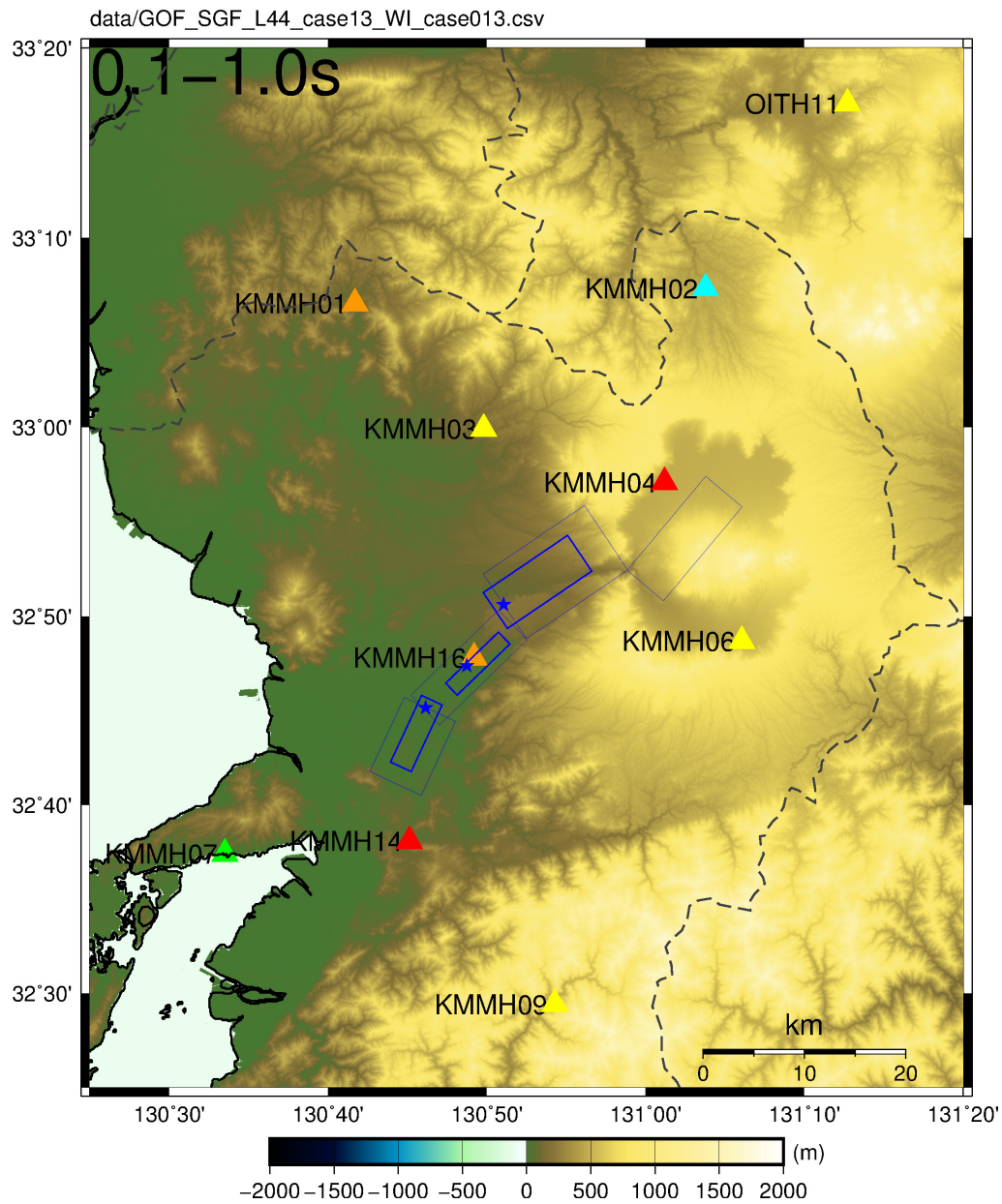


図 4.2.2-1j 地震動評価結果 (OITH11). 上段より観測加速度波形, 合成加速度波形, 観測速度波形, 合成速度波形, 擬似速度応答スペクトル (黒色は観測, 赤色は合成). 最下段の左側は RotD50 の加速度応答スペクトル (黒色は観測, 赤色は合成), 最下段の右側は RotD50 の加速度応答スペクトルの観測に対する合成の比を表す.



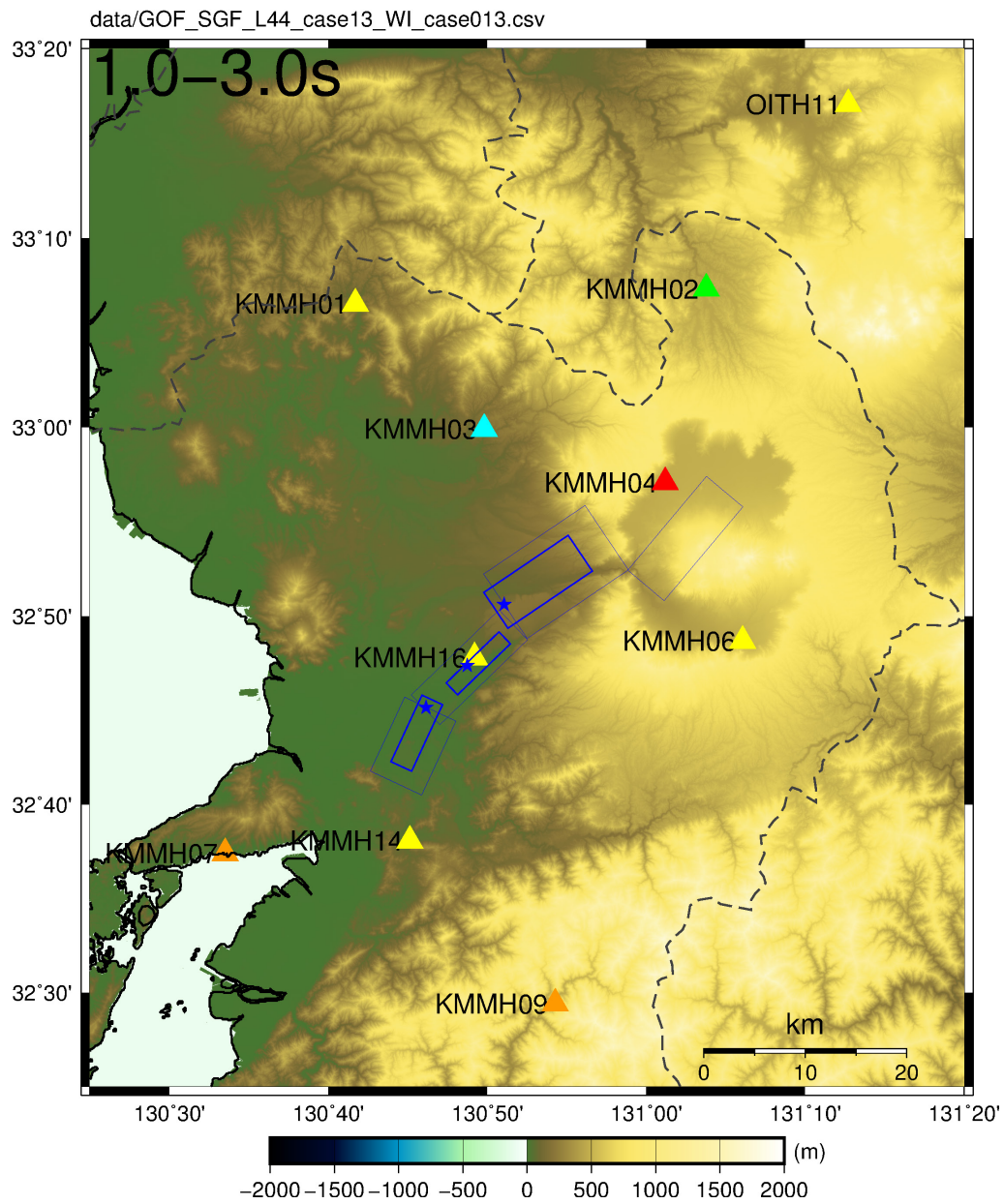
Ratio=(Obs./Syn.)	$\ln(\text{Ratio})$	三角印の色
$2 \leq \text{Ratio}$	$0.69 \leq \ln(\text{Ratio})$	▲
$1.5 \leq \text{Ratio} \leq 2$	$0.41 \leq \ln(\text{Ratio}) \leq 0.69$	▲
$1/1.5 \leq \text{Ratio} \leq 1.5$	$-0.41 \leq \ln(\text{Ratio}) \leq 0.41$	▲
$1/2 \leq \text{Ratio} \leq 1/1.5$	$-0.69 \leq \ln(\text{Ratio}) \leq -0.41$	▲
$\text{Ratio} \leq 1/2$	$\ln(\text{Ratio}) \leq -0.69$	▲

図 4.2.2-2a 地震動評価結果の空間分布（周期 0.05 – 0.1 秒）.



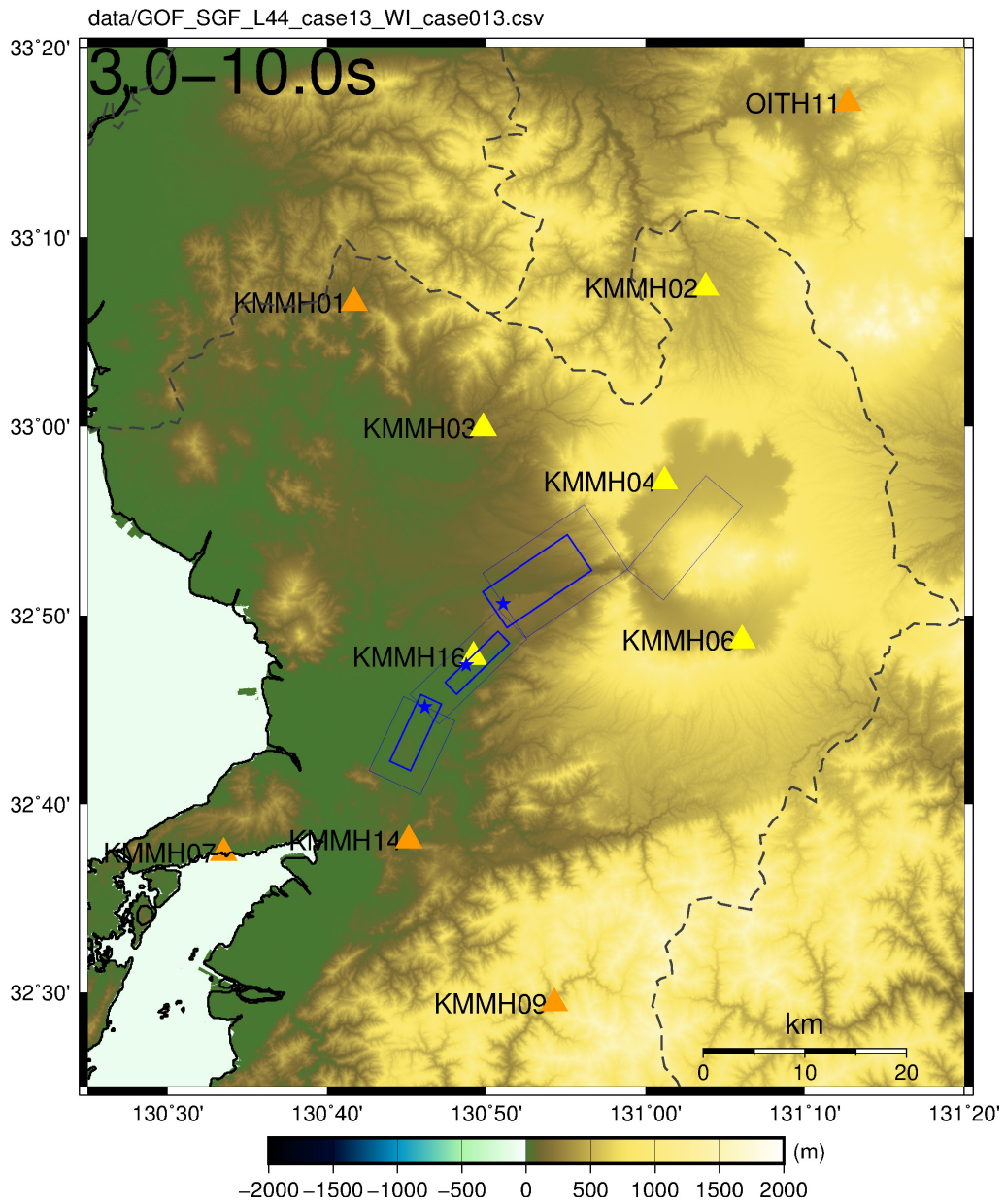
Ratio=(Obs./Syn.)	ln(Ratio)	三角印の色
$2 \leq \text{Ratio}$	$0.69 \leq \ln(\text{Ratio})$	▲
$1.5 \leq \text{Ratio} \leq 2$	$0.41 \leq \ln(\text{Ratio}) \leq 0.69$	▲
$1/1.5 \leq \text{Ratio} \leq 1.5$	$-0.41 \leq \ln(\text{Ratio}) \leq 0.41$	▲
$1/2 \leq \text{Ratio} \leq 1/1.5$	$-0.69 \leq \ln(\text{Ratio}) \leq -0.41$	▲
$\text{Ratio} \leq 1/2$	$\ln(\text{Ratio}) \leq -0.69$	▲

図 4.2.2-2b 地震動評価結果の空間分布（周期 0.1 - 1 秒）.



Ratio=(Obs./Syn.)	ln(Ratio)	三角印の色
$2 \leq \text{Ratio}$	$0.69 \leq \ln(\text{Ratio})$	▲
$1.5 \leq \text{Ratio} \leq 2$	$0.41 \leq \ln(\text{Ratio}) \leq 0.69$	▲
$1/1.5 \leq \text{Ratio} \leq 1.5$	$-0.41 \leq \ln(\text{Ratio}) \leq 0.41$	▲
$1/2 \leq \text{Ratio} \leq 1/1.5$	$-0.69 \leq \ln(\text{Ratio}) \leq -0.41$	▲
$\text{Ratio} \leq 1/2$	$\ln(\text{Ratio}) \leq -0.69$	▲

図 4.2.2-2c 地震動評価結果の空間分布（周期 1-3 秒）.



Ratio=(Obs./Syn.)	ln(Ratio)	三角印の色
$2 \leq \text{Ratio}$	$0.69 \leq \ln(\text{Ratio})$	▲
$1.5 \leq \text{Ratio} \leq 2$	$0.41 \leq \ln(\text{Ratio}) \leq 0.69$	▲
$1/1.5 \leq \text{Ratio} \leq 1.5$	$-0.41 \leq \ln(\text{Ratio}) \leq 0.41$	▲
$1/2 \leq \text{Ratio} \leq 1/1.5$	$-0.69 \leq \ln(\text{Ratio}) \leq -0.41$	▲
$\text{Ratio} \leq 1/2$	$\ln(\text{Ratio}) \leq -0.69$	▲

図 4.2.2-2d 地震動評価結果の空間分布（周期 3-10 秒）.

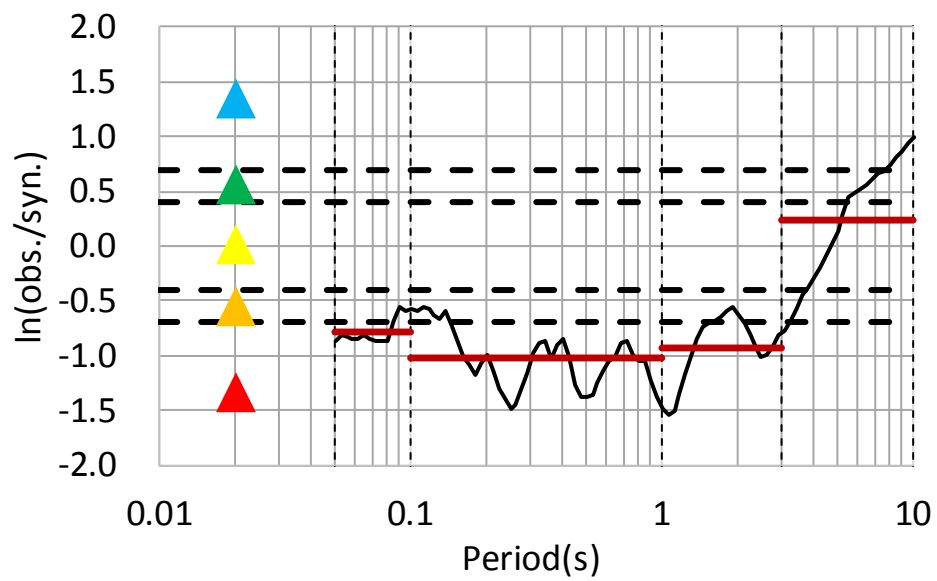


図 4.2.2-3 合成に対する観測の比の周期レンジ毎の平均値のイメージ。黒色の実線は合成に対する観測の比，縦の細い点線は CGOF の周期レンジの境界，茶色の実線は周期レンジ内での平均値，横の太い実線は図 4.2.2-2a ～ d の三角印の色に対応する境界を表す。

⑥ 地震動シミュレーション結果の評価

ここでは, CGOF を用いて地震動シミュレーション結果と観測記録の差を定量的に評価する.

CGOF による評価方法の概要を次に示す. まず, RotD50 (Boore, 2010) の方位に依存しない加速度応答スペクトルを合成と観測に対して算出する. Dreger *et al.* (2015) では, 加速度応答スペクトルは 0.01 ~ 10 秒を対象としているが, 本検討では 0.05 ~ 10 秒を対象とした. 0.05 ~ 10 秒を対数軸上等分割で 100 分割し, 周期を 4 つのグループ (0.05 ~ 0.1 秒, 0.1 ~ 1 秒, 1 ~ 3 秒, 3 ~ 10 秒) に分け, 各周期帯における合成と観測の加速度応答スペクトルの残差を式 4.2.2-1 により求める. CGOF の値は表 4.2.2-3 に示す基準に従って評価される. 最終的には断層最短距離によって観測点を 4 つのグループ (0 ~ 5km, 5 ~ 20km, 20 ~ 70km, 70km 以上) に分類し, それぞれのグループにおける平均値を計算する.

$$CGOF = \frac{1}{2} |\langle \ln(Obs./Syn.) \rangle| + \frac{1}{2} \langle |\ln(Obs./Syn.)| \rangle \quad (4.2.2-1)$$

本検討によって得られた全観測点の合成と観測の加速度応答スペクトル (RotD50) を図 4.2.2-4 に示し, 図 4.2.2-5 に全観測点の加速度応答スペクトルの比と平均, 平均 $\pm 1\sigma$ を示す. 図 4.2.2-5 より, 平均的には観測スペクトルと概ね調和的であるが, 標準偏差は短周期側の方が長周期側よりも大きくなっている. 短周期側の大きな標準偏差は地盤モデルの改善や非線形性の影響を考慮することができれば, 小さくなると考えられる.

この加速度応答スペクトル (RotD50) を用いて計算した CGOF を表 4.2.2-4 に示す. 断層最短距離が短い観測点の短周期側で CGOF 値が大きくなっていることが確認できる. これを改善するためには, 非線形性の影響の考慮が必要になると考えられる.

表 4.2.2-3 CGOF の評価基準

CGOF の値	評価
$CGOF < 0.35$	Within Threshold
$0.35 \leq CGOF < 0.70$	Potential Issues
$0.70 \leq CGOF$	Problematic

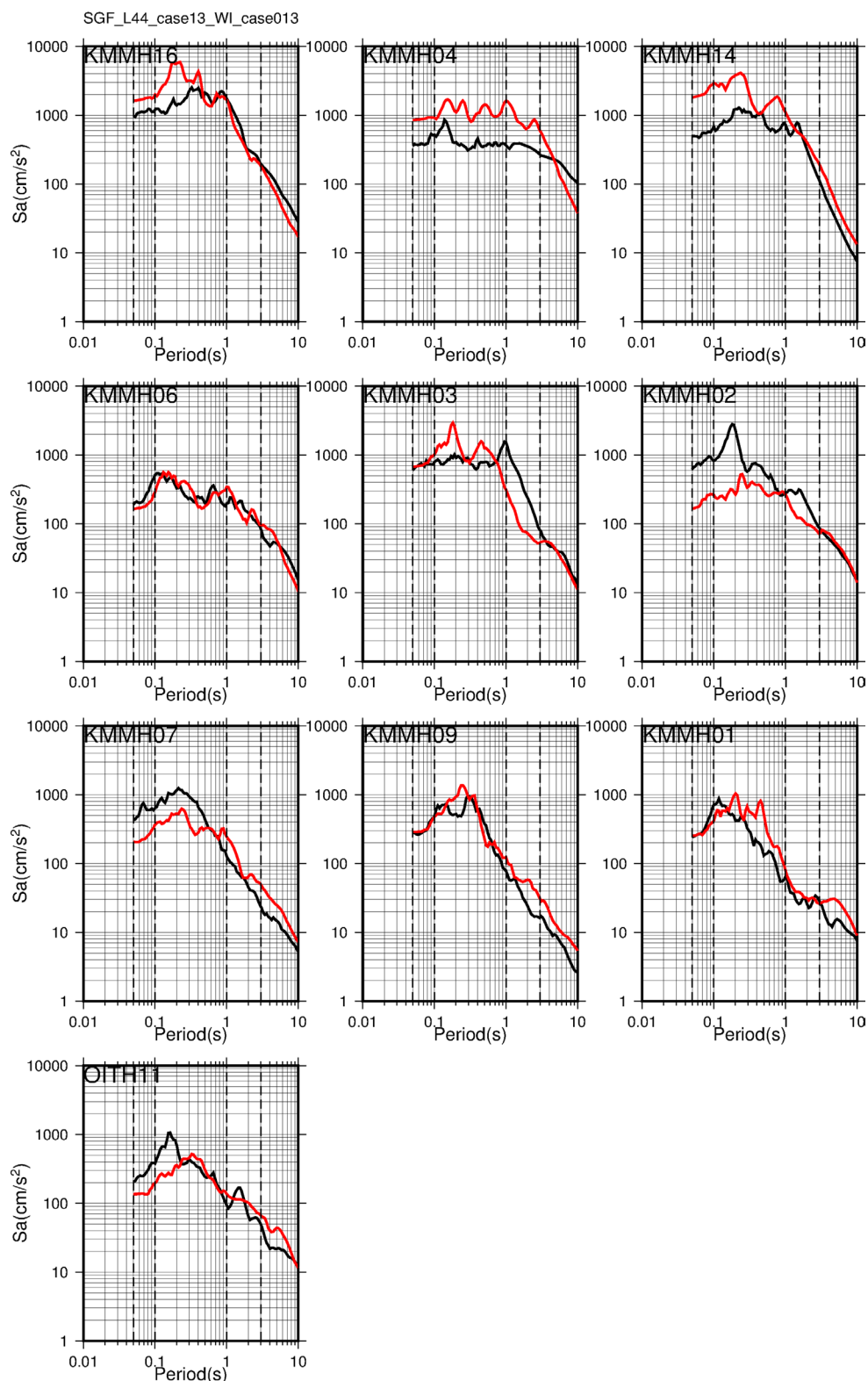


図 4.2.2-4 観測と合成の RotD50 の加速度応答スペクトルによる比較. 黒色は観測, 赤色は合成を表す.

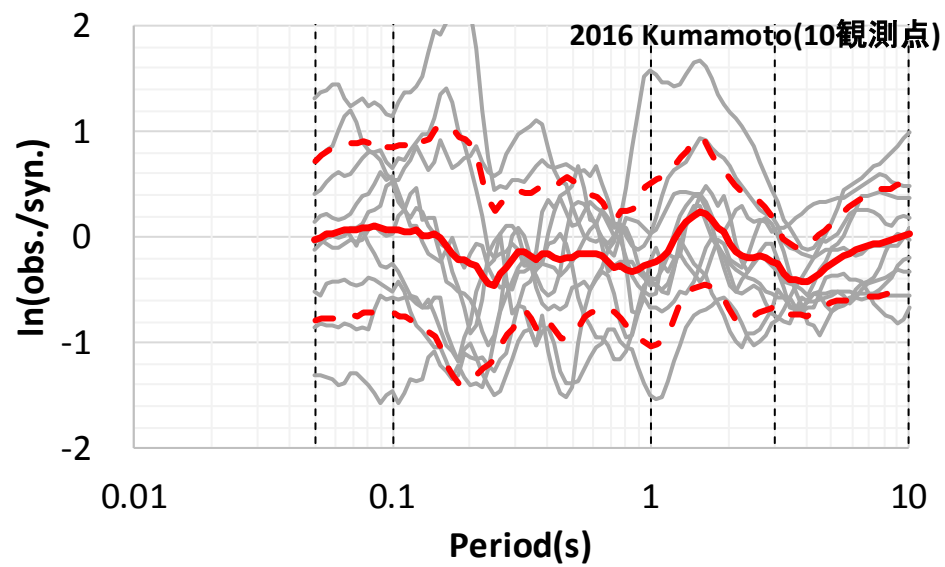


図 4.2.2-5 全観測点の RotD50 の加速度応答スペクトルの比とその平均，平均 $\pm 1\sigma$ ．グレー色は各観測点の RotD50 の加速度応答スペクトル，赤色の実線は平均，赤色の点線は平均 $\pm 1\sigma$ を表す．

表 4.2.2-4 CGOF を用いた本検討による地震動シミュレーション結果の評価
(上段：各観測点，中段：断層最短距離によるグルーピング，下段：評価基準)

Xsh (km)	station name	Xsh (km)	Period(s)			
			0.05-0.1	0.1-1.0	1.0-3.0	3.0-10.0
0-5km	KMMH16	2.4	0.45	0.54	0.23	0.38
	KMMH04	2.8	0.79	1.03	0.94	0.38
	KMMH14	4.7	1.38	0.91	0.27	0.56
5-20km	KMMH06	12.8	0.32	0.15	0.14	0.17
	KMMH03	17.7	0.08	0.41	1.26	0.13
	KMMH02	18.4	1.31	0.93	0.54	0.10
	KMMH07	19.7	0.88	0.54	0.46	0.54
20-70km	KMMH09	24.4	0.04	0.23	0.58	0.56
	KMMH01	33.4	0.12	0.55	0.18	0.51
	OITH11	38.9	0.64	0.35	0.20	0.43

Xsh (km)	num of stations	Period(s)			
		0.05-0.1	0.1-1.0	1.0-3.0	3.0-10.0
0-5km	2	0.87	0.83	0.48	0.44
5-20km	4	0.65	0.51	0.60	0.24
20-70km	3	0.27	0.38	0.32	0.50

Within Threshold CGOF < 0.35	Potential Issues $0.35 \leq \text{CGOF} < 0.70$	Problematic $0.70 \leq \text{CGOF}$
---------------------------------	--	--

⑦ 面的な地震動シミュレーション

ここでは、4.2.1 で構築した特性化震源モデルを参考に、ハイブリッド合成手法を用いて工学的基盤における面的な地震動シミュレーションを実施する。ハイブリッド合成では周波数 $0.5 \sim 1$ Hz を遷移周波数帯域として、短周期側は統計的グリーン関数法、長周期側は理論的手法（波数積分法）を用いた。なお、統計的グリーン関数法での放射係数は S 波の全震源球面上の平均である 0.63 を水平 2 成分の二乗和であると考え、 0.63 を $1/2^{0.5}$ で除した 0.445 を用いた。理論的手法で用いたすべり速度時間関数は中村・宮武 (2000) とした。

面的な地震動シミュレーションのための震源モデルは表 4.2.1-2 で示した特性化震源モデルのうち、背景領域を考慮せずに SMGA のみとした。面的な地震動シミュレーションで用いた震源パラメータを表 4.2.2-5 に示す。地盤モデルは表 4.2.2-2a で示した KMMH16 の地盤モデルを参考に、ここで新たに構築した $V_s = 680$ m/s 層を最浅層としたモデル（表 4.2.2-6）を用いた。但し、統計的グリーン関数法での評価では、地震基盤と考えられる $V_s = 3000$ m/s 層を半無限層とした。計算領域は震源断層面を含むように $120 \text{ km} \times 120 \text{ km}$ とし、評価地点の間隔は震源断層面の近傍では 2 km 間隔、震源断層面から離れるにつれて 4 km 間隔、 8 km 間隔とした。評価地点数は全 1230 点である。評価地点の分布を図 4.2.2-6 に示す。

表 4.2.2-5 面的な地震動シミュレーションで用いる特性化震源モデルの震源パラメータ

パラメータ		単位	日奈久(H)	布田川(西)(F3)	布田川(中央)(F2)
			SM GA1	SM GA2	SM GA3
走向	θ	°	205	226	236
傾斜角	δ	°	72	77	65
すべり角	λ	°	200	200	200
上端深さ	H_s	km	6.27	4.36	4.53
長さ	L	km	7.2	7.2	10
幅	W	km	7.2	7.2	10
面積	S	km ²	51.8	51.8	100
すべり量	D	m	3.00	3.00	4.17
地震モーメント	M_0	Nm	4.86E+ 18	4.86E+ 18	1.30E+ 19
応力降下量	$\Delta \sigma$	MPa	13.6	13.6	13.4
ライズタイム(短周期)	T_r	s	0.6	0.6	0.6
ライズタイム(長周期)	T_r	s	1.29	1.29	1.79
S波速度	β	km/s	3.4	3.4	3.4
密度	ρ	g/cm ³	2.7	2.7	2.7
剛性率	μ	N/m ²	3.12E+ 10	3.12E+ 10	3.12E+ 10
Q値	Q	—	62f ^{0.87}	62f ^{0.87}	62f ^{0.87}
高周波遮断周波数	$f_{\max}$	Hz	6	6	6
破壊伝播速度	V_r	km/s	2.8	2.8	2.8
破壊伝播形式	—	—	マルチハイポセンター		
破壊遅延時間	—	s	0.71	2.26	3.50

表 4.2.2-6 面的な地震動シミュレーションで用いる地盤モデル（全評価地点で共通）
 （統計的グリーン関数法による評価では $V_s = 3000\text{m/s}$ 層を半無限とした）

Depth (m)			Thickness (m)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	ρ (g/cm^3)	Q_s	Q_p
0	–	201	201	680	1500	2.1	17	34
201	–	234	33	1640	2300	2.1	45	90
234	–	500	266	2910	4227.7	2.6	91	182
500	–	1000	500	1210	2633.6	2.4	200	200
1000	–	2000	1000	3000	5300	2.4	200	200
2000	–	5000	3000	3350	5800	2.7	200	400
5000	–	10000	5000	3460	6000	2.73	200	400
10000	–	15000	5000	3520	6100	2.74	200	400
15000	–	20000	5000	3690	6400	2.76	400	800
20000	–	25000	5000	3750	6500	2.78	400	800
25000	–	30000	5000	3900	6800	2.8	500	1000
30000	–	–	–	4600	8000	3.45	1000	2000

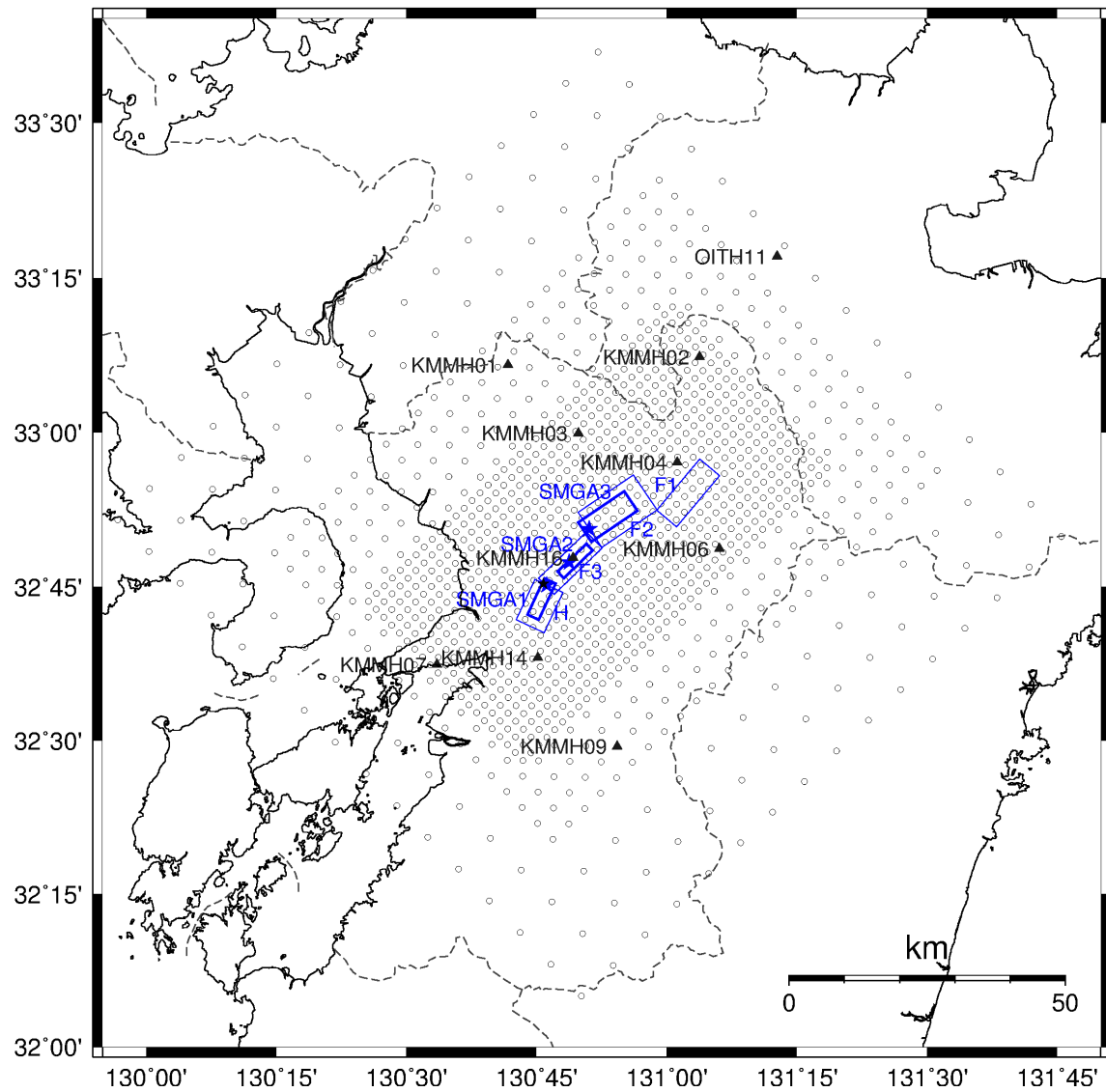


図 4.2.2-6 面的な地震動シミュレーションを実施した計算地点の分布. 黒色の丸印は評価地点を表す.

⑧ 面的な地震動シミュレーションの結果

特性化震源モデルを用いて面的な地震動シミュレーションを行った結果を次に示す。

図 4.2.2-7 と図 4.2.2-8 のそれぞれにハイブリッド合成手法によって評価された各評価点の最大加速度と最大速度の分布を示す。ここで、各評価点の最大加速度と最大速度を評価するにあたって、加速度波形のデータに 0.15 ～ 10 Hz のバンドパスフィルターを施し、最大値は水平 2 成分のうち大きい方の値を採用した。

最大加速度が大きな領域は SMGA2 や SMGA3 の上端付近に現われている。これは、表 4.2.2-5 で示したように各 SMGA の応力降下量は同程度であるが、SMGA2 や SMGA3 の上端深さは SMGA1 に比べて浅いことが起因していると考えられる。一方、最大速度の大きな領域は SMGA2 を挟む北西側と南東側、および SMGA3 付近とその北東の阿蘇側に現われている。ここで、最大速度の大きな領域を詳細に見るために、図 4.2.2-9 の黒丸で示した評価点の速度波形とパーティクルモーションを示す。図 4.2.2-10 に SMGA2 を挟む北西側と南東側の代表的な評価点、図 4.2.2-11 に SMGA3 付近とその北東の阿蘇側の代表的な評価点を示す。図 4.2.2-10 のパーティクルモーションは北東－南西方向が卓越しており、その方向は SMGA2 の走向 (226°) にほぼ一致している。これは、宮武 (2016)でも言及しているように、横ずれ断層で破壊が深部から浅部に伝播する場合の破壊の指向性によるものと考えられる。図 4.2.2-11 より、SMGA3 から遠ざかる（すなわち北東側にいく）につれて、パーティクルモーションには SMGA3 の走向に直交する成分が現われてくる。これは、例えば 1995 年兵庫県南部地震で見られたような Forward Directivity 効果に対応するものと考えられる。

図 4.2.2-12 に面的な地震動シミュレーション結果で得られた最大加速度、最大速度と司・翠川 (1999)による距離減衰式との比較を示す。図中の黒丸が地震動シミュレーションによる結果、赤線は司・翠川 (1999)から求まる最大加速度と最大速度に表層地盤の増幅を考慮したもので、赤色の実線は平均値、赤色の点線は平均 $\pm 1\sigma$ である。表層地盤の増幅は面的な地震動シミュレーションでは $V_s = 680 \text{ m/s}$ 層上面の評価であることを考慮して、最大加速度は司・翠川 (1999)から求まる値を 1.4 で除して岩盤上の値に変換し、最大速度は司・翠川 (1999)から求まる値に藤本・翠川 (2006)による速度増幅度 (0.90) を乗じた。表 4.2.2-7 に面的な地震動シミュレーション結果との比較に用いた司・翠川 (1999)のパラメータと地盤増幅率を示す。

図 4.2.2-12 より最大加速度、最大速度ともに大局的には司・翠川 (1999)と概ね整合していることが分かる。詳細にみると、最大加速度は断層最短距離が大きくなるにつれて、シミュレーション結果がやや過小評価となっている。このようになる一因として、阿蘇側の評価地点は断層最短距離が短い評価点近傍には SMGA がいないため、断層最短距離に比べて地震動は小さくなっていることが考えられる。最大速度は平均から $+1\sigma$ の間にあり、若干過大評価にも見える。この理由として、本検討で用いた破壊伝播速度 (2.8 km/s) がレシピから期待される値（例えば、S 波速度を 3.4 km/s と仮定した時に Geller (1976)を適用する

と 2.4 km/s) よりやや速めであることが要因として考えられる.

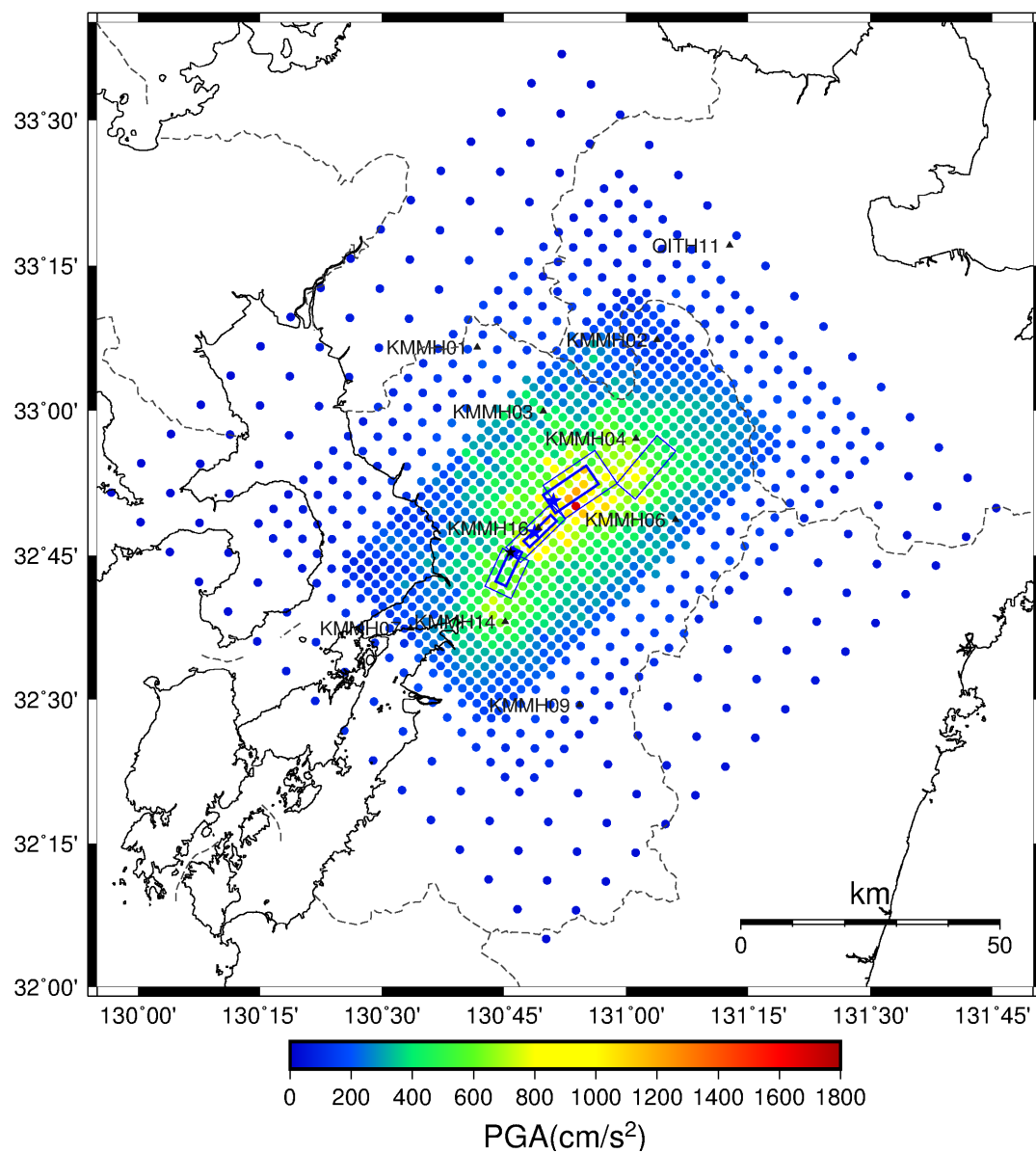


図 4.2.2-7 面的な地震動シミュレーションの最大加速度分布. 評価点の最大加速度は水平 2 成分のうち大きい方の値を採用している.

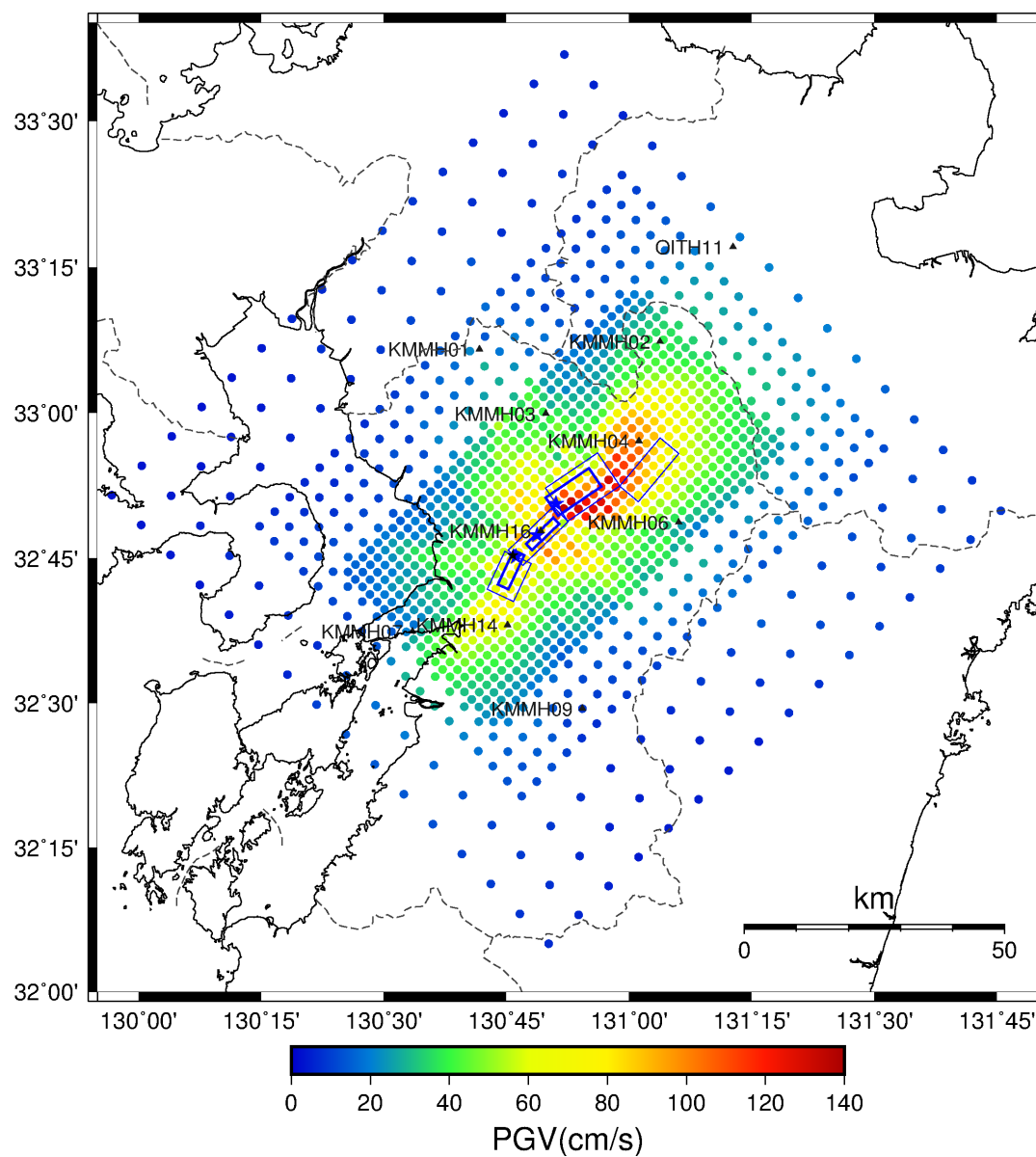


図 4.2.2-8 面的な地震動シミュレーションの最大速度分布. 評価点の最大速度は水平 2 成分のうち大きい方の値を採用している.

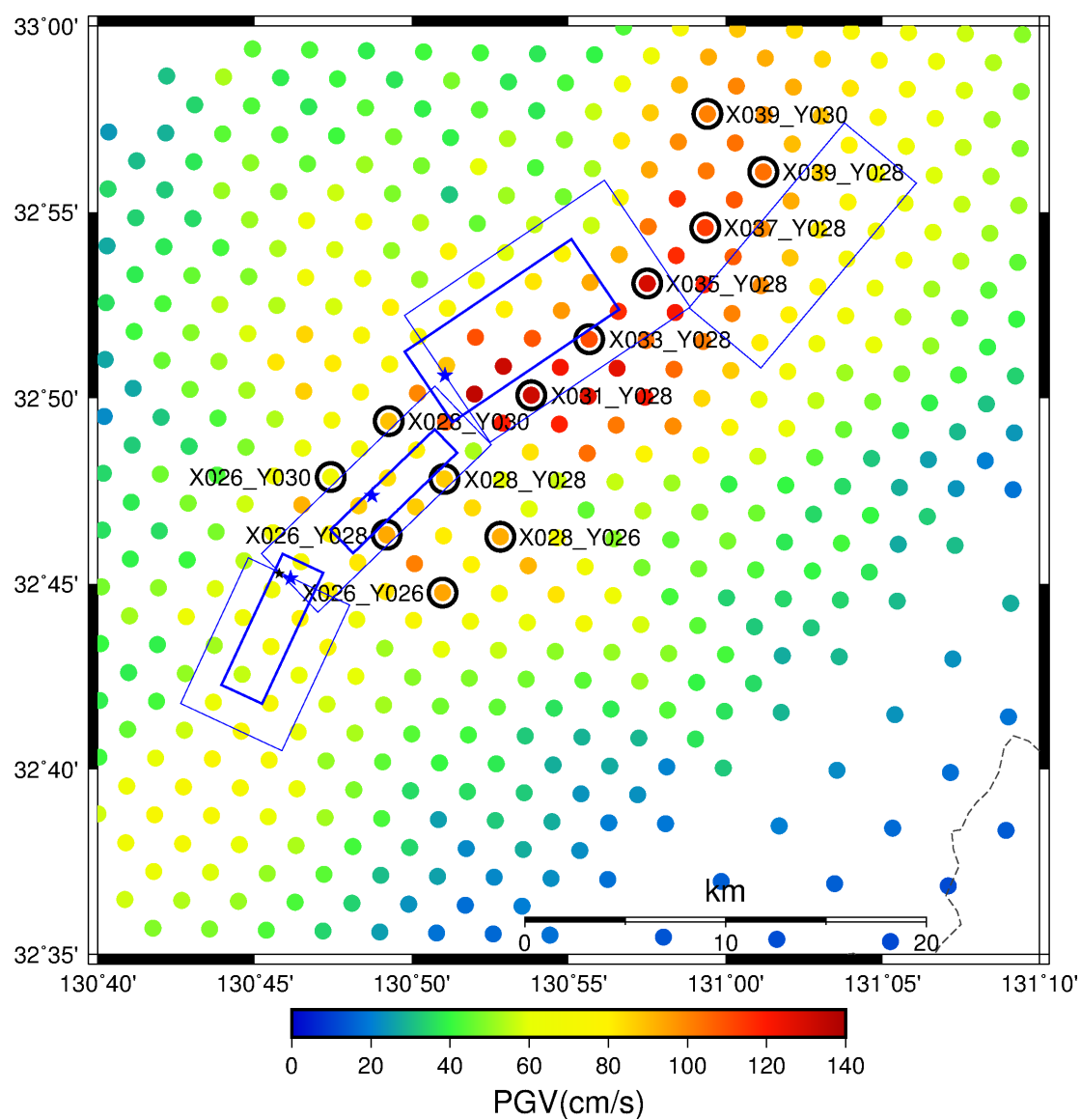
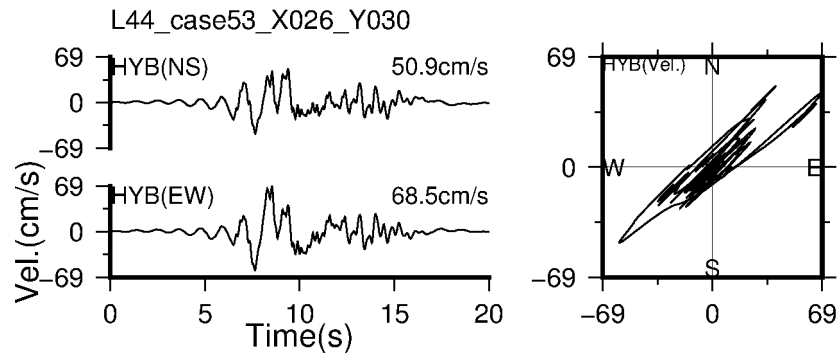
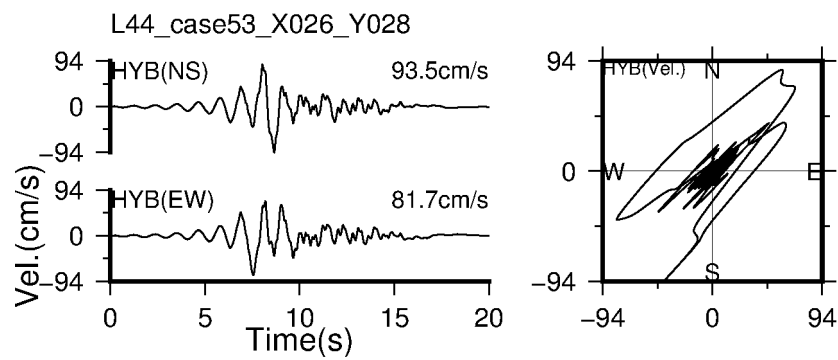


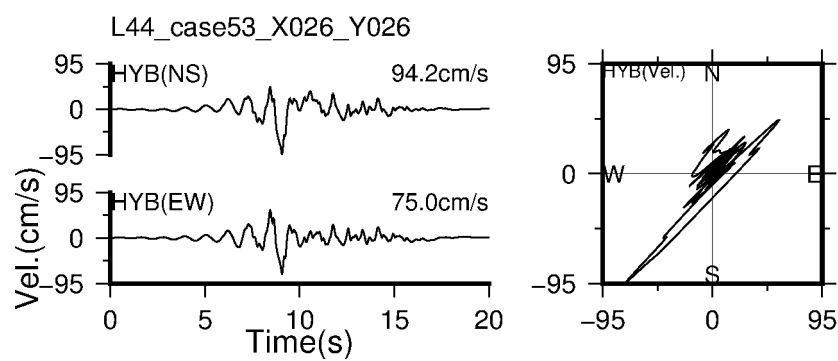
図 4.2.2-9 速度波形とパーティクルモーションを示した評価点（黒色の丸印）。



(a) X026_Y030

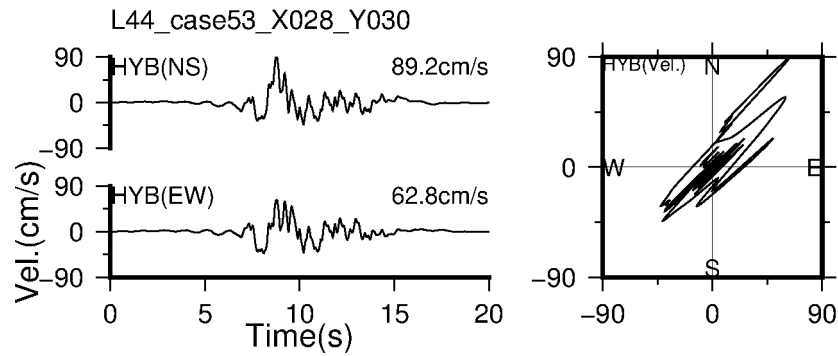


(b) X026_Y028

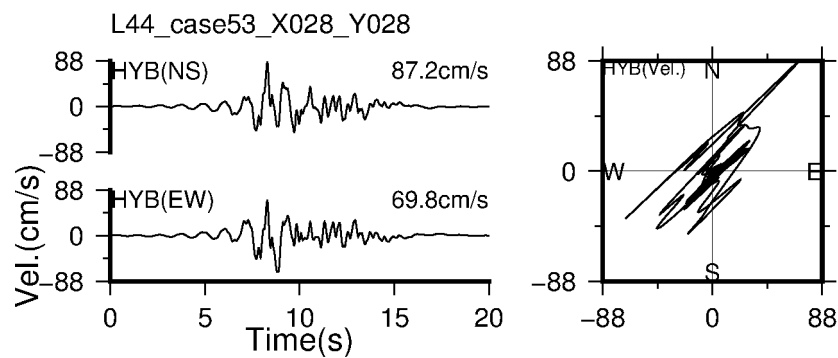


(c) X026_Y026

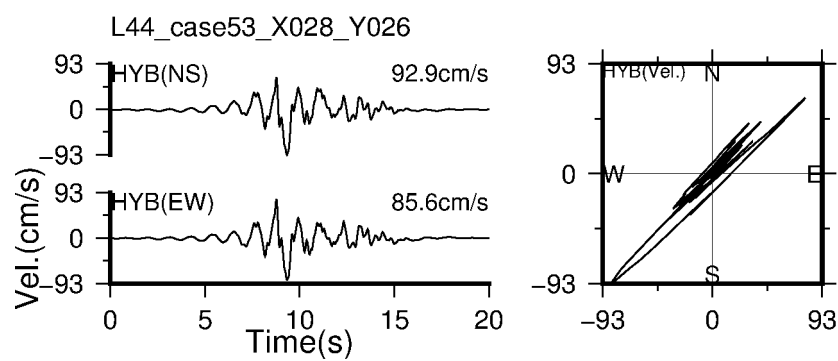
図 4.2.2-10a SMGA2 の北西側と南東側の代表的な評価点の速度波形とパーティクルモーション。左側の上段に NS 成分，下段に EW 成分，右側にパーティクルモーションを表す。



(d) X028_Y030

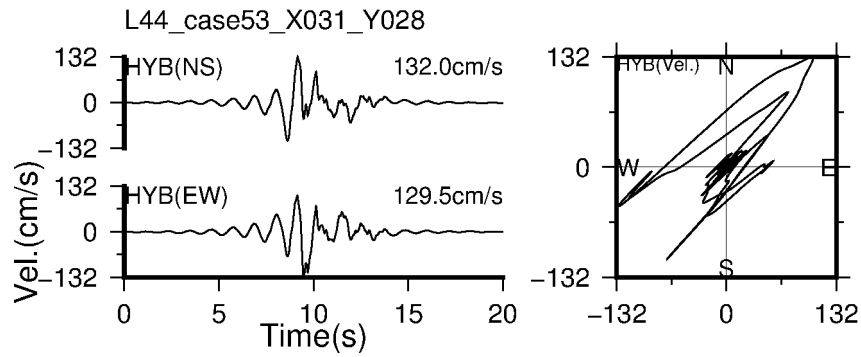


(e) X028_Y028

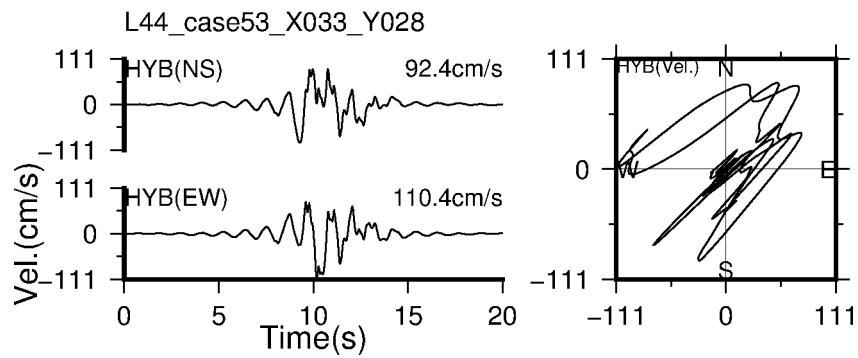


(f) X028_Y026

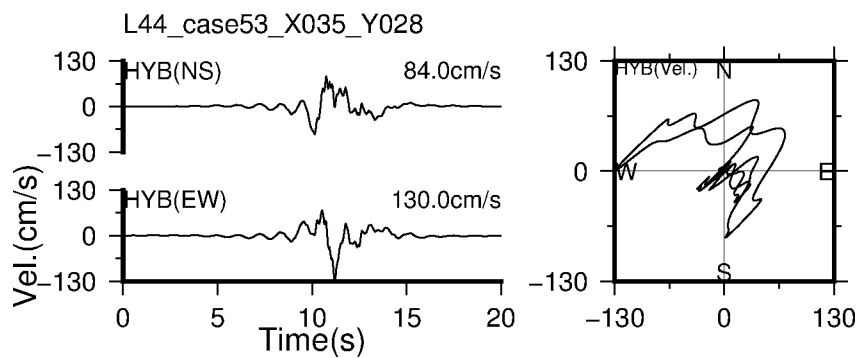
図4.2.2-10b SMGA2の北西側と南東側の代表的な評価点の速度波形とパーティクルモーション. 左側の上段にNS成分, 下段にEW成分, 右側にパーティクルモーションを表す.



(a) X031_Y028



(b) X033_Y028



(c) X035_Y028

図 4.2.2-11a SMGA3 付近とその北東の阿蘇側の代表的な評価点の速度波形とパーティクルモーション。左側の上段に NS 成分，下段に EW 成分，右側にパーティクルモーションを表す。

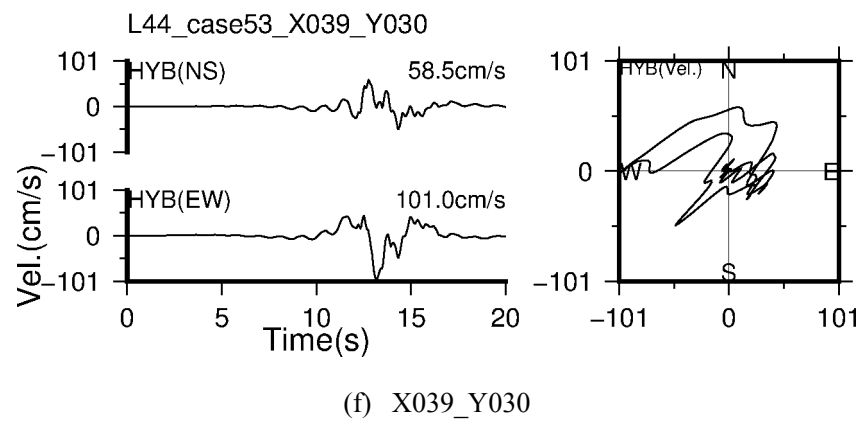
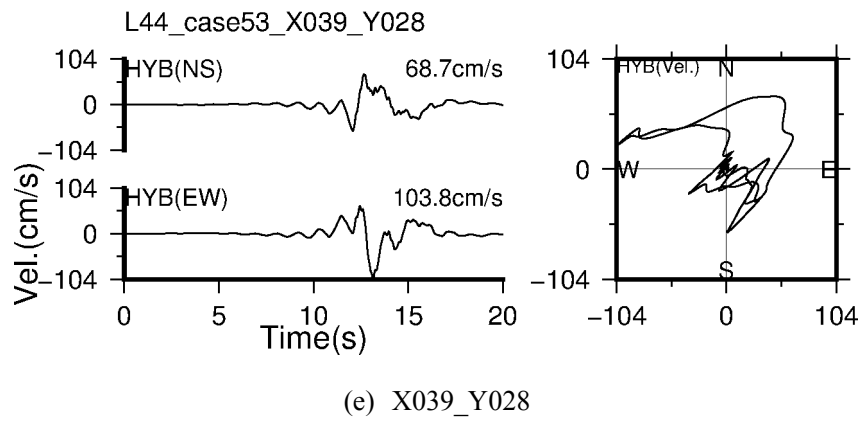
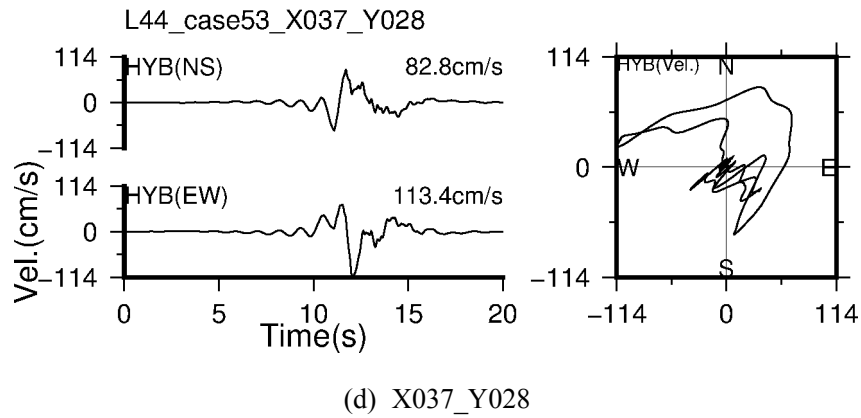


図4.2.2-11b SMGA3付近とその北東の阿蘇側の代表的な評価点の速度波形とパーティクルモーション。左側の上段にNS成分，下段にEW成分，右側にパーティクルモーションを表す。

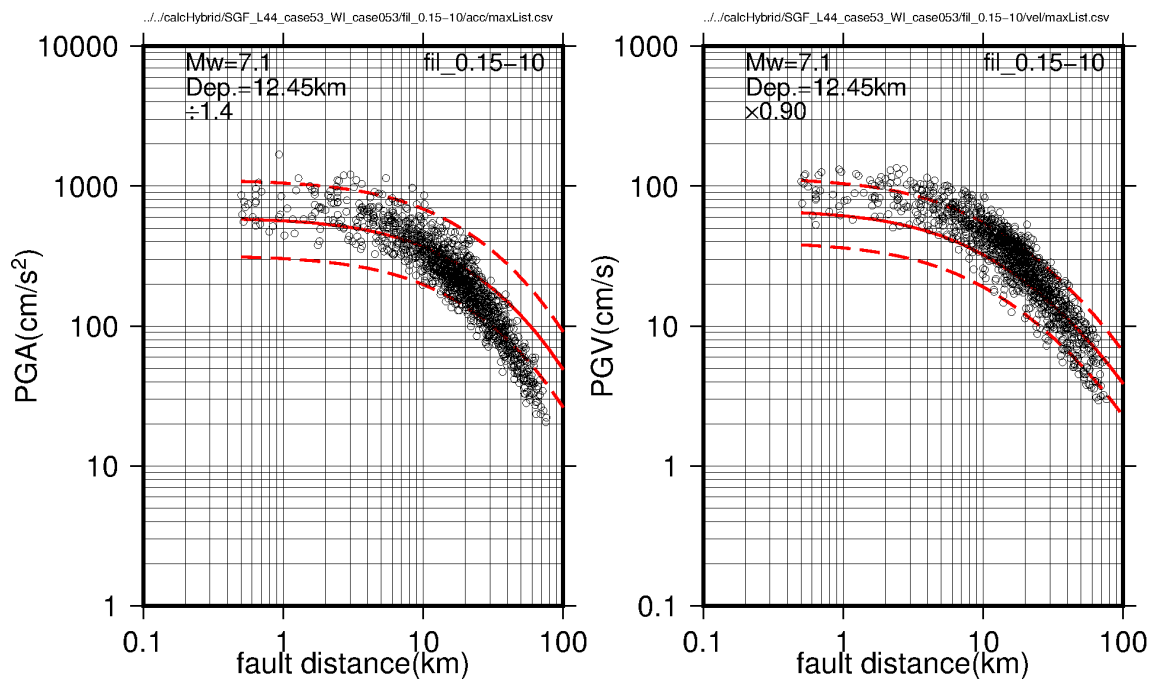


図 4.2.2-12 面的な地震動シミュレーション結果と司・翠川 (1999)との比較. 左側に最大加速度, 右側に最大速度を表す. 黒色の丸印はシミュレーション結果, 赤色の実線は司・翠川 (1999)の平均, 赤色の点線は司・翠川 (1999)の平均 $\pm 1\sigma$ を表す. なお, 司・翠川 (1999)の最大加速度は本検討で評価した地盤が岩盤と考えて 1.4 で除している. 最大速度は藤本・翠川 (2006)から求まる地盤増幅率 (0.90) を乗じている.

表 4.2.2-7 面的な地震動シミュレーション結果との比較に用いた司・翠川 (1999)のパラメータと地盤増幅率

パラメータ		単位	値	根拠
増幅率	モーメント マグニチュード	-	7.1	F-net
	震源深さ	km	12.45	気象庁
	地震タイプ	-	地殻内地震	-
	最大加速度	-	1/1.4	岩盤上の値に変換
	最大速度	-	0.90	藤本・ 翠川 (2006)

⑨ KMMH16 の永久変位

岩田 (2016)は益城町役場（益城町宮園. KiK-net 観測点の KMMH16 から南南西に約 660m の地点）における熊本県自治体震度計ネットワーク記録を用いて、加速度記録を積分して、速度、及び変位波形を求めている．図 4.2.2-13 に岩田 (2016)による益城町役場における変位波形を示す．変位波形より北に約 50cm, 東に約 120cm, 下に約 70cm が数秒の間で大きく動いている．加速度記録を用いた変位量の推定には誤差が含まれていると考えられるが、70 cm の沈降量は国土地理院の InSAR で推定された益城町役場の沈降値に近く、信頼できるものとしている．また、Hisada *et al.* (2017)は KiK-net 観測点の KMMH16 の加速度記録を積分することで、速度、及び変位記録を求めている．図 4.2.2-14 に Hisada *et al.* (2017)による波形を示す．図中の青線が KMMH16 の波形であり、岩田 (2016)が示した益城町宮園と位置は異なるが、変位量のオーダーは同程度である．

そこで、ここでは本検討で構築した特性化震源モデル（4.2.1②で構築した背景領域もある表 4.2.1-2 の震源パラメータ）を用いて KMMH16 の変位波形の評価を行い、観測記録との比較を行う．地震動評価手法は理論的手法（波数積分法）のみとし、地盤モデルは表 4.2.2-2a の理論的手法による評価で使ったモデルを用い、すべり速度時間関数は中村・宮武 (2000)を用いた．図 4.2.2-15 に地震動評価結果を示す．上から順番に地表観測変位波形、断層面全体の合成変位波形、全 SMGA の合成変位波形、背景領域の合成変位波形である．地表観測変位波形は本検討で評価している．合成波形には最終変位量を示しており、便宜的に 25 秒以降の平均値を示している．

評価された最終変位量は北に 32cm, 東に 49cm, 下に 34cm となった．これは、岩田 (2016)や Hisada *et al.* (2017)の観測記録から得られる変位の向きと整合しているが、変位量は観測記録の 4 ～ 6 割程度と過小評価となった．過小評価は次のような理由が考えられる．本検討の背景領域のすべり量は一律に 1.17m としているが、実際は KMMH16 の変位波形に大きく寄与すると思われる SMGA2 より浅い領域のすべり量が 1.17m よりも大きかった可能性がある．震源インバージョン結果等を参考に SMGA2 より浅い領域に大きなすべり量を与えることであれば、観測記録の再現性が向上する可能性がある．別の理由として、実際は本検討で仮定した断層面以外からの寄与があった可能性がある．図 4.2.2-16 に本検討で仮定した断層面の地表投影と Shirahama *et al.* (2016)の地表地震断層の調査結果を比較する．KMMH16 直下の F3 セグメントは布田川断層に沿うようにモデル化されているが、それよりも北西側の KMMH16 に近い位置にもう一条の地表地震断層が確認でき、これは木山断層に対応すると考えられる．このことから、木山断層を適切にモデル化することで、KMMH16 に大きな変位量をもたらす可能性もある．

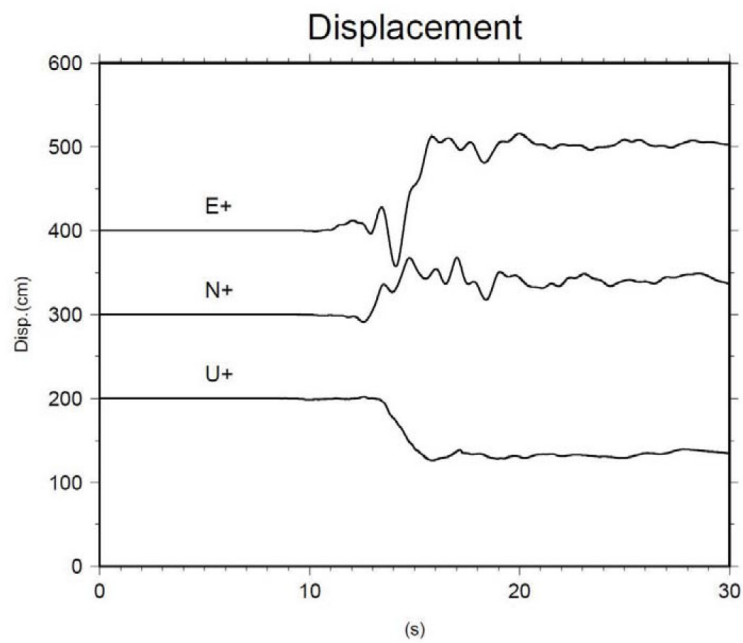


図 4.2.2-13 益城町役場の観測変位波形 (岩田, 2016)

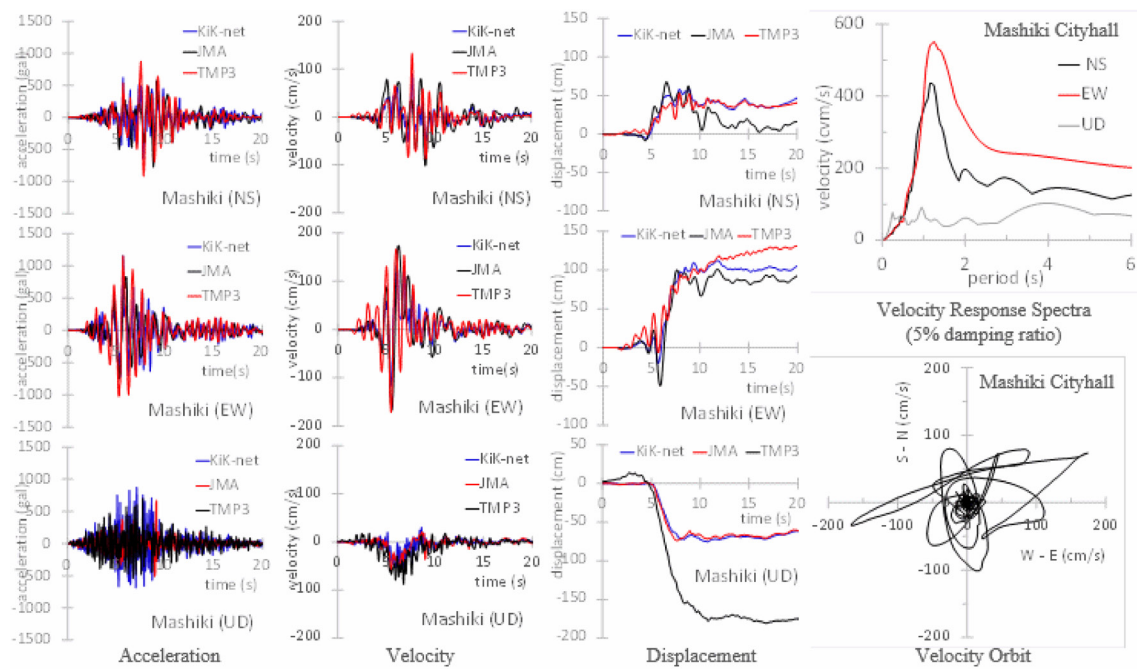


図 4.2.2-14 益城の観測記録 (Hisada *et al.*, 2017). 青色は KMMH16 (KiK-net 益城) の波形を表す.

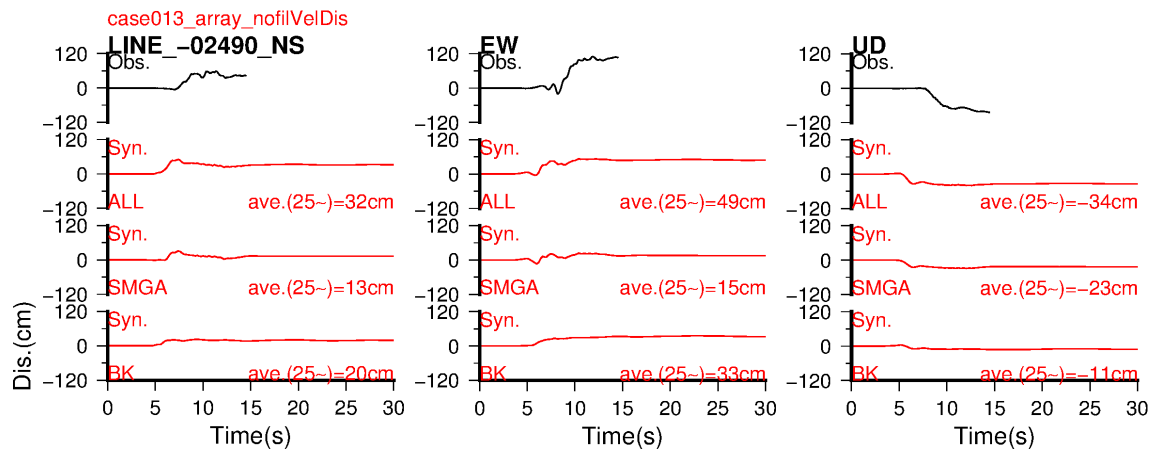


図 4.2.2-15 波数積分法による地震動評価結果 (KMMH16). 黒色は観測, 赤色は合成で, 合成は上から順番に断層面全体, SMGA のみ, 背景領域のみを表す.

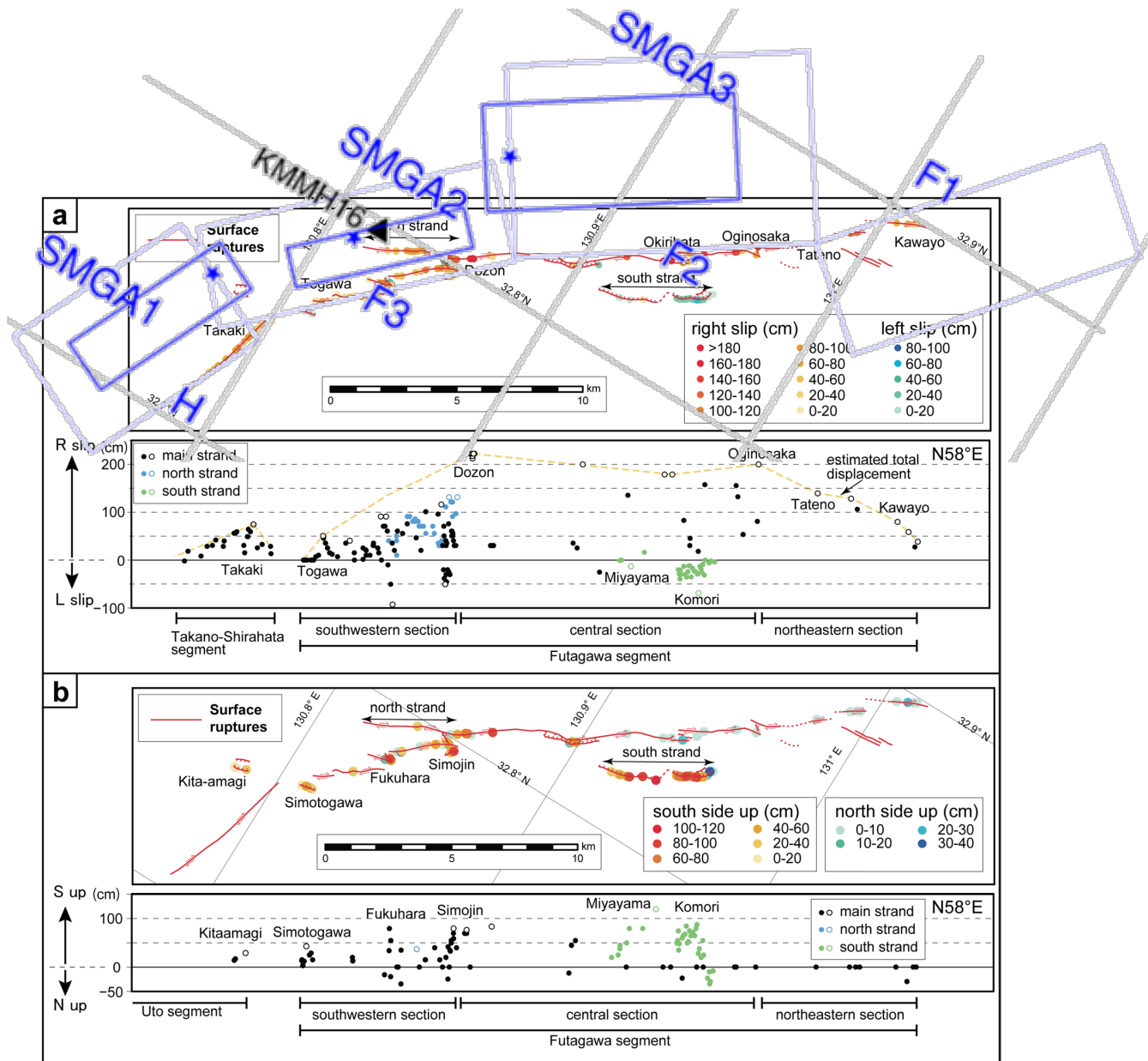


Fig. 6 **a** Distribution of the strike-slip component of surface ruptures (red lines) at measured locations (colored dots with the amount of displacement represented by their shade) along the Futagawa and Hinagu fault zones (top); explanation of surface ruptures in Fig. 1C. Diagram of slip distribution along the fault zone (bottom). Open dots show the representative displacement at each sub-strand. Dashed yellow line shows the estimated total displacement. **b** Distribution of the vertical component of surface ruptures along the Futagawa fault zone

図 4.2.2-16 本検討で仮定した断層面の地表投影（青色の細線は断層面全体，青色の実線は SMGA）と Shirahama *et al.* (2016)による地表地震断層調査結果の比較を示す。Shirahama *et al.* (2016)に加筆した。

⑩ おわりに

ここでは、まず 4.2.1 で構築した特性化震源モデルと、4.1 で検証された地盤モデルを用いて、2016 年熊本地震本震（4 月 16 日 1 時 25 分 $M_{JMA}7.3$ ）を対象にハイブリッド合成手法による地震動シミュレーションを行った。得られたシミュレーション結果の工学的検証のために、CGOF を用いて観測記録と比較検証を行った。その結果、観測記録のスペクトルレベルの再現性は長周期側の方が短周期側よりも高かった。短周期側の観測記録の再現性が芳しくない理由として、震源近傍の観測点で地盤の非線形性の影響が考慮されていないこと、用いた浅部の地盤モデルでは観測に見られる一部の卓越周期の再現性が低いことが挙げられる。その結果、CGOF の値が大きな値となっている。これらのことから、地盤の非線形性の考慮や浅部の地盤モデルが改善できれば、観測記録の再現性は高まり、CGOF も向上することが期待できる。他には、観測記録の水平成分が上下成分に比べて顕著に振幅レベルが小さい、あるいは水平 2 成分間で強い異方性が確認できる観測点がある等、観測記録の詳細な検討も必要と考えられる。

次に、ここで構築した特性化震源モデルを参考に、ハイブリッド合成手法を用いて工学的基盤における面的な地震動シミュレーションを実施した。最大加速度の大きな領域は上端深さが浅い SMGA2 や SMGA3 の上端付近に現われた。最大速度の大きな領域は SMGA2 を挟む北西側と南東側、および SMGA3 付近とその北東の阿蘇側に現われた。SMGA2 を挟む北西側と南東側の領域は断層平行成分が卓越し、これは横ずれ断層で破壊が深部から浅部に伝播する場合の破壊の指向性によるものと考えられる。SMGA3 付近とその北東の阿蘇側の領域は SMGA3 から遠ざかるにつれて断層直交成分が現われ、これは例えば 1995 年兵庫県南部地震で見られたような Forward Directivity 効果に対応するものと考えられる。また、シミュレーション結果は大局的には司・翠川 (1999) の距離減衰式と概ね調和的な結果が得られた。詳細に見ると、最大加速度は断層最短距離が大きくなるにつれて、シミュレーション結果がやや過小評価となっている。この一因として阿蘇側の評価地点は断層最短距離が短い近傍には SMGA が存在しないために、断層最短距離に比べて地震動は小さくなっていることが考えられる。最大速度は司・翠川 (1999) の平均値より若干過大評価となっており、これは本検討で用いた破壊伝播速度 (2.8 km/s) がレシピから期待される値よりやや速いことが要因として考えられる。

最後に、KMMH16 の永久変位の再現性を確認することを目的に、ここで構築した特性化震源モデルを用いて、波数積分法による地震動シミュレーション結果と観測記録との比較を行った。その結果、変位の向きは観測と整合しているが、変位量は観測の 4 ～ 6 割程度で過小評価になった。過小評価となる理由として、本検討でモデル化した断層面の浅部領域のすべり量が小さいこと、あるいは観測には本検討でモデル化をしていない KMMH16 に近い木山断層からの寄与があった可能性が考えられる。これらのことから、本検討でモデル化した断層面の浅部領域に震源インバージョン結果等を参考に、大きなすべり量を与え

ることができれば、あるいは木山断層を適切にモデル化できれば、永久変位の再現性は向上する可能性がある。

⑪ 参考文献

- Boore, D. M. (2010), Orientation-independent, nongeometric-mean measures of seismic intensity from two horizontal components of motion, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100, 1830-1835.
- Dreger, D. S., Beroza, G. C., Day, S. M., Goulet, C. A., Jordan, T. H., Spudich, P. A., and Stewart, J.P. (2015), Validation of the SCEC Broadband Platform V14.3 Simulation Methods Using Pseudospectral Acceleration data, *Seism. Res. Lett.*, 86(1), 39-47.
- 藤本一雄・翠川三郎 (2006), 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅度と地盤の平均 S 波速度の関係, *日本地震工学会論文集*, 6, 11-22.
- Geller, R. J. (1976), Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 66, 1501-1523.
- 後藤浩之・秦 吉弥・吉見雅行・吉田 望, (2016), KiK-net 益城サイトの非線形地盤応答特性, *日本地震学会秋季大会*, S21-P17.
- 久田嘉章 (1997), 成層地盤における正規モード解及びグリーン関数の効率的な計算法, *日本建築学会構造系論文集*, 501, 49-56.
- Hisada, Y., Kaneda, J., Teramoto, A., Murakami, M., Masuzawa, Y., Yanagida, Y., Shindo, T., Suzuki, H., Sakai, S., Mori, K., Nakano, K., Tojo, Y., Kimoto, K., Tanaka, S., and Kobayashi, W. (2017), Strong Ground Motions and Damage Investigation of Buildings near the Surface Faulting of the 2016 Kumamoto Earthquake in Japan, 16 WCEE 2017
- 岩田知孝 (2016), ②地震に関する情報について, 日本学術会議主催公開シンポジウム 熊本地震・三か月報告会,
http://janet-dr.com/11_saigaiji/160716kyushu_houkokukai/20160716pdf/21_ssj.pdf (2017 年 3 月 1 日確認)
- 宮武 隆 (2016), 2016 年熊本地震での益城町の強い断層平行地動について, *日本地震学会秋季大会*, S21-P05.
- 中村洋光・宮武 隆 (2000), 断層近傍強震動シミュレーションのための滑り速度時間関数の近似式, *地震* 2, 53, 1-9.
- Shirahama, Y., Yoshimi, M., Awata, Y., Maruyama, T., Azuma, T., Miyashita, Y., Mori, H., Imanishi, K., Takeda, N., Ochi, T., Otsubo, M., Asahina, D., and Miyakawa, A. (2016), Characteristics of the surface ruptures associated with the 2016 Kumamoto earthquake sequence, central Kyushu, Japan, *Earth, Planets and Space*, 68:191, DOI 10.1186/s40623-016-0559-1.
- 司 宏俊・翠川三郎 (1999), 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, *日本建築学会構造系論文集*, 523, 63-70.