

**「地下構造モデル作成の考え方」に基づいて作成された
関東地方の浅部・深部統合地盤構造モデル説明資料**

平成29年(2017年) 4月27日
地震調査研究推進本部 地震調査委員会

<目次>

1. はじめに	2
2. 地震基盤以深の地殻構造のモデル化	2
3. 初期モデルとして用いる深部地盤構造のモデル化「関連する手順」	3
3-1. 収集した地質情報および各種構造探査データ・既往モデル「手順(1)」	
3-2. 地質層構造と速度構造の対比に用いたデータ「手順(2)」	
3-3. 既往モデルとJ-SHISを用いたモデルの三次元展開「手順(3)」	
3-4. 地震記録によるモデルの調整「手順(4)」	
・ H/V(R/V)スペクトルの比較による深部地盤構造モデルの修正方法	
3-5. 地震動の再現計算による速度構造モデルの検証「手順(5)」	
・ 作成した深部地盤構造モデルについて	
4. 浅部地盤構造のモデル化(地質の三次元的な連続性を重視したモデル化)	13
4-1. ボーリングデータによるモデル化の方法	13
4-1-1. 収集した各種調査データと微地形区分による「山地・丘陵」,「台地・低地」の区分「手順(1)」	
・ 浅部地盤構造モデルを作成するためのデータの収集・整理	
・ 微地形区分による「山地・丘陵」,「台地・低地」の区分	
4-1-2. 柱状図(代表柱状図)を用いた層区分「手順(2)」	
・ 山地・丘陵部、火山地の層区分	
・ 台地・低地部の層区分	
・ 工学的基盤上面の決定	
・ 各メッシュの代表柱状図から層区分して作成した浅部モデル(土質断面)の例	
4-1-3. N値・土質区分と物性値の相関による一次元速度構造モデルの作成「手順(3)」	
・ 浅部地盤の物性値の設定	
・ 山地・丘陵部の物性値の設定	
4-1-4. 速度構造の修正と地質の連続性を重視した三次元化について「手順(5)」	
・ 微動探査データを用いた工学的基盤上面および速度構造の修正	
・ 既往資料における東京湾周辺陸域における沖積層基底面深度の決定	
・ 地質の三次元的な連続性を重視した浅部地盤構造モデルおよびモデル作成手法における特徴	
4-2. 作成した浅部地盤構造モデルについて	30
5. 浅部・深部統合地盤構造モデルの作成	35
5-1. 浅部地盤構造モデルと深部地盤構造モデルの接合と調整「手順(1)」	
5-2. 地震記録・微動観測データによるモデルの調整「手順(2)」	
・ 微動観測の概要	
・ 微動データの解析法について	
・ 地震記録の解析法(R/Vスペクトルの算出)について	
・ 速度構造解析およびジョイントインバージョン	
5-3. 経験的サイト増幅特性による短周期領域の検証・調整「手順(3)」	
・ サイト増幅特性の推定	
5-4. 三次元的な計算手法による地震動の再現と比較「手順(4)」	
・ 差分法による検証について	
6. 強震動予測に用いた地下構造モデル(本検討モデル)の特徴	52
・ 特徴的な境界層の上面深さ分布と断面図	
・ 反射地地震探査測線の解釈結果やブーゲー異常値との比較	
参考文献	59

1. はじめに

地震調査研究推進本部は、地震防災対策の一つとして地震動ハザードを評価するため、「震源断層を特定した地震の強震動予測手法（レシピ¹⁾）」を用いて全国的な地震動予測地図を発表している。

2017年度版の全国地震動予測地図（地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2017a）では、工学的基盤までの地震動をこれまでより正確に計算する事を目的として、浅部・深部統合地盤構造モデルを作成し、関東の活断層を震源断層として特定した地震動予測を行った。そのモデルの作成手順を新たに「レシピ」に加え、地下構造モデル作成の考え方も含めて整理し、「地下構造モデル作成の考え方」（地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2017b）として公表した。

今回、公表した関東地方の浅部・深部統合地盤構造モデルは、この考え方に沿って作成されているが、「地下構造モデル作成の考え方」は、地下構造モデルを始めから作成する場合を想定し、全国のどこでも活用できる作成法を示しているのに対し、公表したモデルは、基本構造として既存のモデルを利用し、新たにデータを加えて地震波速度や層境界の深さの再調整を行い、モデルの再構築をしている。そのため、「地下構造モデル作成の考え方」に示された手順に完全に一致しているわけではない。

本説明資料では、公表したモデルを作成するために用いたデータや具体的な作業手法を説明する。

2. 地震基盤以深の地殻構造のモデル化

浅部・深部統合地盤構造モデルでは、地震基盤以深の地殻構造は「全国1次地下構造モデル（暫定版）」（地震調査研究推進本部地震調査委員会, 2012）を初期モデルとして用いた。本モデルは日本測地系に準ずるが、ここで作成した浅部・深部統合地盤構造モデルは、世界測地系に基づき作成した。

地震基盤上面設定にあたっては、ボーリングや物理探査のデータに加えて、重力異常値の分布パターン（図2-1）と概ね整合するようにした。「全国1次地下構造モデル（暫定版）」は、プレート上面深度として、Sato et al. (2005)や馬場・他 (2006) などを取り込み、既往研究（例えば、領木, 1999; Matsubara et al., 2008）などを比較・参照して設定されている。

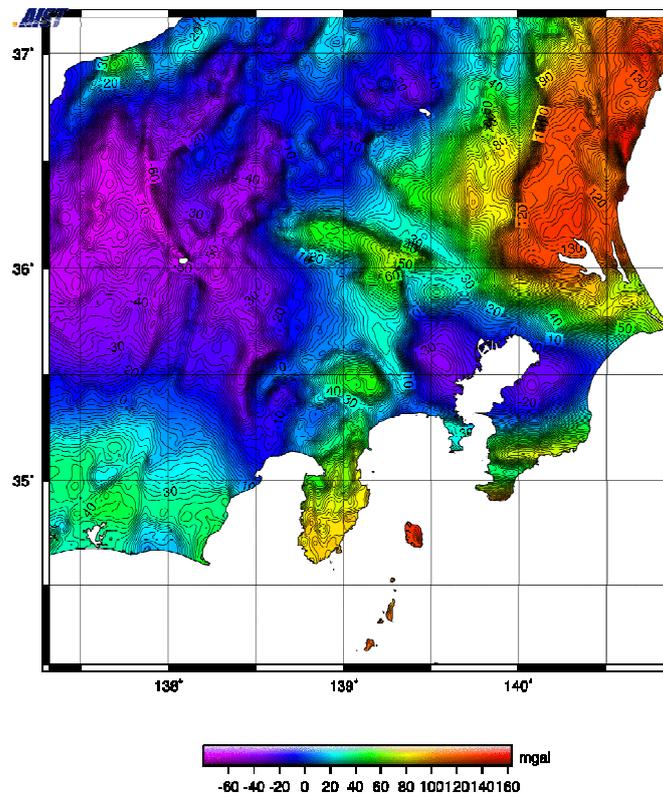


図2-1 産業技術総合研究所による重力図（ブーゲー異常）（仮定密度 2.67 g/cm³）

1 「レシピ」で地下構造モデル作成の手順が公開され、これに基づく広域地盤構造モデルは、J-SHISで公開されている。

3. 初期モデルとして用いる深部地盤構造のモデル化「関連する手順」

今後、広域に展開していく際に、層構造等（速度層）を統一的に扱うため、全国一律に評価・作成された全国地下構造モデルであるJ-SHISモデル（藤原・他, 2009）を基本モデルとし、関東地方の既往の深部地盤構造モデルを整理し、再構築して初期モデルとした。以下、収集したデータ、作成した初期モデルの特徴などを紹介する。

3-1. 収集した地質情報および各種構造探査データ・既往モデル「手順(1)」

関東地方の地質図（図3-1-1）、図3-1-2に示すように、深部地盤構造に関する情報を含む物理探査情報（反射法地震探査・屈折法地震探査・微動アレイ探査等）やボーリングデータ、地質断面等のデータ、既往モデルを収集した。

既往モデルとして、文部科学省における研究委託事業「大都市大震災軽減化特別プロジェクト(H14-18)」によって作成された大大特モデル（三宅・他, 2006）、「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト(H19-23)」による千葉県・茨城県の広域モデル（先名・他, 2013）や千葉県（千葉県, 1999）が県の被害想定のために作成した深部地盤構造モデルを収集した。防災科学技術研究所で作成した北関東（栃木県・群馬県）の地質・土質モデルも用いている。

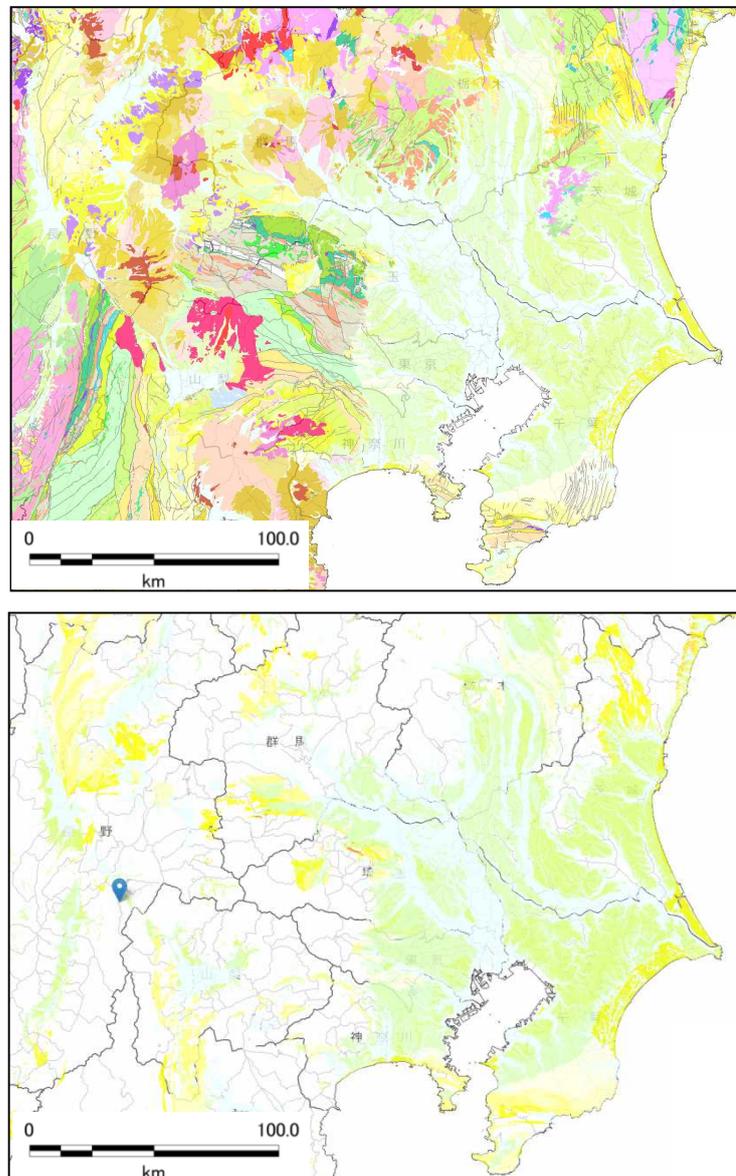


図3-1-1 関東地方の地質図。下の図は、第三紀以新の新しい地層の分布のみを示したもの。
（産業技術総合研究所のシームレス地質図から作成：<https://gbank.gsj.jp/seamless/maps.html>）

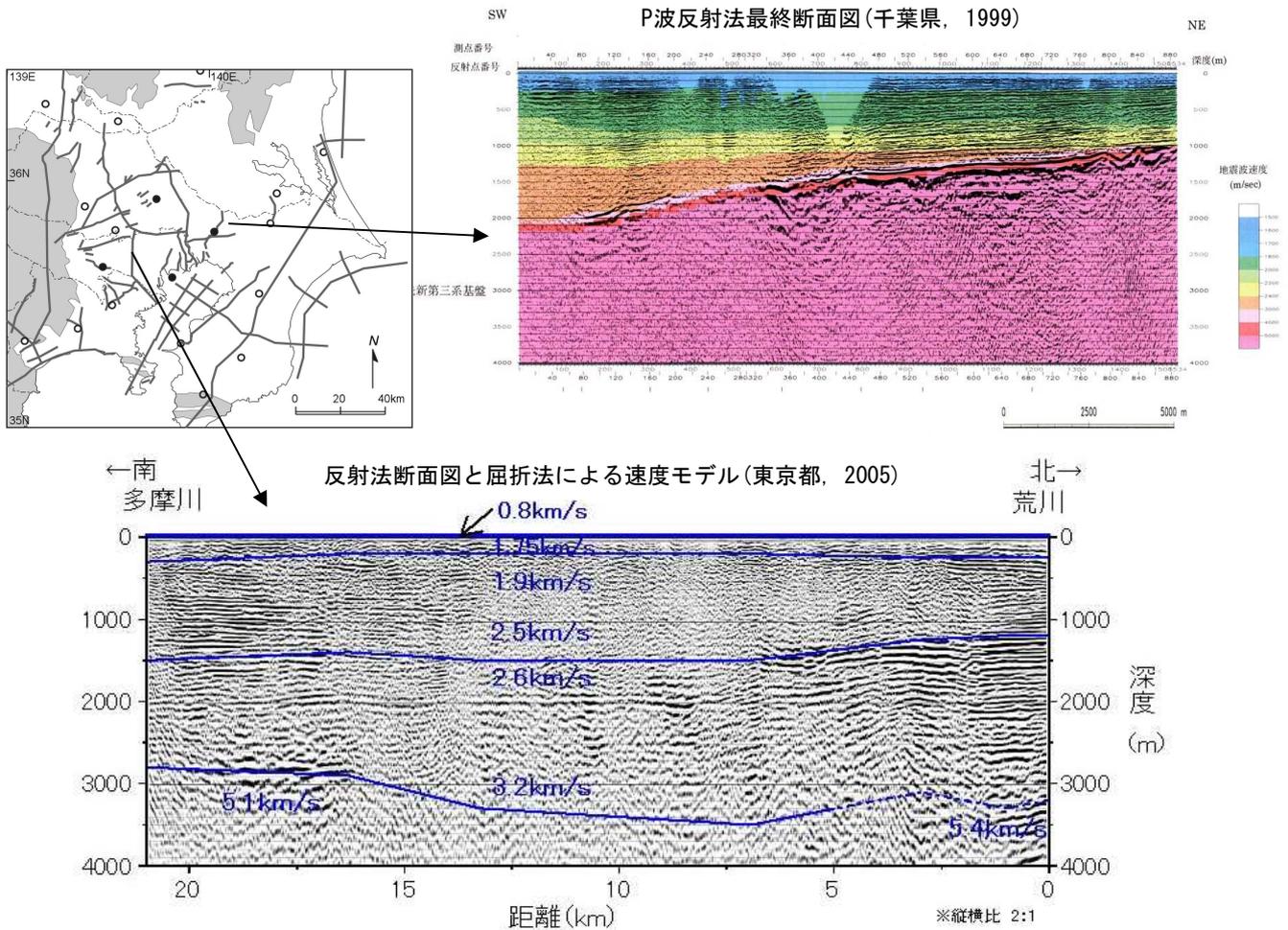


図3-1-2 深部地盤構造に関する情報を含む物理探査情報例

3-2. 地質層構造と速度構造の対比に用いたデータ「手順(2)」

J-SHISモデルの層区分に合わせて、ボーリングデータと地質断面等のデータを用いて地質区分を行い、物性値を設定した(表3-2-1)。J-SHISモデルでは、物性値への対応関係は、Ludwig et al. (1970)の関係図(図3-2-1)を用いている。

地震基盤より上の堆積層に関しては、岩相(岩質)自体の相違(堆積岩類と火山岩類)の影響に加えて、深度増加に伴う弾性波速度の増加傾向が認められるので、この層区分でも、時代が古く堆積盆の深い位置に出現する地層ほど弾性波速度が大きく設定されている。

表3-2-1 層区分と物性値の設定(藤原・他, 2009)

層区分	P波速度 (km/s)	S波速度 (km/s)	密度 (g/cm ³)
第1層	2.0	0.6	1.9
第2層	2.5	1.1	2.15
第3層	3.0	1.4	2.25
第4層	3.5	1.7	2.3
第5、6層	4.0	2.1	2.4
第7層	5.0	2.7	2.5
第8層	5.5	3.1	2.6

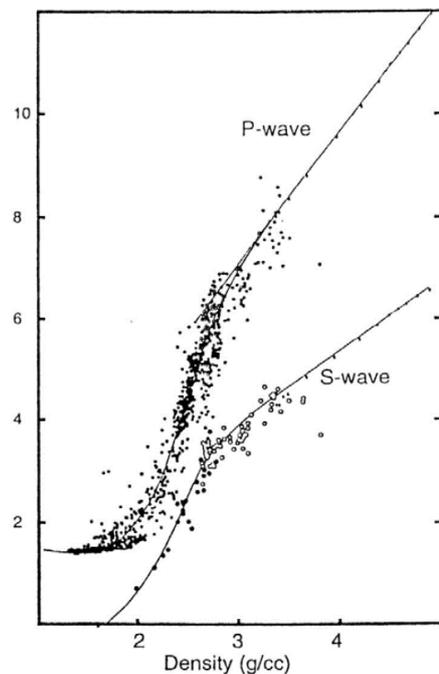


図3-2-1 Ludwig et al. (1970)によるP波速度およびS波速度(km/s)と密度(g/cc)の関係図

微動アレイ探査による暫定解析結果から地盤モデルを作成し、既往の地盤モデルの理論位相速度を比較・検討して、J-SHISモデルに対して新たに7つの速度固定層を挿入した。図3-2-2に千葉県での既往研究からの検討例を示す。

千葉県の深部地盤構造モデルの検討例

J-SHISモデル(2009)に新たな速度層を挿入

No.	Vs(km/s)	Vp(km/s)	Ro		No.	Vs(km/s)	Vp(km/s)	Ro
1	0.50	1.80	1.90		1	0.50	1.80	1.90
2	0.70	1.80	1.90	挿入	*	0.70	1.80	1.90
3	0.90	1.80	2.10		2	0.90	1.80	2.10
4	1.00	2.40	2.10		*	1.00	2.40	2.10
5	1.50	3.00	2.20		3	1.50	3.00	2.20
6	3.00	5.60	2.50		4	2.70~3.30	5.60	2.50

■ J-SHISモデルに存在しない層 (*)

■ 物性値 (Vs) が違う層

図3-2-2 既往の千葉県モデルとJ-SHISモデルの千葉県周辺の物性値を比較して、J-SHISモデルに新たにVs=700m/s層と1000m/s層を挿入して、千葉県地域の深部地盤構造モデルの層区分を作成した例。

3-3. 既往モデルとJ-SHISを用いたモデルの三次元展開「手順(3)」

浅部・深部統合地盤構造モデルの初期モデルとしてVs=350m/sを工学的基盤上面とする深部地盤構造モデルを作成するために、収集した既往の浅部地盤構造モデルを整理し、関東全域（埼玉・東京・神奈川県・千葉・茨城・栃木・群馬県）の統一的な観点による浅部地盤の作成・修正を行った。浅部地盤とJ-SHISモデルとの接続を行い、ボーリングデータでVs=350m/sの上面深度を修正した後、それ以深を微動観測記録および地震記録でチューニングを行い、浅部・深部統合地盤構造モデルとして用いる深部地盤構造モデルの初期モデルとした。

3-4. 地震記録によるモデルの調整「手順(4)」

浅部・深部統合地盤構造モデルでは、作成した三次元速度構造モデルに対し、観測された地震記録の水平上下スペクトル比（H/VもしくはR/Vスペクトル）と速度構造モデルから得られるレイリー波の高次モードまでを考慮した理論H/Vスペクトルの形状の比較によるモデルの調整を試みた。特に、卓越周期ができるだけ一致するように層厚を修正するなどの調整を行った。

地盤構造の推定方法としては、PS検層や反射法探査、微動アレイ観測など、さまざまな方法が用いられている。近年、拡散波動場において地震動水平上下スペクトル比が地震基盤以浅の伝達関数の水平上下比に比例するという理論（Kawase et. al., 2011）も提唱されており、今後の活用が期待されている。

● H/V(R/V)スペクトルの比較による深部地盤構造モデルの修正方法

調整手法と手順は、藤原・他（2009）を参考として以下のように行った。

- ① 中規模の地震について、観測波形の水平動成分の地震波の到来方向の成分と上下動成分のH/V(R/V)スペクトルを求め、観測点位置における地形区分なども考慮しつつ長周期側のピーク周期を読み取る。
- ② 作成した深部地盤構造モデル（初期モデル）を用いて、時松・新井（1998）による3-4-1式に基づきレイリー波の4次モードまでを計算した理論H/Vスペクトルと、観測波形のH/V(R/V)スペクトルを比較し、両者のH/Vスペクトルのピーク周期が異なり、モデルの調整が必要な観測地点を抽出する。

$$\frac{P_{HR}}{P_{VR}} = \frac{\sum_{j=0}^4 (A_{Rj}/k_{Rj})^2 (u/w)_j^2}{\sum_{j=0}^4 (A_{Rj}/k_{Rj})^2} \quad (3-4-1)$$

ここで、

P_H : 水平動成分のパワースペクトル

P_V : 上下動成分のパワースペクトル

k : 波数

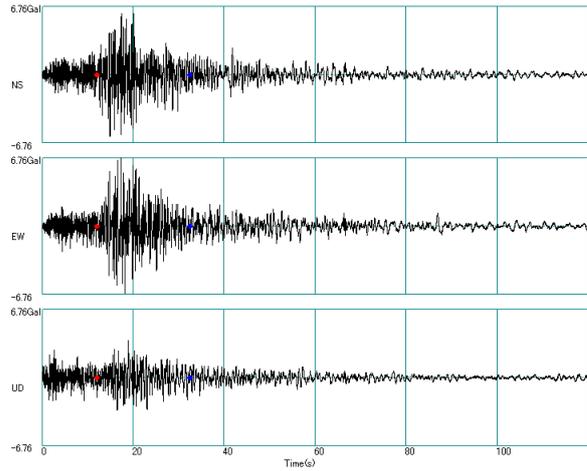
A : ミディアムレスポンス

u/w : レイリー波の地表における粒子軌跡の水平方向・上下方向比
で添え字の R はレイリー波を示している。

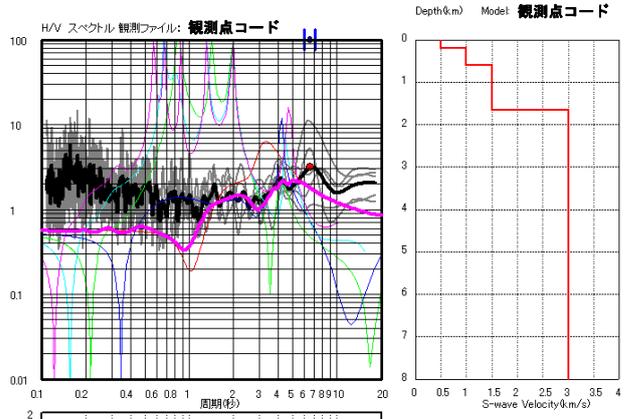
観測波形の H/V(R/V)スペクトルには浅い地盤構造の影響も含まれているため、深部地盤構造モデルの表層部の速度を、各観測地点における速度検層のデータをもとにした速度構造で置き換えて理論 H/V スペクトルを求めた上で、観測波形の H/V(R/V)スペクトルと比較することにより、観測波形に認められる周期 1 秒以下の短周期のピークに対して、どの程度、深部地盤と浅部地盤の速度構造が寄与しているかを判断してモデルを修正する際に参考にする。

- ③ モデル調整が必要な各観測地点について、観測波形の H/V(R/V)スペクトルを説明できるように速度構造の修正を行う (図 3-4-1)。
- ④ 各観測地点での修正結果を用いて、地質構造による補完などにより、周辺地域の調整を行う。
- ⑤ 上記③および④の作業を地域全体について行い、モデルを調整する。

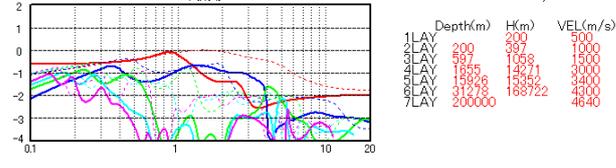
対象観測点における観測記録において S 波初動（右図中の赤丸）から 20 秒（同青丸）以降の 163.84 秒分（但し、該当部分が 40 秒未満の記録は使用せず）について水平 2 成分から合成した地震波の到来方向成分と上下動成分それぞれでフーリエスペクトルを計算し、両者の比を H/V スペクトルとする。



対象観測点において観測された対象地震の全ての観測記録について H/V スペクトルを計算し（右図の左上図中の薄い灰色線）、その平均値（右図の左上図中の太い黒線）を対象観測点の観測 H/V スペクトルとし、そのピーク周期（右図の左上図中の赤丸）を讀取る。



対象観測点における深部地盤モデル（右図の右側）をもとにレーリー波の基本モードから 4 次モードまで計算し、それらを加算した結果が深部モデルから計算される H/V スペクトル（右の左図上段の太いピンク色線）となる。
その長周期側のピーク周期が観測 H/V スペクトルのものと調和的かどうか比較・検討し、深部地盤モデルの修正が必要と判断した場合、深部地盤モデルの構造を修正して再度同様の計算を行い確認する。



【上図の説明】
左側の上図はレーリー波の地表における粒子軌跡の縦横比、下図はレーリー波のメディアムレスポンスを実線で、参考にラブ波のメディアムレスポンスを破線で示している。
なお、各色でモードを示しており、赤が基本モード、青が 1 次、緑が 2 次、水色が 3 次、ピンクが 4 次に対応している。

Depth(m)	H(m)	VEL(m/s)
1LAY	200	500
2LAY	397	1000
3LAY	597	1500
4LAY	1855	3000
5LAY	1858	3400
6LAY	31538	4300
7LAY	200000	4640

図 3-4-1 H/V(R/V) スペクトルの比較による深部地盤構造モデルの修正方法

H/V(R/V)スペクトルの比較によって修正したモデルを、浅部・深部統合地盤構造モデルの深部部分の初期モデル（図3-4-2）とし、新たに 7 層の速度固定層（Vs=350, 500, 700, 1000, 1500, 3200, 3400 m/s）をモデル化するため、J-SHISモデルから改良した初期モデルとして表3-4-1の物性値を与えた。

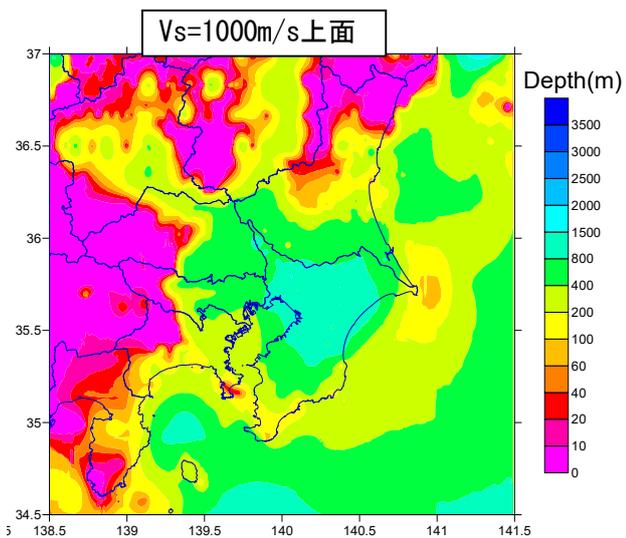
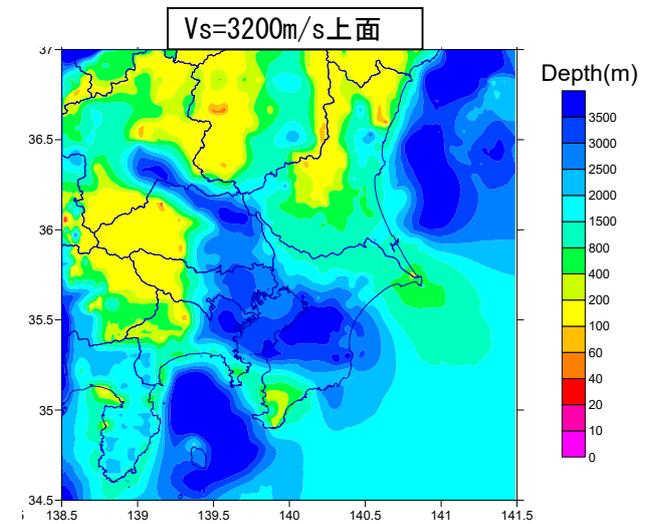
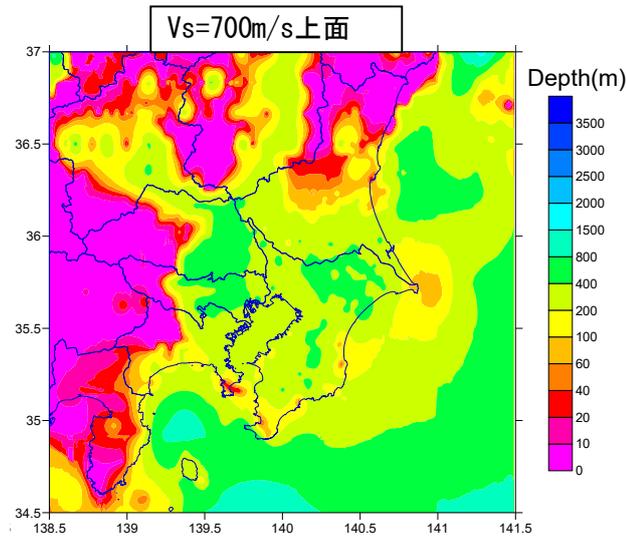
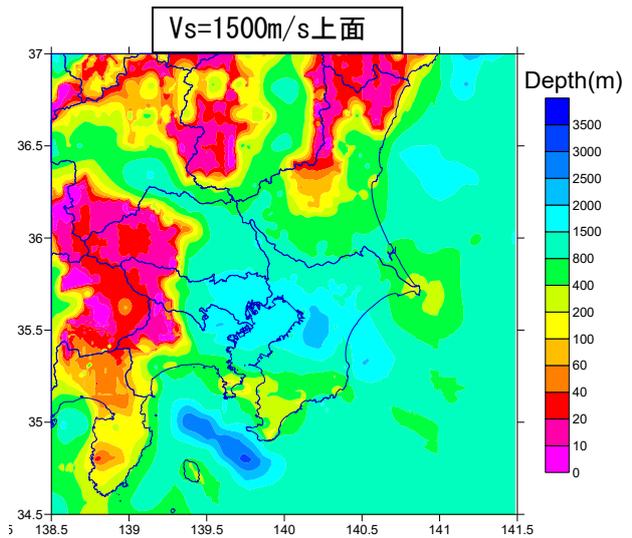
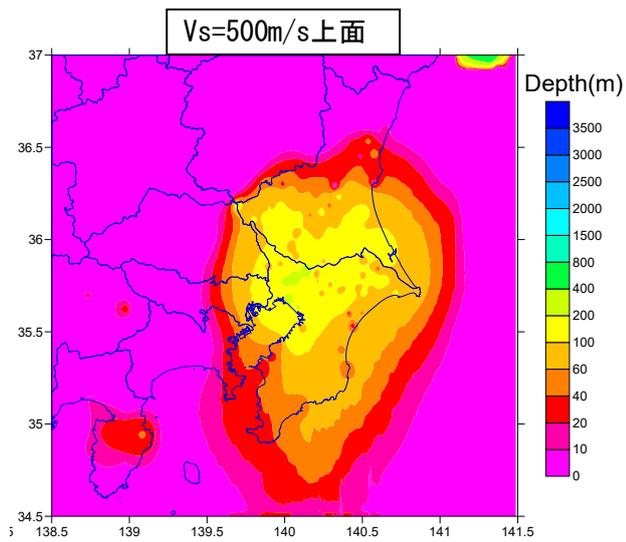


表3-4-1 深部地盤初期設定物性値一覧表

Layer No.	Vs(m/s)	Vp(m/s)	ρ (g/cm ³)
1	350	1600	1.85
2	500	1800	1.90
3	700	2100	2.00
4	1000	2500	2.10
5	1500	3200	2.25
6	3200	5500	2.65
7	3400	5700	2.70

図3-4-2 初期モデルとして使用した深部地盤構造モデル

各速度層（左上から下へ500, 700, 1000m/s、右上から下へ 1500, 3200m/s）の上面深度分布

3-5. 地震動の再現計算による速度構造モデルの検証「手順(5)」

調整したモデルを用いて、差分法による再現計算を行った。計算の対象とした地震は、深さや震央の位置を考慮して選んだ7地震である(表3-5-1、図3-5-1)。これらの地震では、K-NET、KiK-net、および、千葉県と茨城県が設置している震度計により、多くの強震記録が得られている。地震動シミュレーションは表3-5-2の条件で行った。深部地盤構造モデルでは、地震基盤までがモデル化されているため、それよりも深部の構造については、2章で述べたように全国1次地下構造モデル(暫定版)を用いている。また、モデルを修正した効果を調べるために、基本モデルとして与えたJ-SHISの地下構造モデルによる計算結果も示す。

表3-5-1 差分法の計算対象とした地震の一覧

	date	time	latitude	longitude	depth	Mj	Mw	Mo	strike	dip	rake	data		
			° N	° E								km	Nm	NIED
1	1998/8/29	8:46:42	35.633	140.029	64.6	5.3	5.3	9.80E+16	111	64	-27	31	-	-
2	2003/5/12	0:57:06	35.869	140.086	46.9	5.3	5.2	7.07E+16	135	50	-5	56	57	-
3	2003/5/17	23:33:10	35.739	140.651	47.3	5.3	5.3	1.13E+17	193	24	91	60	-	-
4	2004/3/11	11:34:57	36.322	141.008	47.5	5.3	5.3	1.04E+17	5	72	66	50	22	30
5	2004/10/6	23:40:40	35.989	140.090	66.0	5.7	5.7	4.52E+17	360	64	83	65	59	63
6	2005/5/19	10:14:26	35.559	141.082	33.4	5.4	5.3	1.21E+17	301	61	99	52	34	8
7	2007/8/18	16:55:08	35.342	140.345	20.2	5.2	5.1	5.72E+16	236	20	76	57	-	17

表3-5-2 差分法の概要

手法	不連続格子を用いた差分法 (Aoi and Fujiwara, 1999)
格子サイズ	深さ7.5kmまで：70m 深さ7.5kmから100kmまで：210m
Q値の参照周期	1秒
時間間隔	0.05秒
有効周期帯	1秒以上
震源時間関数	Smoothed ramp function (パルス幅1秒)

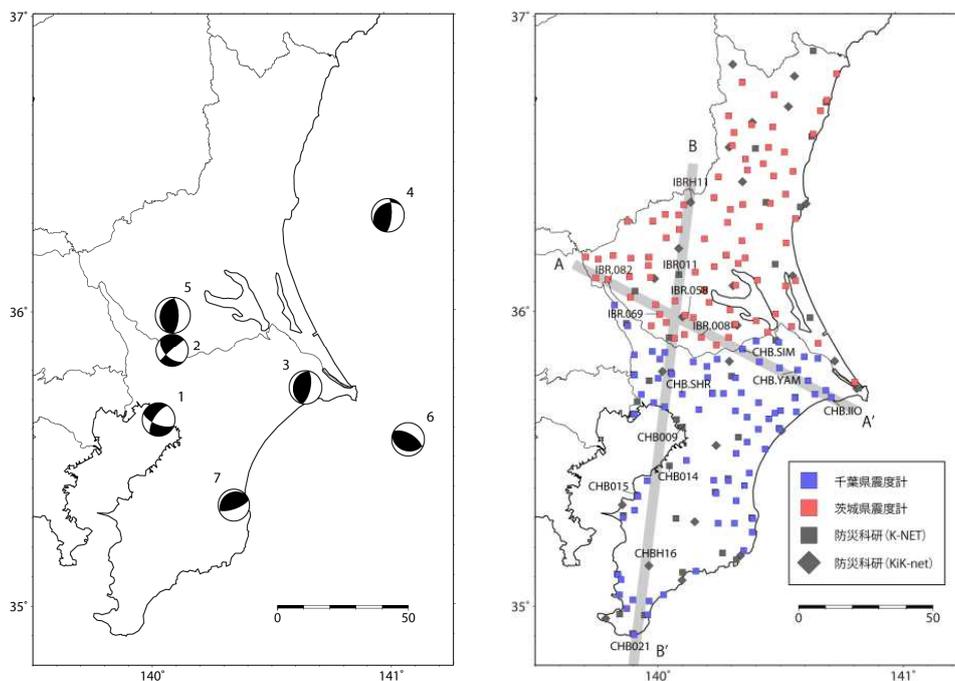


図3-5-1 差分法の計算に用いた地震(左)と、波形計算の対象とした観測点(右)

地震動シミュレーション結果の一例として、2004年10月6日の茨城県南部の地震（深さ66km、M5.7；表3-5-1、図3-5-1の5番目の地震）による結果を図3-5-2に示す。図中の波形は、計算波形および観測記録に0.1~0.5Hzのバンドパスフィルターを施した。計算値は工学的基盤上面（ $V_s=350\text{m/s}$ ）での値となっている。今回の検討により、350m/s層がモデル化された地域において最大速度値が大きくなる傾向がみられた。さらに、図3-5-1（右）に示した2つの測線での速度波形、フーリエスペクトルの比較からは、今回のモデルによって観測記録のピークがより再現されていることが確認できる（図3-5-2a,b）。

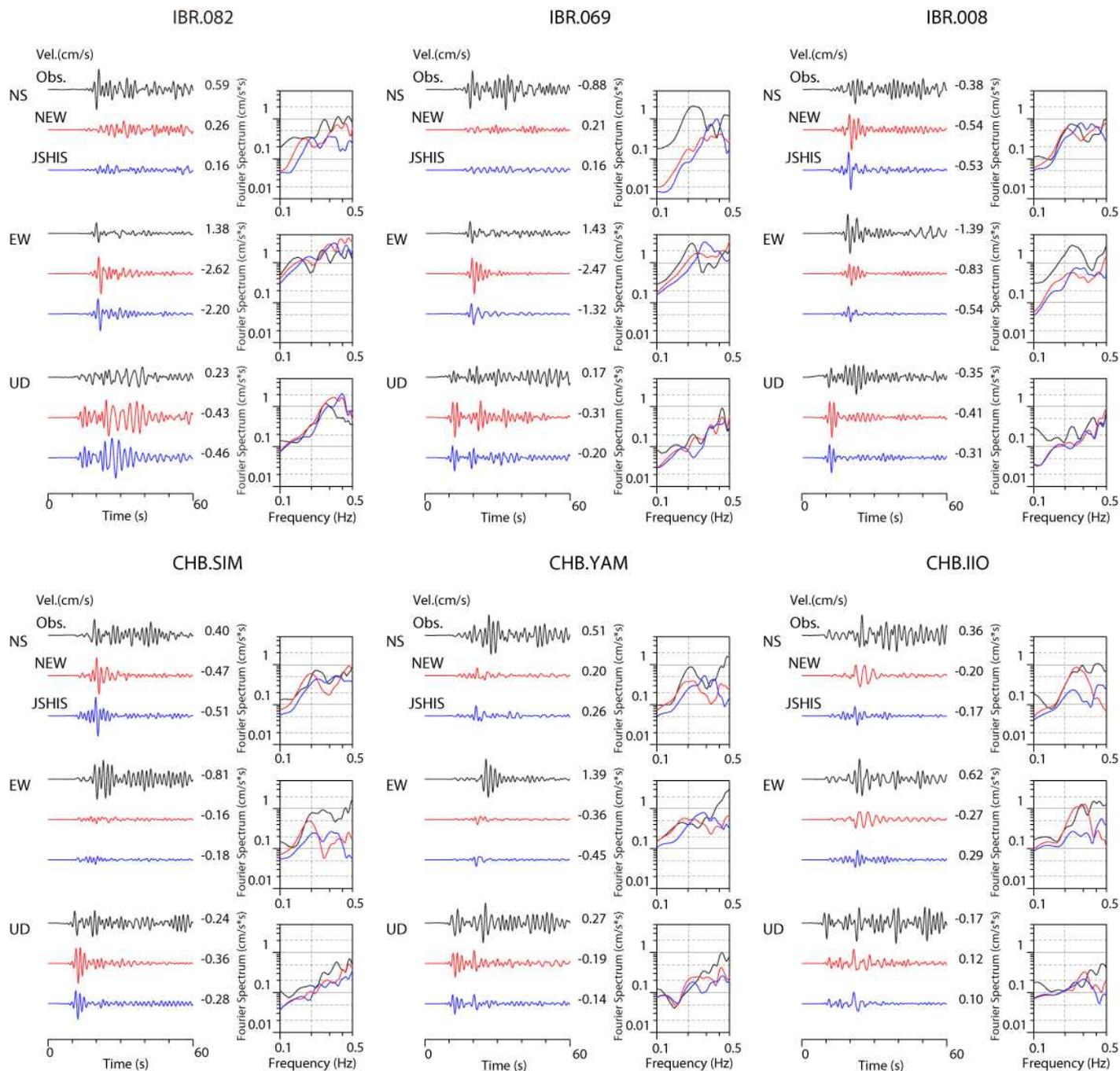


図3-5-2a 図3-5-1（右）の測線A-A'での観測記録（黒線：Obs）と今回のモデルを用いた結果（赤線：NEW）、および、J-SHISモデルを用いた結果（青線：J-SHIS）の速度波形とフーリエスペクトルの比較。波形には0.1~0.5Hzのバンドパスフィルターを施している。スペクトルは0.05HzのParzen windowにより平滑化している。

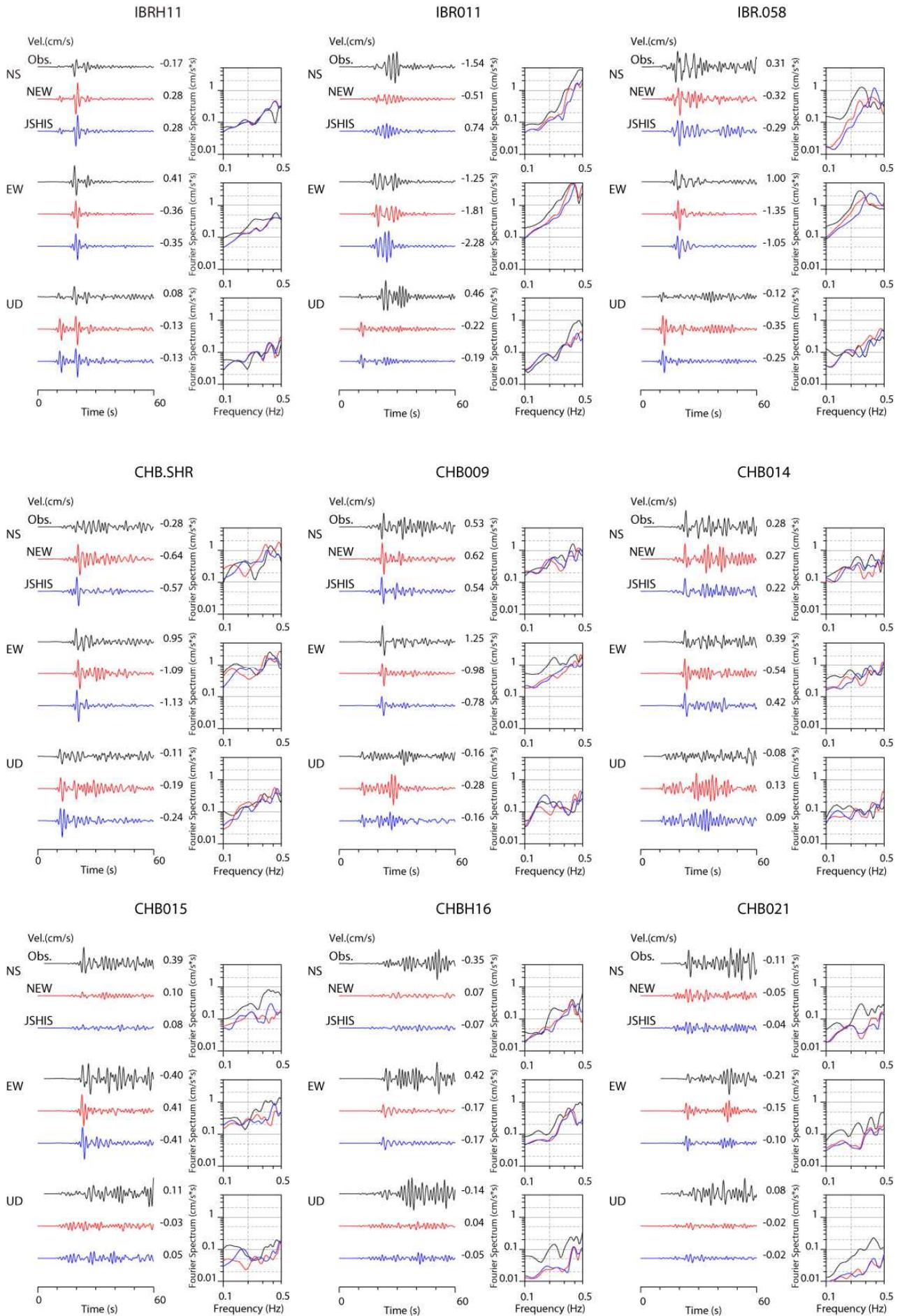


図3-5-2b 図3-5-1 (右) の測線B-B' での比較。

- 作成した深部地盤構造モデルについて
図3-5-3に作成した深部地盤構造モデルの断面図の例を示す。

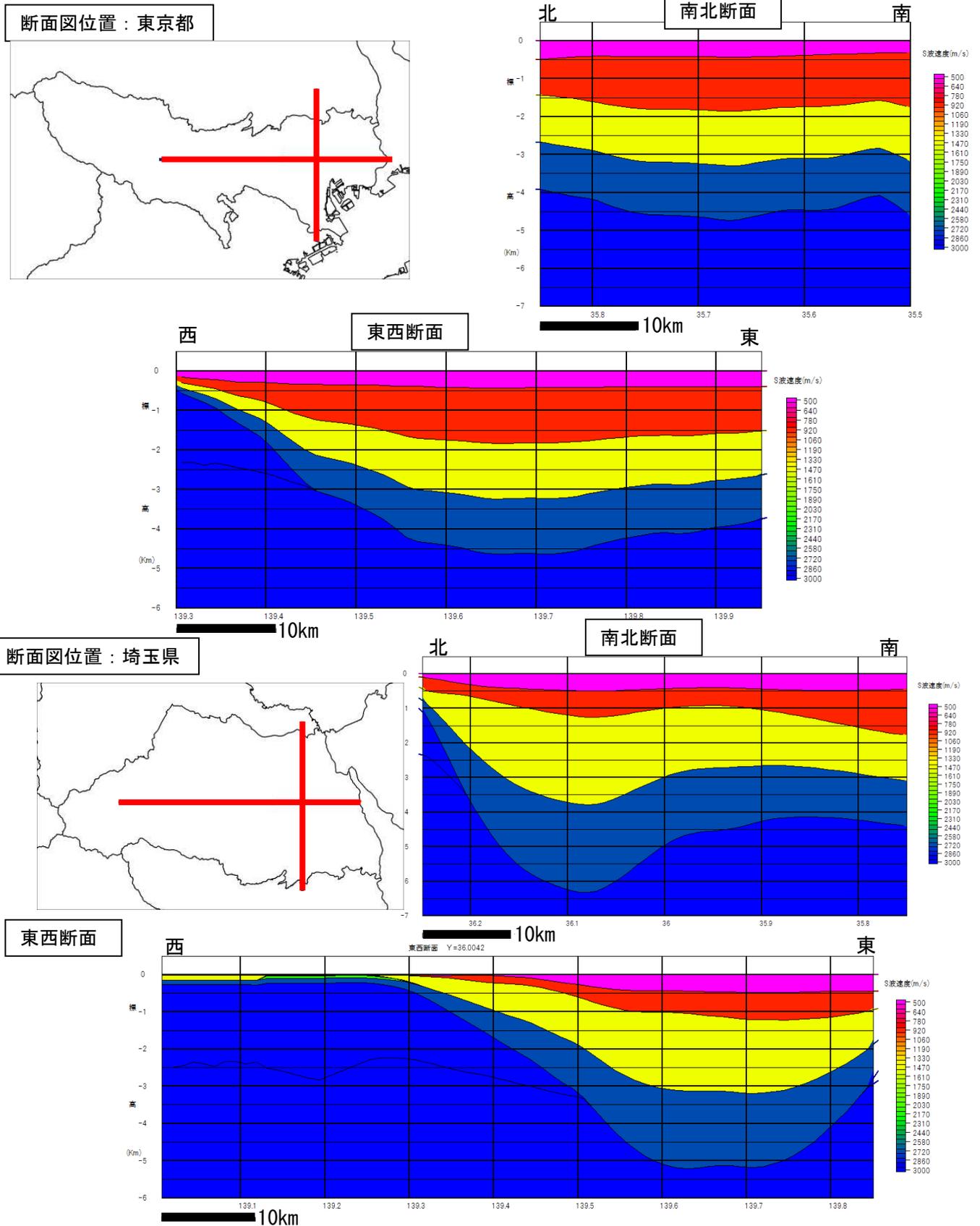


図 3-5-3 関東地方の深部地盤構造モデル (S 波速度) の断面図(測線位置は地図上の赤線)

4. 浅部地盤構造のモデル化（地質の三次元的な連続性を重視したモデル化）

関東地方の浅部・深部統合地盤構造モデルの特徴は、浅部地盤構造モデルを高度化したことにある。まず始めに1都4県（東京都・神奈川県・埼玉県・千葉県・茨城県）で作成された既往の浅部地盤構造モデル（防災科学技術研究所（2011）等の地盤構造モデルおよび自治体で作成された地盤構造モデル）を再整理し、統一的な観点で浅部地盤構造モデルの作成および修正を行った。さらに、関東地域の表層地質データや地盤調査に利用されているボーリングデータを大量に収集して地盤応答計算用の一次元多層速度構造モデルを250mメッシュごとに作成し、メッシュごとの一次元速度構造モデルをスムーズに接続するために地質の連続性を重視したモデル化を行った。また、作成した三次元速度構造モデルに対し、微動観測によるS波速度の決定によるチューニングを行うことで、短周期部分まで地震動の再現性の良いモデルを目指した。

以下、用いたデータ、作成したモデルの特徴などについて紹介する。

4-1. ボーリングデータによるモデル化の方法

4-1-1. 収集した各種調査データと微地形区分による「山地・丘陵」、「台地・低地」の区分「手順(1)」

- 浅部地盤構造モデルを作成するためのデータの収集・整理

メッシュ区分

メッシュ区分方法は、「統計に用いる標準地域メッシュ及び標準地域メッシュコード（昭和48年7月12日行政管理庁告示第143号）の4分の1地域メッシュに準拠しており、緯度方向7.5秒、経度方向11.25秒（約250m四方）である。

ボーリングデータ

関東7都県全体で約28万本のボーリングデータを収集した（図4-1-1）。

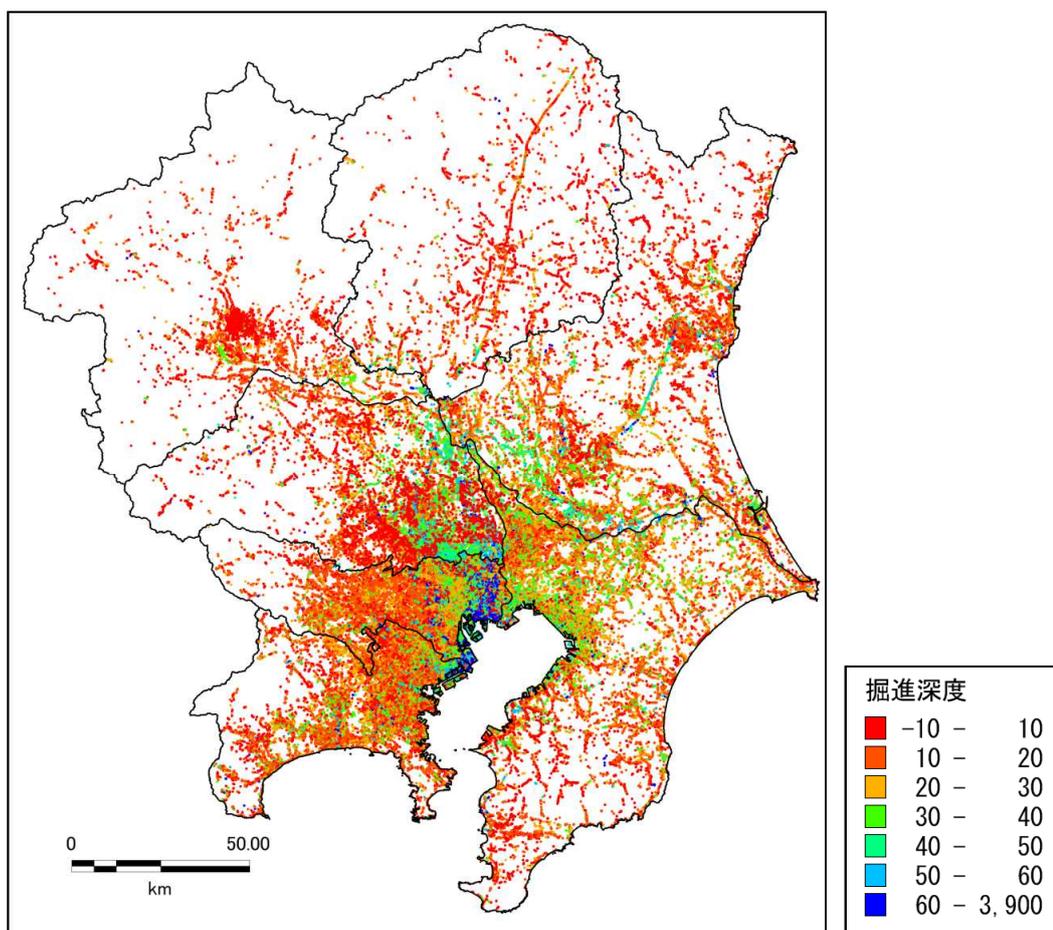


図4-1-1 収集したボーリングの位置図。色の違いは掘進深度（m）を示す（右図は凡例）。

地表標高データ

基盤地図情報の数値標高モデル (DEM) を用いて、作成する地盤構造モデルの 250m メッシュごとに、以下の条件で標高値を設定した (図 4-1-2)。

標高 (5mDEM を基本使用するが、未整備の場合は 10mDEM を使用した)

- 低地：250m メッシュに含まれる 5mDEM の最小値
- 台地：250m メッシュに含まれる 5mDEM 値の最大値
- 山地・丘陵：250m メッシュに含まれる 10mDEM の平均値

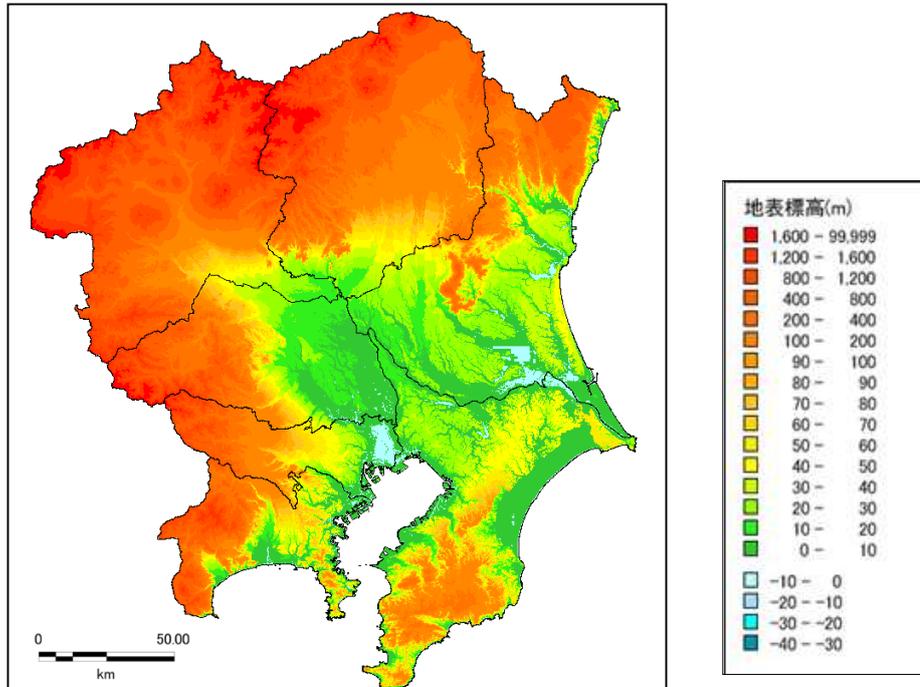


図 4-1-2 地表標高 (250m メッシュ、5mDEM, 10mDEM から作成)

● 微地形区分による「山地・丘陵」、「台地・低地」の区分

微地形区分データは、J-SHIS により公開されている世界測地系に対応した「全国統一基準による地形・地盤分類 250m メッシュマップ」(図 4-1-3, 若松・松岡, 2013)を参考にし、本検討では若松・松岡 (2013) では 6. 火山性台地、23. 河道・水路という区分を、6. 火山性丘陵、23. 河道として区分し、25 番目に海域を追加し、「山地・丘陵」、「台地・低地」にグループ分けした(表 4-1-1)。

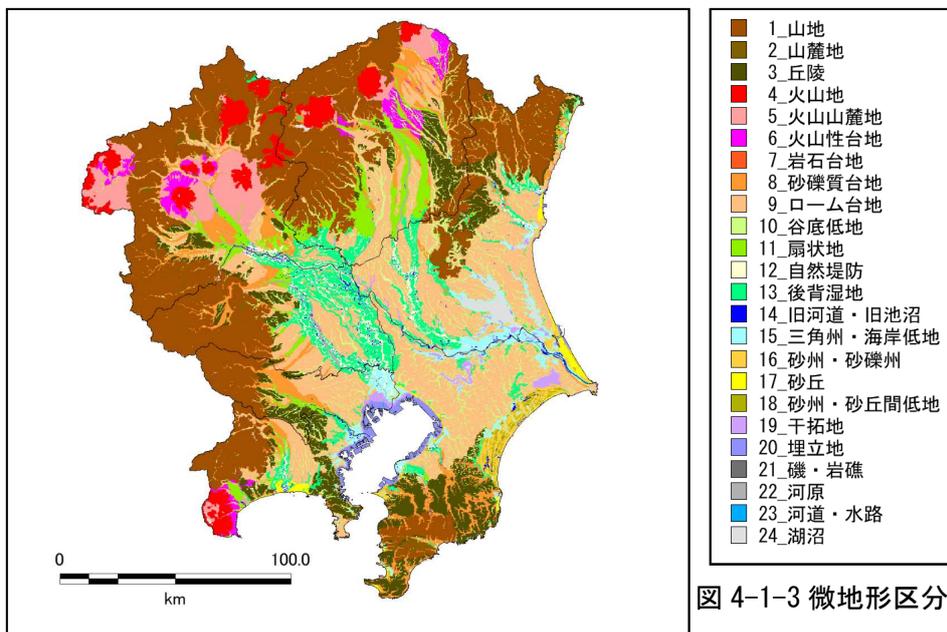


図 4-1-3 微地形区分 (若松・松岡, 2013)

4-1-2. 柱状図（代表柱状図）を用いた層区分「手順(2)」

ボーリングデータを用いた浅部地盤の地質区分作業は、既往文献等に示された当該地域の地質層序に関する考え方を参照して、モデル化の対象地域の地質層序を設定し、柱状図（代表柱状図）を地質で区分する。

データが密にある地域では、細分した地質ごとに、周辺メッシュ内で優勢な土質区分を採用し、各メッシュでの代表柱状図を作成した。N値は周辺メッシュのデータを含めた平均値とした。

ボーリングデータの密度が小さい地域では、データのないメッシュについては、周辺メッシュも含めて地層の連続性を検討して土質分布を推定した。海成粘土層や火山灰層などが存在する場合には、これらを鍵層として横方向の地層の連続性を推定している。N値は周辺のデータのあるメッシュから求めた平均値とした。

一般に、堆積平野の浅部地盤については、海水準変動に伴う層相変化をもとに地層が区分されている。更新統（関東地域では、下総層群ないしその相当層）については、粘性土主体でN値の小さい細粒な層と、砂質・礫質でN値50ないしそれ以上を示す層の鉛直方向の層相変化をもとに地層が区分されている。台地部では、更新統を覆う上位の段丘構成層とローム層が区分されている。海岸部および河川沿いの地域では、更新統ないしそれより古い地層の上位に完新統（≒沖積層）が分布し、基本的には海水準変動に伴う層相変化をもとに地層・層相が区分されている。これらの基本要素を踏まえ、台地・低地部を整理した地質層序表を関東の都道府県毎に整理し、表4-1-2の一覧表にまとめた。参考とした地質層序に関する資料を図4-1-4に示す。

● 山地・丘陵部、火山地の層区分

山地・丘陵部、火山地においては、地域ごとに地形データやボーリングデータを用いて風化部を設定し、その下位を工学的基盤とした（表4-1-2）。

● 台地・低地部の層区分

・ 沖積層

ボーリングデータから沖積基底の深度を読み取り、基底面の分布図（図4-1-5）を作成した。標高による層の連続性を評価するために、整理した250mメッシュの標高値を用いて、ボーリングから読み取った沖積基底面の深度値を標高値に換算した（図4-1-6）。また、微地形区分の山地・丘陵・台地グループについては補間点として250mメッシュの標高値を追加し、沖積層の層厚がゼロになるように調整した（図4-1-6の灰色部分）。これらのデータをもとにボーリングによる沖積層基底面（標高値）と補間ポイントの250mメッシュの標高値を用いて、内挿（自然近傍法）により面補間を行った。

なお、この方法でも、ボーリングデータがない地域、特に台地間に位置する谷底低地などでは、沖積層が示されない、沖積基底面が標高値を上回るなどの不具合が生じるため、沖積層の層厚が5m未満（0mを含む）メッシュについては、層厚を5mとしてモデル化した箇所もある。

・ ローム層

ボーリングデータからローム層下端の深度を読み取り、分布図を作成した（図4-1-7）。ローム層は台地にしか存在しないとしてモデル化を行っている（図4-1-7の灰色の部分は低地・丘陵・山地）。ローム層の上位に盛土などが存在するボーリングデータを除いてローム層の層厚を求めたところ、層厚の中央値は3.6mであった。この値をふまえ、ローム層の厚さが3m未満のメッシュについては、ローム層厚を全て3mに調整した。

表4-1-1 本検討での微地形区分と「山地・丘陵」「台地・低地」の対応

	微地形区分	グループ
1	山地	山地・丘陵
2	山麓地	
3	丘陵	
4	火山地	
5	火山山麓地	
6	火山性丘陵	
7	岩石台地	(台地)
8	砂礫質台地	
9	ローム台地	
10	谷底低地	台地・低地
11	扇状地	
12	自然堤防	
13	後背湿地	
14	旧河道・旧池沼	
15	三角州・海岸低地	
16	砂州・砂礫州	
17	砂丘	
18	砂州・砂丘間低地	
19	干拓地	
20	埋立地	
21	磯・岩礁	
22	河原	
23	河道	
24	湖沼	
25	海域	

表 4-1-2 関東地域の各都道府県の地質層序整理一覧表（神奈川・東京・埼玉）
層序区分の鍵層になる層名を黒色で、その他の層を灰色で記した

関東地域の浅部地盤モデル（地質構造モデル）における地層区分と工学的基盤の設定

おおよその年代	神奈川県地域							東京都地域				埼玉県地域					
	県西部・小田原など		相模川流域・藤沢市付近		多摩丘陵・三浦半島		多摩川低地	層相区分	N値	江戸川・中川流域、谷底低地	谷底低地	武蔵野台地	立川台地	荒川・利根川流域、谷底低地	大宮台地	入間台地	
現在	沖積低地	台地	沖積低地	台地	沖積低地	丘陵	沖積低地	表土・盛土									
	ct-500		ct-500		ct-500		ct-500	埋戻層	4~5以下								
	dt-600		dt-600		dt-600		dt-600	崖堆積層	4~5以下	600：谷地腐植土	600：谷地腐植土			600：谷地腐植土			
	cl-800		cl-800		cl-800		cl-800	沖積層粘土層	4~5以下	600：崖錐	600：崖錐			600：崖錐			
	ss		ss-gvl (N50)		ss		ss	沖積層砂質・礫質	10~30								
	bss-1200		bss-1200		bss-1200		bss-1200	砂丘・浜地堆積層	10~最大100								
	cl-1500		cl-1500		cl-1500		cl-1500	沖積層粘土層	10以下	1000：沖積粘土	1000：沖積粘土			1000：沖積粘土			
										1500：沖積砂層	1500：沖積砂層			1500：沖積砂層			
										1600：沖積砂礫・海浜礫・河川礫	1600：沖積砂礫・海浜礫・河川礫			1600：沖積砂礫		1550：崩積土・扇状地堆積層	
										2000：海成粘土層	2000：海成粘土層			2000：海成粘土層			
1万年前	ss-3000		ss-3000		ss-3000		ss-3000	沖積層砂質土層	10~50以下	2500：沖積層砂層・谷埋め砂層	2500：沖積層砂層・谷埋め砂層			2500：沖積層砂層・谷埋め砂層			
	ss-3500-50		ss-3500-50		ss-3500-50		ss-3500-50	沖積層砂質土層	50以上								
	cl-4000		cl-4000		cl-4000		cl-4000	沖積層海成粘土層	10以下	4000：粘土層・砂層	4000：粘土層・砂層			4000：粘土層・砂層			
	sg-ss-gvl		sg-ss-gvl		ss		ss	沖積層基底礫層	50以上	5000：基底礫	5000：基底礫			5000：基底礫			
2万年前		Lm-10000		Lm-10000		Lm-10000		ローム層	10以下		12000：ローム	12000：ローム		12000：ローム	12000：ローム		
		cl-11000		cl-11000		cl-11000		ローム質粘土層	10以下		13000：ローム質粘土	13000：ローム質粘土		13000：ローム質粘土	13000：ローム質粘土		
				tr-12000				段丘礫層	50以上		15000：武蔵野砂層	15000：武蔵野砂層			15000：武蔵野砂層		
12万年前											16000：武蔵野礫層	16000：武蔵野礫層			16000：武蔵野礫層		
40万年前																	
	R-90000	R-90000			R-90000	R-90000	R-90000	強風化岩盤	50未満								
	R-10000	R-10000			R-10000	R-10000	R-10000	風化~新鮮な岩盤	50以上								

※岩盤：上総層群を含む。

--- 工学的基盤①：Vs350m/s上面

--- 工学的基盤②：Vs500m/s上面

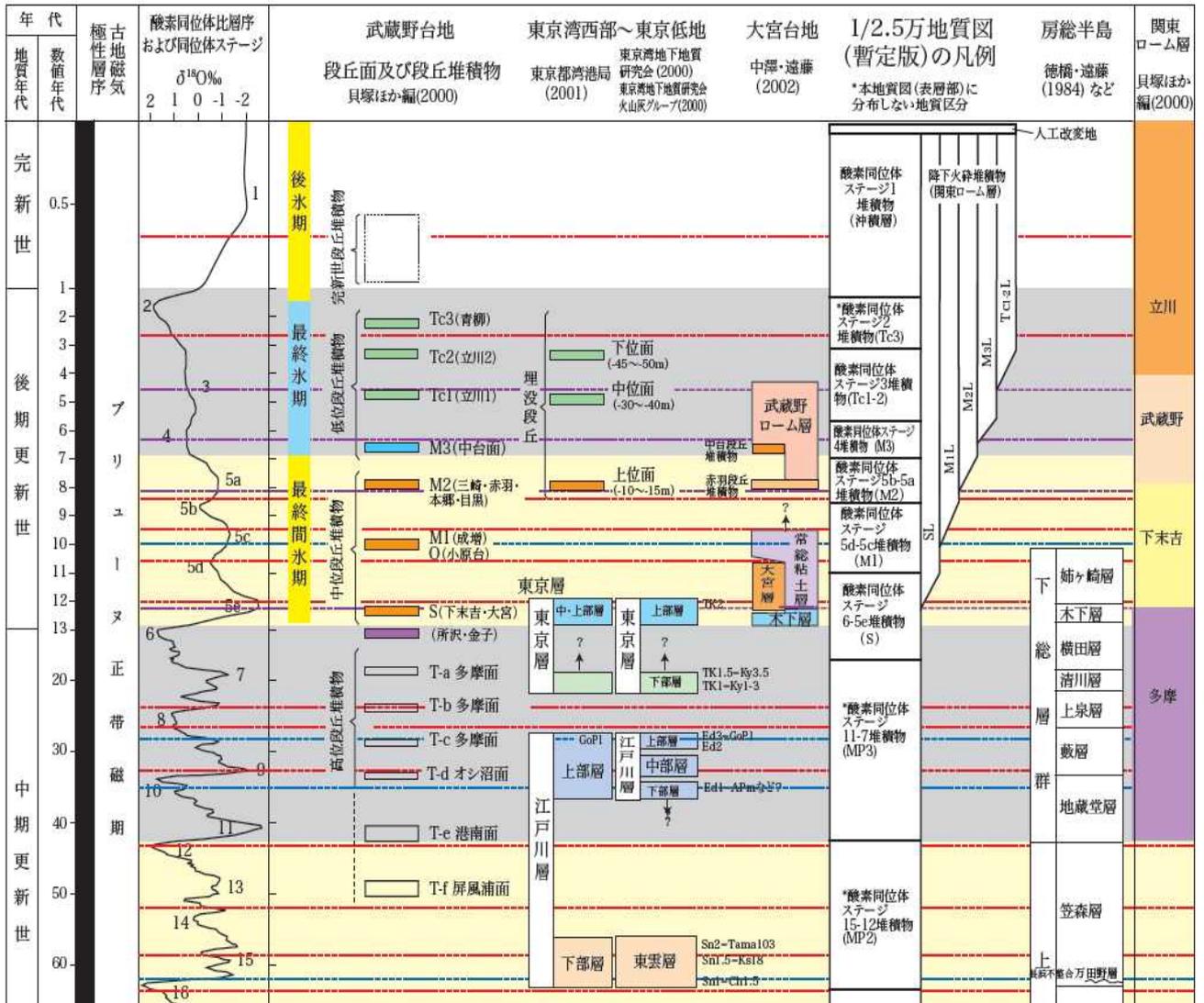


図 4-1-4 浅部地盤の地質区分作業において参照した地質層序 (尾崎・木村, 2009)

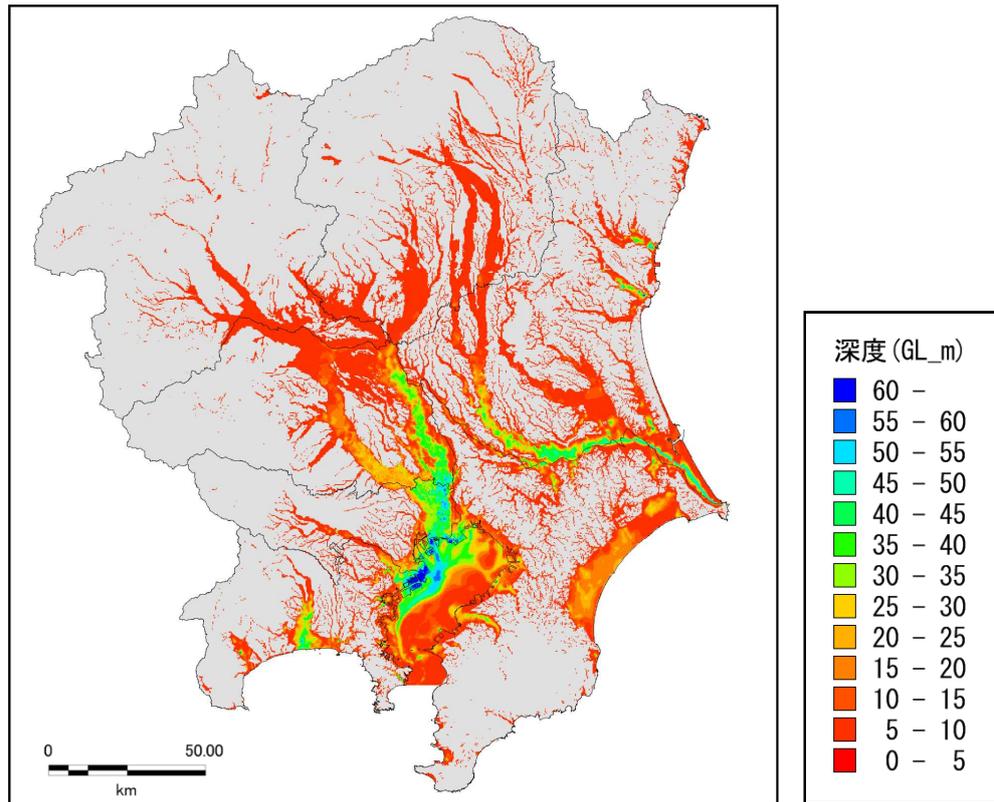


図 4-1-5 関東地域の沖積層基底面深度分布(台地・丘陵・山地は灰色で示している)

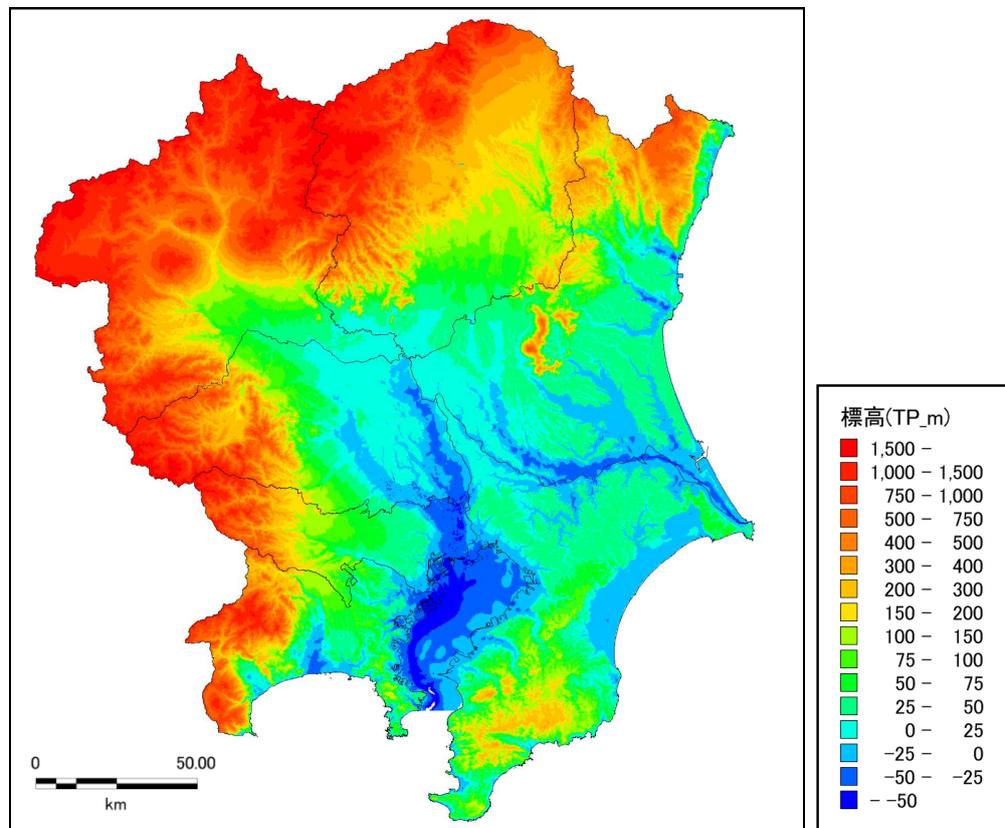


図 4-1-6 関東地域の沖積層基底面標高

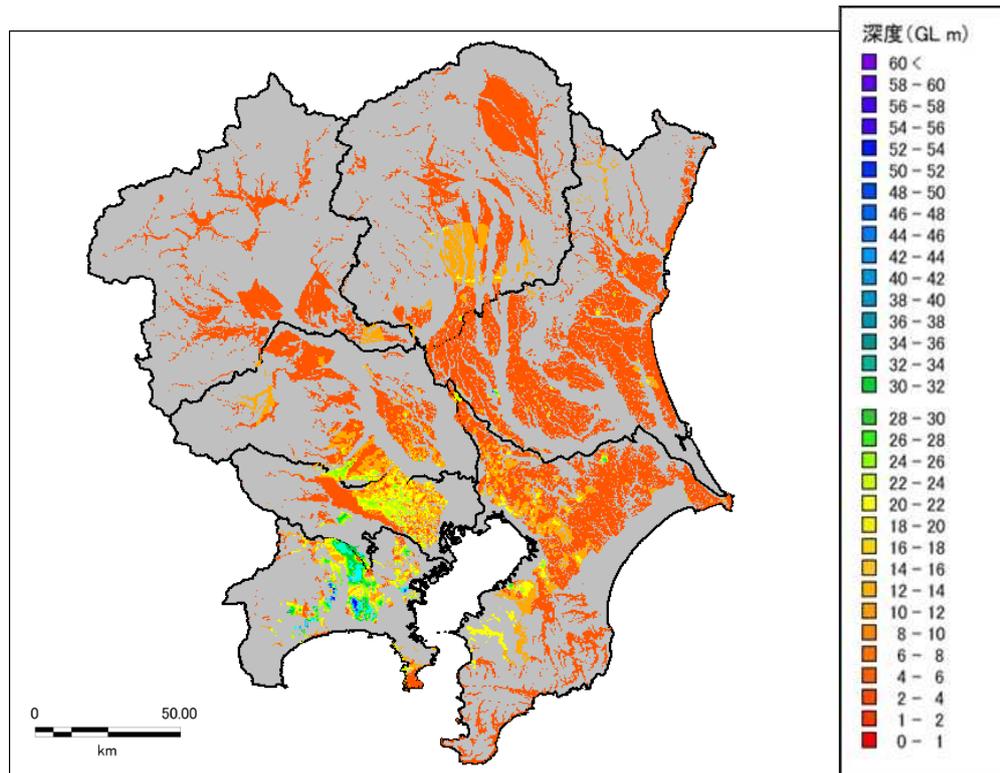


図 4-1-7 ローム層の基底面深度分布 (海域を除く低地と丘陵・山地を灰色で示している)

● 工学的基盤上面の決定

ボーリングデータから工学的基盤上面 (S波速度 350m/s 相当と想定) を判定し、その上面の深度分布を作成した (図 4-1-8)。

前述のように、山地・丘陵の工学的基盤面については、地域区分ごとに設定した風化層の下層を工学的基盤面としている。整理したボーリングによる工学的基盤上面深度と、山地・丘陵の風化層下端を補間ポイントとして、自然近傍法により工学的基盤上面の面データを作成した。沖積基底面と同様に、標高値により層の連続性を追跡するために 250m メッシュの標高値を使用し、工学的基盤上面の深度を標高に換算して補間を行った。

ボーリングデータがない地域、山間部の谷底低地については、工学的基盤面が地表標高を超えるなどの不具合が発生するため、工学的基盤上面深度が 5m 未満のメッシュについては、深度 5m に調整した。

また、台地・低地と山地・丘陵の境界では層境界に段差が生じる場合がある。これを解消するために、山地・丘陵部を囲うようにバッファ (範囲約 1km、250m メッシュ 4 個分) を設け、両端を補間により結合した。なお、山間部の谷底低地などの谷幅が 2km 未満の区域については、今回の処理は対象外とした。

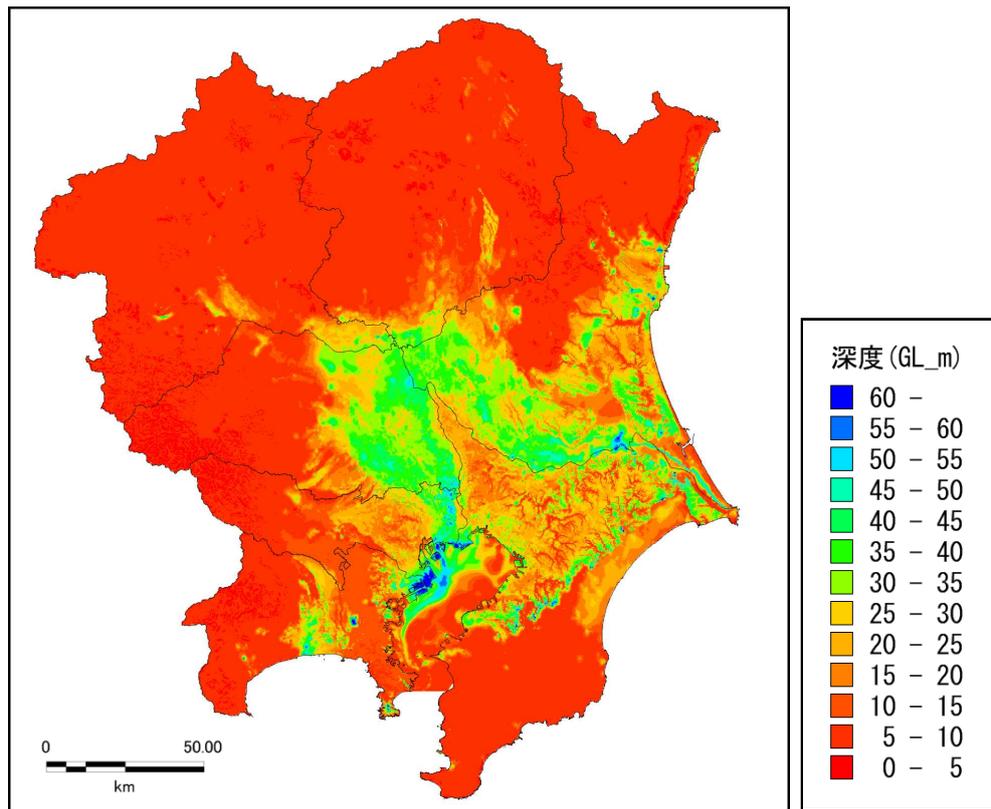


図 4-1-8 工学的基盤上面の深度分布

- 各メッシュの代表柱状図から層区分して作成した浅部モデル（土質断面）の例（図 4-1-9）

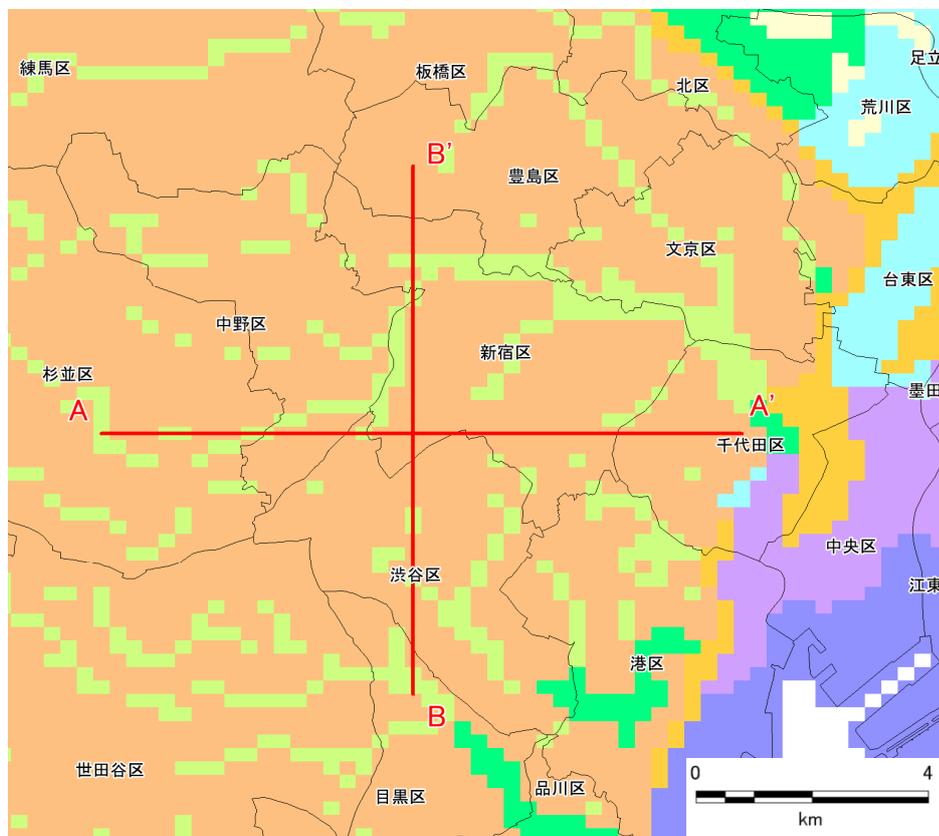


図4-1-9a 作成した断面の位置（東京都庁付近）

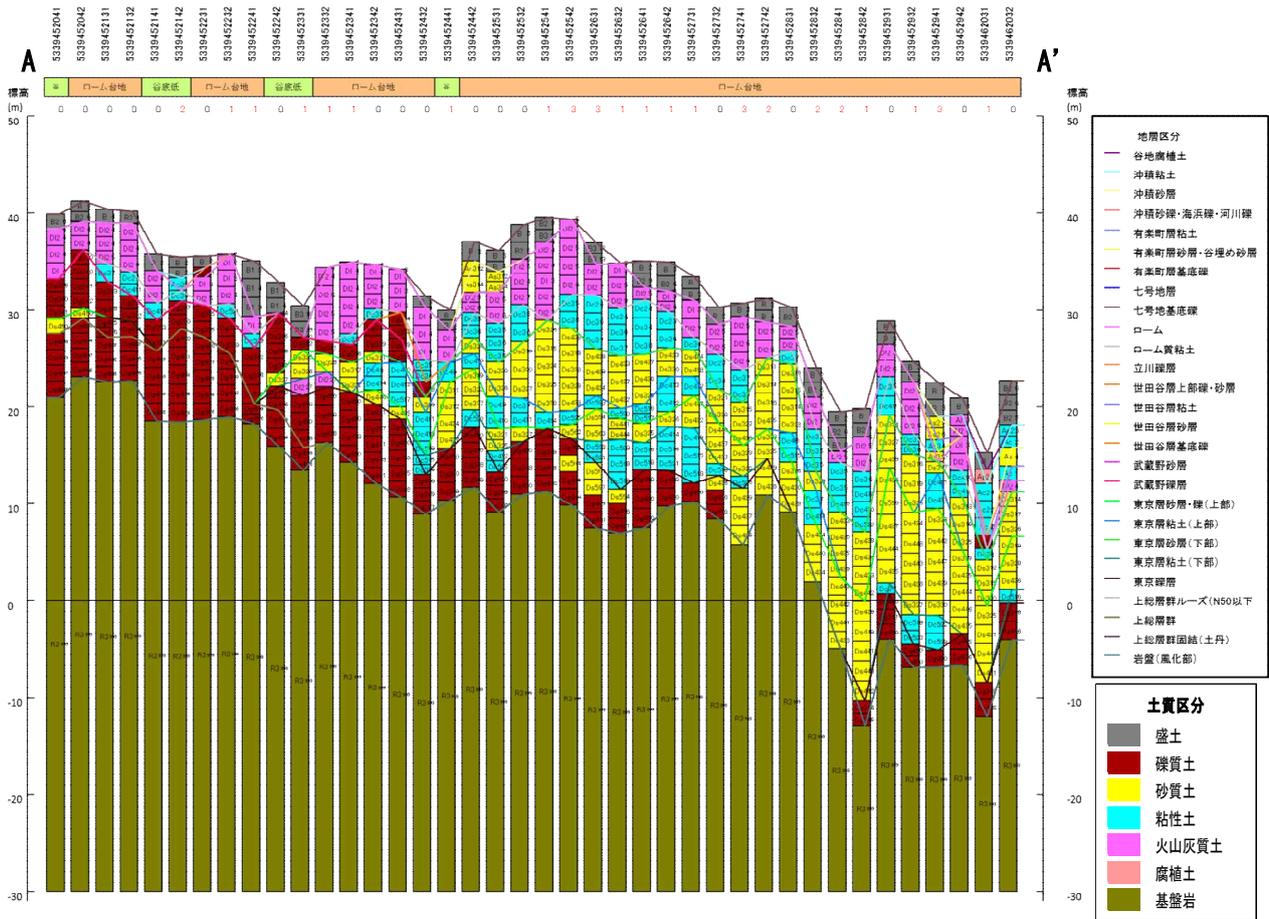


図 4-1-9b 浅部モデルの断面の例（東京都・東西方向・土質断面）。右図に、地層区分面と土質区分の凡例を示す。

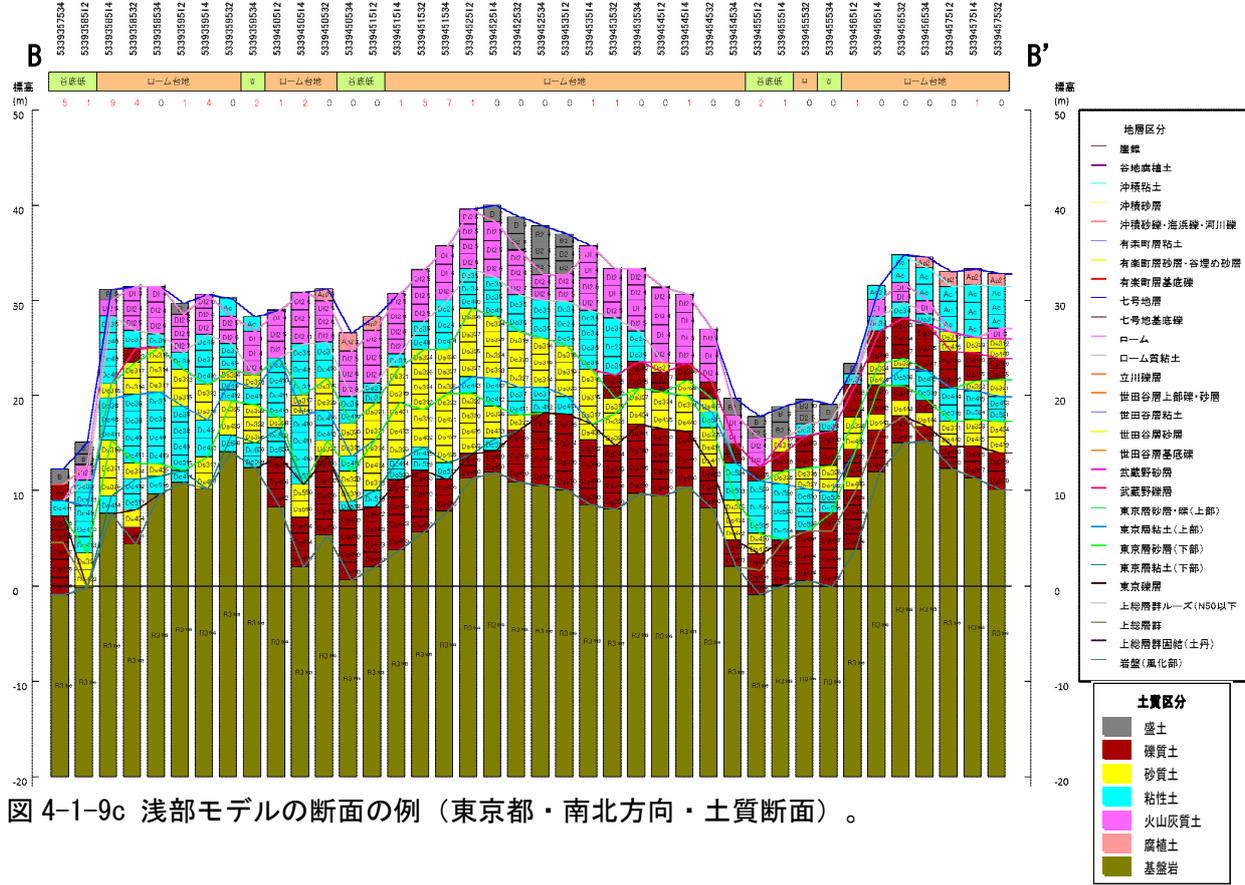


図 4-1-9c 浅部モデルの断面の例（東京都・南北方向・土質断面）。

4-1-3. N値・土質区分と物性値の相関による一次元速度構造モデルの作成「手順(3)」

● 浅部地盤の物性値の設定

浅部地盤構造モデルにおける物性値として、関東地域の浅部地盤構造モデル作成に用いたボーリングデータをもとにN値とS波速度との関係式(回帰式)を作成し、N値を弾性波速度値に変換することにより速度構造モデルに変換した。

物性値の設定に用いた資料を以下の図表に示す。

- ・土質区分ごとのN値を用いたS波速度の設定：表4-1-3、図4-1-10、図4-1-11
- ・上載圧(深さ)を考慮した場合と考慮しない場合の土質ごとのN値とS波速度との関係式に与えたパラメータ：表4-1-4、表4-1-5
- ・P波速度の設定(変換式)：

$$V_p = 5.099 \cdot V_s \quad \text{中央防災会議(2001)}$$

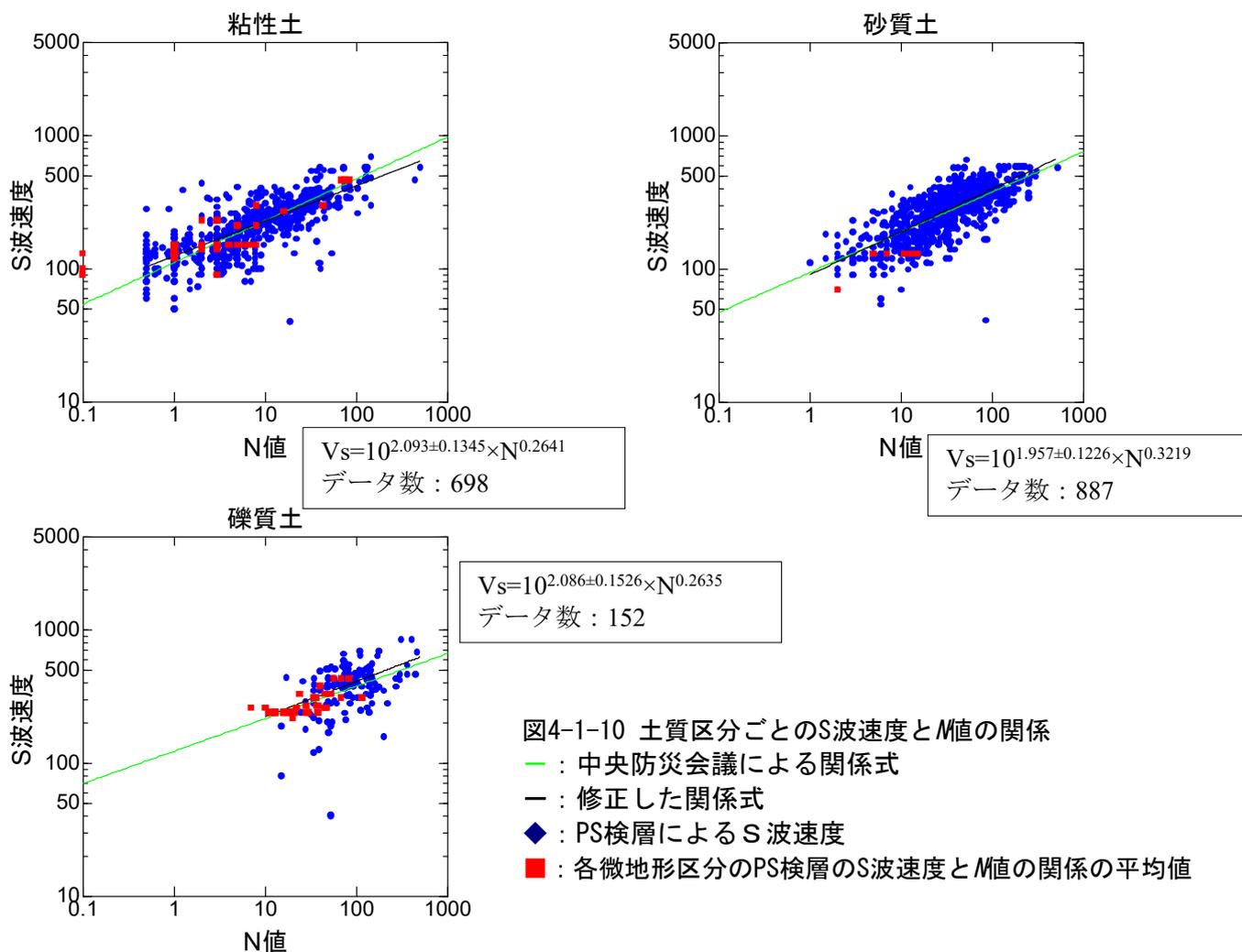
ただし、 V_p : P波速度(m/s)

V_s : S波速度(m/s)

- ・密度の設定：中央防災会議(2001)による土質とN値の区分を参考にし、単位体積重量を求め、密度を設定した(表4-1-6)。
- ・工学的基盤として設定したS波速度：図4-1-12

表4-1-3 S波速度とN値の設定

	本検討データの回帰式	中央防災会議(2006)の回帰式
粘性土(沖積・洪積)	$V_s = 123.8 \cdot N^{0.2641}$	$V_s = 111.3 \cdot N^{0.3144}$
砂質土(沖積・洪積)	$V_s = 90.58 \cdot N^{0.3219}$	$V_s = 94.38 \cdot N^{0.3020}$
礫質土(沖積・洪積)	$V_s = 121.9 \cdot N^{0.2635}$	$V_s = 123.05 \cdot N^{0.2443}$



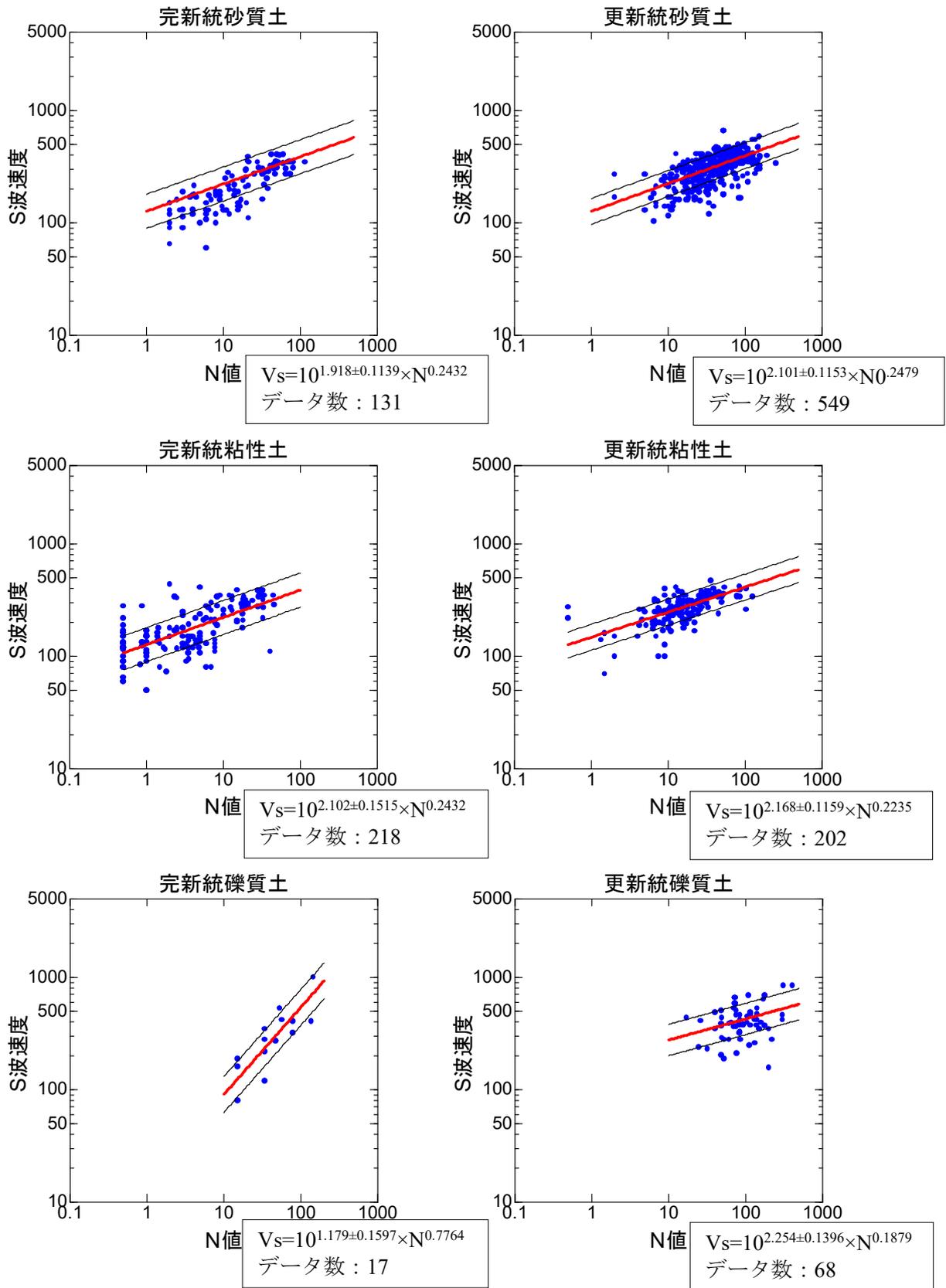


図4-1-11 地質年代も考慮した土質区分ごとのS波速度とM値の関係

明らかに問題のあるデータ S 波速度が大きすぎるものや N 値の小さいものは除外した。

太田・後藤(1976)式を参考に、本検討で使用したデータセットで上載圧を考慮した場合と考慮しない場合の関係式を検討した。表4-1-4と表4-1-5に各関係式から求めた土質に対するパラメータをまとめる。いずれの土質についても、上載圧を考慮した関係式の方が、重相関係数が大きく、特に洪積粘性土において差が大きくなっている。また、剪断弾性係数は拘束圧の0.5乗に比例する。それに関連する係数cは0.15~0.25を選択することが多い。それに比べると設定した値は多少小さめになっている。

a) 上載圧 (深さ) を考慮した土質ごとの M 値と S 波速度との関係式

$$\text{Log}(Vs) = a + b \cdot \text{Log}(N) + c \cdot \text{Log}(h) \pm d$$

Vs : S波速度(m/s), N : N値, h : 地表からの深さ (GL-m), a, b, c, d : 係数

表4-1-4 上載圧 (深さ) を考慮した場合の土質と M 値と S 波速度との関係式に与えたパラメーター

	係数a	係数b	係数c	係数d	重相関係数R	データ数
沖積粘性土	1.943	0.2083	0.1515	0.1626	0.6844	219
沖積砂質土	1.880	0.2039	0.1573	0.1020	0.8535	131
沖積礫質土	1.213	0.6395	0.1637	0.1636	0.8539	18
洪積粘性土	1.978	0.0975	0.2286	0.1012	0.7075	206
洪積砂質土	2.032	0.1843	0.1227	0.1114	0.6272	551
洪積礫質土	2.365	0.0230	0.1465	0.1488	0.3219	69

b) 上載圧 (深さ) を考慮しない土質ごとの M 値と S 波速度との関係式

$$\text{Log}(Vs) = a + b \cdot \text{Log}(N) \pm c$$

Vs : S波速度(m/s), N : N値, a, b, c : 係数

表4-1-5 上載圧 (深さ) を考慮しない場合の土質と M 値と S 波速度との関係式に与えたパラメーター

	係数a	係数b	係数c	重相関係数R	データ数
沖積粘性土	2.102	0.2432	0.1515	0.6687	219
沖積砂質土	1.918	0.3258	0.1139	0.8084	131
沖積礫質土	1.179	0.7764	0.1597	0.8286	18
洪積粘性土	2.168	0.2235	0.1159	0.5786	206
洪積砂質土	2.101	0.2479	0.1153	0.5887	551
洪積礫質土	2.254	0.1879	0.1396	0.3165	69

表 4-1-6 N 値に対応した密度の設定

地質区分	地質名	記号	N 値	単位体積重量 (KN/m ³)
第四紀	埋土	B1	0~4	15.7
		B2	4~10	16.7
		B3	10~	19.6
	腐植土	Ap1	0~1	11.8
		Ap2	1~	12.8
	粘性土	Ac1	0~2	13.7
		Ac2	2~4	14.7
		Ac3	4~8	15.7
		Ac4	8~15	16.7
		Ac5	15~30	17.7
		Ac6	30~	17.7
	砂質土	As1	0~4	16.7
		As2	4~10	17.7
		As3	10~30	18.6
		As4	30~50	18.6
		As5	50~	18.6
	礫質土	Ag1	~20	18.6
		Ag2	20~30	19.6
		Ag3	30~50	19.6
		Ag4	50~	19.6
ローム・凝灰質	Lm1	0~4	13.7	
	Lm2	4~	14.7	
更新世	粘性土	Dc1	0~2	14.7
		Dc2	2~4	15.7
		Dc3	4~8	16.7
		Dc4	8~15	17.7
		Dc5	15~30	17.7
	Dc6	30~	17.7	
	砂質土	Ds1	0~4	17.7
		Ds2	4~10	17.7
		Ds3	10~30	18.6
		Ds4	30~50	18.6
Ds5		50~	19.6	
礫質土	Dg1	~20	18.6	
	Dg2	20~30	19.6	
	Dg3	30~50	19.6	
	Dg4	50~	20.6	
第三紀		K		20.6

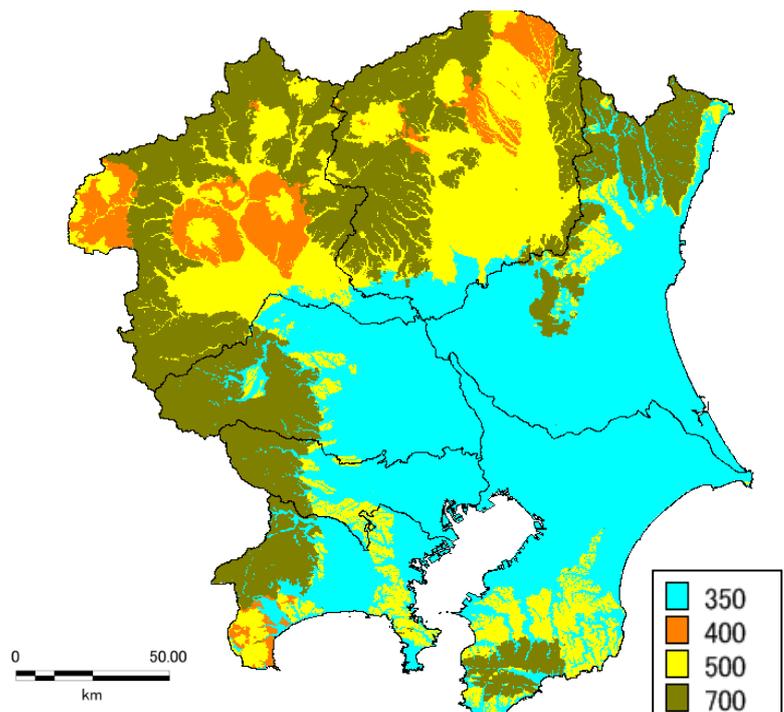


図4-1-12 工学的基盤上面に設定した S 波速度 (m/s)。

右下に、S波速度の凡例を示す。

- 山地・丘陵部の物性値の設定

山地部の設定はボーリングデータと微地形区分による設定に加え、微地形区分で「山地」ないし「丘陵」として一括されている地域の中でも、地盤の構成地質は様々であるため、以下の検討方針により層区分設定を行った。

検討方針)

- ① 山地部、丘陵部を構成する地盤では、地表付近の岩盤の風化、応力解放により、表層部のS波速度が深部に比べて小さくなっている。また、一部では、S波速度の小さい堆積層が表層を覆う。
- ② このような状態は、地質的には被覆層ないし岩盤の「風化部」と「新鮮部」として区分することができる(模式図：図4-1-13)。山地部や丘陵部では、この考え方をもとに、まず既往の地盤データを用いて、図のような層構造を設定した。

層区分 (Vs [m/s])	N 値
被覆層・強風化部 (150~200)	10未満
弱風化部 (200~350)	10以上 50未満
新鮮部 (工学的基盤上面速度)	50以上

- ③ ボーリングデータをもとにして「風化部」の厚さ、S波速度を検討した(図4-1-13)。

図4-1-13 ボーリングデータをもとにした「風化部」の厚さ・S波速度の検討

4-1-4. 速度構造の修正と地質の連続性を重視した三次元化について「手順(5)」

- 微動探査データを用いた工学的基盤上面および速度構造の修正

新たに実施した微動探査(極小アレイ)で得られた浅部地盤の速度構造のデータを用いて初期モデルの工学的基盤上面および速度構造を修正した。使用した微動観測記録に基づくS波速度構造によるAVS30を図4-1-14に、このAVS30から、藤本・翠川(2001)の関係式を用いて求めた最大速度増幅率分布を図4-1-15に示す。図4-1-16は微動探査で得られたS波速度構造断面を周囲のボーリングデータと比較して検討した例である。速度構造モデルの妥当性については、5章で述べるスペクトルインバージョンによる地震基盤からの観測サイト増幅特性を速度構造モデルに対して求めた理論サイト増幅特性と比較して評価している。

- 既往資料における東京湾周辺陸域における沖積層基底面深度の推定

東京湾周辺の浅部地盤構造モデル、およびそれよりも深い地盤構造について検討するため、既往資料を用いて沖積層基底面深度の推定を行った。

<参考にした既往資料等>

- ① 海底地質構造図：基盤(沖積層基底面)の等深線(2.5m 毎)が示されている。
 - ・海上保安庁(1974)：5万分の1 海底地質構造図「東京湾北部」, 第 6363 号 9-S.
 - ・海上保安庁(1973)：5万分の1 海底地質構造図「浦賀水道」, 第 6363 号 1-S.
- ② 音波探査記録と音波探査断面の解釈図
 - ・海上保安庁(1995)：平成7年度 海底地殻構造調査「東京湾」報告書
 - ・岩淵・他(1995)：東京湾北部の三次元マルチチャンネル音波探査
 - ・岩淵・他(1998)：東京湾北部の海底断層調査
- ③ 反射法音波探査記録
 - ・菊池真一・菊地隆男(1991)：マルチチャンネル反射法音波探査記録から見た東京湾底浅層部の地質構造。水路部研究報告, 第27号, 59-95
- ④ その他
 - ・東京都防災会議(1977)：首都圏の活構造と地形区分、一東京直下型地震に関する調査(その4)

・ H15年度大大特：文部科学省「東京湾地殻構造探査：東京湾2003」成果報告書（2004）

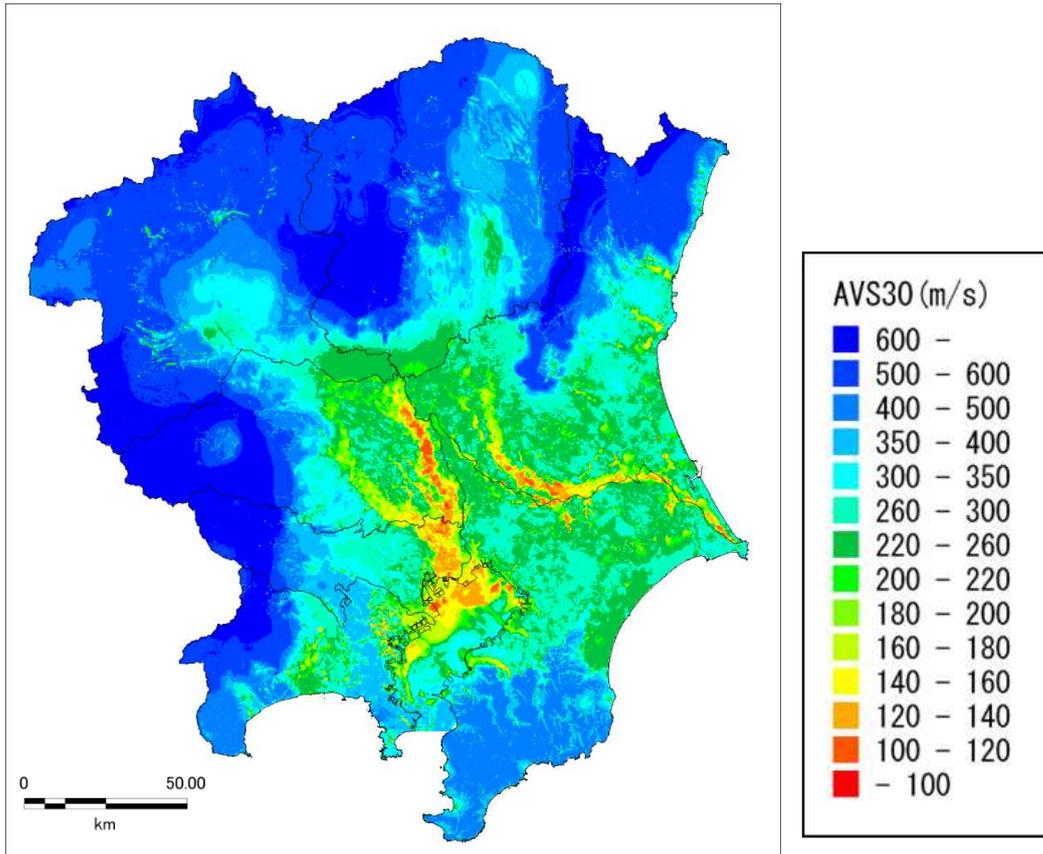


図4-1-14 微動観測記録に基づくS波速度構造によるAVS30（海域・山地部は土質・地質モデルより推定）

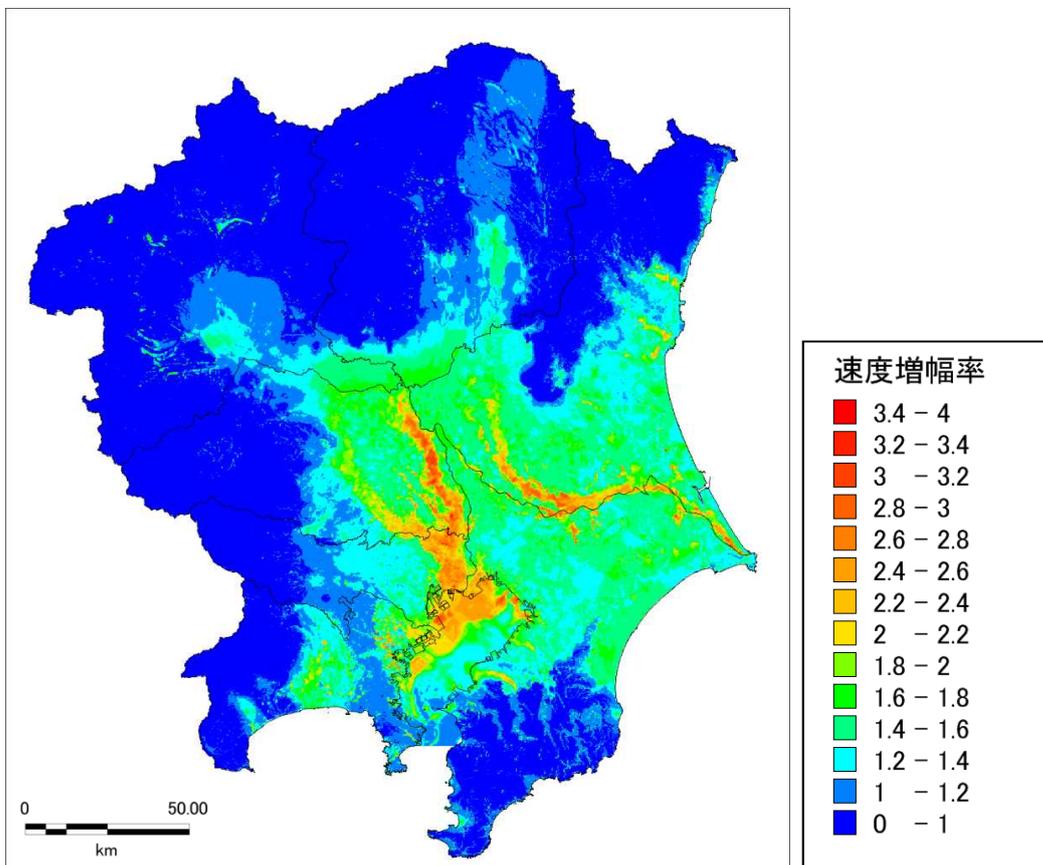


図4-1-15 AVS30(図4-1-14)から藤本・翠川(2001)の関係式を用いて求めた最大速度増幅率

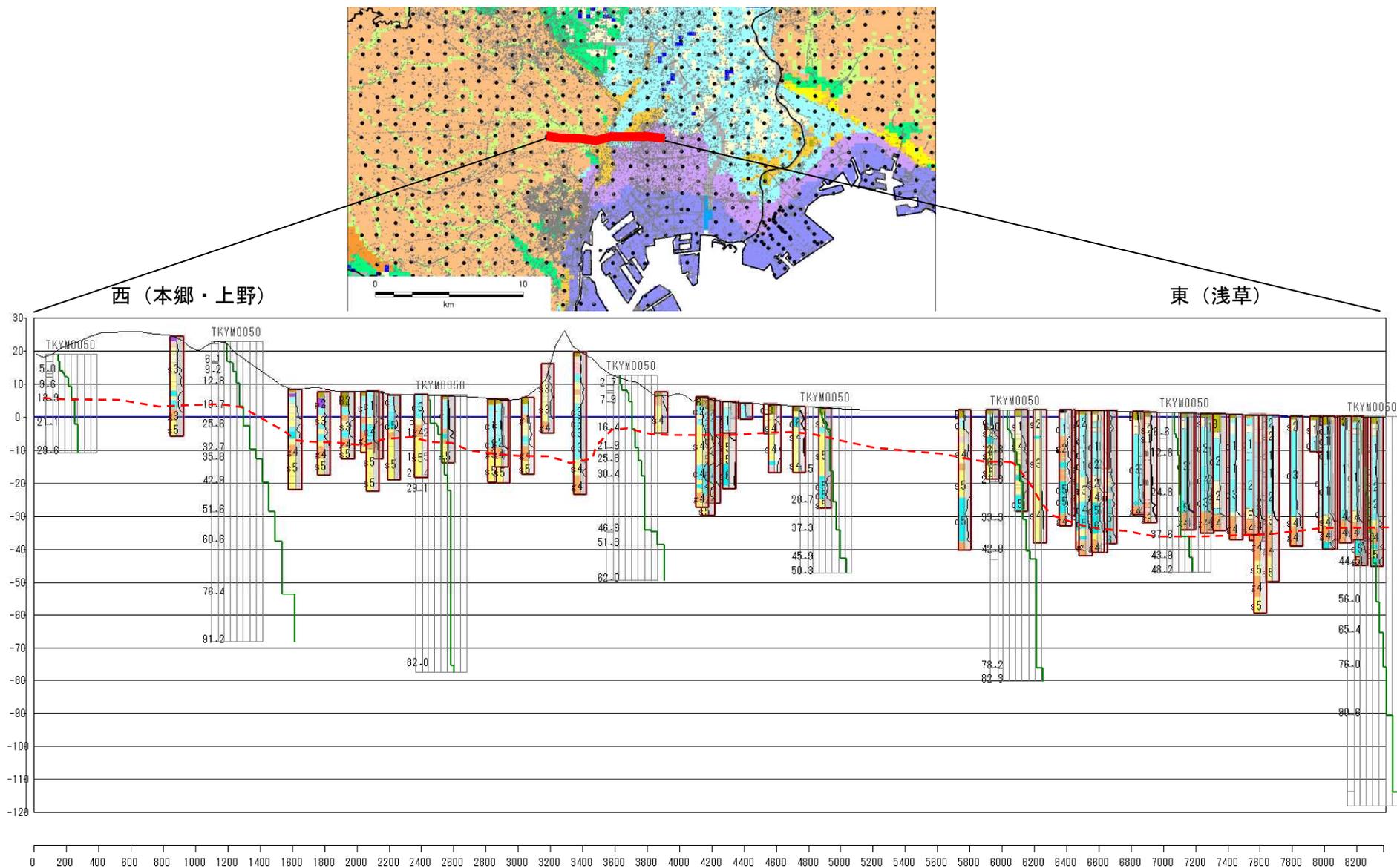


図4-1-16 断面位置図と微動アレイで得られたS波速度構造（緑線）の断面図とボーリング柱状図(下)

上：赤線で示す武蔵野台地－江戸川低地を横断する東西方向の側線に沿った断面。（●：ボーリング地点，●：極小アレイ観測地点）

下：左が本郷・上野、右が浅草。縦方向に20倍に拡大。縦軸は標高(m)、横軸は測線西端からの距離(m)。赤破線はVs350m/s層の上面を示す。

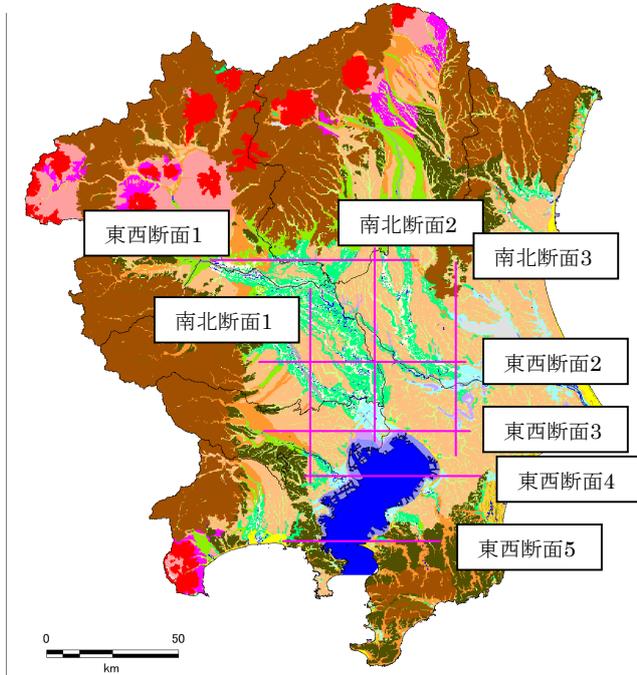
● 地質の三次元的な連続性を重視した浅部地盤構造モデルおよびモデル作成手法における特徴

モデルの特徴と出力内容			モデル作成手法における特徴							今後の改良の可能性			
構造	地震動計算		液状化・斜面崩壊危険度判定	モデル作成に必要なデータ	アルゴリズム	ボーリングデータ等の追加による修正	微動探査、地震観測データによる修正	地域的な適用性	作業効率、必要な時間と予算	全国展開の可能性	可能な修正作業		モデルの有効性、活用方向
	応答スペクトル特性、増幅特性	地震動応答計算用層構造									詳細地形データ・過去の地形データとの組合せ	人工改変地の表現	
<p>・ボーリングデータから地質学的な情報を読み取り、地質構造を推定することにより、浅部地盤の地震動特性を深部地盤構造のモデルと同様の横方向に連続的な層構造で表現する。</p> <p>・実地盤の地域的な特性を反映。</p> <p>・必要な属性を有する層構造への変換が可能。</p> <p>・詳細な地形形状の反映も可能。</p>	<p>・増幅率、計測震度、振幅、速度、加速度、応答スペクトル特性、地震波形</p> <p>・メッシュごとの速度層構造から地震波形を求める。</p> <p>・周期帯域別の表現も可能</p>	<p>・速度層構造は横方向に連続的に変化</p>	<p>・液状化危険層の抽出が可能。</p> <p>・斜面崩壊危険度判定は、山地・丘陵部の層構造の有効な表現は難しい。</p>	<p>・微地形区分</p> <p>・ボーリングデータが、ある程度以上の密度で存在する方が望ましい。</p> <p>・地質学的な情報を用いてデータの補間を行う（例：完新統基底の不整合面の追跡、火山灰層等の鍵層の利用）。その場合は、当てはめモデルより作成に支障がない。</p> <p>・速度値等の物性値データ</p>	<p>・モデル作成に地質解釈技術が必要。</p> <p>・地層区分の基準、構造解析のアルゴリズムの整理が必要。</p>	<p>データの追加による層構造、物性値の変更は可能だが、モデル修正手順の設定が必要。</p> <p>層構造として作成されたデータの追加やそれによる修正が可能。</p>	<p>探査、観測データによるチューニングと面的な補間が可能。</p> <p>◎深部地盤構造モデルと同様の形式なので、統合したモデルとして、地震動、微動の観測結果を再現するような調整が行いやすい。</p> <p>⇒統合地盤構造モデルへの展開</p> <p>◎この作業を加えることで、地震動の再現、地盤応答検討のためのモデルとして可能になる。また、地質技術者の見解の相違を修正可能。</p>	<p>◎平野</p> <p>×丘陵</p> <p>×山地</p> <p>※データが少ない。</p> <p>※平野と異なる設定が必要。</p>	<p>・ボーリングデータの収集、デジタル化、地層や地形の読み取り作業に時間を要する。</p> <p>・地質技術者の参加が必要。</p> <p>・必要予算大、工期も長くなる(△)。</p>	<p>地盤データや鍵層の分布への依存度が高いので、ある程度の精度のモデルが可能な地域は限定される。</p>	<p>旧地形との比較</p> <p>↓</p> <p>人工改変地の抽出、地形解析</p> <p>↓</p> <p>面の平坦性、斜面の傾斜</p> <p>↓</p> <p>微地形区分を細分</p> <p>↓</p> <p>造成地の抽出</p> <p>丘面の定量的認定</p> <p>自然斜面の危険度の評価</p>	<p>・代表地点データをもとに層厚を設定して層構造とする。</p> <p>・データが少ないため、層厚が変化する層構造の設定はデータの条件による。</p>	<p>・自治体、地域レベルのある程度以上の精度でのモデル化に有効。</p> <p>・ある程度詳細な層構造モデルが必要な場合に、地質的な論理を用いることで、効率的なモデル作成が可能（作業に地質技術者の主観が入るが、逆に、主観が入っても、ある程度の共通認識でモデル化できれば、それをもとにチューニングして、そこで客観性を担保するという流れで効率的にモデルを作ることが可能）。</p> <p>・連続的な層構造として汎用性がある。地質断面図など、層構造で表現された他の地盤情報との組合せが可能（沿岸浅海域についても、音波探査データを用いて作成可能）。</p> <p>・詳細な地盤応答解析（地盤の不連続性、非線形挙動、地表構造物との組み合わせ等）の基本となる可能性のあるモデル。</p>

4-2. 作成した浅部地盤構造モデルについて

作成した浅部地盤構造モデルの土質区分とS波速度区分断面図の例(図4-2-1)を示す。東西断面4(図4-2-1h)と東西断面5(図4-2-1i)は東京湾を横断する測線である。断面の横軸は、10kmを目安にメッシュを積算して距離を出している(約250mメッシュだが、緯度方向7.5秒、経度方向11.25秒)ため、250mよりやや大きい経度方向(東西断面)では端数がでているが数値は正しい。

a) 測線位置



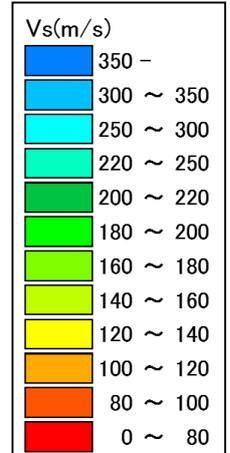
b) 微地形区分の凡例



c) 土質断面の凡例

土質名	color
盛土	■
粘土	■
砂	■
礫	■
ローム	■
基盤	■

d) S波速度断面の凡例



e) 東西1測線に対する土質断面とS波速度断面

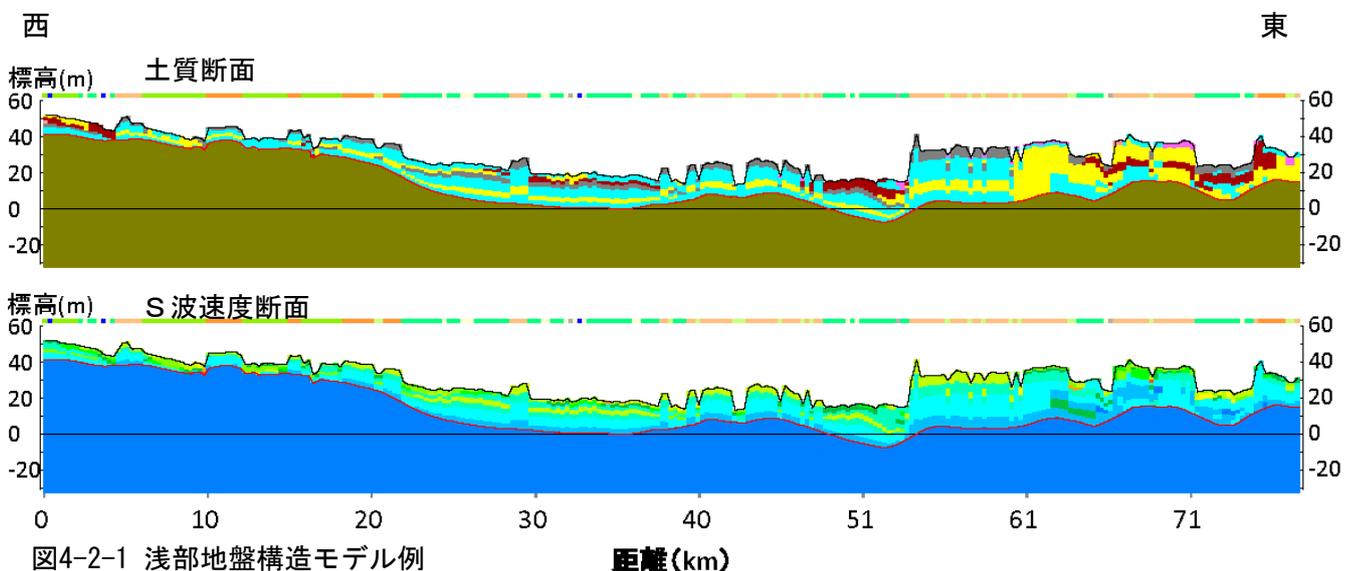
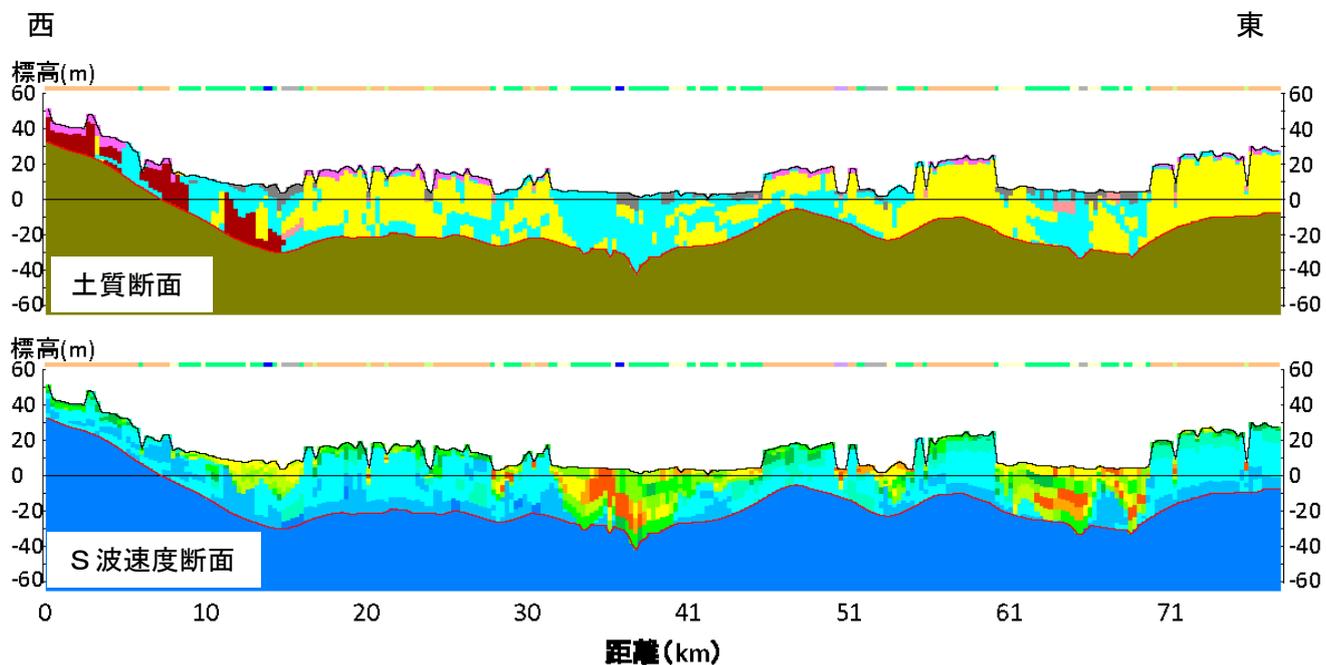


図4-2-1 浅部地盤構造モデル例

距離(km)

- 測線位置図。基図は本検討で用いた微地形区分(14, 15頁参照)。
- 微地形区分の凡例。
- 土質断面の色分けに使われている土質区分とその凡例。
- S波速度断面の色分けに使われている速度区分とその凡例。
- 東西1測線に対する浅部地盤構造モデルの断面図。左が西側。図の上の色分けは、地表面の微地形区分を示す(凡例は、b)。図中の黒横線は標高0mを示す。上は土質断面、下はS波速度断面。
- 東西2測線, g) 東西3測線, h) 東西4測線, i) 東西5測線に対する浅部地盤構造モデルの断面
- 南北1測線に対する浅部地盤構造モデルの断面図。左が南側。
- 南北2測線, l) 南北3測線に対する浅部地盤構造モデルの断面。

f) 東西2測線に対する土質断面とS波速度断面



g) 東西3測線に対する土質断面とS波速度断面

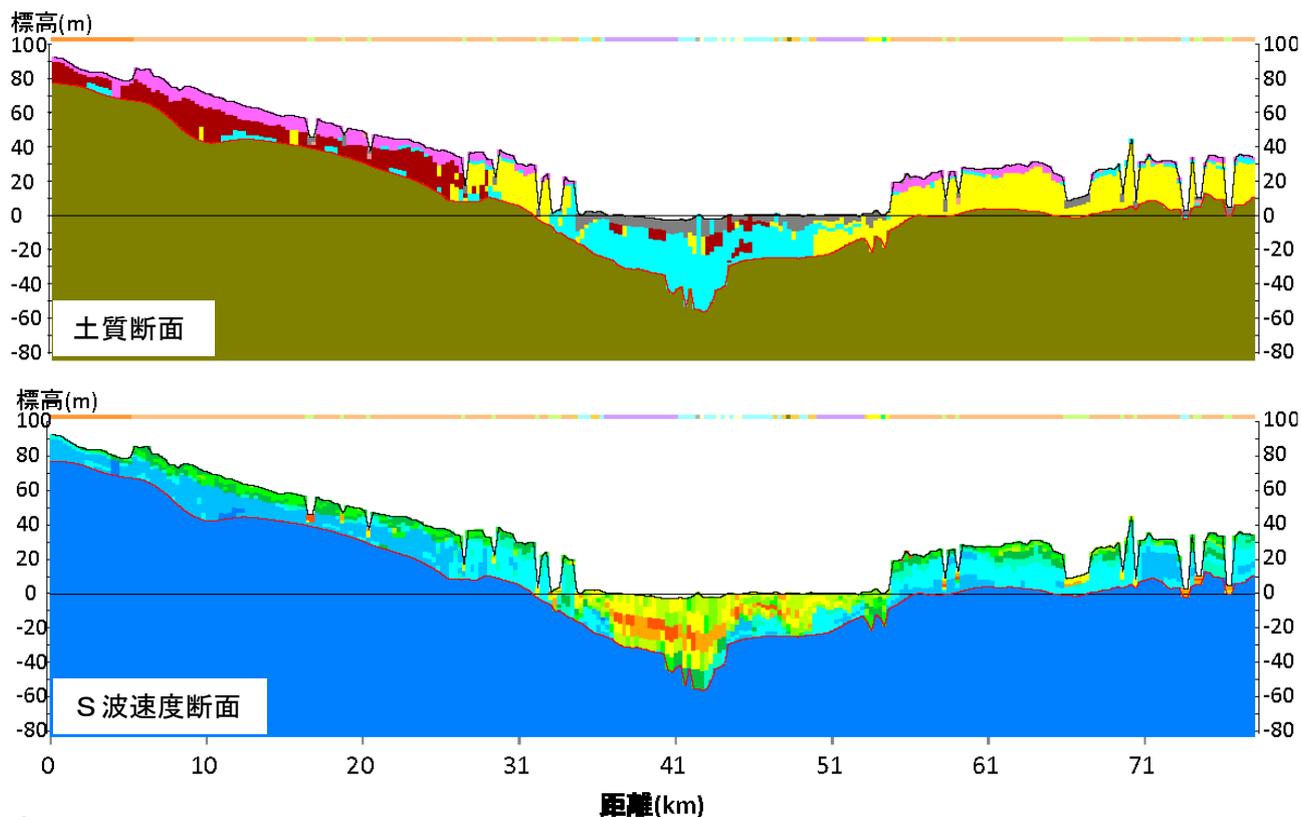
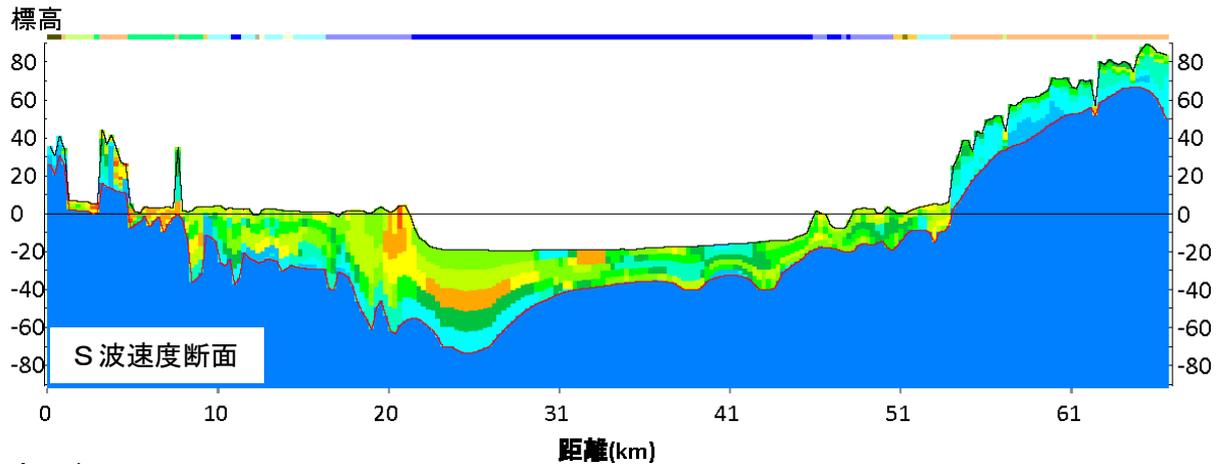
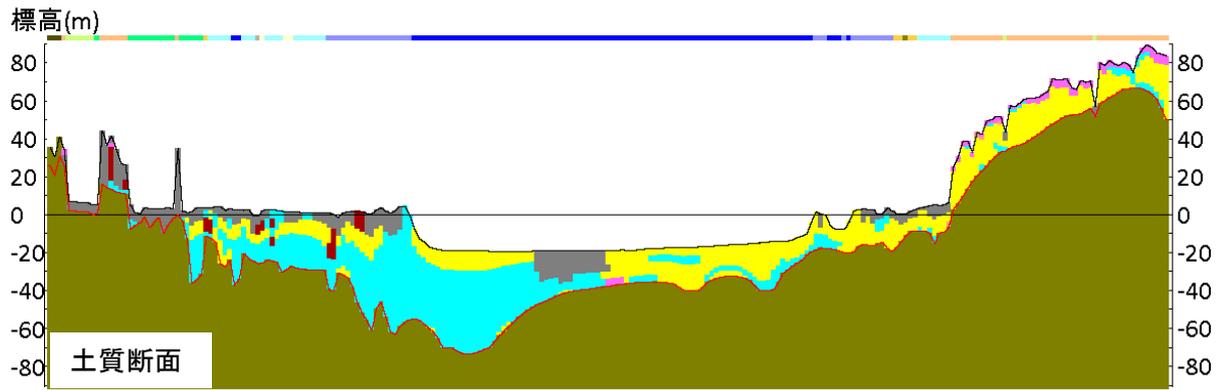
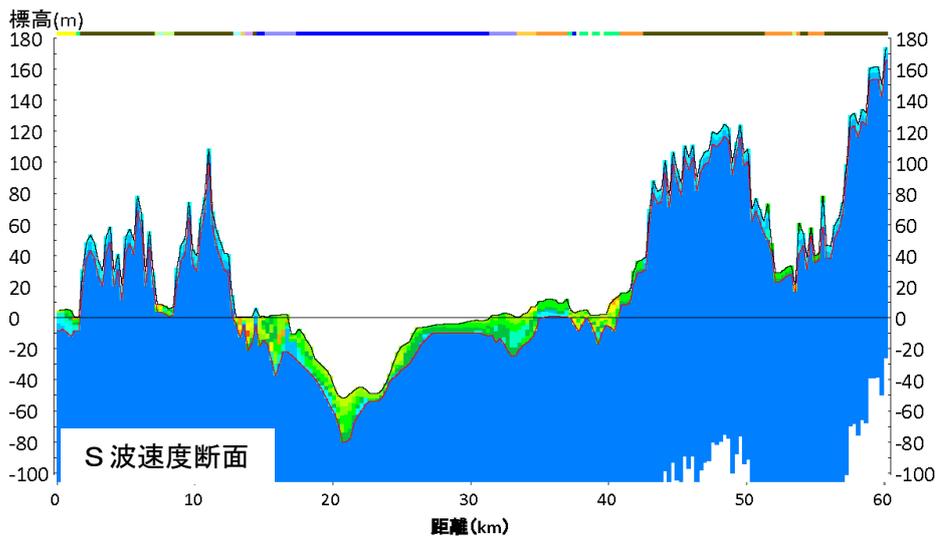
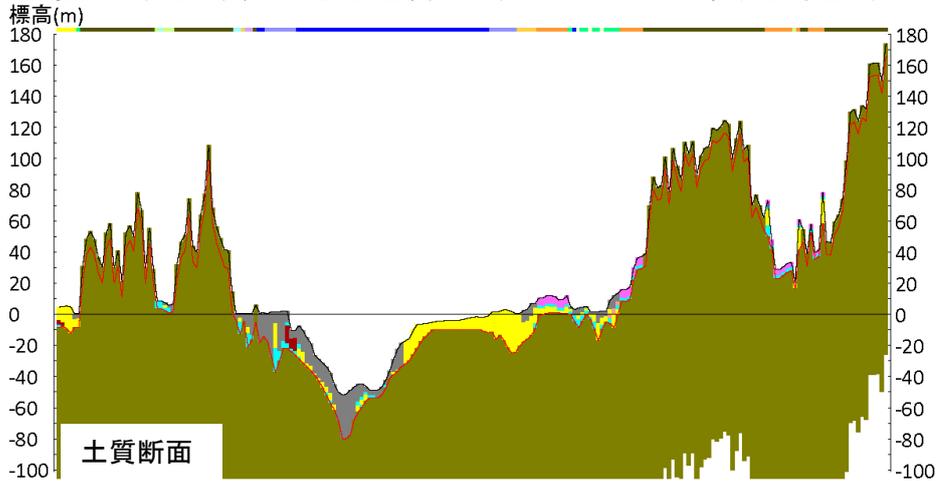


図4-2-1 浅部地盤構造モデル例 (つづき)

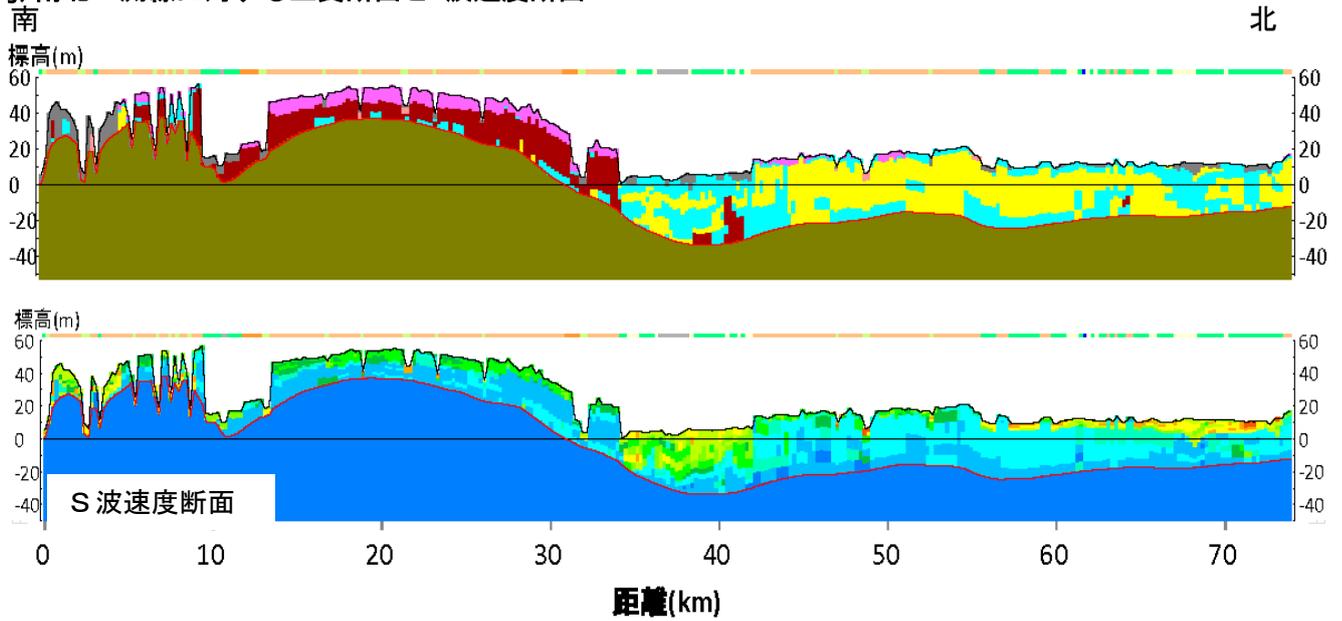
h) 東西4測線に対する土質断面とS波速度断面(0m以下が白い場所は海底面)



i) 東西5測線に対する土質断面とS波速度断面(0m以下が白い場所は海底面)



j) 南北 1 測線に対する土質断面とS波速度断面



k) 南北 2 測線に対する土質断面とS波速度断面

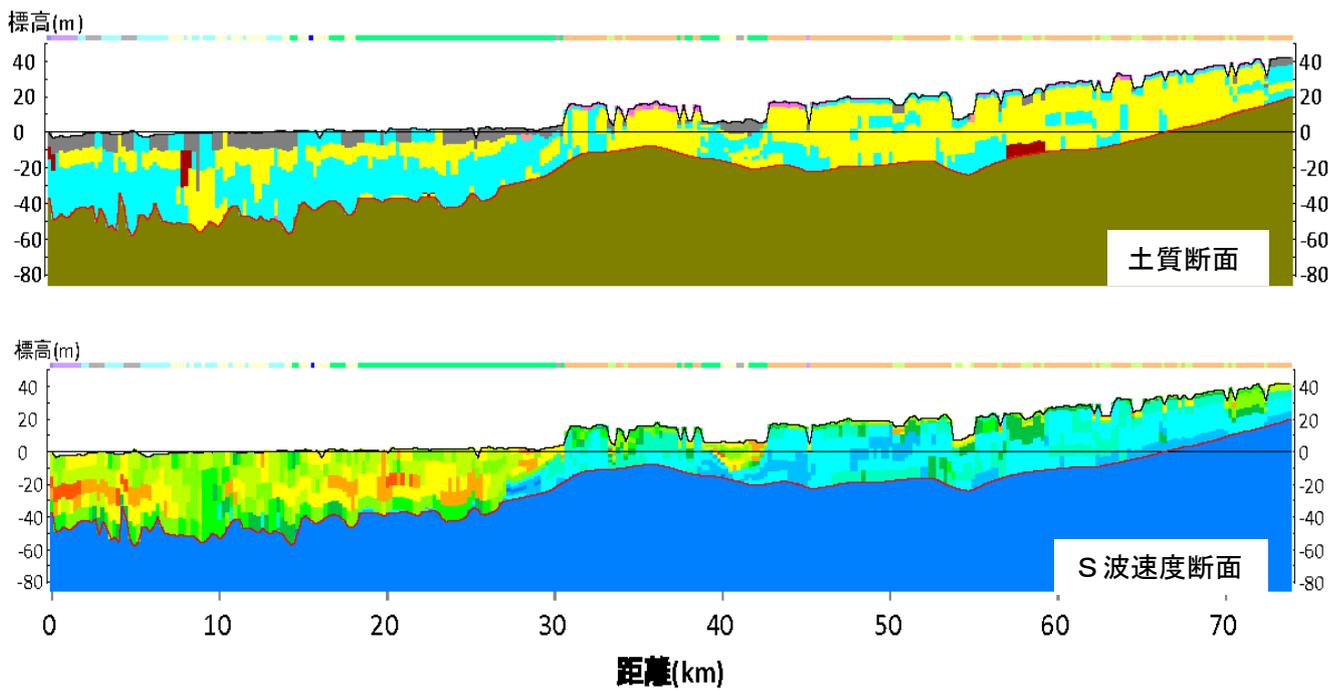


図4-2-1 浅部地盤構造モデル例 (つづき)

1) 南北3測線に対する土質断面とS波速度断面

南

北

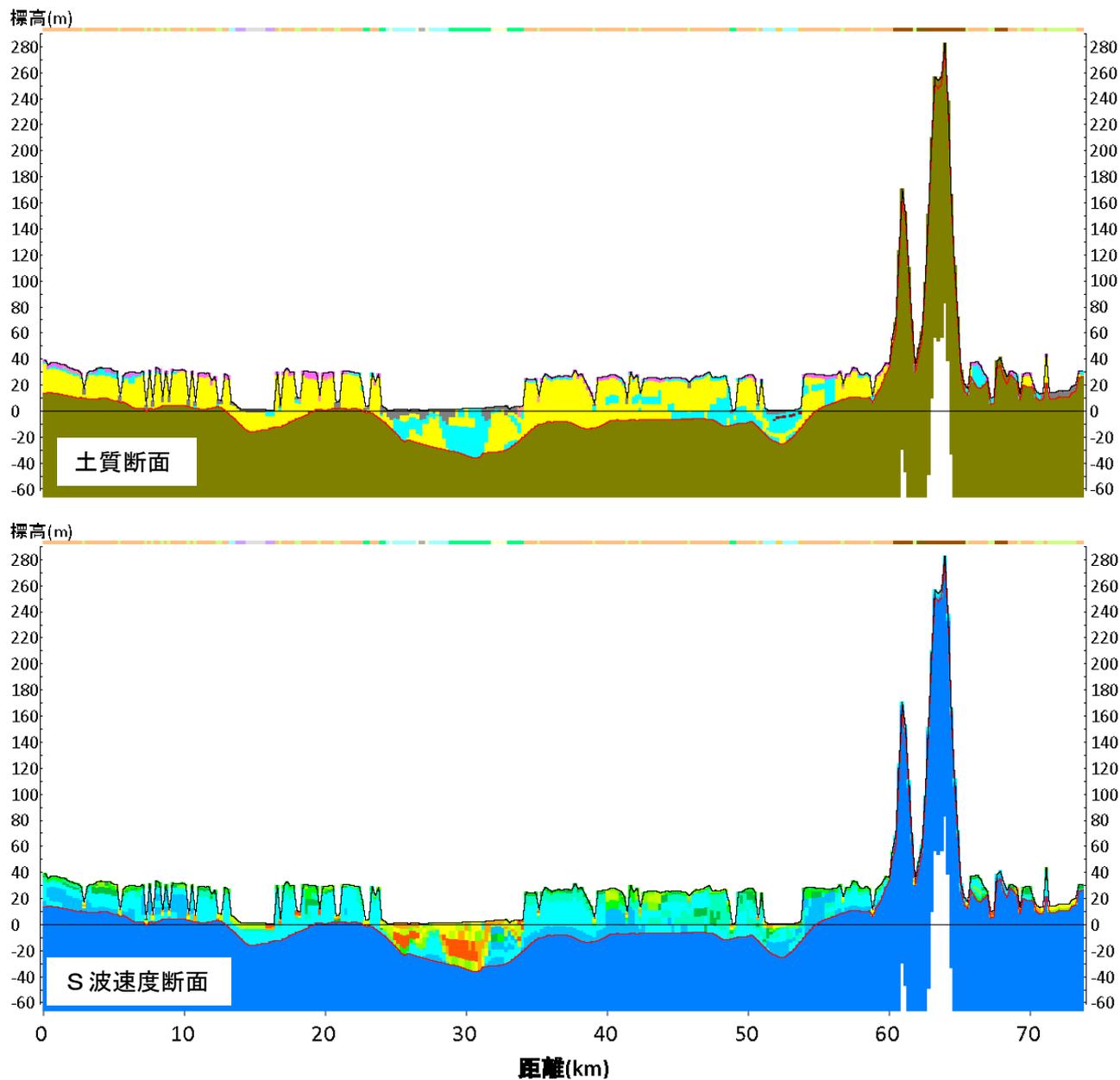


図4-2-1 浅部地盤構造モデル例 (つづき)

5. 浅部・深部統合地盤構造モデルの作成（相当する手順の番号）

5-1. 浅部地盤構造モデルと深部地盤構造モデルの接合と調整「手順(1)」

浅部地盤構造のモデルにおける工学的基盤の地質構成と S 波速度の深度方向変化と深部地盤構造モデルの最上位層の S 波速度を比較し、両者のインピーダンスコントラストが小さい場合には、浅部地盤構造と深部地盤構造をそのまま接合した（図 5-1-1）が、コントラストが大きい場合には、工学的基盤以深に両者をつなぐ中間速度層（ $V_s=350\sim 500$ m/s 程度）を設定した（図 5-1-2）。

中間層を設定する場合は、KiK-net 等の深いボーリングにおける PS 検層データ等を参考にして追加する速度層の厚さと速度値を設定した。堆積盆と周辺の山地部を含む広域的な領域における深部地盤構造と深度分布傾向を考慮して、これらと調和させるように中間速度層の層厚を調整した。

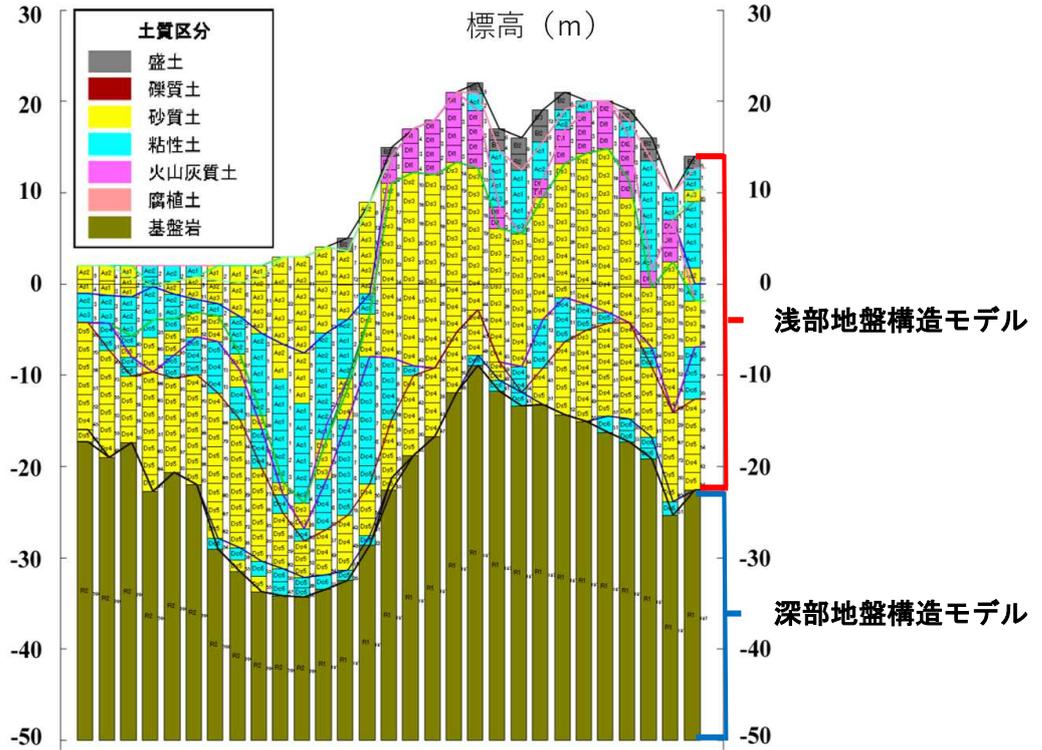


図 5-1-1 浅部地盤と深部地盤構造モデルの接合

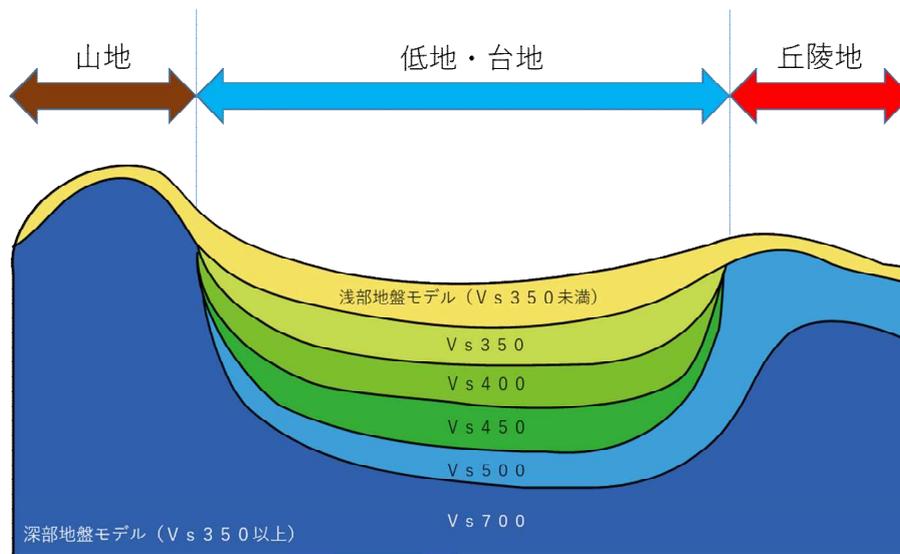


図 5-1-2 中間速度層の設定イメージ ($V_s=350\sim 500$ m/sのイメージ)

5-2. 地震記録・微動観測データによるモデルの調整「手順(2)」

強震動予測のための地盤構造モデルの評価として重要なS波速度構造を検討するため、地震記録を収集し、微動観測を実施した(図5-2-1)。H/V(R/V)スペクトルと位相速度情報等に基づく地盤構造モデルのチューニングを行う。

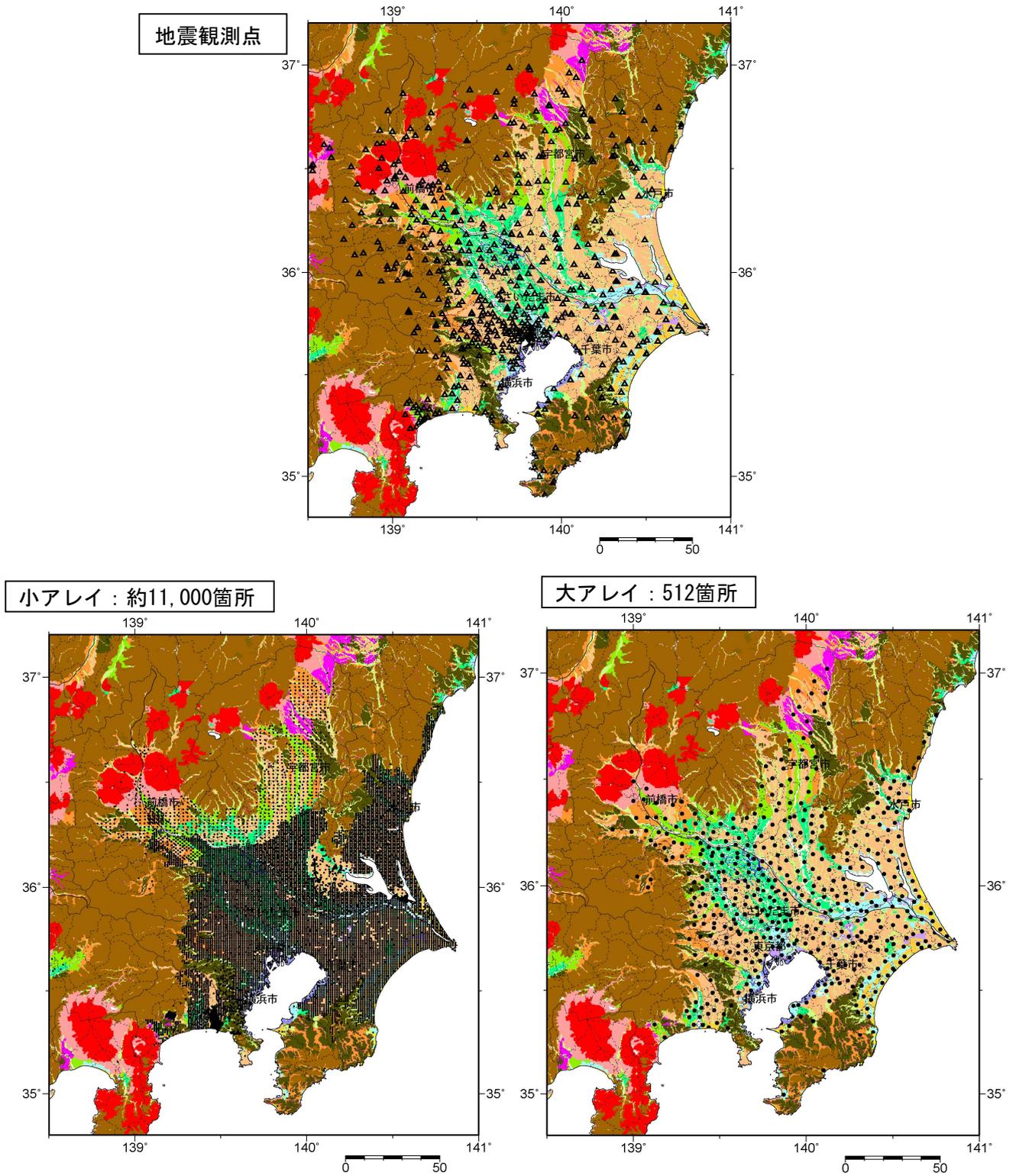


図5-2-1 地震観測記録と微動観測記録の収集・実施状況(関東全域)

基図は微地形区分(若松・松岡, 2013)

上図: 地震観測記録収集地点(△)、下左図: 微動小アレイ(単点も含む)観測記録収集地点(黒点)

下右図: 大アレイ観測記録収集地点(黒丸)

● 微動観測の概要

微動観測については、関東地域全域において、主に低地と台地部において、3成分加速度微動計を用いて2種類の微動アレイ観測を実施している。1つは極小アレイおよび不規則アレイ観測を主体とした小アレイで、主に公的建物の敷地や公道等で、約11,000点（図5-2-1 下左）を約1km間隔（一部地域では2km）で実施している。もう1つは、大きめのサイズのアレイ観測（以後、大アレイ観測と呼ぶ）で、K-NET、KiK-net、自治体の震度観測地点等の512地点（図5-2-1右下図）でそれぞれ実施している。小アレイ観測は、60cmの4点による三角形アレイと5～10mの不規則アレイ（図5-2-2）を、約1km間隔にて、それぞれ15分の観測を行っている。大アレイ観測については、約5km間隔で設定し、半径R=800mもしくは400m、200m、100mの大きさの三角形のアレイ（図5-2-3は、R=400, 200, 100mの例）と、それよりも小さな半径については、一辺75m、50m、25mのL字アレイおよび極小アレイを展開している。三角アレイについては、50～90分程度、L字アレイ等の小さな長さのアレイについては30分程度の観測を行っている。

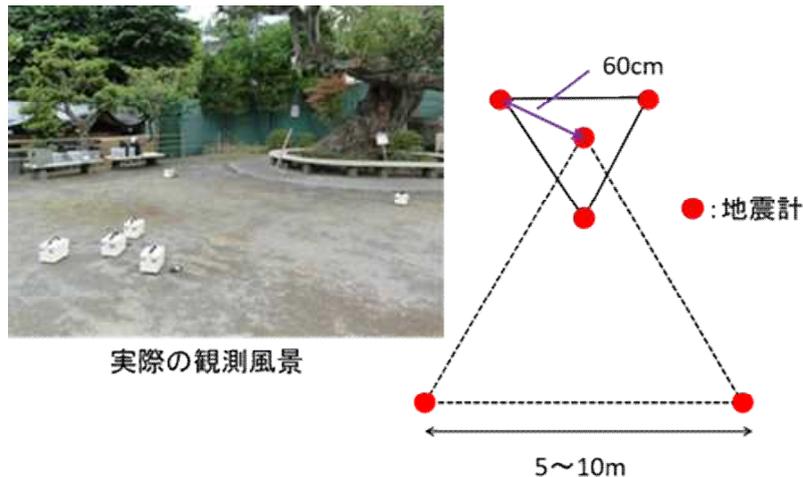


図5-2-2 小アレイの例（半径60cmの円周上の3点とその中心の1点からなる三角形アレイと、その中心の1点を含めた1辺5～10mの不規則三角アレイ）

R=400,200,100mアレイ

L字(75,50,25mアレイ)



図5-2-3 大アレイの例（半径R=400, 200, 100mの三角形アレイ、一辺75, 50, 25mのL字アレイ）

● 微動データの解析法について

微動アレイデータの解析に用いる空間自己相関法(SPAC法)について、以下に手順を示す(図 5-2-4)。

- ① 三角アレイについては 163.84 秒間、Lアレイについては 81.92 秒間、小アレイについては、10.24 秒の波形データとして分割する。
- ② 分割した波形に対して、一次近似によるドリフト除去および DC 除去を施す
- ③ 極端に大きなノイズや、一時的なノイズが入っている区間があれば解析対象から除外する
- ④ SPAC 係数を算出する
 - a) 計算された SPAC 係数をグラフ化する
 - b) 残差分布を求め、そのピークを読み取って位相速度を求める
 - c) 残差分布が不明瞭な場合は、一旦波形に立ち返り、波形の品質を確認する。
- ⑤ ①～④の手順で得られた三角アレイ、Lアレイのそれぞれの実測分散曲線を、結合し、最終的な実測分散曲線とする。

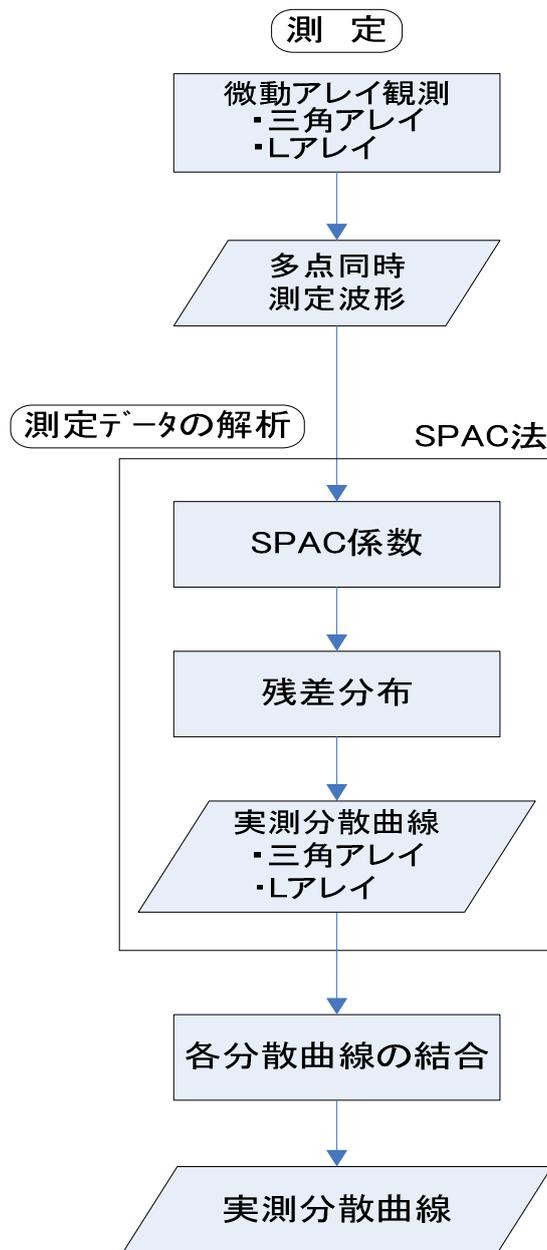


図5-2-4 微動アレイデータの解析手順

● 地震記録の解析法 (R/V スペクトル算出) について

地震記録のR/Vスペクトルは、以下のようにして算出している。

- ・ S 波初動から 20 秒以降の波形を抜き出す。
- ・ 抜き出した波形のラディアル成分と上下動成分のフーリエスペクトルを求める。その際、バンド幅 0.05Hz の Parzen Window により平滑化を行う。
- ・ ラディアル成分と上下動成分のスペクトル比を求める。

表 5-2-1 に茨城県のデータ解析に使用した地震の一覧を、図 5-2-5 に地震の震央位置および観測点位置図を、図 5-2-6 に R/V スペクトルの例を示す。

表 5-2-1 R/V スペクトル算出に使用した地震リスト

ID	Year	Month	Day	Hour	Minutes	Sec	Latitude	Longitude	Depth(km)	Mj	Epicenter
1	2004	4	4	8	2	0.69	38.3802	141.154	48.99	5.8	E OFF IBARAKI PREF
2	2004	5	29	12	47	10.19	37.6645	142.02	37.75	5.9	SE OFF MIYAGI PREF
3	2004	9	1	11	49	26.07	36.9222	141.7812	31.08	5.6	E OFF FUKUSHIMA PREF
4	2004	10	17	2	19	19.26	36.2747	141.403	47.75	5.5	FAR E OFF IBARAKI PREF
5	2004	10	17	3	54	41.65	36.2552	141.3298	49.01	5.7	E OFF IBARAKI PREF
6	2004	10	23	18	3	12.65	37.354	138.9833	9.38	6.3	MID NIIGATA PREF
7	2004	10	23	19	45	57.19	37.2957	138.8762	12.35	5.7	MID NIIGATA PREF
8	2004	10	25	6	4	57.57	37.33	138.9468	15.2	5.8	MID NIIGATA PREF
9	2004	10	27	10	40	50.24	37.2918	139.0333	11.6	6.1	MID NIIGATA PREF
10	2004	11	8	11	15	58.55	37.396	139.032	0	5.9	MID NIIGATA PREF
11	2004	11	29	3	32	14.53	42.946	145.2755	48.17	7.1	OFF NEMURO PENINSULA
12	2004	12	29	22	58	48.77	38.4493	142.1797	39.35	5.5	E OFF MIYAGI PREF
13	2005	3	20	10	53	40.32	33.7392	130.1763	9.24	7	NW OFF KYUSHU
14	2005	12	5	7	20	23.04	37.867	142.6552	25.08	5.5	SE OFF MIYAGI PREF
15	2005	12	17	3	32	13.41	38.4487	142.1813	39.91	6.1	E OFF MIYAGI PREF
16	2006	1	18	23	25	25.64	37.7997	142.2	35.94	5.7	SE OFF MIYAGI PREF
17	2006	4	21	2	50	39.51	34.9415	139.1958	7.11	5.8	E OFF IZU PENINSULA
18	2007	7	16	15	37	40.41	37.504	138.6445	22.53	5.8	OFF S NIIGATA PREF
19	2007	11	26	22	51	37.58	37.304	141.7568	44.13	6	E OFF FUKUSHIMA PREF
20	2007	12	25	23	4	32.85	38.4833	142.1537	40.29	5.6	E OFF MIYAGI PREF
21	2008	5	8	1	16	34.09	36.2747	141.9788	18	6.3	FAR E OFF IBARAKI PREF
22	2008	7	19	11	39	28.89	37.5208	142.2645	31.55	6.9	E OFF FUKUSHIMA PREF
23	2008	7	21	20	30	26.66	37.1365	142.3412	27.38	6.1	E OFF FUKUSHIMA PREF
24	2008	7	22	17	48	48.55	37.689	142.3685	30.45	5.5	SE OFF MIYAGI PREF
25	2008	12	20	19	29	16.75	36.5308	142.7	0	6.6	FAR E OFF KANTO
26	2008	12	21	18	16	40.66	36.6005	142.4657	0	6.2	FAR E OFF FUKUSHIMA PREF
27	2009	2	1	6	51	51.89	36.717	141.2793	47.03	5.8	E OFF IBARAKI PREF
28	2009	6	6	14	52	41.04	35.5418	141.2642	42.4	5.9	NEAR CHOSHI CITY
29	2009	8	11	5	7	5.74	34.7862	138.4993	23.32	6.5	SOUTHERN SURUGA BAY REG

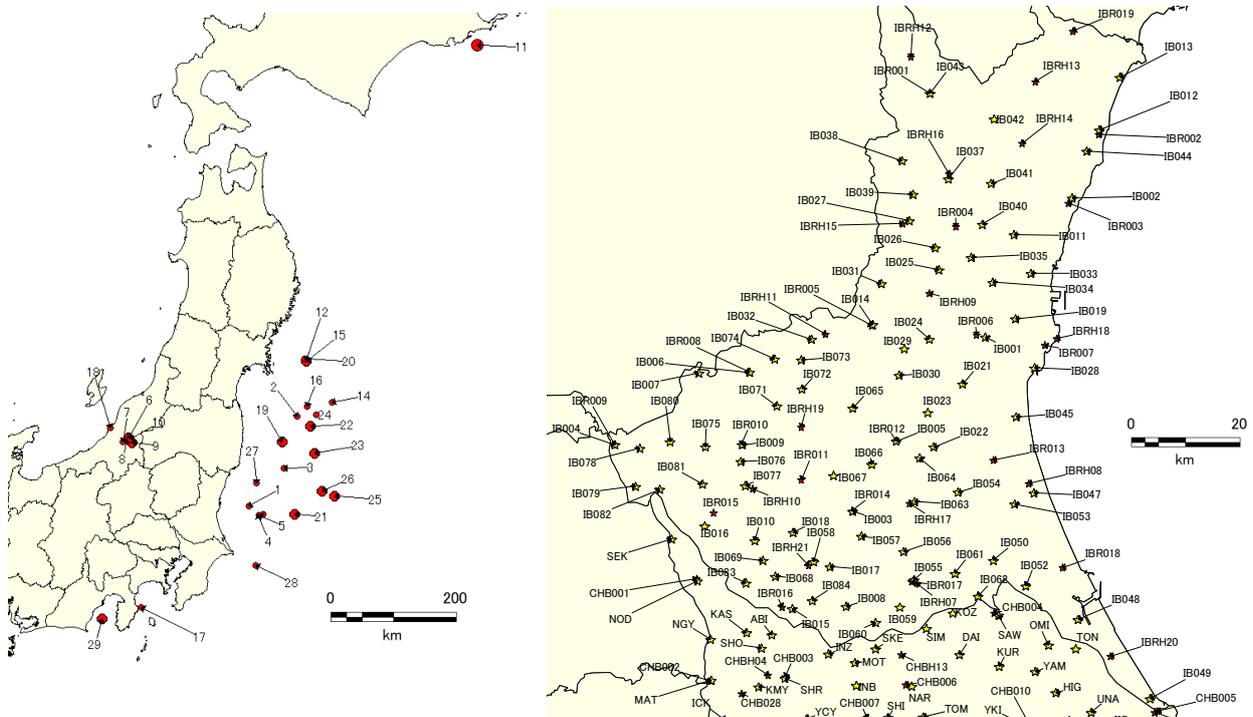


図 5-2-5 R/V スペクトル解析に用いた地震の震央位置 (左図) と地震観測点位置 (茨城県の例)

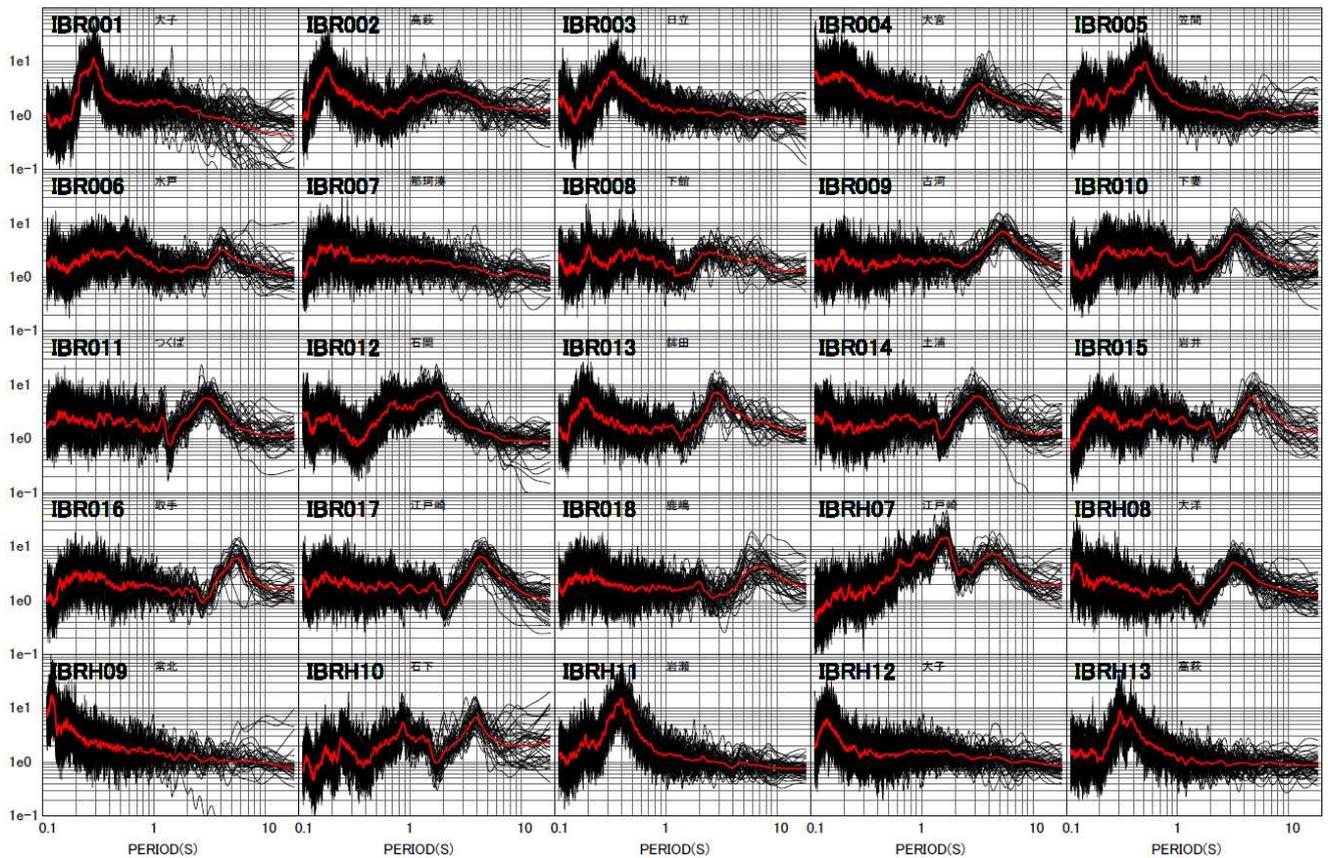


図 5-2-6 R/V スペクトルの例（茨城県）

R/V スペクトルを使った解析については、次節のジョイントインバージョンを行う前に、簡易的に調整するために、観測された地震記録の R/V(H/V)スペクトルと作成した速度構造モデルから得られる理論値を比較することにより層厚を修正するなどの調整を行った（調整手法と手順は 3-4 章と同じ）。

● **速度構造解析およびジョイントインバージョン**

新たに行った微動探査（アレイ）による測定データを用いて実測分散曲線を求め、逆解析を行って地盤の速度構造を求めた。なお、逆解析に際しては、近傍の強震観測点において観測された地震波形の S コーダ波を用いて R/V(H/V)スペクトルを求め、これを併せた同時逆解析（ジョイント・インバージョン）を実施した。

同時逆解析における諸元、パラメーターを表 5-2-2 にまとめた。

表 5-2-2 逆解析諸元と GA パラメーター

ジョイントインバージョン	
位相速度対象モード	基本モード
位相速度逆解析	GA（山中・石田, 1995）
R/V対象モード	基本～4次重ね合わせ
R/V逆解析	Arai and Tokimatsu(2004)
重み	位相速度 0.5 : R/V 0.5
モデルの調整	工学的基盤($V_s=350\text{m/s}$)より上層： 深度固定、速度可変 工学的基盤以深： 速度固定、深度可変

GAパラメーター	
世帯数	50
世代数	50
交差確率	0.7
突然変異確率	0.01

強震記録および微動アレイ観測から得られた結果を用いたジョイントインバージョンのフローを図5-2-7に示す。

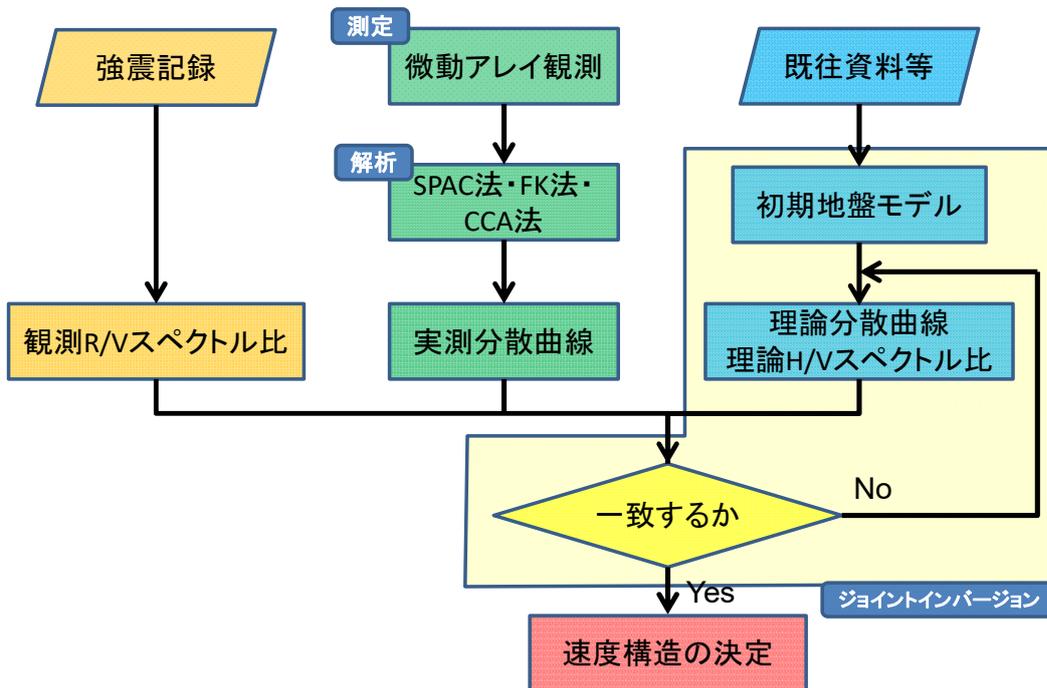


図 5-2-7 微動アレイデータの解析方法と地震記録とのジョイントインバージョンのフロー

ジョイントインバージョンにおける位相速度の残差を以下、5-2-1, 5-2-2 式のように定義した。

$$E_{PV} = \left(\frac{1}{N_{pv}} \sum_{j=1}^{N_{pv}} w(f_j) \left(C_o(f_j) - C_c(f_j) \right) / C_o(f_j) \right)^2 \quad (5-2-1)$$

$$w(f_j) = 1.0 (f_j > 1.0 \text{ Hz}) \quad (5-2-2)$$

$$w(f_j) = f_j * 0.5 + 0.5 (f_j \leq 1.0 \text{ Hz})$$

ここで、 N_{pv} 、 $C_o(f_j)$ 、 $C_c(f_j)$ はそれぞれ位相速度のデータ数、周波数 f_j における実測位相速度および理論位相速度である。 $w(f)$ は、重み関数であり、高周波数ほど重みを大きくした。

同様に、R/V (H/V) スペクトルの残差を以下、5-2-3 式のように定義した。

$$E_{RV} = \left(\frac{1}{N_{RV}} \sum_{j=1}^{N_{RV}} \left[\frac{RV_o(f_j)}{RV_{o_{max}}} - \frac{RV_c(f_j)}{RV_{c_{max}}} \right] \right)^2 \quad (5-2-3)$$

ここで、 N_{RV} 、 $RV_o(f_j)$ 、 $RV_c(f_j)$ 、 $RV_{o_{max}}$ 、 $RV_{c_{max}}$ はそれぞれ R/V (H/V) スペクトルのデータ数、周波数 f_j における観測 R/V(H/V)スペクトル、理論 H/V スペクトル、観測 R/V(H/V)スペクトルの最大値および理論 H/V スペクトルの最大値である。これらの残差を用いて、観測データ全体の残差を以下、5-2-4 式のように定義した。図 5-2-8 にジョイントインバージョンの残差の重み付けの例を示す。

$$E = 0.5E_{PV} + 0.5E_{RV} \quad (5-2-4)$$

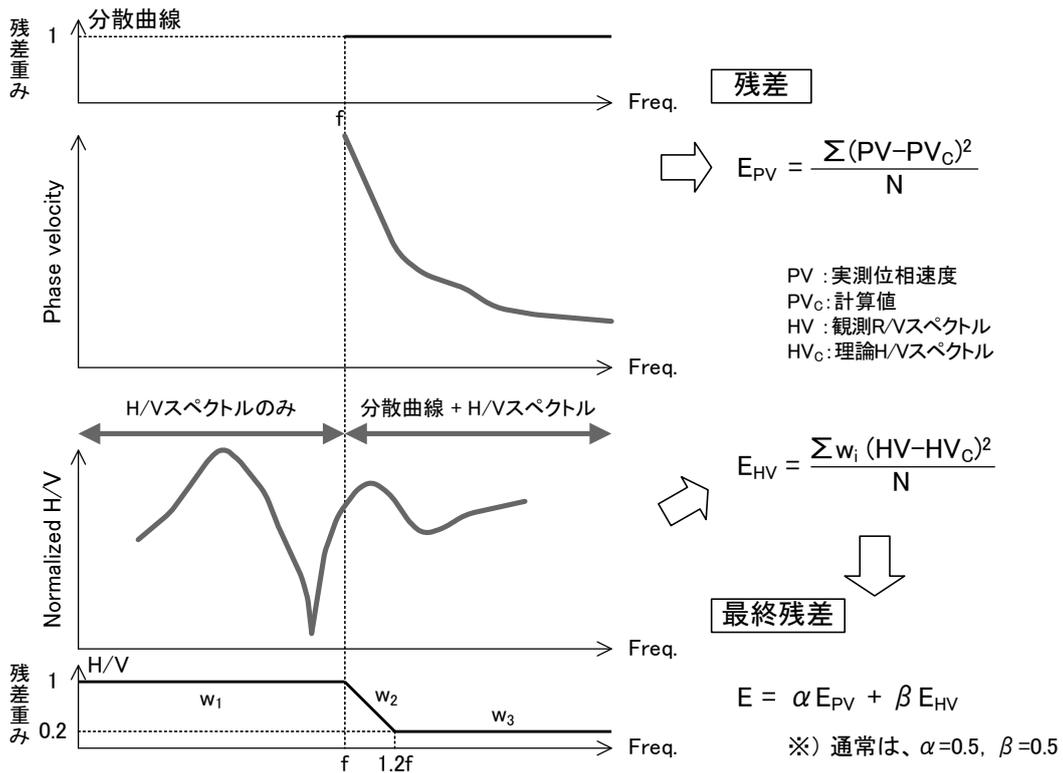


図 5-2-8 ジョイントインバージョンの残差の重み付けの例

また、インバージョン時の層構造の修正については、浅部地盤構造の部分は、S波速度構造を変更（層厚を固定）し、深部地盤構造については、層厚を変更（S波速度構造は固定）した（図 5-2-9）。

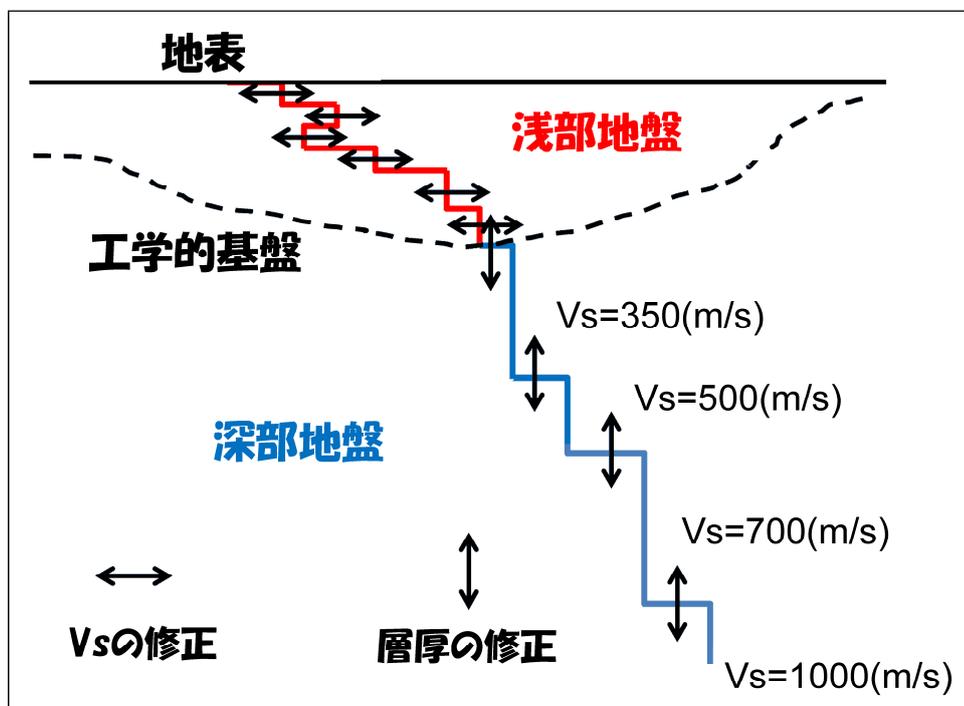
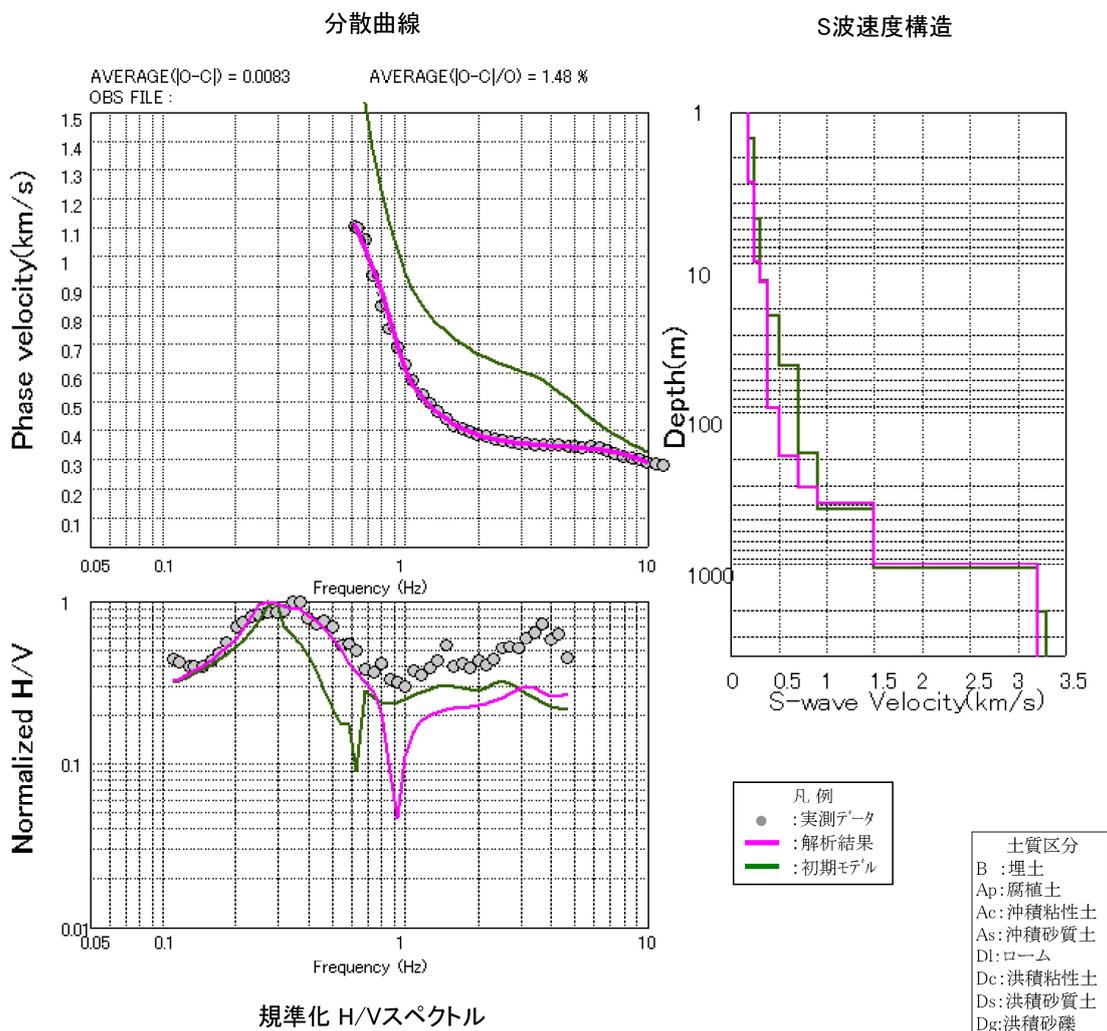


図 5-2-9 ジョイントインバージョン時の速度層・S波速度 (V_s) 構造の修正概念図

初期地質モデル (J-SHIS モデルの改良モデル) に対し、強震記録および微動アレイ観測による解析データを用いたジョイント・インバージョンによる修正結果の例を図 5-2-10 に示す。工学的基盤上面 (350m/s) より上の層では、S波速度が、350m/s 層以下では層厚が修正されている。



解析結果モデル

下面深度(m)	層厚(m)	S波速度(m/s)	密度(g/cm ³)	土質区分
1.5	1.5	180	1.50	D1
3.0	1.5	180	1.50	D1
5.0	2.0	250	1.90	Ds
9.8	4.8	310	1.90	Ds/Dc
13.5	3.7	310	1.90	Ds/Dc
93.4	79.9	350	1.90	R1
192.0	99.0	500	1.90	R2
311.0	119.0	700	2.00	R3
391.0	80.0	900	2.05	R4
1000.0	609.0	1500	2.25	R5
-	-	3200	2.65	R6

初期地質モデル

下面深度(m)	層厚(m)	S波速度(m/s)	密度(g/cm ³)	土質区分
1.5	1.5	180	1.50	D1
3.0	1.5	250	1.50	D1
5.0	2.0	250	1.90	Ds
9.8	4.8	310	1.90	Ds/Dc
13.5	3.7	310	1.90	Ds/Dc
22.5	9.0	350	1.90	R1
48.0	25.5	500	1.90	R2
185.0	137.0	700	2.00	R3
433.0	248.0	900	2.05	R4
1063.0	630.0	1500	2.25	R5
-	-	3200	2.65	R6

図 5-2-10 ジョイントインバージョン修正結果例 (茨城県旭総合支所) ※修正箇所は黄色のハッチ

5-3. 経験的サイト増幅特性による短周期領域の検証・調整「手順(3)」

● サイト増幅特性の推定

作成した浅部・深部統合地盤構造モデルについて、短周期帯域（2秒未満）のサイト増幅特性を検討として、スペクトルインバージョン（例えば、片岡・他,2006）を行い、経験的サイト増幅特性を評価する（図5-3-1）。ここでは地盤の非線形性は考慮しない。地震本部での強震動評価は地盤の非線形性は考慮しない評価をおり、浅部・深部統合地盤構造モデルも、非線形性を示すパラメーターなどのモデル化は行っていない。

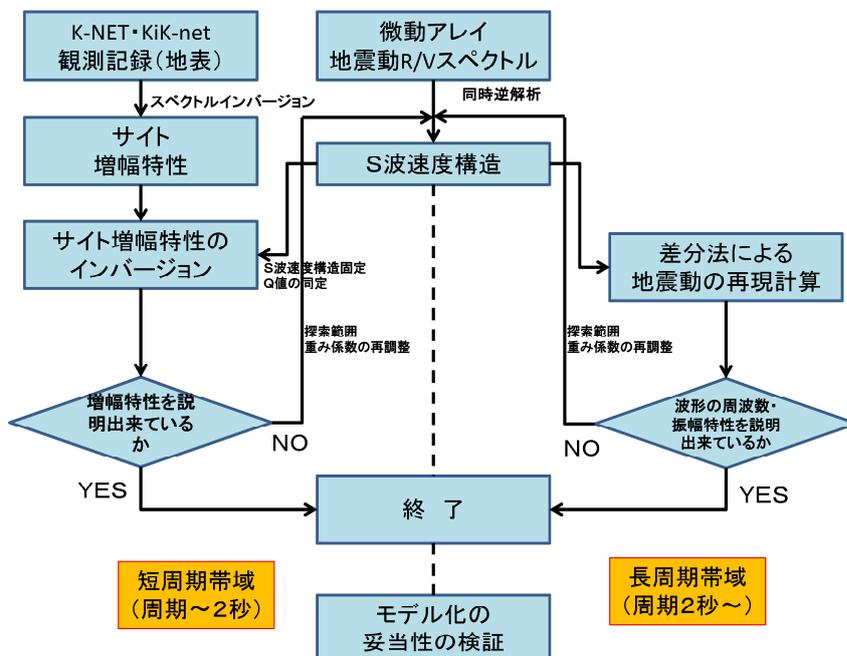


図 5-3-1 地震動の長周期成分の波形再現性と短周期成分のサイト増幅特性を考慮した検討の流れ

スペクトルインバージョン解析に用いた地震の震央位置と伝搬経路の Q 値の検討例を図 5-3-2 に示す。

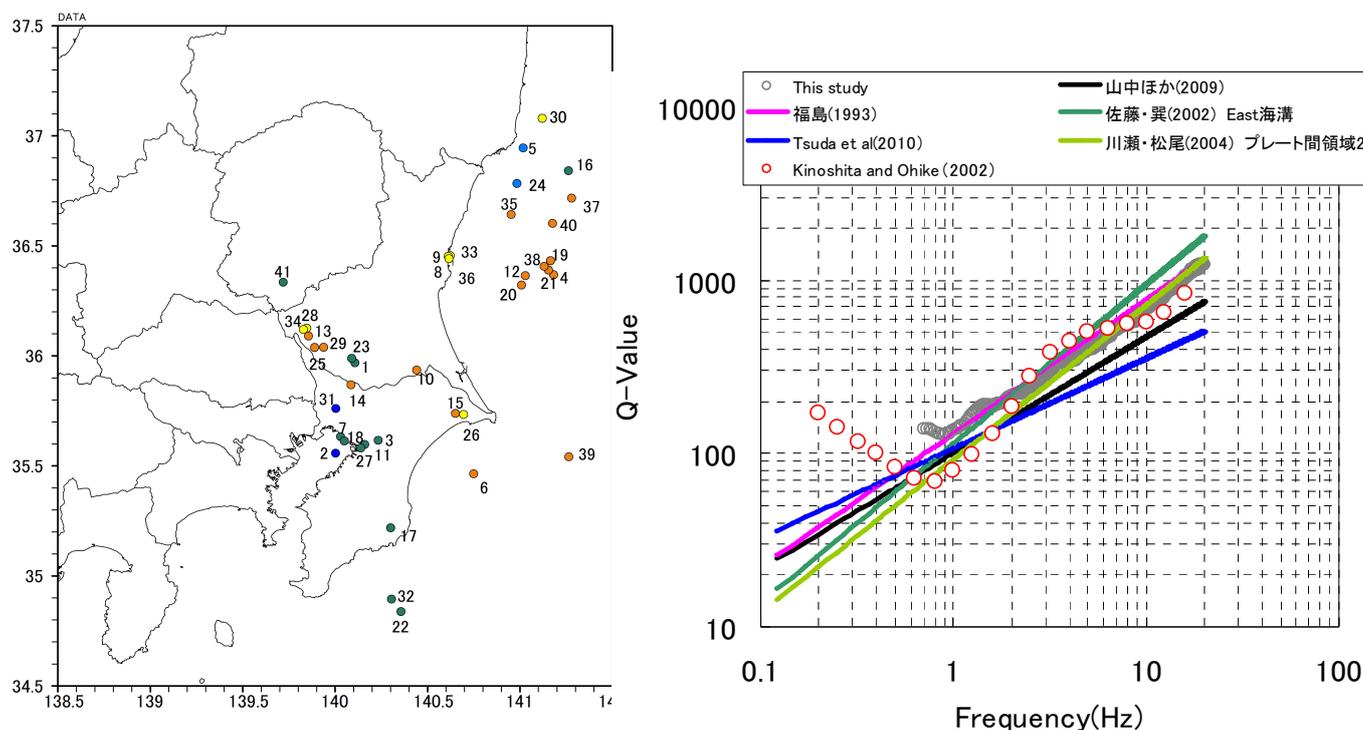


図 5-3-2 スペクトルインバージョンに用いた地震の震央位置（左）、伝播経路の Q 値の検討（右）

Q値に対しては、以下のバイリニア型の式を用い、aの値を0.1~100の間で探索した。

$$Q(f) = \frac{V_s}{a} \cdot f^b \quad (f < f_c) \quad Q(f) = \frac{V_s}{a} \cdot f_c^b \quad (f \geq f_c)$$

$f_c=5\text{Hz}$ (福島・翠川, 1994) , $b=0.44$ (山中・他, 2009)

サイト増幅特性計算は、片岡・他 (2006) のスペクトルインバージョン手法を参考にした。

5-3-1式に示すように、加速度フーリエスペクトル ($A(f)$) が、震源特性 ($S(f)$)、伝搬経路特性 ($P(f)$)、サイト増幅特性 ($G(f)$) の3つのスペクトル成分により構成されると考える。

$$A_{ij}(f) = S_i(f)P(f)G_j(f) \quad (5-3-1)$$

$$P(f) = \frac{1}{X} \exp\left(\frac{-\pi X}{Q\beta}\right) \quad (5-3-2)$$

ここで、 i は地震に対する添字、 j は観測点に対する添字、 f は周波数、 X は震源距離、 β は伝搬経路のS波速度を意味する。

震源特性をスペクトルインバージョンにより推定し、 ω^{-2} モデルによりモデル化する。

$$S(f) = \frac{R_{\theta\phi} F_s P_{RTTN}}{4\pi\rho\beta^3} \sqrt{\frac{\rho\beta}{\rho_z\beta_z}} \frac{(2\pi f)^2 M_0}{1+(f/f_0)^2} \quad (5-3-3)$$

M_0 は地震モーメント、 f_0 はコーナー周波数。 F_s は自由地表面の効果を表す定数で $F_s=2$ とした。 P_{RTTN} は水平2成分へのエネルギー分配を示す係数である。本検討では、水平2成分のベクトル和で定義するため、1とした。ラディエーションパターン $R_{\theta\phi}$ については、スペクトルインバージョン解析ではスペクトルの対数を対象として分離することから、S波のラディエーションパターン係数の対数平均値0.55を用いた。

図5-3-3にスペクトルインバージョンによって求めた震源スペクトルとサイト増幅特性解析結果を示す。用いたデータは、関東地方で観測されたMj5~6の中規模地震で、深さ40 km以上の震源に対する記録である。S波主要動部分の20秒間のデータを用いてスペクトルを計算した。スペクトルの平滑化は、紺野・大町(1995)による対数フィルターを参考にした。b値は20としている。KiK-net観測点の成田、十王、つくばの3地点において、孔中と地表の観測スペクトル比を用いた地盤構造の同定解析を行い、同定解析結果により計算される3地点の理論増幅特性を拘束条件とした。

震源スペクトルは、 ω^{-2} モデルで観測データを良く説明できている (図5-3-3a)。

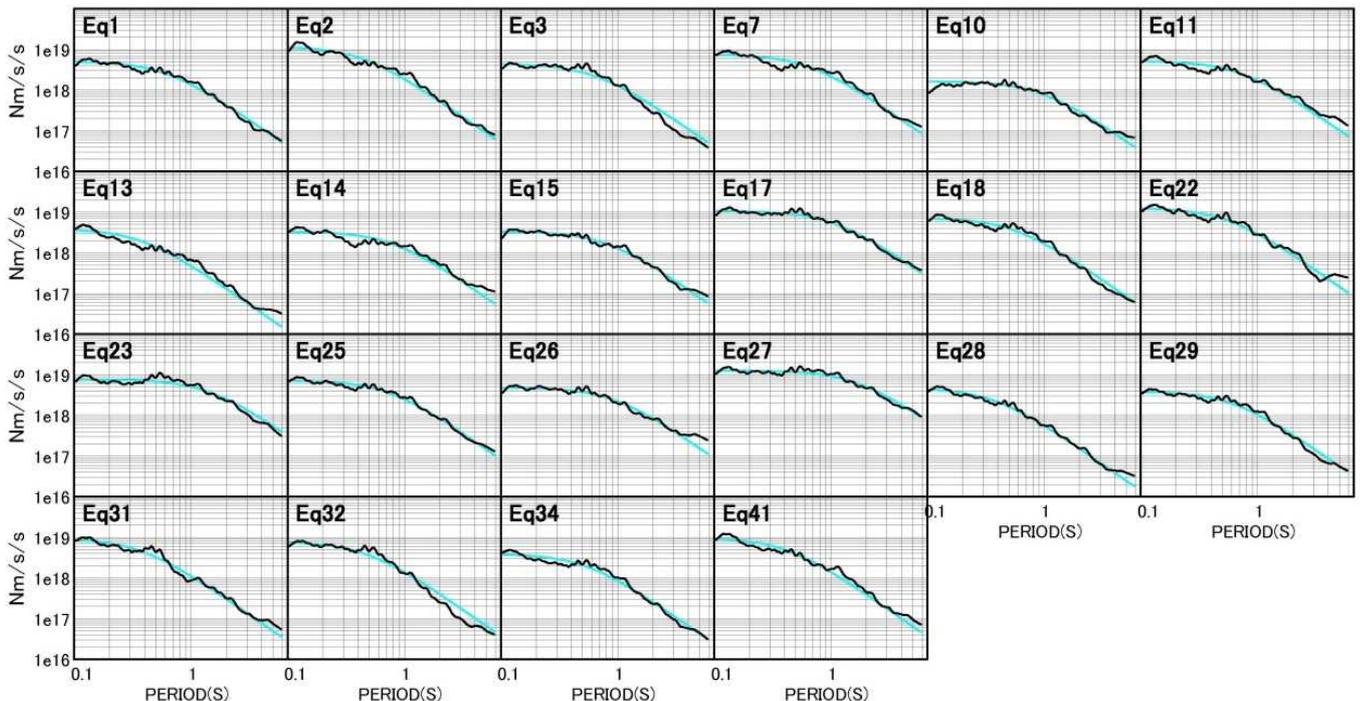


図 5-3-3a スペクトルインバージョンで得られた震源スペクトルの例
観測波形 (震源は図5-3-2) から求めた震源スペクトル (黒) と ω^{-2} モデル (水色)

サイト増幅特性は、本検討で求めた観測サイト増幅特性と野津・長尾(2005)による観測サイト特性増幅特性を比較した。野津・長尾(2005)では、表面波部分も用いているため長周期側では本検討で求めた観測サイト増幅特性に対してやや値が大きいが、ピーク周波数はよく一致している(図5-3-3bの水色と黒のスペクトル)。また、観測サイト増幅特性と浅部・深部統合地盤構造モデル(本検討モデル)を用いた理論サイト増幅特性(図5-3-3b 青のスペクトル)を比較して、モデルに与えた速度構造の妥当性を評価した。

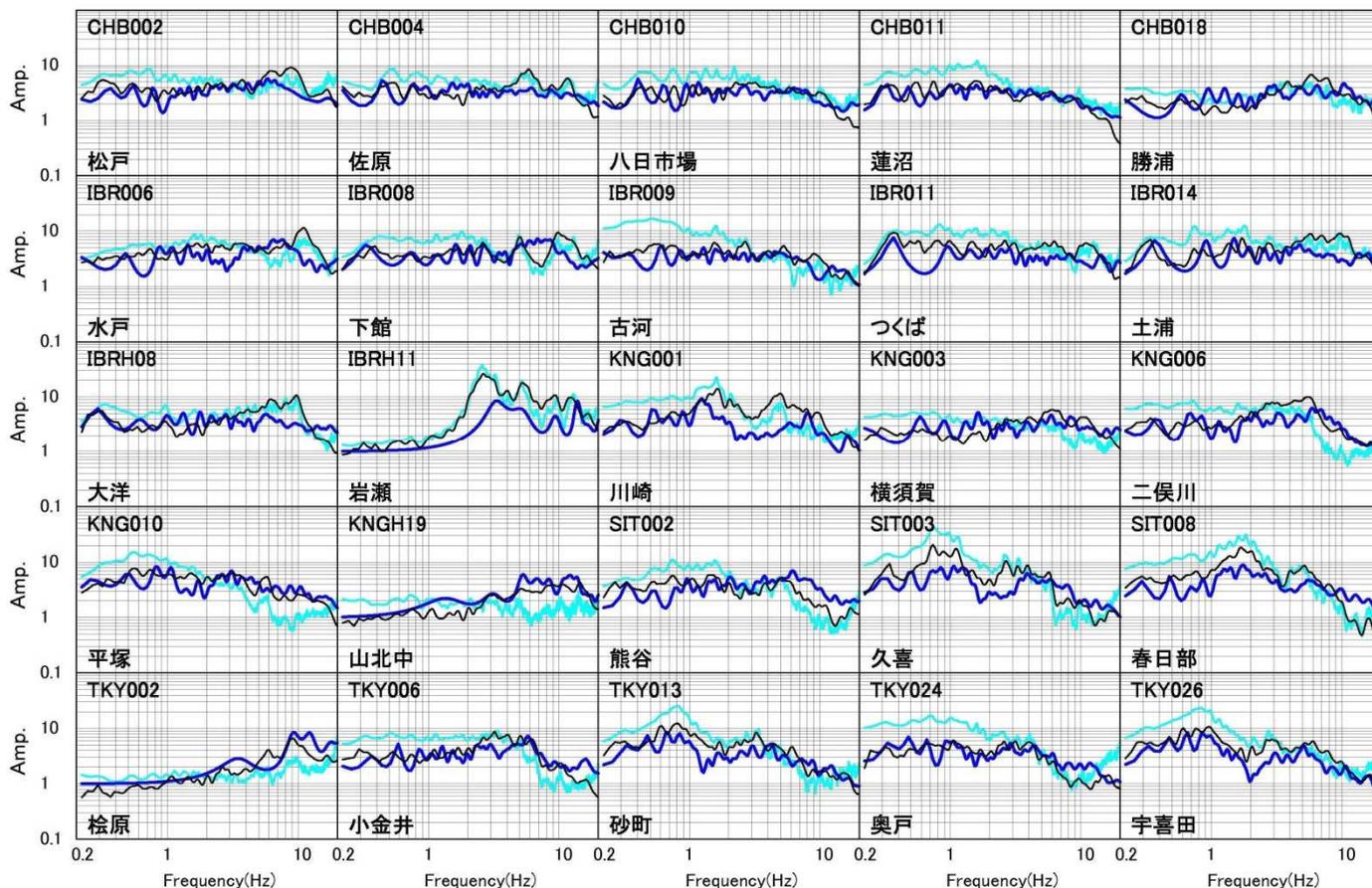


図 5-3-3b スペクトルインバージョン結果(増幅特性)

黒：本検討で求めた地震基盤からの観測サイト増幅特性

水色：野津・長尾(2005)が求めた観測サイト増幅特性

青：浅部・深部統合地盤構造モデルによる理論サイト増幅特性。Q値特性は、千葉県、茨城県の震度計データによる観測サイト増幅特性を用いて求めたQ値の同定解析結果の平均値を用いた。 $Q=V_s/10.6*f^{0.44}$ ($f=5\text{Hz}$ 以上は、 $V_s/10.6*5^{0.44}$ で一定)

5-4. 三次元的な計算手法による地震動の再現と比較「手順(4)」

修正した浅部・深部統合地盤構造モデルを用いて差分法による地震動シミュレーションを行い長周期成分の地震動の再現性によるモデルの検証を行った。ここでは1秒よりも長周期側の検証を行っているため、図5-4-1に示すように浅部地盤構造モデルを利用せず、 $V_s=350\text{ m/s}$ を解放基盤として計算した。ただし、比較対象の観測地震波形は、浅部地盤構造モデルデータに基づき一次元重複反射法を用いて、 $V_s=350\text{ m/s}$ 層の上面まで戻す処理を行っている。本検討の計算に用いた浅部・深部統合地盤構造モデルの物性値を表5-4-1に示す。

表 5-4-1 本検討で用いる地下構造モデルの物性値

	P 波速度 m/s	S 波速度 m/s	密度 g/m ³	Qs
1	1600	350	1850	70
2	1600	400	1850	80
3	1700	450	1900	90
4	1800	500	1900	100
5	1800	550	1900	110
6	2000	600	1900	120
7	2000	650	1950	130
8	2100	700	2000	140
9	2100	750	2000	150
10	2200	800	2000	160
11	2300	850	2050	170
12	2400	900	2050	180
13	2400	950	2100	190
14	2500	1000	2100	200
15	2500	1100	2150	220
16	2600	1200	2150	240
17	2700	1300	2200	260
18	3000	1400	2250	280
19	3200	1500	2250	300
20	3400	1600	2300	320
21	3500	1700	2300	340
22	3600	1800	2350	360
23	3700	1900	2350	380
24	3800	2000	2400	400
25	4000	2100	2400	400
26	4000	2100	2400	400
27	5000	2700	2500	400
28	4600	2900	2550	400
29	5000	2700	2500	400
30	5500	3100	2600	400
31	5500	3200	2650	400
32	5800	3400	2700	400
33	6400	3800	2800	400
34	7500	4500	3200	500
35	5000	2900	2400	200
36	6800	4000	2900	300
37	8000	4700	3200	500
38	5400	2800	2600	200
39	6500	3500	2800	300
40	8100	4600	3400	500

* Qs 値は、Qs=基本的には Vs/5 として設定。
 ■ 全国 1 次地下構造モデル(暫定版)
 □ 浅部・深部統合地盤構造モデルでモデル化されている主要な層

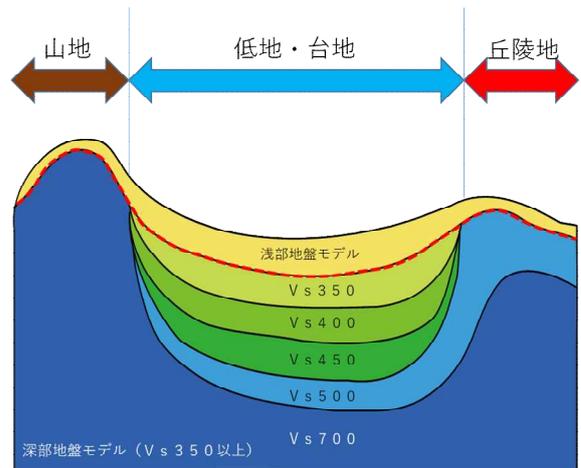


図5-4-1 計算に使用するモデルの範囲
 赤点線 (Vs=350m/s) を解放工学的基盤上面として理論波形計算を行った。比較対象の観測地震波形は、浅部地盤モデルデータに基づき、一次元重複反射法にて解放工学的基盤上面まで戻す処理を行って比較する。

- 25層 陸地のVp=4000m/s層を分類
 - 26層 海洋の反射法などにみられる4000m/s層を分類
 - 31層 地震基盤
 - 32層 上部地殻第2層
 - 33層 下部地殻
 - 34層 マントル
 - 35層 海洋性地殻第2層 (フィリピン海プレート)
 - 36層 海洋性地殻第3層 (フィリピン海プレート)
 - 37層 海洋性マントル (フィリピン海プレート)
 - 38層 海洋性地殻第2層 (太平洋プレート)
 - 39層 海洋性地殻第3層 (太平洋プレート)
 - 40層 海洋性マントル (太平洋プレート)
- * 海洋性地殻第2層は堆積層

差分計算のため、水平70m×鉛直35mのグリッド間隔の差分格子を作成した（表5-4-2）。Q値は基本的には、S波速度の1/5とし、参照周期を3秒とした。計算の対象とした地震は図5-4-2に示した5つの震源であり、茨城県、千葉県、栃木県、群馬県、埼玉県、東京都、神奈川県内のK-NETとKiK-netの197観測点での波形を出力した。比較の対象とする観測記録は、浅部・深部統合地盤構造モデルの浅部地盤構造モデルに基づいて一次元多重反射法を用いて補正し、解放工学的基盤上で評価した。

表5-4-2 計算の概要

構造モデル					
格子サイズ (m)					
第1領域					
dx1	dy1	dz1			
70	70	35			
格子数 (第2領域の格子サイズは第1領域の3倍)					
第1領域			第2領域		
nx1	ny1	nz1	nx2	ny2	nz2
3789	4146	231	1263	1382	400
計算時間間隔 (秒)					
0.003125					

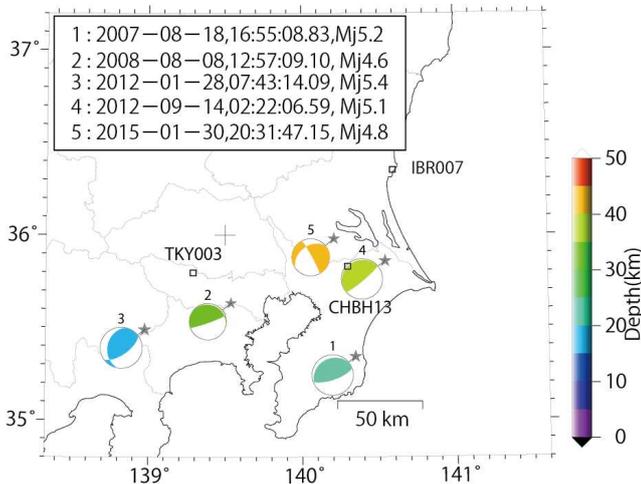


図5-4-2 計算に用いた地震

震源位置は気象庁一元化震源情報

震源メカニズム解・地震モーメントはF-netによるCMT解

● 差分法による検証について

差分法の計算結果の評価については、ここでは、観測記録 (data) に対する計算記録 (model) の再現性を評価する指標として、次式に示すGOF (=goodness-of-fit) およびCGOF (combined GOF) (Dreger et al., 2015) を用いた。GOFとCGOFは次式で表される。

$$GOF = \ln(\text{data}/\text{model})$$

$$CGOF = \frac{1}{2} \left\langle \left| \ln(\text{data}/\text{model}) \right| \right\rangle + \frac{1}{2} \left\langle \left| \ln(\text{data}/\text{model}) \right|^2 \right\rangle$$

CGOF式の右辺第一項はGOFの平均値の絶対値、第二項は絶対値の平均値 (つまり、平均と分散) を表している。指標値の計算には、水平2成分のフーリエスペクトルのベクトル合成値を用いている。

差分法による検証結果の例として、1観測点に対し、本検討モデル (V7_6と表記) の他、浅部・深部統合地盤構造モデルとして調整途中であった深部チューニングモデル (V7_4)、長周期地震動計算用モデル (V6_1)、中央防災会議 (2003) モデル (CDMC)、全国1次地下構造モデル (JIVSM)、J-SHIS-V2モデル (J-SHIS) を用いて求めたGOF値を図5-4-3に示す。図には、3つの周期帯域 (周期1~2秒、2~5秒、5~10秒) での平均 (黒実線) と標準偏差 (黒点線) も示している。平均値が0に近くても標準偏差が大きければ周期特性が合っていないことを意味する。

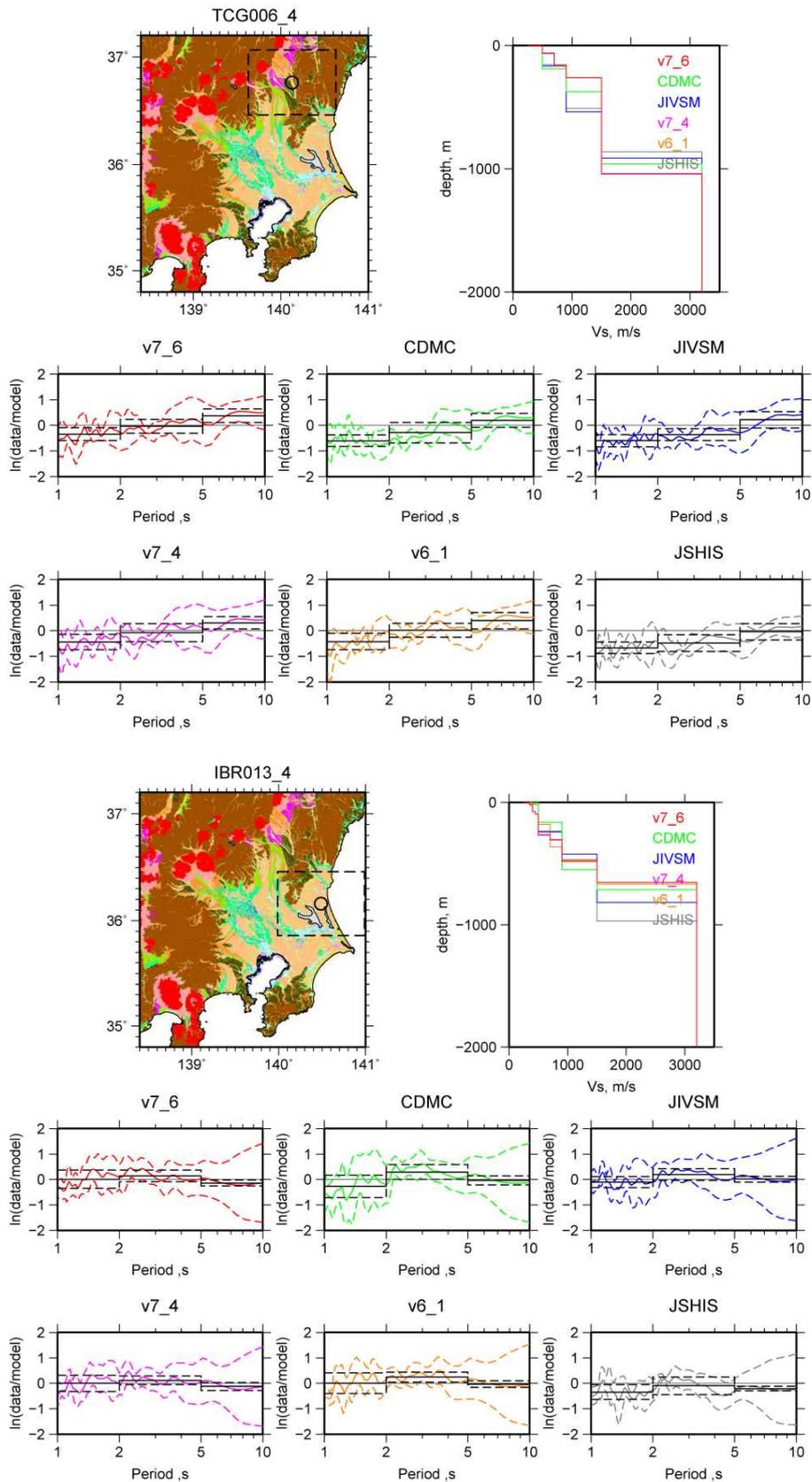


図5-4-3 差分法による検証結果例（上：K-NET TCG006小川観測点 下：IBR013銚田観測点）
 本検討モデル（V7_6）・内閣府（CDMC）・全国1次地下構造モデル（JIVSM）・長周期計算用モデル（V6_1）・
 J-SHIS-V2（J-SHIS）によるGOF値の比較。

モデル化した関東地域全体に対して、どのくらいスペクトルの合致度(CGOF)が向上したかを図5-4-4に示す。これは、5地震197地点に対して、観測記録 (data) と計算記録 (model) のCGOF値を観測点上に示したものである。カラーバーで示すように緑色であるほど、合致度が高いことを示している。深地盤構造モデルである、内閣府モデル (CDMC) や全国1次地下構造モデル (JIVSM) より、本検討モデルでは、CGOF値で示される合致度が高いことがわかる。

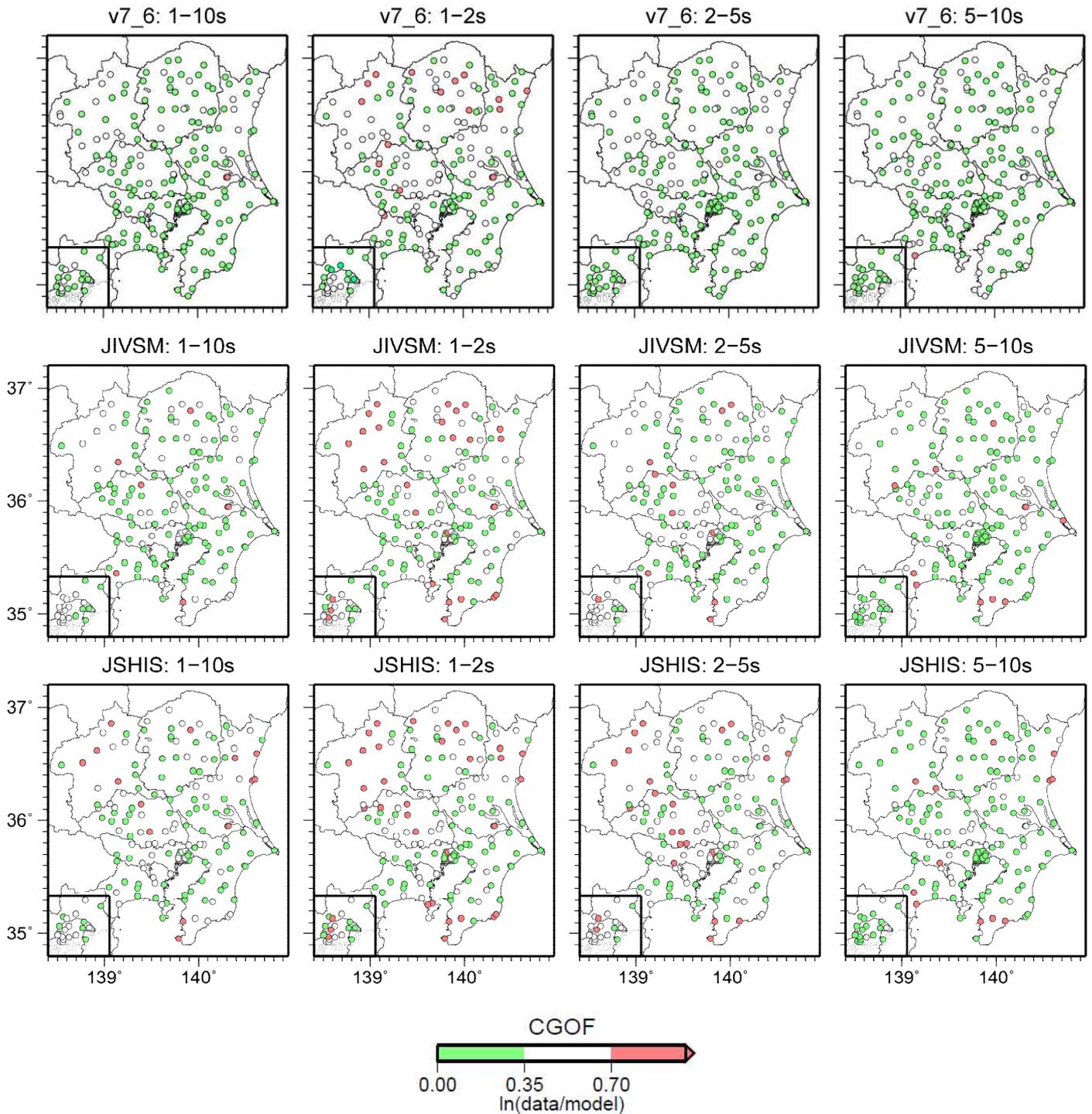
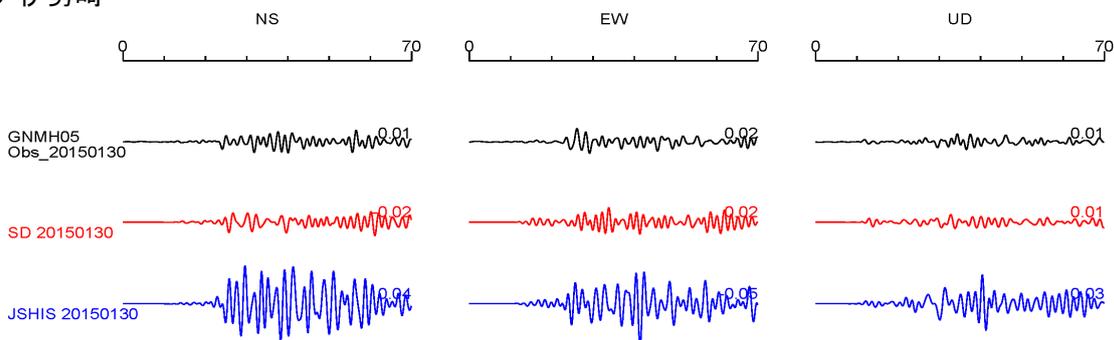


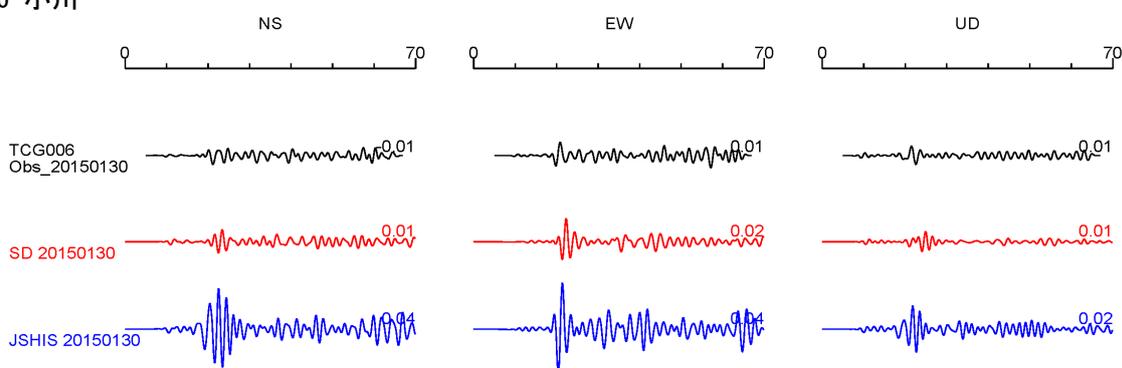
図5-4-4 本検討におけるモデル(v7_6)とJIVSM, J-SHISの全地震観測点のCGOF値

差分法の波形と観測記録の波形比較について図5-4-5に示す。このように、チューニングしたモデルに対して理論計算を行い、観測記録との合致度の比較・検討を行い、さらにチューニングを実施して、結果の改善を試みた。

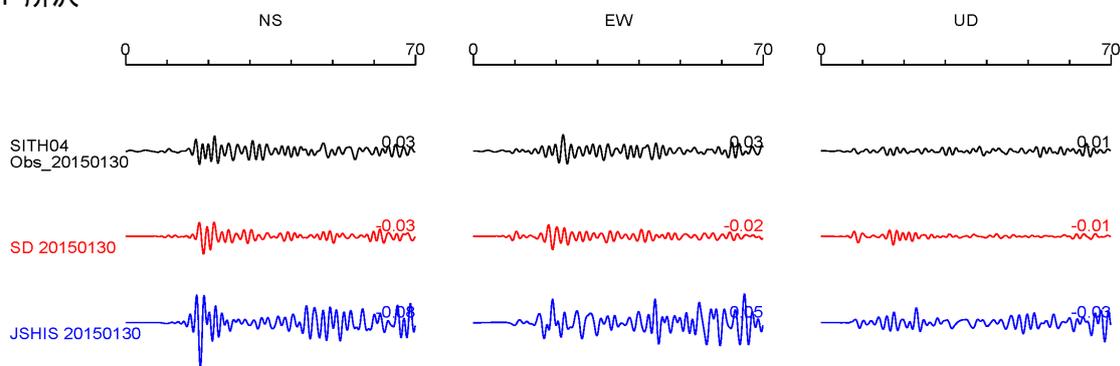
GNMH05 伊勢崎



TCG006 小川



SITH04 所沢



IBR017 江戸崎

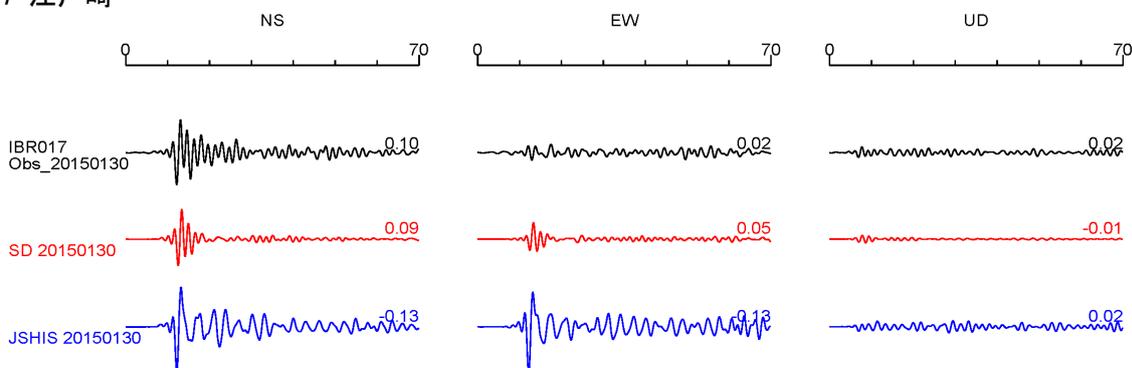


図5-4-5 観測記録と差分法による計算波形の比較例 (黒：地震観測記録 (数字は最大速度)
赤：本検討モデル、青：J-SHIS-V2モデル (地震：2015/1/30 20:31 Mj4.8)

6. 強震動予測に用いた地下構造モデル（本検討モデル）の特徴

● 特徴的な境界層の上面深さ分布と断面図

深部地盤構造モデルは、既往のモデルと比べ、地震基盤相当層($V_s=3200$ m/s)の深さ構造は、大きくは変わらないものの、広帯域化を行う上で重要な工学的基盤相当層である $V_s=350$ m/s 層を加えて評価を行ったことで、 $V_s=500\sim 900$ m/s の各層が大幅に修正され、周期および増幅特性が2秒よりも長周期で、これまでのモデルよりも良く合う結果となっている。それぞれの特徴的な境界層の上面深度を図6-1に示す。

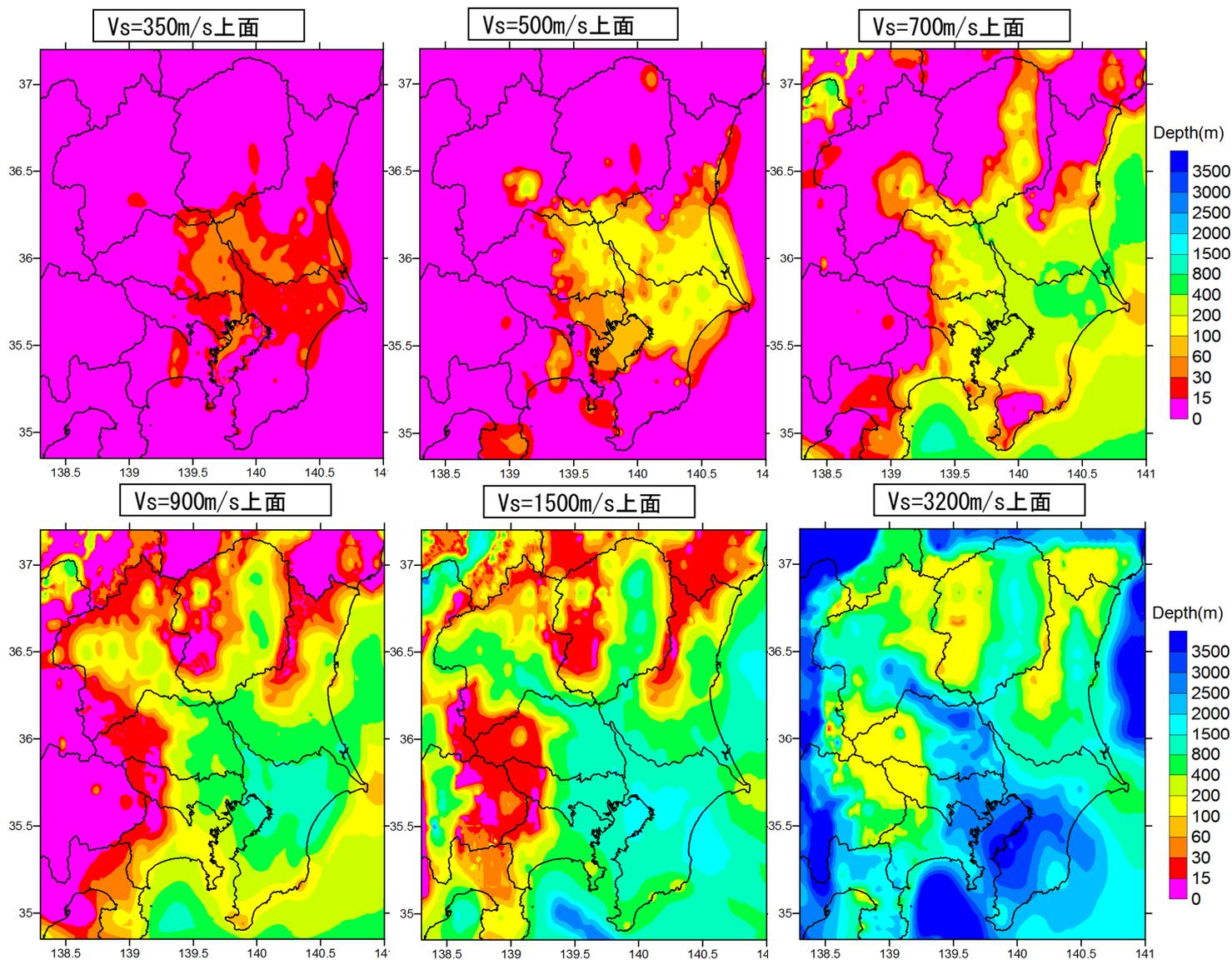


図6-1 本検討による浅部・深部統合地盤構造モデルの深部地盤のS波速度層上面深度
(上段左から $V_s=350, 500, 700$ m/s、下段左から $V_s=900, 1500, 3200$ m/s)
コンターの色と深さの凡例を右端に示す。

図 6-2 に本検討モデルを作成するために用いたモデル修正地点と、図 6-3 に示す断面図の位置を示す。モデル修正位置間の補間修正が必要な場合、移動平均 2.5km の平滑化を行った。

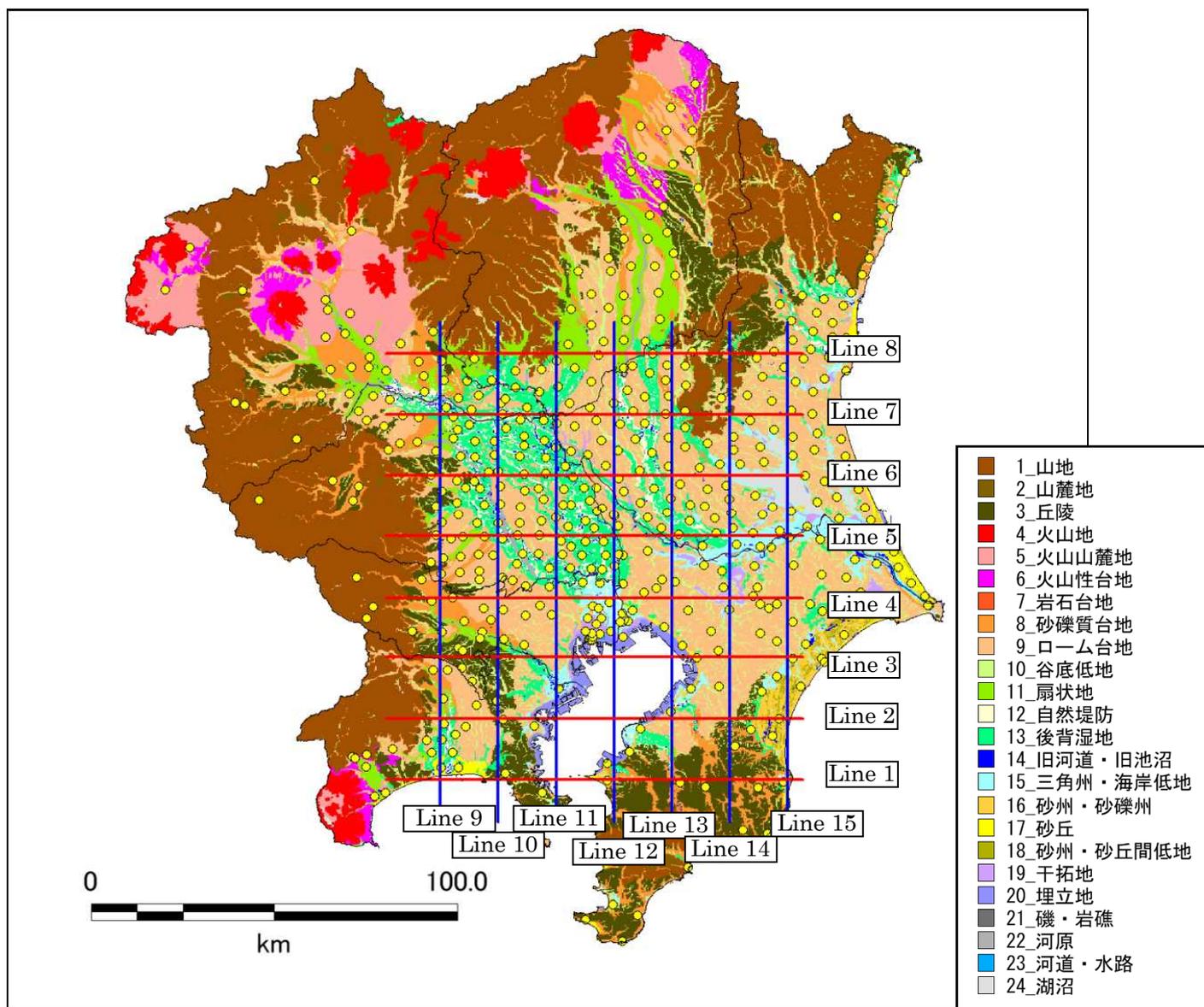


図6-2 ジョイントインバージョン等によるモデル修正地点（黄色）と図6-3の断面図位置。
基図は微地形分類（若松・松岡，2013）

西

東

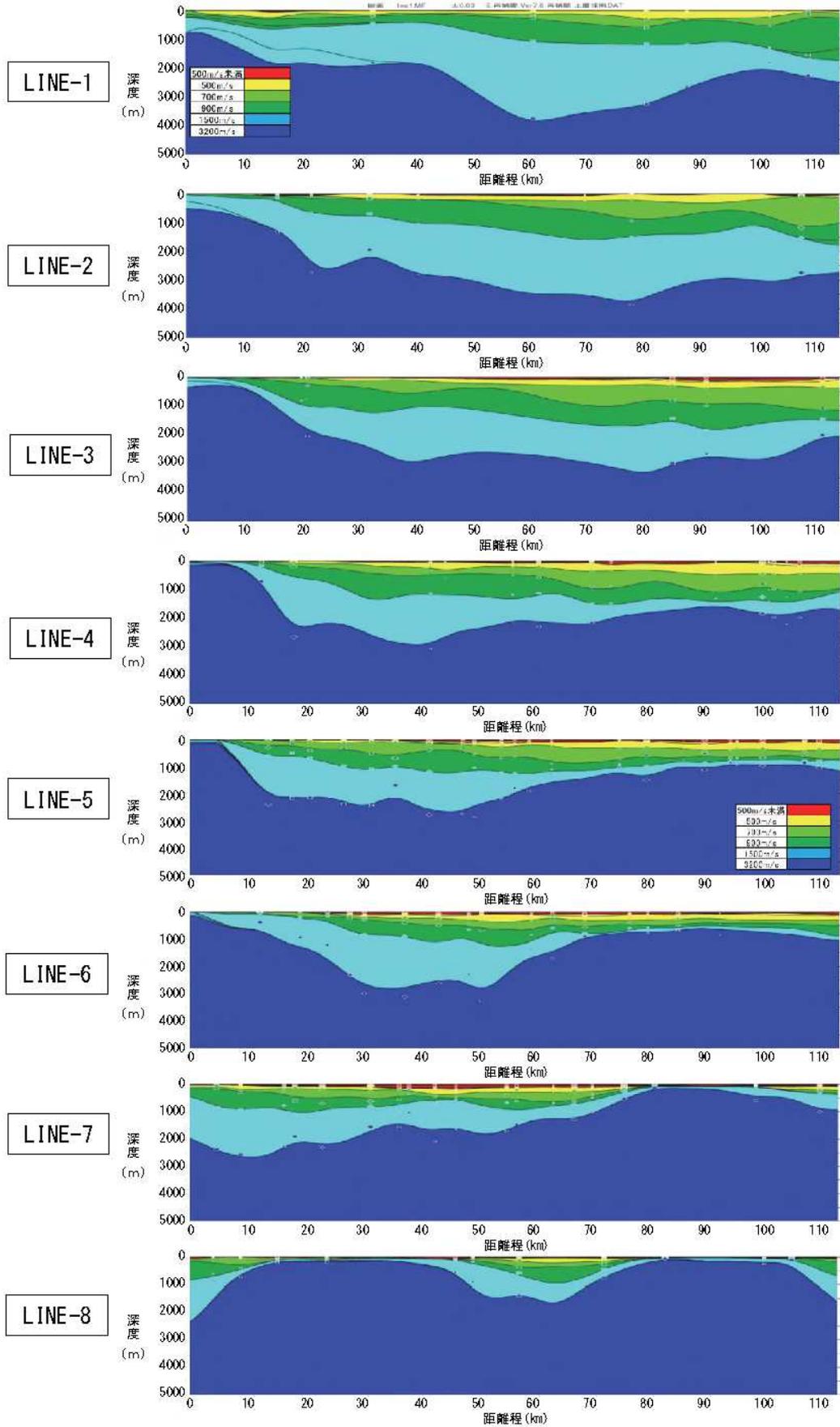


図 6-3a 本検討モデルの深部地盤断面図(東西断面：上からLINE-1～LINE-8)

北

南

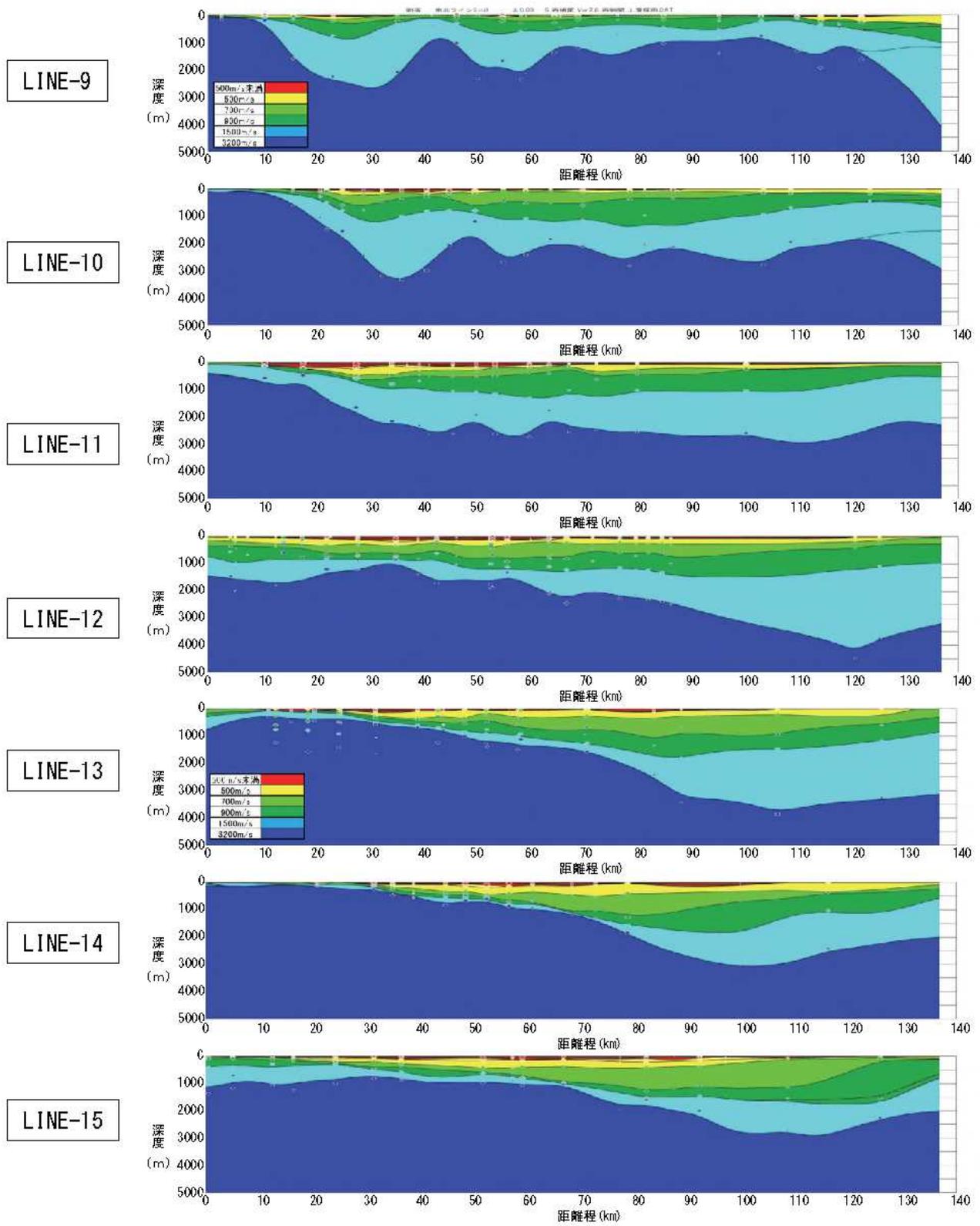


図 6-3b 本検討モデルの深部地盤断面図(南北断面：上からLINE-9~LINE-15)

● 反射法地震探査測線の解釈結果やブーゲー異常値との比較

反射法地震波探査断面（9測線）と微動データによる速度構造モデルの比較を行い、境界層の深さ分布に問題がないか確認を行った。3例を図に示す。

反射法地震探査断面と微動データによる速度モデルは、特に基盤の深度がよく対応し、絶対深度もおおむね良く対応している（図 6-4, 図 6-5, 図 6-6）。ただし、反射法断面で確認されているグラーベン構造等の中新統等の構造は不明瞭であった（図 6-5, 図 6-6）。

重力データと微動データの比較では、相対的な基盤の起伏と重力データの起伏がよく対応している。ただし、いくつかの断面では、トレンド成分を考慮する必要があると考えられる（例えば、図 6-7）。

また、この傾向は、重力データと反射法地震探査データの比較でも同様のことが指摘できるため、重力データのフィルター処理や、2層構造を仮定した重力基盤の解析結果との比較が必要であると考えている。

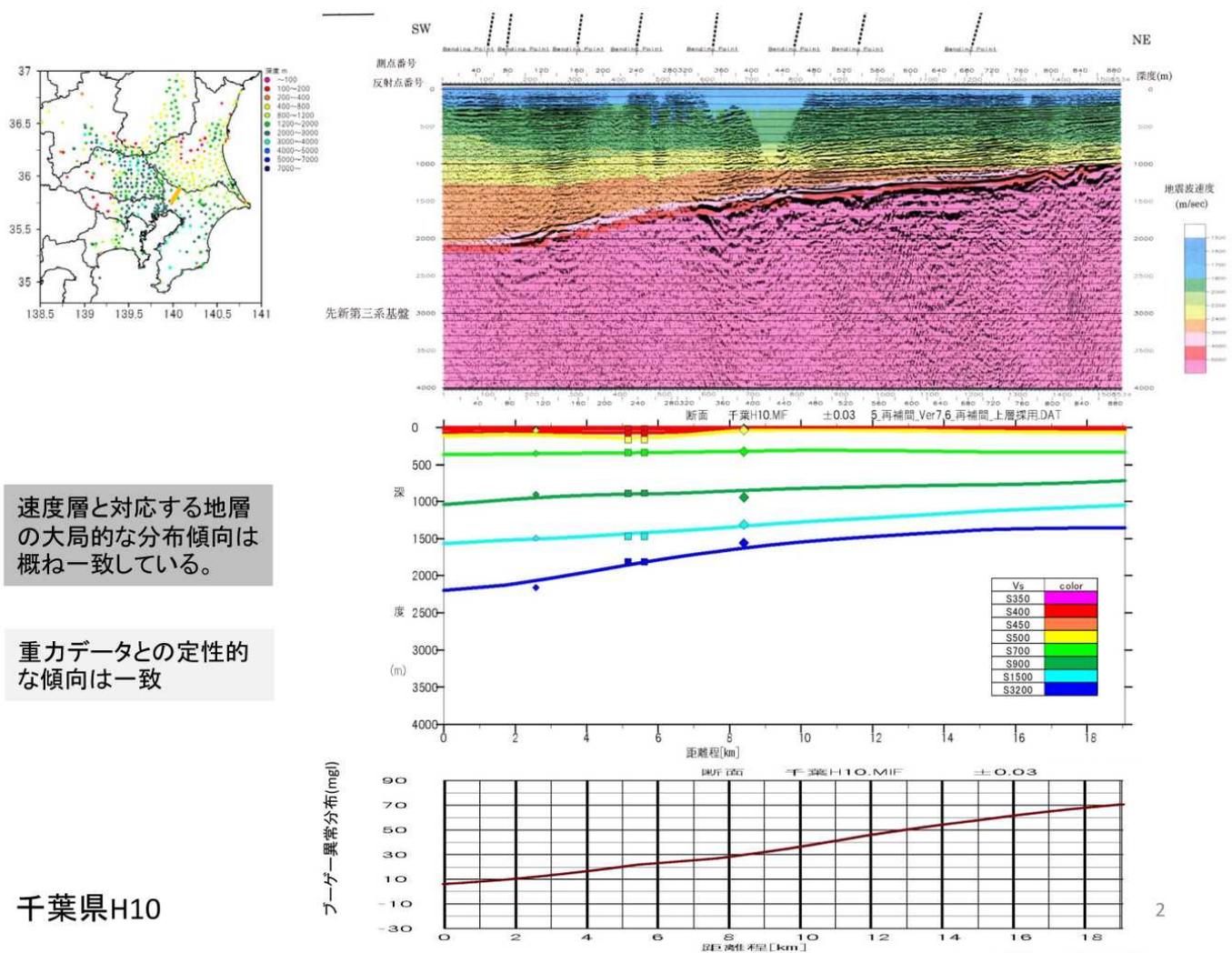
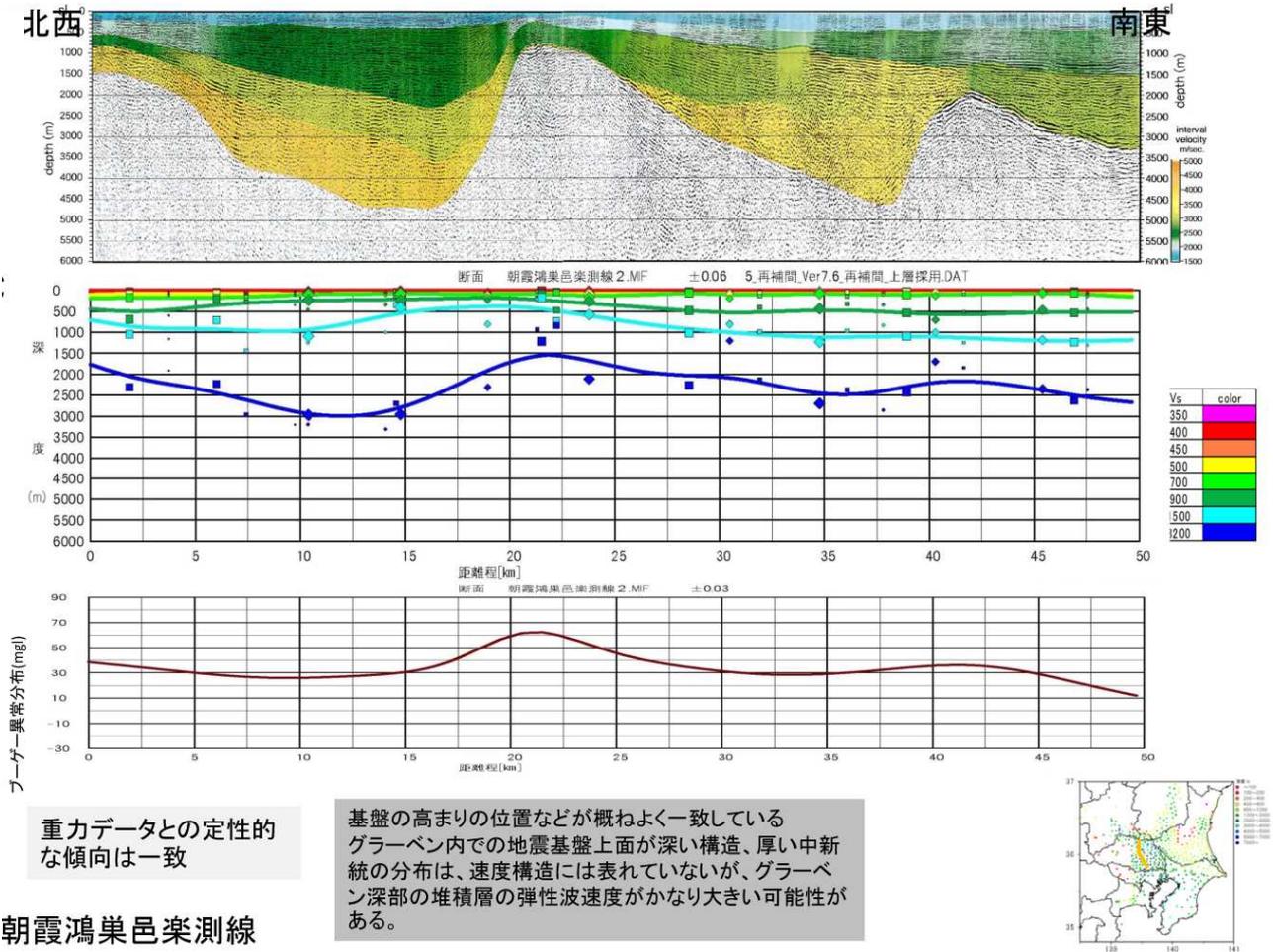


図 6-4 千葉北西部測線に対する反射法地震波探査断面と微動データで調整された速度層モデルの比較
 左上地図：微動観測点と反射法地震探査の測線（千葉県北西部にあるオレンジの線）
 右上：反射法地震探査断面（千葉県，1999）と解釈速度の凡例
 右中：微動データで調整された速度層モデル断面。線は各速度層の上面を表す（図内右下に凡例）。
 右下：対応する測線でのブーゲー異常分布（仮定密度2.67g/cm³；地質調査総合センター，2004）



重力データとの定性的な傾向は一致

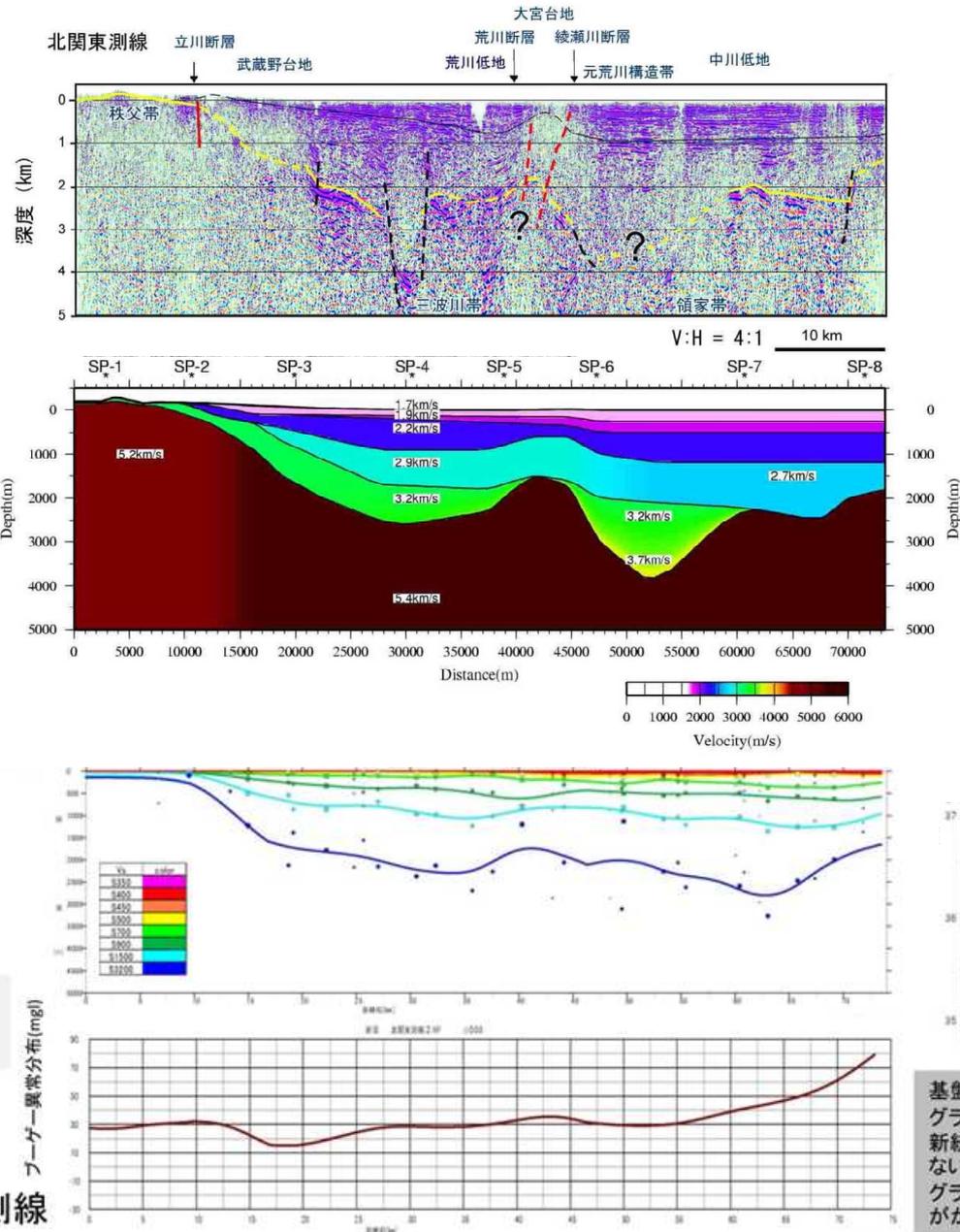
基盤の高まりの位置などが概ねよく一致している
 グラーベン内での地震基盤上面が深い構造、厚い中新統の分布は、速度構造には表れていないが、グラーベン深部の堆積層の弾性波速度がかなり大きい可能性がある。

朝霞鴻巣邑楽測線

図 6-5 朝霞鴻巣邑楽測線に対する反射法地震波探査断面と微動データで調整された速度層モデルとの比較

- 上：反射法地震波探査断面（高橋・他，2006）と解釈速度の凡例。
- 中：微動データで調整された速度層モデル断面。線は各速度層の上面を表す（図の右に凡例）。
- 下：ブーゲー異常分布（仮定密度 2.67g/cm^3 ；地質調査総合センター，2004）
- 右下地図：微動観測点と測線位置。

地震基盤面を示す速度層（中図の青線： $V_s=3200\text{m/s}$ ）と重力データとの定性的な傾向は一致。特に、基盤の高まりの位置（中と下図の中央位置）などが概ねよく一致している。反射断面図（最上図）で見られる地震基盤上面が深い構造は、速度構造（中図）には表れていない。



トレンド成分の除去が必要か？

北関東測線

基盤の高まりの位置は概ね対応グラベン内での深い地震基盤、厚い中新統の分布は、速度構造には表れていない。グラベン深部の堆積層の弾性波速度がかなり大きい可能性がある。

図 6-6 北関東測線に対する反射法地震波探査断面と微動データで調整された速度層モデルとの比較
 上(2図)：反射法地震波探査断面と解釈速度断面速度層モデル(文部科学省, 2006)
 中：微動データで調整された速度層モデル断面。線は各速度層の上面を表す(図中左下に凡例)。
 下：ブーゲー異常分布(仮定密度 2.67g/cm^3 ; 地質調査総合センター, 2004)
 右下地図：微動観測点と測線位置。
 地震基盤面を示す速度層(中図の青線: $V_s=3200\text{m/s}$)と重力データに見られる基盤の高まりの位置は、概ね一致している。反射断面解釈図(上から2番目の図)で見られる地震基盤上面が深い構造は、速度構造(中図)には表れていない。

<参考文献>

引用文献 (アルファベット順)

- Aoi, S. and H. Fujiwara (1999) : 3-D finite difference method using discontinuous grids, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 89, 918-930.
- Arai, H. and K. Tokimatsu (2004) : S-wave velocity profiling by inversion of microtremor H/V spectrum, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 94, 53-63, 2004.
- 馬場俊孝・伊藤亜紀・金田義行・早川俊彦・古村孝志 (2006) : 制御地震探査結果から構築した日本周辺海域下の 3 次元地震波速度構造モデル, 日本地球惑星科学連合大会講演予稿集, S111-006.
- 防災科学技術研究所 (2011) : 統合化地下構造データベースの構築 <地下構造データベース構築ワーキンググループ報告書>, pp. 5-15-5-48.
- 千葉県 (1999) : 平成10年度地震関係基礎調査交付金 千葉県地下構造調査 成果報告書.
<http://www.hp1039.jishin.go.jp/kozo/Chiba3frm.htm>
- 地質調査総合センター(編) (2004) : 日本重力CD-ROM (第2版) 数値地質図P-2.
- 中央防災会議 (2001) : 第10回東海地震に関する専門調査会報告, 平成13年11月27日.
- 中央防災会議 (2003) : 第16回東南海・南海地震等に関する専門調査会, 平成15年12月16日.
- 中央防災会議 (2006) : 日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会報告, 平成18年1月25日.
- Dreger, D. S., G. C. Beroza, S. M. Day, C. A. Goulet, T. H. Jordan, P. A. Spudich, and J. P. Stewart (2015) : Validation of the SCEC broadband platform V14.3 simulation methods using pseudospectral acceleration data, *Seism. Res. Lett.* 86, 39-47.
- 藤原広行・河合伸一・青井 真・森川信之・先名重樹・工藤暢章・大井昌弘・はお憲生・早川 讓・遠山信彦・松山尚典・岩本鋼司・鈴木晴彦・劉瑛 (2009) : 強震動評価のための全国深部構造モデル作成手法の検討, 防災科学技術研究所研究資料, 337, pp. 267.
- 福島美光・翠川三郎 (1994) : 周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的な Q^{-1} 値とそれに基づく地盤増幅率の評価, *日本建築学会論文集*, 460, 37-46.
- 岩淵洋・加藤茂・岸本秀人・楠勝治・渡辺一樹 (1995) : 東京湾北部の三次元マルチチャンネル音波探査, *水路部研究報告* 第31号, p.1.
- 岩淵洋・西川公・野田直樹・田賀傑・雪松隆雄 (1998) : 東京湾北部の海底断層調査, *水路部研究技報*, Vol. 16,
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2012) : 「長周期地震動予測地図」2012年試作版付録 全国1次地下構造モデル (暫定版)
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2017a) : 「全国地震動予測地図 2017年版」別冊 震源断層を特定した地震の強震動予測手法 (「レシピ」)
- 地震調査研究推進本部地震調査委員会 (2017b) : 「地下構造モデル作成の考え方」
- 海上保安庁水路部 (1973) : 5万分の1海底地質構造図「浦賀水道」, 第6363号1-S.
- 海上保安庁水路部 (1974) : 5万分の1海底地質構造図「東京湾北部」, 第6363号9-S.
- 海上保安庁水路部 (1995) : 海底地殻構造調査「東京湾」報告書
- 片岡正次郎・佐藤智美・松本俊輔・日下部毅明 (2006) : 短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式, *土木学会論文集 A*, 62, 4, 740-757.
- Kawase, H., F. J. Sanchez-Sesma, and S. Matsushima (2011) : The optimal use of horizontal-to-vertical spectral ratios of earthquake motions for velocity inversions based on diffuse-field theory for plane waves, *Bull. Seis. Soc. Am.*, 101, 2001-2014.
- 菊池真一・菊地隆男 (1991) : マルチチャンネル反射法音波探査記録からみた東京湾底浅層部の地質構造, *水路部研究報告*, 27, 59-95.
- 紺野克昭・大町達夫 (1995) : 常時微動の水平/上下スペクトル比を用いる増幅倍率の推定に適した平滑化とその適用例, *土木学会論文集*, No. 525/I-33, pp. 247-259.
- Ludwig, W. J., J. E. Nafe, and C. L. Drake (1970) : Seismic refraction, in *The Sea*, vol. 4, edited by A. E. Maxwell, pp. 53-84, Wiley-Interscience, New York.
- Matsubara, M., K. Obara, and K. Kasahara (2008) : Three-dimensional P- and S-wave velocity structures beneath the Japan Islands obtained by high-density seismic stations by seismic tomography, *Tectonophysics*, 454, 86-103.

- 三宅弘恵・瀬藤一起・古村孝志・稲垣賢亮・増田徹・翠川三郎 (2006) : 首都圏の強震動予測のための浅層地盤構造モデルの構築, 第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集, 214-217.
- 文部科学省 (2002) : 大都市大震災軽減化特別プロジェクト, 平成 15 年度 成果報告書, I.
- 文部科学省 (2006) : 「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」平成 17 年度 成果報告書, I.
- 野津厚・長尾毅 (2005) : スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料, 1112, pp. 56.
- 太田裕・後藤典俊 (1976) : S波速度を他の土質諸指標から推定する試み, 物理探査, 29, 4, 251-261.
- 尾崎正紀・木村克己 (2008) : 2 万 5 千分の 1 シームレス地質図「東京低地及び武蔵野台地東部」(暫定版), 地質調査総合センター研究資料集, no. 485.
- 領木邦浩 (1999) : 西南日本の 3 次元深部地盤構造と広域重力異常, 地震第 2 輯, 52, 51-63.
- Sato, H., N. Hirata, K. Koketsu, D. Okaya, S. Abe, R. Kobayashi, M. Matsubara, T. Iwasaki, T. Ito, T. Ikawa, T. Kawanaka, K. Kasahara, and S. Harder (2005) : Earthquake source fault beneath Tokyo, Science, 309, 462-464.
- 先名重樹・前田宜浩・稲垣賢亮・鈴木晴彦・神 薫・宮本賢治・松山尚典・森川信之・河合伸一・藤原広行 (2013) : 強震動評価のための千葉県・茨城県における浅部・深部統合地盤構造の検討, 防災科学技術研究所研究資料, Vol. 370, 3.
- 高橋雅紀・林広樹・笠原敬司・木村尚紀 (2006) : 関東平野西縁の反射法地震探査記録の地質学的解釈—とくに吉見変成岩の露出と利根川構造線の西方延長—, 地質学雑誌, vol. 112, 33-52.
- 時松孝次・新井洋 (1998) : レイリー波とラブ波の振幅比が微動の水平鉛直スペクトル比に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 511, 69-75.
- 東京都 (2005) : 平成 16 年度地震関係基礎調査交付金 千葉県地下構造調査 成果報告書.
<http://www.hp1039.jishin.go.jp/kozo/Tokyo9frm.htm>
- 東京都防災会議 (1977) : 東京直下地震に関する調査研究 (その 4) —活断層および地震活動状況等に関する考察—, 329pp.
- 若松加寿江・松岡昌志 (2013) : 全国統一基準による地形・地盤分類 250m メッシュマップの構築とその利用, 日本地震工学会誌, 18, 33-38.
- 山中浩明・石田 寛 (1995) : 遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析, 日本建築学会構造系論文集, 468, 9-17.
- 山中浩明・大堀道広・翠川三郎 (2009) : 地震記録に基づく地盤増幅特性の逆解析による関東平野のシームレス S 波速度構造モデルの推定, 日本建築学会学術講演梗概集, B-2, 構造 II, 47-48.