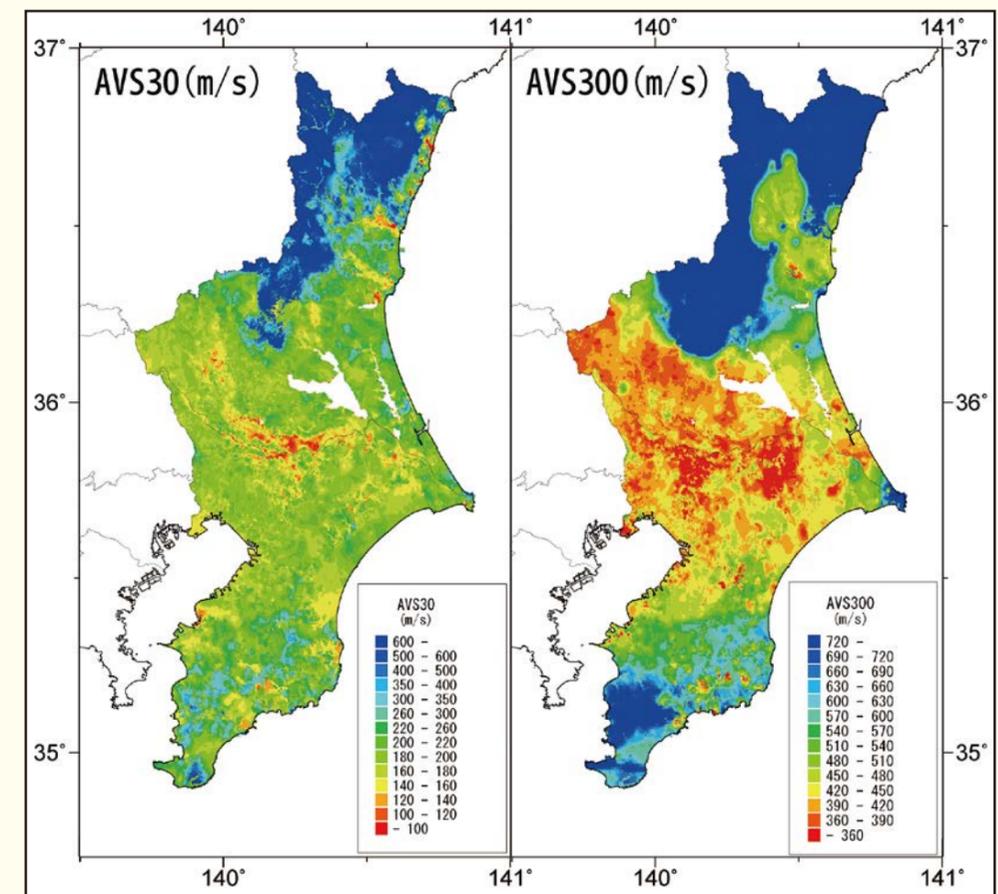


強震動評価のための千葉県・茨城県における
浅部・深部統合地盤モデルの検討

Modeling of the Subsurface Structure from the Seismic Bedrock
to the Ground Surface for a Broadband Strong Motion
Evaluation in Chiba and Ibaraki Prefecture



防災科学技術研究所研究資料

第三七〇号

強震動評価のための千葉県・茨城県における浅部・深部地盤統合モデルの検討

防災科学技術研究所

防災科学技術研究所研究資料

- 第 300 号 強震ネットワーク 強震データ Vol. 21 (平成 18 年 No. 1) (CD-ROM). 2007 年 3 月発行
- 第 301 号 強震ネットワーク 強震データ Vol. 22 (平成 18 年 No. 2) (CD-ROM). 2007 年 3 月発行
- 第 302 号 長岡における積雪観測資料 (30) (2005. 11 ~ 2006. 3) 37pp. 2007 年 3 月発行
- 第 303 号 2003 年十勝沖地震の観測記録を用いた強震動予測手法の検証 (CD-ROM 版). 2007 年 3 月発行
- 第 304 号 アジア・太平洋国際地震・火山観測網構築計画に関する事前調査 96pp. 2007 年 3 月発行
- 第 305 号 新庄における気象と降積雪の観測 (2005/06 年冬期) 45pp. 2007 年 3 月発行
- 第 306 号 地震荷重を受ける減肉配管の破壊過程解明に関する研究報告書 78pp. 2007 年 3 月発行
- 第 307 号 根尾谷断層水鳥地区における深層ボーリング調査と地殻応力測定 (付録 CD-ROM) 33pp. 2007 年 8 月発行
- 第 308 号 地すべり地形分布図 第 32 集「松山・宇和島」26 葉 (5 万分の 1). 2007 年 9 月発行
- 第 309 号 地すべり地形分布図 第 33 集「大分」18 葉 (5 万分の 1). 2007 年 11 月発行
- 第 310 号 Geological and Logging Data of the NIED wells, Japan -Active fault, Seismogenic zone, Hingeline – 29pp. 2008 年 3 月発行
- 第 311 号 新庄における気象と降積雪の観測 (2006/07 年冬期) 35pp. 2007 年 11 月発行
- 第 312 号 地すべり地形分布図 第 34 集「延岡・宮崎」19 葉 (5 万分の 1). 2008 年 3 月発行
- 第 313 号 微動探査観測ツールの開発 その 1 – 常時微動解析ツール – (付録 CD-ROM) 133pp. 2008 年 3 月発行
- 第 314 号 距離減衰式による地震動予測ツールの開発 (付録 CD-ROM) 66pp. 2008 年 3 月発行
- 第 315 号 地すべり地形分布図 第 35 集「八代」18 葉 (5 万分の 1). 2008 年 3 月発行
- 第 316 号 地すべり地形分布図 第 36 集「熊本」15 葉 (5 万分の 1). 2008 年 3 月発行
- 第 317 号 2004 年新潟県中越地震による斜面変動分布図 (付録 CD-ROM) 37pp. 2008 年 3 月発行
- 第 318 号 強震ネットワーク 強震データ Vol. 23 (平成 19 年 No. 1) (CD-ROM 版). 2008 年 3 月発行
- 第 319 号 強震ネットワーク 強震データ Vol. 24 (平成 19 年 No. 2) (CD-ROM 版). 2008 年 3 月発行
- 第 320 号 平成 17 年度大都市大震災軽減化特別プロジェクト II 木造建物実験 - 震動台活用による構造物の耐震性向上研究 - (付録 CD-ROM) 152pp. 2008 年 3 月発行
- 第 321 号 平成 17 年度大都市大震災軽減化特別プロジェクト 実大 6 層 RC 建物実験報告書 (付録 CD-ROM) 46pp. 2008 年 3 月発行
- 第 322 号 地すべり地形分布図 第 37 集「福岡・中津」24 葉 (5 万分の 1). 2008 年 8 月発行
- 第 323 号 地すべり地形分布図 第 38 集「長崎・唐津」29 葉 (5 万分の 1). 2008 年 9 月発行
- 第 324 号 地すべり地形分布図 第 39 集「鹿児島」24 葉 (5 万分の 1). 2008 年 11 月発行
- 第 325 号 地すべり地形分布図 第 40 集「一関・石巻」19 葉 (5 万分の 1). 2009 年 2 月発行
- 第 326 号 新庄における気象と降積雪の観測 (2007/08 年冬期) 33pp. 2008 年 12 月発行
- 第 327 号 防災科学技術研究所 45 年のあゆみ (付録 DVD) 224pp. 2009 年 3 月発行
- 第 328 号 地すべり地形分布図 第 41 集「盛岡」18 葉 (5 万分の 1). 2009 年 3 月発行
- 第 329 号 地すべり地形分布図 第 42 集「野辺地・八戸」24 葉 (5 万分の 1). 2009 年 3 月発行
- 第 330 号 地域リスクとローカルガバナンスに関する調査報告 53pp. 2009 年 3 月発行
- 第 331 号 E-Defense を用いた実大 RC 橋脚 (C1-1 橋脚) 震動破壊実験研究報告書 -1970 年代に建設された基部曲げ破壊タイプの RC 橋脚震動台実験 - (付録 DVD) 107pp. 2009 年 1 月発行
- 第 332 号 強震ネットワーク 強震データ Vol. 25 (平成 20 年 No. 1) (CD-ROM 版). 2009 年 3 月発行
- 第 333 号 強震ネットワーク 強震データ Vol. 26 (平成 20 年 No. 2) (CD-ROM 版). 2009 年 3 月発行
- 第 334 号 平成 17 年度大都市大震災軽減化特別プロジェクト II 地盤基礎実験 - 震動台活用による構造物の耐震性向上研究 - (付録 CD-ROM) 62pp. 2009 年 10 月発行
- 第 335 号 地すべり地形分布図 第 43 集「函館」14 葉 (5 万分の 1). 2009 年 12 月発行
- 第 336 号 全国地震動予測地図作成手法の検討 (7 分冊 + CD-ROM 版). 2009 年 11 月発行
- 第 337 号 強震動評価のための全国深部地盤構造モデル作成手法の検討 (付録 DVD). 2009 年 12 月発行
- 第 338 号 地すべり地形分布図 第 44 集「室蘭・久遠」21 葉 (5 万分の 1). 2010 年 3 月発行
- 第 339 号 地すべり地形分布図 第 45 集「岩内」14 葉 (5 万分の 1). 2010 年 3 月発行
- 第 340 号 新庄における気象と降積雪の観測 (2008/09 年冬期) 33pp. 2010 年 3 月発行
- 第 341 号 強震ネットワーク 強震データ Vol. 27 (平成 21 年 No. 1) (CD-ROM 版). 2010 年 3 月発行
- 第 342 号 強震ネットワーク 強震データ Vol. 28 (平成 21 年 No. 2) (CD-ROM 版). 2010 年 3 月発行
- 第 343 号 阿寺断層系における深層ボーリング調査の概要と岩石物性試験結果 (付録 CD-ROM) 15pp. 2010 年 3 月発行

防災科学技術研究所研究資料

- 第 344 号 地すべり地形分布図 第 46 集「札幌・苫小牧」19 葉 (5 万分の 1). 2010 年 7 月発行
- 第 345 号 地すべり地形分布図 第 47 集「夕張岳」16 葉 (5 万分の 1). 2010 年 8 月発行
- 第 346 号 長岡における積雪観測資料 (31) (2006/07, 2007/08, 2008/09 冬期) 47pp. 2010 年 9 月発行
- 第 347 号 地すべり地形分布図 第 48 集「羽幌・留萌」17 葉 (5 万分の 1). 2010 年 11 月発行
- 第 348 号 平成 18 年度 大都市大震災軽減化特別プロジェクト実大 3 層 RC 建物実験報告書 (付録 DVD) 68pp. 2010 年 8 月発行
- 第 349 号 防災科学技術研究所による深層掘削調査の概要と岩石物性試験結果 (足尾・新宮・牛伏寺) (付録 CD-ROM) 12pp. 2010 年 8 月発行
- 第 350 号 アジア防災科学技術情報基盤 (DRH-Asia) コンテンツ集 266pp. 2010 年 12 月発行
- 第 351 号 新庄における気象と降積雪の観測 (2009/10 年冬期) 31pp. 2010 年 12 月発行
- 第 352 号 平成 18 年度 大都市大震災軽減化特別プロジェクト II 木造建物実験 - 震動台活用による構造物の耐震性向上研究 - (付録 CD-ROM) 120pp. 2011 年 1 月発行
- 第 353 号 地形・地盤分類および常時微動の H/V スペクトル比を用いた地震動のスペクトル増幅率の推定 242pp. 2011 年 1 月発行
- 第 354 号 地震動予測地図作成ツールの開発 (付録 DVD) 155pp. 2011 年 5 月発行
- 第 355 号 ARTS により計測した浅間山の火口内温度分布 (2007 年 4 月から 2010 年 3 月) 28pp. 2011 年 1 月発行
- 第 356 号 長岡における積雪観測資料 (32) (2009/10 冬期) 29pp. 2011 年 2 月発行
- 第 357 号 浅間山鬼押出火山観測井コア試料の岩相と層序 (付録 DVD) 32pp. 2011 年 2 月発行
- 第 358 号 強震ネットワーク 強震データ Vol. 29 (平成 22 年 No. 1) (CD-ROM 版). 2011 年 2 月発行
- 第 359 号 強震ネットワーク 強震データ Vol. 30 (平成 22 年 No. 2) (CD-ROM 版). 2011 年 2 月発行
- 第 360 号 K-NET・KiK-net 強震データ (1996 – 2010) (DVD 版 6 枚組). 2011 年 3 月発行
- 第 361 号 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> 平成 23 年 3 月 238pp. 2011 年 3 月発行
- 第 362 号 地すべり地形分布図 第 49 集「旭川」16 葉 (5 万分の 1). 2011 年 11 月発行
- 第 363 号 長岡における積雪観測資料 (33) (2010/11 冬期) 29pp. 2012 年 2 月発行
- 第 364 号 新庄における気象と降積雪の観測 (2010/11 年冬期) 45pp. 2012 年 2 月発行
- 第 365 号 地すべり地形分布図 第 50 集「名寄」16 葉 (5 万分の 1). 2012 年 3 月発行
- 第 366 号 浅間山高峰火山観測井コア試料の岩相と層序 (付録 CD-ROM) 30pp. 2012 年 2 月発行
- 第 367 号 防災科学技術研究所による関東・東海地域における水圧破碎井の孔井検層データ 29pp. 2012 年 3 月発行
- 第 368 号 台風災害被害データの比較について (1951 年 ~ 2008 年, 都道府県別資料) (付録 CD-ROM) 19pp. 2012 年 5 月発行
- 第 369 号 E-Defense を用いた実大 RC 橋脚 (C1-5 橋脚) 震動破壊実験研究報告書 - 実在の技術基準で設計した RC 橋脚の耐震性に関する震動台実験及びその解析 - (付録 DVD) 64pp. 2012 年 10 月発行

- 編集委員会 -		防災科学技術研究所研究資料 第 370 号
(委員長)	納口恭明	
(委員)	實淵哲也	編集兼 独立行政法人 発行者 防災科学技術研究所 〒 305-0006 茨城県つくば市天王台 3-1 電話 (029)863-7635 http://www.bosai.go.jp/
	鈴木真一 本吉弘岐	
(事務局)	吉田則夫	印刷所 朝日印刷株式会社 茨城県つくば市東 2-11-15
	鈴木比奈子	
(編集・校正)	樋山信子	

© National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention 2013

※防災科学技術研究所の刊行物については、ホームページ (<http://dil-opac.bosai.go.jp/publication/index.html>) をご覧下さい。

 表紙図 …… 本研究資料で作成した千葉県・茨城県の浅部・深部統合地盤モデルによる、深さ 30 m までの平均 Vs 速度 (AVS30) (左図) と深さ 300 m までの平均 Vs 速度 (AVS300) の (右図)

強震動評価のための千葉県・茨城県における浅部・深部統合地盤モデルの検討

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*

Modeling of the Subsurface Structure from the Seismic Bedrock to the Ground Surface for a Broadband Strong Motion Evaluation in Chiba and Ibaraki Prefecture

Shigeeki SENNA*, Takahiro MAEDA*, Yoshiaki INAGAKI**, Haruhiko SUZUKI**, Kaoru JIN**,
Kenji MIYAMOTO**, Hisanori MATSUYAMA**, Nobuyuki MORIKAWA*,
Shinichi KAWAI*, and Hiroyuki FUJIWARA*

* *Disaster Prevention System Research Department,*
National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Japan
senna@bosai.go.jp, tmaeda@bosai.go.jp, inagaki-yoshiaki@oyonet.oyo.co.jp,
matuyama-hisanor@oyonet.oyo.co.jp, suzuki-haruhiko@oyonet.oyo.co.jp, jin-kaoru@oyonet.oyo.co.jp,
miyamoto-kenji@oyonet.oyo.co.jp, morikawa@bosai.go.jp, kawai@bosai.go.jp, fujiwara@bosai.go.jp

Abstract

The structure model created now was not created for earthquake motion evaluation of a broadband. In this study, a detailed subsurface structure with about 250 m intervals, was obtained based on microtremor measurements carried on in the whole area of Chiba and Ibaraki Prefecture. An initial ground structural model was made by borehole data offered from the Chiba and Ibaraki prefecture. The reverse-analysis by the H/V spectral ratio and the phase velocity was applied on the initial model. A final structural model was made from statistic averaging the individual S wave velocity at the same geological layer. The spectral amplification rate obtained from our model is consistent with that of earthquake ground motion recorded by strong ground motion observation point. By these data, a report of the structure model creation technique, and the data about observations and data were published. Moreover, it has dedicated to CD-ROM also about the created structure model data.

Key words : Velocity structure model, Microtremor survey, Strong motion evaluation, Borehole data.

地盤構造モデル作成の現状は、工学的基盤 ($V_s=300 \sim 700$ (m/s) 程度) よりも深い地下構造 (深部地盤構造) については、J-SHIS にも公開されているように全国一律である程度の結果の検証作業がされているが、浅い地盤構造モデルは全国的に整備されている状況にはない。また、深部地盤モデルが対象としている地震動の周波数帯域は、1 秒程度以上の長周期であり、震度予測などに必要な短周期側の情報は深部地盤モデルには十分には含まれていない。一方、工学的基盤以浅の浅い地盤構造モデルについては、ボーリングデータはあるものの、PS 検層などの情報も公開されているものは少ないため、地震動解析に必要な物性値を十分に検討できる状況になく、物性値に関する検証作業がほとんどなされていない状況にある。本研究資料では、千葉県と茨城県全域において、浅部と深部地盤の両方に影響のある周期付近 (0.5 ~ 2 秒) の物性値を明瞭にするための地震観測データ、微動観測データおよびボーリングデータ等を出来る限り収集し、浅部・深部を接合した上での地盤モデルの検討を行い、250 m メッシュ単位の地盤構造モデルを作成した。本資料では、そのうち、地盤構造モデル作成手法の報告および観測結果についてのデータと資料を掲載した。また、作成した地盤構造モデルデータについても CD-ROM に納めている。

* 独立行政法人 防災科学技術研究所 社会防災システム研究領域

** 応用地質株式会社

研究資料 370 号
強震動評価のための千葉県・茨城県における浅部・深部統合地盤モデルの検討

＜目 次＞

1. はじめに	1
1-1. 浅部・深部統合地盤モデル作成に関する取り組みについて	1
2. 初期モデルとして使用する深部および浅部地下構造モデルについて	5
3. 常時微動観測データの収集と解析について	9
3-1. 微動観測の概要	9
3-2. 常時微動測定結果(解析)について	14
4. 地震動データ(R/V)の解析	19
5. 速度構造解析および地盤構造作成の流れ	31
5-1. 修速度構造解析の概要	31
5-2. 初期モデルにおける層の結合方法	32
5-2-1. 既往メッシュ地盤モデルが未作成地域のモデル作成方針	35
5-2-2. 深部地盤モデルへのVs700m/s層の挿入方法	35
5-3. 速度構造解析方法	36
5-4. 解析手順	38
5-5. 鋭いピークのH/Vスペクトルに対する対処について	39
5-6. 高次モードの取り扱い	45
6. サイト増幅特性の推定	64
7. 千葉県・茨城県の深部地盤構造モデルの作成結果	79
8. 差分法による検証	85
9. 千葉・茨城県の浅部・深部統合地盤モデルの作成	91
10. 常時微動のH/Vスペクトル比と浅部・深部統合地盤モデルの位相速度を用いた、ジョイントインバージョンについて	94
11. まとめ	115

<参考文献>	115
--------------	-----

< APPENDIX >

付録 1. 微動アレイ観測点と解析位相速度等結果一覧	117
----------------------------------	-----

付録 2. 単点による微動観測点と H/V スペクトル比解析結果一覧	255
--	-----

付録 3. 浅部・深部統合地盤モデル作成状況	333
------------------------------	-----

(地質・土質地盤モデル断面・層相別深度)

<謝辞>	407
------------	-----

データ CD 付き(地盤モデルデータ)

1. はじめに

強震動評価の高度化のため、0.1 秒から 10 秒程度の広帯域の地震動特性を評価できるような地盤モデルを構築していくためには、これまで別々にモデル化を実施してきた浅部地盤モデルと深部地盤モデルを統合し、観測記録を再現できるようなモデルの構築が不可欠である。そのため、本検討では、浅部と深部地盤の両方に影響のある周期付近 (0.5~2 秒) を十分説明する上で重要となる、ボーリングデータおよび物性値データ (主に微動観測データ) を収集した上で、浅部・深部を接合した地盤モデルの検討を実施した。本研究資料においては、千葉県・茨城県を結合した構造モデル検討について報告し、観測した微動観測データ (解析状況) や初期地盤構造について付録として掲載した。なお、これらの検討は文科省地震調査研究推進本部における「地下構造モデル検討分科会」にて議論された内容に基づいて編集している。

1-1. 浅部・深部統合地盤モデル作成に関する取り組みについて

現在、防災科研において、運営費交付金事業、文科省における研究委託事業「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト(H19-H23)」(以下、首都直下) および、「ひずみ集中帯の重点的調査観測・研究(H20-H24)」(以下、ひずみ集中帯) 等において本検討を実施済みである。防災科研においては下記に示す、1) 広域版の i) ~ iii) に示す各県全域において、浅部・深部統合地盤モデルの作成手法の検討を実施、今後、南関東全域についても検討を行う予定である。また、モデル化手法の検討については、下記の 2) 地域版に示す、iii), iv) の都市においても、より詳細な検討として自治体との共同研究や既往の研究を参考に検討するものとする (図 1 参照)。本検討における浅部・深部地盤モデル構築で対象としている周期領域の概略については図 2-1・図 2-2 に示す。

1) 浅部・深部統合地盤構造モデルの検討 (広域版)

i) 千葉県・茨城県全域 (首都直下) ii) 新潟県全域 (ひずみ集中帯)

2) 浅部・深部統合地盤構造モデルの検討 (地域版) (注: 主に自治体との共同研究)

iii) 神奈川県藤沢市 iv) 茨城県つくば市

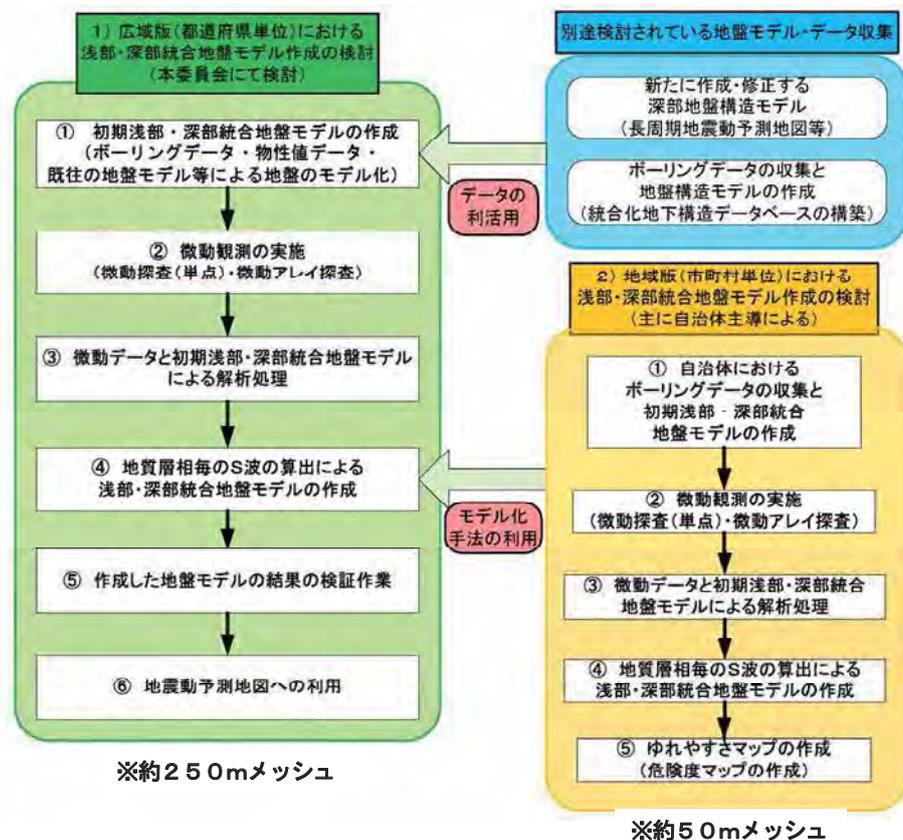


図 1 浅部・深部統合地盤モデルの手法検討の流れ (概略)

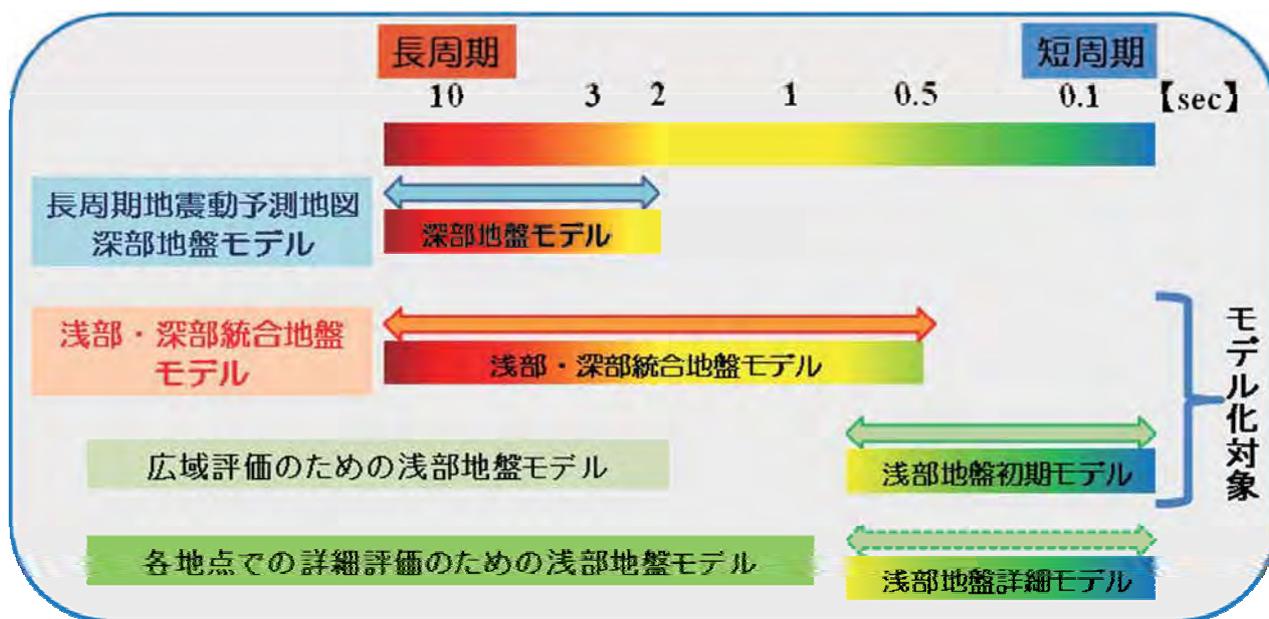


図 2-1 各地盤モデル作成に関する対象周期との関係概念図

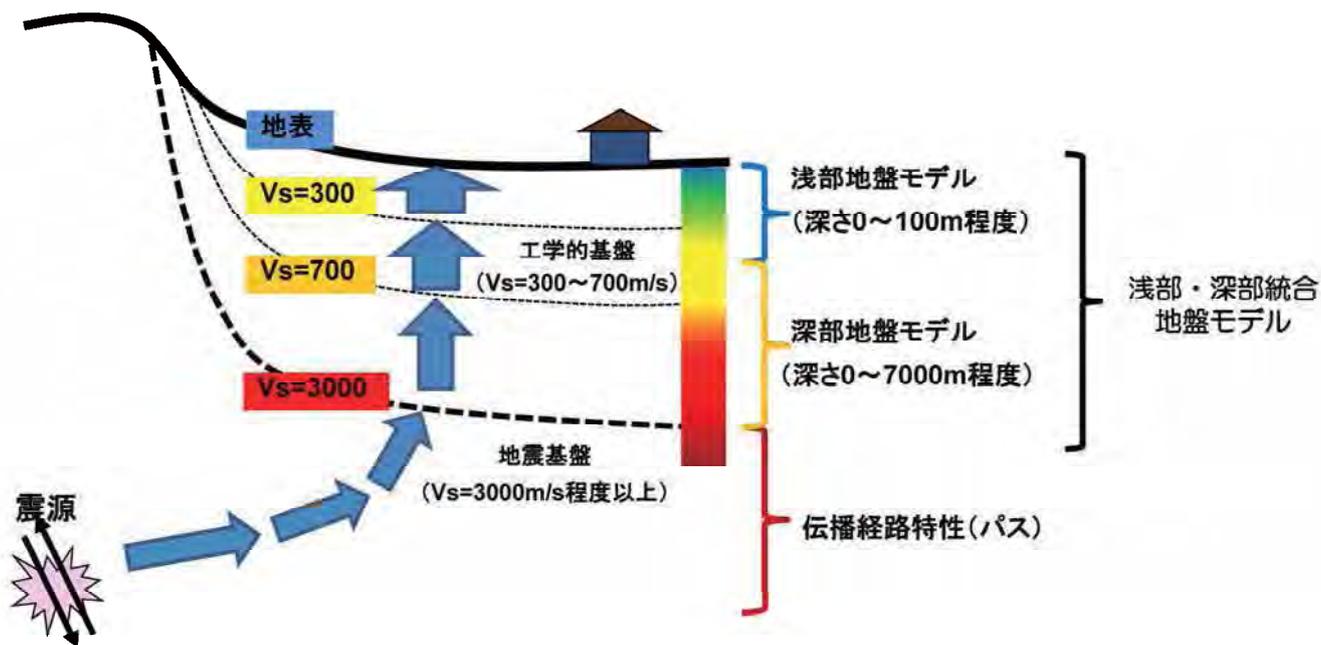


図 2-2 日本の主に堆積平野における地盤構造の S 波速度と周期特性の関係概念図

上記に示す検討手法を実施することにより、工学的基盤周辺付近のモデルの改善および、地震動および微動観測のピーク周期（固有モード）にある程度合った地盤構造モデルの作成が期待される（図 3）。なお、この解析には初期モデルとなる、ボーリングデータに基づく地質情報等による浅部・深部統合地盤モデルについて、3次元化された層序モデルが作成されていることが重要であり、また、層厚・層序の分類には、堆積層分布の広さ・周期特性および地震動・微動データの収集による、増幅特性や減衰構造等の地域区分（地域類型化）も今後検討する必要がある。

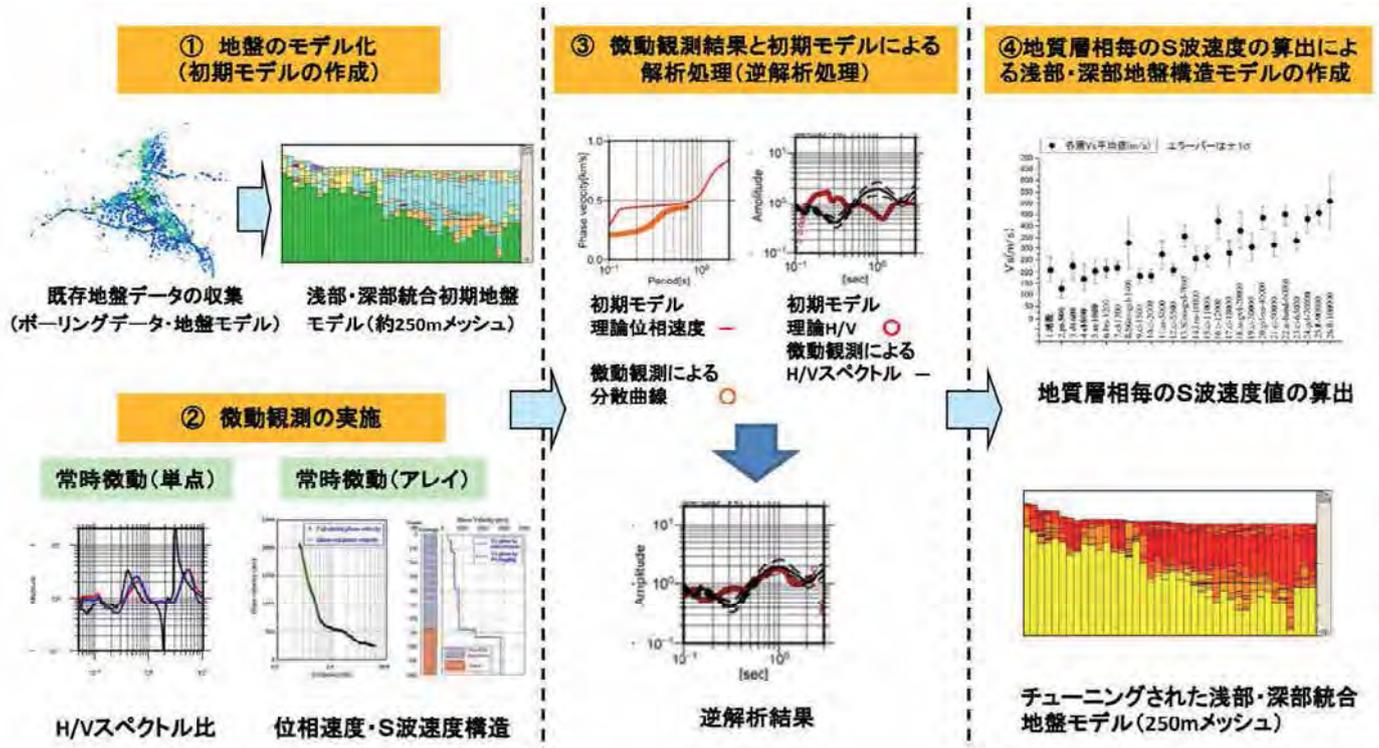


図3 浅部・深部統合地盤モデルのチューニング方法の概念図

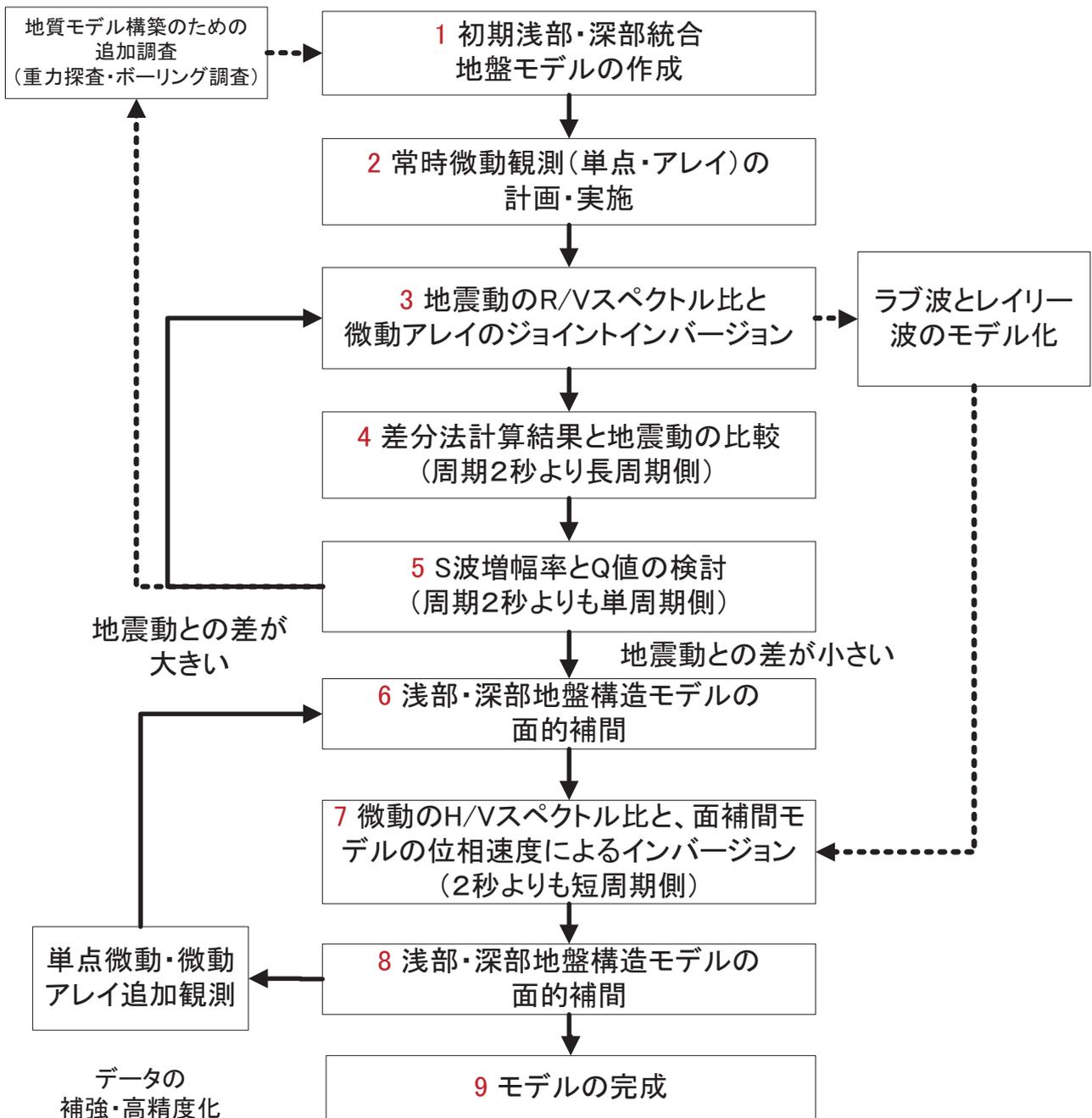


図4 浅部・深部統合地盤モデル作成の流れ

2. 初期モデルとして使用する深部および浅部地下構造モデルについて

地下構造の初期モデルは、深部地下構造モデルについては、検討初期は、千葉県モデルの被害想定で作成された地盤モデルを使用した。今後広域に展開していく際に、層構造等（速度層）が異なるため、全国一律に評価・作成された全国地下構造モデル（J-SHISモデル）を使用することとした。なお、当初千葉県で作成された千葉県モデルの深部地盤モデルの構造（物性値）を元に検討を実施したため、その構造を生かす形で、J-SHIS 構造モデルに移行している（表3・表4）。浅部地盤構造モデルは、千葉県の浅部地盤構造モデル（ $V_s=500$ (m/s)未満）を使用し、茨城県全域の浅部地盤構造モデルは、今年度防災科研で作成した浅部地質構造モデルを使用している。浅い地質構造の作成方法は、現時点では2種類あり、千葉県・茨城県では後述に示す「①地質層序モデル」にて浅部の初期モデルを作成している。なお、後述では既往の浅部・深部統合構造モデルである大大特モデル（三宅ほか（2006））との結果の差を比較しているが、大大特モデルの浅部地盤構造モデルは「②当てはめモデル」で作成されている。

表3 深部地盤構造モデルの作成経緯と比較

モデル名範囲	千葉県浅部・深部統合地盤モデル (本委員会)	J-SHISモデル(2009)
作成範囲	千葉県内	全国
モデルの作成方針	千葉県モデル(2008)をベースに微動探査(単点・アレイ)のデータを使用(千葉県モデルのベースは山中・山田(2006))	主に屈折法の数値構造と重力データを使用
地震動データによるチューニング	K-NET・KiK-net・千葉県の観測網(SKネット)の観測データを使用	K-NET・KiK-netの観測データを使用
速度層構造	堆積層: $V_s=500$ (m/s), 700 (m/s), 900 (m/s), $1,000$ (m/s), $1,500$ (m/s) 地震基盤: $V_s = 3,000$ (m/s)	堆積層: $V_s=500$ (m/s), 900 (m/s), $1,500$ (m/s)の3層に区分 地震基盤: $V_s = 3,100\sim 3,300$ (m/s)

表4 物性値の比較

浅部・深部統合地盤モデル(委員会)

J-SHISモデル(千葉・茨城県周辺(2009))

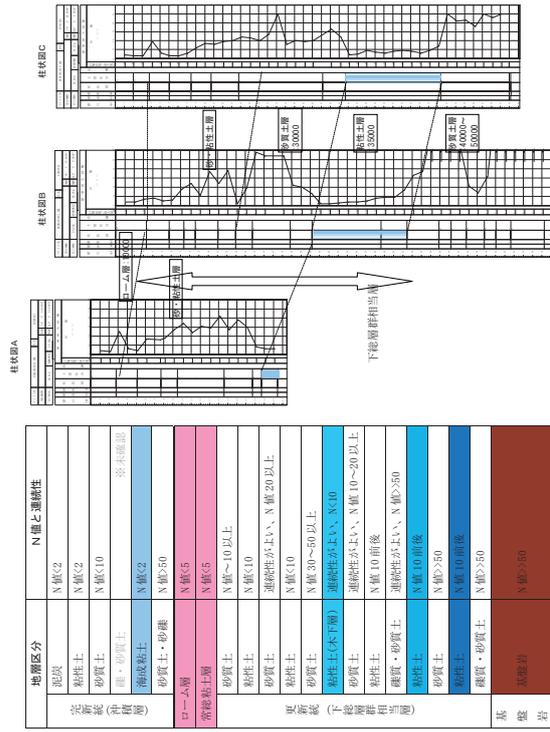
No.	V_s (km/s)	V_p (km/s)	R_o	挿入	No.	V_s (km/s)	V_p (km/s)	R_o
1	0.50	1.80	1.90		1	0.50	1.80	1.90
2	0.70	1.80	1.90	→	*	0.70	1.80	1.90
3	0.90	1.80	2.10		2	0.90	1.80	2.10
4	1.00	2.40	2.10	→	*	1.00	2.40	2.10
5	1.50	3.00	2.20		3	1.50	3.00	2.20
6	3.00	5.60	2.50		4	2.70~3.30	5.60	2.50

J-SHISモデルに存在しない層(*)

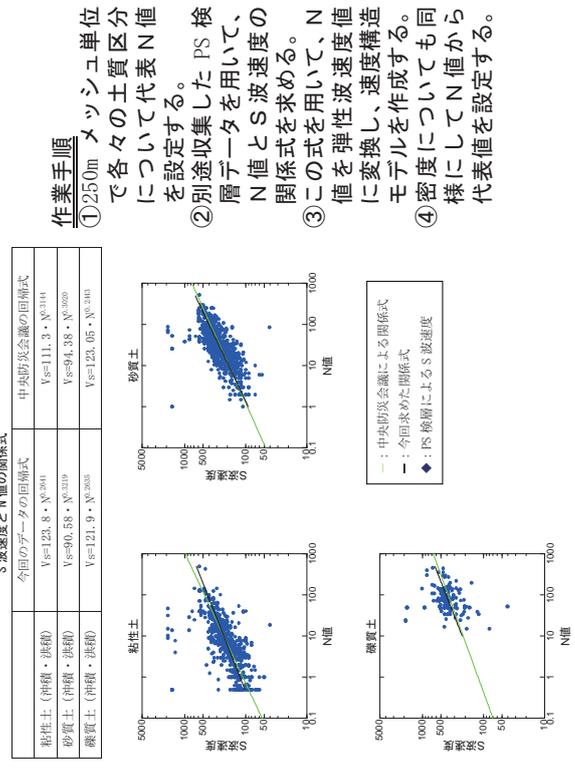
物性値(V_s)が違う層

① 地質層序モデルの作成手順

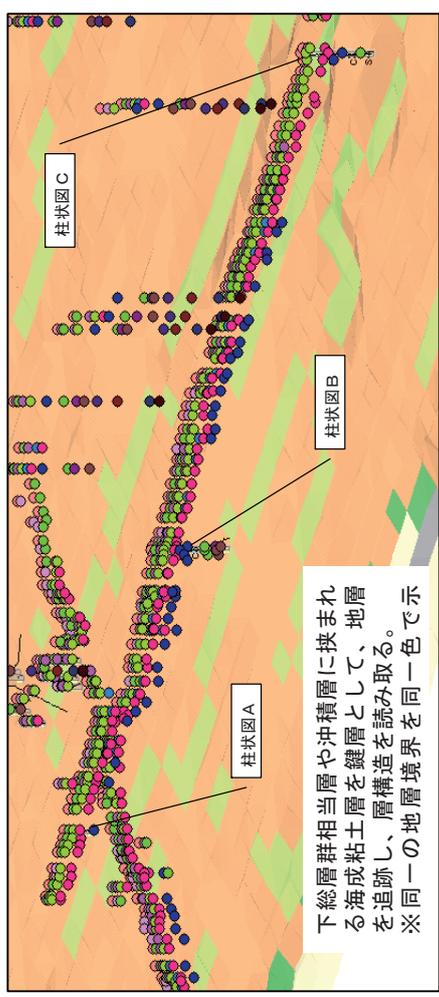
1. 対象地域の地質層序を設定し、柱状図を地質で区分する。



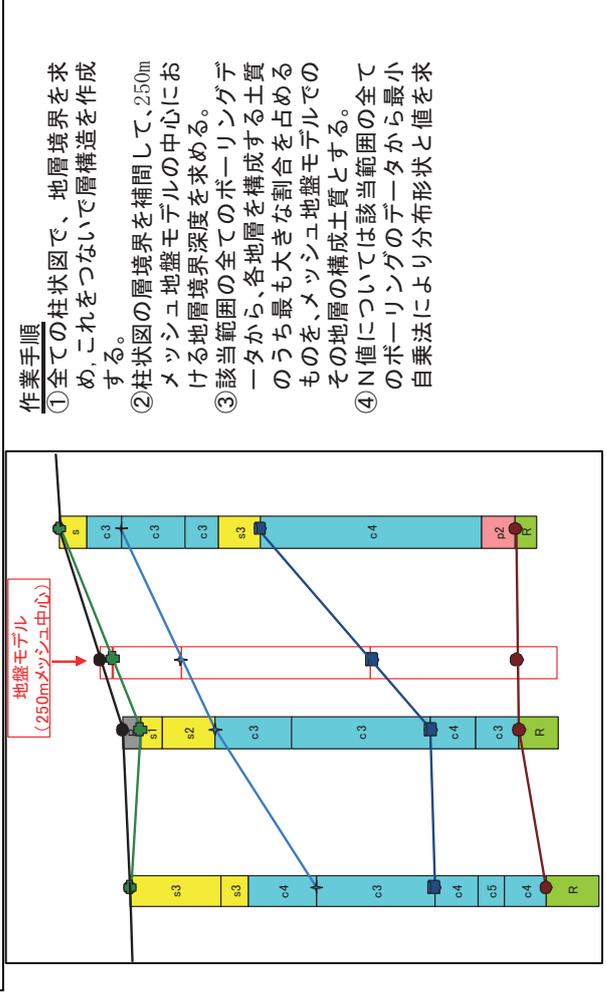
4. N値からS波速度へ変換し、弾性波速度構造モデルを作成する。



2. 各柱状図から地層の連続性を読み取る。



3. 地層境界データの補間、メッシュへの割り振りにより、地質構造モデルを作成する。



②「あてはめ」モデルの作成手順

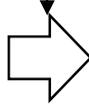
1. 物性値の設定

ボーリングにおける検層結果をもとに、土質区分ごとにN値とS波速度の関係式を設定する(前ページ参照)。密度も、土質区分及びN値から代表値を設定する。



2. 各メッシュにおける層構造モデルの作成

ボーリングデータを有するメッシュ(1辺 250m)では、その中での代表的なボーリングデータ(最も深いものを)、そのメッシュの地盤構成とみなす。設定した物性値をもとに、ボーリング地点の層構造地盤構造モデルを作成し、AVS30を求める。



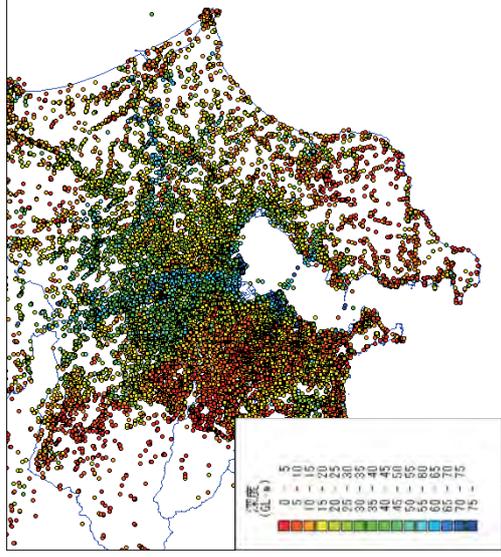
4. ボーリングの存在しないメッシュへの層構造モデルの拡張

ボーリングデータの存在しないメッシュについては、同一微地形区分で最も近いメッシュの層構造モデルを採用してモデルを拡張する。当該メッシュのN値50の基準面深度に整合するようにモデルの層厚を調整する。

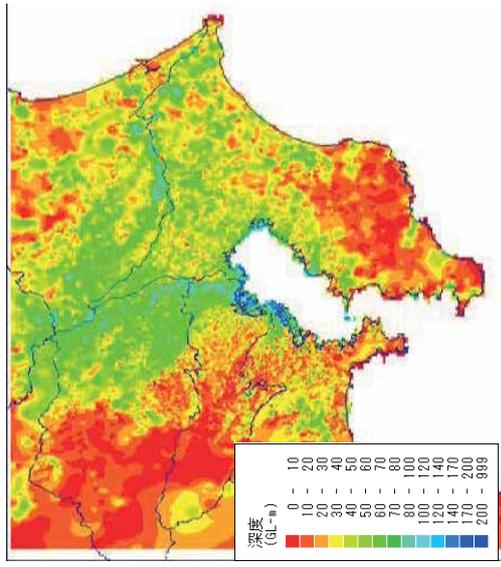
3. 柱状図から工学的基盤の上面を読み取り、コンター図を作成する。

工学的基盤の定義

- ・最終N値50以上を連続3回確認
 - ・N値50以上を連続5回確認
 - ・岩盤部でN値50以上を確認
- という条件を満たす最も浅い



ボーリング地点の工学的基盤上面深度



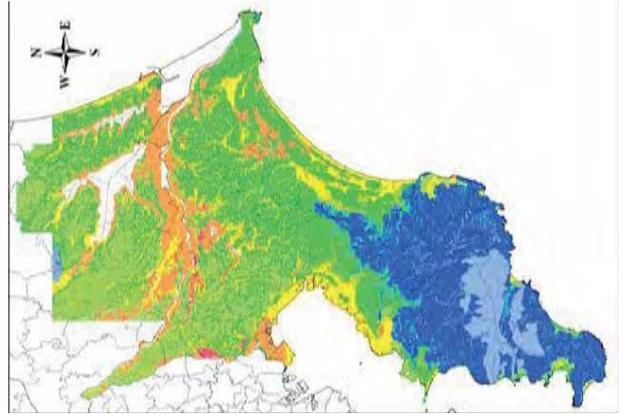
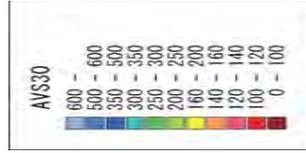
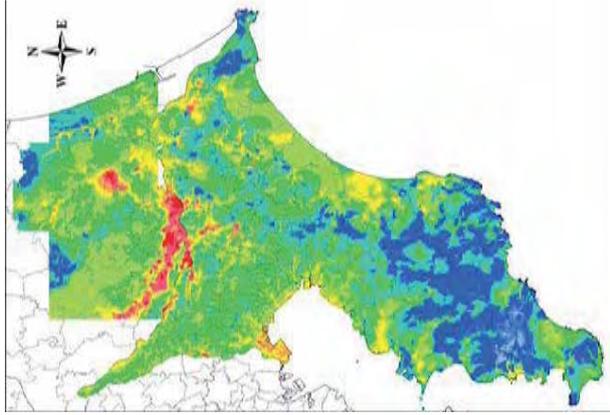
工学的基盤上面の深度分布コンター図

③ 浅部地盤モデルの作成例

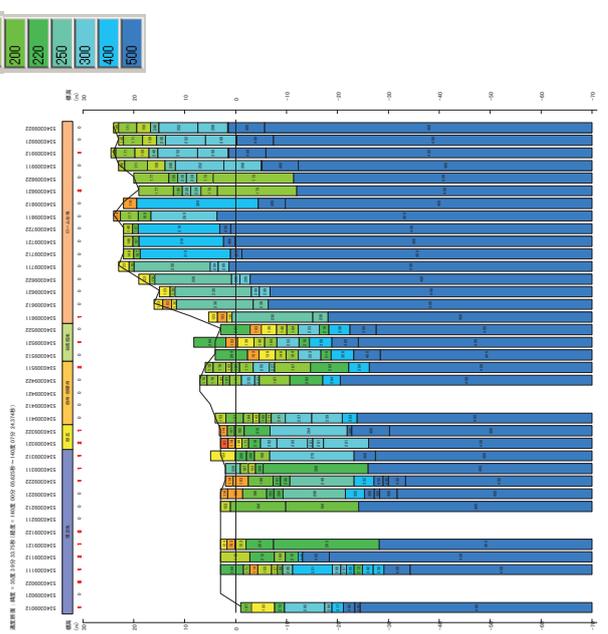
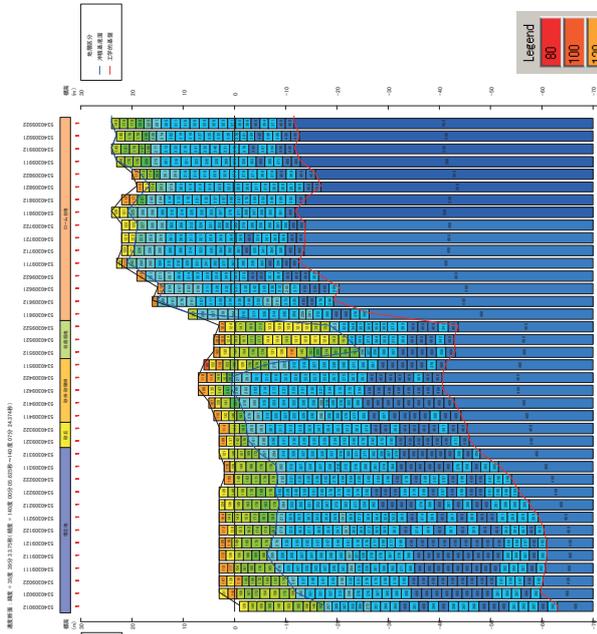
地質層序にもとづくモデルでは、「当てはめモデル」に比べて、地盤の側方変化を表しつつ、地質的な連続性がより明確に示される。一方、ボーリングデータのない地域では、モデルの精度が下がる。沖積低地下に埋没谷が存在する場合には、谷地形の箇所にはボーリングが存在しないと、埋没谷の地形とそれを埋積している沖積層の深さや連続性はモデル化できない。

なお、ここでは、モデルから求めた地震動に関する地盤特性として、AVS30を算出しているが、これらのモデルを用いた地震動の応答解析も可能である。

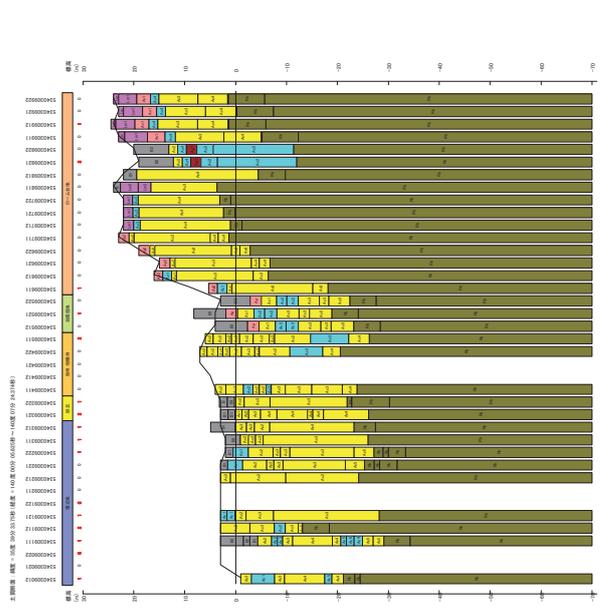
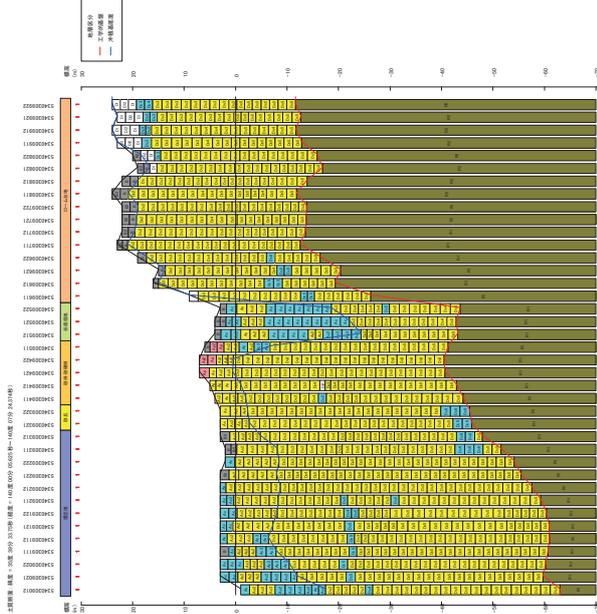
AVS30



弾性波速度構造



土質区分



地質層序モデル

おてはめモデル

3. 常時微動観測データの収集と解析について

本研究において、平成21年度から平成23年度にかけて千葉県と茨城県において単点および微動アレイによる常時微動観測を行った。以下微動観測と解析の内容を示す。

3-1 微動観測の概要

本調査は、浅部・深部統合地盤モデル作成の基礎データを得ることを目的として、千葉県・茨城県全域において微動探査を実施したものである。図4に微動探査(単点)の測定地点位置図および微動アレイ探査測定位置図を示す。巻末資料1・2に測定地点の一覧を示す。

微動探査では、単点、アレイともに独立行政法人防災科学技術研究所が開発した3成分加速度型微動探査機JU-210およびJU-215を使用した。

表5-1に使用機器の仕様一覧を、表5-2に微動探査(単点)測定諸元を、表5-3に微動探査(アレイ)測定諸元を示す。

表5-1 微動探査 機器仕様一覧

名称	型式	仕様
微動観測キット	JU-210 (白山工業)	内蔵センサー : JA-40GA04 (日本航空電子工業) 内蔵ロガー : LS-7000XT (白山工業) プリアンプ利得 : 5倍 外形寸法 : 172×245×160mm 本体重量 : 5,500g以下 (LS-7000XT組込時)
	JU-215 (白山工業)	同上 無線LAN : IEEE802.11b/g準拠
加速度計	JA-40GA04 (日本航空電子工業)	最大計測レンジ : $\pm 39.2 \text{ m/s}^2 (\pm 4G)$ 電圧感度 : $0.2039 \pm 3\% \text{ V (m/s}^2) (2.000 \pm 3\% \text{ V/G)}$ 周波数特性 : 200Hz $\pm 3\text{dB}$ 以上 感度温度特性 : 400ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 以下 動作温度 : $-20 \sim +70^{\circ}\text{C}$
ロガー	LS-7000XT (白山工業)	入力チャンネル : 6ch 平衡入力 入力レンジ : $\pm 1\text{V}, \pm 10\text{V}$ 切り替え可能 入力インピーダンス : 1M Ω 以上 サンプリングレート : 200Hz, 100Hz, 40Hz, 1Hz : 3chごとに設定可能 AD変換 : 24bit デルタシグマ型 時刻校正方法 : GPSによる 時刻校正間隔 : 1時間, 毎秒時刻校正 格納メディア : コンパクトフラッシュ データファイル : WINフォーマット
ハンディGPS	Foretrex201 (GARMIN)	測地精度 : 通常動作時 5-15mRMS*1 電池寿命 : 約15時間 (通常使用にて) 寸法 : 82.8×43.44×17.53mm 重量 : 78g

表 5-2 微動探査(単点) 測定諸元

サンプリングレート	100Hz
測定時間	20 分以上(同時に測定する時間)
増幅率	20dB
フィルター	MINIMUM
データビット長	24bit
GPS モード	NONE

表 5-3 微動探査(アレイ) 測定諸元

アレイ展開	<ul style="list-style-type: none"> ・ 10ch 三角アレイ 半径 100m, 200m, 400m ・ 7ch L アレイ 最小地震計間隔 25m, 1 辺長 75m
サンプリングレート	100Hz
測定時間	<ul style="list-style-type: none"> ・ 三角アレイ : 1 時間 10 分間程度 ・ L アレイ : 25 分間程度
増幅率	20dB
フィルター	MINIMUM
データビット長	24bit
GPS モード	AUTO
時刻補正間隔	1 秒毎

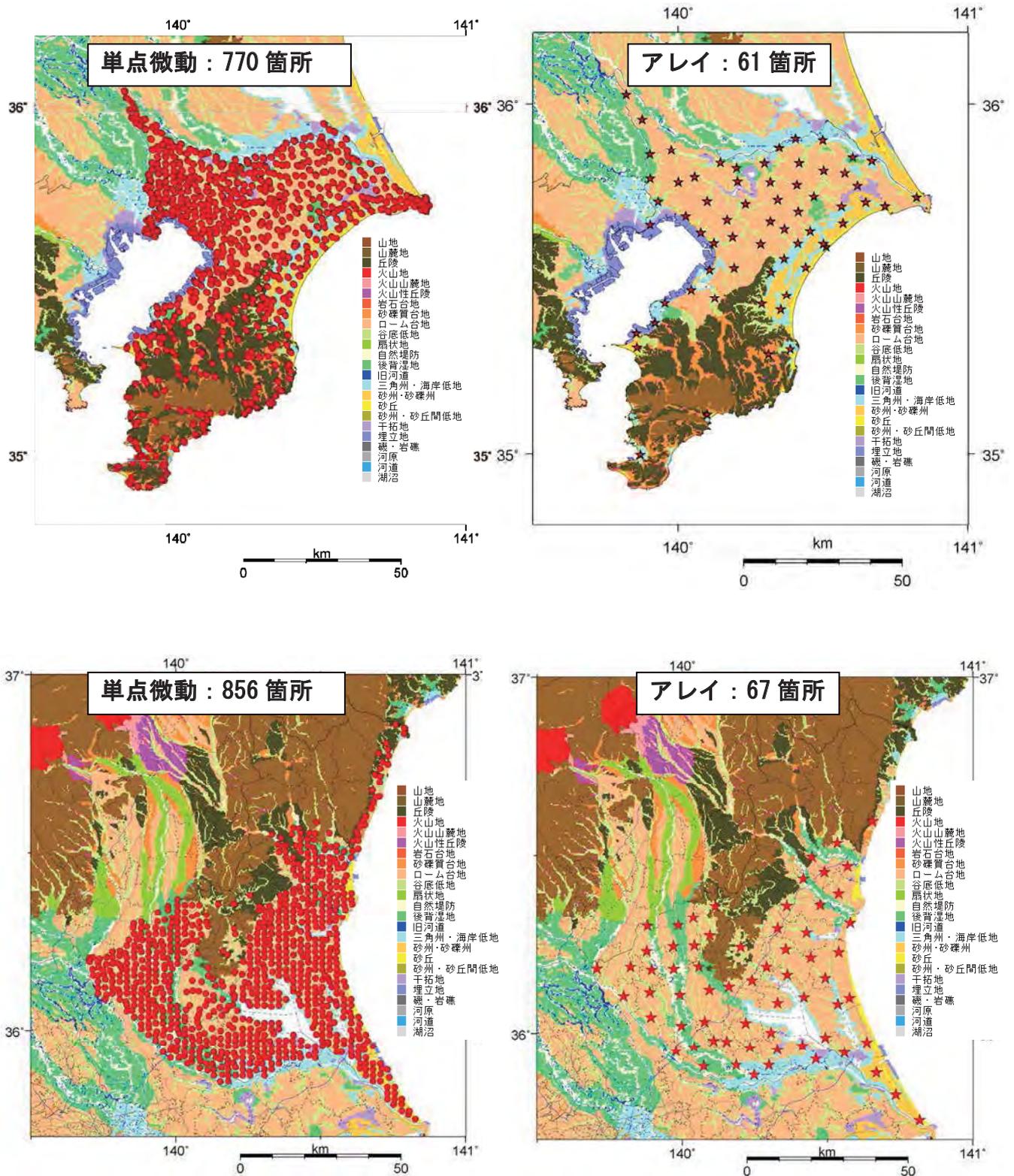


図5 千葉県で実施した微動観測位置 (上左: 単点, 上右: アレイ), 茨城県で実施した, 微動観測位置 (下左: 単点, 下右: アレイ) アレイ展開は, すべての地点で, 半径 $R=400m, 200m, 100m$ の三角アレイと, L字アレイ(一片 $75m, 25m$ ピッチ7点)を実施した. ほとんどの地点では, 地震計設置位置を中心として展開している.

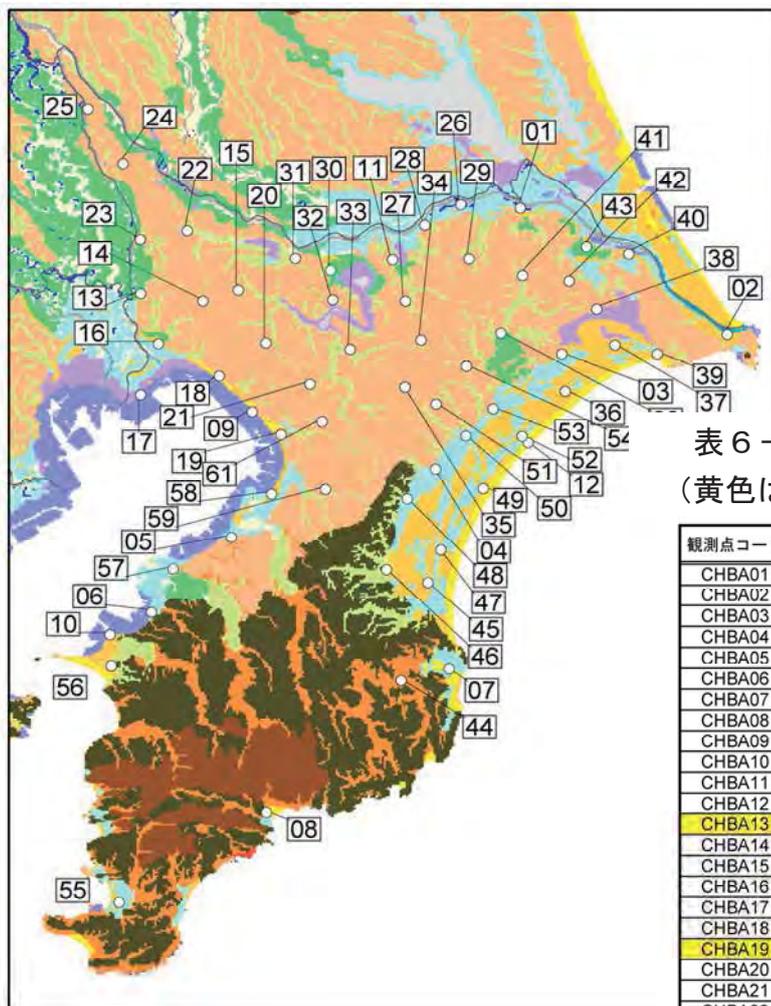


図6-1 微動アレイ観測地点図(千葉県)

- 山地
- 山麓地
- 丘陵
- 火山地
- 火山山麓地
- 火山性丘陵
- 岩石台地
- 砂礫質台地
- ローム台地
- 谷底低地
- 扇状地
- 自然堤防
- 後背湿地
- 旧河道
- 三角洲・海岸低地
- 砂州・砂礫州
- 砂丘
- 砂州・砂丘間低地
- 干拓地
- 埋立地
- 礫・岩礁
- 河原道
- 湖沼

表6-1 微動アレイ観測地点(千葉県)
(黄色は地震観測記録が得られていない地点)

観測点コード	市町村名	強震観測点名	強震観測点コード (観測区分)
CHBA01	香取市	香取市役所	CHB004(K-NET)
CHBA02	銚子市	唐子公園	CHBH14(KiK-net)
CHBA03	匝瑳市	八日市場	CHB010(K-NET)
CHBA04	東金市	東金市役所	TOG(SK-NET)
CHBA05	市原市	姉崎	CHB014(K-NET)
CHBA06	木更津市	木更津	CHB015(K-NET)
CHBA07	いすみ市	岬	CHB016(K-NET)
CHBA08	鴨川市	鴨川	CHB020(K-NET)
CHBA09	千葉市	稲毛	CHB024(K-NET)
CHBA10	君津市	君津勤労者総合福祉センター	CHBH12(KiK-net)
CHBA11	成田市	成田地殻活動観測施設	CHBH13(KiK-net)
CHBA12	山武市	蓮沼海浜公園	CHBH19(KiK-net)
CHBA13	松戸市	東葛飾県民センター	C02(SK-NET)
CHBA14	鎌ヶ谷市	鎌ヶ谷市役所	KMY(SK-NET)
CHBA15	白井市	白井市役場	SHR(SK-NET)
CHBA16	市川市	市川市役所	ICK(SK-NET)
CHBA17	浦安市	浦安市役所	URA(SK-NET)
CHBA18	習志野市	習志野市役所	NRS(SK-NET)
CHBA19	千葉市	千葉県庁	C01(SK-NET)
CHBA20	八千代市	八千代市役所	YCY(SK-NET)
CHBA21	四街道市	四街道市役所	YOT(SK-NET)
CHBA22	柏市	柏市役所	KAS(SK-NET)
CHBA23	流山市	流山市役所	NGY(SK-NET)
CHBA24	野田市	野田市役所	NOD(SK-NET)
CHBA25	野田市	関宿支所	SEK(SK-NET)
CHBA26	神崎町	神崎町役場	KOZ(SK-NET)
CHBA27	成田市	成田市役所	NAR(SK-NET)
CHBA28	成田市	下総町役場	SIM(SK-NET)
CHBA29	成田市	大栄町役場	DAI(SK-NET)
CHBA30	印西市	本埜村役場	MOT(SK-NET)
CHBA31	印西市	印西市役所	INZ(SK-NET)
CHBA32	印西市	印旛村役場	INB(SK-NET)
CHBA33	佐倉市	北総県民センター	C03(SK-NET)
CHBA34	富里市	富里市役所	TOM(SK-NET)
CHBA35	八街市	八街市役所	YCM(SK-NET)
CHBA36	匝瑳市	野栄町役場	NOS(SK-NET)
CHBA37	旭市	旭市役所	ASH(SK-NET)
CHBA38	旭市	千潟町役場	HIG(SK-NET)
CHBA39	旭市	飯岡町役場	IIO(SK-NET)
CHBA40	東庄町	東庄町役場	TON(SK-NET)
CHBA41	香取市	栗源町役場	KUR(SK-NET)
CHBA42	香取市	山田町役場	YAM(SK-NET)
CHBA43	香取市	小見川町役場	OMI(SK-NET)
CHBA44	いすみ市	夷隅町役場	ISU(SK-NET)
CHBA45	長生村	長生村役場	CHS(SK-NET)
CHBA46	茂原市	茂原市役所	MOB(SK-NET)
CHBA47	白子町	白子町役場	SIR(SK-NET)
CHBA48	大網白里町	大網白里町役場	OOA(SK-NET)
CHBA49	九十九里町	九十九里町役場	KUJ(SK-NET)
CHBA50	山武市	成東町役場	NRU(SK-NET)
CHBA51	山武市	山武町役場	SNB(SK-NET)
CHBA52	山武市	蓮沼村役場	HAS(SK-NET)
CHBA53	山武市	松尾町役場	MTO(SK-NET)
CHBA54	芝山町	芝山町役場	SHB(SK-NET)
CHBA55	館山市	館山市役所	TAT(SK-NET)
CHBA56	富津市	富津市役所	FUT(SK-NET)
CHBA57	袖ヶ浦市	袖ヶ浦市役所	SOD(SK-NET)
CHBA58	市原市	水道局市原	C11(SK-NET)
CHBA59	市原市	水の江小	C25(SK-NET)
CHBA60	多古町	多古町役場	非観測点(役場)
CHBA61	千葉市	千城台高校	非観測点(高等学校)

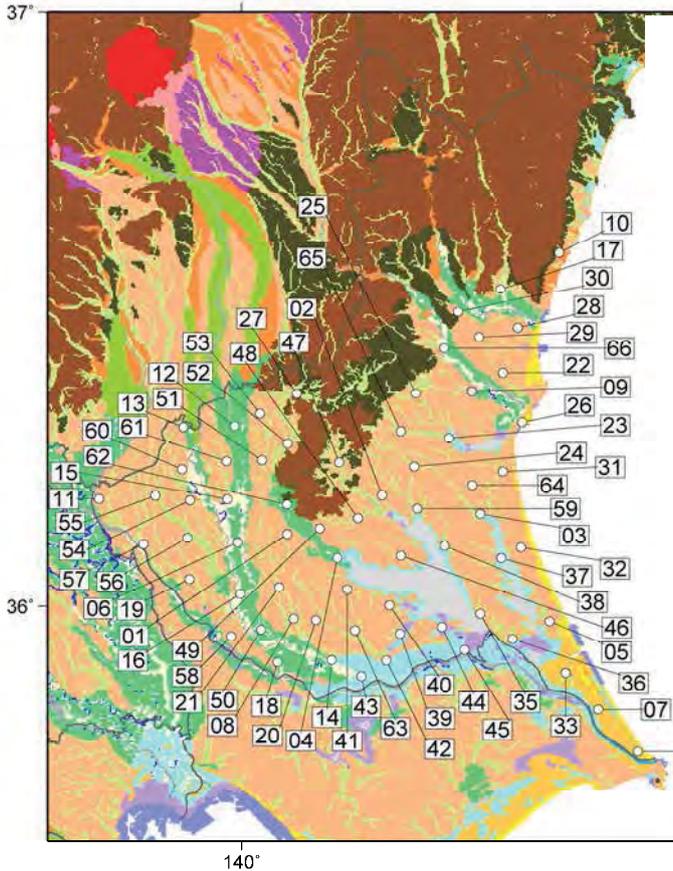


図6-2 微動アレイ観測地点図（茨城県）

- 山地
- 山麓地
- 丘陵
- 火山地
- 火山山麓地
- 火山性丘陵
- 岩石台地
- 砂礫質台地
- ローム台地
- 谷底低地
- 扇状地
- 自然堤防
- 後背湿地
- 旧河道
- 三角州・海岸低地
- 砂州・砂礫州
- 砂丘
- 砂州・砂丘間低地
- 干拓地
- 埋立地
- 礫・岩礫
- 河原
- 河道
- 湖沼

表6-2 微動アレイ観測地点
(茨城県) (黄色は地震観測記録が
得られていない地点)

観測点コード	市町村名	強震観測点名	強震観測点コード
IBRA001	つくば市	(独)防災科学技術研究所	K-NET(IBR011)
IBRA002	石岡市	石岡市役所	K-NET(IBR012)
IBRA003	鉾田市	鉾田市総合公園	K-NET(IBR013)
IBRA004	土浦市	土浦第一中学校	
IBRA005	鹿嶋市	-	K-NET(IBR018)
IBRA006	常総市	豊田球場	KiK-net(IBRH10)
IBRA007	神栖市	-	KiK-net(IBRH20)
IBRA008	つくば市	釜崎運動公園	KiK-net(IBRH21)
IBRA009	水戸市	水戸市役所	SK-NET(IBR.001)
IBRA010	日立市	日立市役所	SK-NET(IBR.002)
IBRA011	古河市	古河市役所(古河庁舎)	SK-NET(IBR.004)
IBRA012	筑西市	筑西市役所	SK-NET(IBR.006)
IBRA013	結城市	結城市役所	SK-NET(IBR.007)
IBRA014	龍ヶ崎市	龍ヶ崎市役所	SK-NET(IBR.008)
IBRA015	下妻市	下妻市役所	SK-NET(IBR.009)
IBRA016	常総市	常総市役所	SK-NET(IBR.010)
IBRA017	常陸太田市	常陸太田市役所	SK-NET(IBR.011)
IBRA018	取手市	取手消防署	SK-NET(IBR.015)
IBRA019	坂東市	坂東市役所(岩井庁舎)	SK-NET(IBR.016)
IBRA020	牛久市	牛久市役所	SK-NET(IBR.017)
IBRA021	つくば市	つくば市役所(谷田部庁舎)	SK-NET(IBR.018)
IBRA022	ひたちなか市	ひたちなか市役所	SK-NET(IBR.019)
IBRA023	茨城町	茨城町役場	SK-NET(IBR.021)
IBRA024	小美玉市	小美玉市役所	SK-NET(IBR.023)
IBRA025	水戸市	水戸市役所内原支所	SK-NET(IBR.024)
IBRA026	大洗町	大洗消防署	SK-NET(IBR.028)
IBRA027	桜川市	桜川市役所(岩瀬庁舎)	SK-NET(IBR.032)
IBRA028	東海村	東海村役場	SK-NET(IBR.033)
IBRA029	那珂市	那珂市役所	SK-NET(IBR.034)
IBRA030	那珂市	那珂市役所瓜連支所	SK-NET(IBR.035)
IBRA031	鉾田市	鉾田市役所旭総合支所	SK-NET(IBR.045)
IBRA032	鉾田市	鉾田市役所大洋総合支所	SK-NET(IBR.047)
IBRA033	神栖市	神栖市役所	SK-NET(IBR.048)
IBRA034	神栖市	神栖市役所波崎総合支所	SK-NET(IBR.049)
IBRA035	行方市	行方市役所(麻生庁舎)	SK-NET(IBR.050)
IBRA036	潮来市	潮来市役所	SK-NET(IBR.052)
IBRA037	行方市	行方市役所(北浦庁舎)	SK-NET(IBR.053)
IBRA038	行方市	行方市役所(玉造庁舎)	SK-NET(IBR.054)
IBRA039	稲敷市	稲敷市役所(江戸崎庁舎)	SK-NET(IBR.055)
IBRA040	美浦村	美浦村役場	SK-NET(IBR.056)
IBRA041	阿見町	阿見町役場	SK-NET(IBR.057)
IBRA042	稲敷市	稲敷市役所(新利根庁舎)	SK-NET(IBR.059)
IBRA043	河内町	河内町役場	SK-NET(IBR.060)
IBRA044	稲敷市	稲敷市役所(桜川庁舎)	SK-NET(IBR.061)
IBRA045	稲敷市	稲敷市役所(東庁舎)	SK-NET(IBR.062)
IBRA046	かすみがうら市	かすみがうら市役所(霞ヶ浦庁舎)	SK-NET(IBR.063)
IBRA047	石岡市	石岡市役所八郷総合支所	SK-NET(IBR.065)
IBRA048	かすみがうら市	かすみがうら市役所(千代田庁舎)	SK-NET(IBR.066)
IBRA049	土浦市	土浦市役所(新治庁舎)	SK-NET(IBR.067)
IBRA050	つくばみらい市	つくばみらい市役所	SK-NET(IBR.068)
IBRA051	筑西市	筑西市役所明野支所	SK-NET(IBR.071)
IBRA052	桜川市	桜川市役所(真壁庁舎)	SK-NET(IBR.072)
IBRA053	筑西市	筑西市役所協和支所	SK-NET(IBR.074)
IBRA054	八千代町	八千代町役場	SK-NET(IBR.075)
IBRA055	古河市	古河市役所(三和庁舎)	SK-NET(IBR.080)
IBRA056	坂東市	坂東市役所(猿島庁舎)	SK-NET(IBR.081)
IBRA057	坂東市	坂東消防署境分署	SK-NET(IBR.082)
IBRA058	守谷市	守谷市役所	SK-NET(IBR.083)
IBRA059	小美玉市	小川南中学	
IBRA060	結城市	山川小学校	
IBRA061	筑西市	関城東小学校	
IBRA062	つくば市	筑波高等学校	
IBRA063	牛久市	牛久第二中学	
IBRA064	鉾田市	鉾田北中学校	
IBRA065	笠間市	岩間第二小学校	
IBRA066	水戸市	飯富中学校	

3-2 常時微動測定結果（解析）について

単点微動の解析には、独立行政法人防災科学技術研究所の研究資料第 313 号「微動探査システムの開発」に付属しているプログラムツール「Tremor Data View」を使用し、H/V スペクトルを求めた。

微動アレイデータの解析では、空間自己相関法 (SPAC 法) を用いた。解析は、以下の手順で実施した。

- ① 波形の読み込みと分割
 - ・ 1 分間ごとに保存されている波形データを読み込んで結合し、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 秒間の波形データとして再分割する。
- ② 波形に対する処理
 - ・ 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 波形の選別
 - ・ 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
 - ・ グラフ化した SPAC 係数の形状や並びを参照し、位相速度を読み取る範囲を決める
 - ・ 長いスパンの SPAC 係数は高周波側が悪く、短いスパンの SPAC 係数は低周波数側が悪くなる傾向があるため、一度に全 SPAC 係数を使って解析することが必ずしも精度を上げることにはならない。SPAC 係数を参照し、周波数帯によって採用する SPAC 係数を選んで残差分布を求める。
 - ・ 特定の設置点においてデータの品質が悪いと判断された場合には、その設置点を解析対象から除外する
 - 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
 - ・ 読み取りの際は、SPAC 係数を参照する
 - 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。
 - ・ 波形およびフーリエスペクトルを確認し、スペクトル形状に大きく影響するほどのノイズが混入している区間、または設置点の波形を解析対象から除外した上で、改めて位相速度を求める
- 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。

位相速度曲線の結合

L アレイから得られた実測分散曲線と、三角アレイの実測分散曲線を結合するに際しては、下記の方針で行った。図 7-1～図 7-4 に実測分散曲線の結合例を示す。

- 双方の連続性が良い : そのまま結合する (図 7-1)
- 双方の連続性がやや悪い : 三角アレイと L アレイの実測分散曲線の差が 50m/s 程度以内
 - ・ 原則として遅い方を読み取る方針で結合する
 - ・ 三角アレイの残差分布において、高周波数側のピークが明瞭で比較的精度良く位相速度を読み取れる場合は原則に則る (図 7-2)
 - ・ 三角アレイの残差分布において、高周波数側のピークが不明瞭で位相速度の読み取り精度が比較的悪いと判断される場合は、両者の中間値をもって結合する (図 7-3)

- 双方の連続性が悪い: 三角アレイとLアレイの実測分散曲線の差が 50m/s 程度以上
- ・ 高次モードであると考え、基本モードとして考えていくことから、原則として遅い方を読み取って結合する(図7-4)

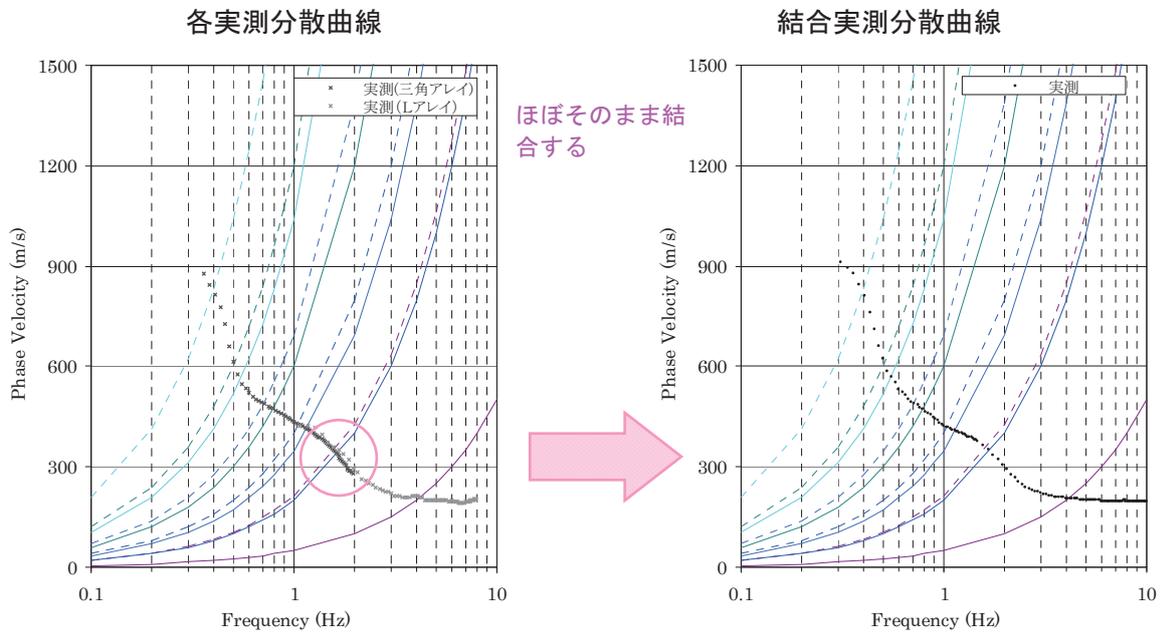
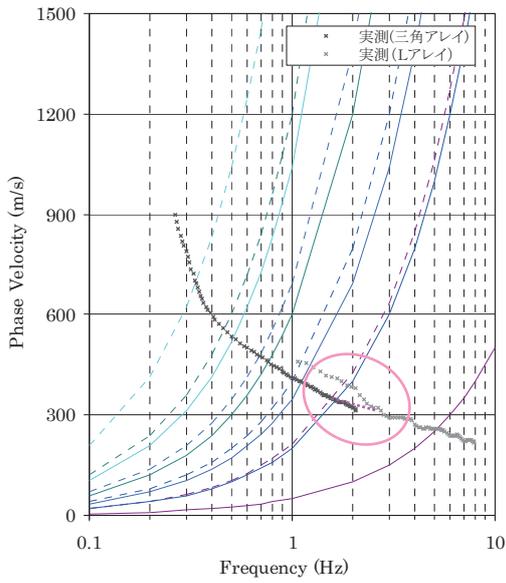
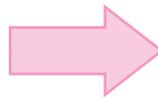


図7-1 三角アレイとLアレイの結合例
<連続性が良い場合>

各実測分散曲線



位相速度が小さい方に対して滑らかに結合



結合実測分散曲線

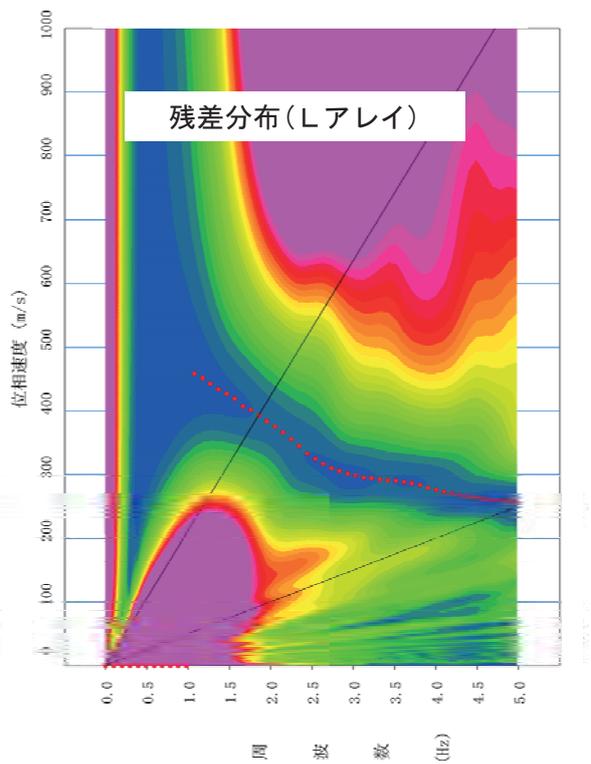
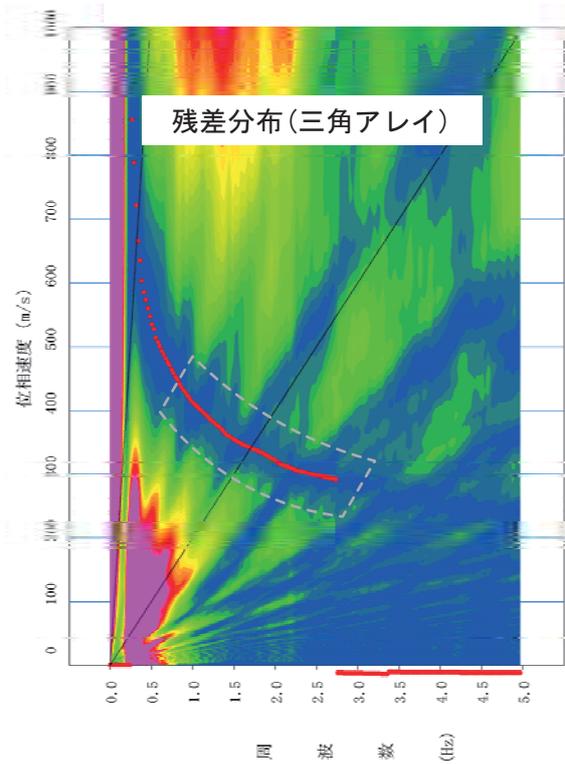
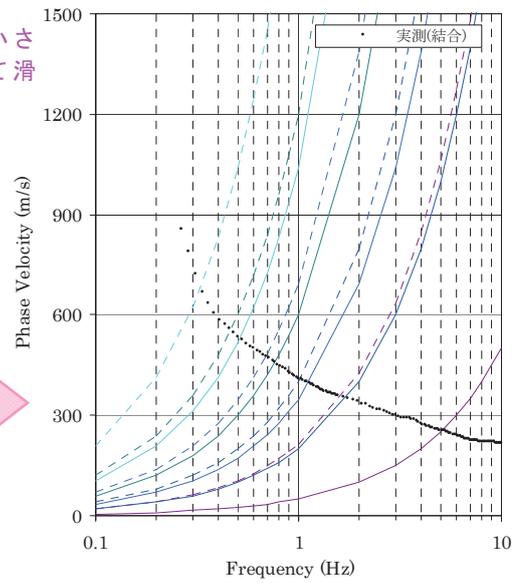


図7-2 三角アレイとLアレイの結合例
 <連続性がやや悪いが残差分布が明瞭な場合>

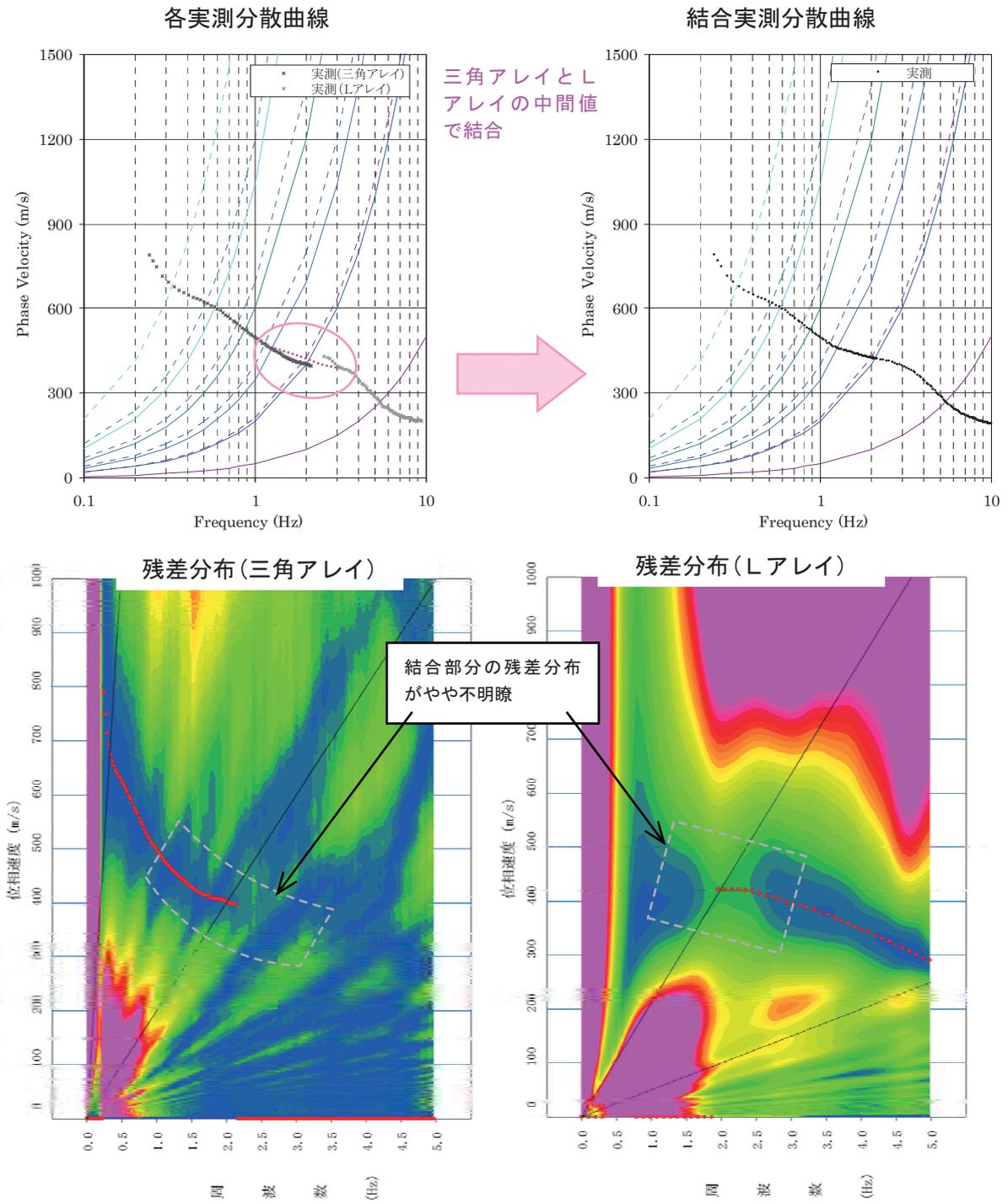


図7-3 三角アレイとLアレイの結合例
 <連続性がやや悪く残差分布がやや不明瞭な場合>

実測分散曲線

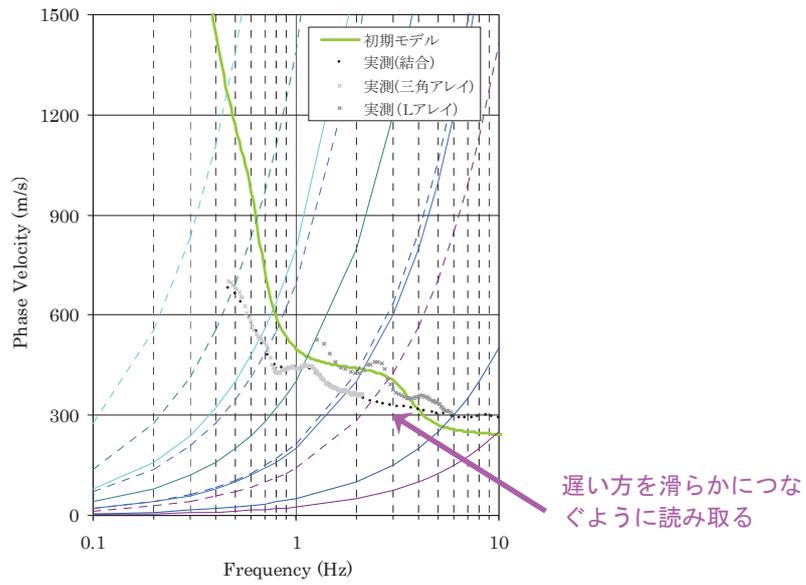


図7-4 三角アレイとLアレイの結合例
<三角アレイとLアレイの実測分散曲線の差が大きい場合>

4. 地震動データ (R/V) の解析

地震動の R/V スペクトルは、以下のようにして算出した。

- ・ 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 7-1・表 7-2 に解析に使用した地震の一覧を、図 8-1・図 8-2 に地震の震央位置を示す。図 8-3・図 8-4 に観測点位置図を、図 8-6～図 8-10 に R/V スペクトルの一覧を示す。なお、茨城県の震度計データのサイト名は、IBR.001 などとなっており、K-NET 観測点との区別をつけるため、IB001 と名前を付けなおした。

表 7-1 R/V スペクトル算出に使用した地震波形データ一覧 (茨城県)

ID	Year	Month	Day	Hour	Minutes	Sec	Latitude	Longitude	Depth(km)	Mj	Epicenter
1	2004	4	4	8	2	0.69	36.3902	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	37.56	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	28.69	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	46	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

表7-2 R/V スペクトル算出に使用した地震波形データ一覧 (千葉県)

No	年	月	日	時	分	秒	経度	緯度	深さ(km)	Mj
1	1997	03	04	12	51	27.2	139.168	34.955	3	5.9
2	1998	05	03	11	09	5.3	139.175	34.960	5	5.9
3	1999	11	15	10	34	35.4	142.427	38.320	46	5.7
4	2000	06	03	17	54	47.7	140.745	35.688	48	6.1
5	2000	07	15	10	30	32.0	139.242	34.423	10	6.3
6	2000	07	21	03	39	18.6	141.118	36.528	49	6.4
7	2000	07	21	14	16	33.9	141.322	35.252	37	5.7
8	2000	07	30	21	25	46.6	139.410	33.970	17	6.5
9	2000	12	05	01	47	34.5	141.142	35.833	35	5.5
10	2001	02	25	6	53	50.8	142.255	37.190	16	5.9
11	2002	02	12	22	44	37.9	141.082	36.588	48	5.7
12	2002	07	24	05	05	30.3	142.315	37.232	30	5.9
13	2002	11	03	12	37	43.6	142.138	38.895	46	6.3
14	2003	04	08	03	28	35.0	141.957	36.373	24	6.0
15	2003	07	26	07	13	31.5	141.170	38.405	12	6.4
16	2003	09	26	04	50	7.4	144.078	41.778	45	8.0
17	2003	10	31	10	06	30.6	142.695	37.832	33	6.8
18	2003	11	15	03	43	51.6	141.165	36.432	48	5.8
19	2004	04	04	08	02	0.6	141.153	36.390	49	5.8
20	2004	09	01	11	49	26.0	141.780	36.922	31	5.6
21	2004	09	05	23	57	16.8	137.140	33.137	44	7.4
22	2004	10	17	02	19	19.2	141.402	36.273	48	5.5
23	2004	10	17	03	54	41.6	141.328	36.255	49	5.7
24	2004	10	23	17	56	0.3	138.867	37.292	13	6.8
25	2004	10	23	18	03	12.6	138.983	37.353	9	6.3
26	2004	10	23	18	11	56.7	138.828	37.252	12	6.0
27	2004	10	23	18	34	5.6	138.930	37.305	14	6.5
28	2004	10	23	19	45	57.1	138.875	37.295	12	5.7
29	2004	10	25	06	04	57.5	138.947	37.330	15	5.8
30	2004	10	27	10	40	50.2	139.033	37.292	12	6.1
31	2004	11	08	11	15	58.5	139.032	37.395	0	5.9
32	2005	02	16	04	46	36.1	139.888	36.038	46	5.3
33	2005	05	19	10	14	26.2	141.082	35.558	33	5.4
34	2005	08	08	00	06	43.8	141.445	36.338	46	5.6
35	2005	08	16	11	46	25.7	142.277	38.148	42	7.2
36	2005	09	09	16	15	26.5	140.947	35.590	38	5.0
37	2005	10	16	16	05	42.6	139.937	36.038	47	5.1
38	2005	10	19	20	44	42.6	141.042	36.382	48	6.3
39	2005	12	02	22	13	7.9	142.353	38.072	40	6.6
40	2005	12	17	03	32	13.4	142.180	38.448	40	6.1
41	2006	01	18	23	25	25.6	142.200	37.798	36	5.7
42	2006	04	21	02	50	39.5	139.195	34.940	7	5.8
43	2007	01	13	13	23	13.0	155.052	46.937	30	8.2
44	2007	07	16	10	13	22.5	138.608	37.557	17	6.8
45	2007	07	16	15	37	40.4	138.643	37.503	23	5.8
46	2007	08	16	04	15	6.6	140.530	35.443	31	5.3

*KKNet ChibaではMj \geq 5.0、K-NET及びKiK-netではMj \geq 5.5の地震を使用。
 深さは50km以浅の地震を選択。
 但し、46番の地震記録(KKNet Chiba)は未受領。

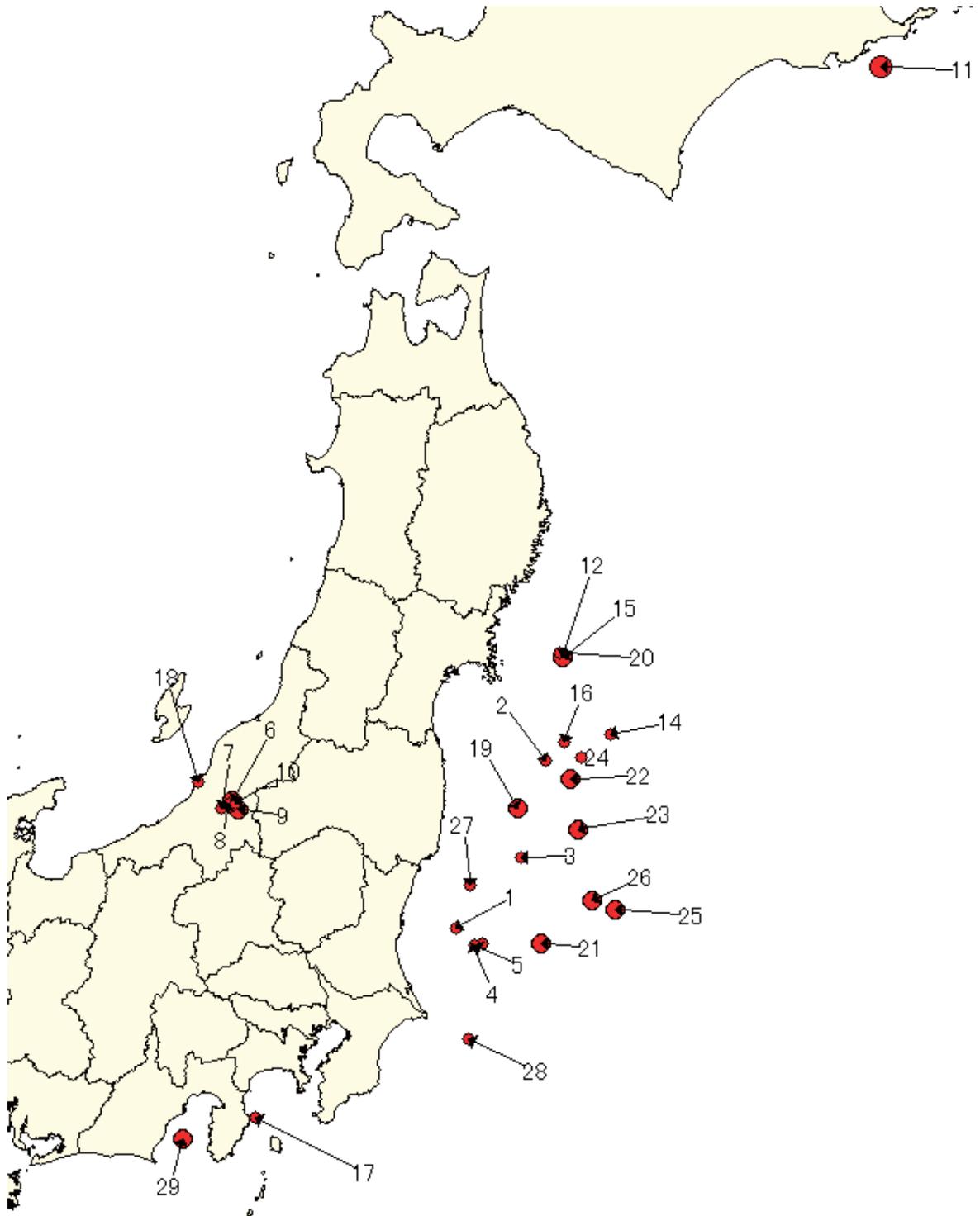


図8-1 R/Vスペクトル解析に用いた地震の震央位置（茨城県）

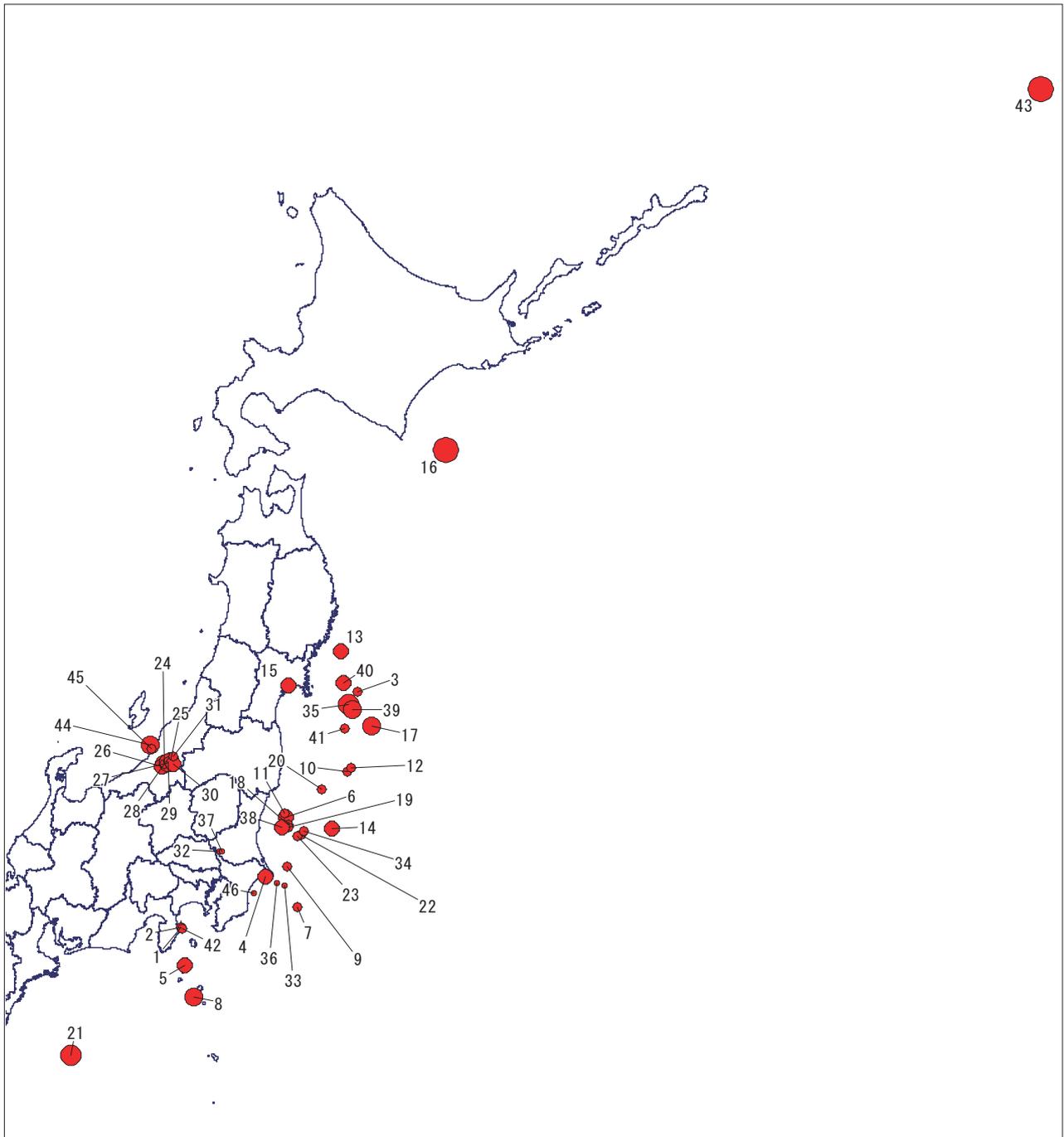


図 8-2 R/V スペクトル解析に用いた地震の震央位置 (千葉県)

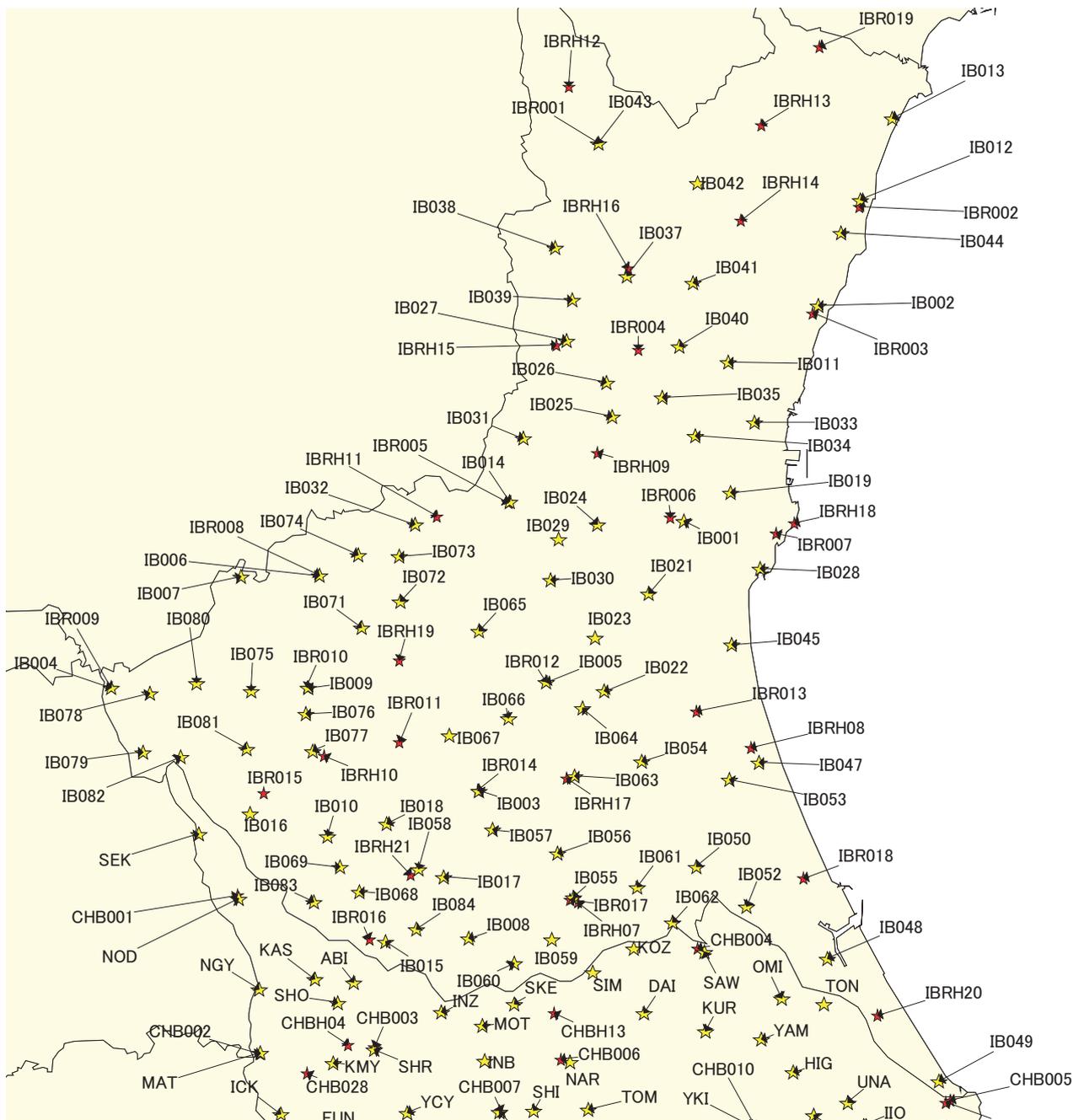


図 8 - 3 強震観測点位置 (茨城県)

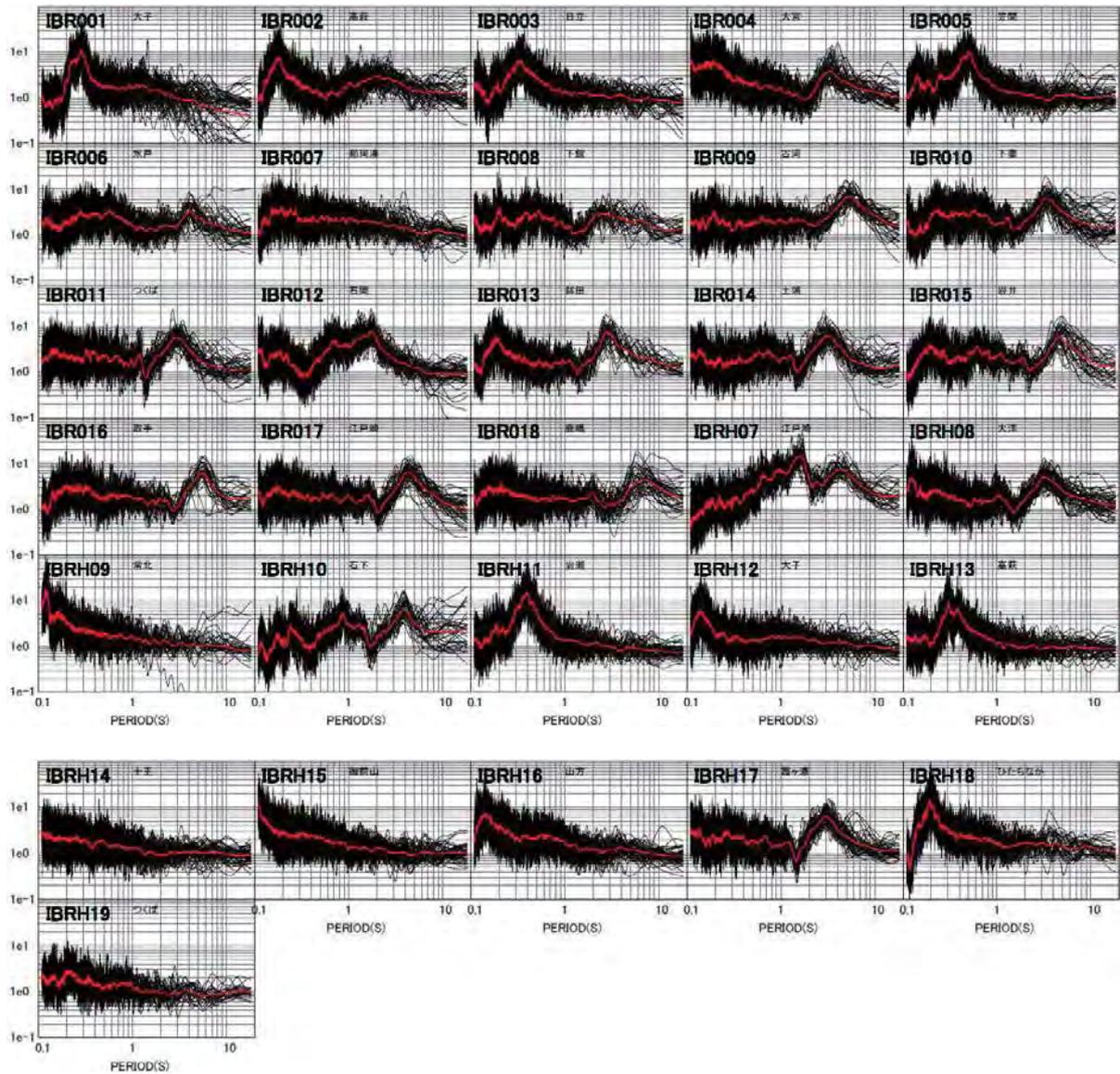


図 8-5 R/V スペクトル (茨城県)

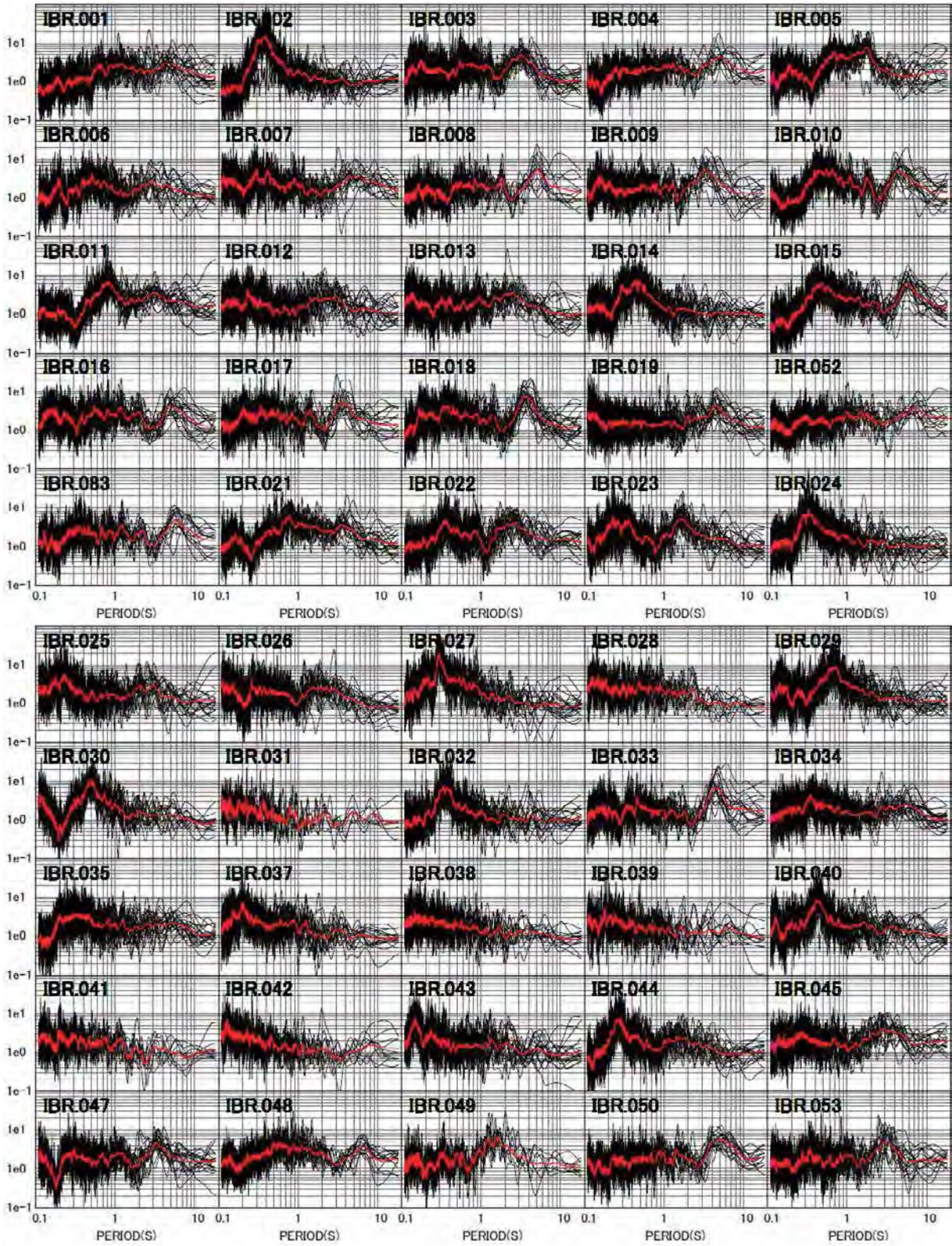


図 8-6 R/V スペクトル (茨城県)

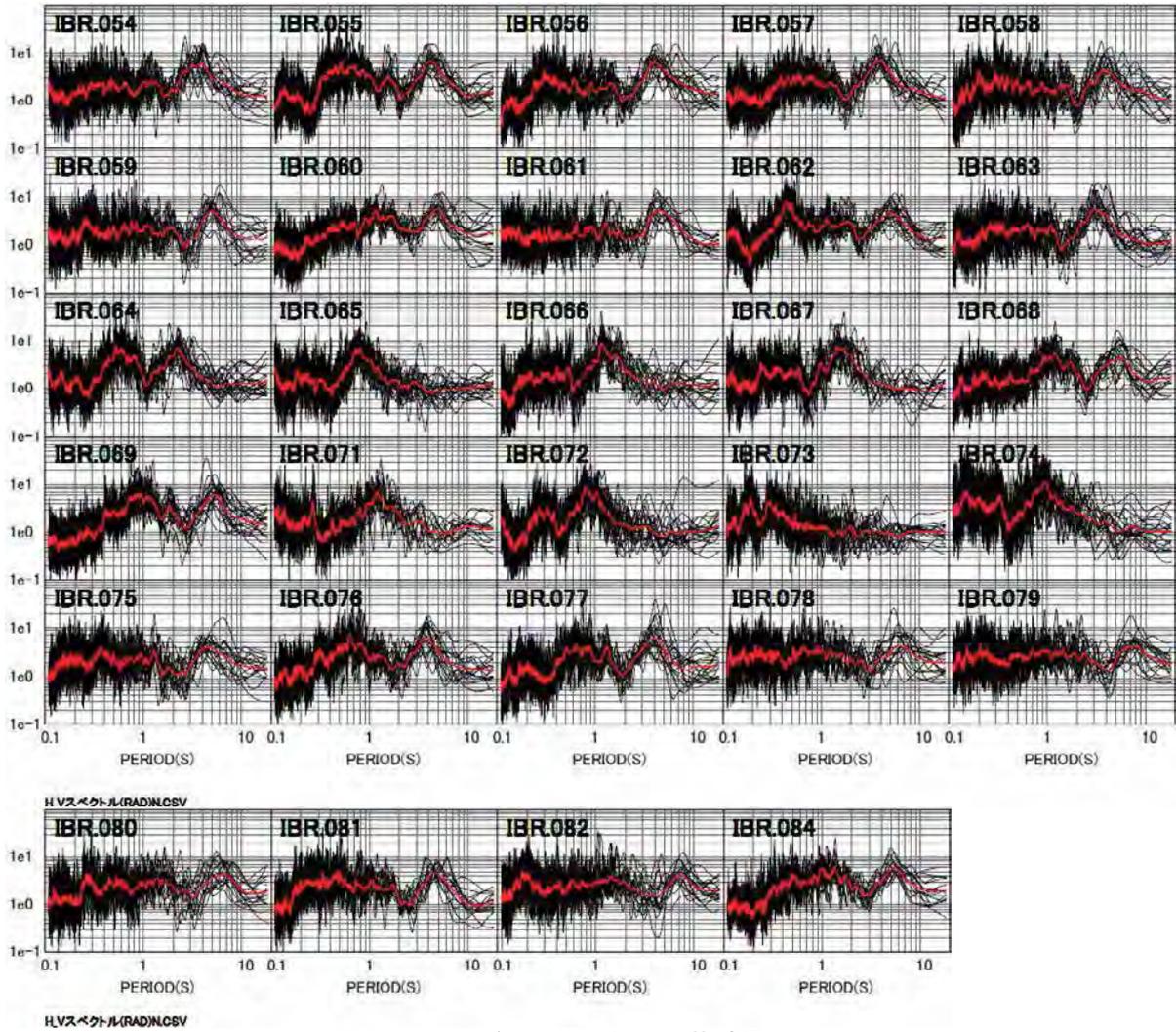


図8-7 R/Vスペクトル(茨城県)

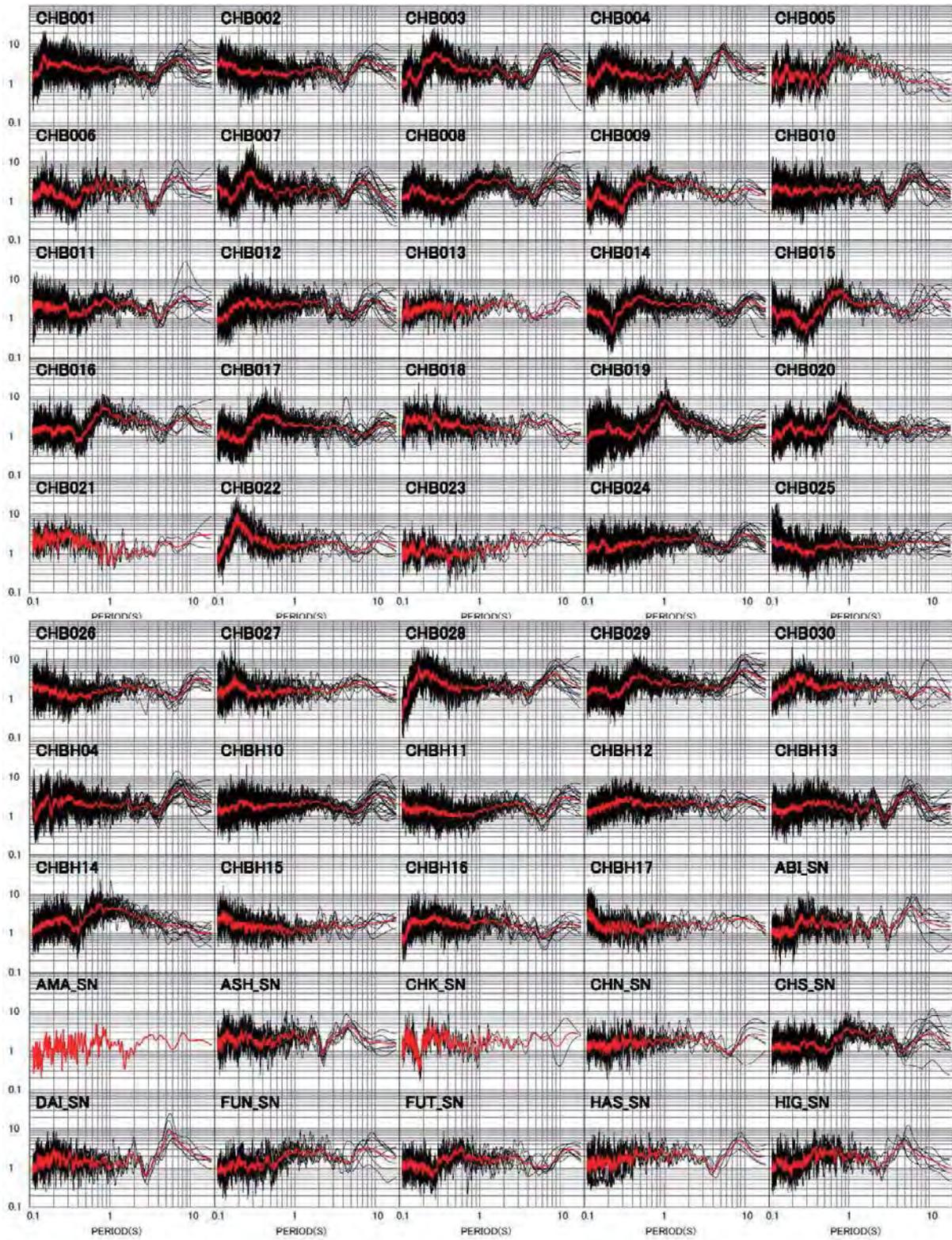


図 8-8 R/V スペクトル (千葉県)

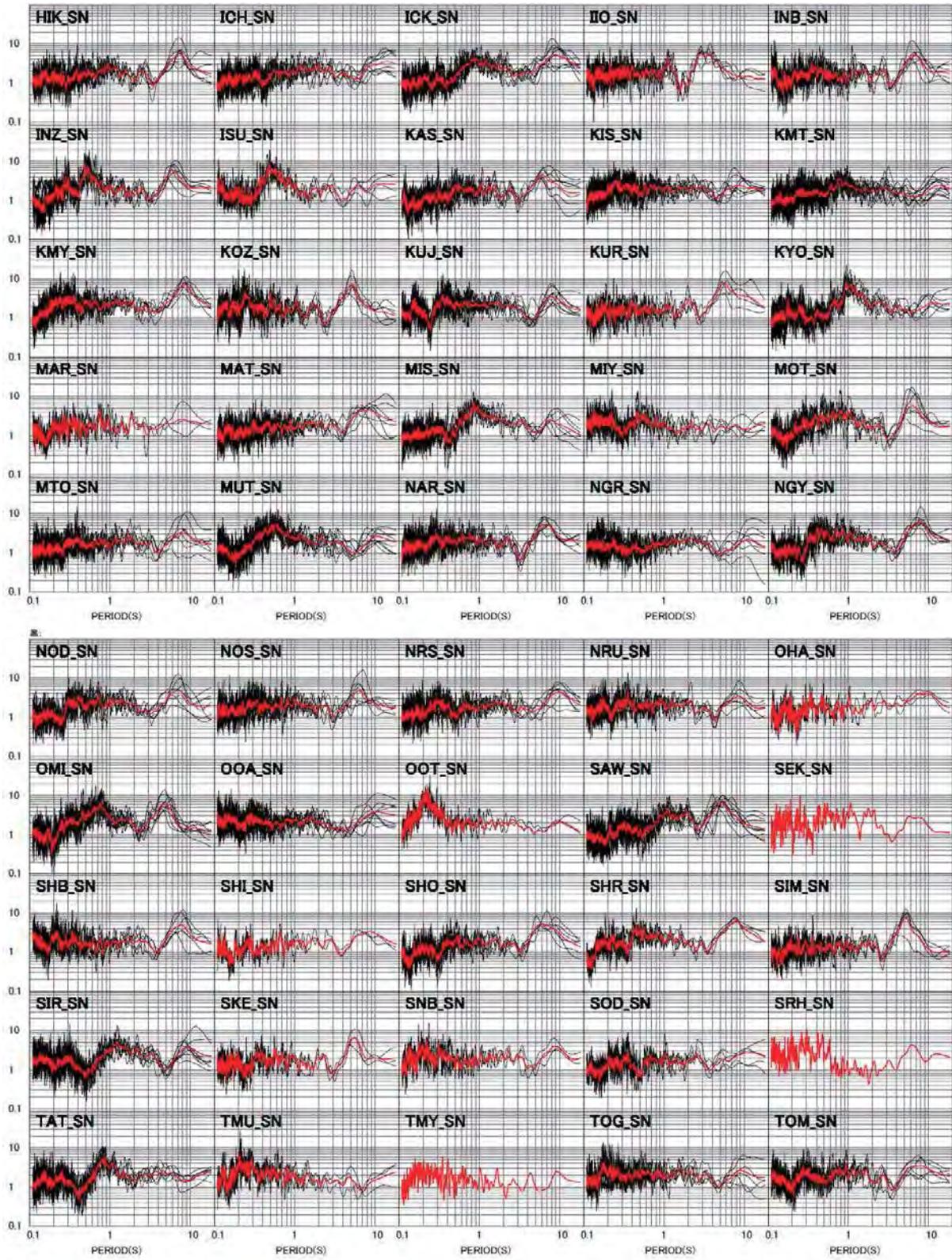


図 8-9 R/V スペクトル (千葉県)

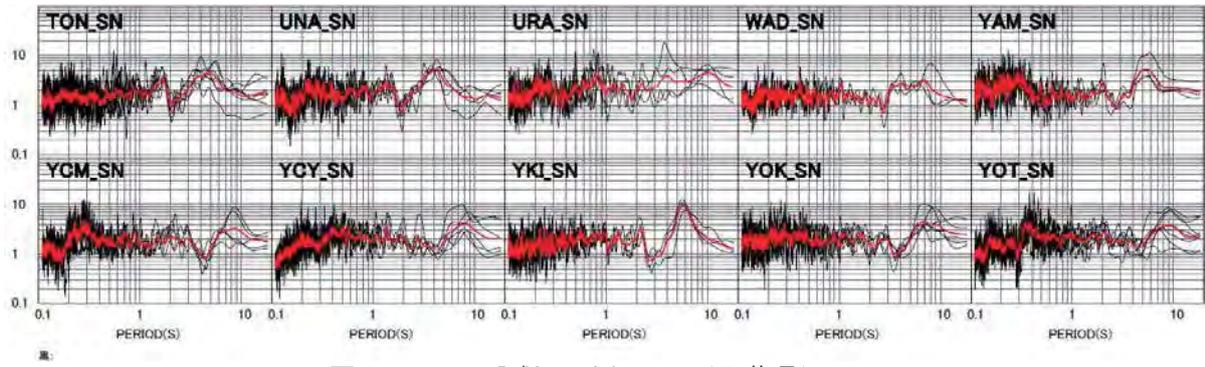


図 8-10 R/V スペクトル (千葉県)

5. 速度構造解析および地盤構造作成の流れ

5-1 速度構造解析の概要

微動探査(アレイ)では、測定データにより得られた実測分散曲線に対し、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コード波を用いてR/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。図9-1には逆解析のフローを示す。また、図9-2にジョイントインバージョン時の層構造修正方法に関する概念図を示す。図16-1にはジョイントインバージョン時の残差の重みづけ方法を、図16-2には地盤構造評価フローをそれぞれ示す。

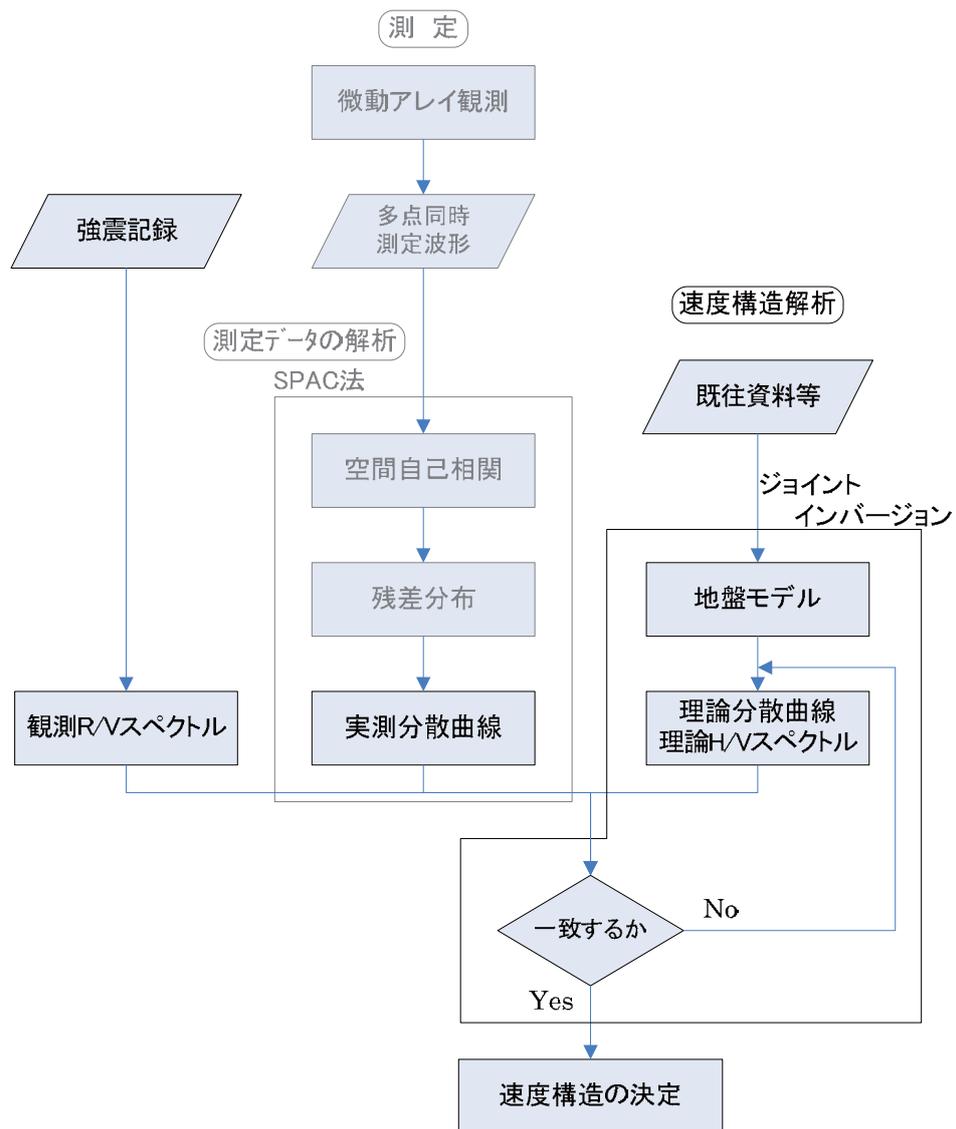


図9-1 逆解析フロー (ジョイント・インバージョン)

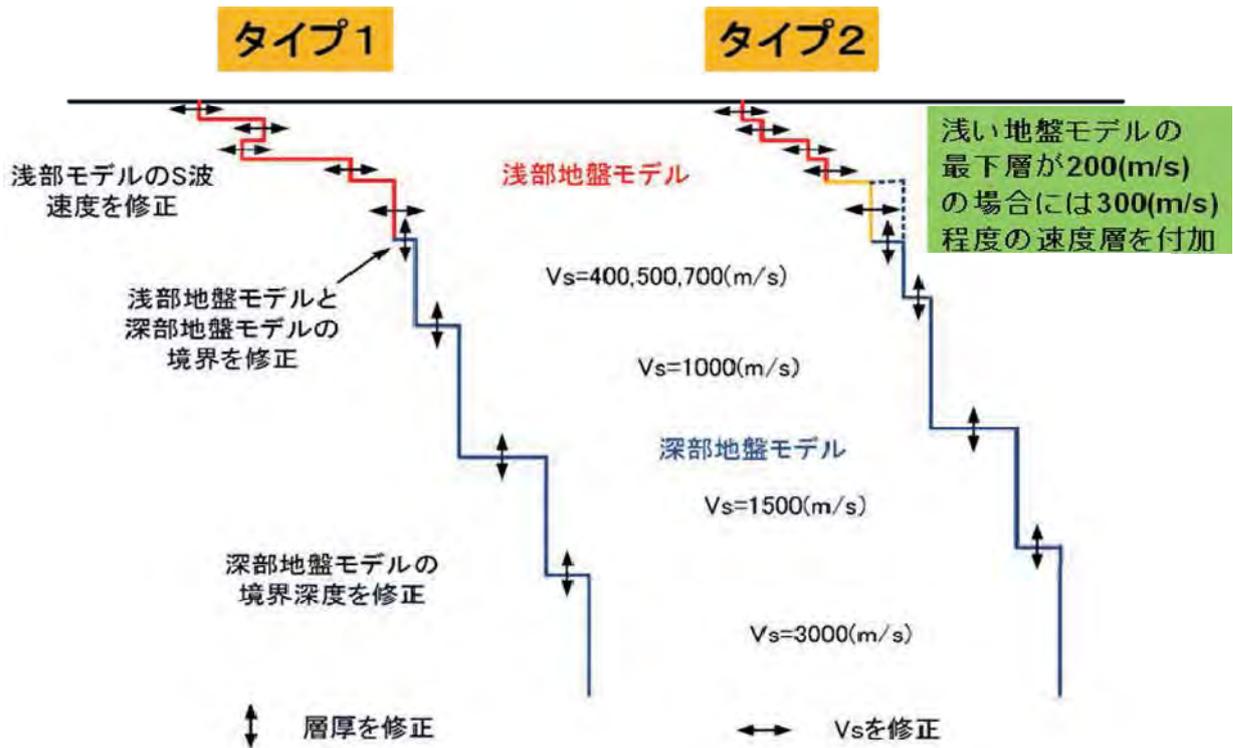


図 9-2 浅部・深部地盤モデルのインバージョン時の層構造修正状況概念図

5-2 初期モデルにおける層の結合方法

層の統合にあたっては、原則として下記の方針で実施した。図 9-3 に層統合の例を示す。

- V_s の値を基準に統合する境界深度を判断する
- 統合の対象となる層の基準は、隣り合う(上下)層の V_s 値の差が、その V_s 値の 20%程度以下である層同士とする。このときの V_s 値の差の上限は、50m/s とする。
- 統合する層がミラージュとなっていて上記基準に従うと統合する層数が多くなり、かつそれらの層の最大 V_s と最小 V_s の差が 100m/s 程度以上となる場合、全てを一つの層にまとめず、下記のどちらかの条件をもって間に境界深度を設ける。

○土質区分が違う層境界

○それらの層の平均 V_s を基準とし、その平均値程度の値を持つ層の境界深度をもって境界とする。

- 統合対象とならない層のうち、層厚がその層の下端深度の 5%程度以下である層、または、層厚 1m 未満の層については無視できるものとみなし、層厚のみを上下いずれか値に近い方の層に擦り付ける。
- 統合した層の速度値および密度値は、元の層の厚さで重みを付けて各層の値を加算平均したものを、統合後の値とする。

$$V_{s_{avr}} = \Sigma H_i / \Sigma (H_i / V_{s_i})$$

- 速度値は上 2 桁で丸める。100m/s 未満の場合は、5m/s 単位とする。
- 密度値は下 1 桁で丸める。

また、下記の場合には、層を 1 層挿入することとした。

- 初期モデルに、隣り合う(上下)層の V_s に 2 倍程度以上の差がある層があり、かつ、実測

分散は滑らかであるのに対し、地盤モデルより得られる理論分散には段差がみられ、逆解析をしてもこの部分が収束しない場合、これらの層の間に中間層を1層挿入する。

- この際、工学的基盤相当層以深層の深度は変わらないように挿入する。
- 挿入層の V_s は、上層の下層の単純平均値をとり、上2桁で丸める。
- 工学的基盤相当層とその上層が対象の場合は、上層の層厚を50%にし、残りの50%を挿入層の厚さに充てる。
- それ以外の場合は、上層下層それぞれの層厚の1/3を挿入層の層厚に充てる。

茨城県メッシュ地盤モデル

解析用初期モデル

下面深度(m)	層厚(m)	P波速度(m/s)	S波速度(m/s)	密度(g/cm ³)	土質区分
1.2	1.2	587	115	1.6	B
2.8	1.6	766	150	1.5	Ac
4.4	1.6	756	148	1.5	Ac
6.0	1.6	716	140	1.4	Ac
7.8	1.8	861	169	1.8	As
9.6	1.8	893	175	1.8	As
11.4	1.8	954	187	1.9	As
13.2	1.8	985	193	1.9	As
15.0	1.8	989	194	1.9	As
16.8	1.8	1004	197	1.9	As
18.6	1.8	998	196	1.8	As
20.6	2.0	847	166	1.5	Ac
22.6	2.0	861	169	1.5	Ac
24.6	2.0	993	195	1.8	As
26.6	2.0	868	170	1.5	Ac
28.6	2.0	930	182	1.6	Ac
30.0	1.4	1000	196	1.7	As
31.4	1.4	1035	203	1.8	As
33.4	2.0	929	182	1.5	Ac
35.4	2.0	956	188	1.6	Ac
37.4	2.0	1012	198	1.6	Ac
69.4	32.0	1001	196	1.6	Ac
369.2	299.8	1800	500	1.9	—
900.8	531.5	2100	700	2.0	—
1050.5	149.7	2400	1000	2.1	—
1460.5	410.0	3000	1500	2.2	—
—	—	5600	3000	2.5	—

下面深度(m)	層厚(m)	P波速度(m/s)	S波速度(m/s)	密度(g/cm ³)	土質区分
1.2	1.2	590	120	1.6	B
6.0	4.8	750	150	1.5	Ac
37.7	31.7	970	190	1.7	As/Ac
69.4	31.7	1700	350	1.8	—
369.2	299.8	1800	500	1.9	—
900.7	531.5	2100	700	2.0	—
1050.4	149.7	2400	1000	2.1	—
1460.4	410.0	3000	1500	2.2	—
—	—	5600	3000	2.5	—

挿入層

挿入層

解析結果

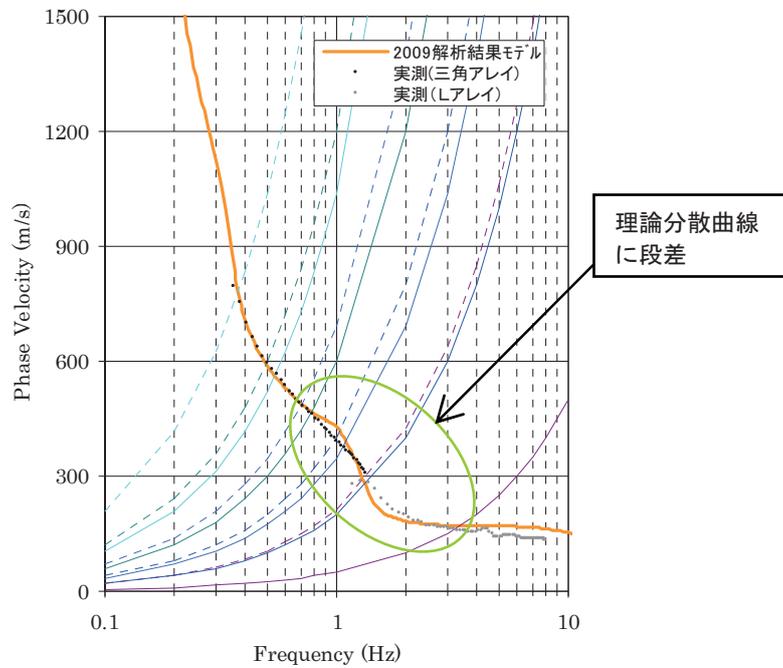


図9-3 層の統合例

5-2-1. 既往メッシュ地盤モデルが未作成地域のモデル作成方針

茨城県西域の 21 測定地点については、当初、浅部地盤のメッシュモデルが未作成であったため、これらの測定地点については以下の方針にて初期モデルを作成した。なお、これらの測定地点については、浅部地盤のメッシュモデルが作成された後に、他の測定地点と同様に前述した方針にて層統合を行って初期モデルを作成した。

- 深部については J-SHIS 公開のメッシュモデルがあるので、それを使う
- 浅部地盤モデルの最下層（深部地盤モデルの最上層）の上面深度については、比較的近い測定地点の深度を参考に決める
- 浅部層の設定は、下記のルールで行う

・基本的な構成は下記とする

Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ (g/cm ³)
510	100	1.5
760	150	1.6
1000	200	1.7
1300	250	1.7
1500	300	1.8
1700	400	1.8
1800	500	1.9

Vp=5.009Vs (ただし Vp ≤ 1500)

300m/s 未満 : 50m/s 単位

300m/s 以上 : 100m/s 単位

- ・逆転層は作らない
- ・最上層は、実測分散の最小位相速度よりやや小さい速度とする
- ・深部モデルを基に、その 500m/s 層を上記の基本的な構成に分割することによって浅部層を設定する
- ・深部モデルの 500m/s 層の層厚 ≤ 20m の場合は、各層厚が薄くしすぎないために、上記層順を間引いた層設定をする
- ・各層の層厚はおおむね等分割を基本とするが、現実的なモデルとするために、200m/s 未満の層は、原則として深度は 5m 以浅とする

5-2-2. 深部地盤モデルへの Vs700m/s 層の挿入方法

Vs700m/s 層の挿入にあたっては、下記のように層統合と同様な方針で行った。

- ・上層 (Vs500m/s) と下層 (Vs900m/s) のそれぞれの層厚の 1/3 を Vs700m/s 層の層厚に充てる。

5-3. 速度構造解析方法

図 9-4 に速度構造解析のフローを示す。

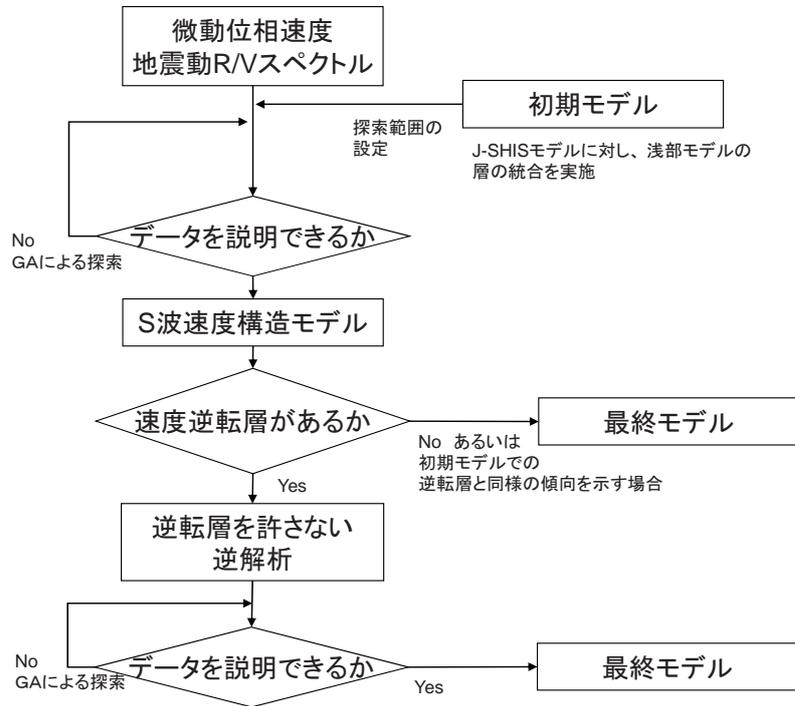


図 9-4 速度構造解析フロー

S 波速度の逆解析には、山中・石田(1995)による遺伝的アルゴリズム(GA, 巻末資料を参照)を用いた。表 8 に遺伝的アルゴリズムのパラメータを示す。世帯数 50, 世代数 25 として、初期乱数を 12 回変えて、基本的に残差の最も小さいモデルを採用した。

表 8 速度構造解析諸元

個体数	50
世帯数	25
交差確率	0.7
突然変異確率	0.01
初期乱数	12

また逆解析に際して、初期モデルに対するパラメータの探索範囲を、基本的に下記のように設定した。

- ・ S 波速度：初期モデルの 0.5～2.0 倍
- ・ 層厚：初期モデルの 0.5～2.0 倍
- ・ 工学的基盤以浅のモデルでは、N 値データなどによる層境界の深度の精度は比較的高く、N 値と S 波速度の関係式より導出した S 波速度の精度が低いため、S 波速度の探索範囲を大きく設定した。
- ・ 工学的基盤以深の速度層の層厚は 0.5～2.0 倍とした。

なお、ジョイントインバージョンにおける位相速度および R/V スペクトルの残差を以下のように定義した。

$$E_{PV} = \left(1/N^{PV}\right) \sum_{j=1}^{N^{PV}} \left[w(f_j) \left(C^o(f_j) - C^c(f_j) \right) / C^o(f_j) \right]^2 \quad (4-1)$$

$$w(f_j) = 1.0 (f_j > 1.0 \text{ Hz})$$

$$w(f_j) = f_j * 0.5 + 0.5 (f_j \leq 1.0 \text{ Hz}) \quad (4-2)$$

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 スペクトルの残差を以下のように定義した。

$$E_{RV} = \left(1/N^{RV}\right) \sum_{j=1}^{N^{RV}} \left[\left(\frac{RV^o(f_j)}{RV_{max}^o} - \frac{RV^c(f_j)}{RV_{max}^c} \right) \right]^2 \quad (4-3)$$

ここで、 N_{RV} 、 $RV_o(f_j)$ 、 $RV_c(f_j)$ 、 RV_{max}^o 、 RV_{max}^c はそれぞれ位相速度のデータ数、周波数 f_j における観測 R/V スペクトル、理論 H/V スペクトル、観測 R/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のように定義した。

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

位相速度は基本モードにより、R/V スペクトルはレイリー波の基本モードから 1 次モードを考慮した理論計算を行った。また、理論 H/V スペクトルは、ピークの形状を合わせるために理論値および観測値の最大値で規格化して残差を計算した。レイリー波の理論 H/V スペクトルは、Arai and Tokimatsu (2004) を参考とした。基本モードから 1 次モードまでを考慮して以下の式のように求めた。

$$\frac{H}{V} = \sqrt{\frac{P_{HR}}{P_{VR}}} \quad (4-5)$$

ここで、

$$P_{VR} = \sum_{j=0}^M P_{VR_j}, \quad P_{HR} = \sum_{j=0}^M P_{HR_j} \quad (4-6)$$

P_{VRj} , P_{HRj} はそれぞれ, j 次モードのレイリー波の鉛直成分および水平成分の相対パワーであり, レイリー波のミディアムレスポンス A_{Rj} を用いて,

$$P_{VRj} = \left(\frac{A_{Rj}}{k_{Rj}} \right)^2 \quad (4-7)$$

$$P_{HRj} = P_{VRj} \cdot \varepsilon_j^2 \quad (4-8)$$

と表せる. k_{Rj} はレイリー波の波数, ε_j は j 次モードのレイリー波の楕円率である. 上記の式ではレイリー波のみを考えている.

なお, 計算された速度構造モデルによる理論 H/V スペクトル比は観測 R/V スペクトル比と良く合っている (図 1 7-1~4). 地震観測記録のあるアレイ観測地点において, 理論 H/V スペクトル比を計算し, ラブ波とレイリー波の比を探索すると, 2 秒よりも短周期で, 平均 R/L は 0.58 であり, 2 秒よりも長周期では平均 R/L は 0.90 程度となった (図 1 7-5).

5-4. 解析手順

3-2 章で得られた位相速度データに対して, 4 章で求めた地震動の R/V スペクトルも考慮した同時解析 (ジョイント・インバージョン) を実施し, 下記の解析手順にて速度構造を求めた. 得られた速度構造解析結果は巻末資料として付す.

なお, 分散曲線と R/V スペクトルの同時逆解析では, 微動探査の測定地点と R/V スペクトル解析地点の距離が 1km 以内である場合のみに実施し, 距離が 1km 以上離れている場合には分散曲線のみ逆解析を実施した.

以下に示す手順に基づいて解析を行った.

① 初期条件

a) 分散曲線と H/V スペクトルのウエイト

実測分散曲線が得られている範囲 : 分散曲線 0.8, R/V 0.2

R/V のみ得られている範囲 : 分散曲線 0.0, R/V 1.0

b) 解析対象範囲外と思われる層は V_s ・深度ともに固定する

・「層の中心深度が最小波長の 1/5 以下」である層 (主に最上層)

※やや緩く固定している 探索範囲 : 深度固定, V_s 0.99-1.0

・地震基盤 ($V_s \geq 3,000$ m/s) は, 原則として V_s ・深度ともに固定

c) b) 以外の層については, 深度可変, V_s 固定で計算する

・探索範囲 : 深度 0.5~2.0 倍, V_s 固定

② この時点でフィッティングがよくない測定地点について

2-1. 深部構造をターゲットとしてフィッティングを改善する

・深部の探索範囲を広げる 探索範囲 : 深度 0.2~4.0 倍

・フィッティングの良否によって, 探索範囲を調整する

・場合によっては中間層を 1 層挿入する

2-2. 浅部構造をターゲットとしてフィッティングを改善する

・深部の探索範囲を狭く設定する 探索範囲 : 深度 0.7~1.3 倍

・フィッティングの良否によって, 探索範囲を調整する

・再統合した層を再統合前の状態に戻す (再統合したモデルの場合)

・浅部モデルを, 深度の探索範囲を狭めにし, V_s 可変で解析する

探索範囲 : 深度 0.8~1.2 倍, V_s 0.5~2.0 倍

- ・ フィッティングの良否によって, 探索範囲を調整する
- ・ 場合によっては中間層を 1 層挿入する

③ 初期モデルと実際の測定結果の乖離が大きい場合には, 個別に調整する

なお, 既往のメッシュ地盤モデルが未作成であった測定地点については, 当初, 任意に作成した地盤モデルを用いて逆解析を進めたが, 既往モデルを用いるよりもスムーズに解析ができた (図 10 参照). このことから今後は, 初期モデルとして任意モデルを用いて逆解析を行い, 最後にメッシュモデルを当てはめる, といった解析手順も考えられる.

また, 上記の解析手順で解析した結果において, フィッティングが良くない測定地点があった. 特に, 理論 H/V スペクトルのピークが鋭く, 観測 R/V スペクトルとフィッティングしない測定地点が見られた.

このような測定地点に対しては, 以下の検討を行い, 最終的な速度構造を求めた.

5-5. 鋭いピークの H/V スペクトルに対する対処について

H/V スペクトルに対する通常の解析では, 観測 R/V スペクトル, 理論 H/V スペクトルとも, それぞれのピーク値を用いて規格化している. ほとんどの観測点については, この方法でとくに問題はないが (図 10), 理論 H/V スペクトルに鋭いピーク (特に 1Hz 前後) が現れるような観測点の場合 (図 11) には観測データをうまく説明できていないのが現状であった. そこで, この問題に対して, (1) 計算方法の修正 (プログラムの改善), (2) 分散曲線と H/V スペクトルにおける残差の重み付けの割合の変更, の 2 つの対処を行った. なお, 今回の解析において理論 H/V スペクトルに鋭いピークが現れている測定地点は, 以下の 7 地点である.

- ・ IBRA024 小美玉市役所
- ・ IBRA034 波崎総合支所
- ・ IBRA048 かすみがうら市役所
- ・ IBRA049 新治庁舎
- ・ IBRA051 明野支所
- ・ IBRA052 真壁庁舎
- ・ IBRA053 協和支所

① 計算方法の修正 (プログラムの改善)

フィッティングの際に, 観測 R/V スペクトルの規格化したピークと理論 H/V スペクトルのピークではなく, スペクトルの形状をフィッティングさせるように, 観測値と計算値の残差の計算方法を修正した. 残差の計算方法を以下に示す.

- i 観測データの低周波数側の最大値を求める (振幅値: A_{\max} , 周波数: f_{\max}).
- ii 低周波数側から最初に $A_{\max}/2$ を超える周波数 f_1 を求める.
- iii $A_{\max}/2$ を下回る周波数 f_2 を求める.
- iv 観測値, 計算値をそれぞれ, $(OBS(f_1) + OBS(f_2))/2$, $(CAL(f_1) + CAL(f_2))/2$ の値で規格化する.
- v 規格化された観測値, 計算値の残差を計算する. ただし, 周波数 $(f_1 + f_{\max})/2$ と $(f_2 + f_{\max})/2$ の間のデータでは残差は計算しない.

上記の計算方法による解析結果をこれまでの解析結果と比較して図 2-11 に示す. なお, 今回の逆解析の条件としては, 浅部 (V_s が 500m/s より遅い速度層) の S 波速度および層厚を固定し, 深部 (V_s が 500m/s 以上の速度層) の境界深度を ± 100 m の範囲で探索するようにした.

○フィッティングが改善された測定地点 (図 12 参照)

IBRA051(明野支所)および IBRA053(協和支所)については、元々、ピークの位置はほぼ合致していたこともあって、改善したことにより 1Hz 付近のピークを中心とした理論 H/V スペクトルと観測 R/V スペクトルの形状はよくフィッティングするようになった。

しかし、これらの以外の測定地点については、分散曲線はよくフィッティングしているものの、理論 H/V スペクトルのピークが観測 R/V スペクトルのピークよりも低周波数側に推定され、観測 R/V スペクトルとのフィッティングは改善されなかった。

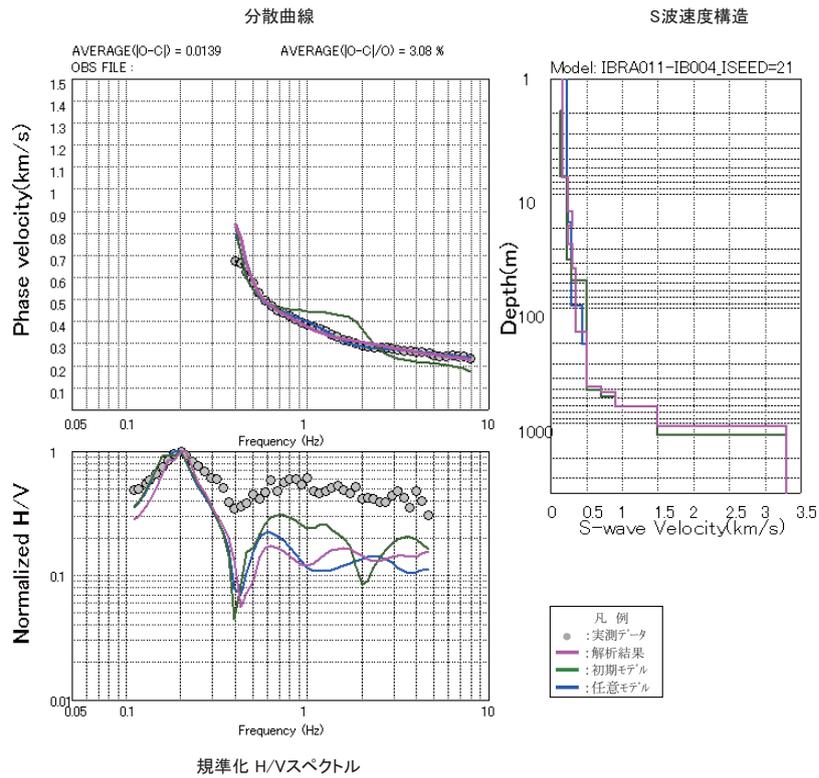
観測 R/V スペクトルとのフィッティングは改善されなかった理由としては、ピークが認められる周波数範囲では観測 R/V スペクトルとのフィッティングよりも実測分散曲線とのフィッティングを重視して残差を計算していることが挙げられる。そこで、フィッティングが改善されなかった測定地点については、この周波数範囲における分散曲線と H/V スペクトルの残差の重み付けの割合を変更して、再度、逆解析することにした。

② 残差の重み付けの割合の変更

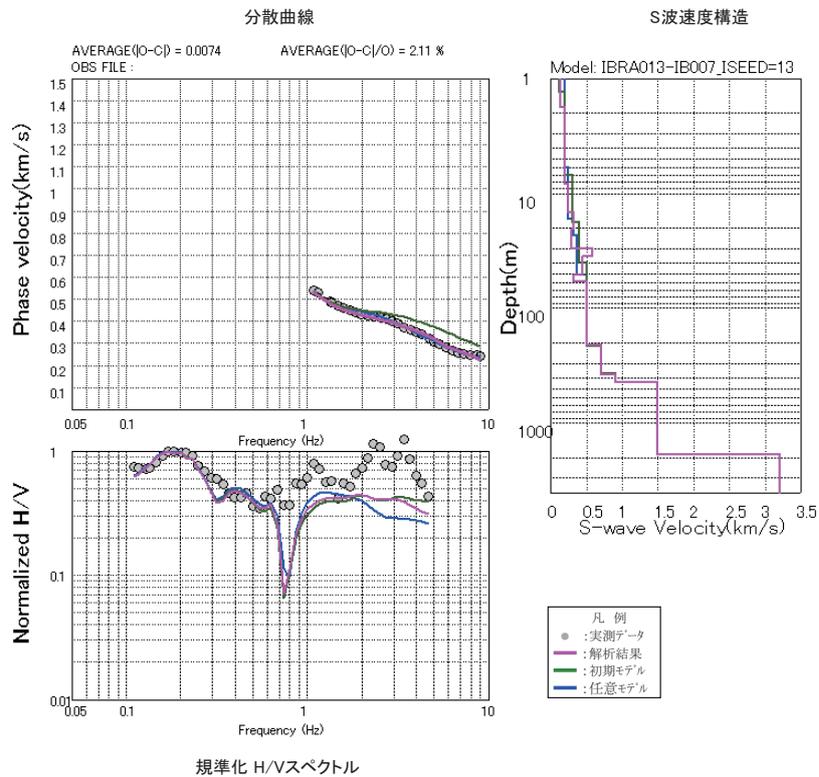
前述した計算方法の修正によっても、観測 R/V スペクトルと理論 H/V スペクトルのフィッティングが改善されなかった観測点は、以下の 5 地点である。これらの観測点については、分散曲線と H/V スペクトルにおける残差の重み付けの割合を変更して再解析を行った。

- ・ IBRA024 小美玉市役所
- ・ IBRA034 波崎総合支所
- ・ IBRA048 かすみがうら市役所
- ・ IBRA049 新治療舎
- ・ IBRA052 真壁庁舎

現状、残差を計算する際の重みは、実測分散曲線がなく観測 R/V スペクトルのみの周波数範囲では、分散曲線が 0、H/V スペクトルが 1 である。また、両方が重なり合う周波数範囲では、遷移的に変化する区間を挟んで、分散曲線が 0.8、H/V スペクトルが 0.2 としている。最終的な残差は、分散曲線と H/V スペクトルのそれぞれの残差に同じ比率となる係数 0.5 を掛けることによって求めている。今回、重み付けの割合を変更するために、係数 α および β の比率を変えた (図 1 3-1)。図 1 3-2 に第 2 段階でフィッティングが改善された例を示す。

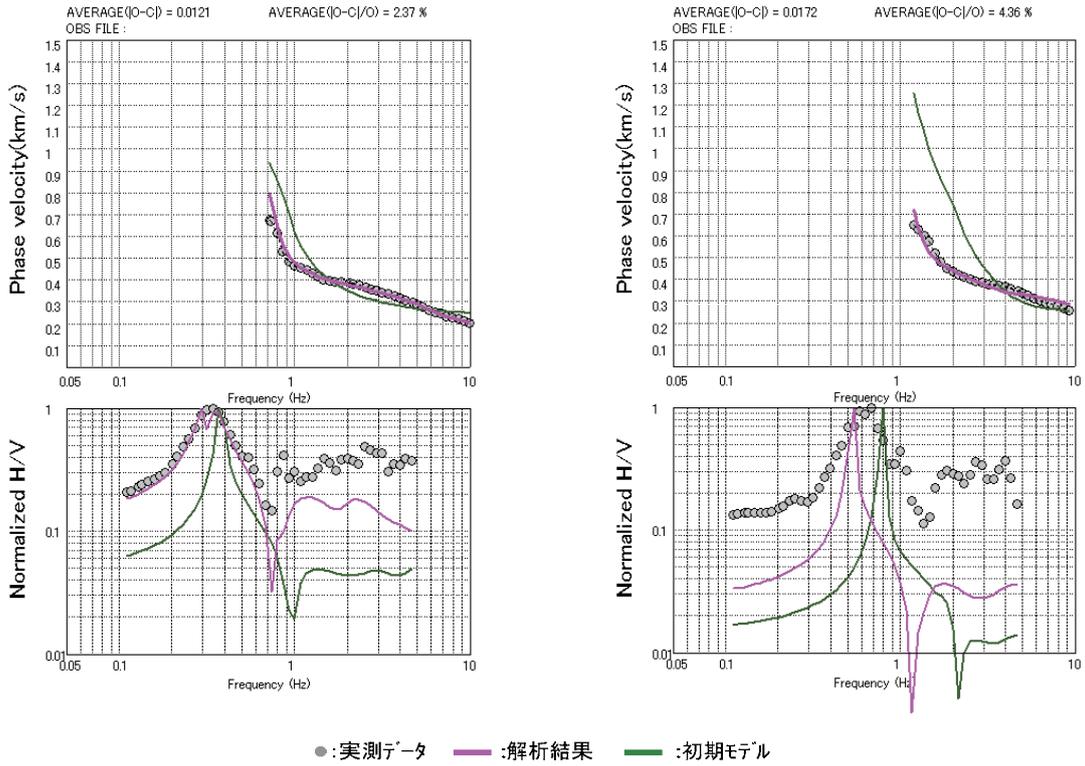


(a) IBRA011 古河庁舎



(b) IBRA013 結城市役所

図 10 任意モデルの解析結果例



(a) 通常の観測点
(例: IBRA001 つくば)

(b) 鋭いピークが見られる観測点
(例: IBRA049 新治庁舎)

図 1 1 - 1 鋭いピークが見られる H/V スペクトル例

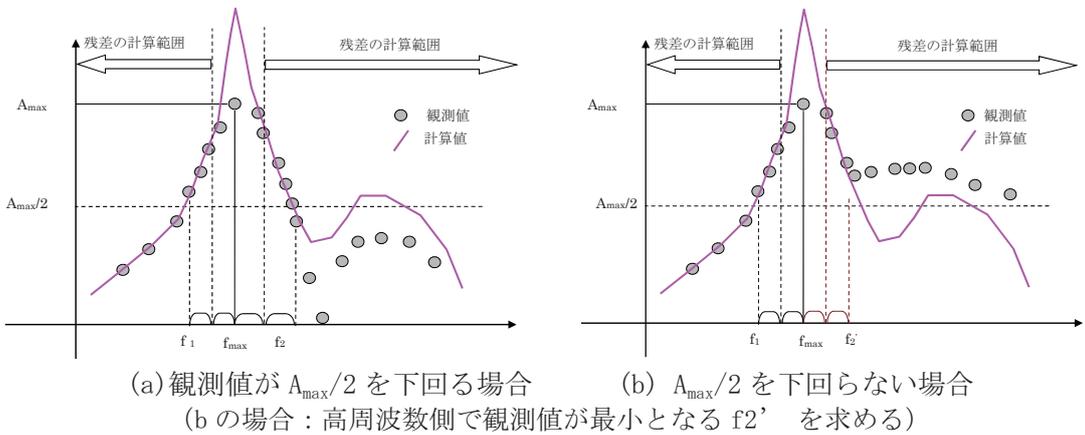
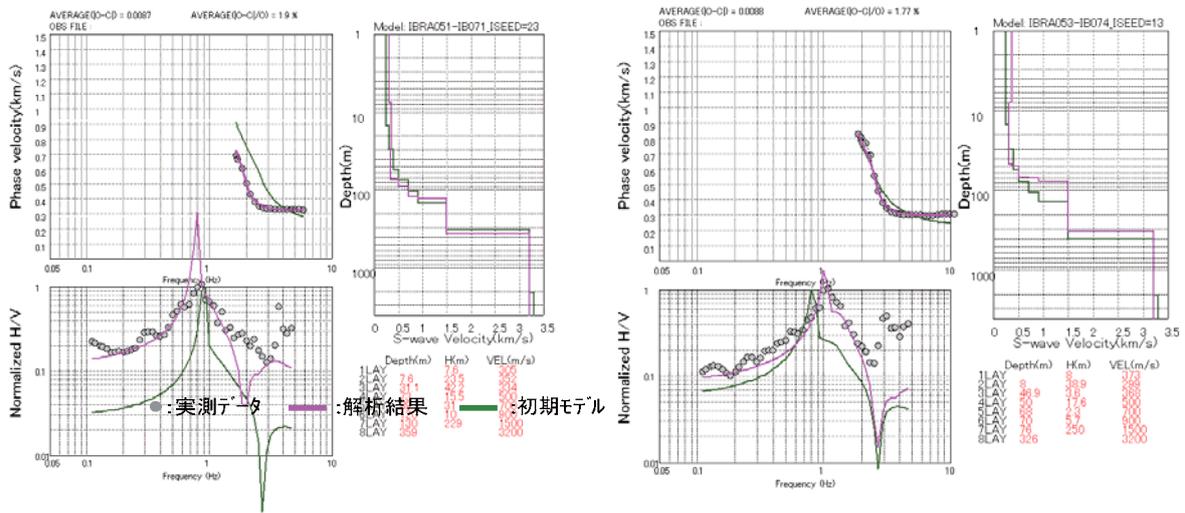


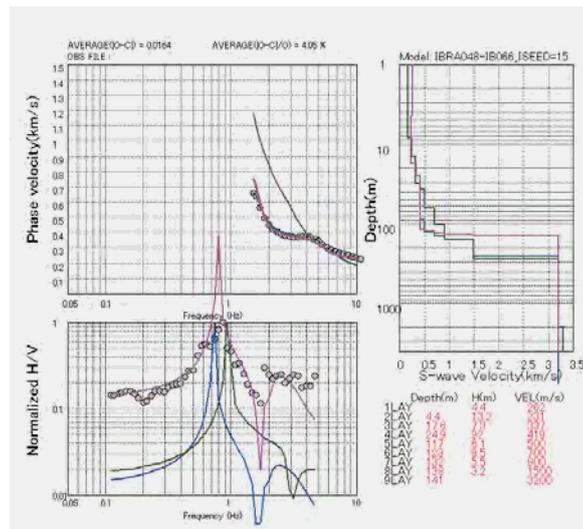
図 1 1 - 2 残差の計算方法



IBRA051 明野支所

IBRA053 協和支所

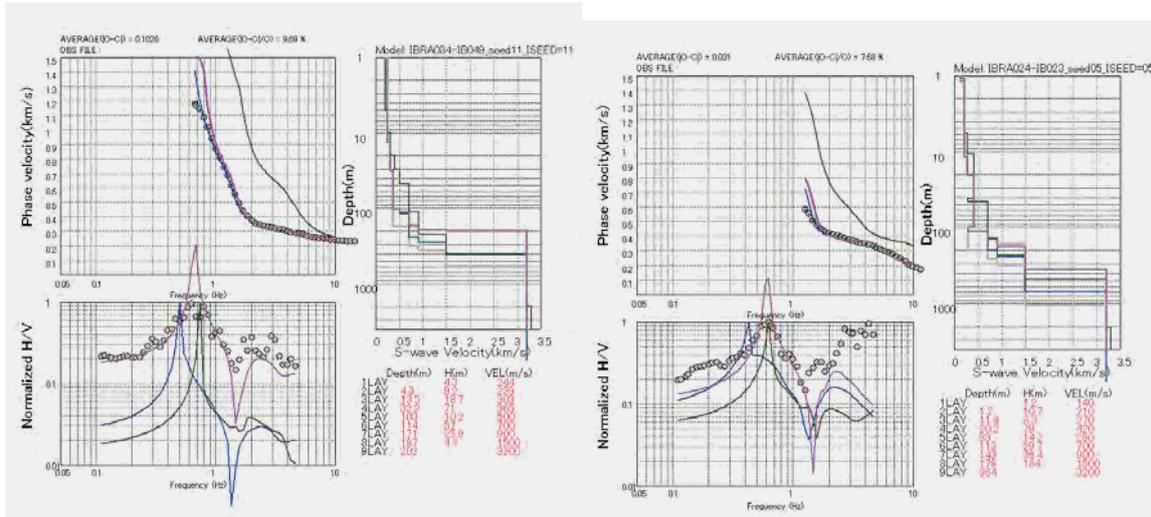
図 1.2 フィッティングが改善された解析結果例



IBRA048 かすみがうら市役所

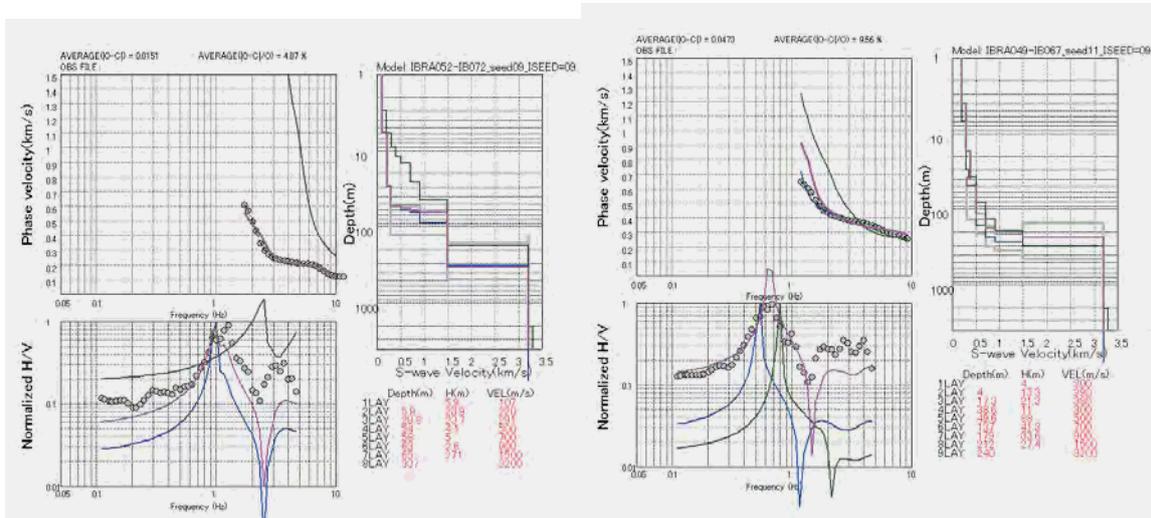
— :初期モデル — :これまでの結果 — :再解析結果

図 1.3-1 第1段階でフィッティングが改善された例



IBRA024 小美玉市役所

IBRA034 波崎総合支所



IBRA049 新治疗舎

IBRA052 真壁庁舎

— :初期モデル — :これまでの結果 — :再解析結果

図 13-2 第 2 段階でフィッティングが改善された例

5-6. 高次モードの取り扱い

微動アレイの観測では、高次モードと考えられる位相速度が上に凸の形状を示す観測点がある。そのような観測記録に対しては、位相速度の低速度側を読み取り、インバージョンでは基本モードの位相速度を用いて逆解析を行った。ここでは、上記のように低速度側を読み取って基本モードで逆解析した結果と高次モードと思われる観測位相速度を読み取って高次モードを考慮した逆解析を行った結果について比較を行った。図14-1に高次モードと思われる位相速度を用いた解析結果を示す。同図には、位相速度の低速度側を読み取って基本モードで解析を行った結果もあわせて示している。IBRA021（谷田部）では若干 S 波速度構造が異なるが、IBRA006（石下）、IBRA011（古河）では S 波速度に大きな違いは見られなかった。図14-2には、同じ位相速度のデータを基本モードで逆解析した結果と高次モードを考慮した逆解析を行った結果の比較を示す。深度 10-20 m 付近に S 波速度構造に相違がみられた。図14-3には、それぞれの解析結果による S 波増幅特性の比較を示す。両者の結果に大きな違いは見られなかった。以下に結果をまとめる。

- ・高次モードを読み取った場合の解析結果と基本モードを読み取った解析結果に大きな違いは見られない。
- ・S 波増幅特性に及ぼす影響は大きくない(H/V スペクトルとの同時逆解析を行っているため)
- ・同一の位相速度データに対して、高次モード考慮の解析と基本モードでの解析を行った結果では、高次モード考慮の解析結果の S 波速度がやや低速度を示す。
- ・高次モードの観測位相速度は、観測日時によって変化する地点も見られた。高次モードの発生機構、高次モードの混入度合いの日変化など今後の検討課題である。

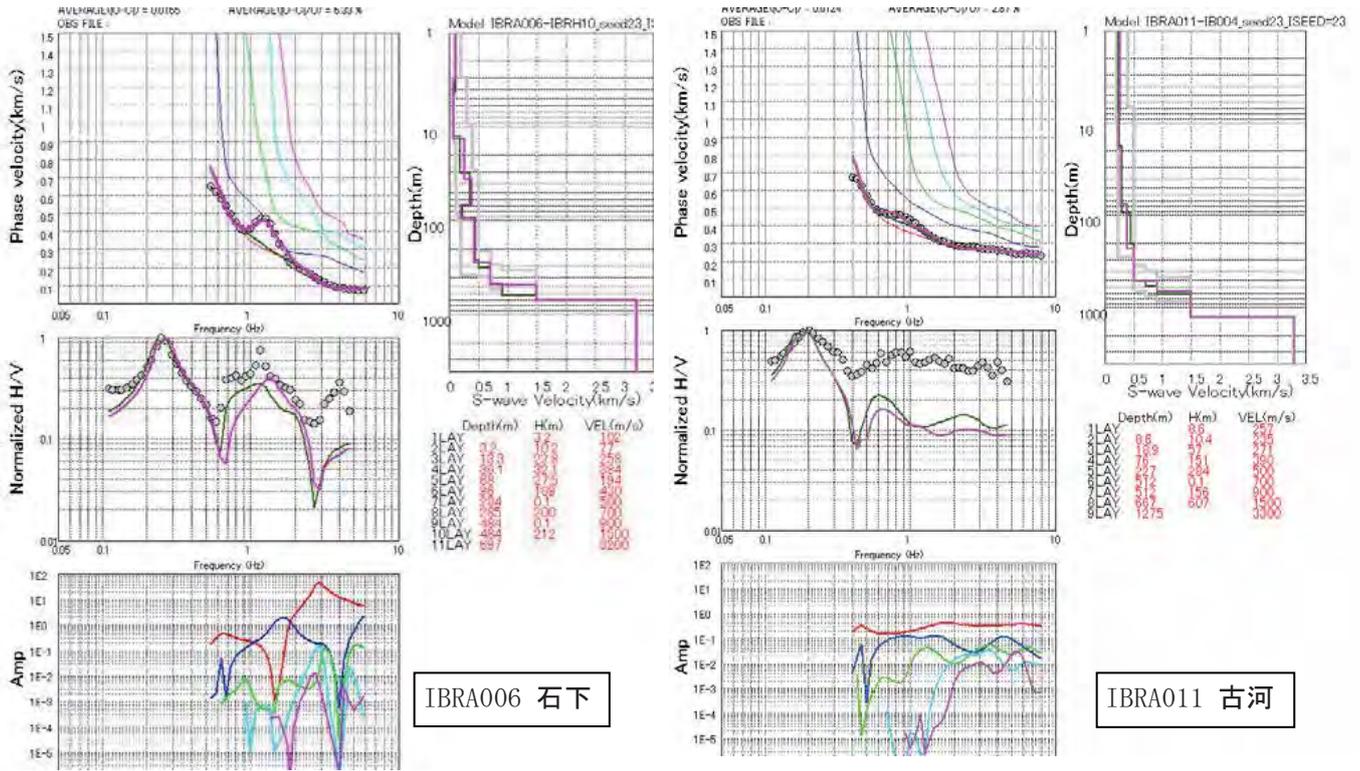


図 14-1-1 高次モードと思われる位相速度を用い解析結果
 赤：高次モードと思われる位相速度を用いた解析結果（高次モード考慮）
 緑：高次モードを読み取らずに基本モードとして解析を行った結果

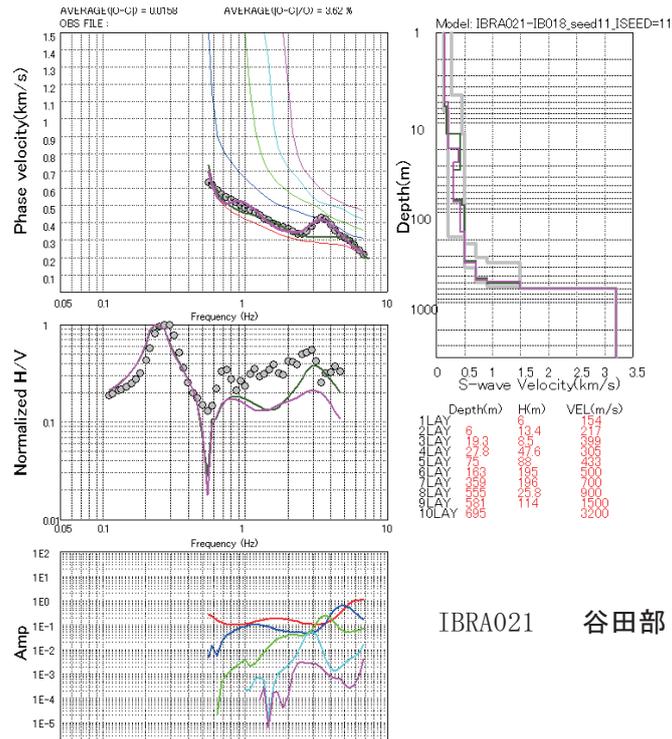


図 14-1-2 高次モードと思われる位相速度を用いた解析結果
 赤：高次モードと思われる位相速度を用いた解析結果（高次モード考慮）
 緑：高次モードを読み取らずに基本モードとして解析を行った結果

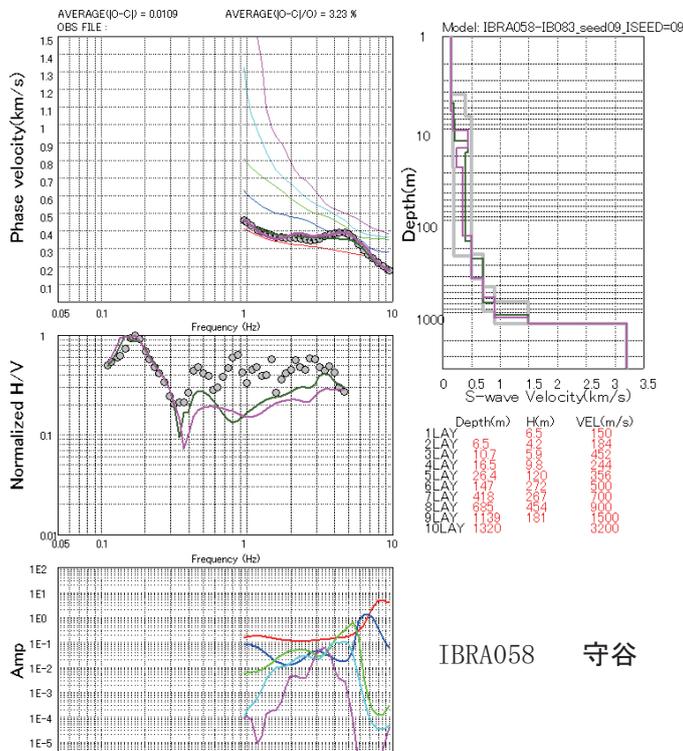


図 14-2 高次モード解析と基本モード解析の比較
 赤：高次モード考慮 緑：基本モードで解析

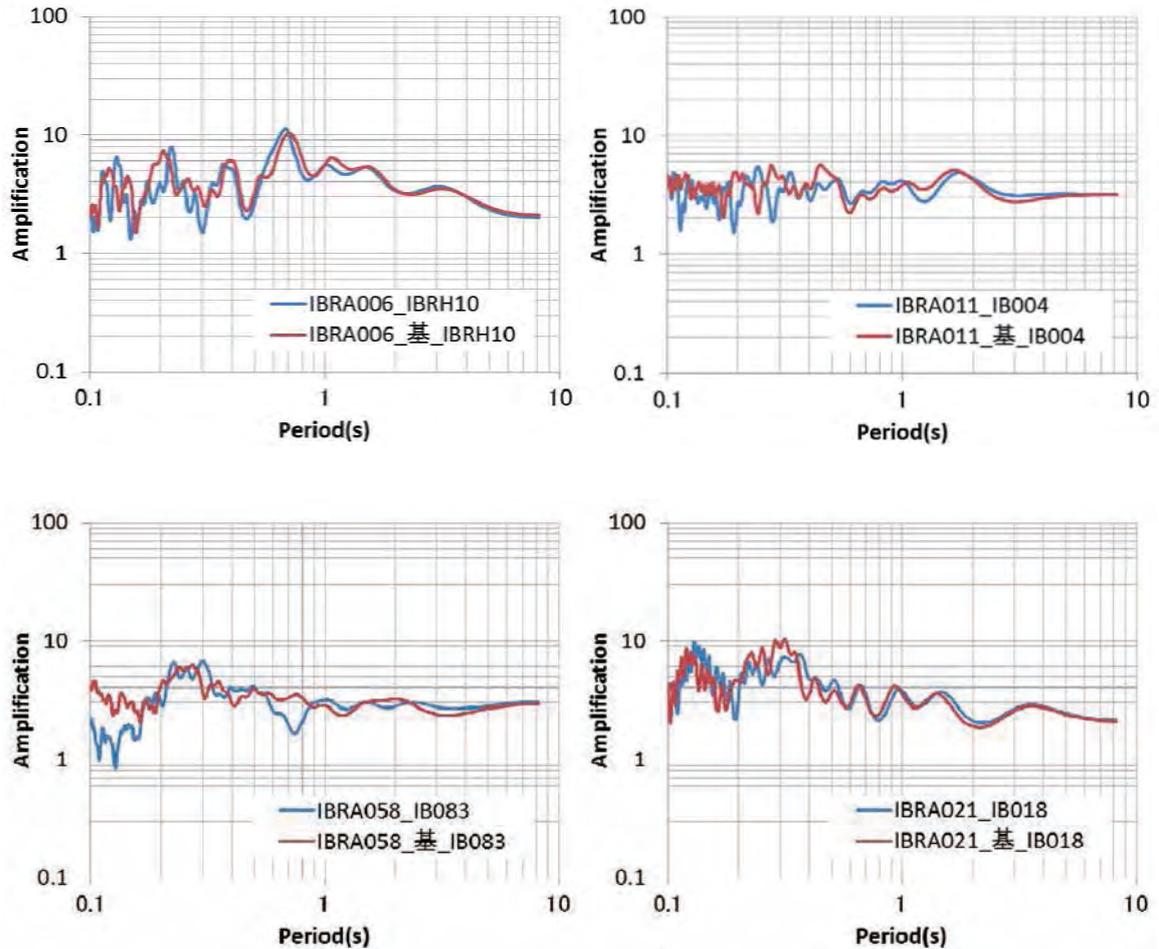


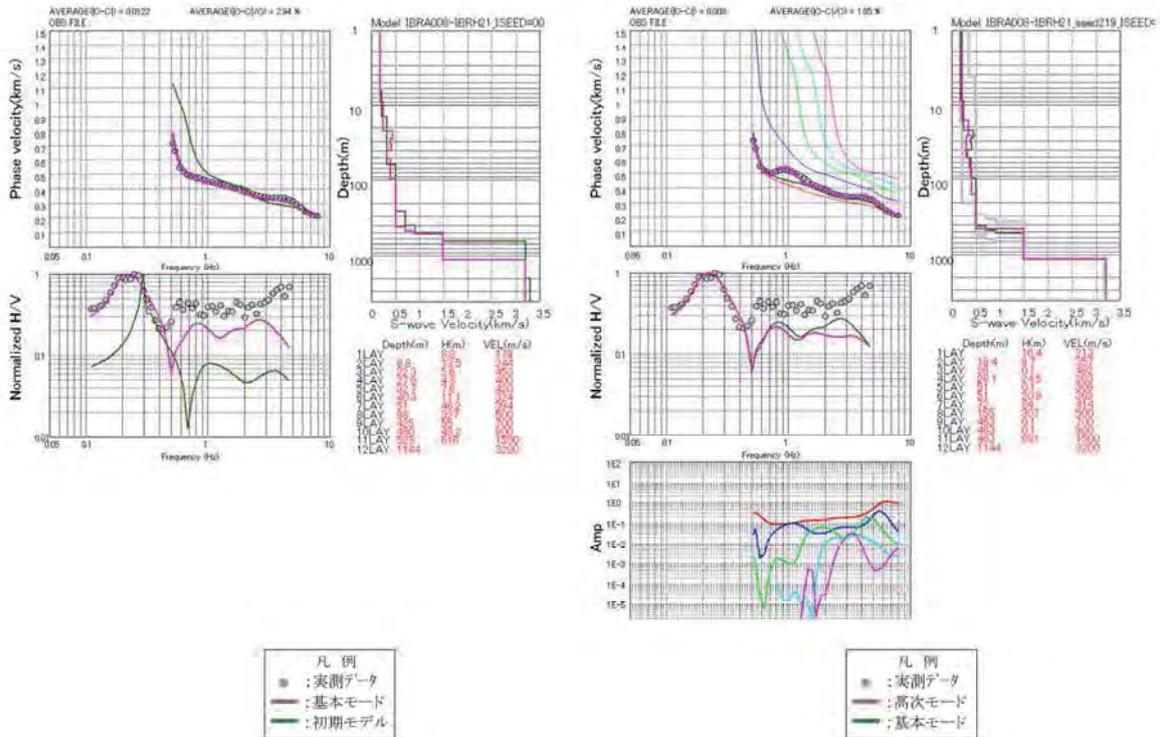
図 1 4 - 3 S 波増幅特性の比較
 青：高次モードを考慮した解析結果 茶：基本
 モードによる解析結果

図 1 5 - 1 ~ 図 1 5 - 4 に高次モードが確認された 4 地点の解析結果（各モードの確認）を示す。

IBRA008 つくば南

基本モード解析

高次モード解析



初期モデル

下面深度(m)	層厚(m)	P波速度(m/s)	S波速度(m/s)	密度(g/cm ³)	土質区分
6.4	6.4	890	180	1.65	Dl/De/Ds
14.5	8.1	1100	220	1.90	Ds
22.5	8.0	1400	280	1.85	Ds/Dc
31.0	8.5	1700	360	2.00	Ds
48.5	17.5	1600	300	1.80	Dc
59.8	11.3	1700	380	2.00	Ds
63.0	3.2	1500	290	1.80	Dc
254.3	191.3	1800	500	1.90	—
400.7	146.4	2100	700	2.00	—
502.0	101.3	2400	900	2.05	—
659.0	157.0	3200	1500	2.25	—
2014	1355	5500	3200	2.65	—
7015	5001	5700	3300	2.70	—
—	—	6000	3400	2.75	—

基本モード解析結果

下面深度(m)	層厚(m)	P波速度(m/s)	S波速度(m/s)	密度(g/cm ³)	土質区分
7.6	8.8	890	179	1.65	Dl/De/Ds
27.1	13.5	1100	244	1.90	Ds
32.3	5.6	1400	450	1.85	Ds/Dc
37.9	4.8	1700	400	2.00	Ds
49.3	7.6	1600	420	1.80	Dc
56.7	11.1	1700	324	2.00	Ds
58.8	46.2	1500	394	1.80	Dc
414.8	327.0	1800	500	1.90	—
486.8	55.0	2100	700	2.00	—
626.8	48.2	2400	900	2.05	—
1144	616.0	3200	1500	2.25	—
—	—	5500	3200	2.65	—

高次モード解析結果

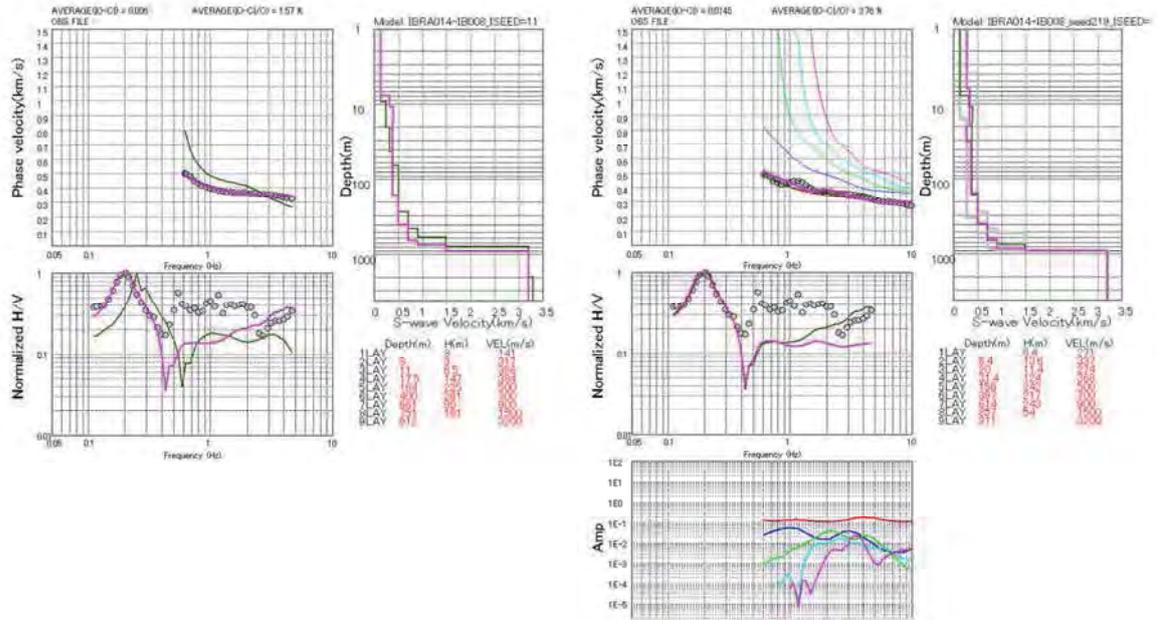
下面深度(m)	層厚(m)	P波速度(m/s)	S波速度(m/s)	密度(g/cm ³)	土質区分
16.4	16.4	890	213	1.65	Dl/De/Ds
26.0	9.7	1100	357	1.90	Ds
26.1	0.1	1400	492	1.85	Ds/Dc
51.0	24.5	1700	303	2.00	Ds
51.0	0.1	1600	309	1.80	Dc
72.0	20.9	1700	362	2.00	Ds
155.0	84.0	1500	414	1.80	Dc
463.0	307.0	1800	500	1.90	—
463.0	0.1	2100	700	2.00	—
463.0	0.1	2400	900	2.05	—
1144	681.0	3200	1500	2.25	—
—	—	5500	3200	2.65	—

図 15-1 高次モードが確認地点の解析結果(つくば南)

IBRAO14 龍ヶ崎市役所

基本モード解析

高次モード解析



凡例
 ● : 実測データ
 — : 基本モード
 — : 初期モデル

凡例
 ● : 実測データ
 — : 高次モード
 — : 基本モード

初期モデル

下面深度(m)	層厚(m)	P波速度(m/s)	S波速度(m/s)	密度(g/cm ³)	土質区分
9.4	9.4	730	140	1.65	Ac/As/Ds
20.5	11.1	1300	250	1.90	Ds
43.1	22.6	1600	320	1.90	Dc/Ds
65.1	22.0	1700	380	2.00	Ds
274.4	209.3	1800	500	1.90	—
446.7	172.3	2100	700	2.00	—
582.0	135.3	2400	900	2.05	—
785.0	203.0	3200	1500	2.25	—
907.0	122.0	5500	3200	2.65	—
708.0	500.0	3400	3300	2.70	—
—	—	6000	3400	2.75	—

基本モード解析結果

下面深度(m)	層厚(m)	P波速度(m/s)	S波速度(m/s)	密度(g/cm ³)	土質区分
8.0	8.0	730	141	1.65	Ac/As/Ds
11.0	3.0	1300	317	1.90	Ds
17.5	6.5	1600	396	1.90	Dc/Ds
164.5	147.0	1700	384	2.00	Ds
399.5	235.0	1800	500	1.90	—
660.5	261.0	2100	700	2.00	—
750.5	90.0	2400	900	2.05	—
911.5	161.0	3200	1500	2.25	—
—	—	5500	3200	2.65	—

高次モード解析結果

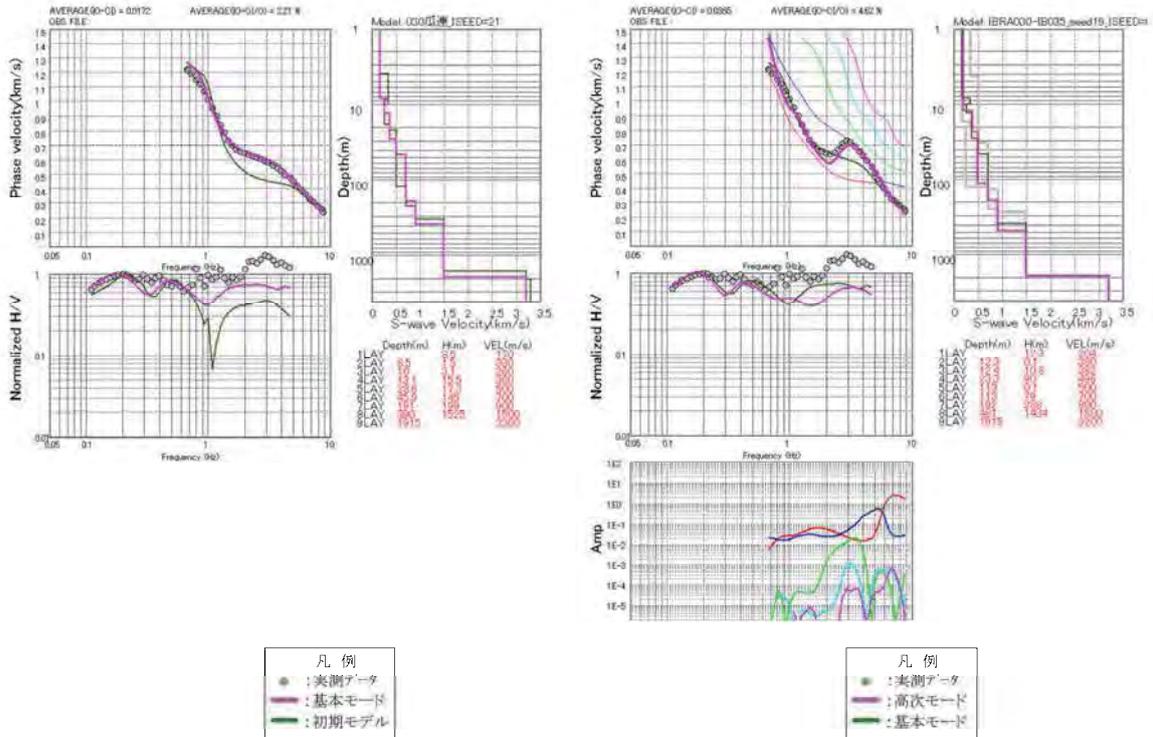
下面深度(m)	層厚(m)	P波速度(m/s)	S波速度(m/s)	密度(g/cm ³)	土質区分
6.4	6.4	730	271	1.65	Ac/As/Ds
20.0	13.6	1300	337	1.90	Ds
31.4	11.4	1600	274	1.90	Dc/Ds
156.0	124.0	1700	368	2.00	Ds
397.0	242.0	1800	500	1.90	—
614.0	217.0	2100	700	2.00	—
857.0	243.0	2400	900	2.05	—
911.0	54.0	3200	1500	2.25	—
—	—	5500	3200	2.65	—

図 15-2 高次モードが確認地点の解析結果 (龍ヶ崎市役所)

IBRA030 瓜連支所

基本モード解析

高次モード解析



初期モデル

下面深度(m)	層厚(m)	P波速度(m/s)	S波速度(m/s)	密度(g/cm ³)	土質区分
3.9	3.9	870	170	1.55	Dl/Dc
8.7	4.8	1700	330	2.00	Dg
18.3	9.6	1300	260	1.85	Ds/Dc
21.7	3.4	1700	360	2.10	Dg
121.1	99.5	1800	500	1.90	—
223.3	102.1	2100	700	2.00	—
328.0	104.7	2400	900	2.05	—
1602	1274	3200	1500	2.25	—
2045	443.0	5500	3200	2.65	—
7046	5001	5700	3300	2.70	—
—	—	6000	3400	2.75	—

基本モード解析結果

下面深度(m)	層厚(m)	P波速度(m/s)	S波速度(m/s)	密度(g/cm ³)	土質区分
8.5	8.5	870	170	1.55	Dl/Dc
10.0	1.5	1700	330	2.00	Dg
13.1	3.1	1300	260	1.85	Ds/Dc
28.6	15.5	1700	360	2.10	Dg
45.9	17.3	1800	500	1.90	—
190.9	145.0	2100	700	2.00	—
389.9	199.0	2400	900	2.05	—
1915	1525	3200	1500	2.25	—
—	—	5500	3200	2.65	—

高次モード解析結果

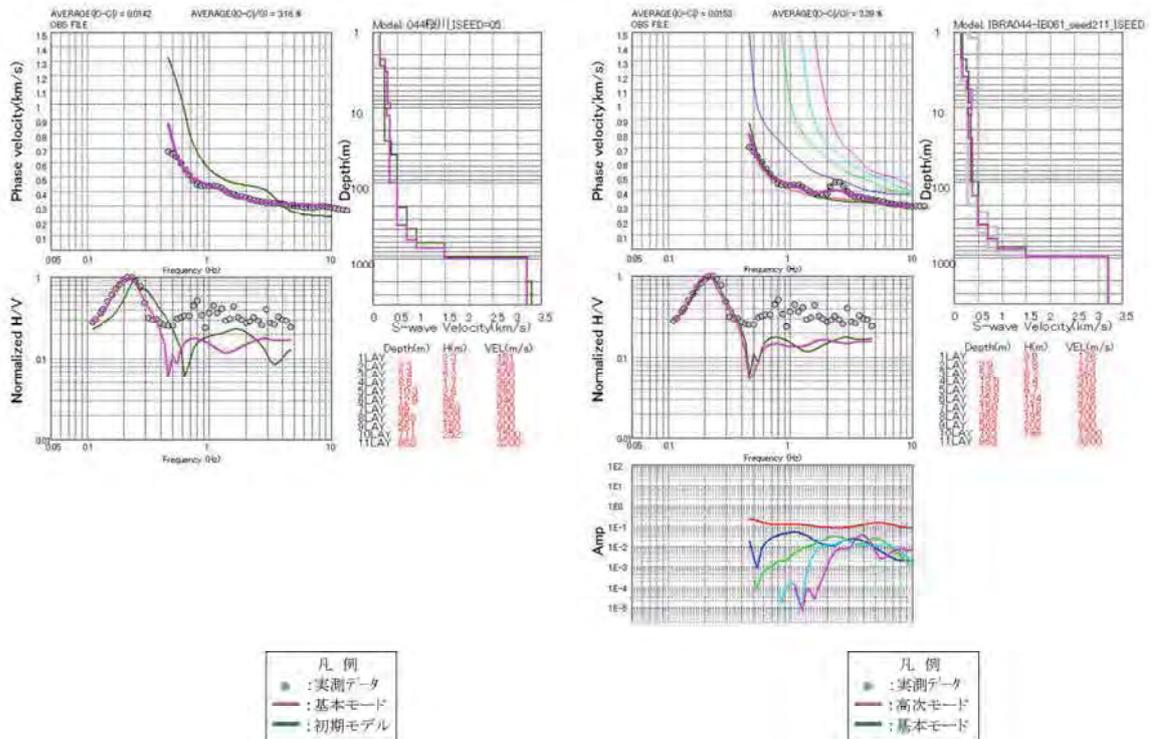
下面深度(m)	層厚(m)	P波速度(m/s)	S波速度(m/s)	密度(g/cm ³)	土質区分
12.3	12.3	870	204	1.55	Dl/Dc
12.4	0.1	1700	380	2.00	Dg
23.3	10.8	1300	382	1.85	Ds/Dc
113.0	90.0	1700	496	2.10	Dg
113.0	0.1	1800	500	1.90	—
192.0	79.0	2100	700	2.00	—
481.0	288.0	2400	900	2.05	—
1915	1434	3200	1500	2.25	—
—	—	5500	3200	2.65	—

図 15-3 高次モードが確認地点の解析結果 (瓜連支所)

IBRA044 桜川庁舎

基本モード解析

高次モード解析



初期モデル

下面深度(m)	層厚(m)	P波速度(m/s)	S波速度(m/s)	密度(g/cm ³)	土質区分
2.8	2.8	770	150	1.75	B/As
7.3	4.5	1100	210	1.90	As
19.7	12.4	1500	290	1.90	As
22.7	3.0	1000	200	1.60	As/Ap
27.8	5.1	1400	270	1.90	Ds
41.7	13.9	1600	380	2.00	Ds
210.6	168.9	1800	500	1.90	—
399.0	188.4	2100	700	2.00	—
607.0	208.0	2400	900	2.05	—
919.0	312.0	3200	1500	2.25	—
2001	1082	5500	3200	2.65	—
7002	5001	5700	3300	2.70	—
—	—	6000	3400	2.75	—

基本モード解析結果

下面深度(m)	層厚(m)	P波速度(m/s)	S波速度(m/s)	密度(g/cm ³)	土質区分
2.2	2.3	770	151	1.75	B/As
3.9	1.1	1000	258	1.90	As
8.6	5.2	1500	300	1.90	As
9.7	1.7	1000	360	1.60	As/Ap
11.6	2.6	1400	290	1.90	Ds
122.0	86.0	1600	346	2.00	Ds
358.0	259.0	1800	500	1.90	—
671.0	203.0	2100	700	2.00	—
739.0	150.0	2400	900	2.05	—
963.0	252.0	3200	1500	2.25	—
—	—	5500	3200	2.65	—

高次モード解析結果

下面深度(m)	層厚(m)	P波速度(m/s)	S波速度(m/s)	密度(g/cm ³)	土質区分
3.9	3.9	770	178	1.75	B/As
5.8	1.8	1000	273	1.90	As
12.5	6.7	1500	363	1.90	As
18.9	6.4	1000	310	1.60	As/Ap
25.6	6.7	1400	308	1.90	Ds
150.0	124.0	1600	376	2.00	Ds
368.0	218.0	1800	500	1.90	—
563.0	195.0	2100	700	2.00	—
765.0	202.0	2400	900	2.05	—
963.0	198.0	3200	1500	2.25	—
—	—	5500	3200	2.65	—

図 15-4 高次モードが確認地点の解析結果 (桜川庁舎)

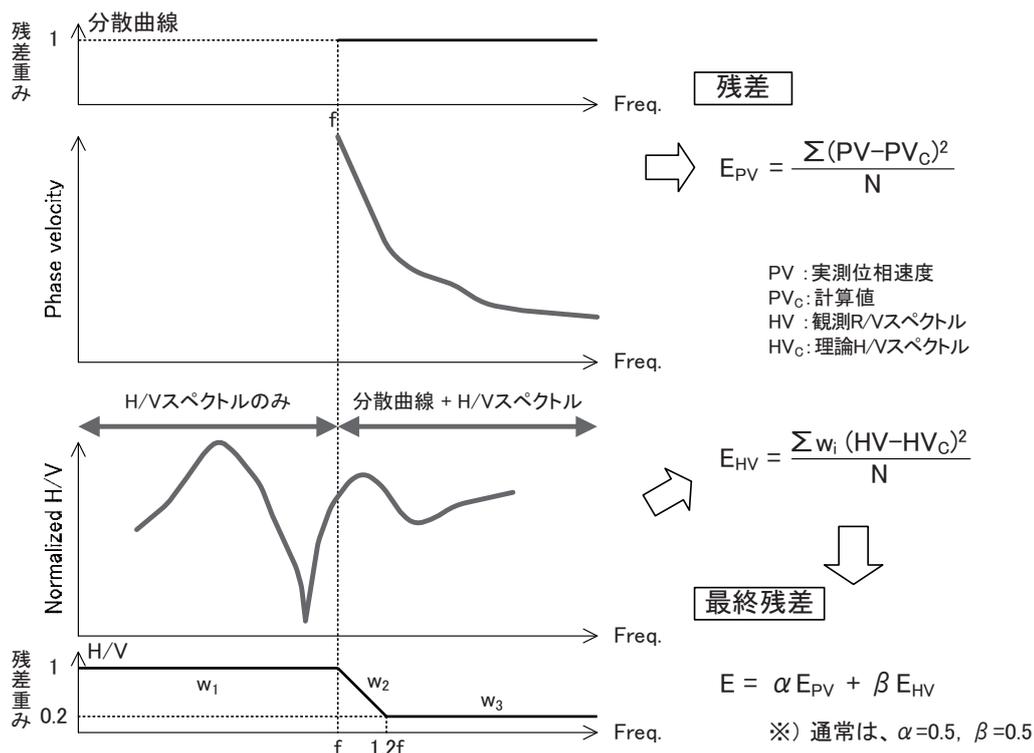


図16-1 ジョイントインバージョン残差の重み付け

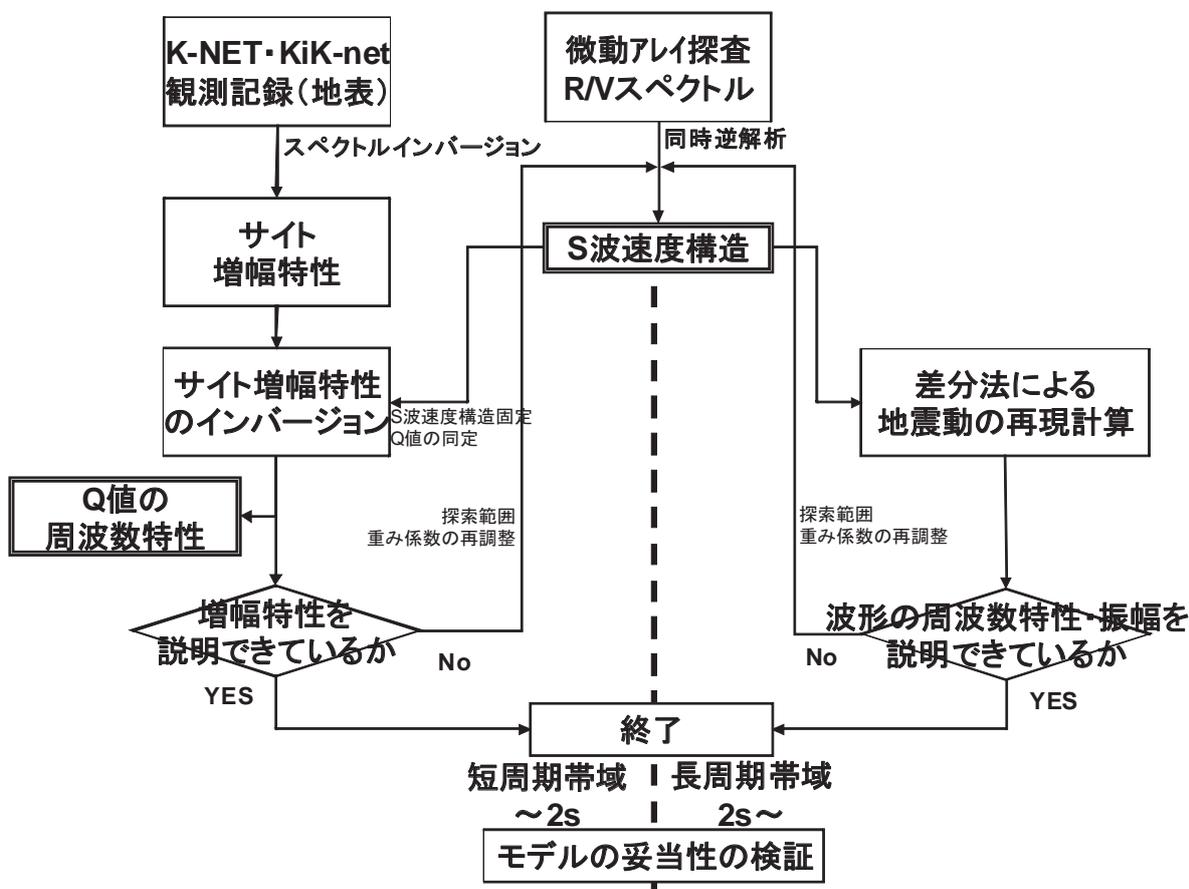


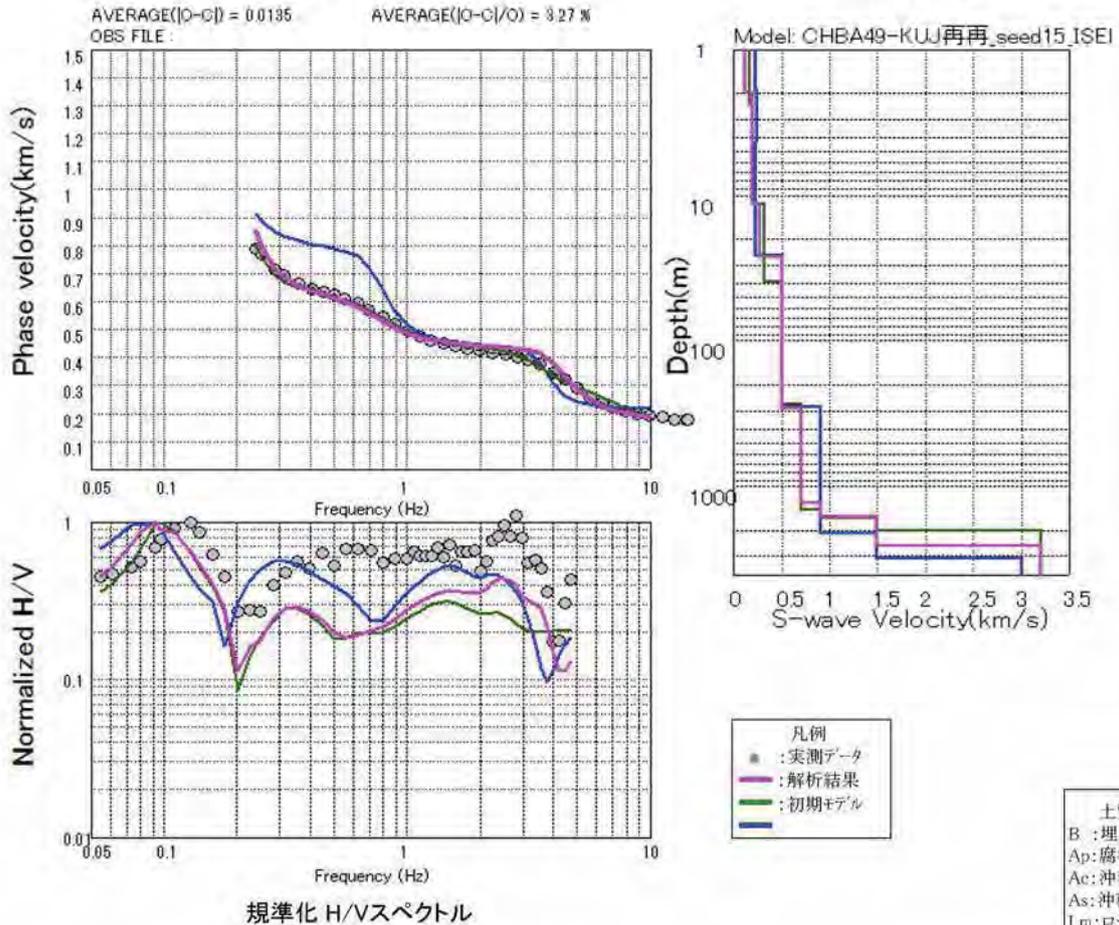
図16-2 地震記録のある微動アレイ観測点における地盤構造モデルの作成の流れ

CHBA49 九十九里町役場

千葉県 微動探査(アレイ) 解析結果

分散曲線

S波速度構造



標準化 H/Vスペクトル

大大特モデル

下面 深さ(m)	層厚 (m)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	土質 区分
1.9	1.9	1171	230	1.9	As
4.3	2.4	1224	240	1.9	As
26.2	21.9	1142	224	1.9	As
281.1	254.9	1850	500	1.9	—
2097.9	1816.8	2350	900	2.2	—
3072.4	974.5	3000	1500	2.3	—
—	—	5800	3000	2.7	—

初期モデル

下面 深さ(m)	層厚 (m)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	土質 区分
2.4	2.4	630	170	1.8	As
11.6	9.2	930	190	1.9	As
39.1	27.5	1200	320	1.9	As
272.1	233.0	1800	500	1.9	—
1451.1	1179.0	2100	700	2.0	—
1640.1	189.0	2400	900	2.1	—
1982.1	342.0	3000	1500	2.3	—
—	—	5600	3200	2.7	—

解析結果モデル

下面 深さ(m)	層厚 (m)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	土質 区分
2.0	2.0	630	119	1.8	As
11.5	9.5	930	191	1.9	As
26.4	14.9	1200	269	1.9	As
290.0	263.6	1800	500	1.9	—
1293.0	1003.0	2100	700	2.0	—
1613.0	320.0	2400	900	2.1	—
2537.0	924.0	3200	1500	2.3	—
—	0	5500	3200	2.7	—

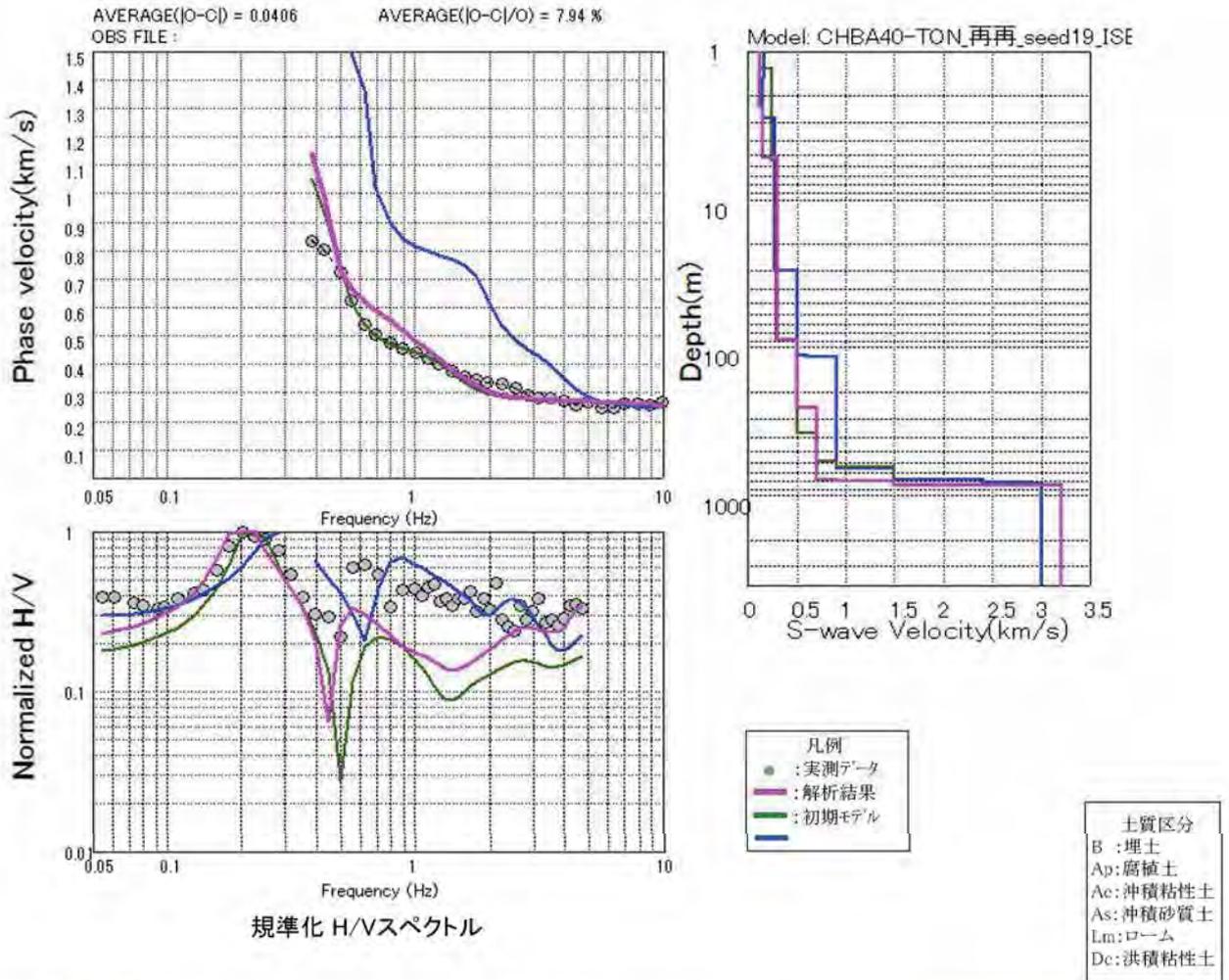
図17-1 ジョイントインバージョン結果 (CHBA049 千葉県九十九里町役場)

CHBA40 東庄町役場

千葉県 微動探査(アレイ) 解析結果

分散曲線

S波速度構造



大大特モデル

下面 深度(m)	層厚 (m)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	土質 区分
1.5	1.5	866	170	1.7	B
2.8	1.3	731	143	1.8	As
30.2	27.4	1379	270	1.9	As
112.6	82.4	1850	500	1.9	-
116.4	3.8	2000	600	2.0	-
652.9	536.5	2350	900	2.2	-
786.4	133.5	3000	1500	2.3	-
805.5	19.1	4200	2400	2.5	-
828.9	23.4	5050	2900	2.6	-
-	-	5800	3000	2.7	-

初期モデル

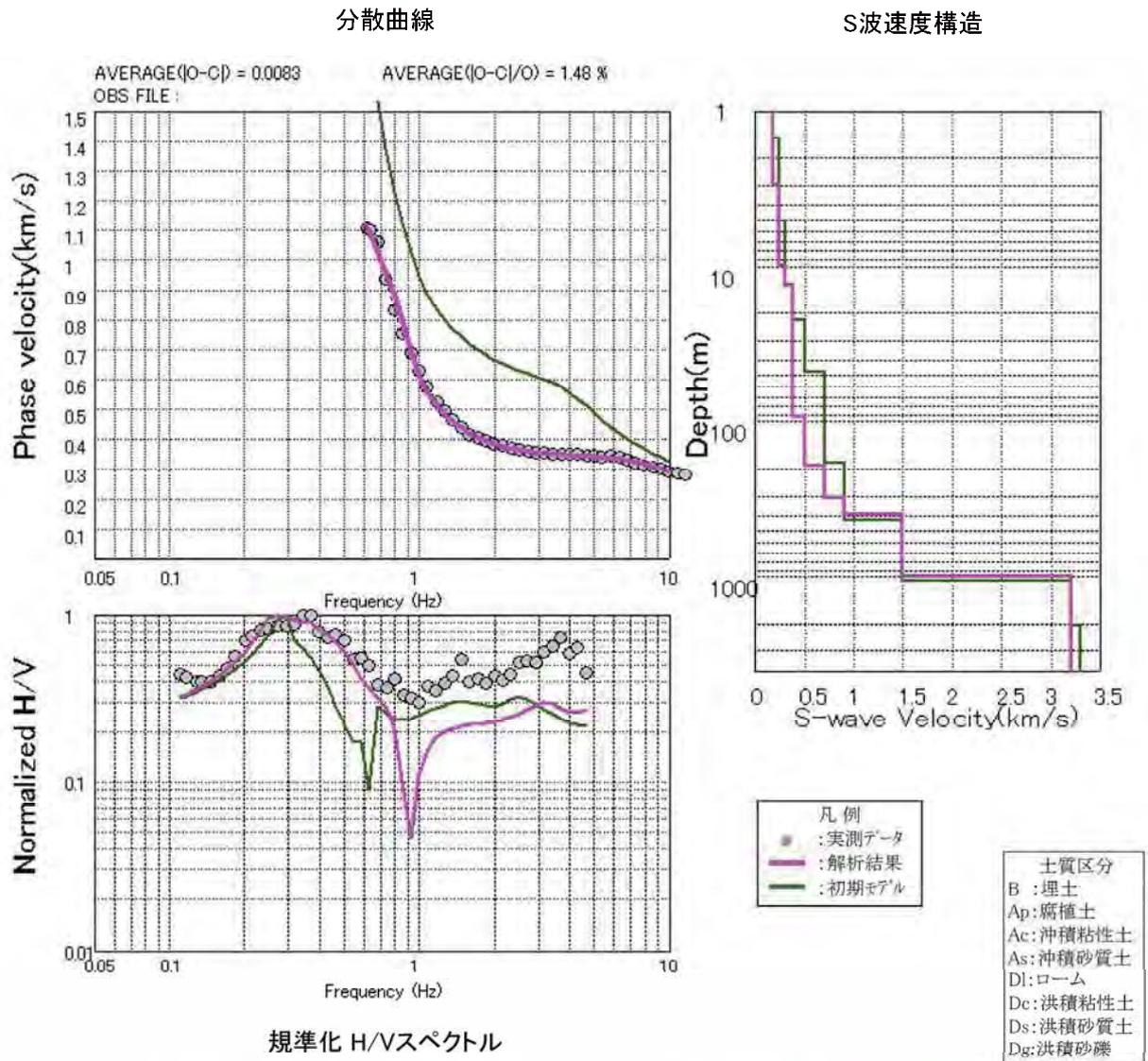
下面 深度(m)	層厚 (m)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	土質 区分
1.3	1.3	630	120	1.9	As
5.5	4.2	760	240	1.7	As/Ac
88.5	83.0	1700	290	1.9	Ds
379.5	291.0	1800	500	1.9	-
588.5	209.0	2100	700	2.0	-
635.7	47.2	2400	900	2.1	-
842.7	207.0	3000	1500	2.3	-
-	-	5600	3200	2.7	-

解析結果モデル

下面 深度(m)	層厚 (m)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	土質 区分
2.4	2.4	630	120	1.9	As
5.3	2.9	760	150	1.7	As/Ac
87.9	82.6	1700	300	1.9	Ds
252.1	164.2	1800	500	1.9	-
783.0	530.9	2100	700	2.0	-
793.0	10.0	2400	900	2.1	-
843.0	50.0	3200	1500	2.3	-
-	0	5500	3200	2.7	-

図 17-2 ジョイントインバージョン結果(CHBA040 千葉県東庄町役場)

IBRA031 旭総合支所



初期モデル

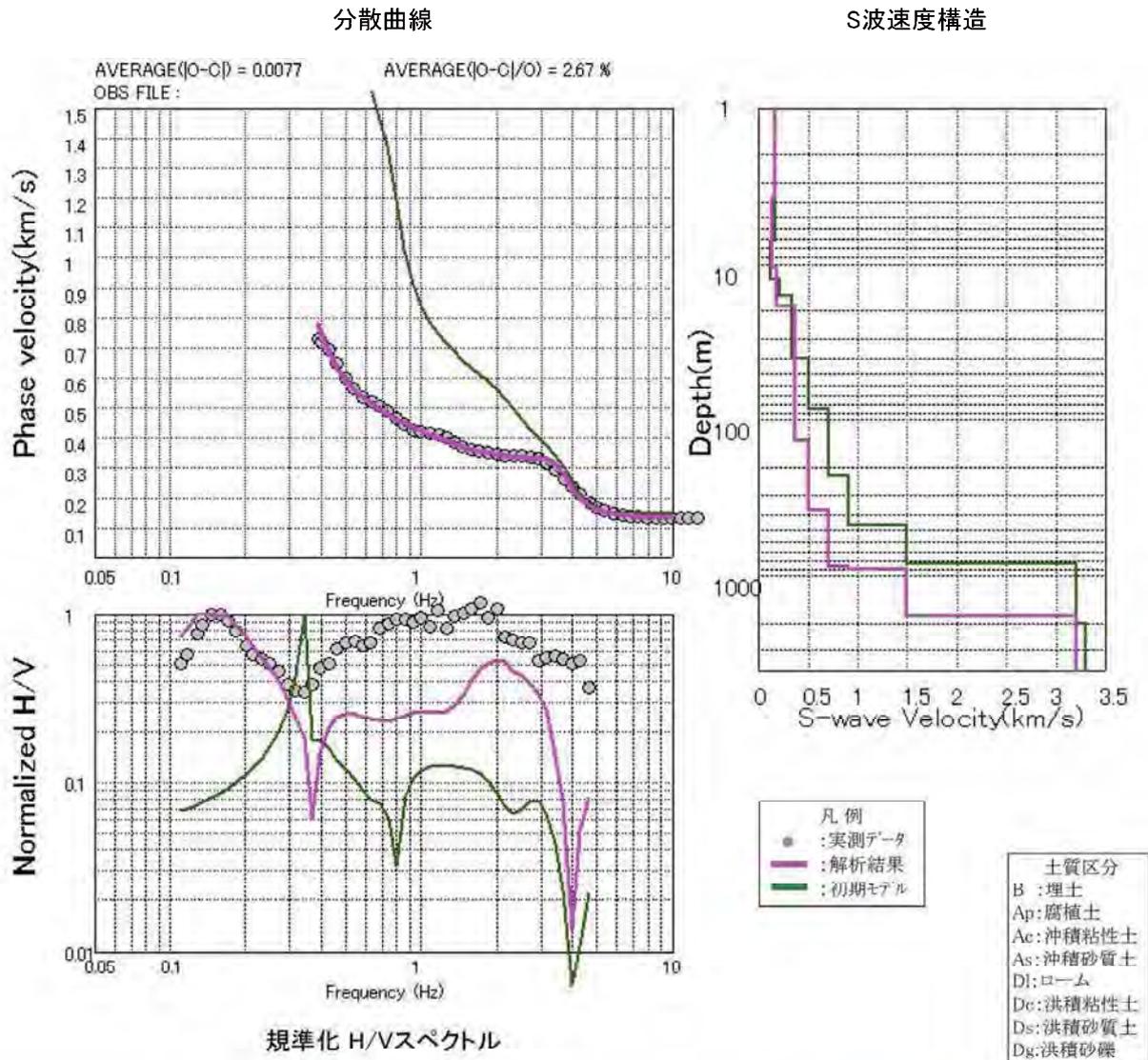
下面 深度(m)	層厚 (m)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	土質 区分
1.5	1.5	920	180	1.50	D1
5.1	3.6	1300	250	1.90	Ds
13.1	8.0	1600	310	1.90	Ds/Dc
22.1	9.0	1700	380	2.00	Ds
48.0	25.9	1800	500	1.90	—
185	137	2100	700	2.00	—
433	248	2400	900	2.05	—
1063	630	3200	1500	2.25	—
2032	969	5500	3200	2.65	—
7033	5001	5700	3300	2.70	—
—	—	6000	3400	2.75	—

解析結果モデル

下面 深度(m)	層厚 (m)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	土質 区分
3.0	3.0	920	180	1.50	D1
10.0	7.0	1300	250	1.90	Ds
13.5	3.5	1600	310	1.90	Ds/Dc
93.4	79.9	1700	380	2.00	Ds
192	99.0	1800	500	1.90	—
311	119	2100	700	2.00	—
391	80.0	2400	900	2.05	—
1000	609	3200	1500	2.25	—
—	—	5500	3200	2.65	—

図17-3 ジョイントインバージョン結果(IBRA031 茨城県旭総合支所)

IBRA033 神栖市役所



初期モデル

下面 深度(m)	層厚 (m)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	土質 区分
7.1	7.1	850	170	1.75	As/B
12.5	5.4	620	120	1.45	Ac
16.1	3.6	1100	210	1.65	Ac
40.6	24.5	1700	330	1.90	Ds/Dc
85.5	44.9	1800	500	1.90	
230	144	2100	700	2.00	—
473	243	2400	900	2.05	—
838	365	3200	1500	2.25	—
2004	1166	5500	3200	2.65	—
7005	5001	5700	3300	2.70	—
—	—	6000	3400	2.75	—

解析結果モデル

下面 深度(m)	層厚 (m)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	土質 区分
3.8	3.8	850	170	1.75	As/B
10.7	6.9	620	132	1.45	Ac
19.0	8.3	1100	177	1.65	Ac
134	115	1700	374	1.90	Ds/Dc
377	243	1800	500	1.90	
875	498	2100	700	2.00	—
913	37.4	2400	900	2.05	—
1783	870	3200	1500	2.25	—
—	—	5500	3200	2.65	—

図 17-4 ジョイントインバージョン結果 (IBRA033 茨城県神栖市役所)

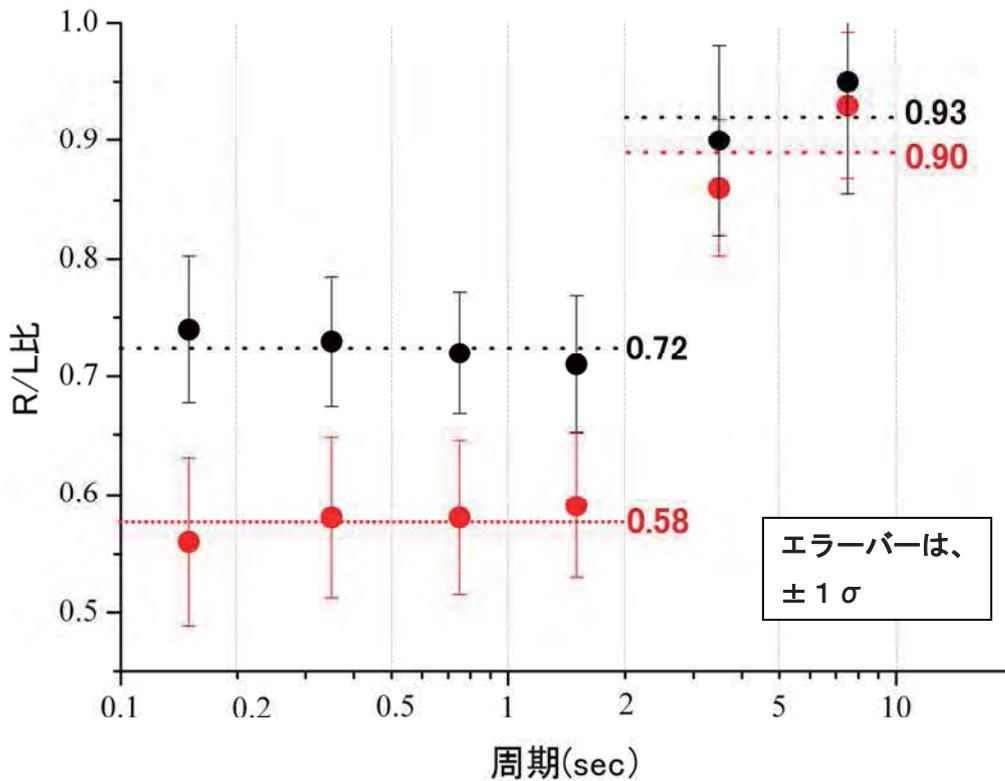
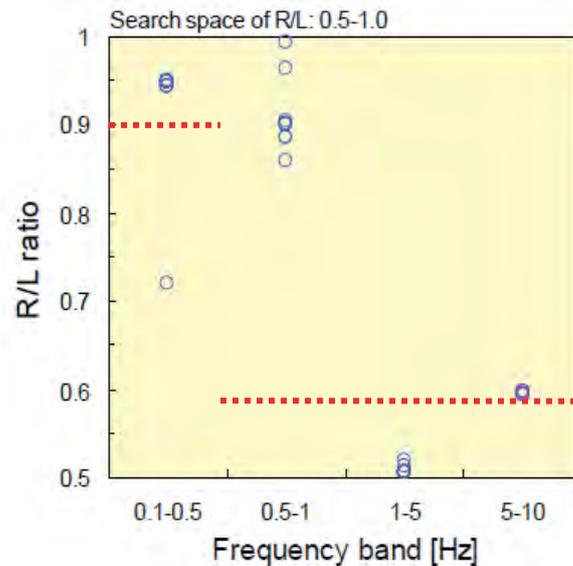


図 17-5 アレイ観測を実施した地震観測点（千葉県・茨城県）におけるレイリー波とラブ波の水平振幅比 R/L の解の収束状況（本研究）
 （赤：地震動の R/V スペクトル比・黒：微動の H/V スペクトル比）



参考図：KiK-net 成田のレイリー波とラブ波の水平振幅比 R/L の解の収束状況（小林・儘田(2010)） --- は、本研究の平均値

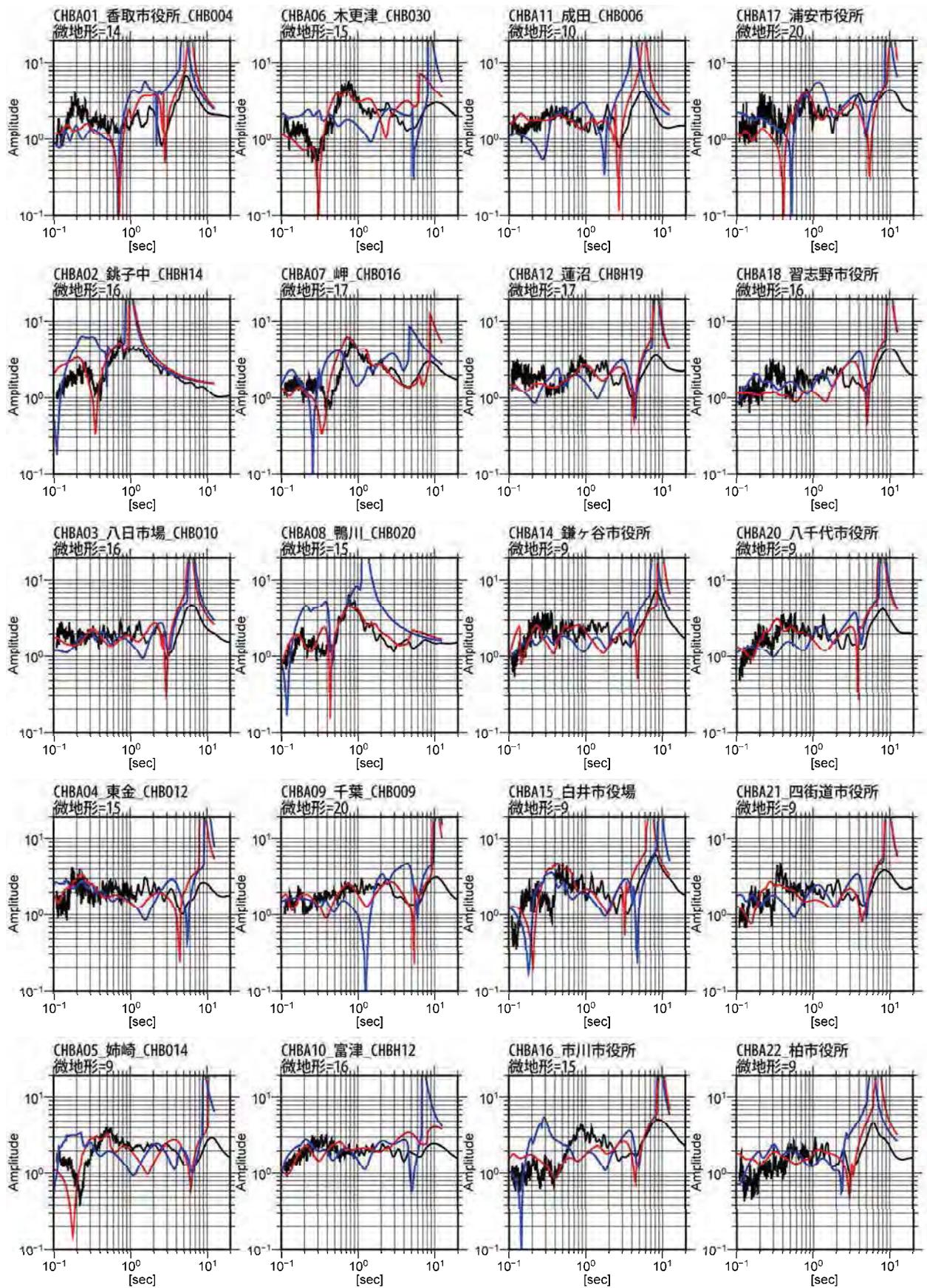


図 18-1 地震動 R/V スペクトルとの比較 (その 1 : 千葉県)

黒線 : 地震記録による H/V スペクトル比 (R/V スペクトル比)

赤線 : 作成した地盤モデルによる理論 H/V スペクトル比 (4 次モード合成 R/L 比=0.58)

青線 : 大々特地盤モデルによる理論 H/V スペクトル比 (4 次モード合成 R/L 比=0.58)

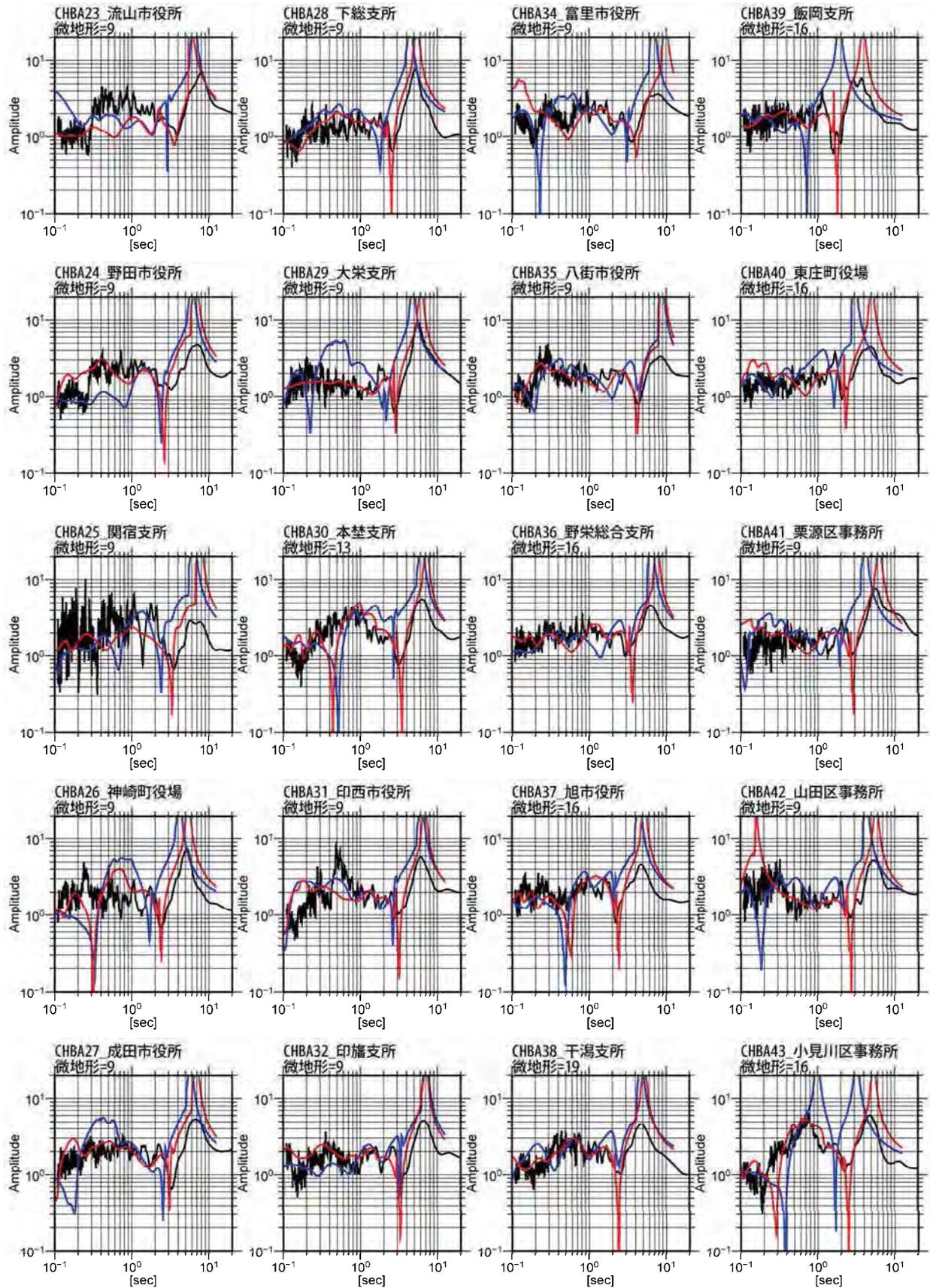


図 18-2 地震動 R/V スペクトルとの比較 (その 2 : 千葉県)

黒線 : 地震記録による H/V スペクトル比 (R/V スペクトル比)

赤線 : 作成した地盤モデルによる理論 H/V スペクトル比 (4 次モード合成 R/L 比=0.58)

青線 : 大々特地盤モデルによる理論 H/V スペクトル比 (4 次モード合成 R/L 比=0.58)

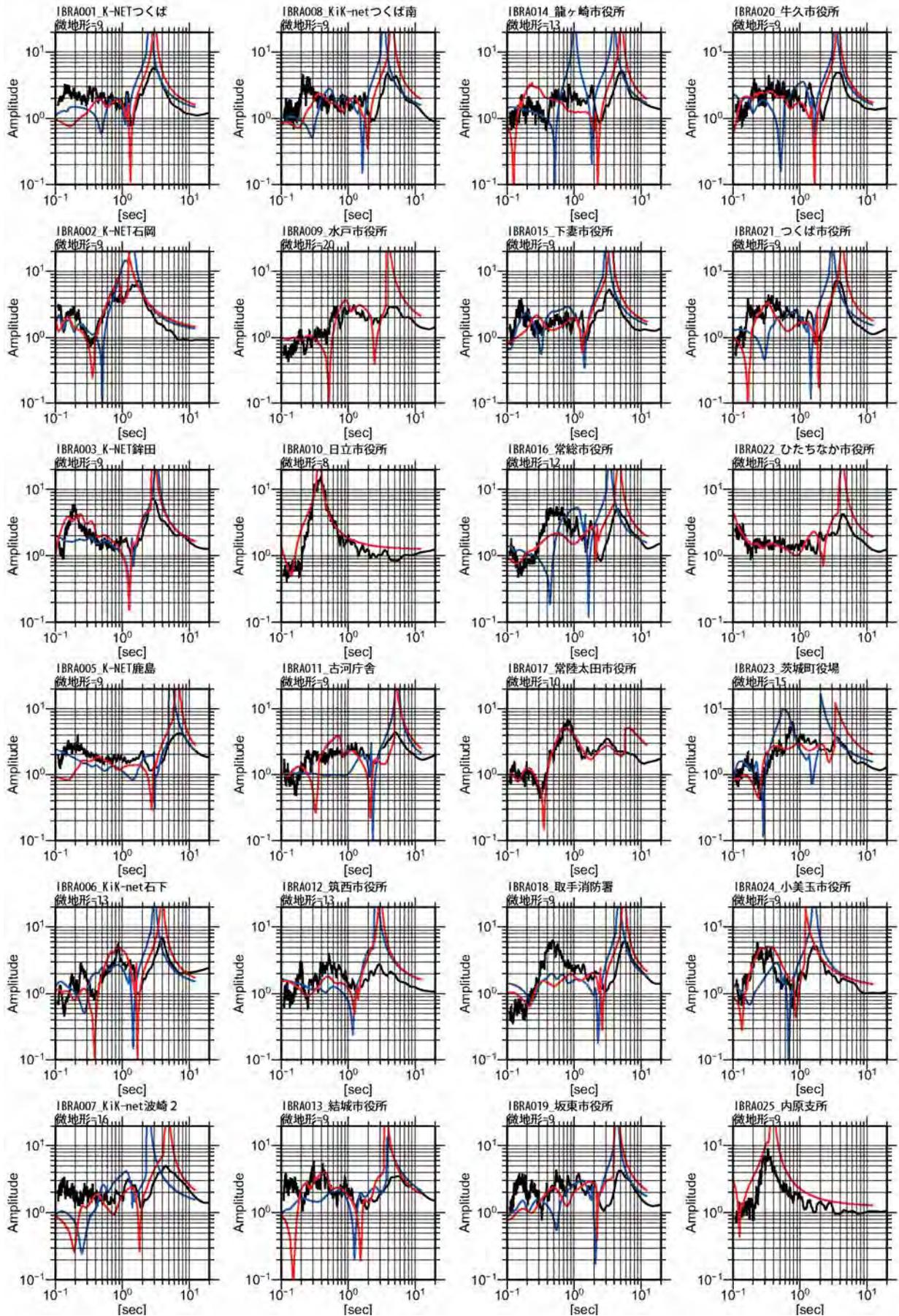


図 18-3 地震動R/Vスペクトルとの比較 (その3: 茨城県)

黒線: 地震記録によるH/Vスペクトル比 (R/Vスペクトル比)

赤線: 作成した地盤モデルによる理論H/Vスペクトル比 (4次モード合成R/L比=0.58)

青線: 大々特地盤モデルによる理論H/Vスペクトル比 (4次モード合成R/L比=0.58)

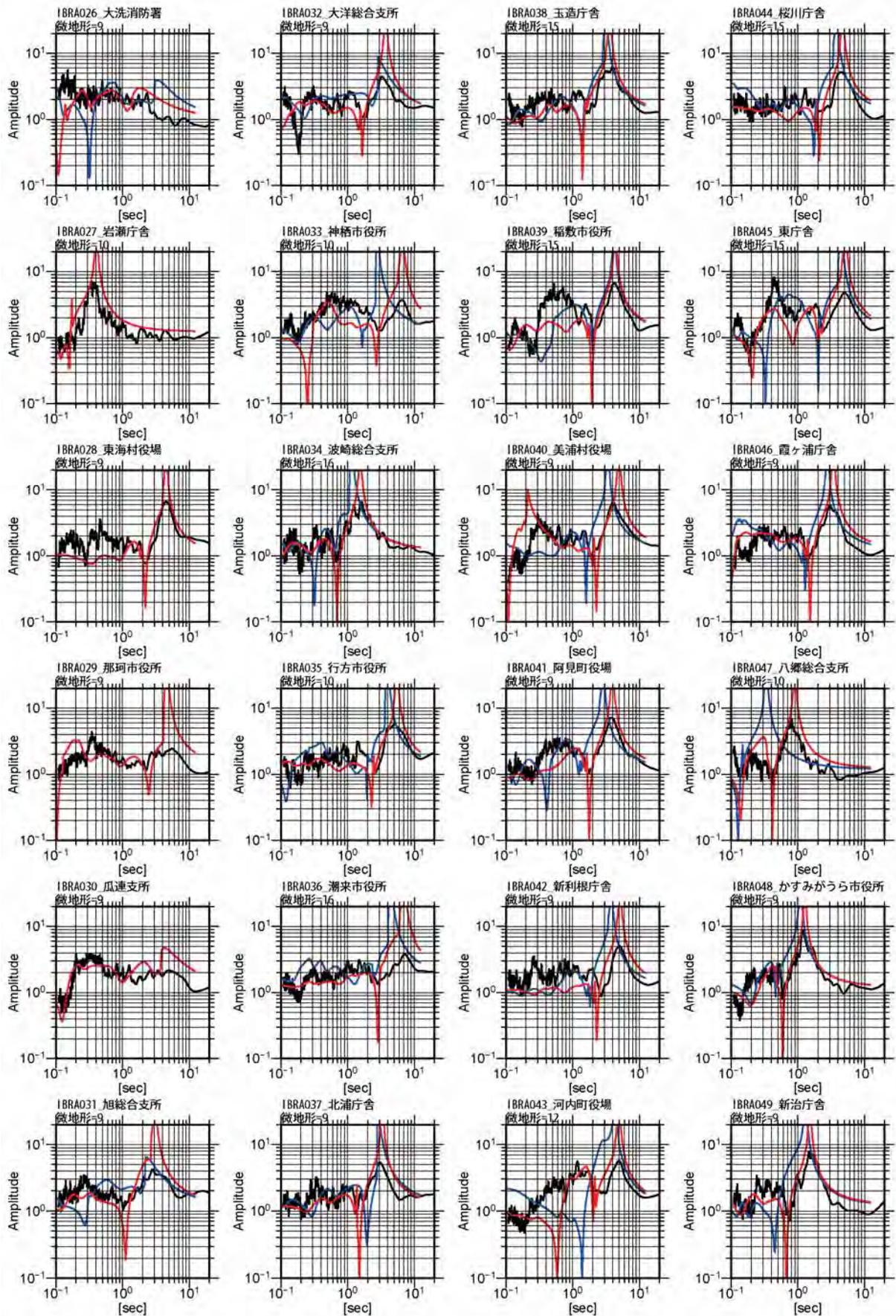


図 18-4 地震動 R/V スペクトルとの比較 (その 4 : 茨城県)

黒線 : 地震記録による H/V スペクトル比 (R/V スペクトル比)

赤線 : 作成した地盤モデルによる理論 H/V スペクトル比 (4 次モード合成 R/L 比 = 0.58)

青線 : 大々特地盤モデルによる理論 H/V スペクトル比 (4 次モード合成 R/L 比 = 0.58)

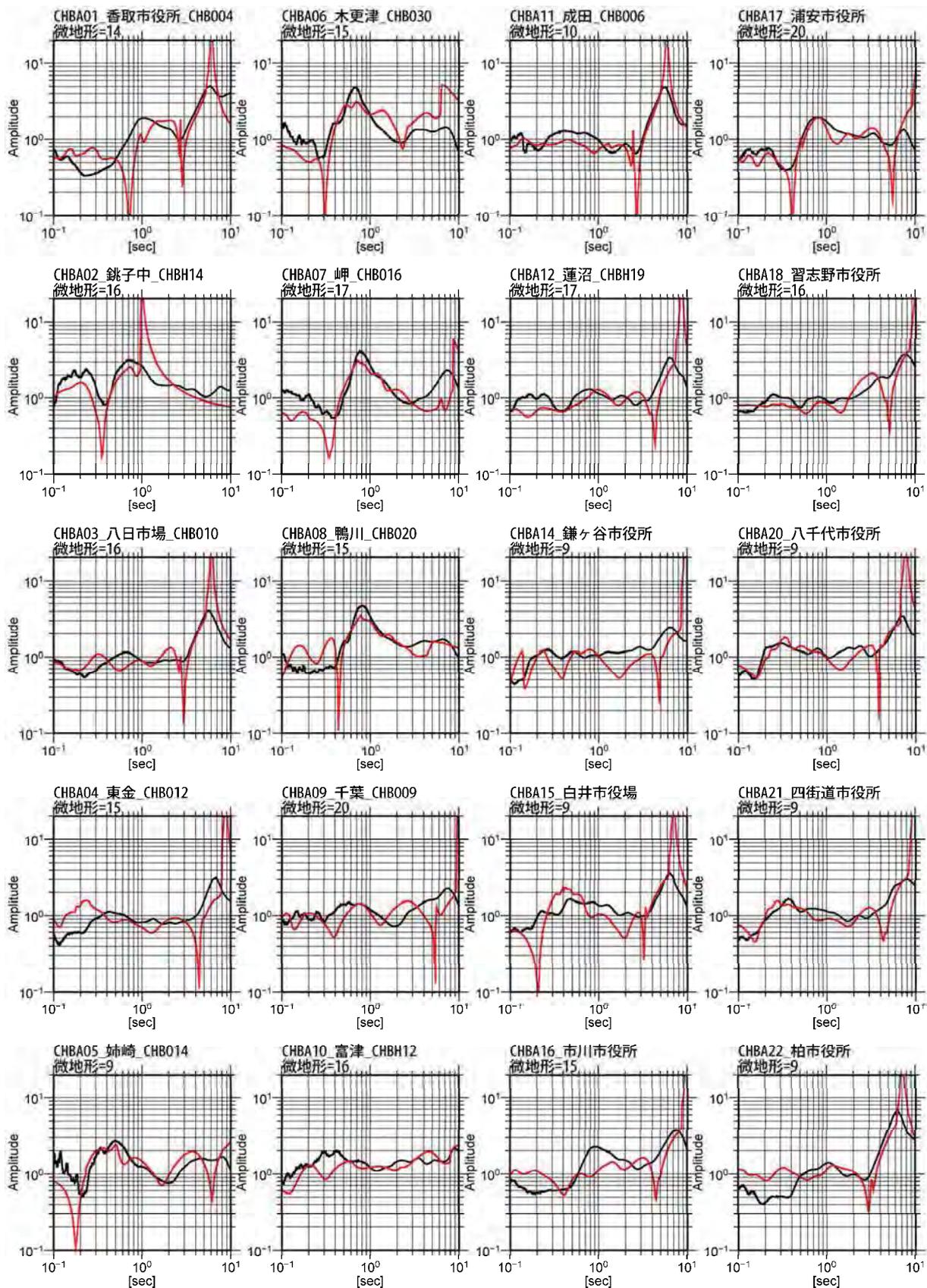


図 18-5 微動 H/V スペクトル比との比較 (その 1)

黒線：常時微動記録による H/V スペクトル比

赤線：作成した地盤モデルによる理論 H/V スペクトル比 (4 次モード合成 R/L 比=0.72)

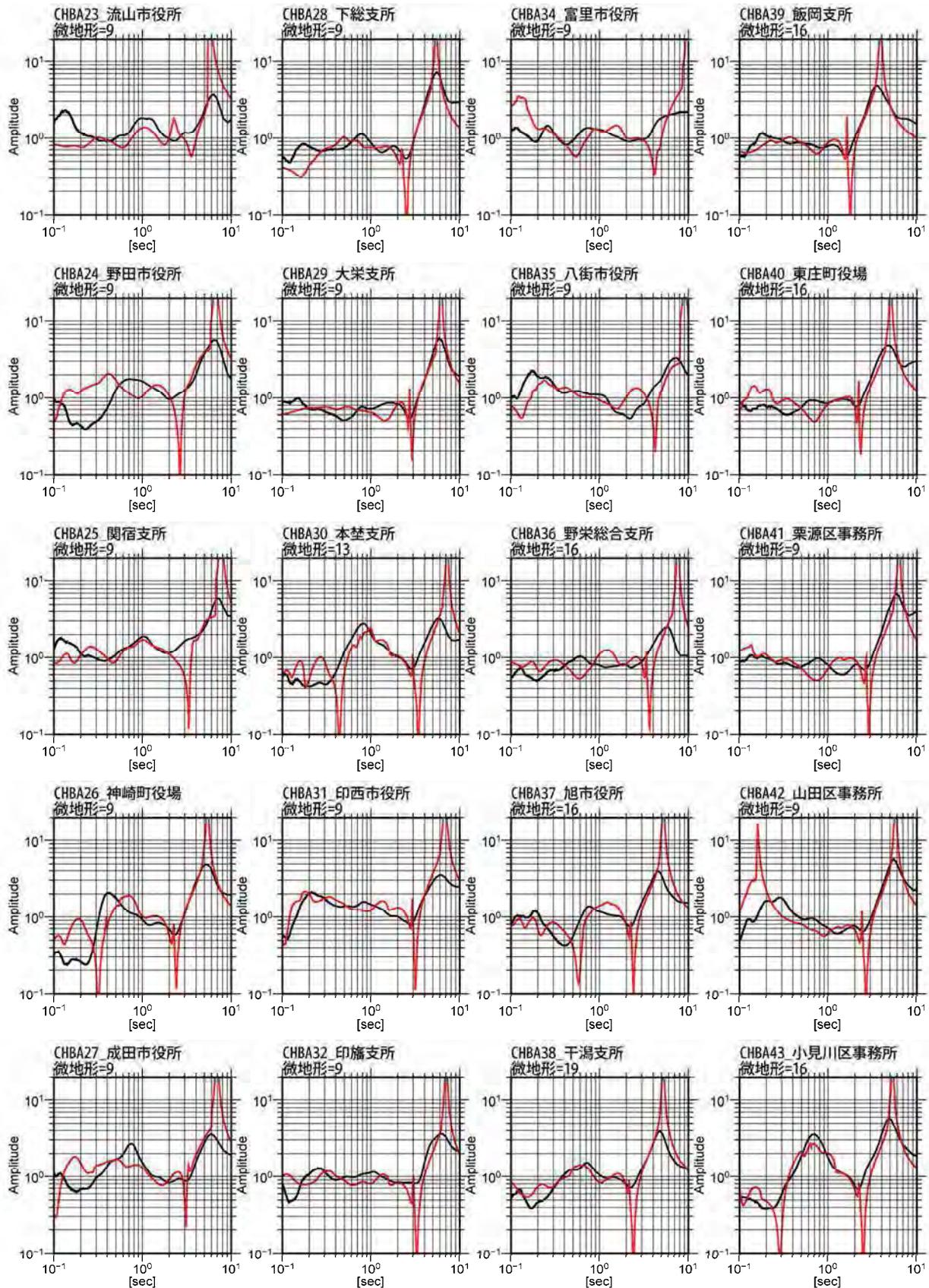


図 18-6 微動 H/V スペクトル比との比較 (その 2)

黒線：常時微動記録による H/V スペクトル比

赤線：作成した地盤モデルによる理論 H/V スペクトル比 (4 次モード合成 R/L 比=0.72)

6. サイト増幅特性の推定

千葉県, 茨城県内の K-NET, KiK-net データ, 震度計データを用いる. スペクトルインバージョンのデータとしては, 上記以外に, 神奈川県, 東京都, 埼玉県の K-NET, KiK-net データも用いる. 図 19-1 に, 茨城県千葉県内の強震観測点を示す. 地震記録は, 千葉県, 茨城県内で観測された M5~M6 の中規模地震を用い, 震源深さ 40 km 以上地震, 千葉県, 茨城県からの距離が 50 km 以内の地震を選定した (図 20-1 ; 表 10) .

<拘束条件>

CHBH13 (成田) , IBRH14 (十王) , IBRH19 (つくば) において, 地表地震計と孔中地震計のスペクトル比を求め, S 波速度構造の同定を行った. 用いた地震の震央位置を図 20-1 に, 地震の諸元を表 10 に示す. 図 19-2 に拘束条件に用いた観測点を示す. スペクトルは, S 波部分の 10.24 秒間を用いて, バンド幅 0.2Hz の ParzenWindow によるスムージングを施した.

同定解析では, 遺伝的アルゴリズムを用いた. モデルの探索範囲は, PS 検層結果を参考に設定した. 解析では探索範囲を 2 通り設定した. PS 検層に対して, 境界深度の探索範囲を狭めて解析する場合 (以下, 深度固定解析という) と S 波速度の探索範囲を狭めて解析する場合 (以下, 速度固定解析という) の 2 通りである. 解析には周波数 1~15Hz までのデータを用いた. 遺伝的アルゴリズムのパラメータは, 交差確率 0.7, 突然変異確率 0.01, 個体数 100, 世帯数 100 とした. 初期乱数を 10 回変え, 最も残差の小さいモデルを採用した (IBRH14 の場合は収束が悪かったため, 個体数 200, 世帯数 200 とした). 同定解析では, 深度固定解析の結果を用いた場合, 速度固定解析の結果を用いた場合について解析を行った. それぞれの解析では, 拘束条件を 1 つの観測点の増幅特性を用いた場合と 3 観測点の増幅特性を用いた場合について検討した. 表 9-1 に深度固定解析のモデルの探索範囲, 表 9-2 に速度固定解析のモデルの探索範囲を示す. 図 19-3~図 19-5 に CHBH13, IBRH14, IBRH19 における解析結果を示す. どちらの解析結果でも観測データをよく説明でき, 検層結果と整合する結果となった.

<計算手順>

スペクトルインバージョン解析は, 片岡ほか(2006)を参考にした. 加速度フーリエスペクトル: $A(f)$ が, 震源特性: $S(f)$, 伝播経路特性: $P(f)$, サイト特性 $G(f)$ の 3 つのスペクトル成分により構成されると考える.

$$A_{ij} = S_i(f)P(f)G_j(f) \quad (6-1)$$

ここで, i は地震に対する添字, j は観測点对する添字, f は周波数である.

伝播経路特性: $P(f)$ を以下のように表す.

$$P(f) = \frac{1}{X} \exp\left(\frac{-\pi f X}{Q\beta}\right) \quad (6-2)$$

X は震源距離, β は伝播経路の S 波速度であり, 山中ほか(1998)を参考に 3.7km/s とした.

スペクトルインバージョンにより推定された震源特性: $S(f)$ を ω^{-2} 乗モデルによりモデル化する.

$$S(f) = \frac{R_{\theta\phi} F_s P_{RTTN}}{4\pi\rho\beta^3} \sqrt{\frac{\rho\beta}{\rho_z\beta_z} \frac{(2\pi f)^2 M_0}{1+(f/f_0)^2}} \quad (6-3)$$

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あり， $F_s = 2$ とした． P_{RTTN} は水平2成分へのエネルギー分配を表す係数であり，水平2成分のベクトル和で定義するため1とする．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．震源域のS波速度 β および密度 ρ は，Tsuda et al.(2010)を参考に4.5km/sおよび3.0t/m³とした．拘束条件は，IBRH14（十王），IBRH19（つくば），CHBH13（成田）観測点の増幅特性を用いた拘束条件を用いた．その際，拘束条件に速度固定解析と深度固定解析の結果を用いた場合で大きな違いがみられなかったことから，拘束条件には，深度固定解析の結果を用いた．S波スペクトルは，S波初動から20.48秒までのNS成分とEW成分のフーリエスペクトルを求め，紺野・大町(1995)の対数フィルターを参考に平滑化をした． b 値は60とした．拘束条件に用いた，計算S波増幅特性にも同様のフィルターを施している．推定された観測増幅特性と理論増幅特性の比較により，補正係数（Q値）を推定した．補正係数は，以下の式に示すような，バイリニア型の補正係数（Q値）を導入した． f_c は福島・翠川（1994）を参考に5Hzに固定し， b については山中ほか（2009）を参考に0.44に固定した．係数 a の値は0.1~100の間で探索した．

$$Q(f) = \frac{V_s}{a} \cdot f^b (f < f_c) \quad (6-4)$$

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

ここで， V_s は各層のS波速度(m/s)， f は周波数(Hz)である．

図18に震源スペクトルを示す．対数フィルター結果，Parzenwindowによる平滑化による結果ともに ω^2 乗モデルで観測データをよく説明できている．図20-2にF-netによる地震モーメントとの比較を示す．概ねF-netに比べて倍半分の範囲に概ねデータが分布している．図20-3に伝播経路の補正係数（Q値）を示す．対数フィルター結果，Parzenwindowによる平滑化による結果に大きな違いは見られない．周波数4Hz以上では，山中ほか(2010)の結果とほぼ整合している．図19-3～図19-5に補正係数（Q値）の同定解析結果を示す．計算されたスペクトル増幅率の図を図21-1～図21-5に示す．，補正係数（Q値）を観測点ごとに同定した場合の結果と観測点のAVS100に連動させて a を決めた場合，同定解析の結果を平均して a を求めた場合の結果も併せて示している．AVS100に連動させた場合については，計算増幅特性が過小評価となる地点が多く見られた．参考までに，図24にAVS100と a の関係回帰結果の分布を示す． a の値とAVSに明瞭な関係は見られなかった．地盤の減衰は，地盤のS波速度だけでなく，不均質の影響を強く受けていると考えられる（例えば，佐藤，2009）．したがって，より精度のよい減衰モデルを構築するには，S波速度，微地形の指標のほかに地盤の不均質性などの指標を考慮する必要があると考えられる．いくつかのKiK-net観測点などでは，サスペンション法によるPS検層が実施されており，地盤の不均質性を評価することができる．今後，地盤の不均質性を考慮した減衰モデルの構築が課題であると考えられる．

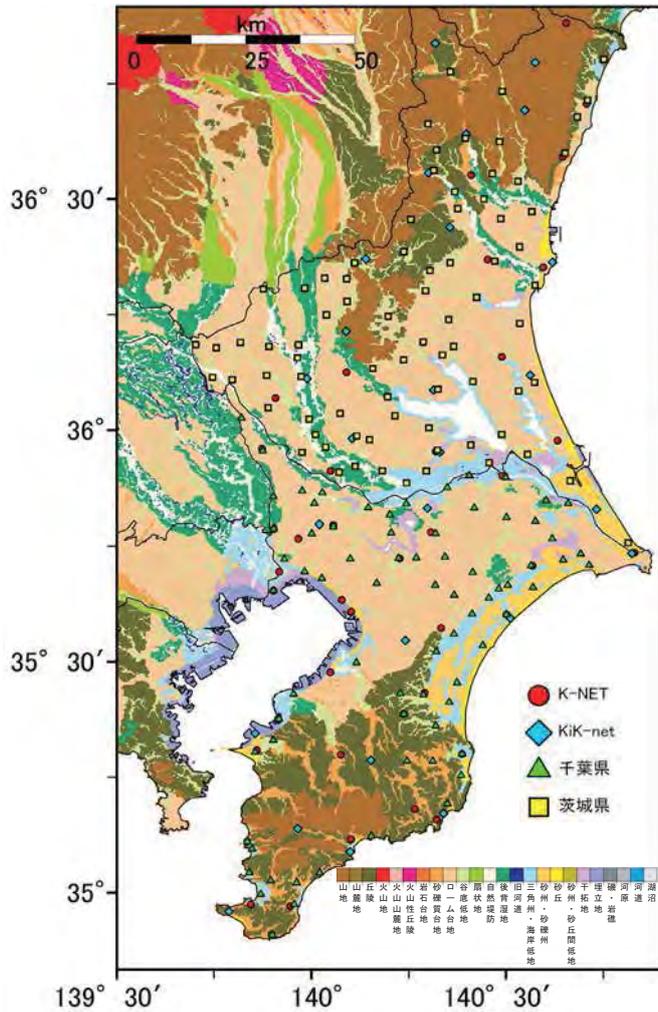


図19-1 検討に使用した茨城・千葉県の地震観測点

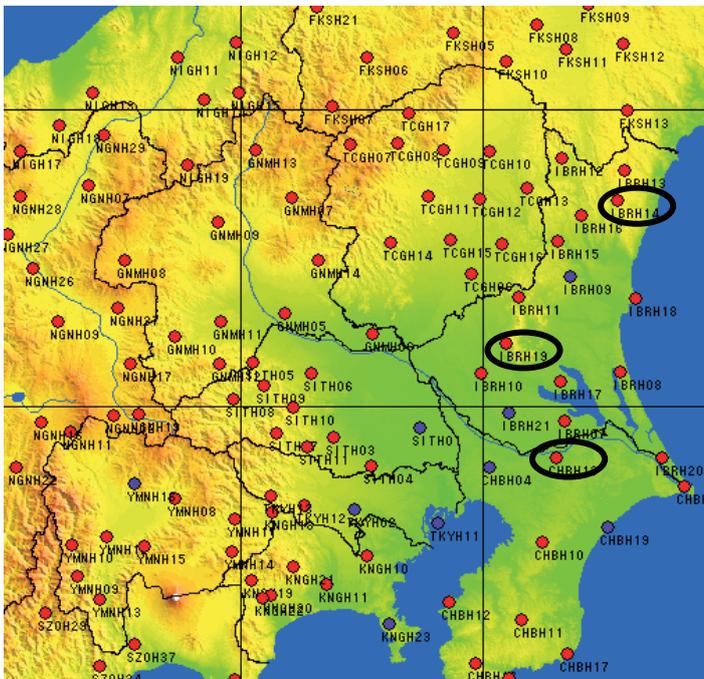


図19-2 拘束条件に使用した観測点位

表9-1 深度固定解析のモデルの探索範囲

下面深度	S波速度	下面深度
50m以浅	±20%	±20%
200m以	±20%	±10%
200m以	±20%	±5%

表9-2 速度固定解析のモデルの探索範囲

下面深度	S波速度	下面深度
50m以浅	±10%	±30%
200m以	±5%	±30%
200m以	±5%	±30%

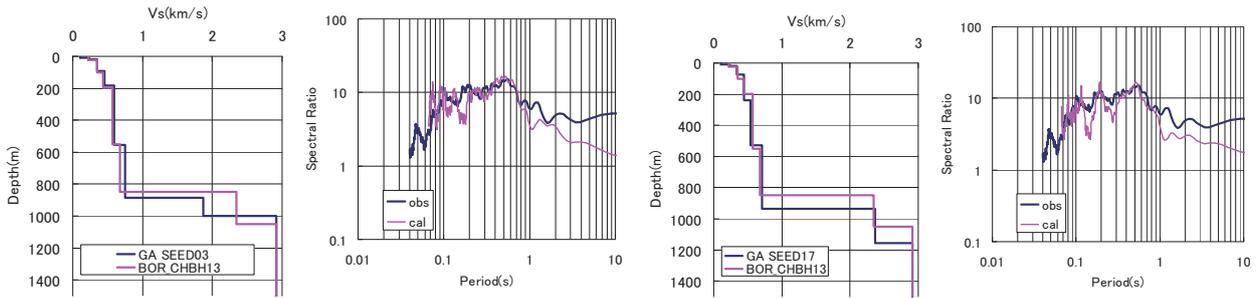


図 19-3 CHBH13 (成田) における解析結果 (左図: 深度固定解析・右図: 速度固定解析)

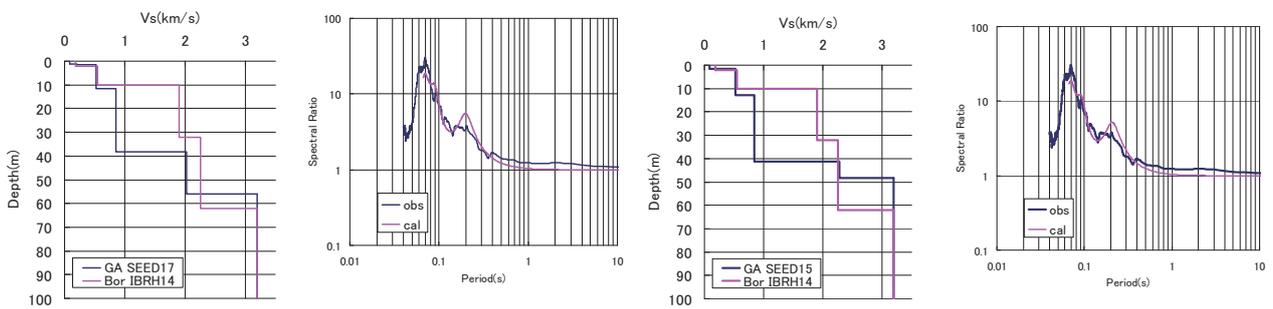


図 19-4 IBRH14 (十王) における解析結果 (左図: 深度固定解析・右図: 速度固定解析)

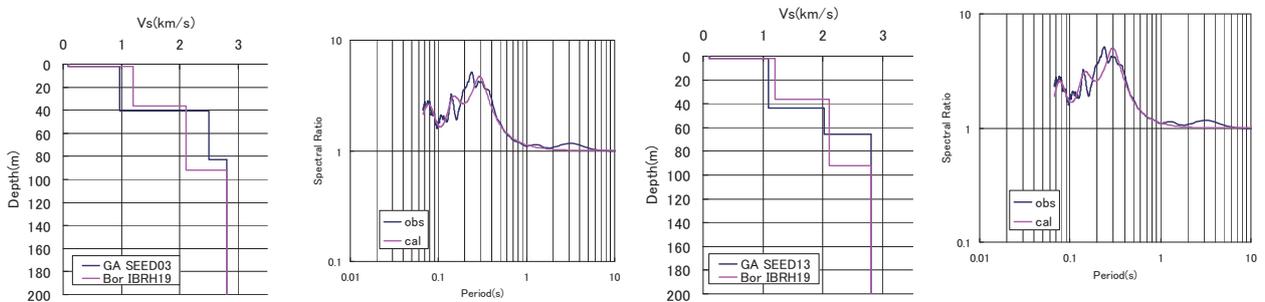


図 19-5 IBRH19 (つくば) における解析結果 (左図: 深度固定解析・右図: 速度固定解析)

表10 スペクトルインバージョンに用いた地震の諸元

No	Year	Month	Day	Hour	Minutes	Sec	Latitude	Longitude	Depth(km)	Mj	Mo(Nm)	Epicenter
1	1997	3	23	14	58	55.18	35.9687	140.107	71.46	5.1	4.77E+16	SOUTHERN IBARAKI PREF
2	1997	9	8	8	40	38.47	35.558	140.0022	108.59	5.1	6.62E+16	CENTRAL CHIBA PREF
3	1998	1	14	2	17	7.88	35.6165	140.2328	77.98	5	2.28E+16	CENTRAL CHIBA PREF
4	1998	3	23	18	37	9.22	36.369	141.182	48.6	5.4	1.28E+17	E OFF IBARAKI PREF
5	1998	4	9	17	45	39.14	36.9452	141.0172	94.87	5.4	1.78E+17	E OFF FUKUSHIMA PREF
6	1998	6	14	22	17	6.19	35.4645	140.749	46.43	5.7	3.58E+17	KUJUKURI COAST BOSO PEN
7	1998	8	29	8	46	42.35	35.633	140.0293	64.6	5.3	9.80E+16	CENTRAL CHIBA PREF
8	1999	3	26	8	31	9.38	36.4507	140.6155	59.04	5	4.55E+16	NORTHERN IBARAKI PREF
9	1999	4	25	21	27	2.95	36.456	140.622	59.47	5.2	6.24E+16	NORTHERN IBARAKI PREF
10	1999	7	15	7	56	21.89	35.9357	140.441	49.64	5	5.33E+16	SOUTHERN IBARAKI PREF
11	1999	9	13	7	56	46.82	35.5977	140.1598	75.81	5.1	1.08E+17	CENTRAL CHIBA PREF
12	2003	1	21	13	19	23.98	36.3645	141.029	46.62	5.1	4.60E+16	E OFF IBARAKI PREF
13	2003	3	13	12	12	58	36.0902	139.8557	47.26	5	2.34E+16	SW IBARAKI PREF
14	2003	5	12	0	57	6.08	35.8688	140.0857	46.87	5.3	7.07E+16	SOUTHERN IBARAKI PREF
15	2003	5	17	23	33	10.79	35.7385	140.6507	47.29	5.3	1.13E+17	NEAR CHOSHI CITY
16	2003	6	16	18	34	4.77	36.8415	141.2623	76.92	5.1	2.48E+16	E OFF IBARAKI PREF
17	2003	9	20	12	54	52.2	35.2188	140.3003	69.96	5.8	3.53E+17	KUJUKURI COAST BOSO PEN
18	2003	10	15	16	30	35.79	35.6137	140.0498	73.9	5.1	5.15E+16	CENTRAL CHIBA PREF
19	2003	11	15	3	43	51.64	36.4325	141.1652	48.4	5.8	3.43E+17	E OFF IBARAKI PREF
20	2004	3	11	11	34	57.57	36.322	141.0082	47.52	5.3	1.04E+17	E OFF IBARAKI PREF
21	2004	4	4	8	2	0.69	36.3902	141.154	48.99	5.8	8.38E+17	E OFF IBARAKI PREF
22	2004	7	17	15	10	18.17	34.8382	140.356	68.68	5.5	2.39E+17	SE OFF BOSO PENINSULA
23	2004	10	6	23	40	40.16	35.9888	140.0898	65.97	5.7	4.52E+17	SOUTHERN IBARAKI PREF
24	2005	1	1	5	13	49.09	36.7835	140.9833	89.42	5	3.64E+16	E OFF IBARAKI PREF
25	2005	2	16	4	46	36.13	36.0385	139.8888	46.15	5.3	1.33E+17	SW IBARAKI PREF
26	2005	6	20	1	15	14.2	35.7338	140.6947	50.65	5.6	3.81E+17	NEAR CHOSHI CITY
27	2005	7	23	16	34	56.32	35.5817	140.1385	73.08	6	9.11E+17	CENTRAL CHIBA PREF
28	2005	7	28	19	15	35.01	36.1262	139.8463	51.12	5	2.28E+16	SW IBARAKI PREF
29	2005	10	16	16	5	42.6	36.0393	139.9375	47.12	5.1	3.57E+16	SW IBARAKI PREF
30	2005	10	22	12	12	46.78	37.0797	141.1205	51.96	5.6	2.06E+17	E OFF FUKUSHIMA PREF
31	2006	2	1	20	35	53.06	35.761	140.0037	101.02	5.1	5.07E+16	NORTHERN CHIBA PREF
32	2006	10	14	6	38	1.68	34.8948	140.3048	64.42	5.1	2.62E+16	SE OFF BOSO PENINSULA
33	2008	3	8	1	54	57.17	36.4525	140.6117	57.04	5.2	5.57E+16	NORTHERN IBARAKI PREF
34	2008	4	4	19	1	51.86	36.12	139.8282	53.48	5	2.05E+16	SW IBARAKI PREF
35	2008	7	5	16	49	2.56	36.6427	140.952	49.69	5.2	5.25E+16	E OFF IBARAKI PREF
36	2008	8	22	19	59	50.17	36.4418	140.6153	55.92	5.2	5.02E+16	NORTHERN IBARAKI PREF
37	2009	2	1	6	51	51.89	36.717	141.2793	47.03	5.8	4.65E+17	E OFF IBARAKI PREF
38	2009	4	28	6	37	34.51	36.407	141.1307	47.88	5	5.80E+16	E OFF IBARAKI PREF
39	2009	6	6	14	52	41.04	35.5418	141.2642	42.4	5.9	5.48E+17	NEAR CHOSHI CITY
40	2009	10	23	10	28	26.9	36.6023	141.1762	45.15	5	1.67E+16	E OFF IBARAKI PREF
41	2009	12	18	5	41	29.93	36.3347	139.719	78.05	5.1	5.31E+16	SOUTHERN TOCHIGI PREF

気象庁一元化震源による モーメントはF-net によるハッチは千葉県浅部・深部統合地盤モデル作成時に用いた地震

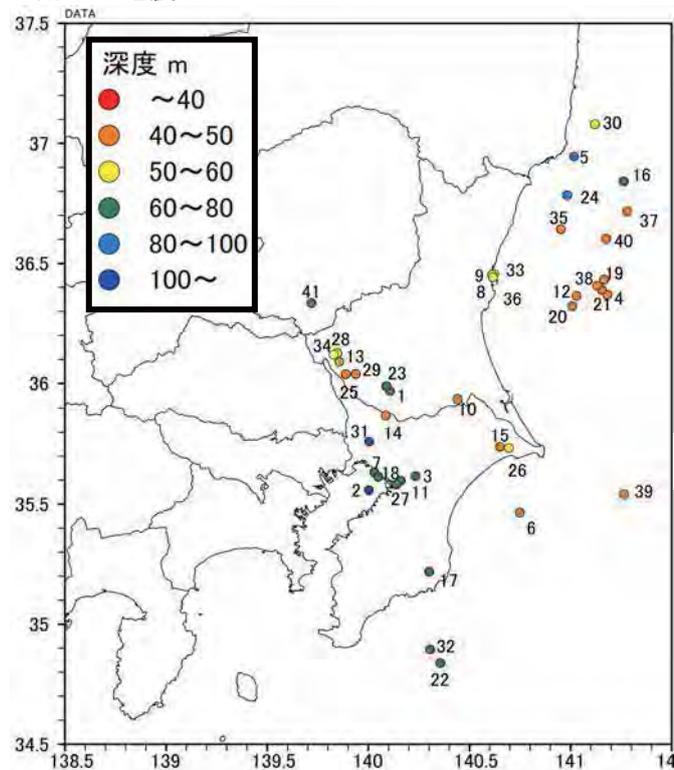


図20-1 震央位置

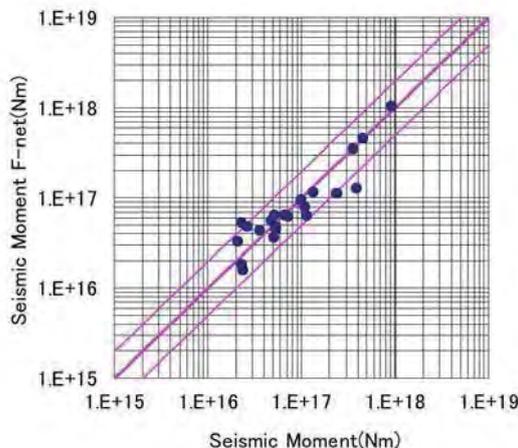


図20-2 F-netによる地震モーメントとの比較

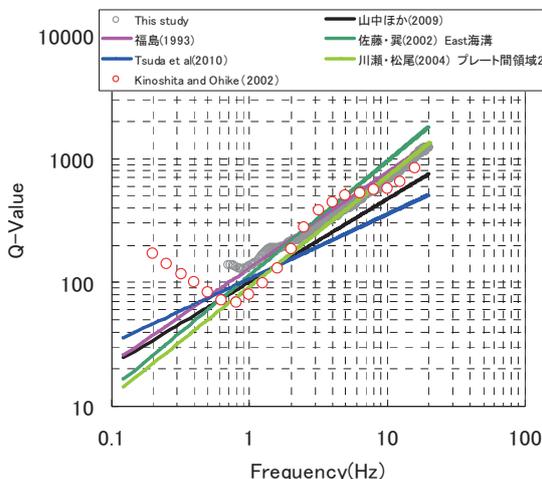


図20-3 伝播経路のQ値

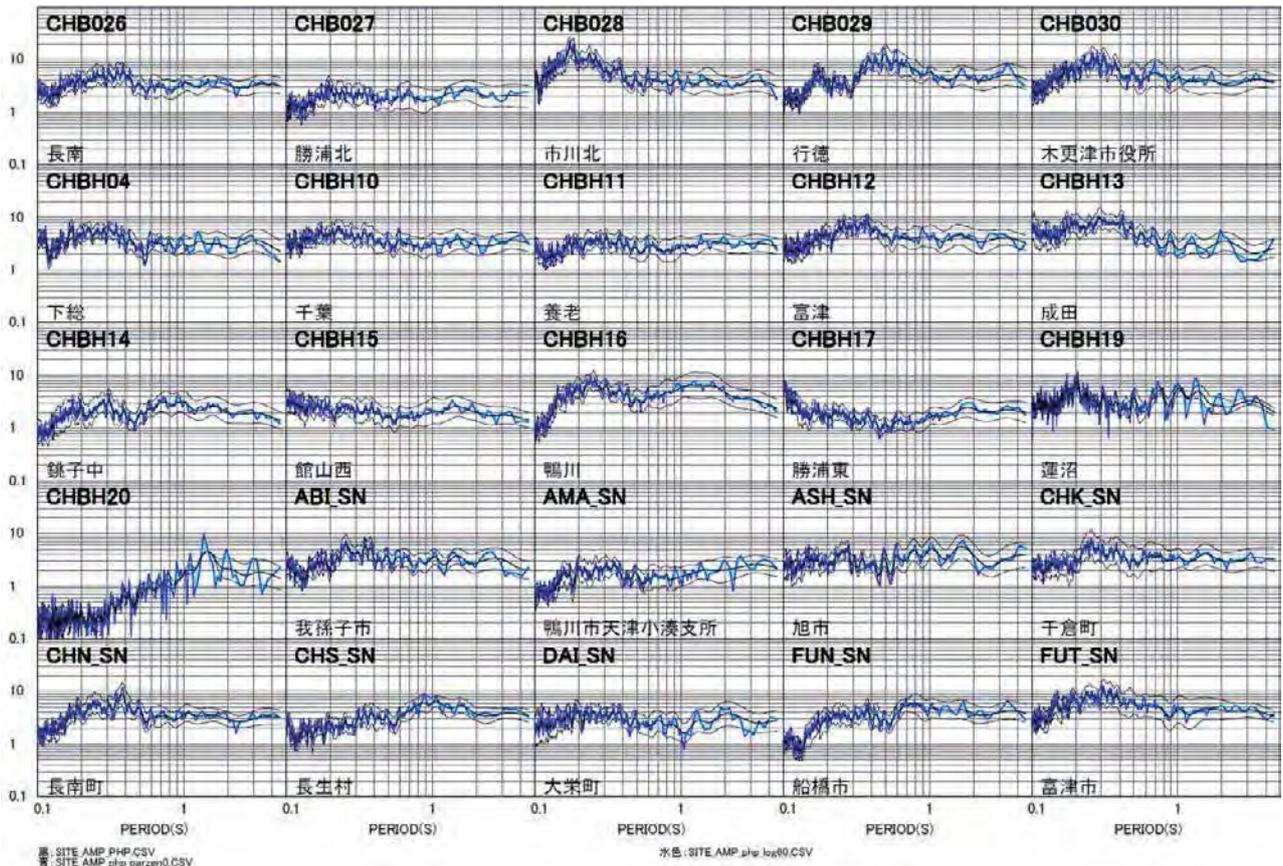
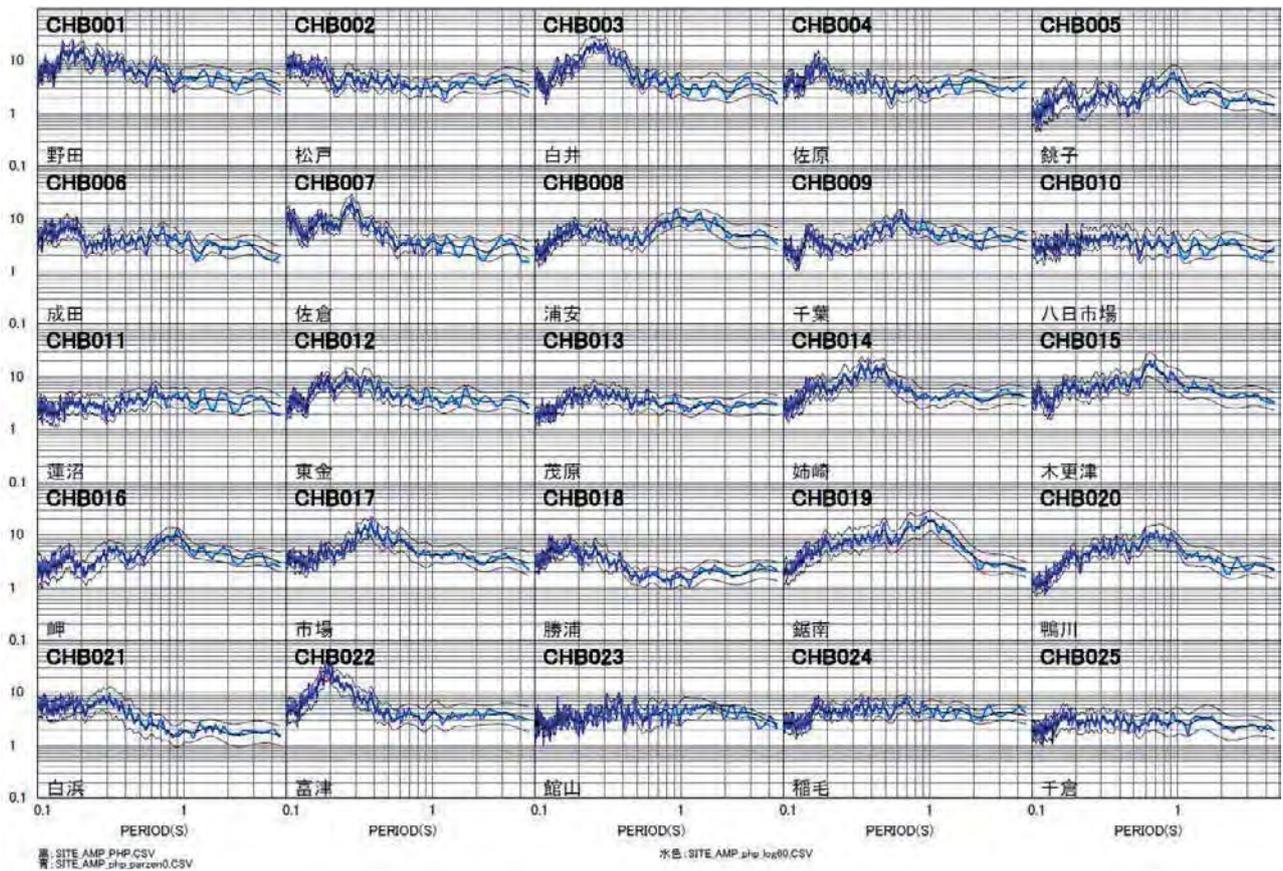


図 2 1 - 1 スペクトルインバージョンによるサイト増幅特性計算結果の比較
 黒線 : Parzenwindow0.2Hz 結果 水色 : 対数フィルター結果 青 : スムージングなし結果

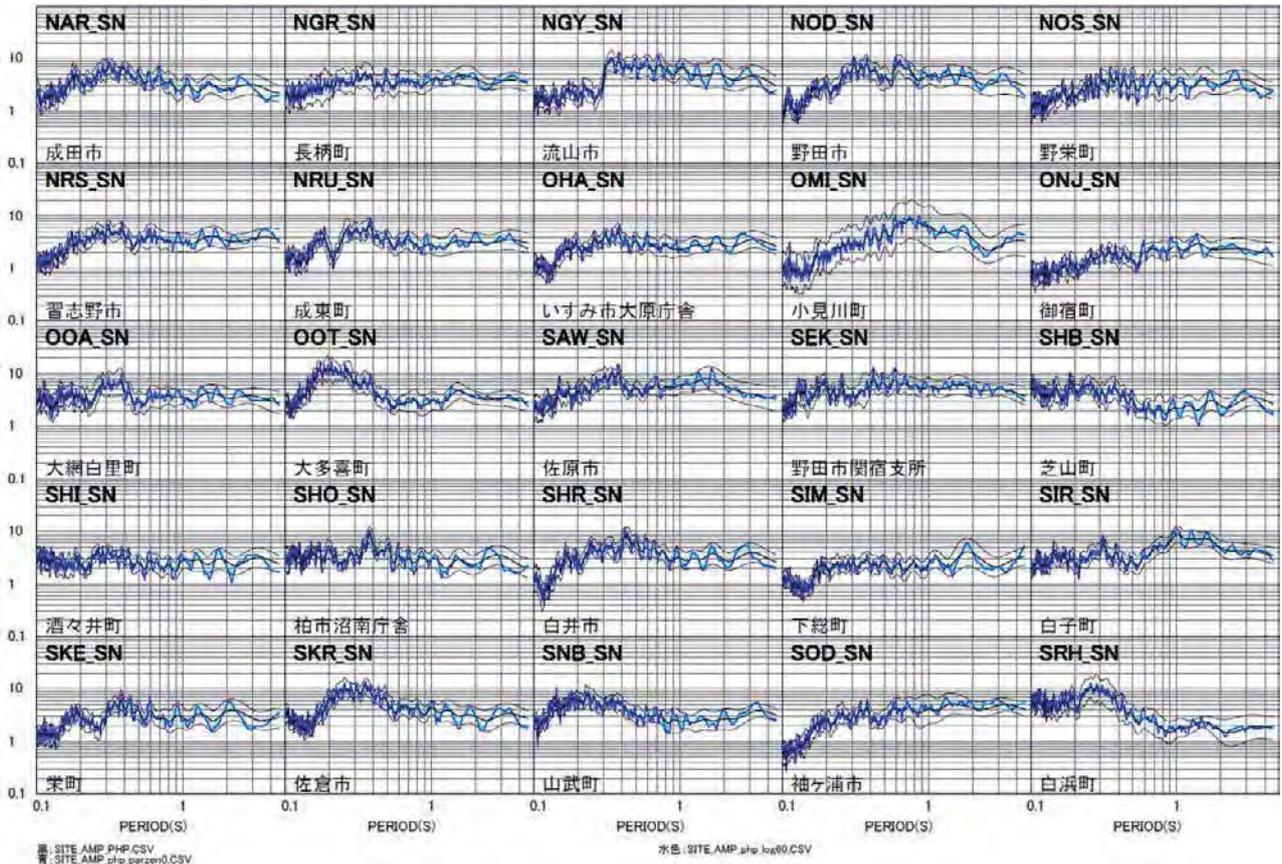
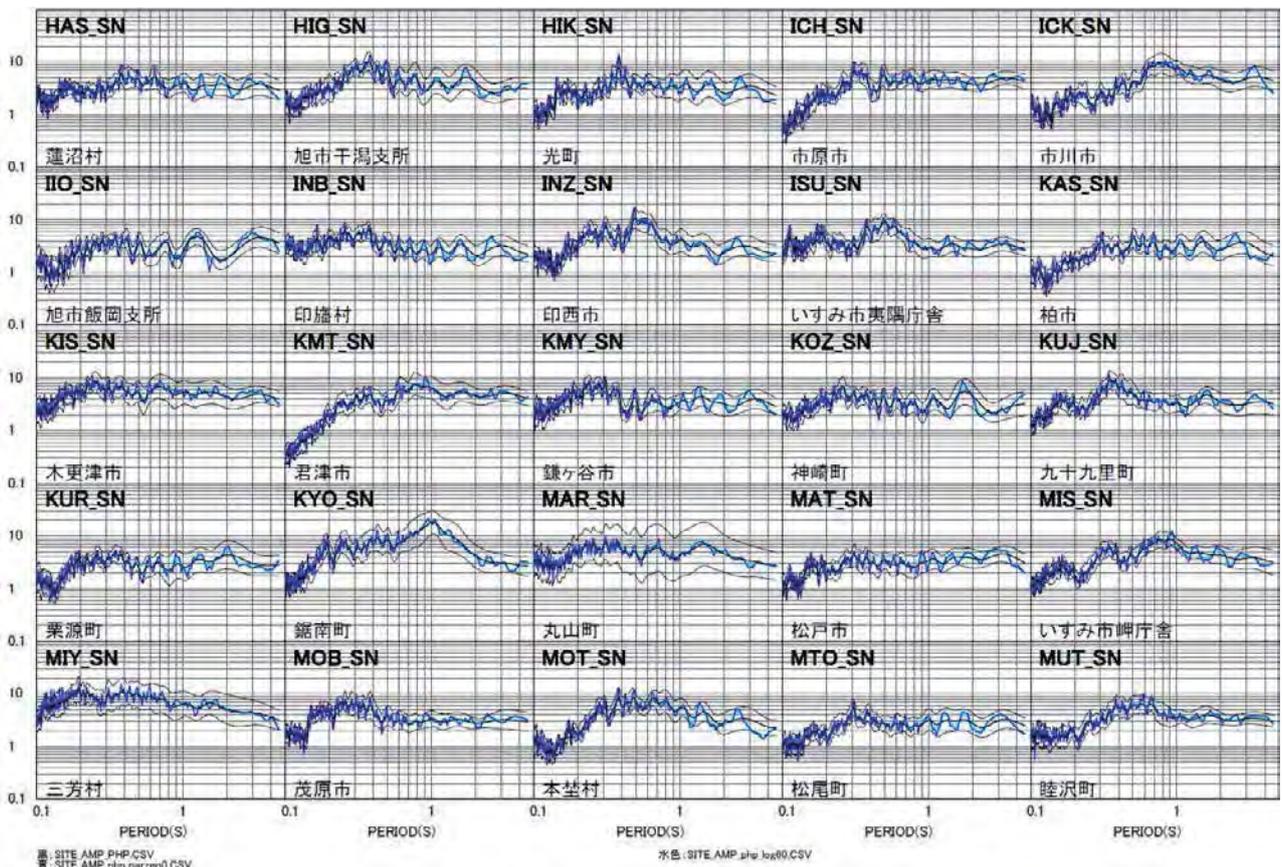
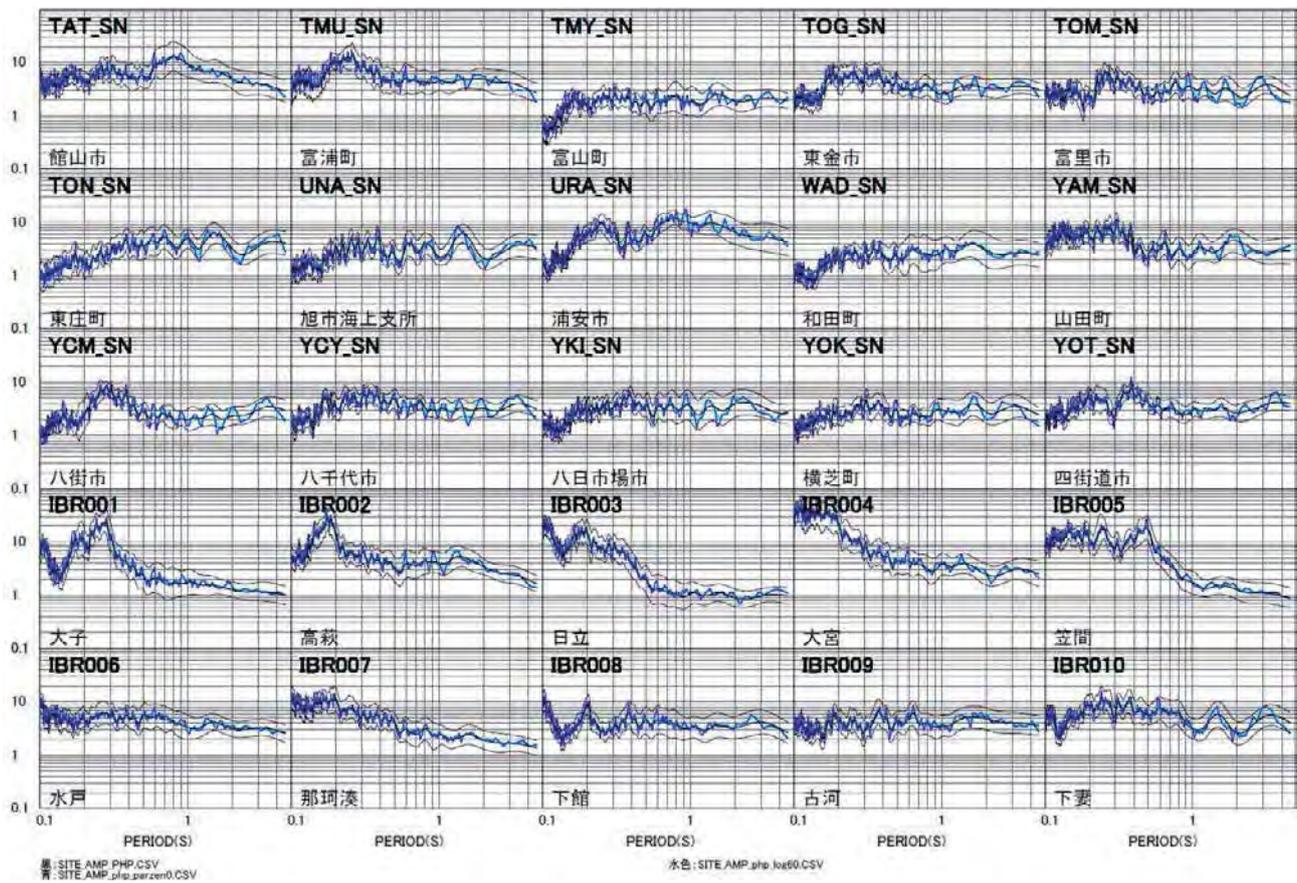
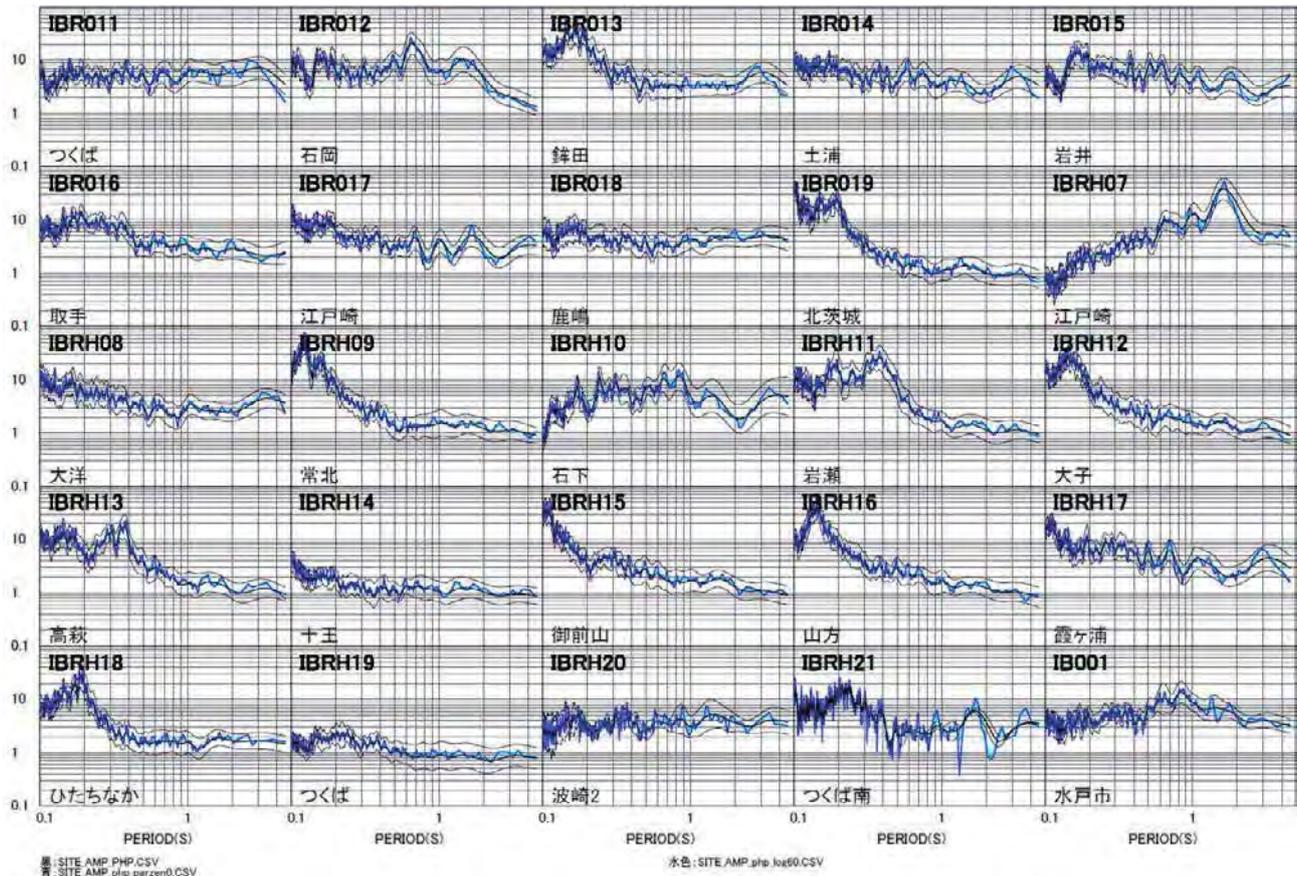


図 2 1 - 2 スペクトルインバージョンによるサイト増幅特性計算結果の比較
 黒線 : Parzenwindow0.2Hz 結果 水色 : 対数フィルター結果 青 : スムージングなし結果



黒: SITE AMP.php.csv
青: SITE AMP.php.parzen0.csv

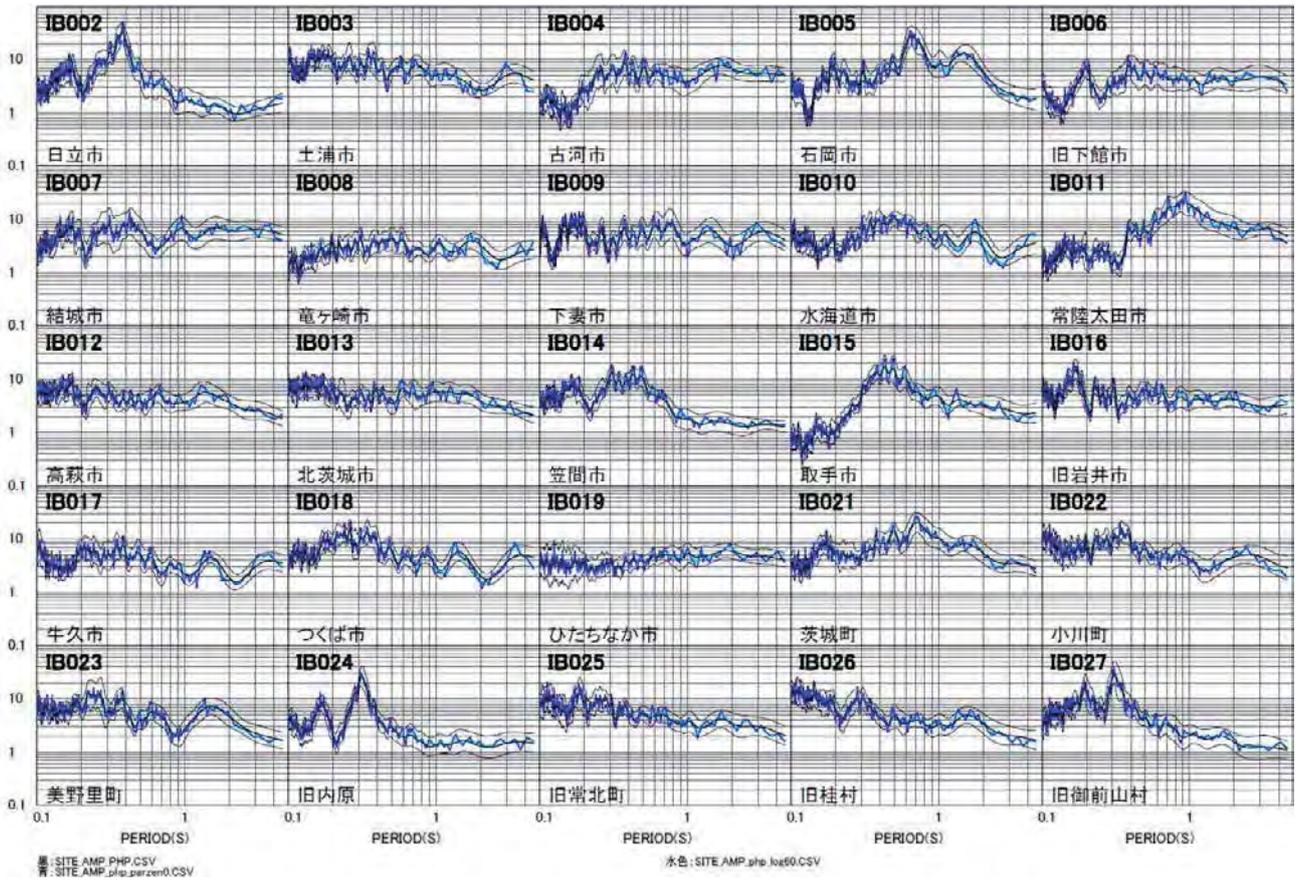
水色: SITE AMP.php.loz60.csv



黒: SITE AMP.php.csv
青: SITE AMP.php.parzen0.csv

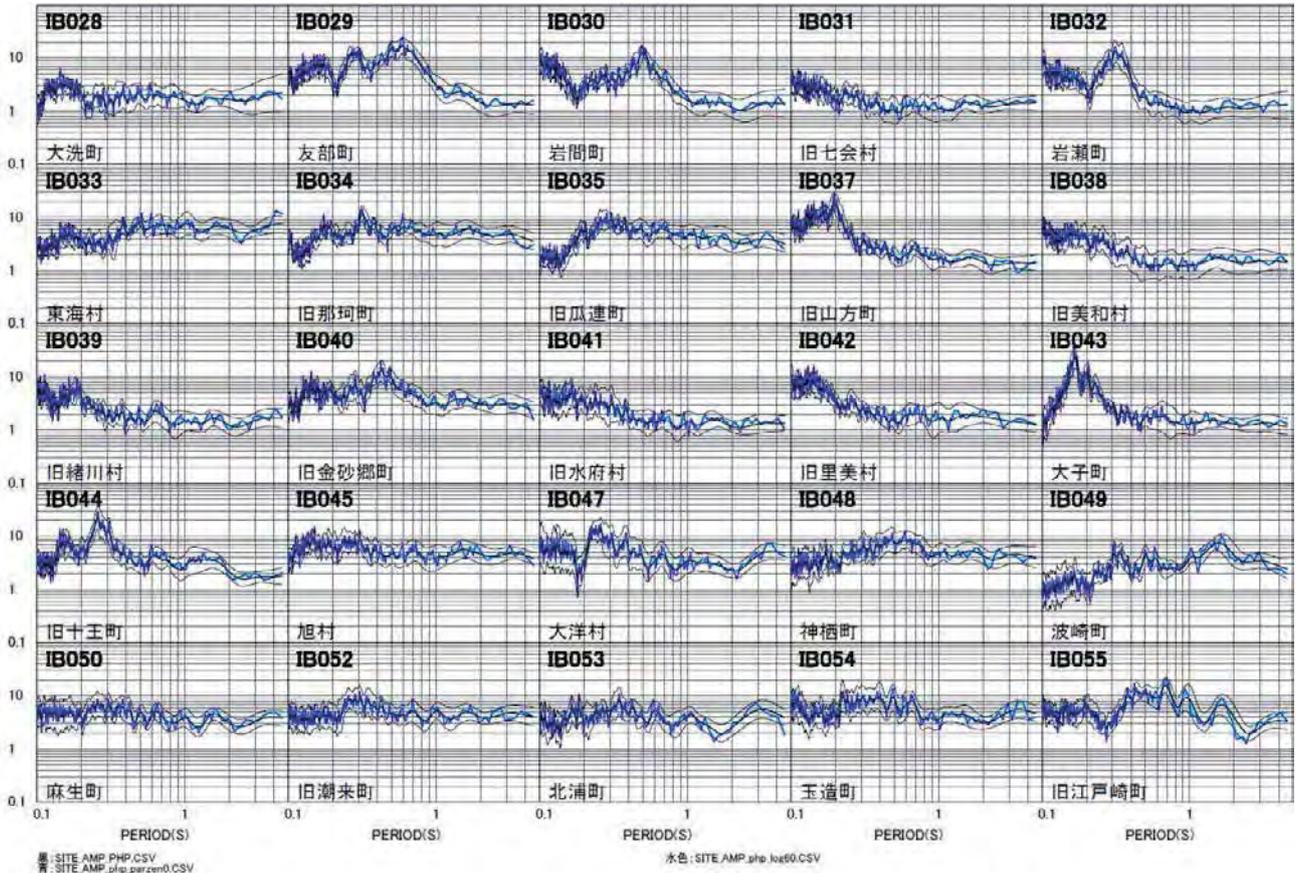
水色: SITE AMP.php.loz60.csv

図 2 1 - 3 スペクトルインバージョンによるサイト増幅特性計算結果の比較
黒線: Parzenwindow0.2Hz 結果 水色: 対数フィルター結果 青: スムージングなし結果



黒: SITE AMP_PHP.CSV
青: SITE AMP_php.parzen0.CSV

水色: SITE AMP_php_log60.CSV



黒: SITE AMP_PHP.CSV
青: SITE AMP_php.parzen0.CSV

水色: SITE AMP_php_log60.CSV

図 2 1 - 4 スペクトルインバージョンによるサイト増幅特性計算結果の比較
黒線: Parzenwindow0.2Hz 結果 水色: 対数フィルター結果 青: スムージングなし結果

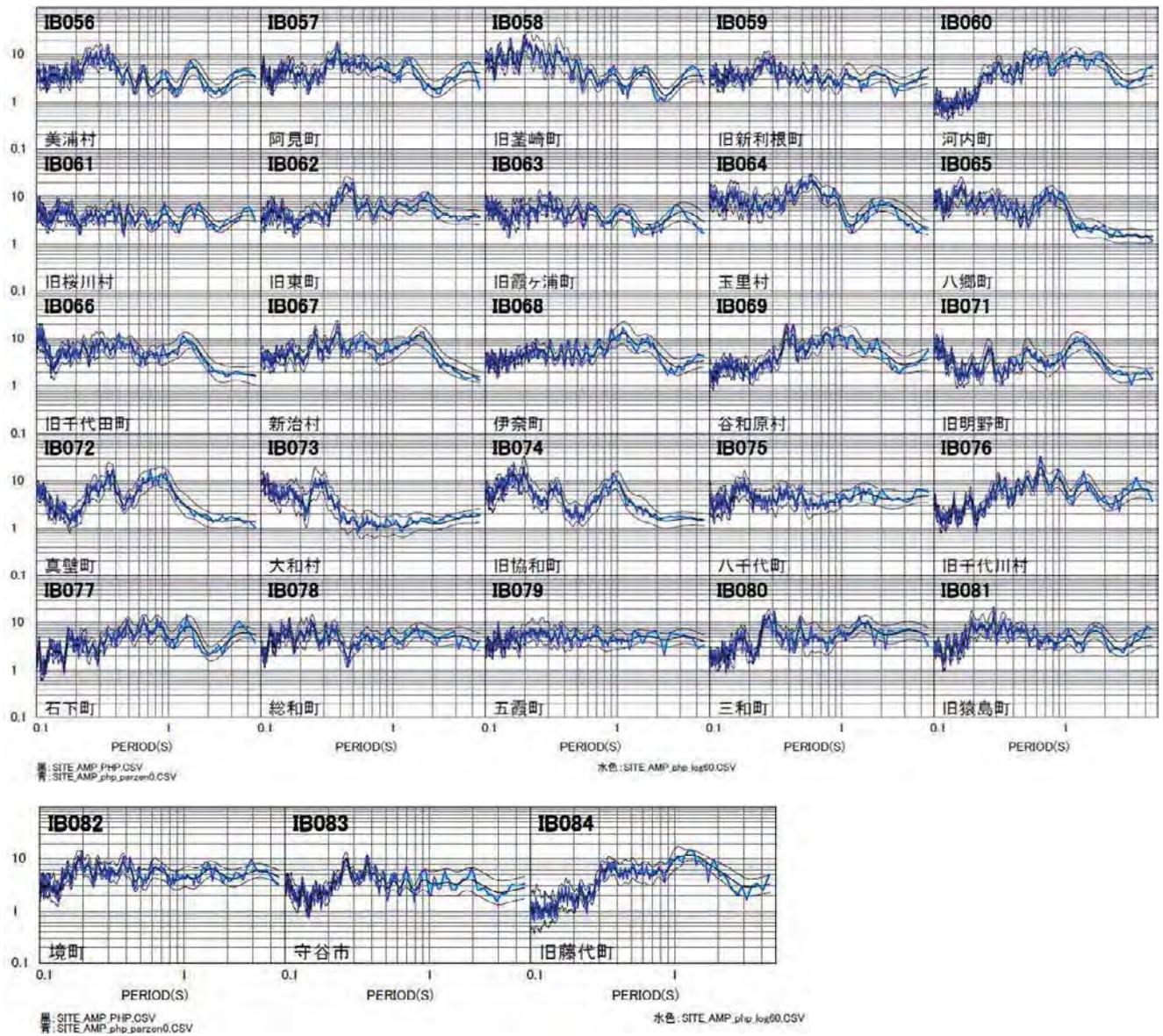


図 2 1 - 5 スペクトルインバージョンによるサイト増幅特性計算結果の比較
 黒線 : Parzenwindow0.2Hz 結果 水色 : 対数フィルター結果 青 : スムージングなし結果

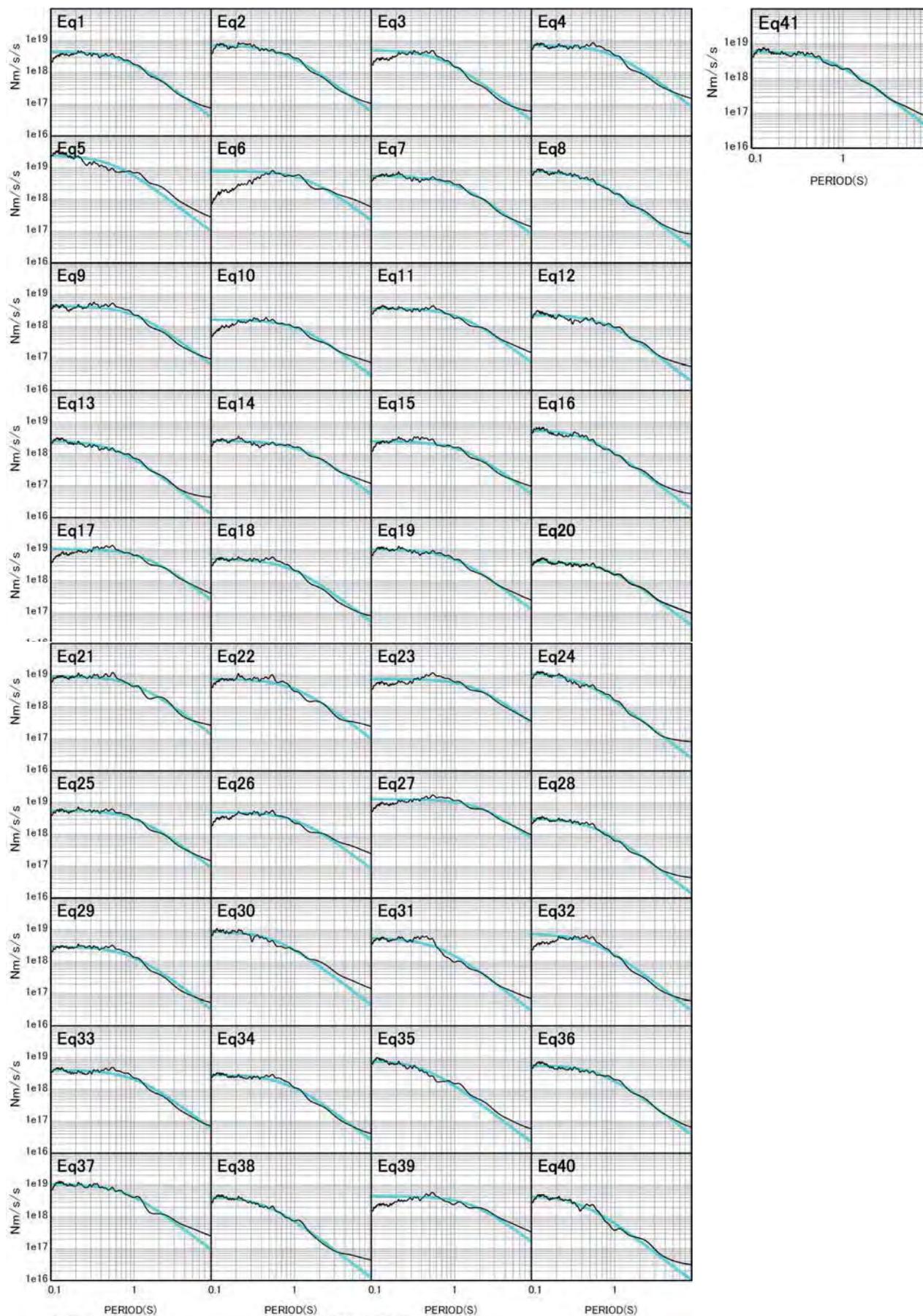


図 2 2 震源スペクトルと ω^2 モデル

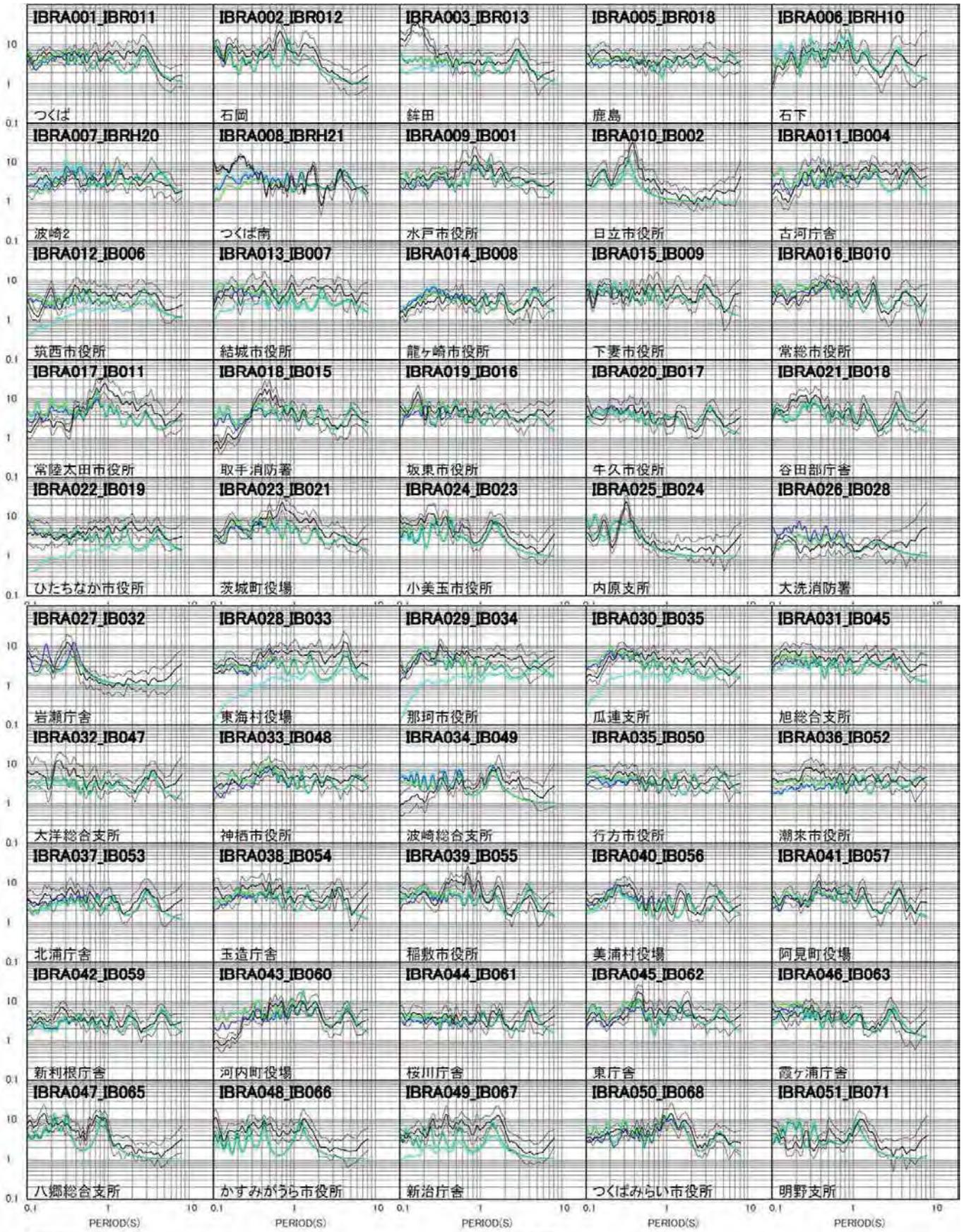


図 2-3-1 減衰補正係数 (Q) の同定解析結果 黒: 観測増幅特性 (スペクトルインバージョン結果) 水色: AVS100 の結果 青: 平均値 (a=10.6) 緑: 同定解析結果 (茨城県)

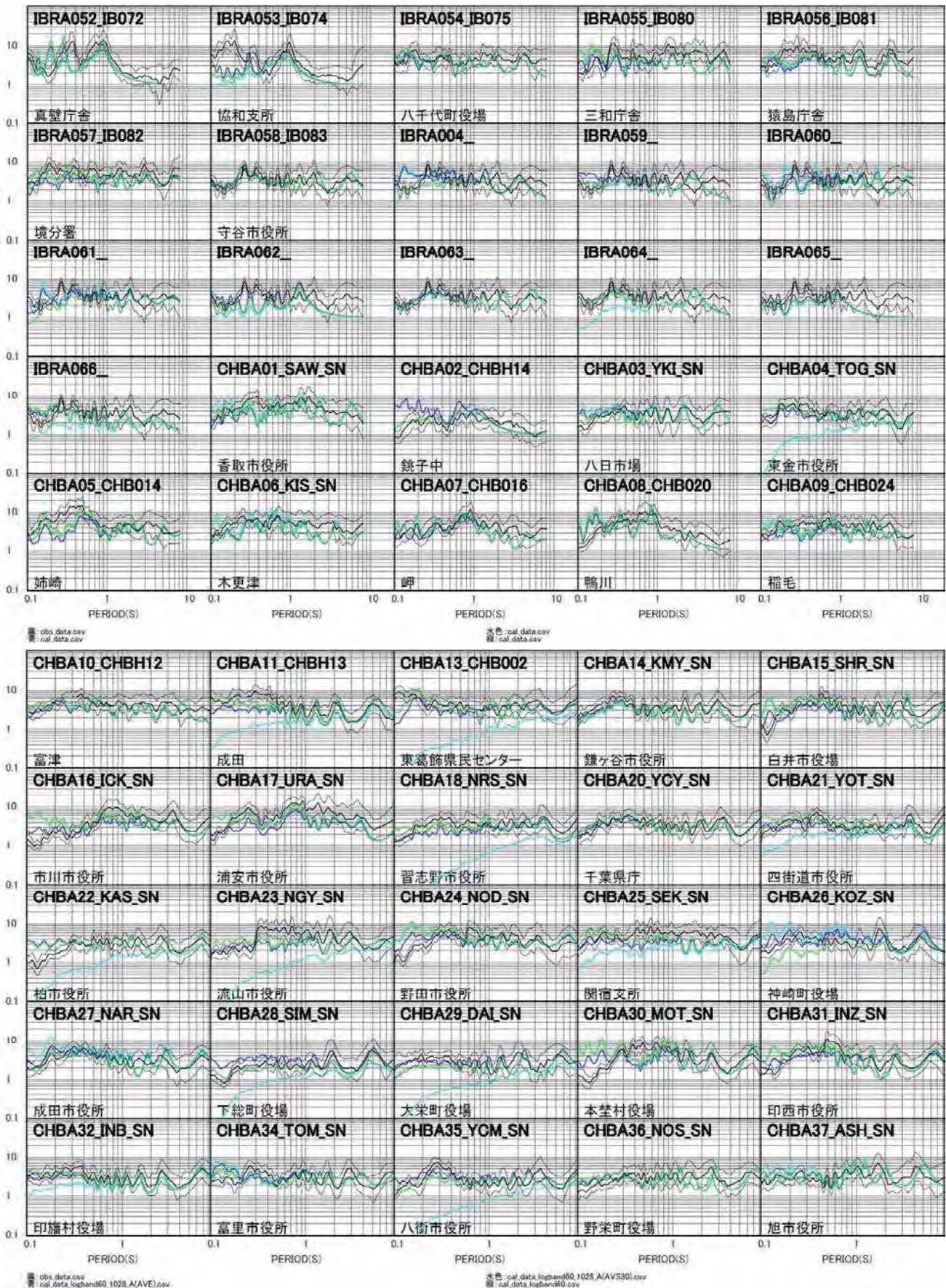


図 2 3 - 2 減衰補正係数 (Q) の同定解析結果 黒 : 観測増幅特性 (スペクトルインバージョン結果) 水色 : AVS100 の結果 青 : 平均値 (a=10.6) 緑 : 同定解析結果 (茨城県・千葉県)

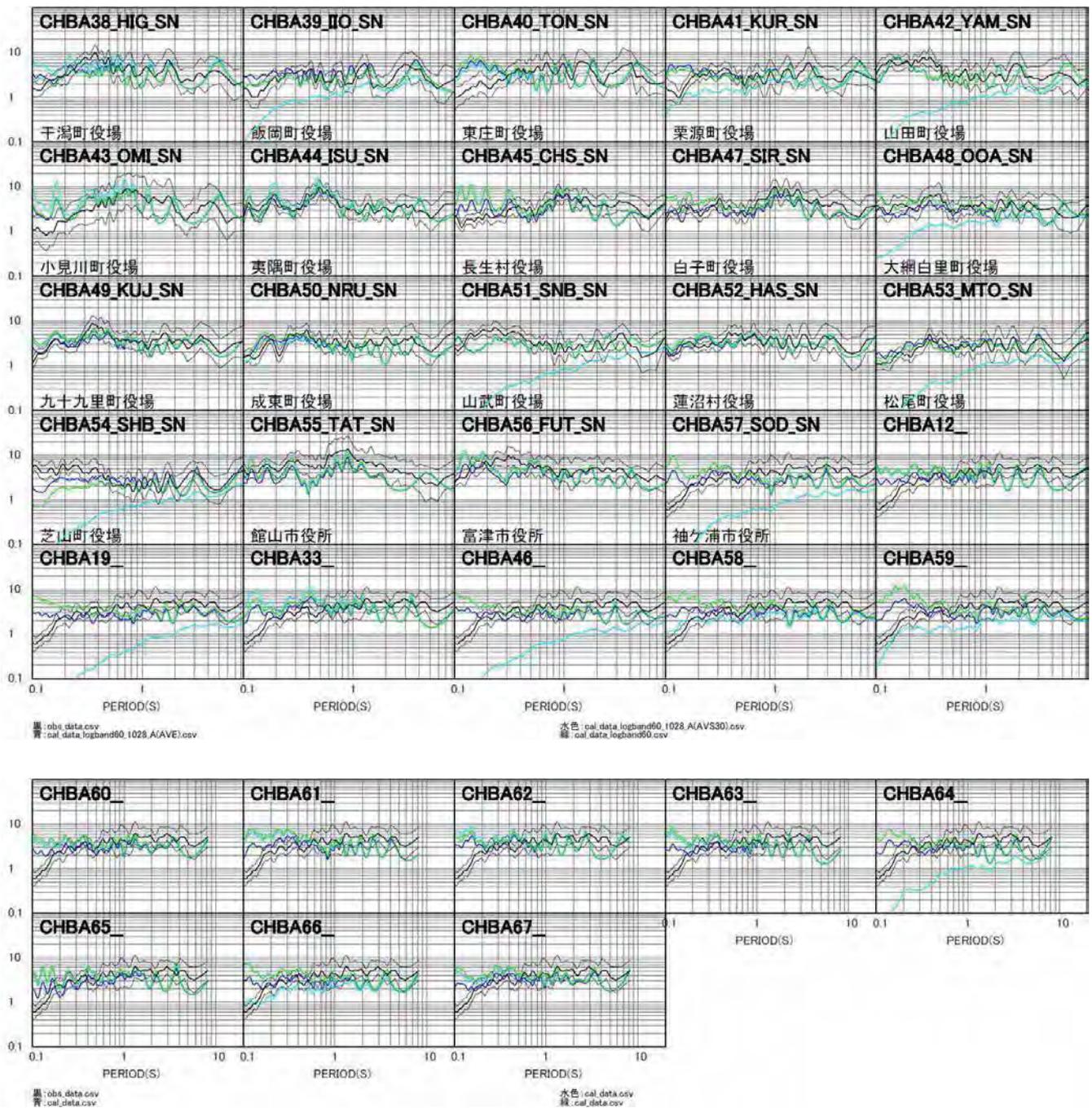


図 2-3-3 減衰補正係数 (Q) の同定解析結果 黒：観測増幅特性 (スペクトルインバージョン結果) 水色：AVS100 の結果 青：平均値 ($\alpha=10.6$) 緑：同定解析結果 (千葉県)

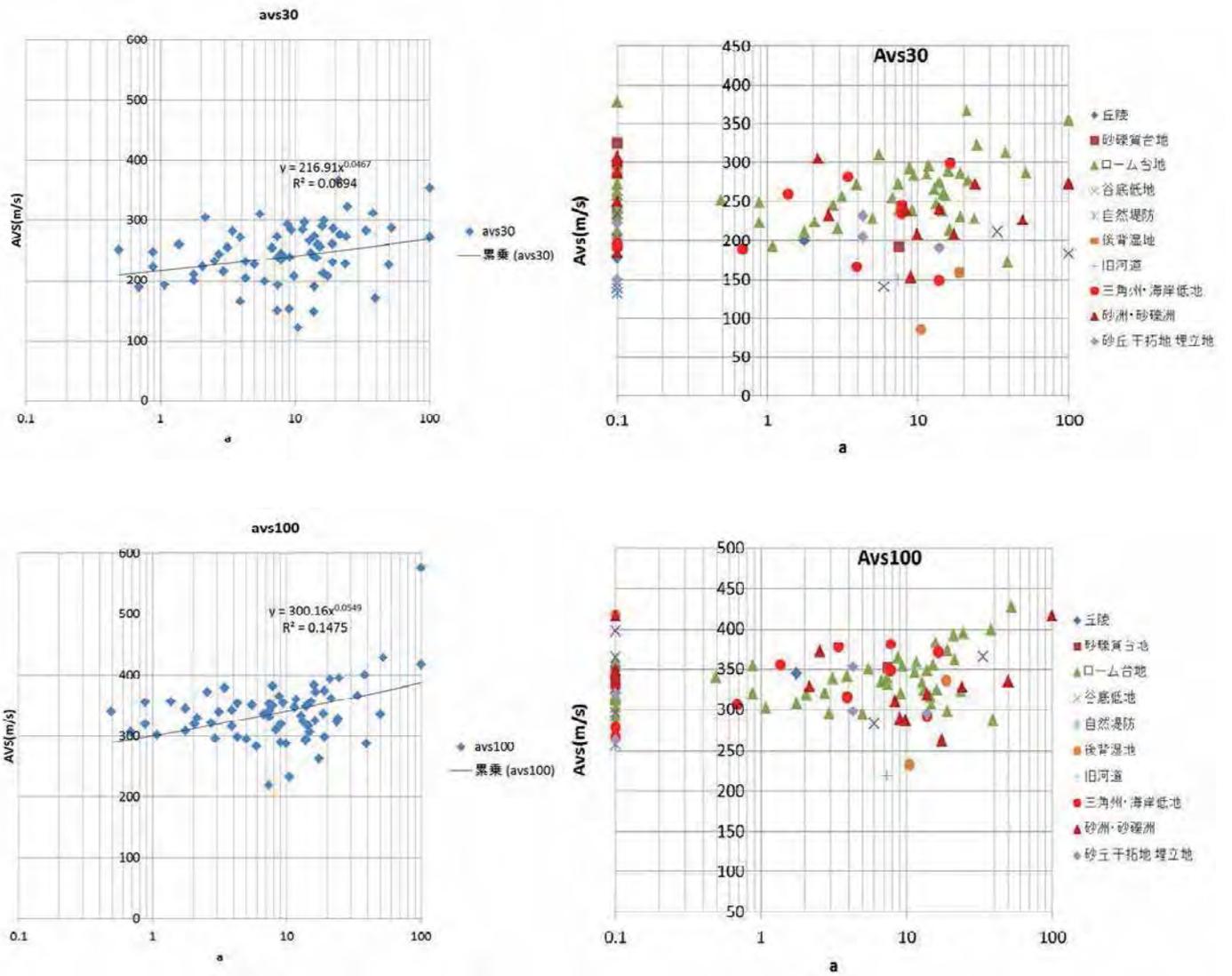


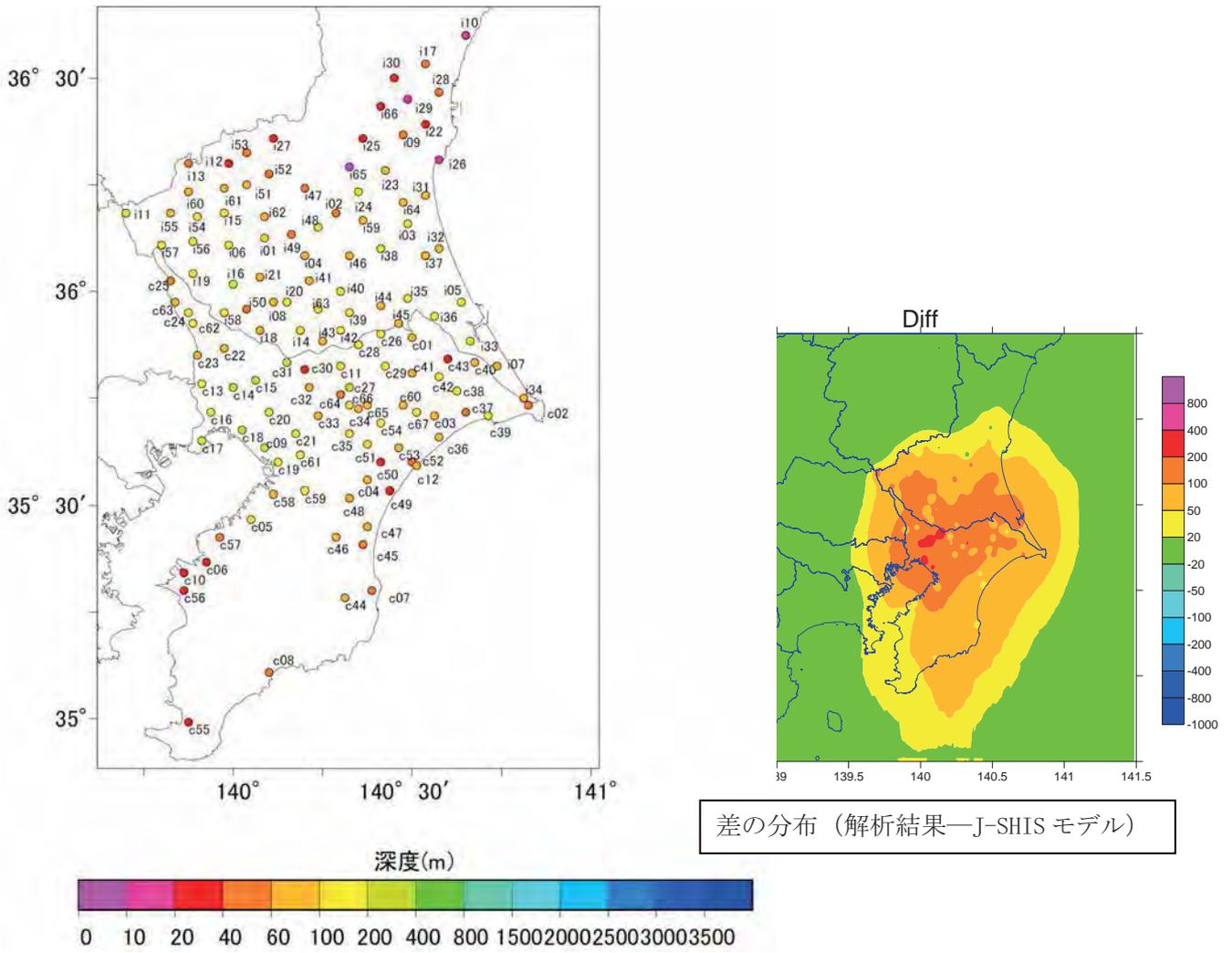
図 2 4 AVS と a 値の関係と微地形区分との関係 (上図 AV330, 下図 AVS100)

7. 千葉県・茨城県の深部地盤構造モデルの作成結果

千葉県・茨城県の結果と併せて平面図としてまとめた。図25-1～図25-5に各速度層の上面深度分布を示す。全体的な傾向としては、筑波山近傍で浅く、周辺部へ離れるにつれて深くなっているように見受けられ、千葉県中部付近で最も深くなっている。また、茨城県西城では、Vs700～900m/s層の上面深度が海側の測定地点のIBRA010(日立市役所)、IBRA026(大洗消防署)の付近でやや浅くなっている。なお、同図中にはJ-SHISの地盤モデルも示したが、解析結果のVs900m/s層の上面深度がJ-SHISモデルと比べて深く推定された。また、Vs1500m/s層の上面深度についても、茨城県北域ではJ-SHISモデルと比べて深く推定された。表11に計算に使用した工学的基盤以深の物性値を示す。

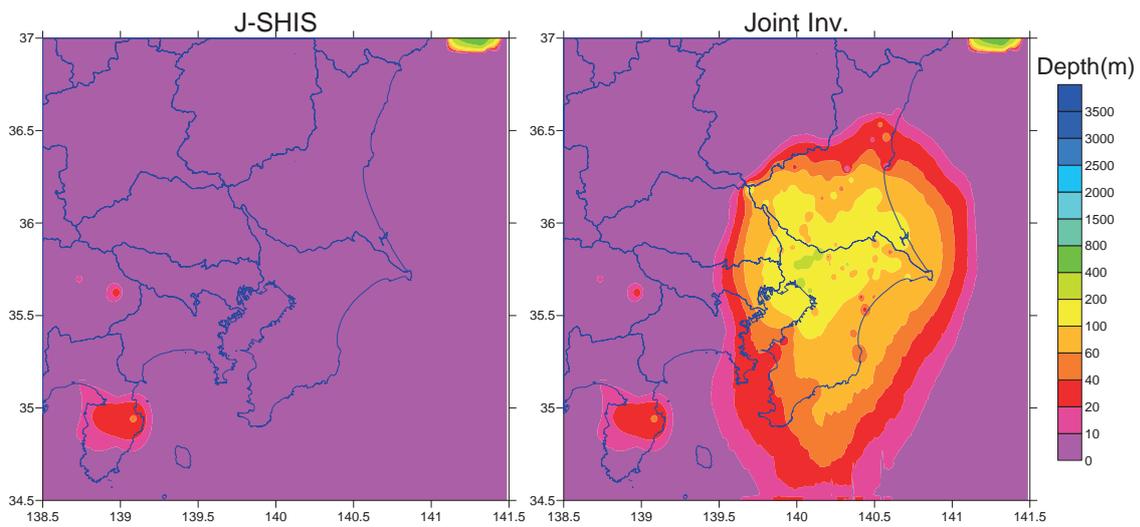
表11 深部地盤モデルの物性値

Layer	Vs (km/s)	Vp (km/s)	ρ (g/cm ³)
1	0.35	1.6	1.85
2	0.40	1.6	1.85
3	0.45	1.7	1.90
4	0.50	1.8	1.90
5	0.55	1.8	1.90
6	0.60	2.0	1.90
7	0.65	2.0	1.95
8	0.70	2.1	2.00
9	0.75	2.1	2.00
10	0.80	2.2	2.00
11	0.85	2.3	2.05
12	0.90	2.4	2.05
13	0.95	2.4	2.10
14	1.0	2.5	2.10
15	1.1	2.5	2.15
16	1.2	2.6	2.15
17	1.3	2.7	2.20
18	1.4	3.0	2.25
19	1.5	3.2	2.25
20	1.6	3.4	2.30
21	1.7	3.5	2.30
22	1.8	3.6	2.35
23	1.9	3.7	2.35
24	2.0	3.8	2.40
25	2.1	4.0	2.40
26	2.1	4.0	2.40
27	2.7	5.0	2.50
28	2.9	4.6	2.55
29	2.7	5.0	2.50
30	3.1	5.5	2.60
31	3.2	5.5	2.65



差の分布 (解析結果—J-SHIS モデル)

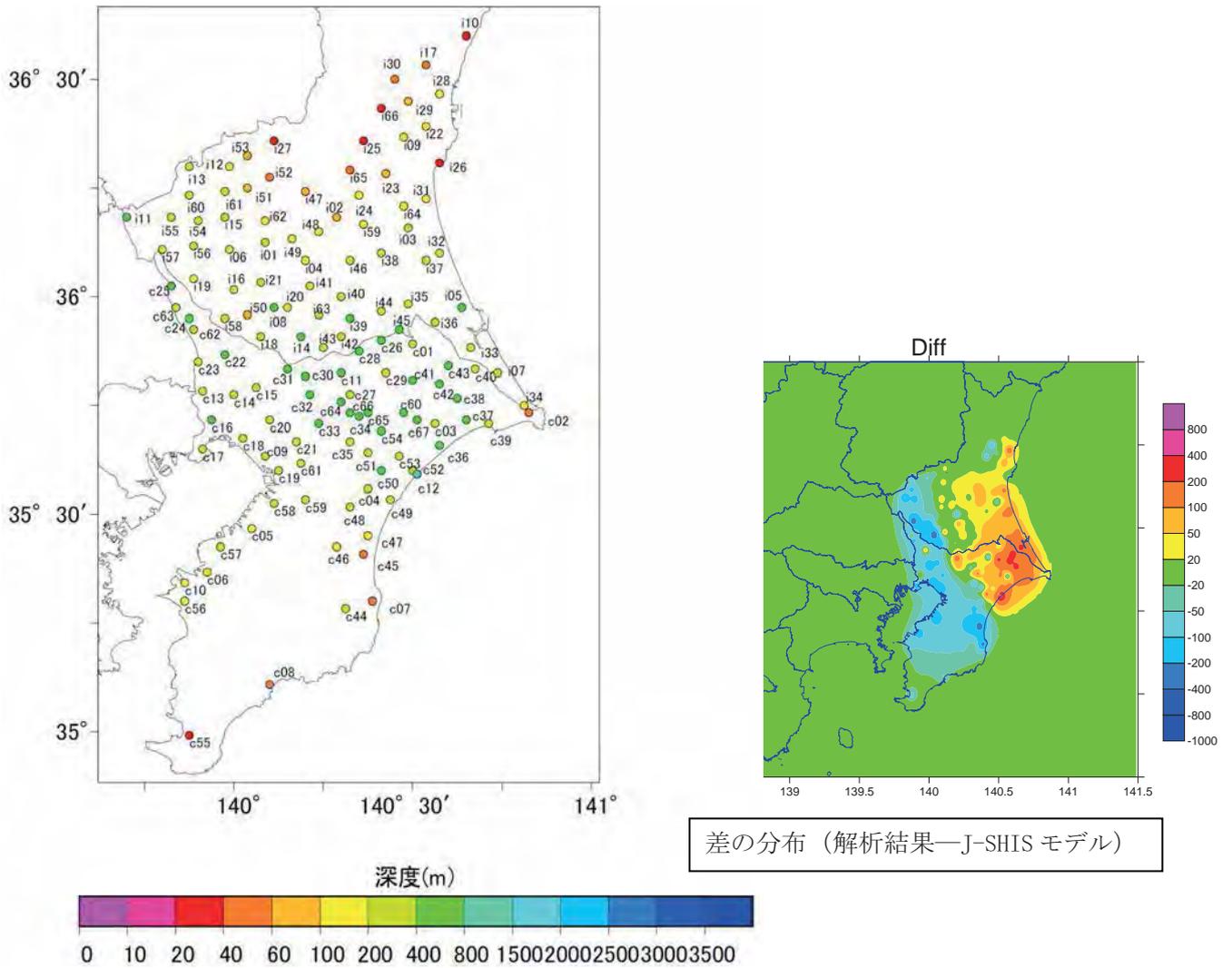
(a) 測定地点毎の上面深度



左:J-SHIS モデル 右:解析結果

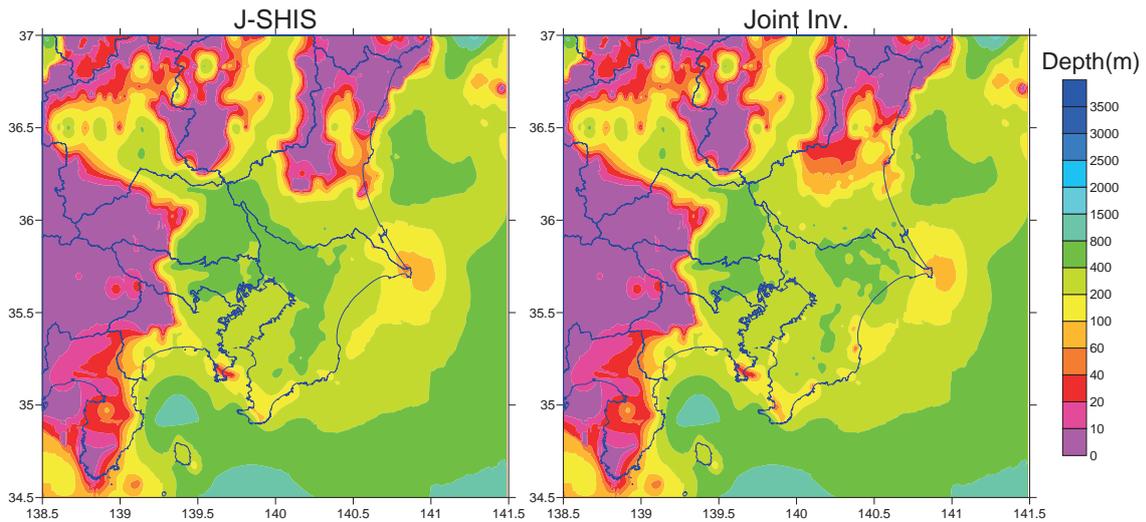
(b) コンター図

図 2 5 - 1 Vs500 m/s 層上面深度



差の分布 (解析結果—J-SHIS モデル)

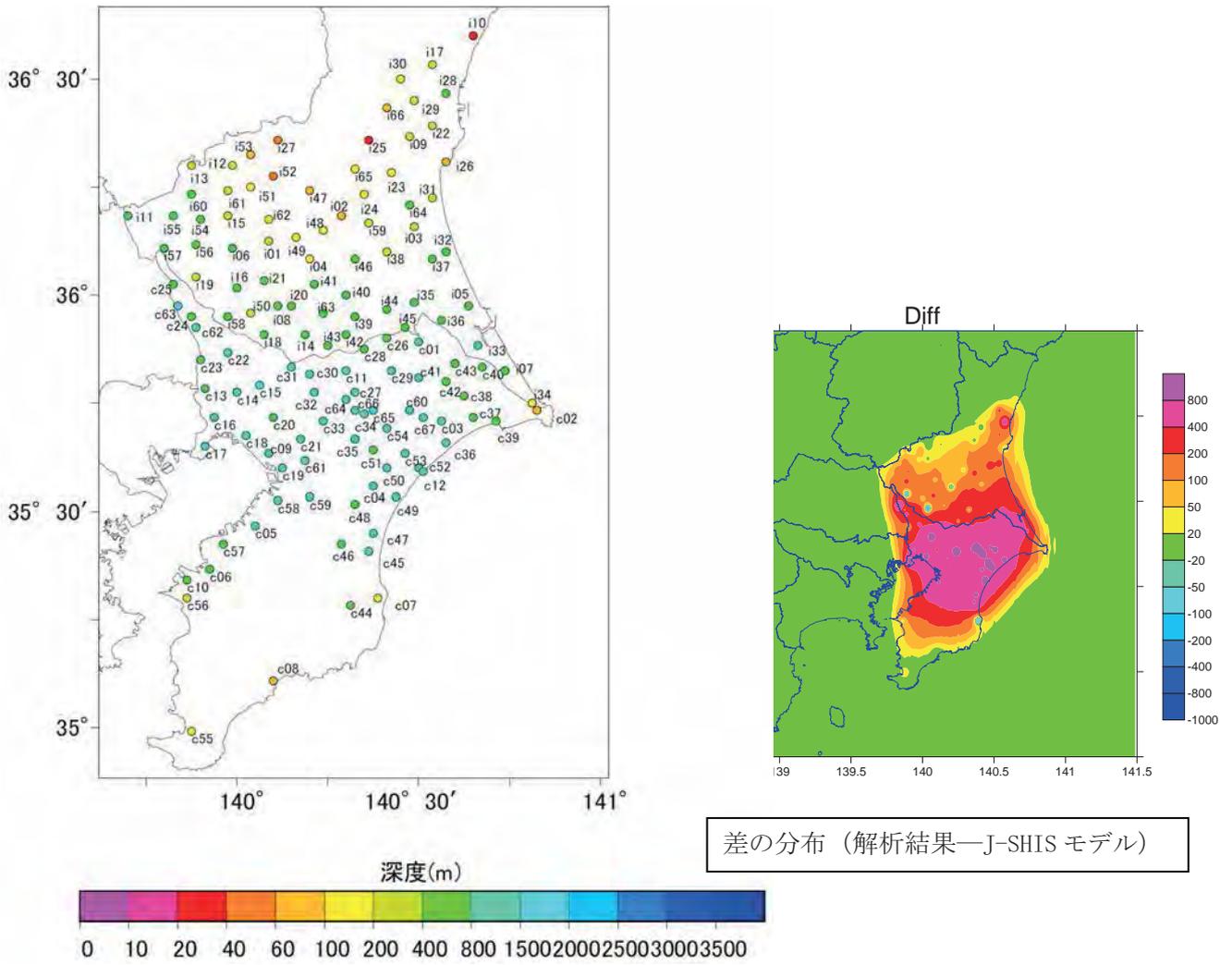
(a) 測定地点毎の上面深度



左:J-SHIS モデル 右:解析結果

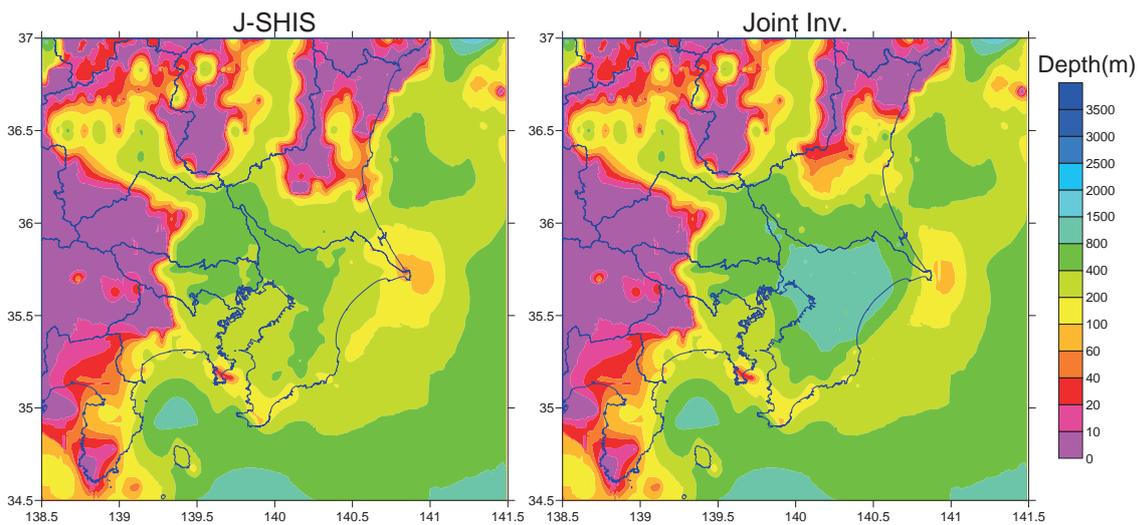
(b) コンター図

図 2 5 - 2 Vs700 m/s 層上面深度



差の分布 (解析結果—J-SHIS モデル)

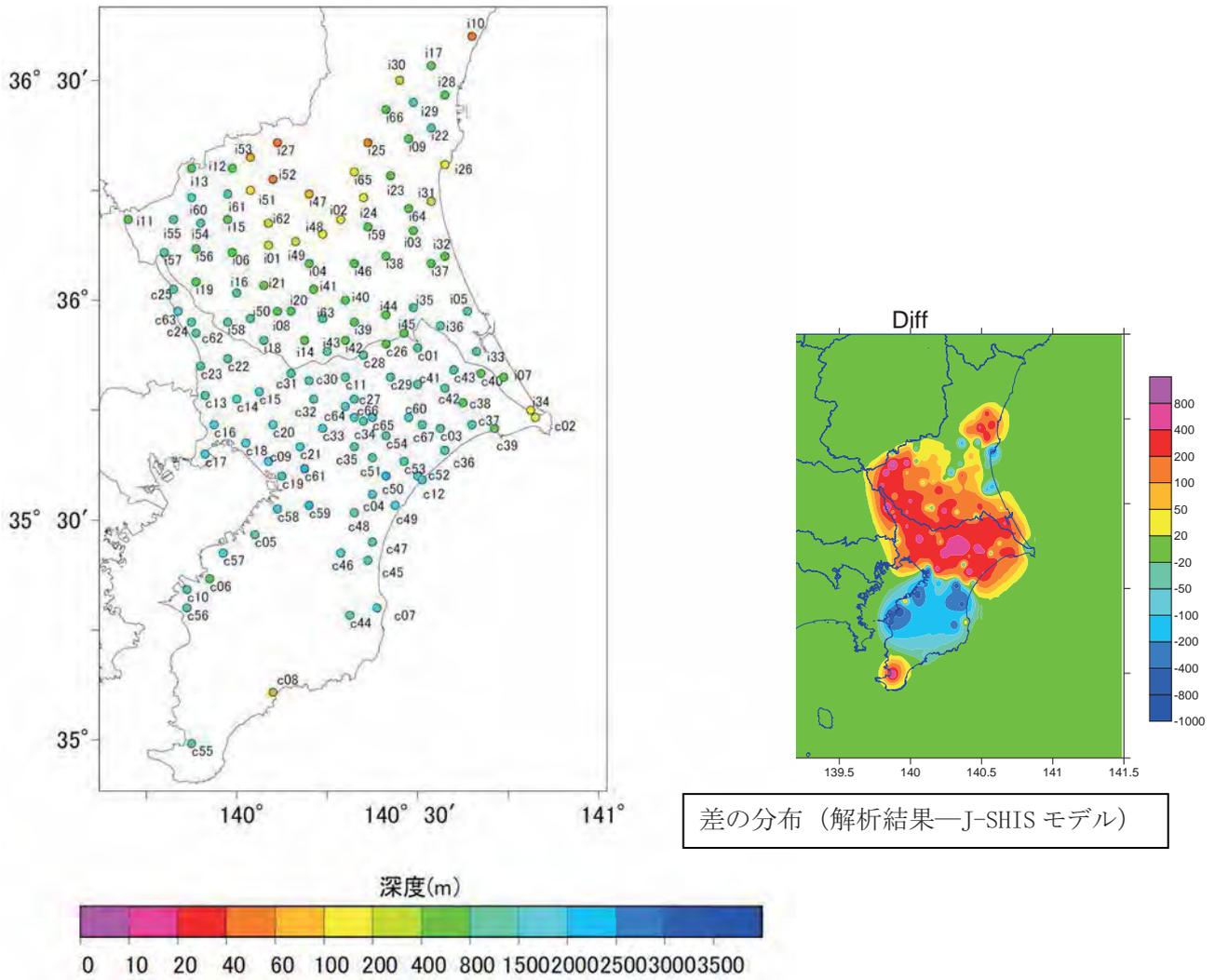
(a) 測定地点毎の上面深度



左:J-SHIS モデル 右:解析結果

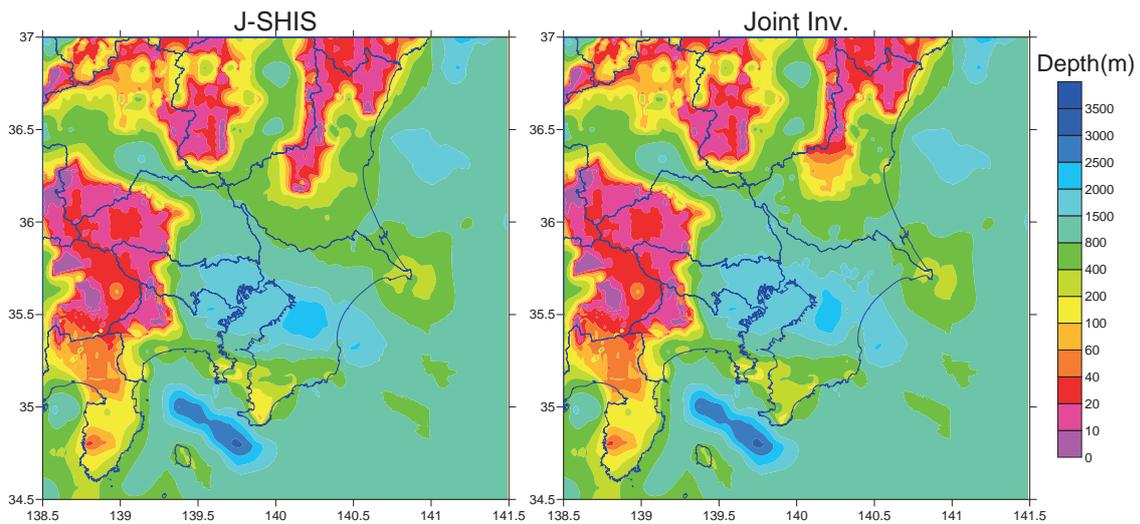
(b) コンター図

図 2 5 - 3 Vs900 / Vs1000 m/s 層上面深度



差の分布 (解析結果—J-SHIS モデル)

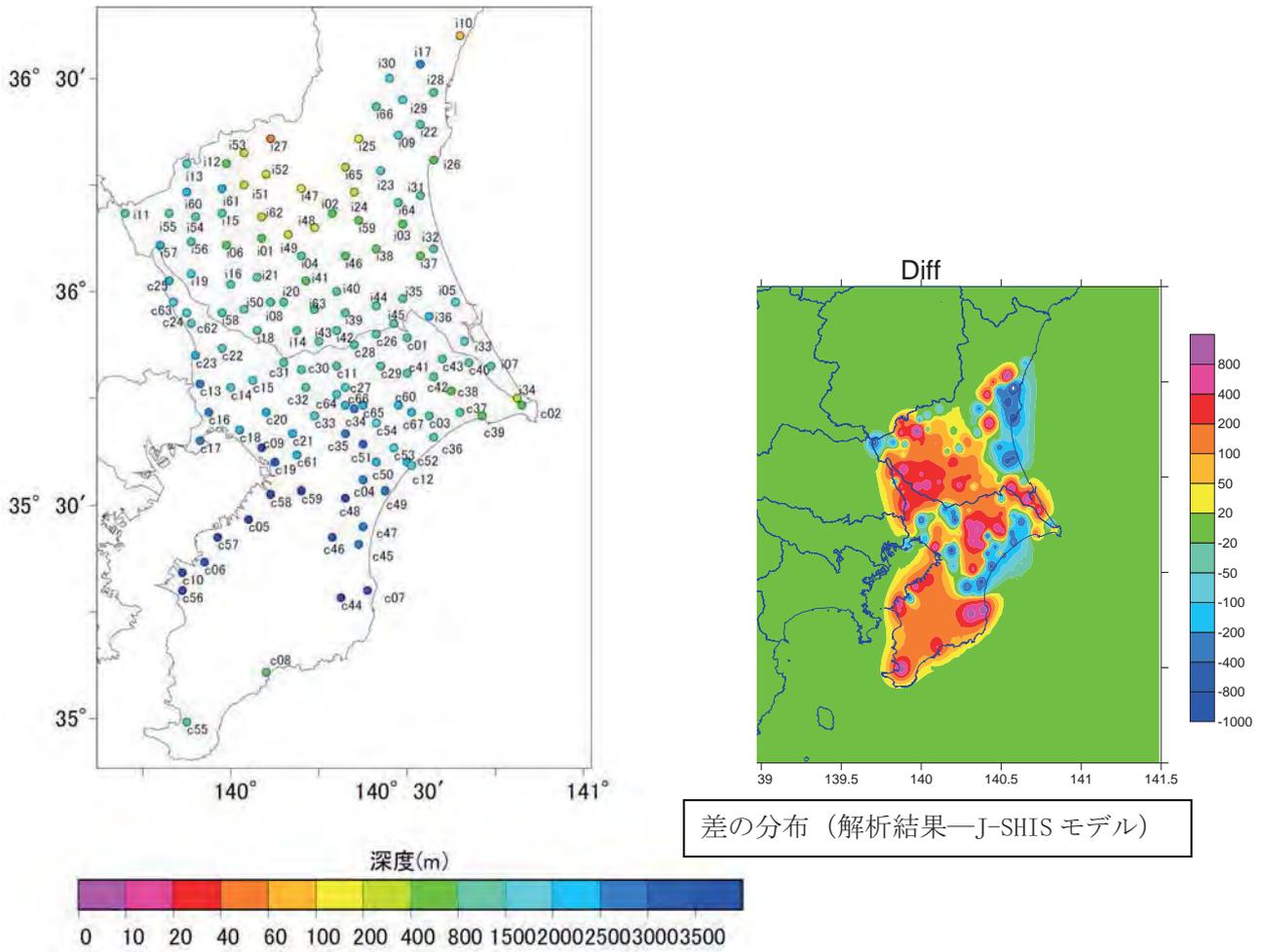
(a) 測定地点毎の上面深度



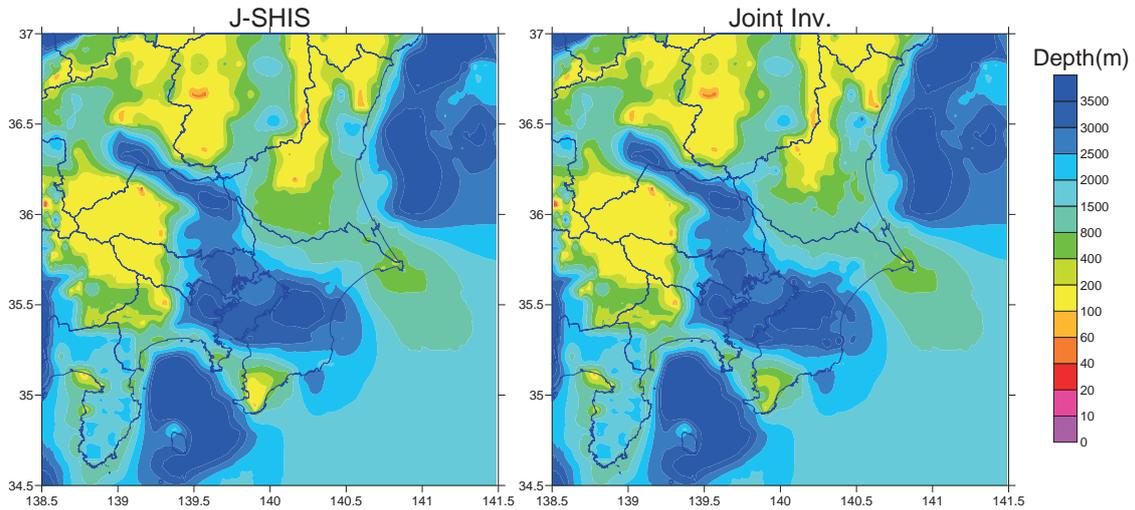
左:J-SHIS モデル 右:解析結果

(b) コンター図

図 2 5 - 4 Vs1500 m/s 層上面深度



(a) 測定地点毎の上面深度



左:J-SHIS モデル 右:解析結果

(b) コンター図

図 2 5 - 5 Vs3200 m/s 層上面深度

8. 差分法による検証

今回作成した地下構造モデルの妥当性（主に深部部分）を検証するために、差分法による地震動シミュレーションを行い観測記録と比較した。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12，図26）。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12の条件で行った。今回作成した地下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、全国1次地下構造モデルを参考にモデル化した。また、モデルを修正した効果を調べるために、初期モデルとして与えたJ-SHISの地下構造モデルによる計算も行った。

地震動シミュレーション結果の一例として、モデル化領域のほぼ中央部で発生した2004年10月6日の茨城県南部の地震（深さ66km，M5.7；表12，図26の5の地震）による最大速度値の分布を図27に示す。図中には、観測記録から算出した各観測点での最大速度値を重ねて示している。これらの最大振幅値は、0.1Hz~0.5Hzのバンドパスフィルターを施した計算記録および観測記録から求めており、計算値はVs350m/s上での値となっている。計算結果は、震央の西側で振幅が大きく、震源からの放射特性の影響を強く受けた分布となっている。一方、観測値では震央の西側だけでなく、東側でも振幅の大きな地点がみられる。これは、速度構造モデルにはVs350m/sよりも低速度層が含まれていないことや、バンドパスフィルター処理によっても観測記録には0.5Hz以上の高周波数成分の影響が残っていることなどが理由と考えられる。2種類の地下構造モデルによる結果の比較として、計算結果の最大速度値の比を、対象とした7地震について平均した（図28）。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る。さらに、図26（右）に示した2つの側線での速度波形、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29a，b）。

今回のモデル化では、微動や地震動の周波数特性を考慮して構造の修正が行われている。そこで、次式により観測記録と計算結果の残差の周波数特性を評価した（図26）。

$$Res(f) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i,j} (\log O_{ij}(f) - \log C_{ij}(f))^2} \quad (8-1)$$

ここで、 $O_{ij}(f)$ 、 $C_{ij}(f)$ は、 i 地震による j 観測点での観測スペクトルと計算スペクトルの差を図26に示す。対象とした0.1~0.5Hzの周波数帯では、今回のモデルの方がJ-SHISモデルよりも残差が小さくなっていることがわかる。また、観測点毎の観測スペクトルと計算スペクトルの再現性については、次式により評価した。

$$A_j(f) = \frac{1}{N_e} \sum_i^{N_e} (\log O_{ij}(f) - \log C_{ij}(f)) \quad (8-2)$$

$$\bar{A}_j = \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} A_j(f) df \quad (8-3)$$

$$(SD_j)^2 = \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} (A_j(f) - \bar{A}_j)^2 df \quad (8-4)$$

ここで、 $A_j(f)$ は j 観測点における観測スペクトルと計算スペクトルの差の周波数毎の平均値、 N_e は地震数である。 $A_j(f)$ の f_1 から f_2 （ここでは $f_1=0.1\text{Hz}$ 、 $f_2=0.5\text{Hz}$ とした）の周波数帯での平均値を \bar{A}_j として、 $A_j(f)$ の標準偏差（ SD_j ）を算出した。 $O_{ij}(f)$ と $C_{ij}(f)$ の周波数特性が一致していれば、 SD_j は小さくなると思われる。図 3 1 に 2 つの地下構造モデルによる \bar{A}_j の分布と SD_j の分布を示す。 \bar{A}_j の分布は、今回のモデルによるスペクトルの平均振幅値が、J-SHIS モデルより小さく、観測値よりも大きいことを示している。また、今回のモデルによる SD_j は、J-SHIS モデルによるものに比べて全体的に減少しており、特に、茨城県南西部では J-SHIS モデルに比べて大きく改善されている。これらの地点は、図 2 9 a の IBR.069 や図 2 9 b の IBR.058 に対応しており、観測スペクトルに見られる 0.25Hz 付近のピークが、今回のモデルによって再現されていることがわかる。

表 1 2 差分法の計算の対象とした地震の一覧

	date	time	latitude	longitude	depth	Mj	Mw	Mo	strike	dip	rake	data		
			° N	° E								Nm	NIED	Chiba
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 1 3 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)

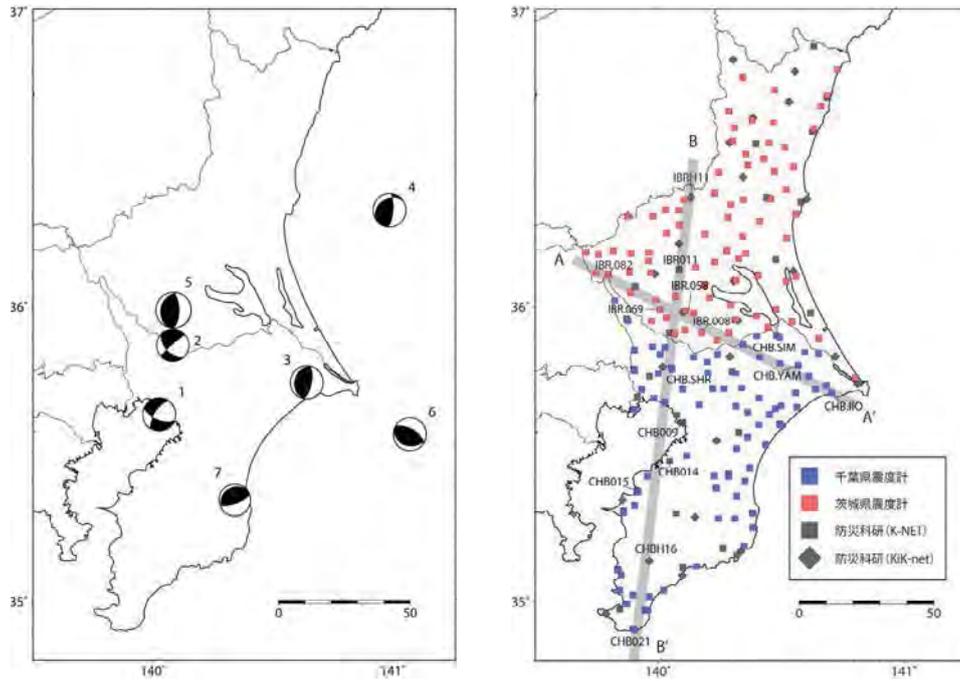


図26 差分法の計算に用いた地震（左）と、波形計算の対象とした観測点（右）。

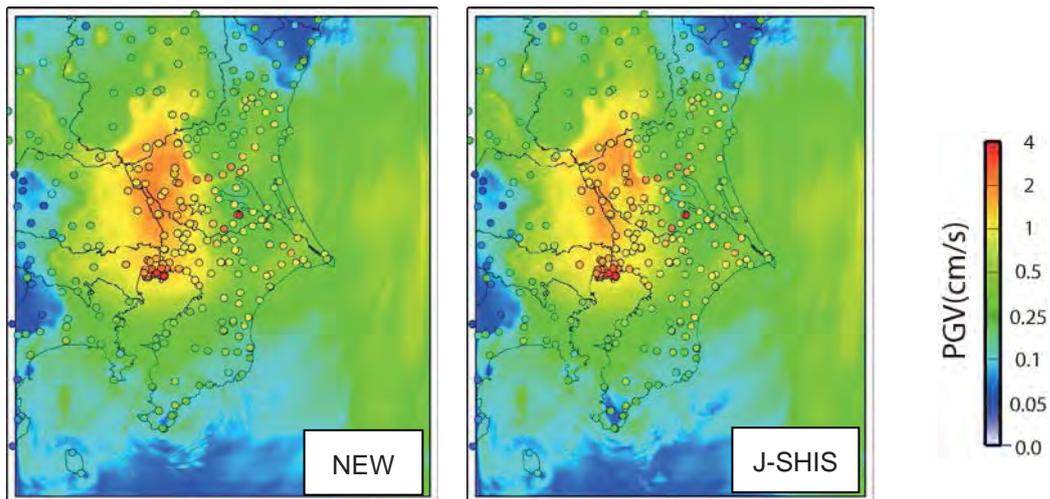


図27 今回作成した地下構造モデル（NEW）（左）と J-SHIS モデル（右）による最大速度値の分布。強震観測点での観測値は○で示している。

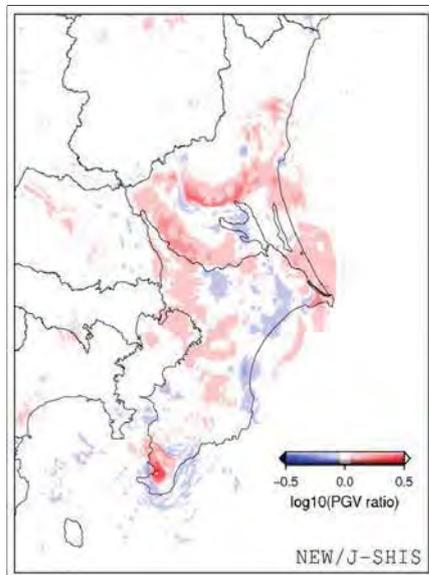


図28 今回作成した地下構造モデル（NEW）と J-SHIS モデルによる最大速度値の比（NEW/J-SHIS）の7地震についての平均値の分布。

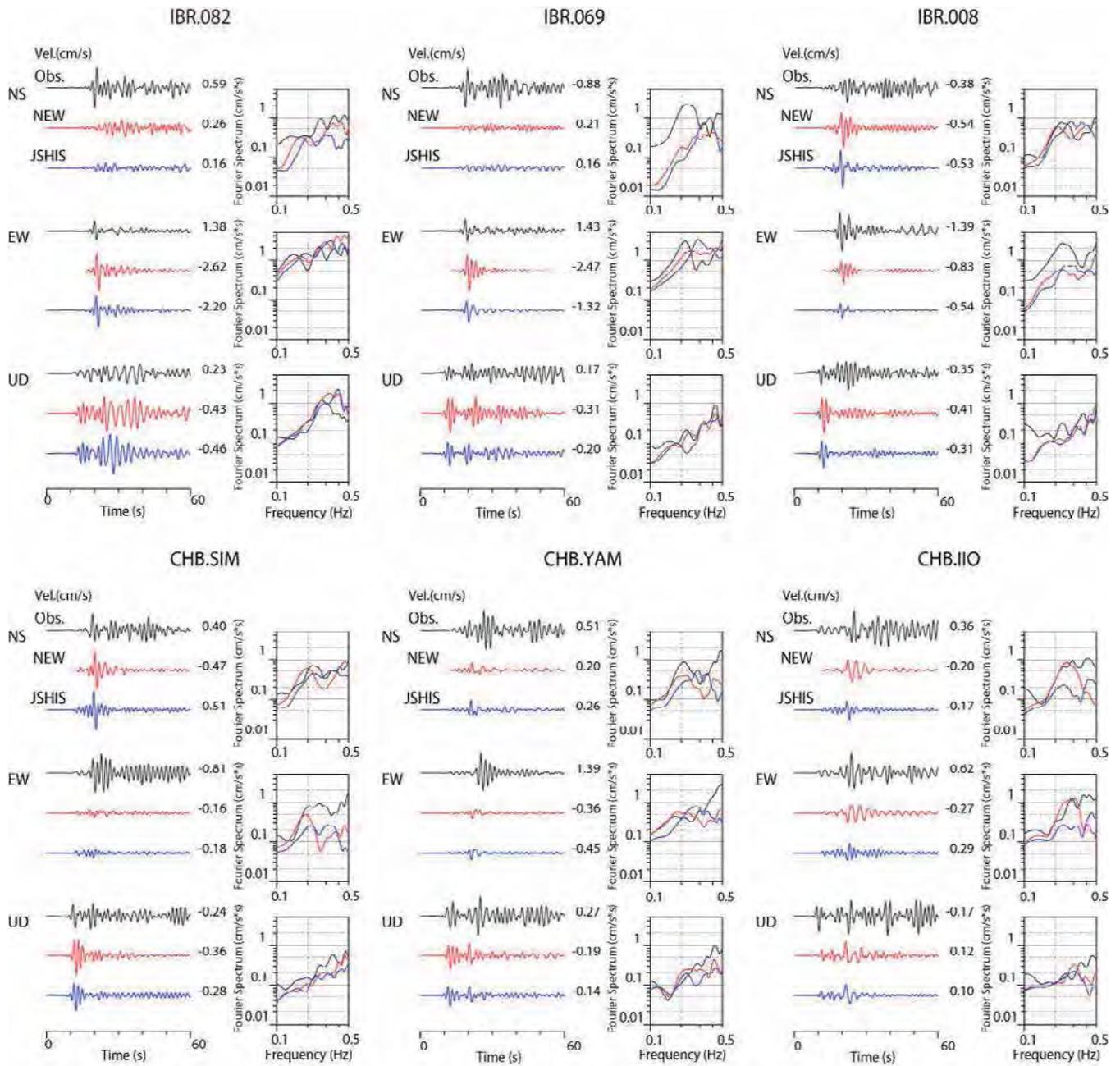


図 2.9a 図 1 左の測線 A-A'での観測記録（黒線：Obs）と今回のモデルを用いた結果（赤線：NEW），および，J-SHIS モデルを用いた結果（青線：J-SHIS）の速度波形とフーリエスペクトルの比較．波形には 0.1~0.5Hz のバンドパスフィルターを施している．スペクトルは 0.05Hz の Parzen window により平滑化している．

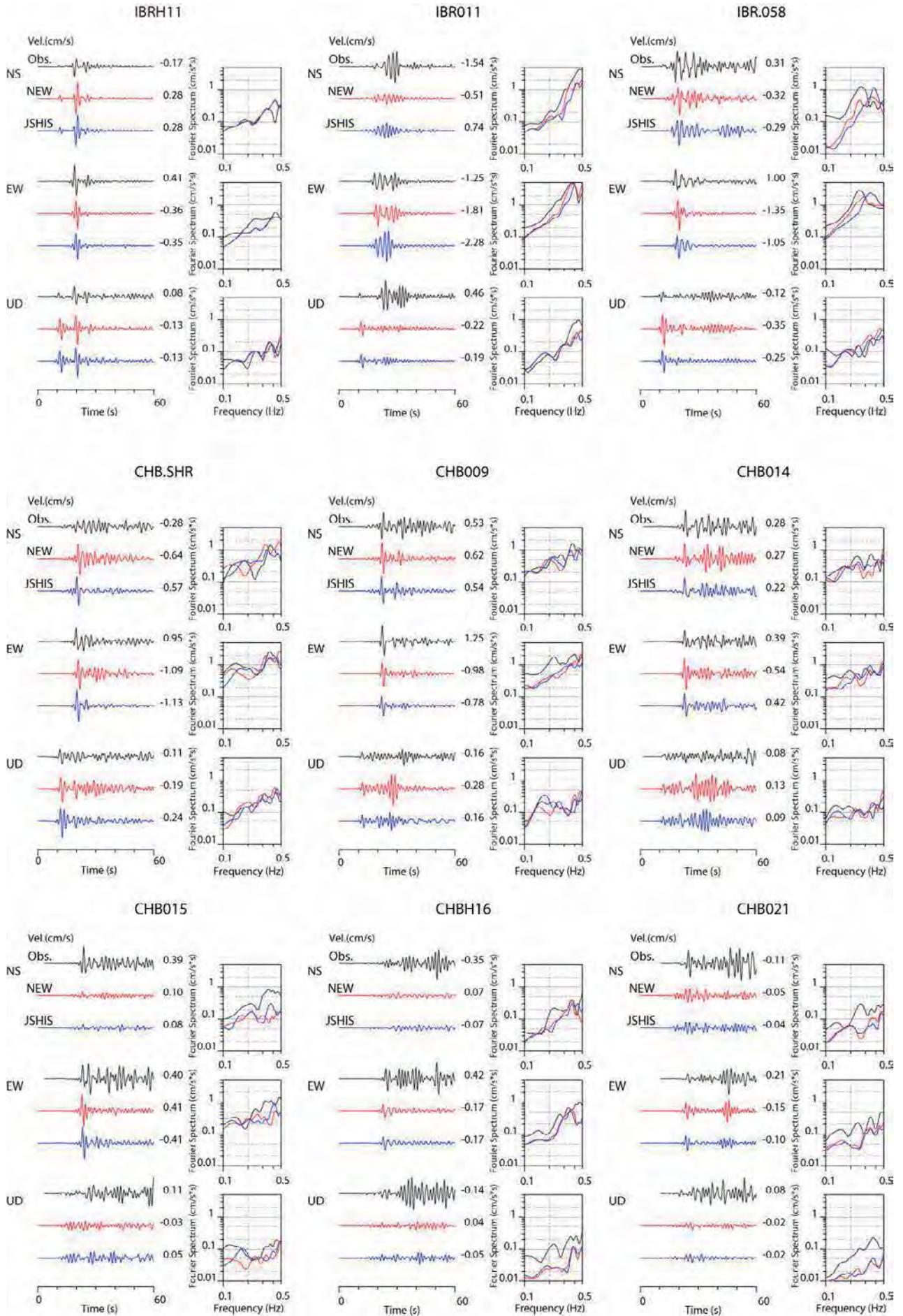


図 2 9 b 図 2 5 a と同じ (B-B'測線)

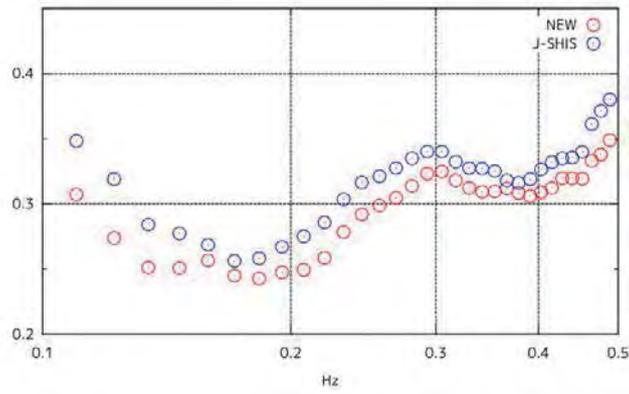


図 30 全記録についての観測スペクトルと計算スペクトルの残差の周波数特性.

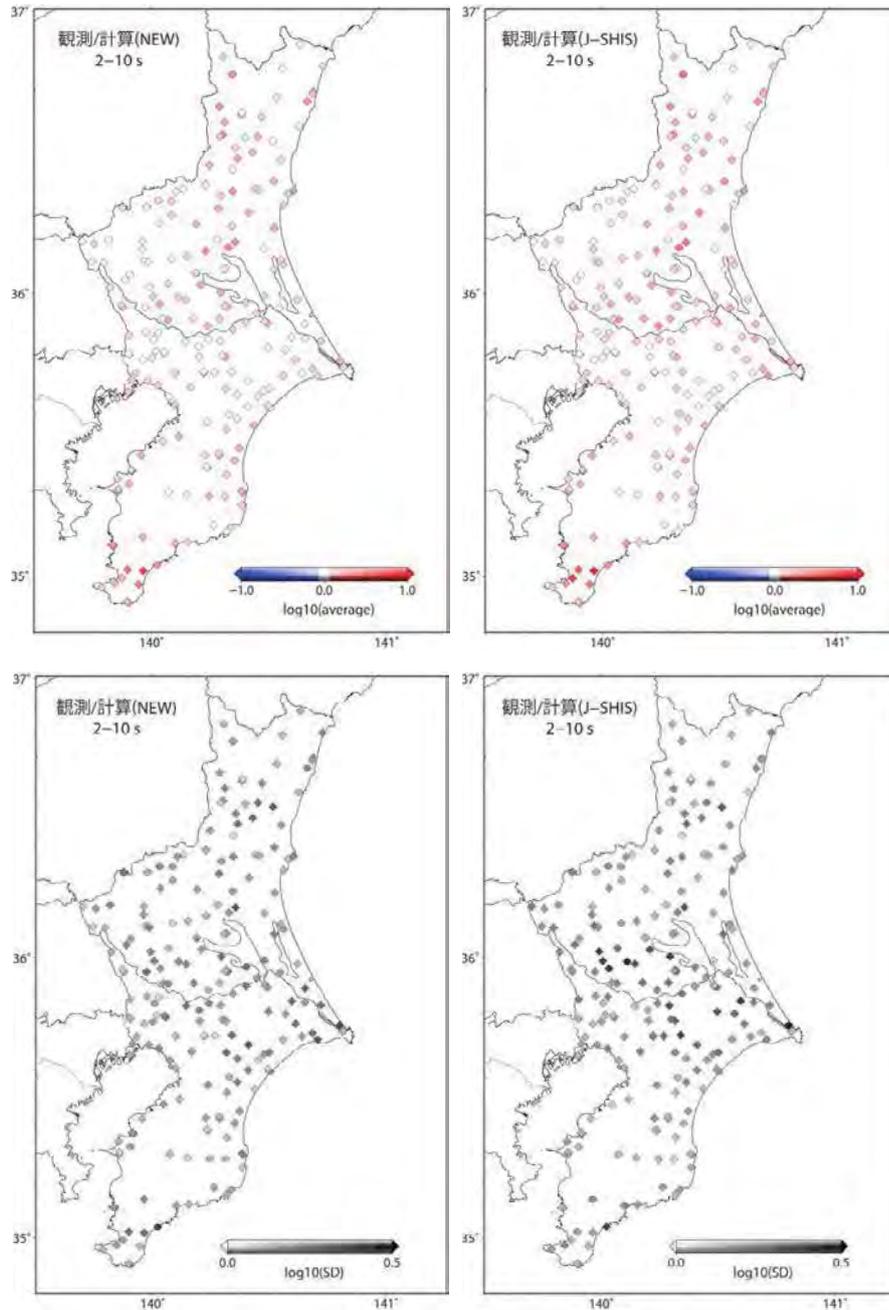


図 31 各観測点における、観測記録と計算結果の 0.1~0.5 Hz の周波数帯におけるスペクトル比(観測/計算)の平均値(上)と標準偏差(下)の分布. 左が今回作成したモデル, 右が J-SHIS モデルによる結果.

9. 千葉県・茨城県の浅部・深部統合地盤モデルの作成（浅部地盤構造モデルの拡張方法）

微動観測結果（微動アレイ観測）に基づく地盤モデルを用いた、250 m メッシュデータの水平方向の浅い地盤構造モデルの拡張方法に関する概念図を図 3 2 - 1 に示す。また、拡張方法の例として、図 3 2 - 2 に IBRA007 波崎 2 観測点の例を示した。

Step1：地層境界面の設定

例えば千葉県地域のモデルでは、表 1 4 - 2 に示した地層区分を設定し、柱状モデルについて各地質区分の上面深さを設定している。微動観測により得られた地盤モデルに対して、地層境界面を修正する。S 波速度の統合により地層境界面が無い場合は、初期モデルの層厚比を用いて設定する。

Step2：残差の計算

各地層について、以下の式に基づいて、千葉県モデルの S 波速度との比率を求める。

$$\sum_{b=1}^B \left(\frac{V_S}{V_{S_b}} \right) h_b / \sum_{b=1}^B h_b \quad (9-1)$$

Step3：残差の補間

各地層について、残差を空間方向に補間する。

Step4：S 波速度の修正

各層の S 波速度について、Step3 で求めた残差をかける。

Step5：微動モデル（微動アレイデータ存在メッシュ）の当てはめ

微動アレイデータの位置するメッシュについては、微動（アレイ）モデルで置き換えを行う。

Step6：単点微動観測位置における理論位相速度と微動の H/V によるジョイントインバージョンによる S 波速度構造の当てはめ

単点微動データ（H/V スペクトル比）を利用し、近傍の同一微地形区分の地震観測点で得られた R/L 比を参照し、2 秒よりも短周期側についてジョイントインバージョンすることで、S 波速度構造を求め、モデルの置き換えを行う。上記の作業を行うことにより、微動アレイを実施したメッシュについては、微動アレイのモデルが反映され、その他のメッシュについては、もとの千葉・茨城県初期モデルで作成した S 波速度—深度の形状が維持されたモデルになる。なお、微動モデルについて、層厚が薄い層については、S 波速度の信頼性が低いと考えられるので、上層の速度が下層より大きな S 波速度にならない様にモデルを再調整した。その際、工学的基盤以深のモデルは変更していない。

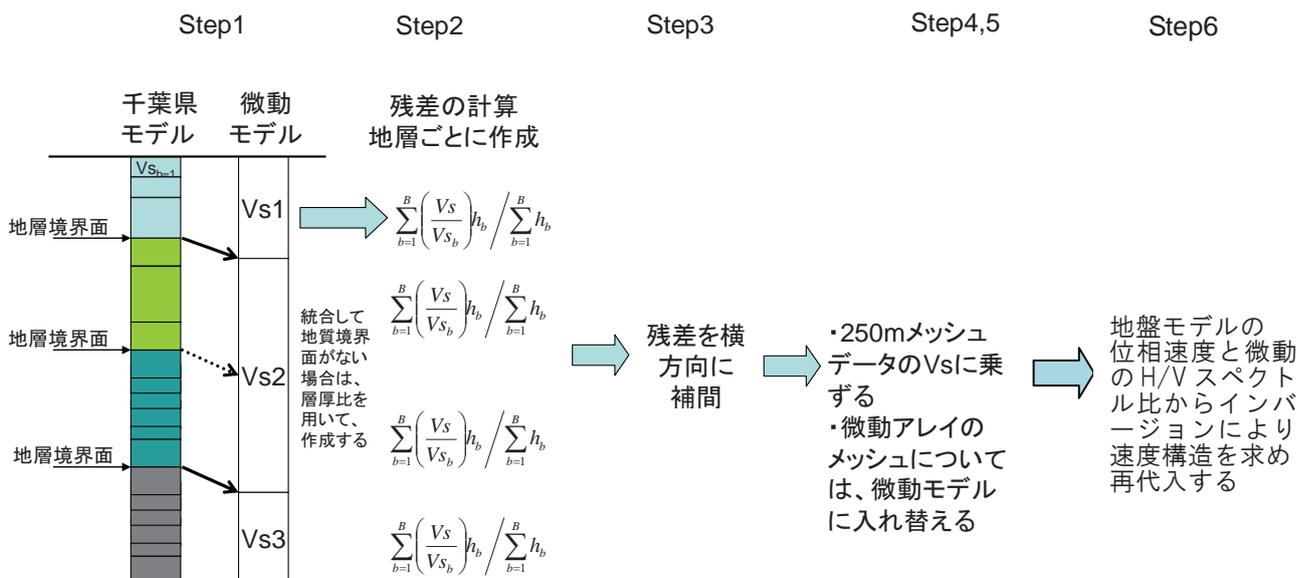


図 3 2 - 1 浅部モデルの拡張方法

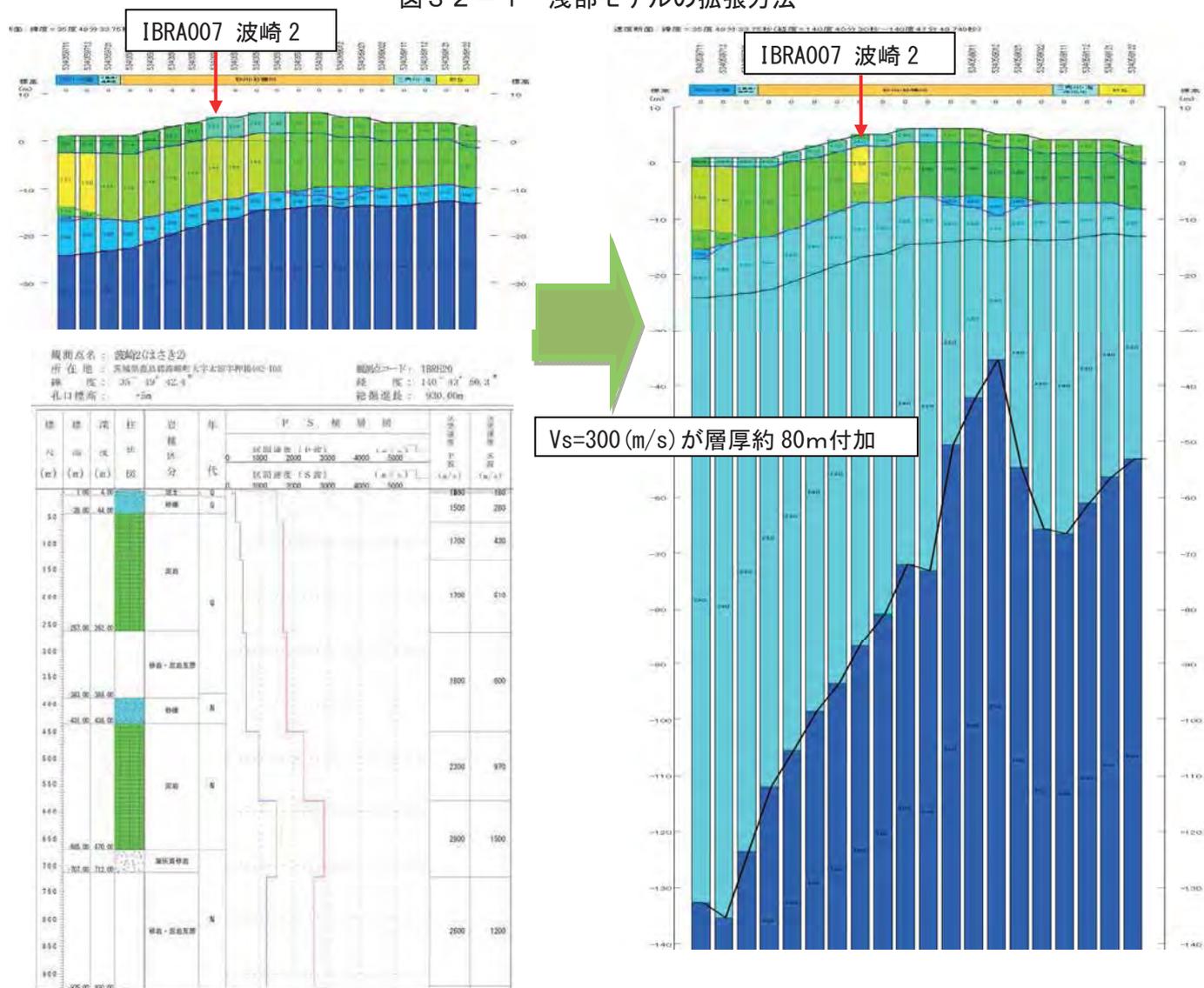


図 3 2 - 2 微動による結果を反映した浅部・深部統合地盤モデル (IBRA007 波崎 2) と KiK-net 波崎 2 の柱状図

表 1 4 - 1 STEP 1 に示す浅部地盤モデルの統合 (CHBA11 KiK-net 成田)

CHBA11 成田(初期モデル)						CHBA11 成田(編集後初期モデル)					
下端深度 (m)	層厚 (m)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	土質 記号	下端深度 (m)	層厚 (m)	P波速度 (m/s)	S波速度 (m/s)	密度 (g/cm ³)	土質 記号
1.7	1.7	607	119	1.7	B	1.7	1.7	610	120	1.7	B
3.2	1.5	906	178	1.5	Dc1	6	4.3	970	190	1.6	Dc
4.6	1.4	946	185	1.7	Dc1	10.5	4.5	1700	330	1.9	Ds
6	1.4	1045	205	1.7	Dc1	23.8	13.3	1400	280	1.8	Dc
7.5	1.5	1631	320	1.9	Ds1	104.1	80.3	1800	360	1.9	Ds
9	1.5	1729	339	1.9	Ds1	360	255.9	1800	500	1.9	-
10.5	1.5	1703	334	1.9	Ds1	908.6	548.6	2100	700	2	-
12.4	1.9	1294	254	1.8	Dc2	1355.9	447.3	2400	1000	2.1	-
14.3	1.9	1337	262	1.8	Dc2	1462.5	106.6	3000	1500	2.2	-
16.2	1.9	1370	269	1.8	Dc2	-	-	5600	3000	2.5	-
18.1	1.9	1404	275	1.8	Dc2						
20	1.9	1436	282	1.8	Dc2						
21.9	1.9	1468	288	1.8	Dc2						
23.8	1.9	1539	302	1.8	Dc2						
25.6	1.8	1869	367	1.9	Ds2						
104.1	78.5	1801	353	1.9	Ds2						
360	255.9	1800	500	1.9	-						
908.5	548.5	2100	700	2	-						
1355.8	447.3	2400	1000	2.1	-						
1462.4	106.6	3000	1500	2.2	-						
-	-	5600	3000	2.5	-						

表 1 4 - 2 (例) 千葉県の浅部地盤構造モデルの地層区分と平均 Vs 速度

地層区分	層位	モデル番号	地質・堆積相区分	区分名	層相	平均Vs速度(m/s)
沖積層	上部	100	表土・盛土	B		210
		300,600	崖錐堆積物	As	砂質土主体	261
		500,800	陸化した後の堆積物	Ac,Ap	粘性土、泥炭などの細粒層	155
		1000	河川性の堆積物	As,Ag	砂・砂礫主体、一部粘性土	196
		1200	砂丘・浜堤の堆積物	As	砂質土	214
	中部	1500	粘土・海成粘土	Ac,As	シルト・粘土主体、薄い砂層を挟む N値はごく小さい(2~3未満が多)	220
		2000				243
		3000	粘性土中の砂層の挟み	As	砂主体、一部砂礫	290
		4000	海成粘土(下部)	Ac,As	シルト・粘土主体、薄い砂層を挟む	219
	下部	5000	河川性堆積物 ※砂洲堆積物を挟む場	As,Ag	砂主体、一部砂礫、あまり厚くない	309
5500		同上	Ac	粘性土主体、あまり厚くない	210	
7000		基底礫層	Ag,As	砂礫・砂主体、N値50程度以上	355	
洪積層	10000	ローム層		DI	粘性土主体	255
	11000					
	20000		Ds,Dg	砂質土・礫質土	371	
	30000	主に海成粘土層	Dc,Ds	粘性土主体、一部砂質土	305	
	40000		Ds,Dg	砂質土・礫質土	380	
	50000		Ds	砂質土	361	
	60000		Ds	砂質土、N値>>50	413	
70000		Dc,Ds	粘性土	337		
洪積層以前	90000	岩盤		RW	風化部、N値<50	400
	100000			R	健全部、N値>>50	500

10. 常時微動のH/Vスペクトル比と浅部・深部統合地盤モデルの位相速度を用いた、ジョイントインバージョンについて

補間した地盤構造モデルと千葉県・茨城県の単点の微動観測結果全点を使い、2秒よりも短周期（工学的基盤よりも浅い地盤構造）についてインバージョン処理を行った。単点微動を利用したインバージョンの流れを図33に、インバージョンの計算方法（条件）については式(10-1)に示す。また、単点による常時微動観測点のうち、千葉県については72箇所・茨城県については90箇所分の観測点分布図を図34に示す。

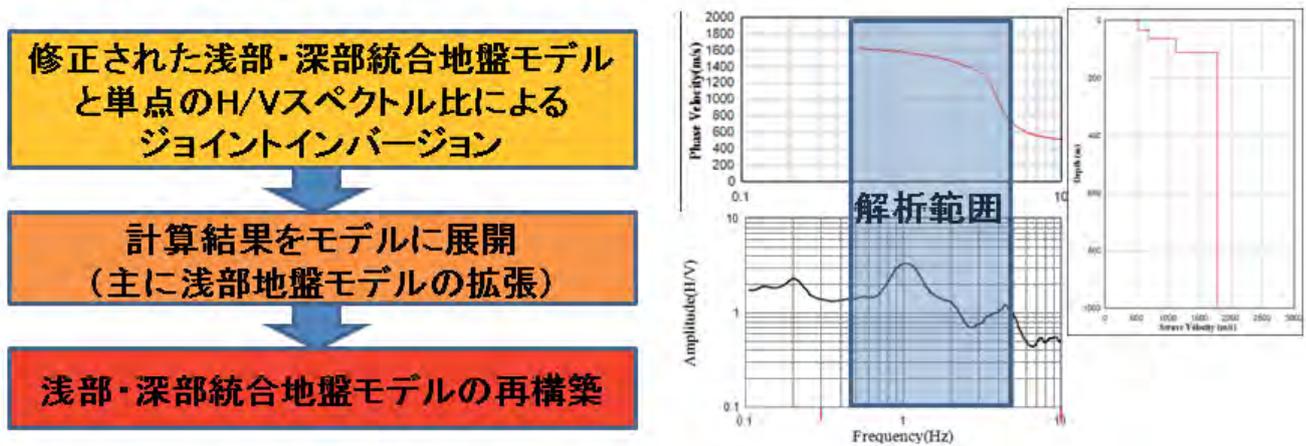


図33 微動のH/Vスペクトル比と地盤モデルの位相速度を用いたジョイントインバージョン

<インバージョン計算式（残差）>

$$F = \frac{w_R}{I_R} \sum_{i=1}^I \left(\frac{c_{mi}^R - c_{Si}^R}{c_{mi}^R} \right)^2 + \frac{w_{HV}}{I_{HV}} \sum_{i=1}^{I_{HV}} \left(\frac{(H/V)_{mi} - (H/V)_{Si}}{(H/V)_{mi}} \right)^2 \quad (10-1)$$

※インバージョン対象周期範囲は、0.2～2.0（sec）

ここで、 c^R 、 (H/V) は、モデル化された浅部・深部地盤モデルのレイリー波理論位相速度、H/Vスペクトル比（R/L比=0.72：4次モード合成）であり、 I_R 、 I_{HV} は、それぞれのデータ個数である。添字 m 、 S は、それぞれ観測値、理論値を表す。 w は重みであり、ここでは、 $w_R=1.0$ 、 $w_{HV}=1.0$ としている。残差の開平値 F を最小にするような計算を実施した。計算結果については、図35-1～図35-6に千葉県72地点・茨城県90観測点分を示した。また、図36にそれらの周期毎の分散を示した。その結果、今回検討したモデルが微動観測結果（H/Vスペクトル比）と最も良く合う結果となった。

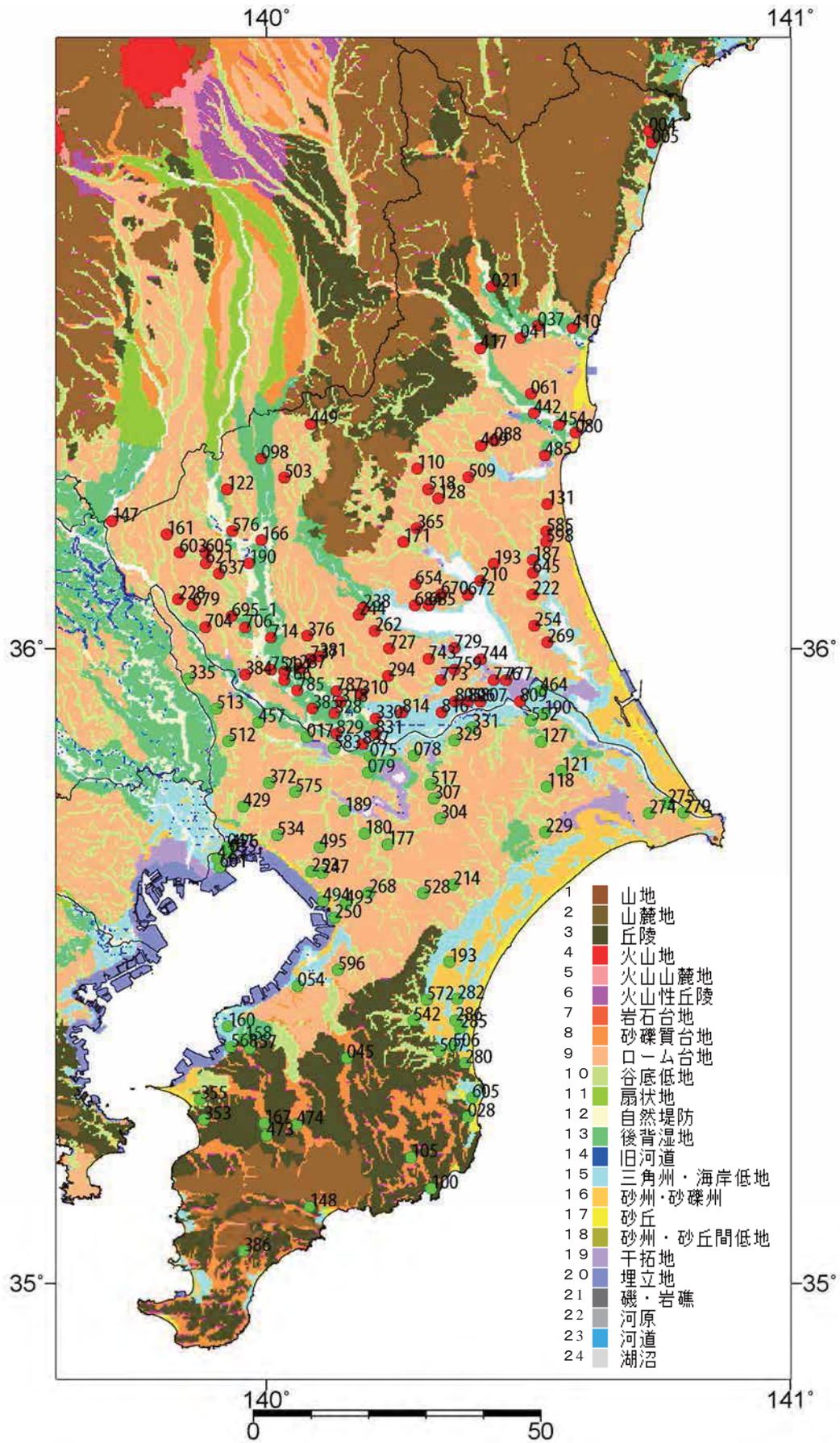


図3-4 インバージョン結果比較地点 (●千葉県72箇所・●茨城県90箇所)

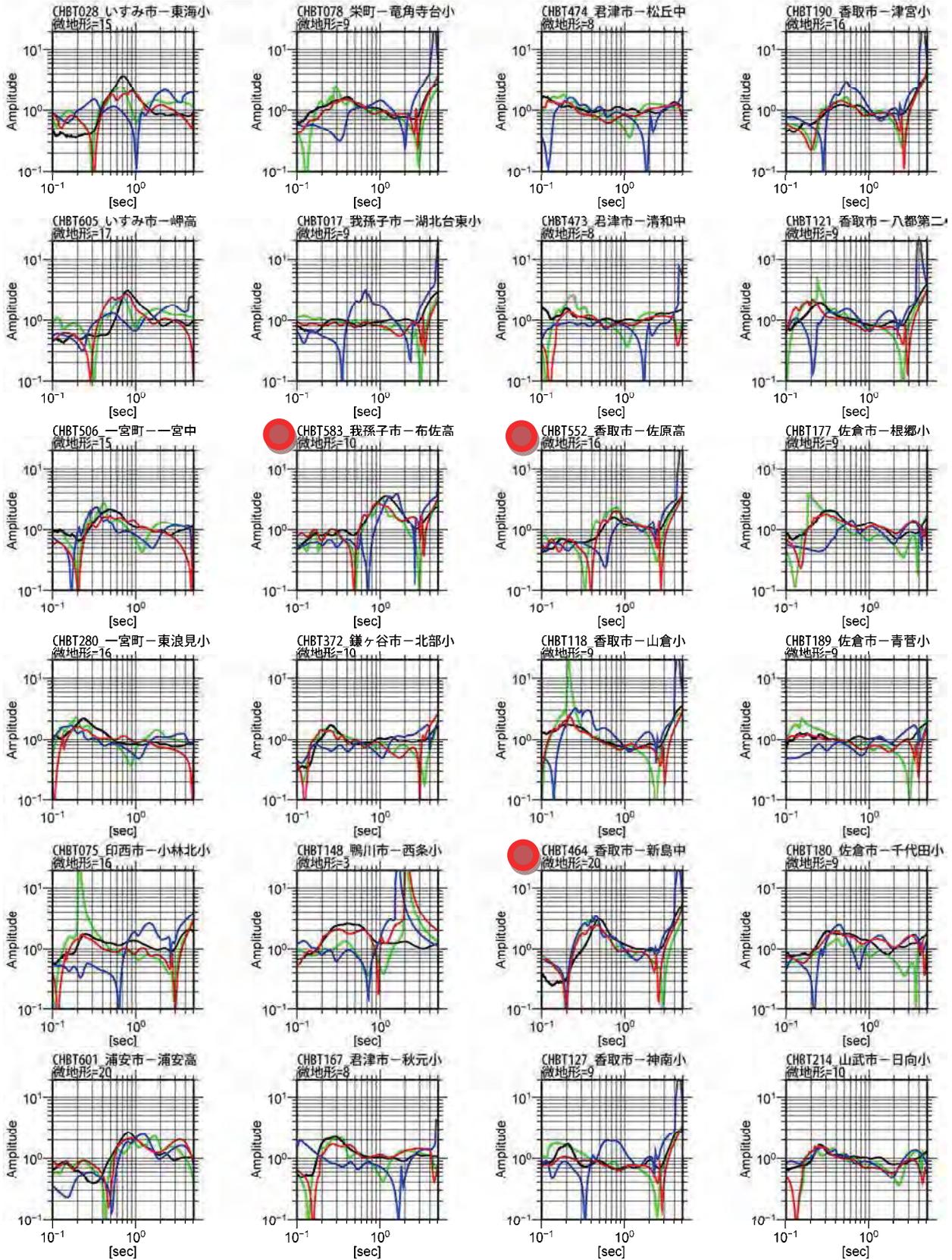


図 3 5 - 1 理論 H/V スペクトル比 (4 次モード合成 R/L=0.72) と微動の H/V スペクトル比の比較 (黒 : 微動 H/V, 青 : 大大特, 緑 : 修正千葉県モデル (初期), 赤 : 本研究) ●は大大特の柱状図メッシュ位置

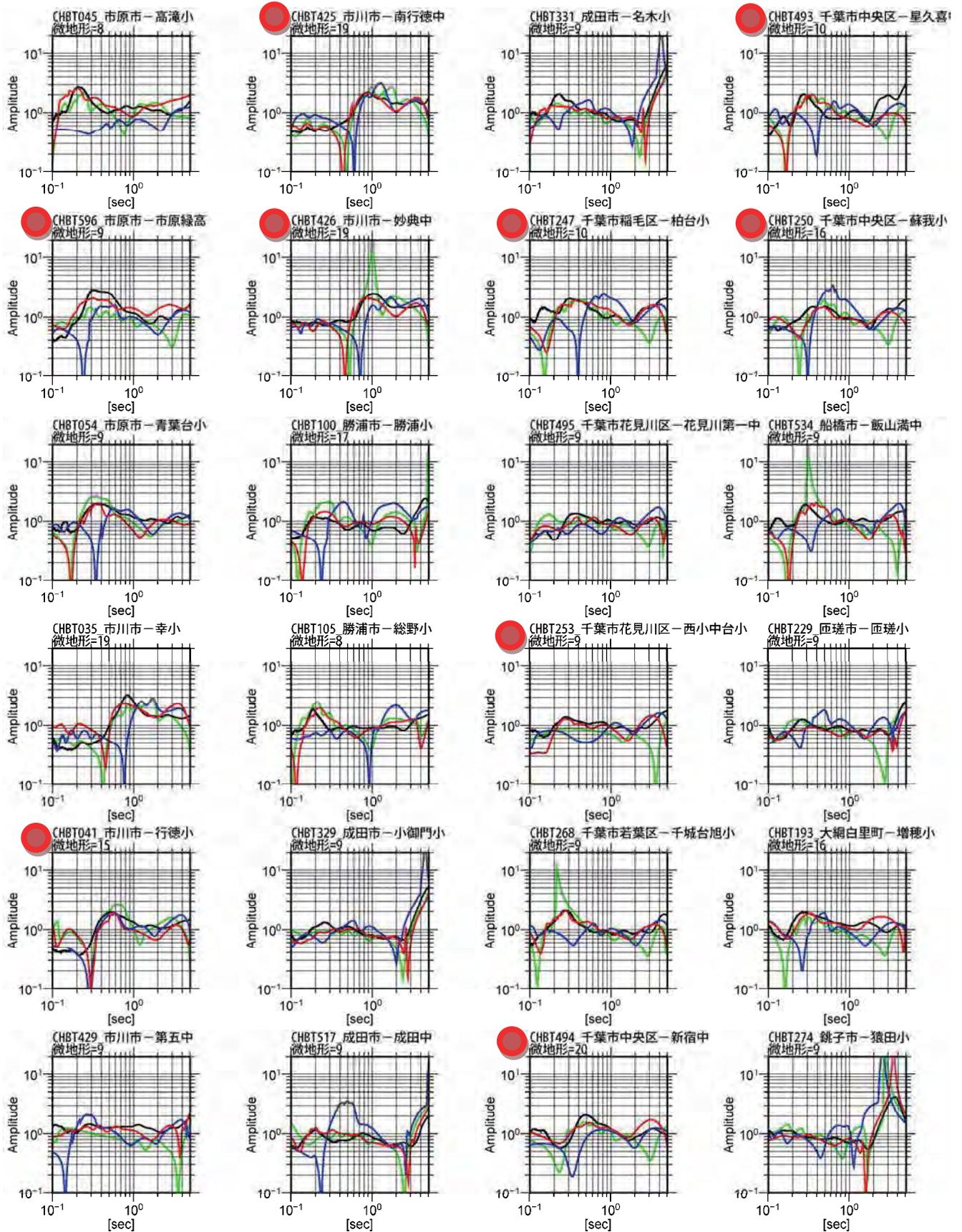


図 3 5 - 2 理論 H/V スペクトル比 (4 次モード合成 R/L=0.72) と微動の H/V スペクトル比の比較 (黒 : 微動 H/V, 青 : 大大特, 緑 : 修正千葉県モデル (初期), 赤 : 本研究) ●は大大特の柱状図メッシュ位置

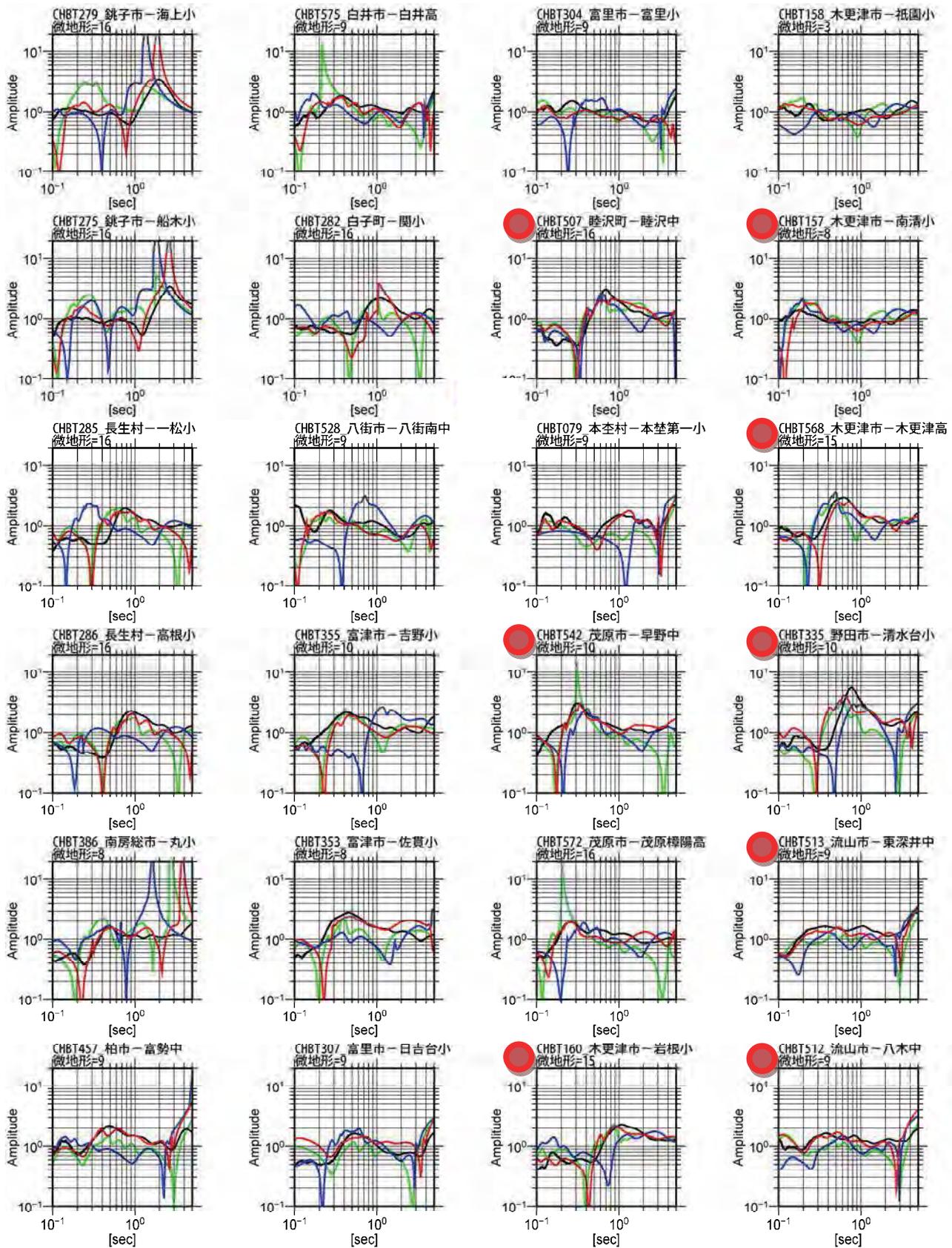


図35-3 理論H/Vスペクトル比(4次モード合成R/L=0.72)と微動のH/Vスペクトル比の比較(黒:微動H/V, 青:大大特, 緑:修正千葉県モデル(初期), 赤:本研究) ●は大大特の柱状図メッシュ位置

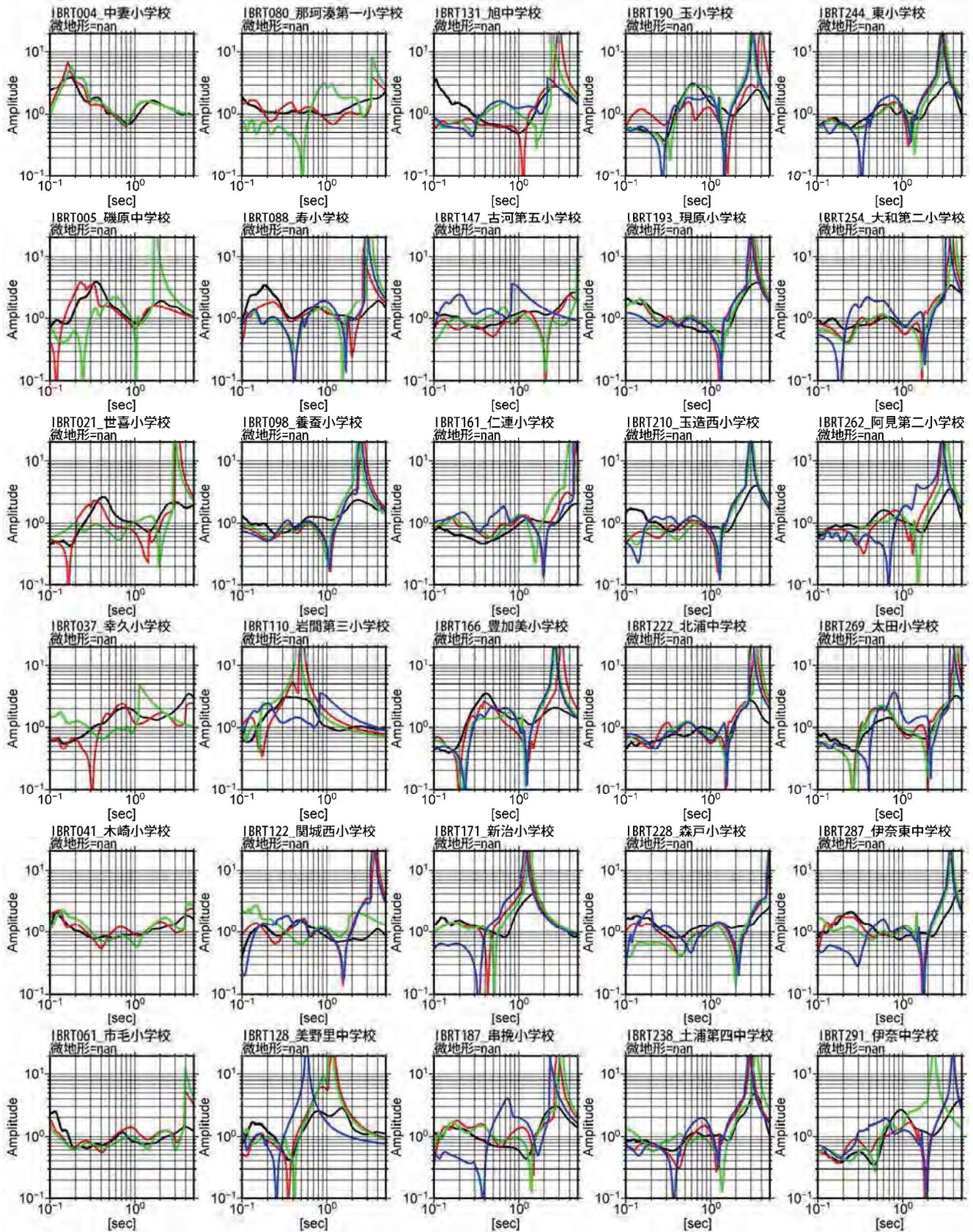


図3-5-4 理論H/Vスペクトル比(4次モード合成R/L=0.72)と微動のH/Vスペクトル比の比較(黒: 微動H/V, 緑: 初期茨城地盤モデル, 赤: 本研究, 青: 大大特モデル) 柱状図メッシュ位置

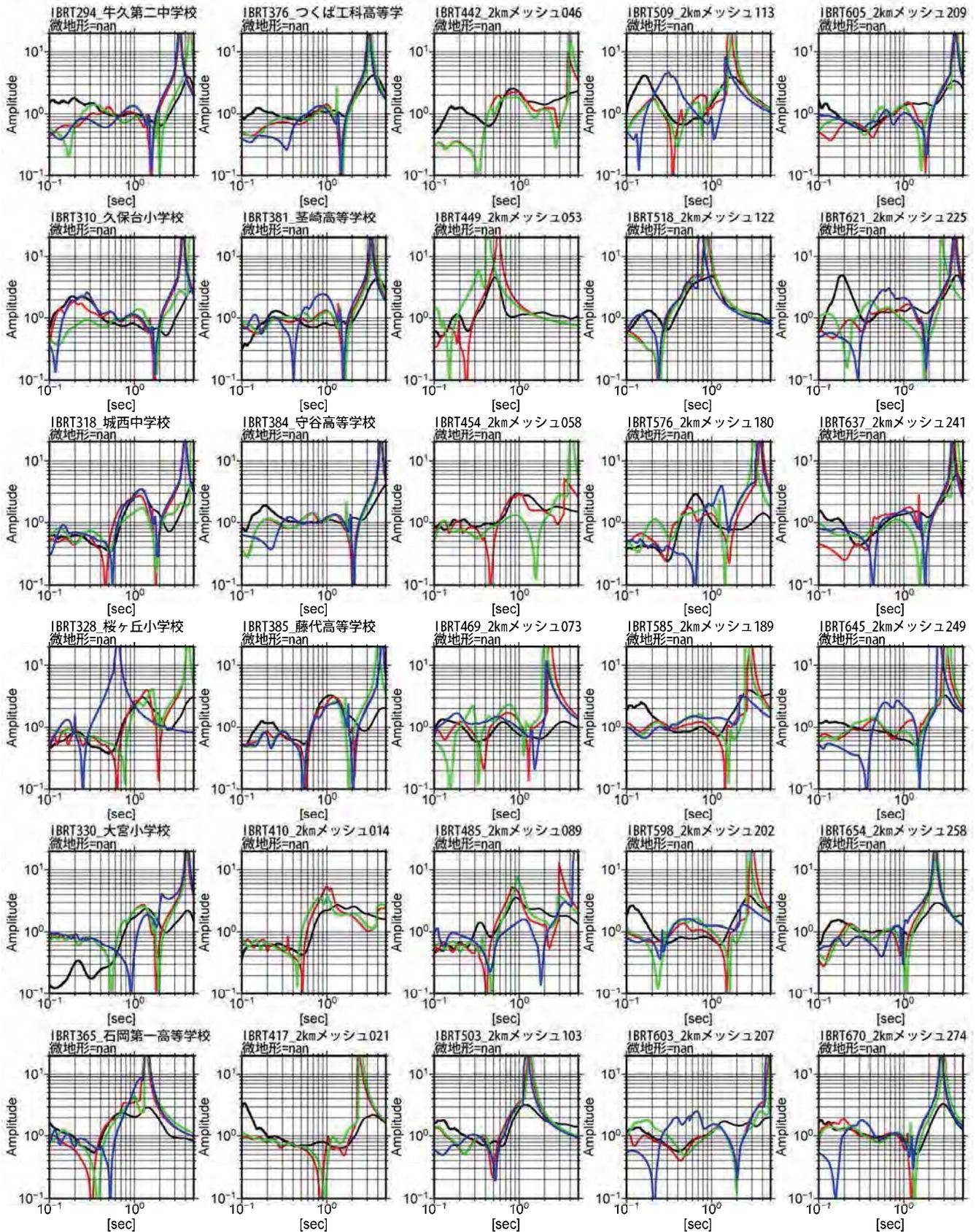


図 3 5 - 5 理論 H/V スペクトル比 (4 次モード合成 R/L=0.72) と微動の H/V スペクトル比の比較 (黒 : 微動 H/V, 緑 : 修正千葉県モデル (初期), 赤 : 本研究) 柱状図メッシュ位置

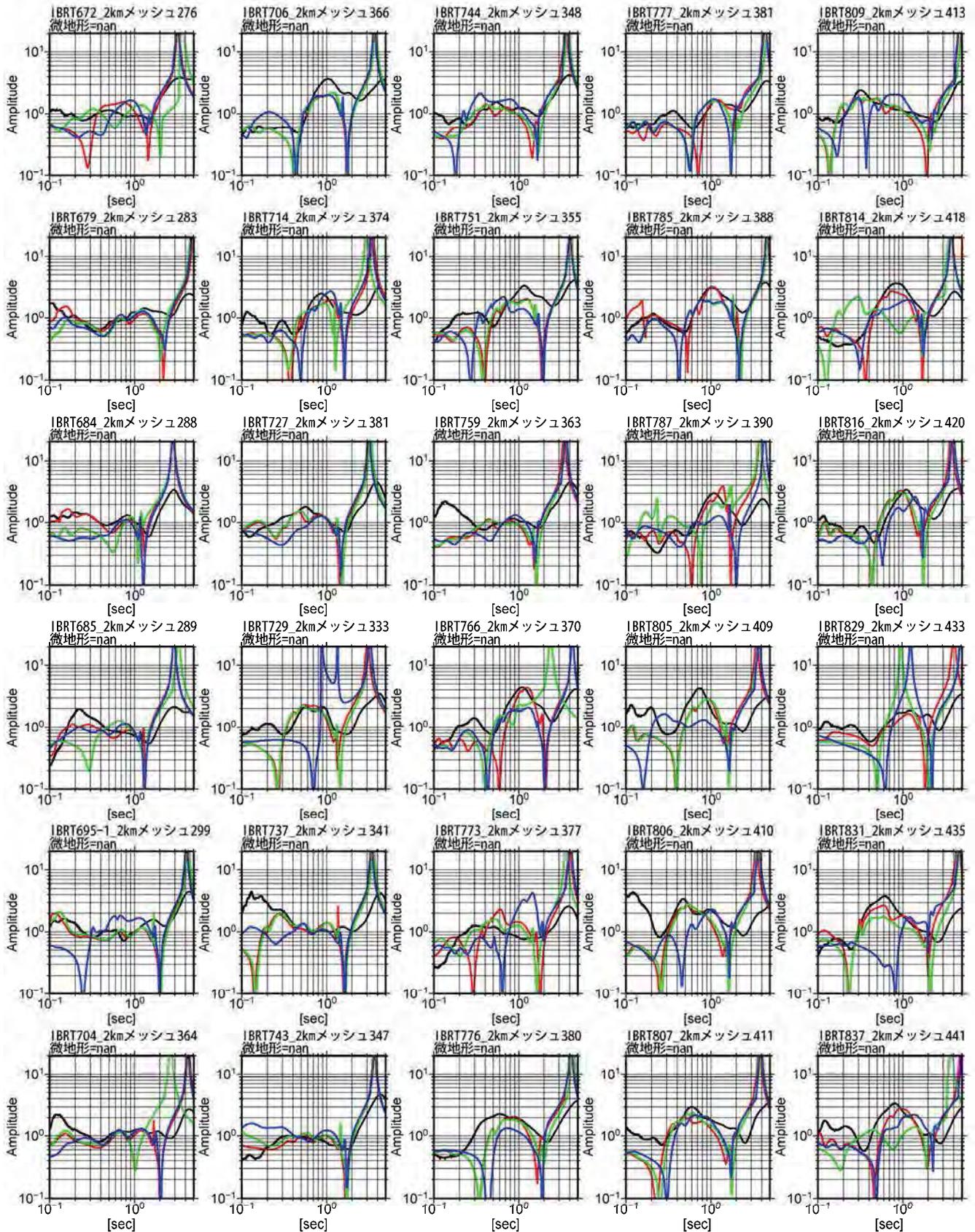


図 35-6 理論 H/V スペクトル比（4次モード合成 R/L=0.72）と微動の H/V スペクトル比の比較（黒：微動 H/V，緑：初期茨城地盤モデル，赤：本研究，青：大大特モデル）柱状図メッシュ位置

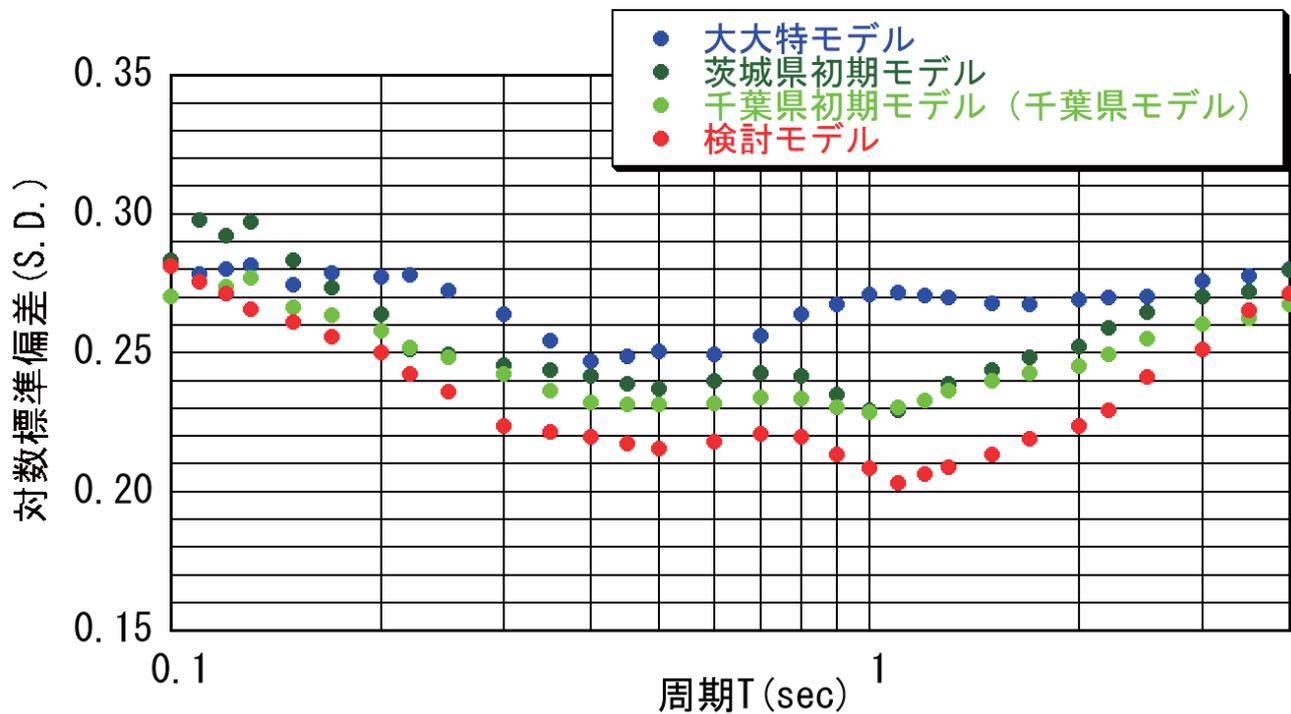


図 3 6 千葉県・茨城県の初期浅部・深部統合地盤モデル（地質モデル）とチューニングされた修正モデルに対して微動観測点および柱状図のあるメッシュ位置 (250m) における分散特性比較 (千葉県・茨城県合計 183 箇所分)

初期地盤モデルと今回検討している千葉県・茨城県の浅部・深部統合地盤モデルの比較を行った。以下の図37～38に、深部・浅部地盤モデルから計算したAVS30等の図をそれぞれ示す。

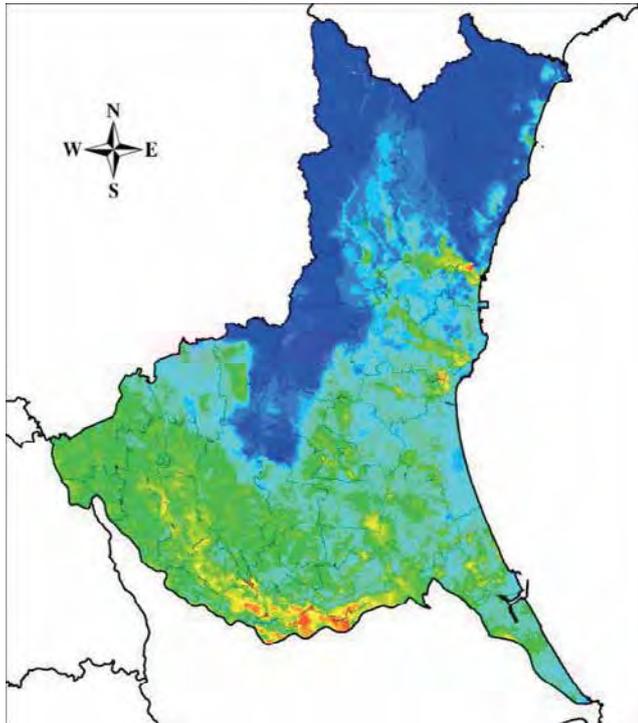


図37-1 茨城県のAVS30の分布図
(修正前モデル)

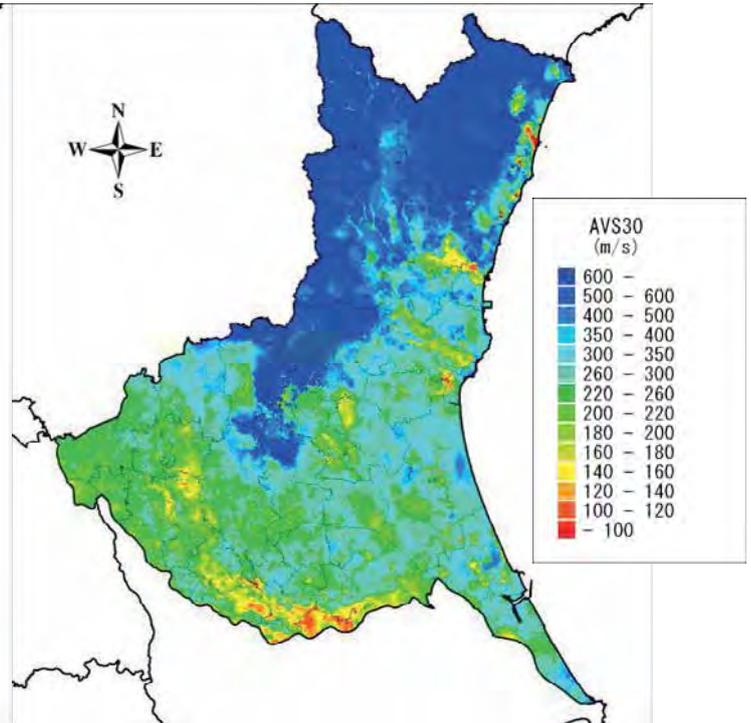


図37-2 茨城県のAVS30の分布図
(検討結果モデル)

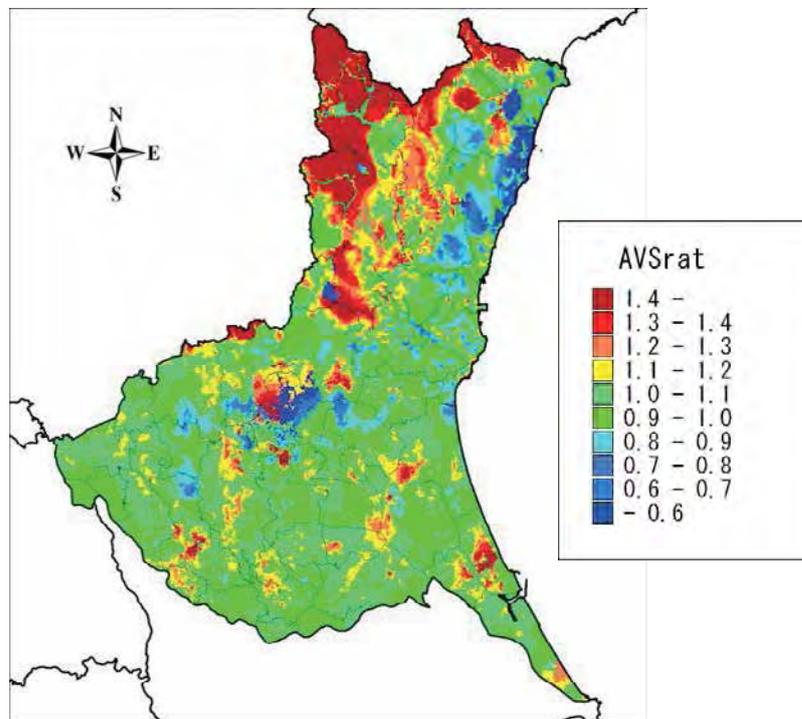


図37-3 茨城県の各モデルのAVS30の比の分布図

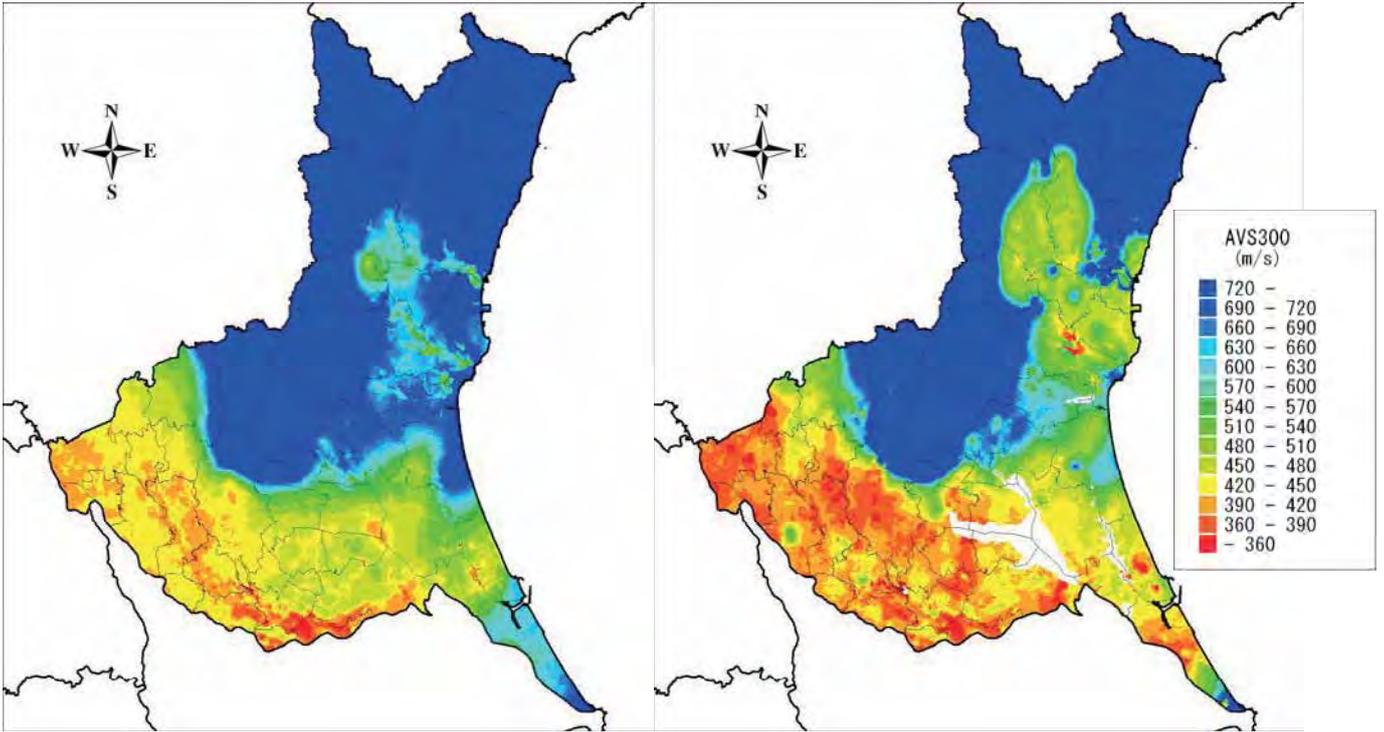


図 3 8 - 1 茨城県の AVS300 の分布図
(修正前モデル)

図 3 8 - 2 茨城県の AVS300 の分布図
(検討結果モデル)

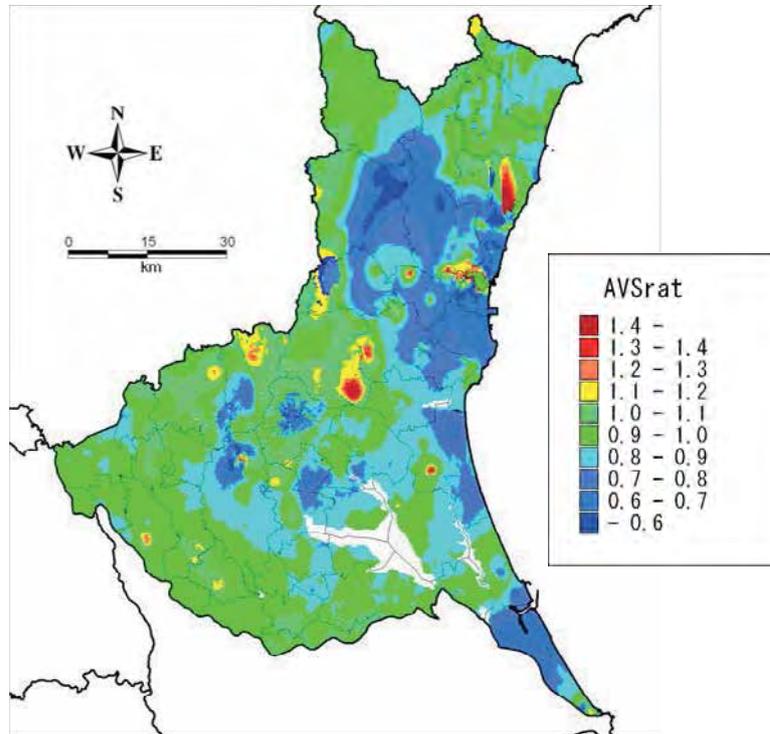


図 3 8 - 3 茨城県の各モデルの AVS300 の比の分布図
(検討結果モデル) / (修正前モデル)

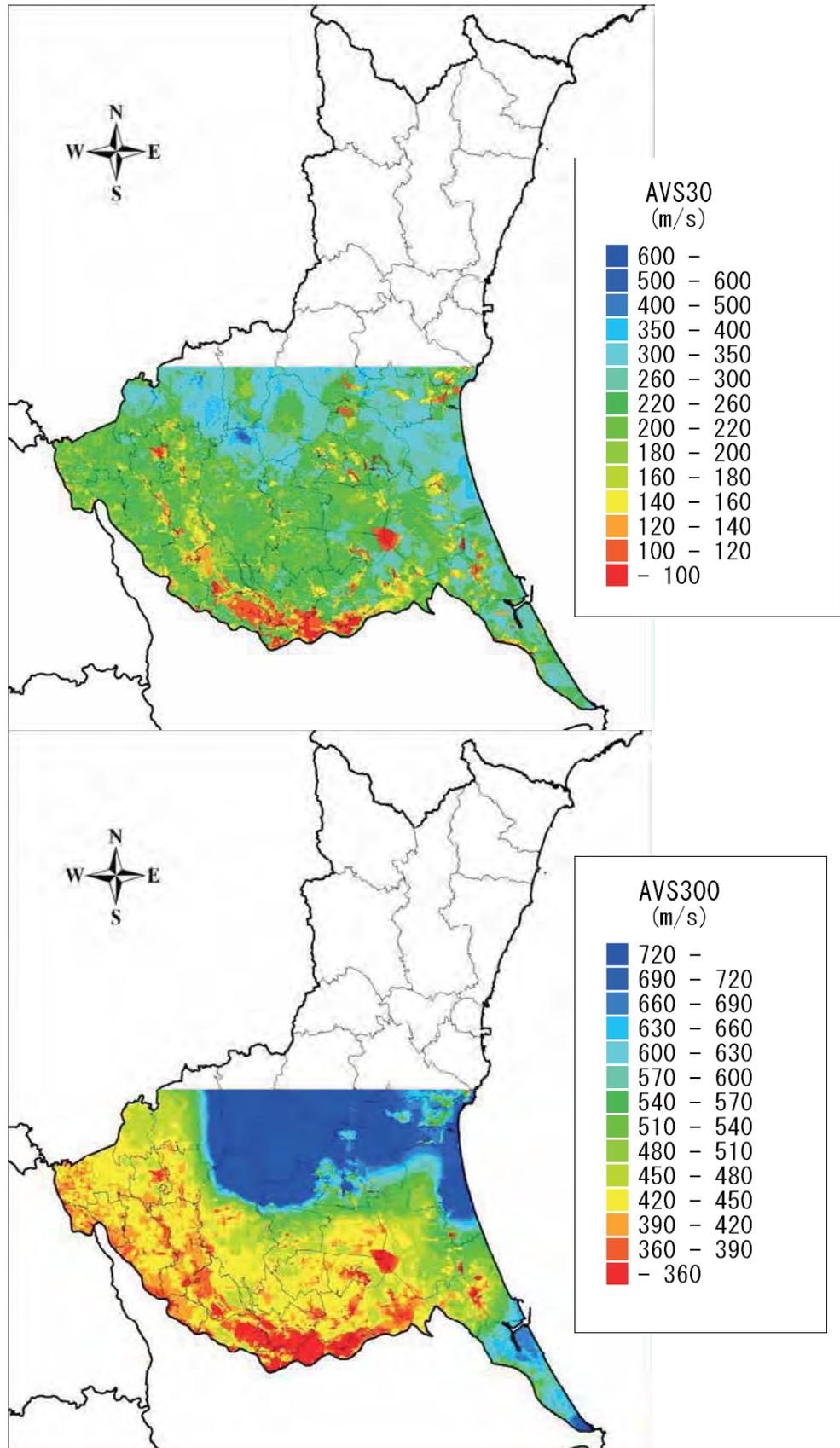


図39 大大特モデルのAVS30（上図）とAVS300（下図）の分布
（茨城県）

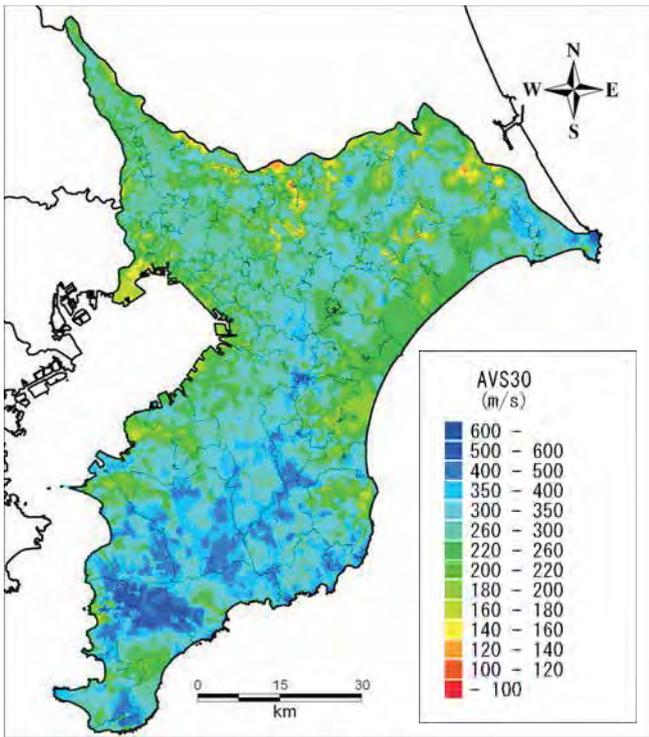


図 4 0 - 1 千葉県 AVS30 の分布図
(修正前モデル)

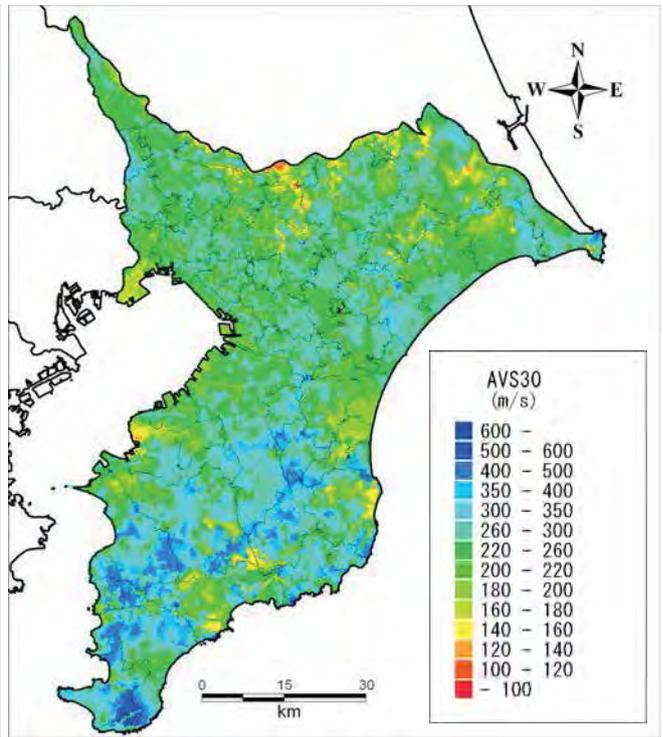


図 4 0 - 2 千葉県 AVS30 の分布図
(検討結果モデル)

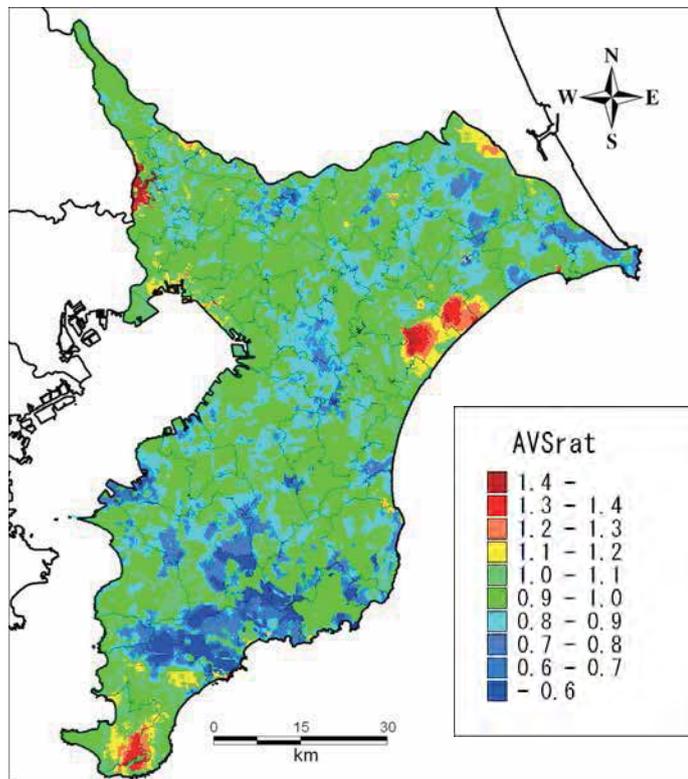


図 4 0 - 3 千葉県各モデルの AVS30 の比の分布図
(検討結果モデル) / (修正前モデル)

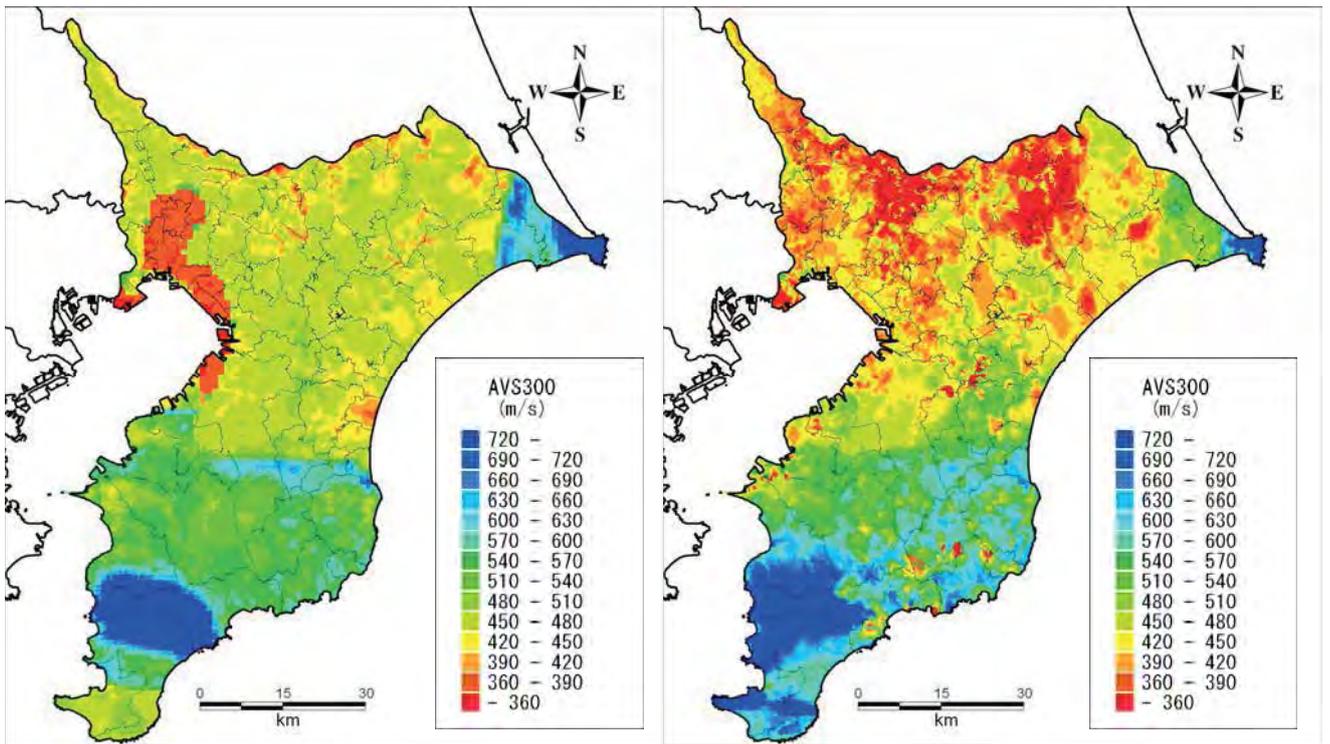


図 4 1 - 1 千葉県の AVS300 の分布図
(修正前モデル)

図 4 1 - 2 千葉県の AVS300 の分布図
(検討結果モデル)

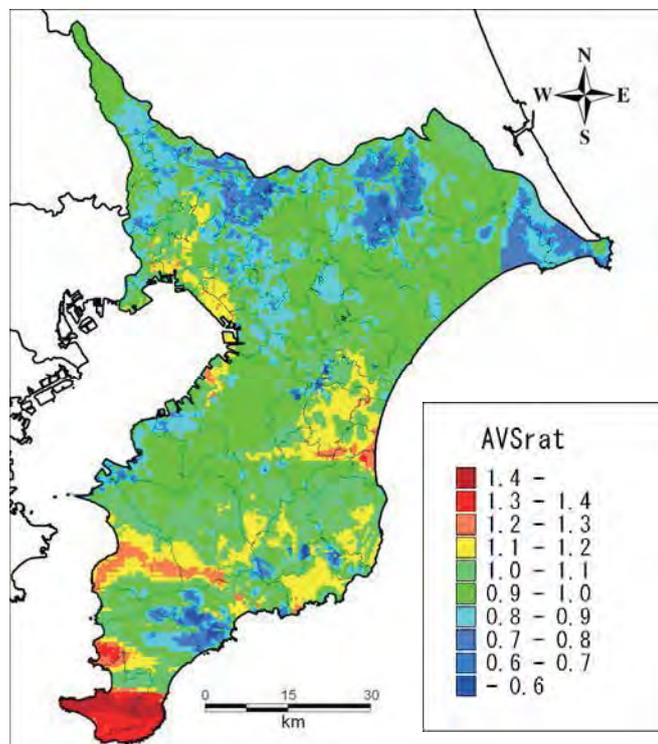


図 4 1 - 3 千葉県の各モデルの AVS300 の比の分布図
(検討結果モデル・全域の速度及び層厚を修正) / (修正前モデル)

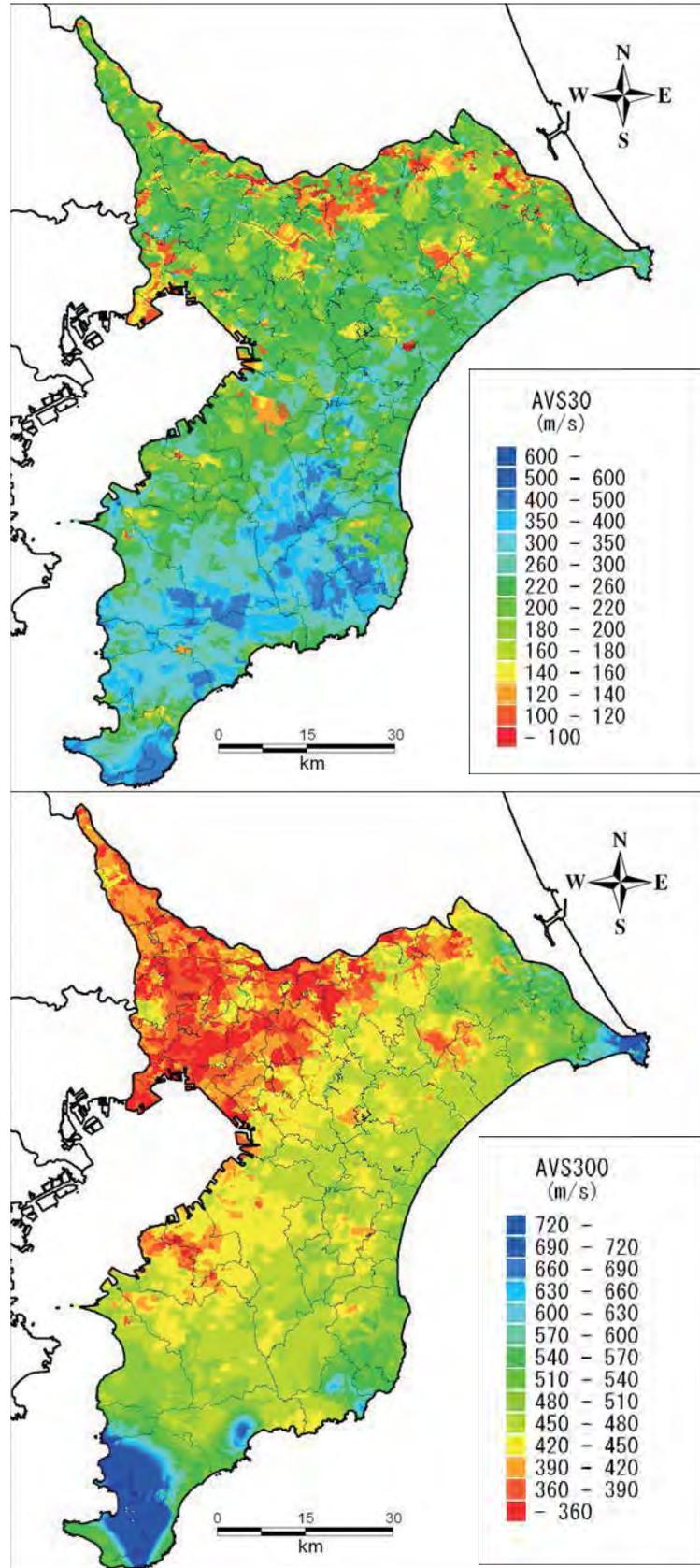


図 4 2 大大特モデルの AVS30 (上図) と AVS300 (下図) の分布 (千葉県)

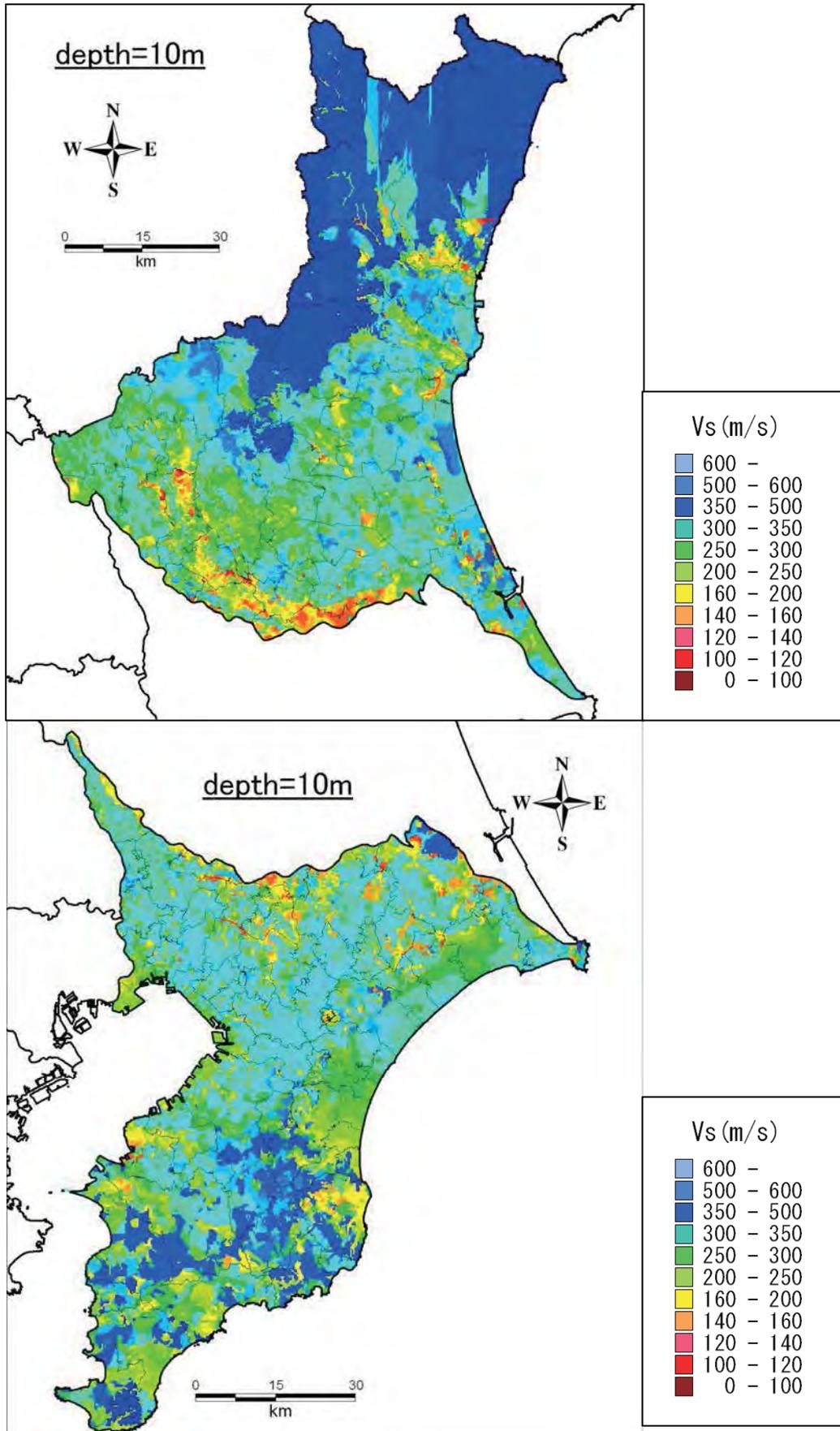


図4 3 - 1 作成された地盤モデルの深さ別 V_s 速度 (GL-10m)

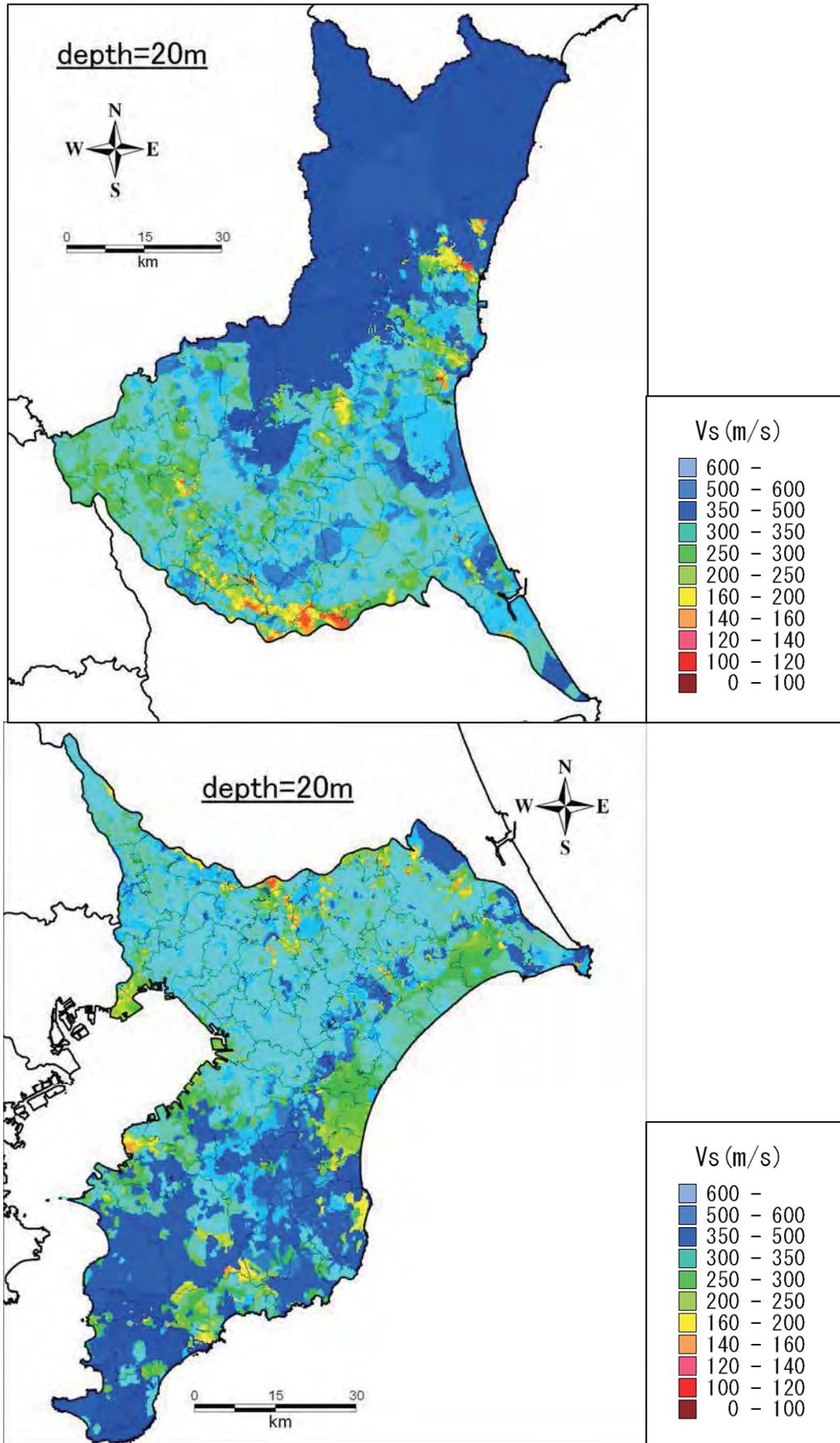


図 4 3 - 2 作成された地盤モデルの深さ別 V_s 速度 (GL-20m)

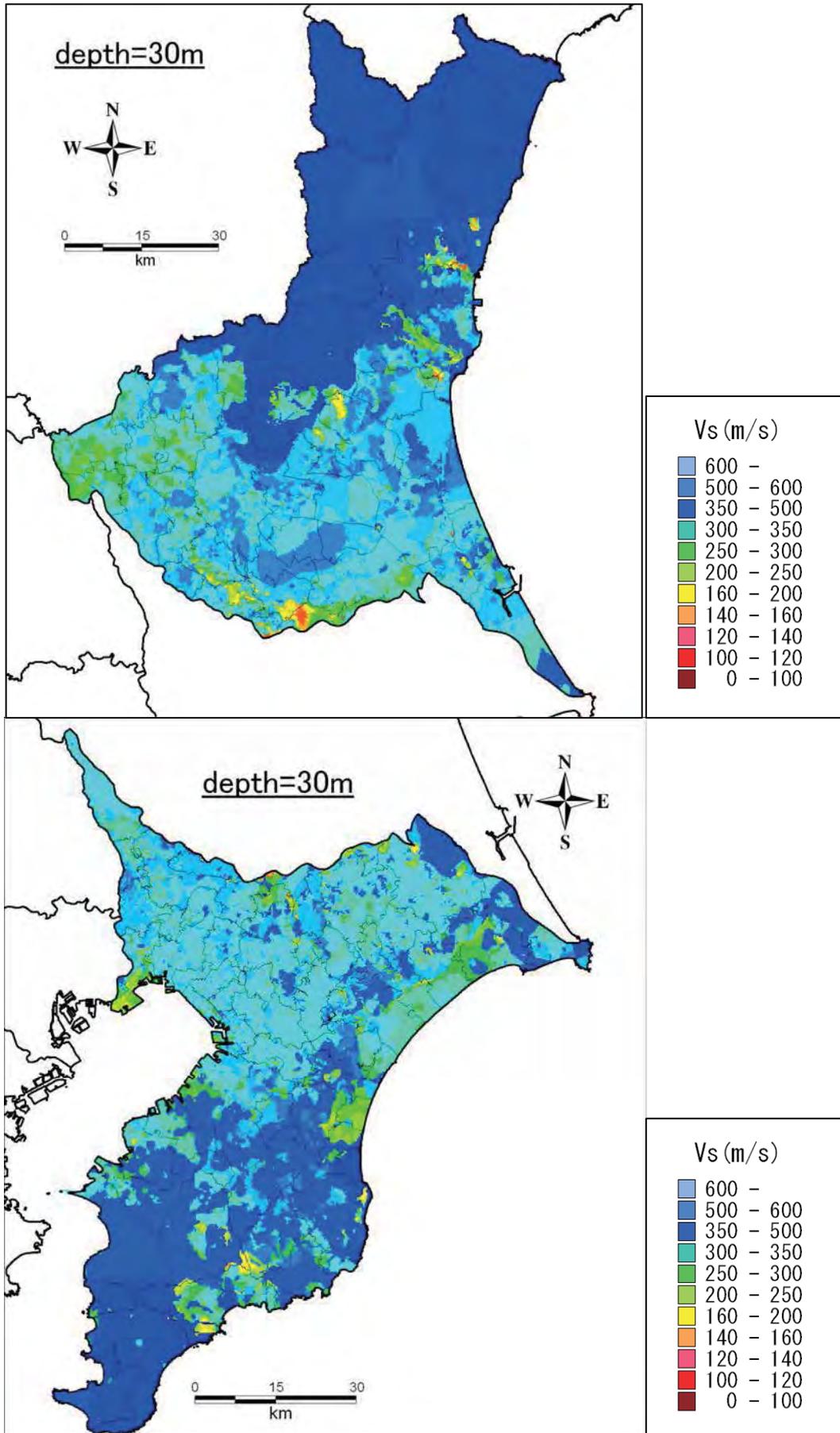


図 4 3 - 3 作成された地盤モデルの深さ別 V_s 速度 (GL-30m)

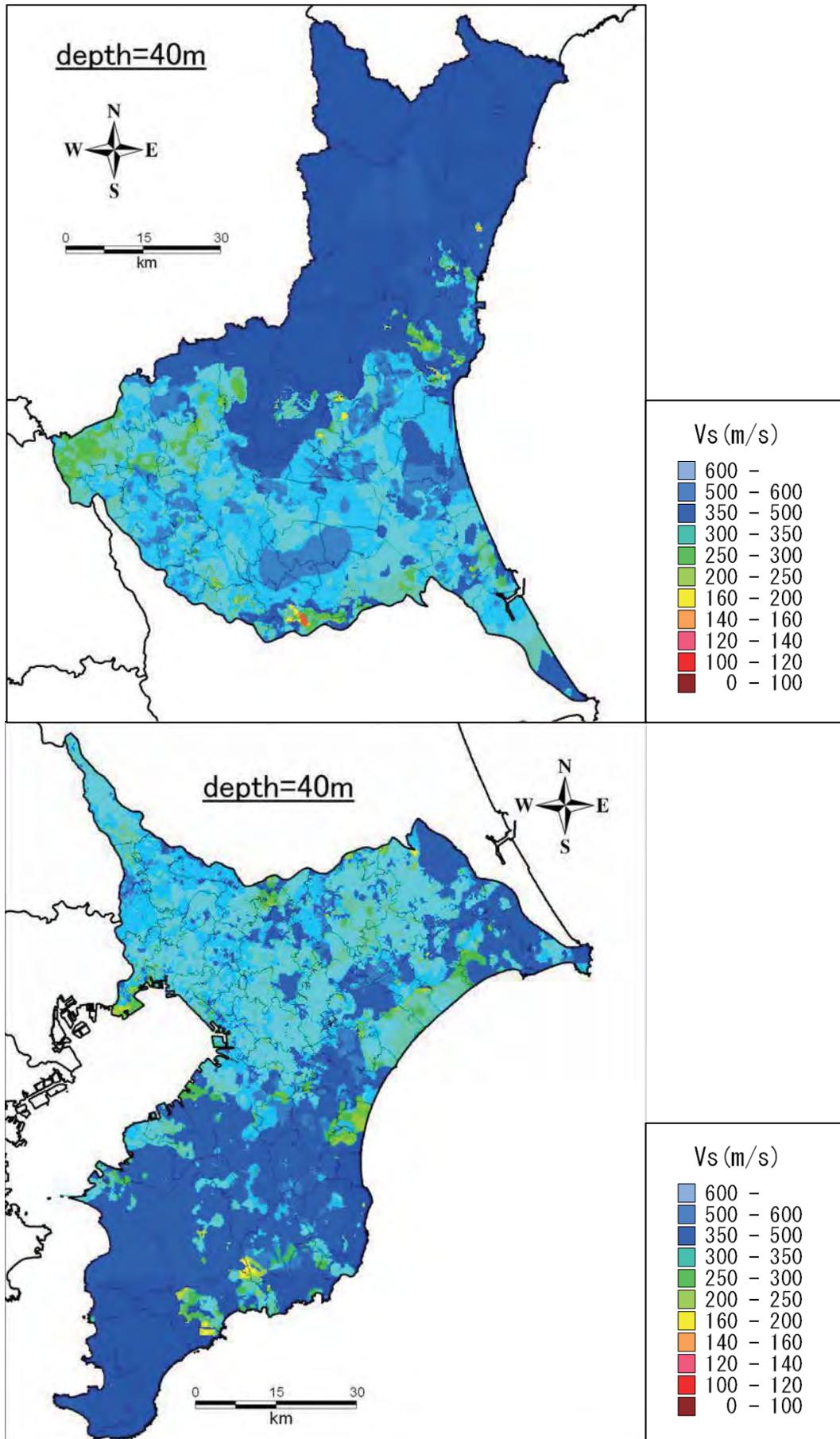


図 4 3 - 4 作成された地盤モデルの深さ別 Vs 速度 (GL-40m)

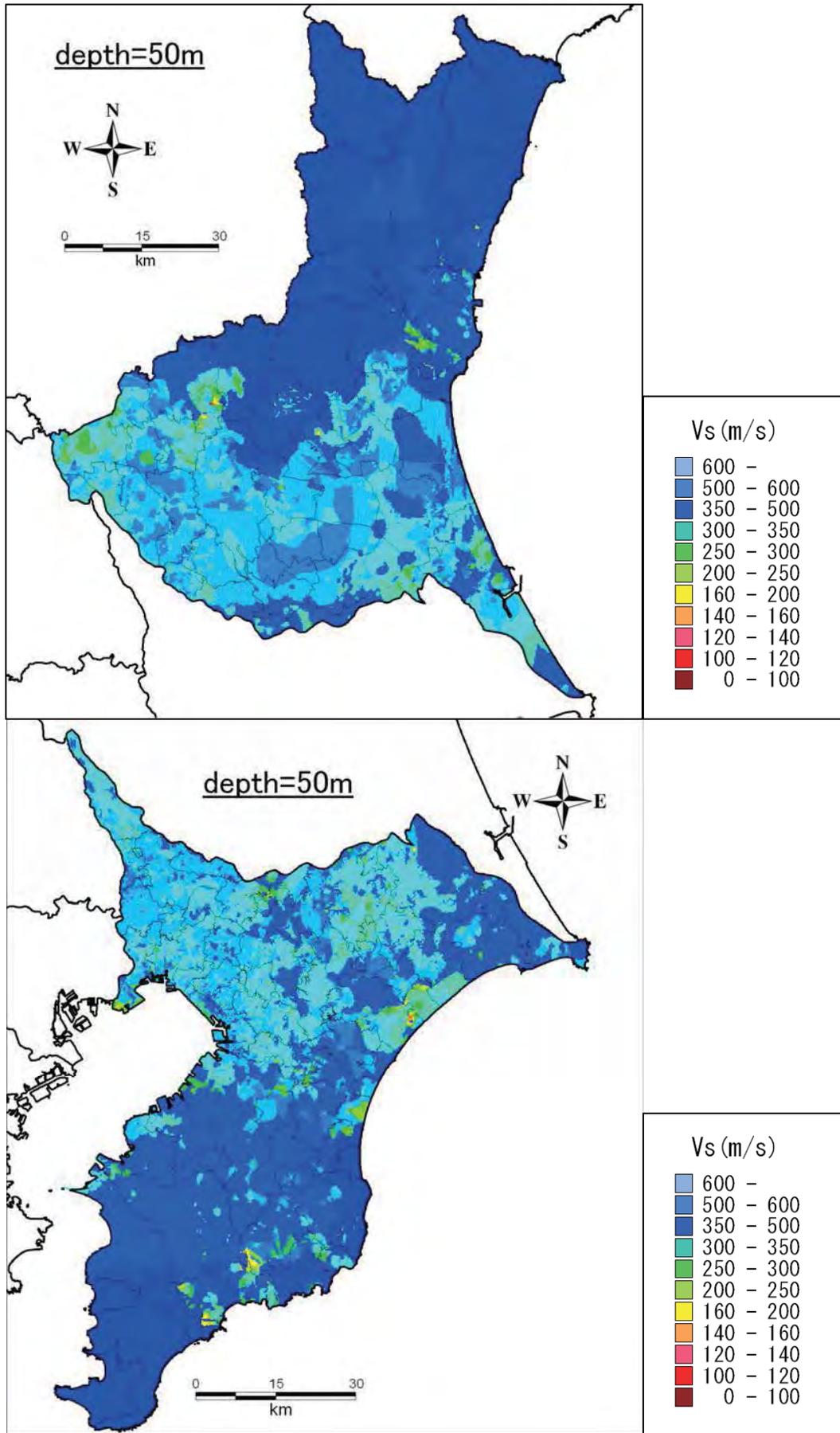


図 4 3 - 5 作成された地盤モデルの深さ別 Vs 速度 (GL-50m)

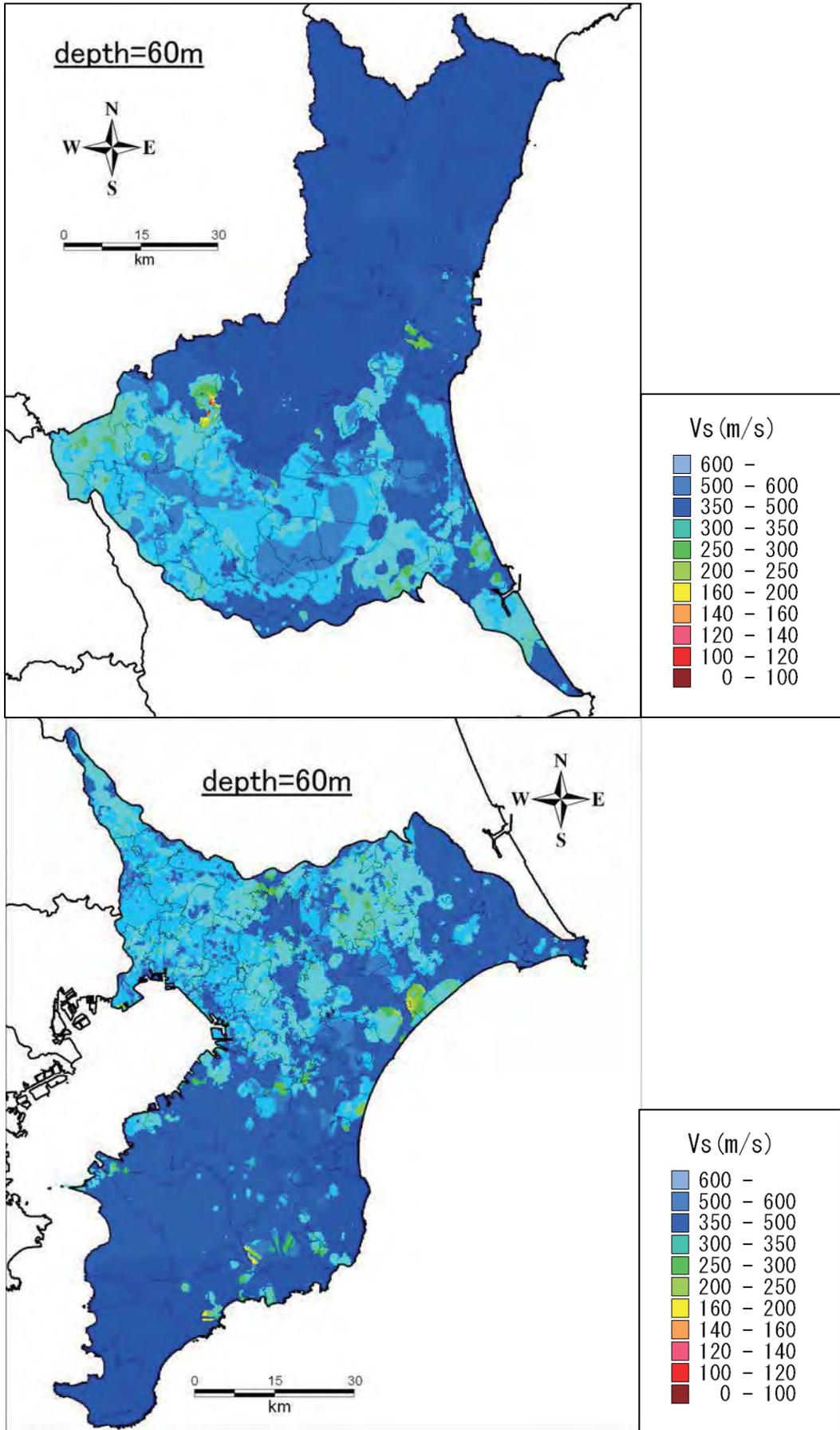


図 4 3 - 6 作成された地盤モデルの深さ別 Vs 速度 (GL-60m)

11. まとめ

本検討では、初期地質モデルを作成し、微動アレイ探査、常時微動測定結果を用いて、浅部・深部統合地盤モデルを作成した。さらに、作成した浅部・深部統合地盤モデルを用いて、地盤の周期・増幅特性についての検証を行った。深部地盤モデルを作成した結果、特に $V_s900\text{m/s}$ 層以浅の上面深度が J-SHIS モデルと比べて深く推定された。 $V_s1500\text{m/s}$ 層の上面深度については、茨城県北域では J-SHIS モデルと比べて深く推定された。全体的な傾向としては、各層の上面深度は、筑波山近傍で浅く、周辺部へ離れるにつれて深くなり、千葉県中部付近で最も深くなっている。一方浅部地盤モデルの方は AVS30 の結果からも分かるように、大大特の結果からみても、全体的に S 波速度が速くなる結果となった。全体的には、既往の南関東域で作成された浅部・深部統合地盤モデルである大大特モデル(2006)や J-SHIS 深部地下構造モデルと比較すると、広帯域全体の周期特性が改善されており、特に 1 秒付近において大幅に改善されたといえる。この結果は、柱状図データを集めたことによる浅部モデルの詳細化による効果だけでなく、浅部と深部をつなぐ $V_s=300\sim700(\text{m/s})$ 程度の工学的基盤周辺の構造について、微動観測による位相速度と周期特性(H/V スペクトル比)等の評価による構造モデルの修正によって、より精度高く浅部・深部統合地盤モデルが作成されたことによるものと考えられる。また、本検討の手法の中では、インバージョンによる高次モードの取り扱いについても高次モードの影響を考慮した検討を行い、移送速度の処理の仕方によって、速度構造モデルに大きな差が確認できないことが分かった。今回の検討では、初期地盤構造を作成する際に、ボーリングデータ収集の密度により、構造の作成が難しいということで、若干の検討の余地は残るものの、ある一定の改善がされたものと考えられる。

<参考文献>

- 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 譲・遠山信彦・松山尚典・岩本鋼司・鈴木晴彦・劉瑛：強震動評価のための全国深部地盤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，337，2009。
- 山中浩明・山田伸之：強震動評価のための関東平野の3次元S波速度構造モデルの構築，物理探査，59，6，549-560，物理探査学会，2006。
- 先名重樹・藤原広行：微動探査観測ツールの開発 その1-常時微動解析ツール-，防災科学技術研究所研究資料，313，2008。
- 藤原広行・他：防災科学技術研究所研究資料236，249，256，261，262，263，279，281，283，295，296。
- 三宅弘恵，瀨瀬一起，古村孝志，稲垣賢亮，増田徹，翠川三郎：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，214-217，2006。
- Kanno T., A. Narita, N. Morikawa, H. Fujiwara, and Y. Fukushima(2006): A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on record data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **96**, 879-897.
- Arai, H. and K. Tokimatsu: S-wave velocity profiling by joint inversion of microtremor dispersion curve and horizontal-to-vertical spectrum, *Bull. Seis. Soc. Am.*, **95**, 1766-1778, 2005.
- 鈴木晴彦・山中浩明：深部地盤のS波速度構造推定のための地震記録と微動探査データの同時逆解析，物理探査，63，215-227，2010。

- 小林源裕・儘田 豊・堤 英明(2009)：鉛直アレー観測記録による地盤減衰同定に関する一考，物理探査学会第121回学術講演会論文集，1-4.
- 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.
- 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.
- 佐藤浩章・金谷 守・大鳥靖樹(2006)：減衰定数の下限値を考慮したスペクトル比の逆解析による同定手法の提案 —岩盤における鉛直アレイへの適用と減衰特性の評価—，日本建築学会構造系論文集，**604**，55-62.
- Tsuda Kenichi, K. Koketsu, Y. Hisada and T. Hayakawa(2010)：Inversion analysis of site response in the Kanto basin using data from a dense strong motion seismograph array, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **100**，1276-1287.
- 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・中丸明子・栗田勝実・瀬尾和大 (1998)：表層の地盤特性を拘束条件にしたS波スペクトルのインバージョンによるサイト特性の評価，地震，51，193-202.
- 山中浩明・大堀道広・翠川三郎(2010)：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
- 福島美光(1993)：地震動強さの距離減衰式(経験式)に関する最近の研究動向，地震2，**46**，315-328.
- 川瀬 博・松尾秀典(2004)：K-NET, KiK-net, JMA震度計観測網による強震動波形を用いた震源・パス・サイト各特性の分離解析，日本地震工学会論文集，**4**，1，33-52.
- Kinoshita, S. and M. Ohike(2002)：Scaling relations of earthquakes that occurred in the upper part of Philippine sea plate beneath the Kanto region, Japan, estimated by means of borehole records, *Bull. Seism. Soc. Am.* **92**，611-624.
- 佐藤智美・巽 誉樹(2002)：全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性，日本建築学会構造系論文集，**556**，15-24.