

3.4.4 首都圏周辺の高精度な地盤モデルの構築

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

「震源断層モデル等の構築」に関連する。首都圏の浅部地盤および深部地盤の既存の地盤モデルを収集・整理するとともに、新しいデータの追加を図り、表層から地震基盤に至る切れ目のない3次元地盤モデルの作成を行う。ここで得られた結果を、個別研究テーマ「震源断層モデル等の構築」で実施する首都直下地震の強震動予測の高度化に利用する。

(b) 平成22年度業務目的

- 1) 平成21年度に引き続き、浅部地盤の卓越周期データ、微動アレイ観測による深部地盤データの収集を行う。
- 2) 首都圏に展開されている中感度稠密地震観測で得られた観測記録を用いて、水平/上下スペクトル比などの地盤構造に関する情報を抽出する。
- 3) 抽出した地盤情報を用いて平成21年度に改良した表層から地震基盤までの地盤モデルの妥当性を検証し、必要に応じて地盤モデルの修正を行う。
- 4) 得られた3次元地盤モデルを用いて中小地震による地震動のシミュレーションを行い、首都圏での地震動の伝播特性を明らかにする。

(c) 担当者

| 所属機関 | 役職 | 氏名 | メールアドレス |
|--------------------------------------------|-----|------|---------|
| 東京工業大学 | 教授 | 翠川三郎 | |
| 同 | 准教授 | 山中浩明 | |
| 同 | 研究員 | 津野靖志 | |
| 海洋研究開発機構 地震津波・ 防災研究プロジェクト データ 解析グループ | 研究員 | 大堀道広 | |

(2) 平成22年度の成果

(a) 業務の要約

- 1) 平成21年度に引き続き、浅部地盤の卓越周期データ、微動アレイ観測による深部地盤データの収集を行った。
- 2) 首都圏に展開されている中感度稠密地震観測で得られた観測記録を用いて、水平/上下スペクトル比などの地盤構造に関する情報を抽出した。
- 3) 抽出した地盤情報を用いて平成21年度に改良した表層から地震基盤までの地盤モデルの妥当性を検証し、必要に応じて地盤モデルの修正を行った。
- 4) 得られた3次元地盤モデルを用いて中小地震による地震動のシミュレーションを行い、首都圏での地震動の伝播特性を明らかにした。

(b) 業務の成果

1) 微動観測データの地震波干渉法による表面波群速度の推定

a) 微動の連続観測

微動の連続観測を2つの地域で実施した。ひとつは、昨年度と同様に図1に示す相模湾と東京湾を中心にした首都圏南西部である。この地域の11地点で微動の連続観測を継続し、データを蓄積した。もうひとつは、駿河湾周辺地域である。これは、南海トラフ沿いに発生する巨大地震による首都圏での地震動の伝播経路に対応することを考慮して観測を実施することにしたものである。この地域での観測の一部は、停電や電源の不安定さによるトラブルなどの影響で、現時点でのデータの蓄積は十分ではない。長期間の観測を行うことを目的としているために、各地点では既存の観測施設や建物内に機器を設置した。観測には、昨年度と同様に、白山工業製ロガーLS8000SH、小型PC、ミットヨ製加速度計6A3を用いて、3成分の微動データを0.01秒間隔で連続収録した。

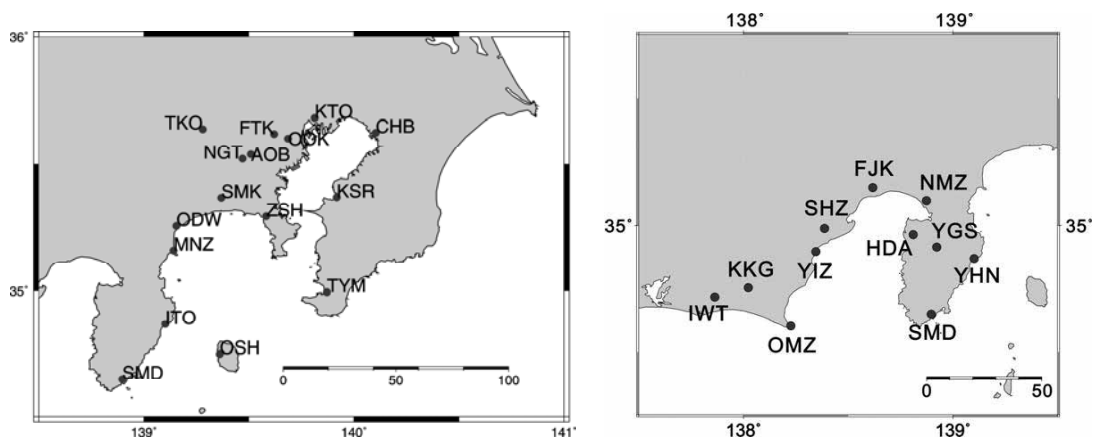


図1．微動連続観測の地点

b) 相互相関関数に基づく群速度の推定

得られた微動データに図2に示したように地震波干渉法に基づく処理をすることにした。長時間の記録を24時間毎にまとめ、周期1～数秒の帯域通過フィルタ処理を行う。つぎに、地震や突発的な大振幅のノイズなどの振幅が大きい部分の影響を少なくするために、+1と-1の値のみにする2値化の操作を行った(Sabra et al., 2005)。これらの処理後の加速度波形の1時間(サンプル時間長さ)のデータを用いて相互相関係数を求める。この操作をすべてのデータに対して繰り返し、さらに、それらをアンサンブル平均することによって、最終的な相互相関関数を得る。十分な時間平均ができれば、正と負の遅れ時間の相互相関関数は、2地点の間の両方向のグリーン関数(厳密には、グリーン関数の微分形)になる。この観測では上下と水平2成分の記録を取得しており、2点の間では9成分の相互相関関数を得ることになる。つぎに、相互相関関数が2点間のグリーン関数を考えられる場合には、片側の相互相関関数のマルチプルフィルタ処理によって2地点間の群速度を算出することができる。さらに、群速度の逆解析によって2点間の平均的なS波速度構造を求めることができる。

ここでは、今年度に観測を開始した駿河湾周辺地域での観測データに対する結果について述べる。2地点の相互相関関数の計算結果の例として、HAD-NMZでの結果が図3に示されている。この2点は約16km離れており、64日間のデータを用いて相互相関関数が算

出されている。図4には、正負の相互相関関を平均して得られる波形のマルチプルフィルタ解析の結果の例（上下成分）を示している。明瞭な分散性は確認できず、レイリー波の群速度が周期に対して大きく変化していないことを示している。図4には、図3の結果から得られるレイリー波の群速度を示している。図には、相互相関関数の上下成分、動径成分、それらを平均した群速度が示されている。周期5秒程度までは、上下成分と動径成分で大きな差異はなく、安定した結果である。群速度は、周期2～6秒の間で1.2～1.8km/sである。以下では、2つに群速度の平均値を観測値として取り扱うことにした。

上記の解析を各観測点ペアの相互相関関数に適用し、2点間の表面波の群速度を得ることができる。図5には、駿河湾地域の観測点ペアで得られたレイリー波の群速度の例である。図5の左、中、右は、駿河湾西部、北部、伊豆半島の観測点ペアに対するレイリー波の群速度である。西部と北部での群速度は比較的小さいが、伊豆半島では、ほとんどの周期で群速度が大きくなっている。これは、伊豆半島の地下構造を反映していると考えられる。なお、昨年度に同様の検討を伊豆半島東部について行っているが、その結果による群速度と大きな矛盾はない。

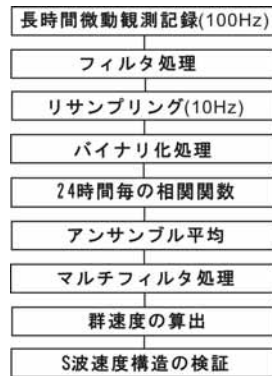


図2 . 微動連続データの処理方法

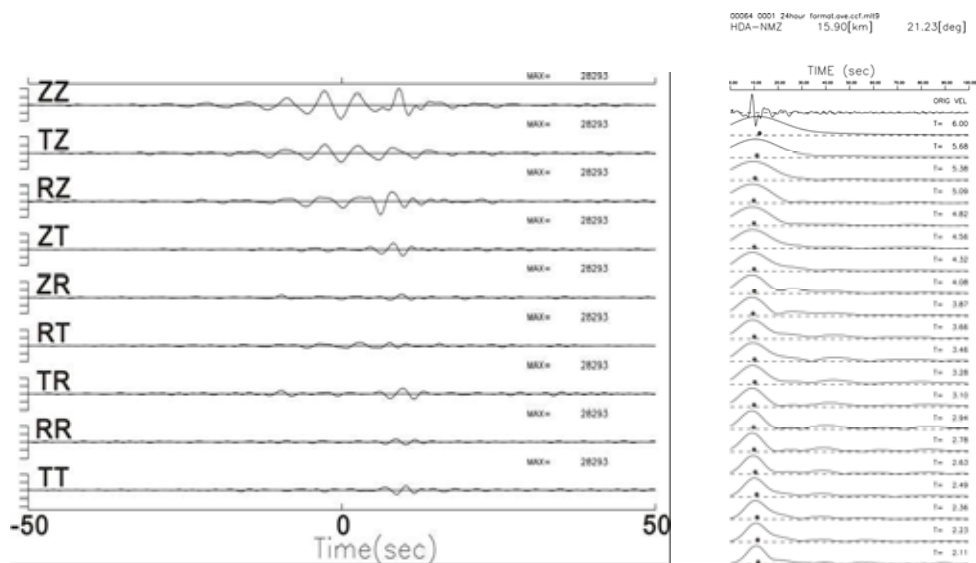


図3 . HAD と NMZ の間での相互相関関数とマルチプルフィルタ処理結果

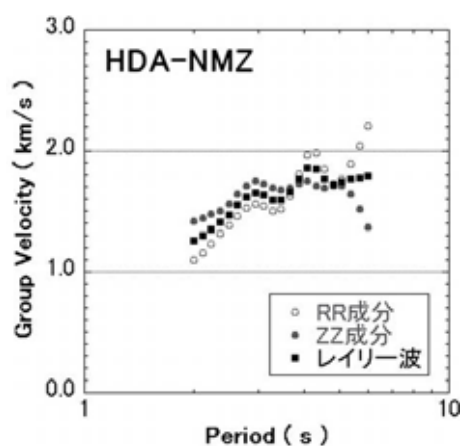


図4 . HAD と NMZ の間のレイリー波の群速度

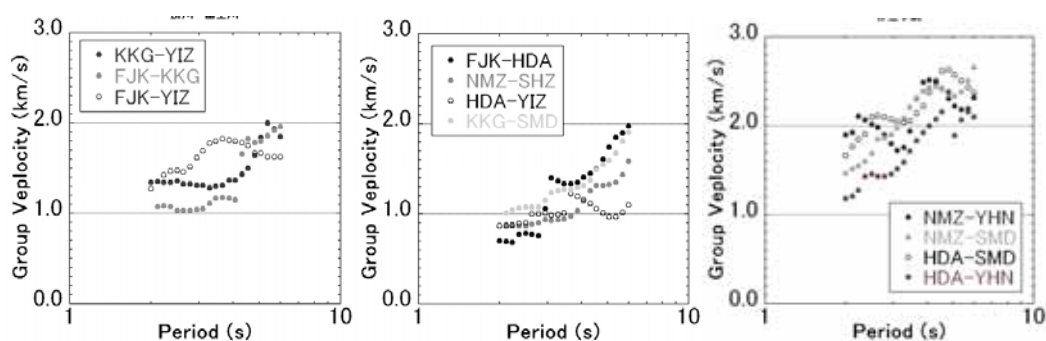


図5 . 各観測点ペアに対するレイリー波の群速度

c) 表面波群速度と地下構造の関係

図5のように得られた群速度を逆解析し、各観測点間の平均的な1次元S波速度構造を推定した。図6と7には、得られたS波速度構造モデルが示されている。図6は、伊豆半島地域における、NMZ - YHN、NMZ - SMD、NMZ - HDA間のS波速度構造を示している。伊豆半島では、地震基盤は全体的に非常に浅く、半島の中央ではやや深くなっているのがわかる。図7は、駿河湾を挟んだFJK - HDA、SHZ - SMD、KKG - SMD間間のS波速度構造モデルである。駿河湾では地震基盤が全体的に深く、地震基盤深度は3 km程度であると推定される。図8は各観測点ペアの間で得られたS波速度構造モデルでの地震基盤の深度を示したものである。駿河湾および遠州灘では、地震基盤が深くなっているが、伊豆半島では、1km以下と地震基盤が浅くなっており、明瞭な地域性があることがわかる。

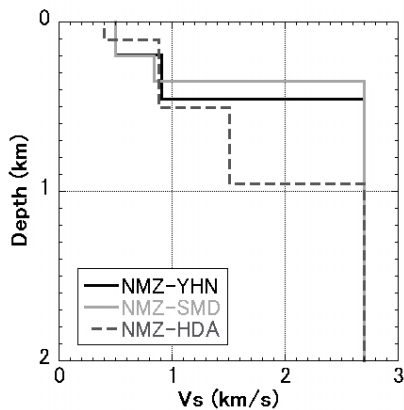


図 6 . 伊豆半島の観測点の地下構造

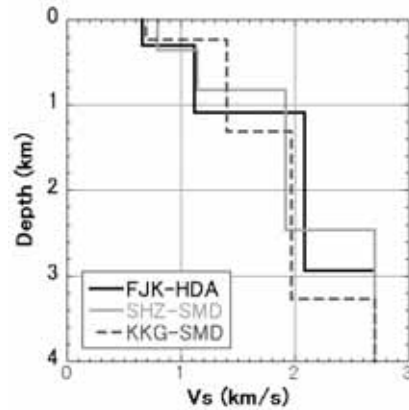


図 7 . 駿河湾の観測点の地下構造

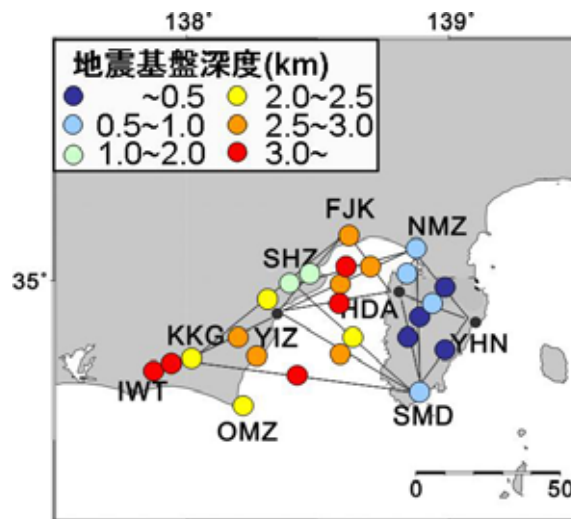


図 8 . 地震基盤深度の分布

d)まとめ

首都圏周辺部において地震波干渉法に基づく表面波の群速度の推定のために微動の長期間連続観測を行った。関東平野では、昨年度に引き続きデータの蓄積を行い、十分なデータを取得できた。また、想定東海地震などの地震による首都圏の地震動の伝播経路にあたる伊豆半島から駿河湾地域においても微動の連続観測を行った。現状では、観測データの蓄積が十分ではないが、一部の地点ではレイリー波の群速度を評価することができた。得られた群速度の逆解析から伊豆半島と駿河湾の S 波速度構造を推定した。地震基盤の深度分布には明瞭な地域性が認められ、駿河湾での厚い堆積層の S 波速度構造を明らかにした。

微動観測では、鹿島の諸井孝文博士と池浦友則博士、東大地震研究所の坂上実氏、纈纈一起教授、千葉大の中井正一教授と関口徹助教、千葉県消防地震防災課の浅尾一己氏には、ご協力を頂きました。記して感謝いたします。

2) 地震記録のコーダ部の H/V による地下構造モデルの検証

a)使用データ

MeSO-net の約 170 観測点で得られた地震記録を用いて、地震動の H/V による 1 次ピーク周期と首都圏の地下構造との関係について検討した。周期 1 秒以上の地震動を対象に、日本近辺で発生したマグニチュード 6.5 以上の 9 つの地震を選択した。ここで使用した地震の緒元を表 1 に、MeSO-net 観測点および地震震央の位置を図 9 と図 10 に各々示す。

観測記録の例として、2009 年 8 月 17 日 9 時頃に発生した石垣島南方沖の地震(深さ 50km、M6.7)の湘南(SYO)で記録された周期 1 秒から 20 秒の帯域の速度波形の上下動成分(震央距離 2000km)を図 11 に示す。MeSO-net によるデータでは、適切なバンドパスフィルター処理を行うことで微動に埋もれた加速度記録から長周期成分が卓越した遠地の地震波形を取り出すことが出来る。図 12 には、南北方向の加速度記録を 2 回積分して得られた周期 8 秒から 20 秒の変位記録を示す。図 12 の縦軸は観測点 SYO からの距離で横軸は走時であり、S 波初動の到着後 50 秒程度の間の後続位相の見かけ速度は S 波初動と同程度と大きく、屈折波やそれらの重複反射波が卓越している。一方で、S 波初動の到着後 100 秒以降の後続位相の見かけ速度は、初動に比べて小さくなっており表面波が主成分であると考えられる。

b) コーダ部の H/V

図 10 に示した 9 つの地震による H/V とそれらを平均した H/V の例を図 13 に示す。9 つの地震記録による H/V のばらつきが小さく、また複数の地震記録から算出された H/V スペクトルを平均化することで一つの地震記録のみでは卓越周期が明確に読み取れなかった観測点(例えば、SYO)での卓越周期を読み取ることが可能になった。震源情報(震源位置やマグニチュード)に違いがある複数の地震記録による H/V が安定していることは、地震動コーダ部分の H/V は震源の影響があまり小さくなく、観測点直下の地下構造を反映した結果が現れていることを示している。

地震動コーダ部分の H/V の 1 次ピーク周期の分布を図 14 に示す。この図には、K-NET や KiK-net、千葉県での SK-net を用いて地震動コーダの H/V を求めた佐藤・東(2006)による H/V の 1 次ピーク周期結果も併せて示している。大局的には、山中・山田(2006)で示された関東平野の深部地下構造と一致する。特に、房総半島中部から北部に対して、H/V 比の卓越周期が長いことと山中・山田モデルに見られる地震基盤面が深いことはよく調和する。一方で、東京湾の西側に対して、H/V のピーク周期が長いことと地震基盤面が浅くなることに違いが見られる。

c) H/V ピーク周期と地下構造の関係

ここでは、図 9 に示した 5 つの測線に対する観測された地震動コーダ H/V の 1 次ピーク周期と山中・山田モデルを用いて計算されたレイリー波基本モードの楕円率の 1 次ピーク周期を比較した(図 15)。観測値と理論値の不一致は主として、H/V の 1 次ピーク周期がより長い地点で見られる傾向にある。特に、東京湾の西部である Line-c での両者 H/V の違いは大きい(図 15c)。より長周期帯で両者の対応関係が低くなることは、山中・山田(2006)で提案されている地下構造はアレー微動観測を用いた結果であるためより長周期帯で微動のパワーが小さければレイリー波の位相速度が求められないことによると考えられる。

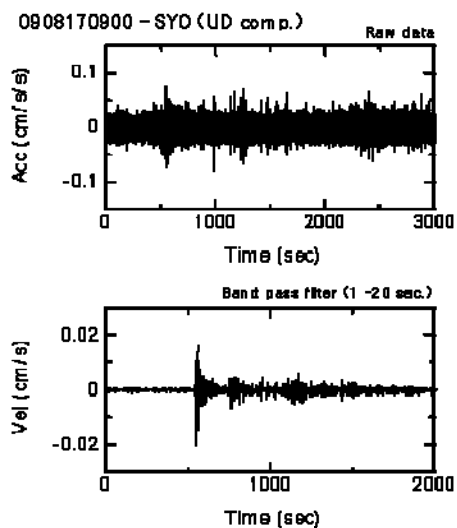


図 11 . SYO での観測記録 (上) と
フィルター処理結果 (下)

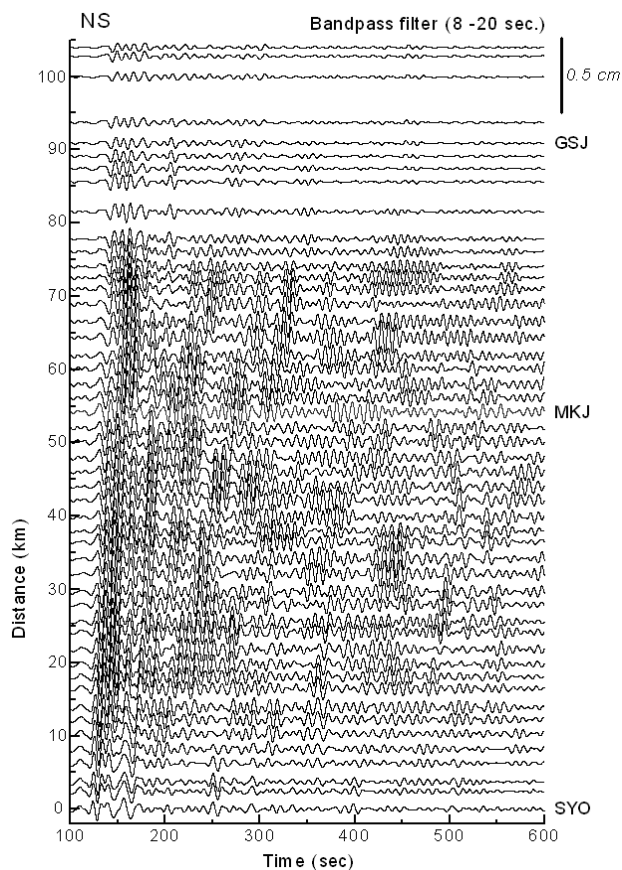


図 12 . 変位波形

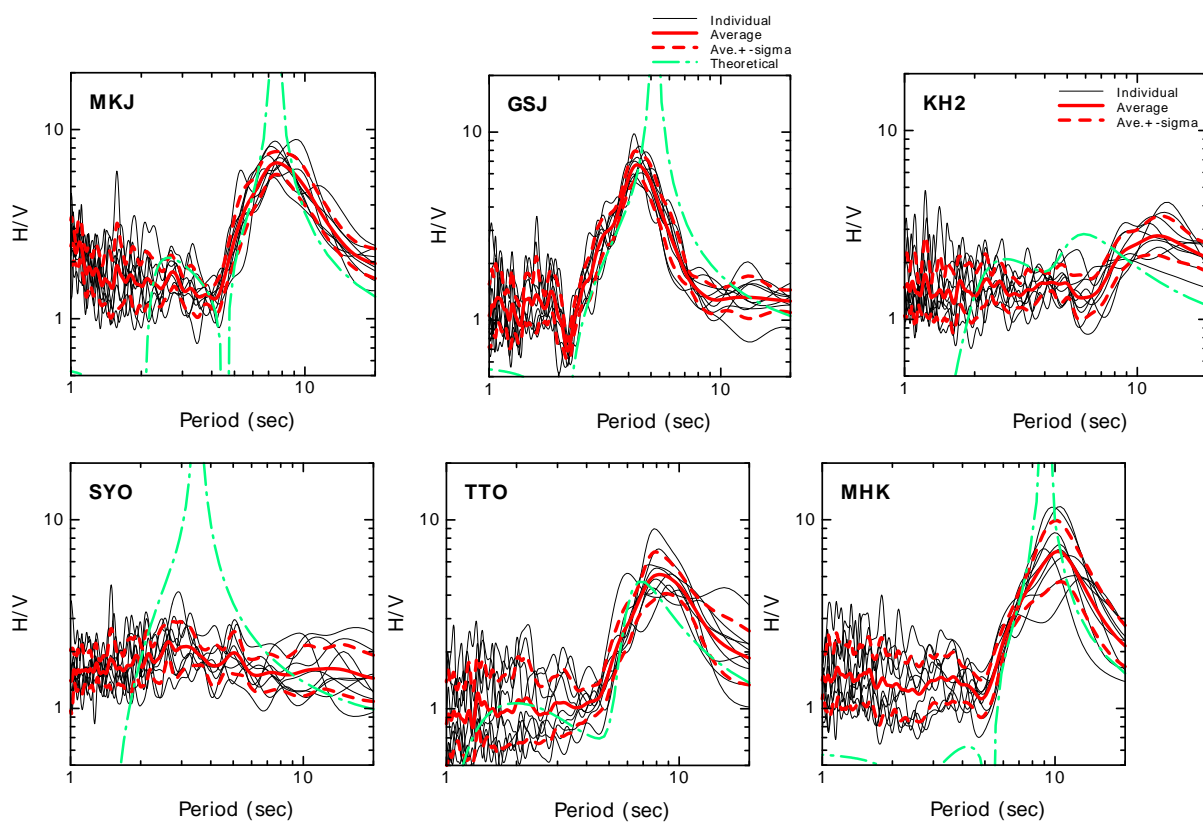


図 13 . コーダ波の H/V スペクトルの例

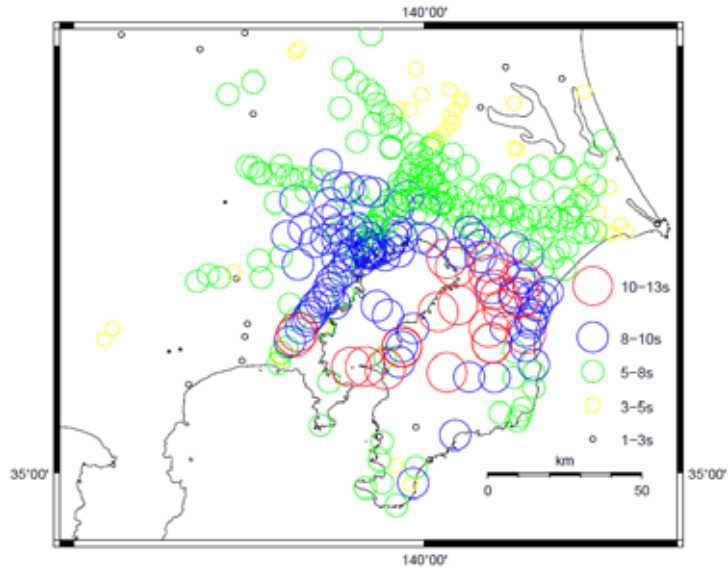


図 14 . H/V スペクトルのピーク周期の分布

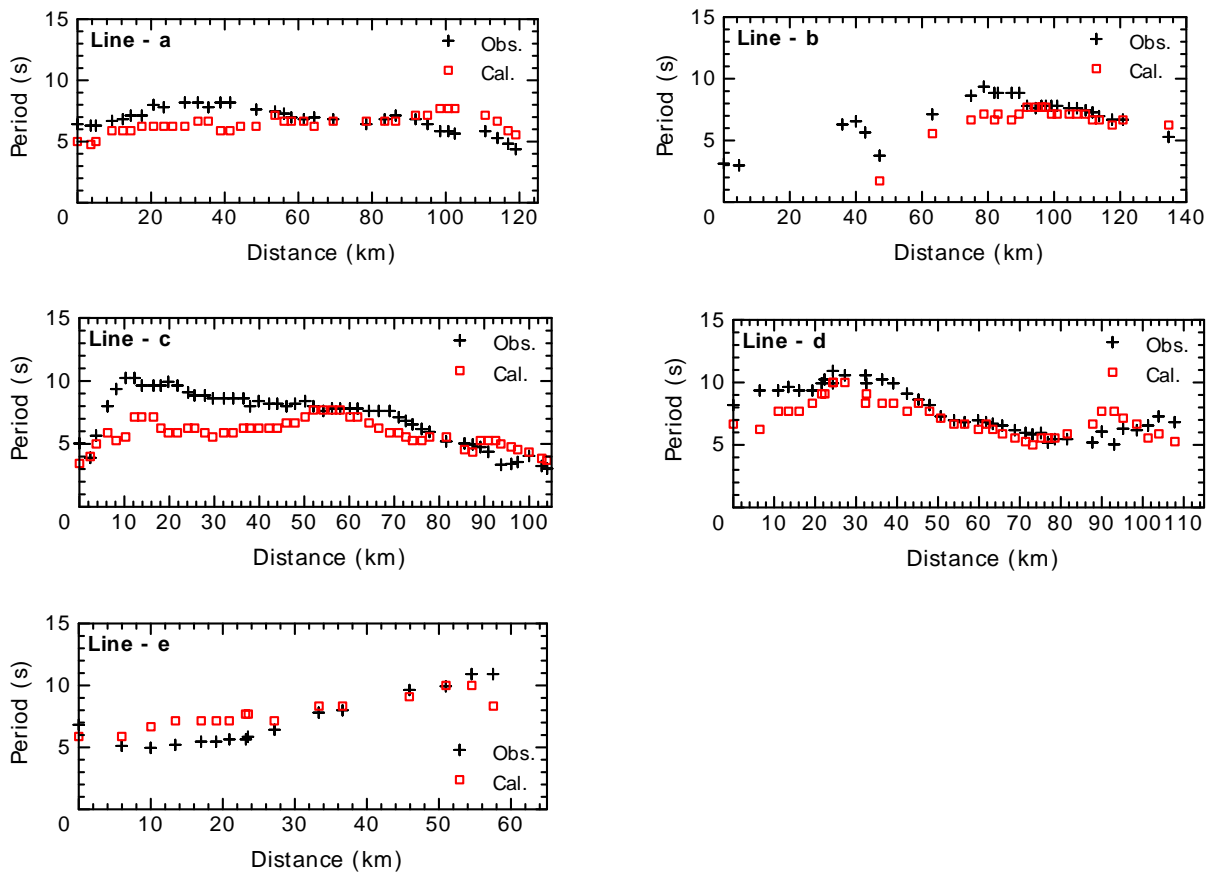


図 15 . H/V ピーク周期とレイリー波楕円率のピーク周期の関係。

- 3) 微動アレイ観測による 3 次元地下構造モデルの修正と地震動シミュレーション
 a) 3 次元モデルの改良

昨年度に微動探査による地盤情報に基づいて作成した地盤モデルでは、表層の S 波速度を 0.5km/s と仮定していた。しかし、微動探査の結果によれば、表層の S 波速度には、地域性があることが明らかにされている。そこで、表層部分の S 波速度の地域的な変化を考慮した地盤モデルを作成した。作成したモデルは図 16 に示すごとくである。図 16a ~ 16c の各地層の上面深度は、昨年度とほぼ同じである。図 16d の表層の S 波速度分布には、関東平野の中央部の東京湾岸地域や霞ヶ浦周辺から利根川流域にかけての地域では 0.3 や 0.4 km/s の比較的低速度の地域が認められる。一方、平野の西側端部や北西端部ではやや大きな 0.7 や 0.8 km/s の S 波速度になっている。

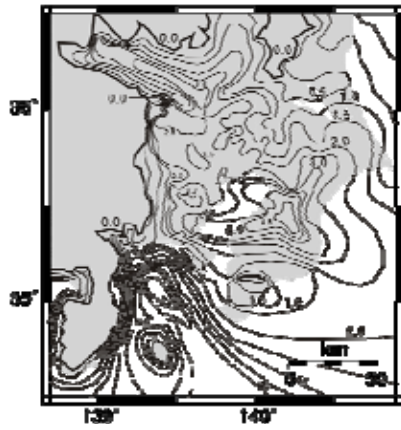
b) 修正モデルを用いた地震動シミュレーション

上記の 3 次元地盤モデルを用いて、中小地震による地震動のシミュレーションを行い、モデル修正結果が地震動に及ぼす影響を調べた。検討には、1990 年伊豆大島近海の地震とした。これは古い地震であり、多くの観測データが得られているわけではないが、山中・山田(2006)で首都圏の深部地盤モデルの検証に使われている地震であることを考慮して、この地震を対象とした。

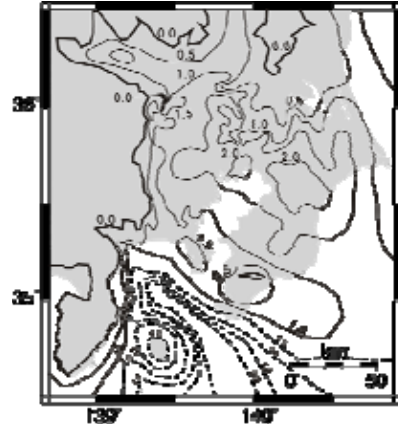
図 17 には、対象とした地震で観測記録が得られている地点が示されている。図 18 には、観測された速度記録、上記の修正地盤モデルに対する計算速度波形が比較されている。各波形は、周期 4 - 20 秒のバンドパスフィルター処理をしている。観測波形の全体的な様子は、計算結果でも再現されており、振幅も概ね一致している。しかし、姉ヶ崎や千葉では、一致の程度が低いと考えられる。さらに、震源から離れた前橋でも波形の一致の程度は低い。図 19 には、5%減衰の速度応答スペクトルの比較が示されている。図には、観測値、表層の S 波速度 0.5km/s に固定したモデル、表層の速度変化を考慮したモデルの計算結果が示されている。水戸では、表層の S 波速度を変化させても大きな差異はないが、それ以外の観測点では、表層の S 波速度を変化させたモデルのほうが観測結果をよく説明していることがわかる。表層の数百 m の S 波速度も長周期地震動へ及ぼす影響が大きいことがわかる。

c) まとめ

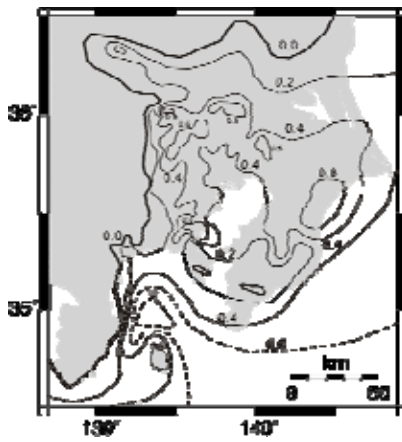
微動探査による S 波速度構造モデルに基づいて、表層の S 波速度の変化を考慮した地盤モデルを作成した。そのモデルを用いた中小地震による地震動シミュレーションでは、多くの地点での後続位相の振幅の時間的変動の様子を再現することができた。また、表層の S 波速度の変化を考慮しない場合と比較して、考慮した場合のほうがよく観測結果を説明できることがわかった。



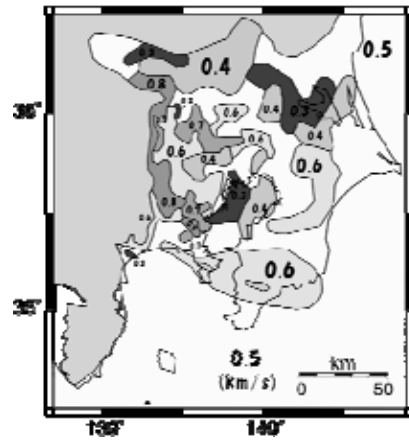
a) 3.0km/s 層 (地震基盤) 上面



b) 1.5km/s 層上面深度



c) 1.0km/s 層上面深度



d) 表層の S 波速度

図 16 . 3 次元地下構造モデル

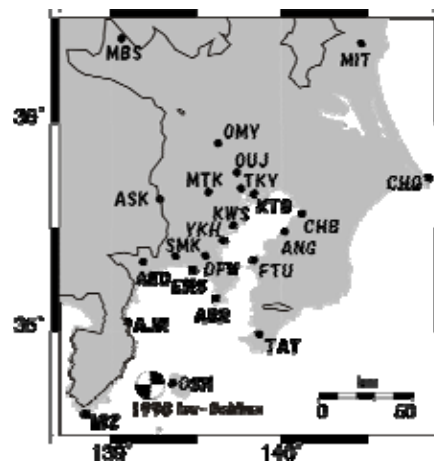


図 17 . 1990 年伊豆大島近海の地震の観測点

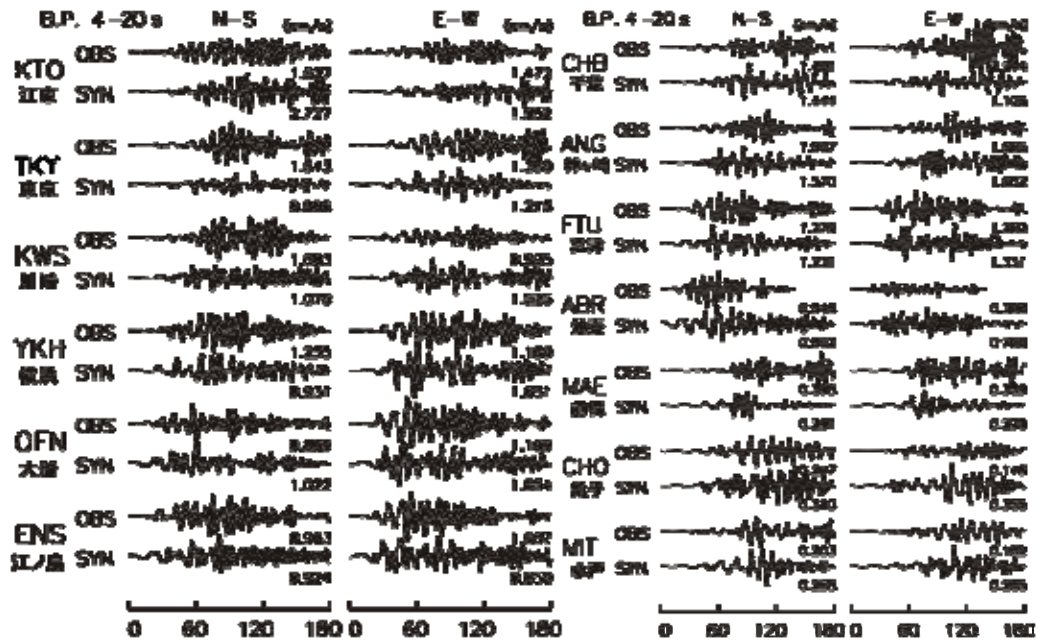


図 18 . 1990 年伊豆大島近海の地震のシミュレーション結果。各地点での速度波形は、上
が観測された速度、下が計算速度である。

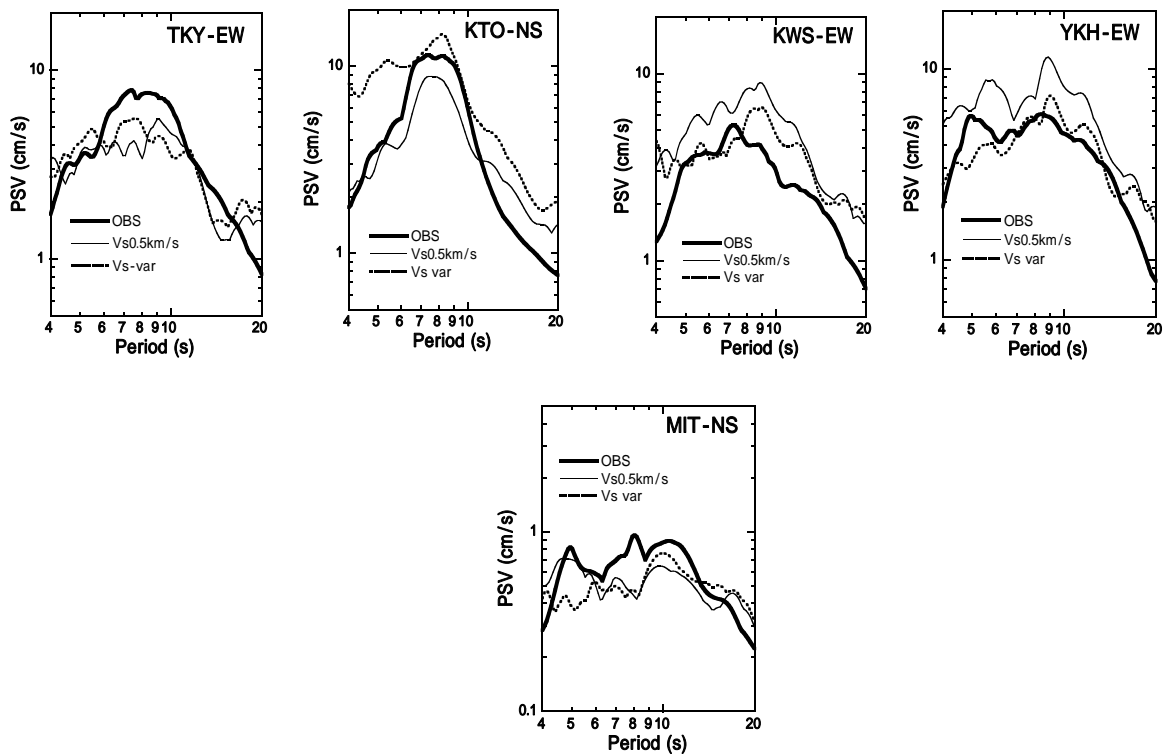


図 19 . 速度応答スペクトルの比較

(c) 結論ならびに今後の課題

- 首都圏およびその周辺地域において、微動観測を行い、それらの分析によって地盤の S 波速度構造を推定した。
- 首都圏に展開されている中感度稠密地震観測で得られた観測記録を用いて、水平/上下スペクトル比などの地盤構造に関する情報を抽出した。平成 21 年度に改良した地震基盤までの地盤モデルの妥当性を検証し、改良すべき点を明らかにした。
- 表層の S 波速度の地域性を考慮した 3 次元地盤モデルを用いて中小地震による地震動のシミュレーションを行い、表層の S 波速度の地域的な変化を考慮することにより、首都圏での地震動の伝播特性をより良く再現することができた。

(d) 引用文献

- 1) Sabra, K. G., P. Gerstoft, P. Roux, and W.A. Kuperman : Extracting time-domain Green's function estimates from ambient seismic noise、 Geophy. Res. Lett、 Vol.32、 L03310. doi:10.1029/2004GL021862、 2005.
- 2) 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、Vol.59、pp.549-560、2006.
- 3) 佐藤浩章、東 貞成：関東平野の 3 次元地下構造モデル化、第 12 回日本地震工学シンポジウム、No.357、2006

(e) 学会等発表実績

学会等における口頭・ポスター発表

| 発表成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別） | 発表者氏名 | 発表場所（学会等名） | 発表時期 | 国際・国内の別 |
|-----------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------|----------|---------|
| 地震波干渉法による関東平野の深部地盤の S 波速度構造探査の試み その 2 口頭発表 | 地元孝輔、山中浩明、諸井孝文、池浦友則、纈纈一起坂上実、中井正一、関口 徹、小田義也、 | 2010年日本建築学会学術講演会 | 2010年9月 | 国内 |
| MeSO-net で観測された地震動の H/V 比の定常性に関する検討 口頭発表 | 津野靖志、山中浩明、酒井慎一、平田直、笠原敬司、木村之尚紀、明田川保 | 物理探査学会第 123回学術講演会 . | 2010年10月 | 国内 |
| 地震波干渉法による南関東における表面波群速度の抽出その | 地元孝輔、山中浩明、諸井孝文、池浦友 | 物理探査学会第 122回学術講演会 | 2010年10月 | 国内 |

| | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----|
| 2 地下構造モデルの 検証 口頭発表 | 則、 瀧瀬一起、 坂上実、中井正 一、 関口徹、 小田義也 | | | |
| Relation between dominant periods of H/V of coda waves observed by MeSO-net and underground velocity structures in Tokyo metropolitan area, Poster | S. Tsuno、 H.Yamanaka、 S.Sakai、 N. Hirata、 K. Kasahara、 H. Kimura、 T. Aketagawa | AGU (American Geophysical Union) Fall meeting | 2010年12月 San Francisco、 California、 USA | 国際 |

学会誌・雑誌等における論文掲載

| 掲載論文（論文題目） | 発表者氏名 | 発表場所 （雑誌等名） | 発表時期 | 国際・ 国内の 別 |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------|-----------------|
| 南関東地域における微 動の長期連続観測記録 の地震波干渉法処理に よる表面波の群速度の 推定、 | 山中浩明、 地元孝輔、 諸井孝文、 池浦友則、 瀧瀬一起、 坂上 実、 中井正一、 関口 徹、 小田義也 | 物理探査、63、 409-425 | 2010年 | 国内 |

(f) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1)特許出願

なし

2)ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

(3) 平成22年度業務計画案

- ・首都圏に展開されている中感度稠密地震観測で得られた観測記録を用いて、水平/上下スペクトル比などの地盤構造に関する情報を抽出結果に基づいて地下構造モデルを改良する。
- ・これまでに収集した地盤モデルのデータを統合し、表層から地震基盤までの地盤モデルを再構築する。また、モデルの修正状況に応じて微動観測などを実施する。
- ・地震波動伝播シミュレーション装置を用いて、得られた3次元地盤モデルでの地震波干渉法によるグリーン関数のシミュレーションを行い、地盤モデルの妥当性を検証する。