

3. 3. 5. 1 地下構造モデル化の研究／三次元速度・Q構造モデル

(1) 業務の内容

(a) 業務題目：地下構造モデル化の研究／三次元速度・Q構造モデル

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名	メールアドレス
東京工業大学・大学院 総合理工学研究科	助教授	山中浩明	yamanaka@depe.titech.ac.jp
京都大学・防災研究所	ポストドクター 研究員	山田伸之	yamada@egmdpri01.dpri.kyoto-u.ac.jp
東京大学・地震研究所	助教授	古村孝志	furumura@eri.u-tokyo.ac.jp
(財)電力中央研究所	主任研究員	佐藤浩章	hiroakis@criepi.denken.or.jp
(財)電力中央研究所	主任研究員	東貞成	higashi@criepi.denken.or.jp
(財)電力中央研究所	主任研究員	芝良昭	cbar@criepi.denken.or.jp
清水建設（株）・技術研 究所	副主任研究員	佐藤俊明	toshiaki.sato@shimz.co.jp
清水建設（株）	主席研究員	早川崇	takashi.hayakawa@shimz.co.jp

(c) 業務の目的

この研究では、関東平野において地下構造調査および地震記録の分析により、新たに地下構造に関する情報を取得し、既存の地下構造関連データと統合して、強震動数値シミュレーション用の3次元地下構造（P波・S波速度、密度、Q値）のマスターモデルを構築することを目的とする。さらに、得られたマスターモデルを用いて、関東平野周辺で発生した被害地震による強震動の数値シミュレーションを行い、強震動強さと被害の関係についても明らかにする。

(d) 5（あるいは計画年数）ヵ年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 平成14年度：

- ・既存データの収集・既存モデルの整備
- ・既存地下構造モデルを用いた地震動シミュレーション
- ・堆積層における速度勾配および不均質性の既存データ調査

2) 平成15年度：

- ・既存の地下構造データのコンパイル
- ・堆積層の構造探査の実施
- ・既存地下構造モデルによる地震動シミュレーション
- ・地震記録の分析によるモデル修正
- ・速度の深度勾配および不均質モデルの影響の評価

3) 平成 16 年度：

- ・堆積層の構造探査の実施
- ・関東平野の堆積層のマスターモデルの提案
- ・地震記録の分析によるモデル修正
- ・深度勾配と不均質を付与した地下構造モデルの検証と改良
- ・マスターモデルを用いた高精度強震動シミュレーション

4) 平成 17 年度：

- ・堆積層の構造探査の実施
- ・関東平野の堆積層のマスターモデルの改良
- ・地震記録の分析によるモデル修正
- ・関東周辺の被害地震の強震動シミュレーション

5) 平成 18 年度：

- ・堆積層の構造探査の実施
- ・関東平野の堆積層のマスターモデルの最終案
- ・関東周辺の想定地震による強震動シミュレーション

(e) 平成 15 年度業務目的

平成 14 年度に収集した既存の関東平野での微動アレイ探査の結果である位相速度データを統一的に解釈し、関東平野の堆積層の 3 次元 S 波速度構造モデルを構築する。さらに、地下構造探査密度の低い関東平野北部において微動アレイ観測および人工地震観測を行い、地下構造データを蓄積する。既存の関東平野の堆積層モデルを用いて、観測された地震動のシミュレーションを行い、観測記録との比較により、地下構造モデルの妥当性の検討を行う。また、関東平野での深層ボーリング資料の収集を行ない、堆積層の速度の深度勾配および不均質性を評価し、地震動特性への影響を評価する。

(2) 平成 15 年度の成果

(2-1) 関東平野の地下構造のモデル化に関する研究

山中浩明（東京工業大学）

山田伸之（京都大学）

(a) 業務の要約

平成 14 年度に収集した既存の関東平野での微動アレイ探査による位相速度データを整理し、周期数秒までのレイリー波の位相速度の空間分布を明らかにした。つぎに、各地点で得られている位相速度データを統一した基準で逆解析し、約 200 地点での地震基盤に至るまでの 1 次元 S 波速度構造を新たに推定し、その結果を用いて、関東平野の堆積層の 3 次元モデルを構築した。つぎに、地下構造データが少なかった関東平野北部において、微動アレイ観測を行い、地下構造データを蓄積した。さらに、関東平野北部で実施された人工地震の観測を熊谷－高崎の間で実施し、その間の基盤構造を明らかにした。

(b) 業務の成果

1) 関東平野での位相速度の逆解析

近年、関東平野では、自治体などによって堆積層の構造探査が実施され、地下構造データは急速に増えつつある。とくに、地震動特性に大きな影響を及ぼす S 波速度は、微動アレイ探査によって推定されている。平成 14 年度には、関東平野で実施されている微動アレイ探査において観測されたレイリー波の位相速度データを収集した。図 1 には、既存の微動アレイ探査の調査位置が黒丸で示されている。これらのデータの主なものは、大学や研究機関による観測^{1), 2), 3)}、神奈川県、千葉県、横浜市、川崎市による地下構造調査、などであり、合計 203 地点である。すでに、すべての地点で位相速度の逆解析が行われ、S 波速度構造の推定が行なわれている。しかし、地層の数、速度や厚さの拘束条件など逆解析時の仮定が異なっており、それらの結果を統合して 3 次元モデルを作成する場合に判断が難しいことが多い。そこで、これらの位相速度データを整理し、同一の基準で逆解析を行うことを試みた。

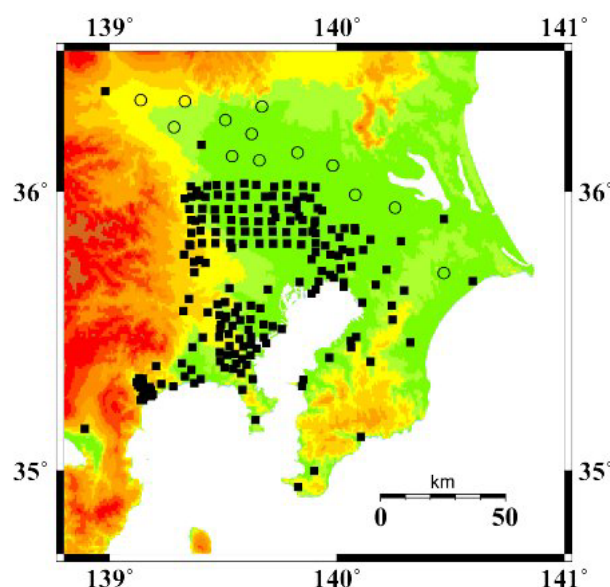


図 1 微動観測点の位置

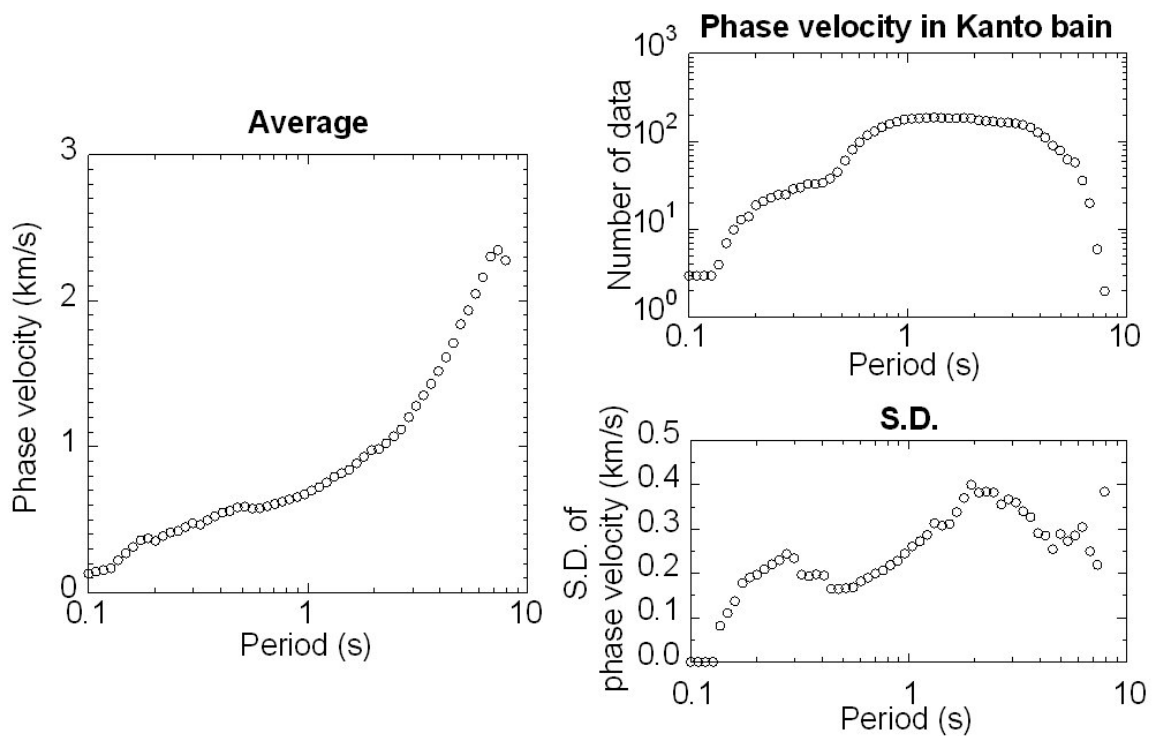


図2 既存の微動アレイ探査での位相速度データの平均値と標準偏差

収集した位相速度データは、周期範囲やその間隔などがそれぞれ異なっている。そこで、それぞれの地点での位相速度データを線形補間して、同じ周期ごとのデータに直して、以下の検討に用いることにした。図2には収集したデータの周期別の数、平均位相速度およびその標準偏差が示されている。周期0.6秒から5秒の間でデータ数が多い。それより長周期では、アレイのサイズや微動の振幅スペクトルの低下などの理由によりデータ数が急激に少なくなる。一方、ほとんどの微動アレイ探査ではやや深い地盤の探査を対象にしていることから、周期約0.5秒以下ではデータ数が少なくなっている。平均位相速度は比較的スムーズなものとなっているが、周期6秒程度まで2 km/s以下となり、より長周期まで位相速度が得られている地点の結果が平均に反映された結果となっていると考えられる。位相速度の標準偏差は周期1~5秒で大きくなり、この周期帯域での位相速度が空間的に著しく変動していることを示している。観測されたレイリー波の位相速度データから周期ごとの位相速度分布図を作成した。図3は、周期4.2、1.2、0.6秒の位相速度の分布を示している。この図では、関東山地では位相速度が3 km/sであると仮定している。周期4秒では、房総半島中央部で位相速度が小さく、平野西部で大きくなる。周期1.2および2秒では、平野南西部で大きい値となっている。さらに、周期0.6秒では横浜・川崎市の北部で大きくなり、表層のS波速度の差異を反映していると考えられる。こうした位相速度の分布がわかれば、地下構造モデルを使わないで、表面波のレイトレーシングを行なう場合の入力データが直接得られたことになり、非常に有益であると考えられる。

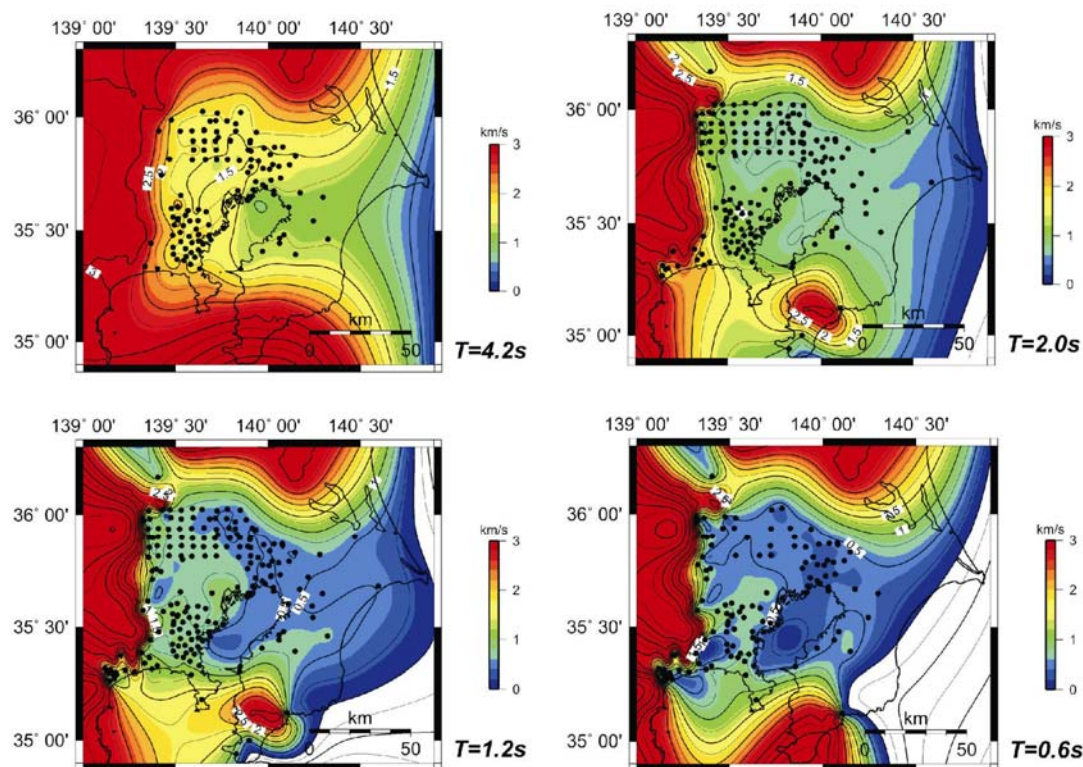


図3 微動アレイ探査によるレイリー波の位相速度の観測値の分布

つぎに、表1のようなS波速度を与えた4層構造を仮定して、すべての地点での位相速度の逆解析を行った。このS波速度は、³⁾を参考にして決めたものである。逆解析では、³⁾と同様に遺伝的アルゴリズムによる方法を用いて、観測された位相速度と理論位相速度の誤差のL1ノルムをデータ数で除した値が最小になるように、表1に示す3つの堆積層の厚さを決めた。こうした逆解析では、かなり強い拘束を与えてことになり、観測された位相速度が十分に説明できない場合も当然でてくる。しかし、統一して逆解析することで、長周期地震動の評価により適切な堆積層のモデルを構築することができると考えられる。図4には、逆解析で得られたモデルに対する上記の誤差の分布が示されている。多くの観測点では、比較的小さい値となっていることがわかる。基盤速度を3km/sに固定していることも誤差が大きい場合の一因であると考えられる。図5は、第2、3層までの深度および基盤深度を示したものである。関東山地では、基盤深度が露頭していると仮定している。S波速度1km/sの第2層目までの深さは、平野北部と房総半島で0.4km以上と深く、南西部では浅くなっている。S波速度1.5km/sの第3層目までの深度も房総半島中央部では、2kmと厚い。この傾向は、基盤深度でも認められ、房総半島中心部で基盤深さは4kmに達している。北部では基盤深度は2km以下と浅く、その他の地域では、2.5km前後である。図4には、逆解析から得られた表層のS波速度の分布も示されている。東京湾北部の臨海部でS波速度は小さく、平野西部では大きな値となっており、³⁾に指摘されているように表層のS波速度には地域性がある。

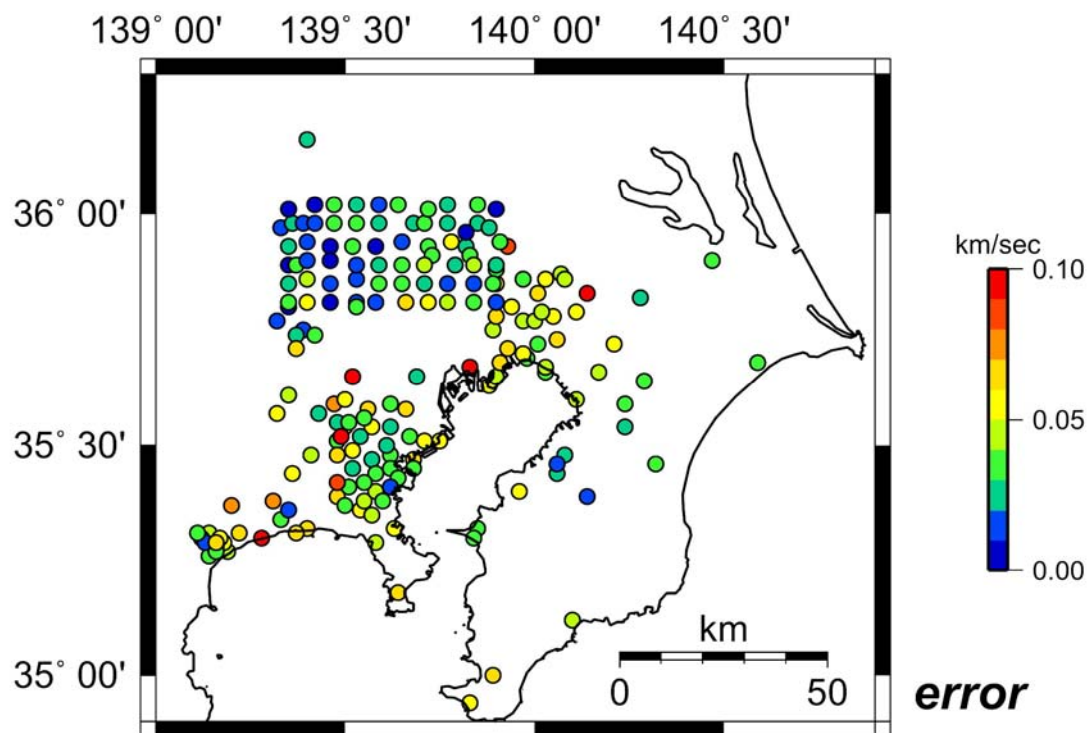


図4 位相速度の逆解析での誤差の分布

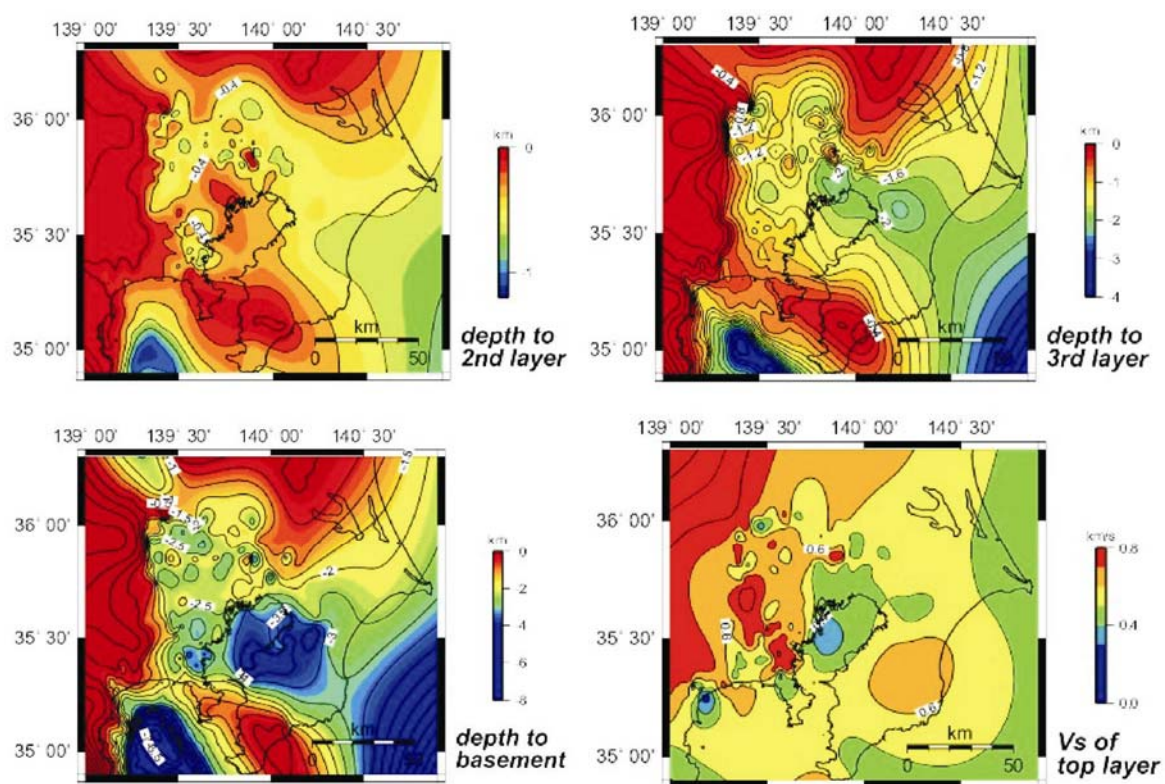


図5 位相速度の逆解析結果による深部地盤構造モデル

2) 関東平野での地下構造探査

図 1 に示したように、関東平野における既存の微動アレイ探査は、北部で十分に行なわれていない。そこで、関東平野北部において深部地盤を対象とした微動アレイ探査と人工地震探査を実施した。平成 15 年度に実施した微動アレイ探査の観測点は、図 1 の白丸で示されている 13 点である。各観測点では、0.5km から 1.5km 程度の半径を持つ 7 点アレイが 2 つ展開され、30 から 60 分の間微動の上下成分の観測が行われ、地下構造探査の観測データが蓄積された。

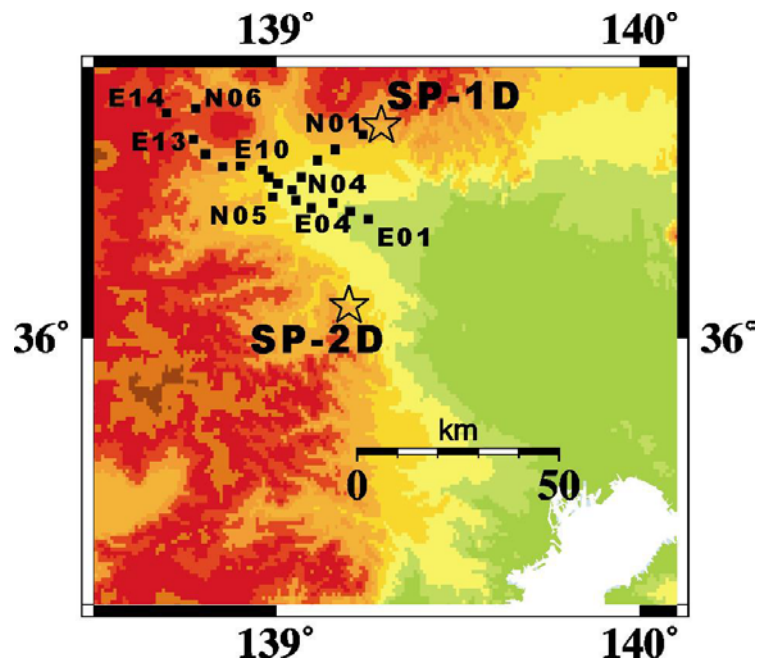


図 6 人工地震の発破点と観測点

人工地震探査では、本プロジェクトで行なわれた大間々と寄居での発破を図 6 に示す地点で観測が行われた。これは、1984 年長野県西部地震の際に熊谷地域で観測された特異な長周期地震動をシミュレーションするための地下構造モデルを作成することを目的としている。観測点は、高崎市を中心に北東－南西方向（N 測線）と北西－南東方向（E 測線）の測線上に計 20 地点に設けられた。観測には固有周期 4.5Hz の地震計と LS8000-SH（白山工業）を収録に用い、時刻校正を GPS により行い、200Hz サンプリングとした。図 6 には、寄居発破点から西側の榛名山山麓に至る E 測線で得られた速度の上下成分である。S/N 比は低い、震央距離約 50 km 以上離れた榛名山山麓でも P 波初動の到着を読み取ることができた。図 6 には、P 波初動走時も示されている。震央距離 40km までは、見かけ速度 5.9km/s で基盤速度に近い値である。それより遠くの観測点では、より速い見かけ速度が得られており、基盤深度が浅くなっているものと考えられる。発破点での地下構造などがまだ確定していないので、図 7 の走時曲線のインターセプトタイムを用いて、基盤速度を 5.7km/s と仮定して、タイムターンを求めた。さらに、高崎で実施した微動アレイ探査の結果から堆積層の層構成を考慮して、地下構造を求めると、図 8 に示すごとくである。埼玉県本庄付近（E01）から北西の高崎に向かって伸びる谷状の堆積層の終端部は、震央距離約 50km の観測点 EW12 付近であることがわかる。これは、既存の³⁾によるモデルに比べて、谷構造がより西へ伸びており、モデルの修正が必要であると考えられる。

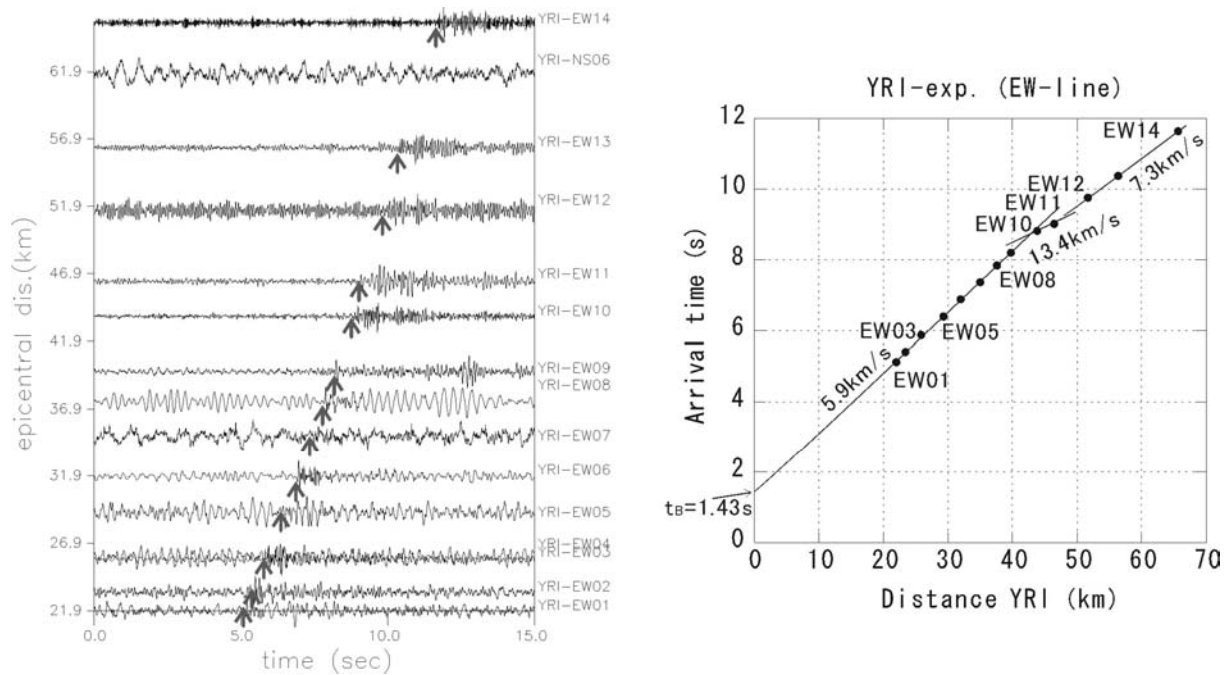


図7 寄居での発破による人工地震の記録と走時曲線

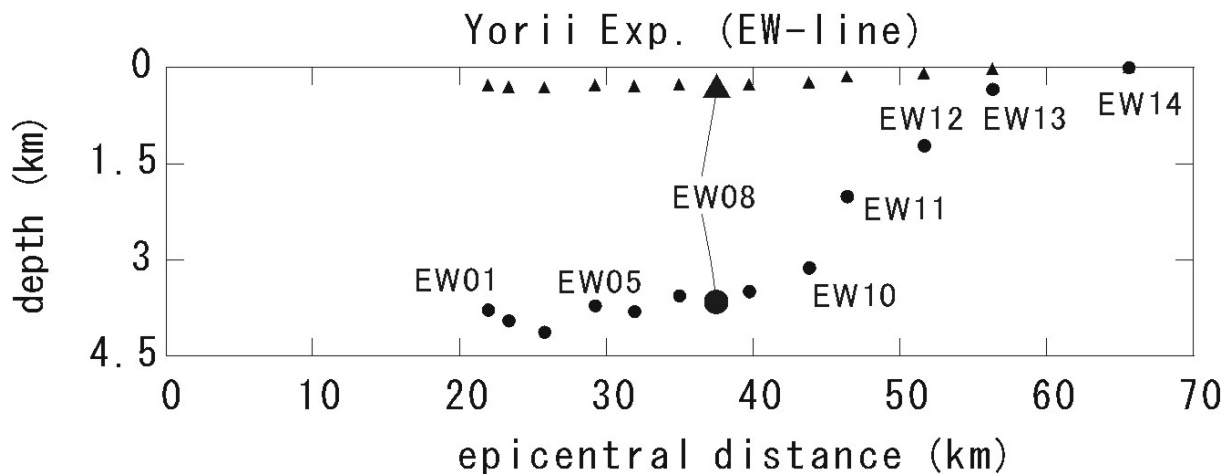


図8 E01 から E14 の間での地下構造モデル

(c) 結論ならびに今後の課題

関東平野における3次元S波速度構造を構築することを目的として、既存の微動アレイ探査の結果を整理し、レイリー波の位相速度の空間的分布を明らかにし、同一の基準で位相速度を逆解析することによって、堆積層の3次元S波速度を新たに提案した。さらに、地下構造調査の密度が低い、関東平野北部において微動アレイ探査および人工地震探査を実施し、地下構造データを蓄積した。

今後、関東平野での地下構造データの蓄積を進め、3次元S波速度の高度化を目指すとともに、地震動データの分析およびシミュレーションを行ない、提案した3次元モデルの妥当性の検討を行う必要がある。さらに、その結果を踏まえて、シミュレーションにおいてモデルの改良が必要と考えられる地域に探査対象を絞った戦略的な地下構造調査を実施する。

(d) 引用文献

- 1) 神野達夫：深部地盤構造を考慮した建築構造物への入力地震動に関する研究，東京大学博士論文，2000.
- 2) 松岡達郎，白石英孝：関東平野の深部地下構造の精査を目的とした微動探査法の適用性－埼玉県南部地域の三次元S波速度構造の推定－，物理探査，Vol. 55，pp. 127-143, 2002.
- 3) 山中浩明，山田伸之：微動アレイ観測による関東平野の3次元S波速度構造モデルの構築，物理探査，Vol. 55，pp. 26-38，2002.

(e) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
山田伸之，山中浩明	関東平野における地下構造モデルの比較のための中規模地震の地震動シミュレーション	地震 2，第 56 巻，第 2 号，111-123，2003	平成 15 年 9 月
山中浩明， 枇谷亜紀， 山田伸之	ニューラルネットワークによる強震記録の初動走時の読み取り	第 22 回日本自然災害学会学術講演会講演概要集，25-26，2003	平成 15 年 9 月 18 日
山田伸之， 山中浩明， 小山信	微動アレイ観測と爆破地震動観測による関東平野北西部における地下構造モデルの改良－地震動シミュレーションのための地下構造モデルの構築－	2004 年地球惑星関連科学合同大会 3	平成 16 年 5 月

(g) 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

(2-4) より短周期地震動予測をめざした複雑な地下構造のモデル化に関する考察

早川 崇（清水建設（株）技術研究所）

佐藤 俊明（清水建設（株）技術研究所）

(a) 業務の要約

近年、関東平野では大深度のボーリングが多く実施され、厚い堆積層における詳細な鉛直一次元の速度構造データが蓄積されつつある。それらのデータをみると P 波速度の鉛直一次元構造は、深さとともに漸増する構造（以下、トレンド構造）とランダムな揺らぎの構造から構成されていることが認められる。現在関東平野の三次元地下構造モデルは幾つか提案されている^{1), 2)}。これらのモデルは未だ周期 1、2 秒といった構造物の破壊に大きく影響する周期域まで十分に検証されていない。今後そのような短周期域までの強震動予測に有用な、高精度な地下構造モデルの構築には、トレンド構造や揺らぎの構造が重要となる可能性がある。

本年度は実測された地下構造モデルに基づいて、理論的な地震動の増幅率や強震観測記録の分析等から、主としてトレンド構造が地震動に与える影響を検討した。三次元構造におけるトレンド構造の影響は考察が難しいため、まずは鉛直一次元構造で検討した。トレンド構造を反映したモデルと反映しないモデルで、周期 1 秒以上の周期域において、地震動の理論的な増幅率や観測記録の再現性を比較した。その結果、またトレンド構造の有無で地震動の増幅が変化すること、強震動シミュレーションにおいて良好な一致が得られることが示され、より高精度なモデリングには漸増構造のモデル化は重要であると考えられた。

(b) 業務の実施方法

1) はじめに

下総には地下約 2000m の地震基盤まで達する観測井が掘削され、同観測井においては VSP によって詳細でかつ信頼性の高い速度構造が得られている³⁾。また同地点では GL-23m および GL-2300m において地震観測が実施されている（KiK-net, <http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>）。本検討はデータが揃っている同地点で実施した。

2) 解析方法

VSP による V_p 構造で漸増構造が認められる GL-80 m～GL-1300m までの区間に対し、 $V_p=a \cdot Z^b$ で回帰し、トレンド構造の抽出をおこなった。この区間は上総層群に相当すると考えられ⁴⁾。その結果、 $V_p=756Z^{0.151}$ が得られた。ただし Z は深度 (m) である。 V_s 構造は V_p 構造から $V_s=0.8V_p-800$ ⁵⁾ の関係から求めた。この式の適用性は VSP による S 波構造との一致から確認している。漸増構造の影響を検討するために図 1 に示すように、抽出された漸増構造を 1 層でモデル化した漸増構造を反映しないモデル（1 層モデル）と、詳細に反映した 16 層でモデル化したモデル（16 層モデル）、その中間のモデル（2 層モデル）を作成した。GL-80m～GL-1300m の区間で各モデルの S 波速度の伝播時間が同じとなるようにモデル化している。これらのモデルを用いて、まず第 1 に、重複反射理論による S 波の増幅率の検討、第 2 に、波数積分法⁶⁾による千葉県北西部で 2003 年 8 月 18 日に発生した Mj4.7 の小地震（図 2）の観測記録のシミュレーション、第 3 に、Amplitude Response⁷⁾

による表面波の励起効率の検討、を実施しモデル間での比較から漸増構造の影響を考察した。なお、2) で用いた地震は鉛直一次元構造の影響が強く反映され、かつ地震基盤での波が単純である地震を選択している。

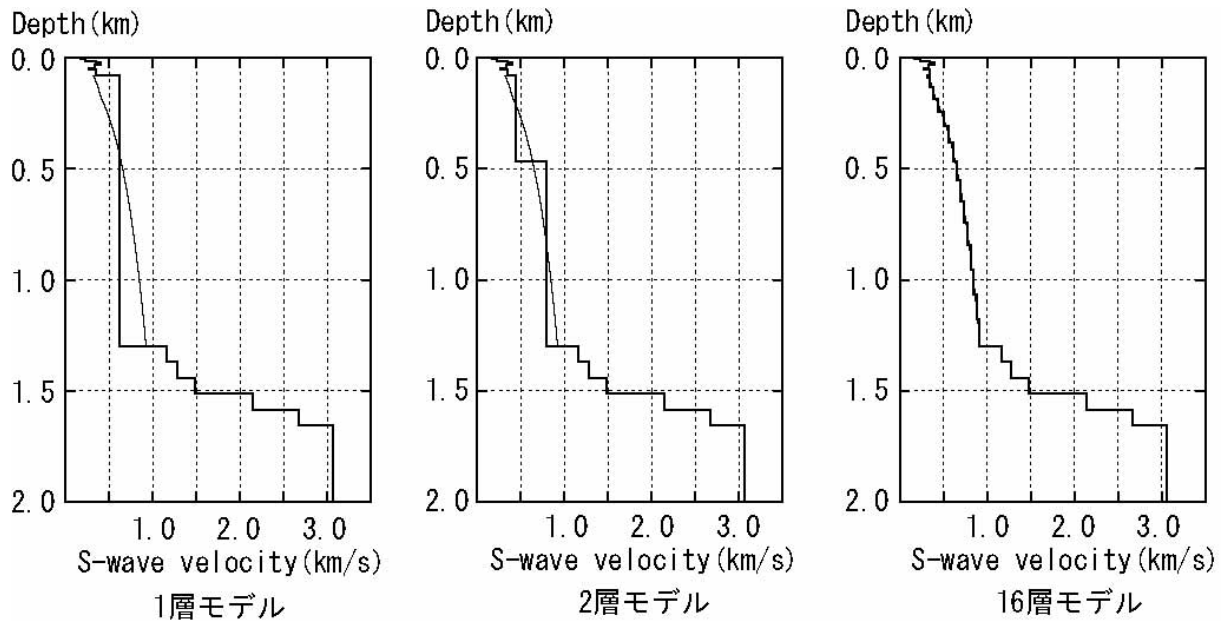


図1 検討に用いた一次元モデルのS波構造

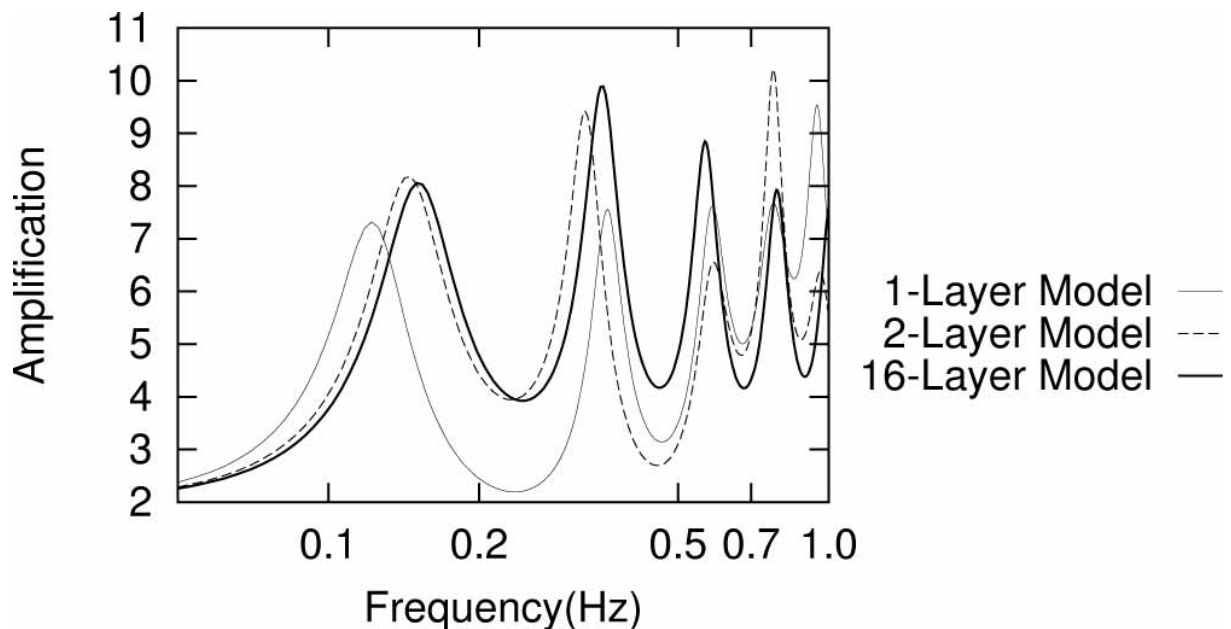


図2 各モデルによるS波増幅率の比較

(c) 業務の成果

図3は1層、2層、16層モデルによるS波の増幅率の比較である。各モデルで増幅のピークの振動数はほぼ一致しているもののピークの高さは異なり、漸増構造の影響が認められる。例えば0.3Hz付近の二次ピークの高さは1層モデルで約7、16層モデルで約10となる。

っている。図 4 は周期 1 秒以上を対象とした観測記録とシミュレーションの比較である。堆積層の S 波の多重反射波（図中▲）に着目すると、16 層モデルの計算波では再現されているのに対して、他のモデルの計算波では明瞭な多重反射波が説明できてない。図 5 は Amplitude Response の比較である。Love 波、Rayleigh 波ともに各モデルで大きく異なり、0.5Hz 前後で 1 層モデルと 16 層モデルで 2~3 倍の励起効率の違いが認められ、S 波の増幅率と比べてより大きな漸増構造の影響が認められる。

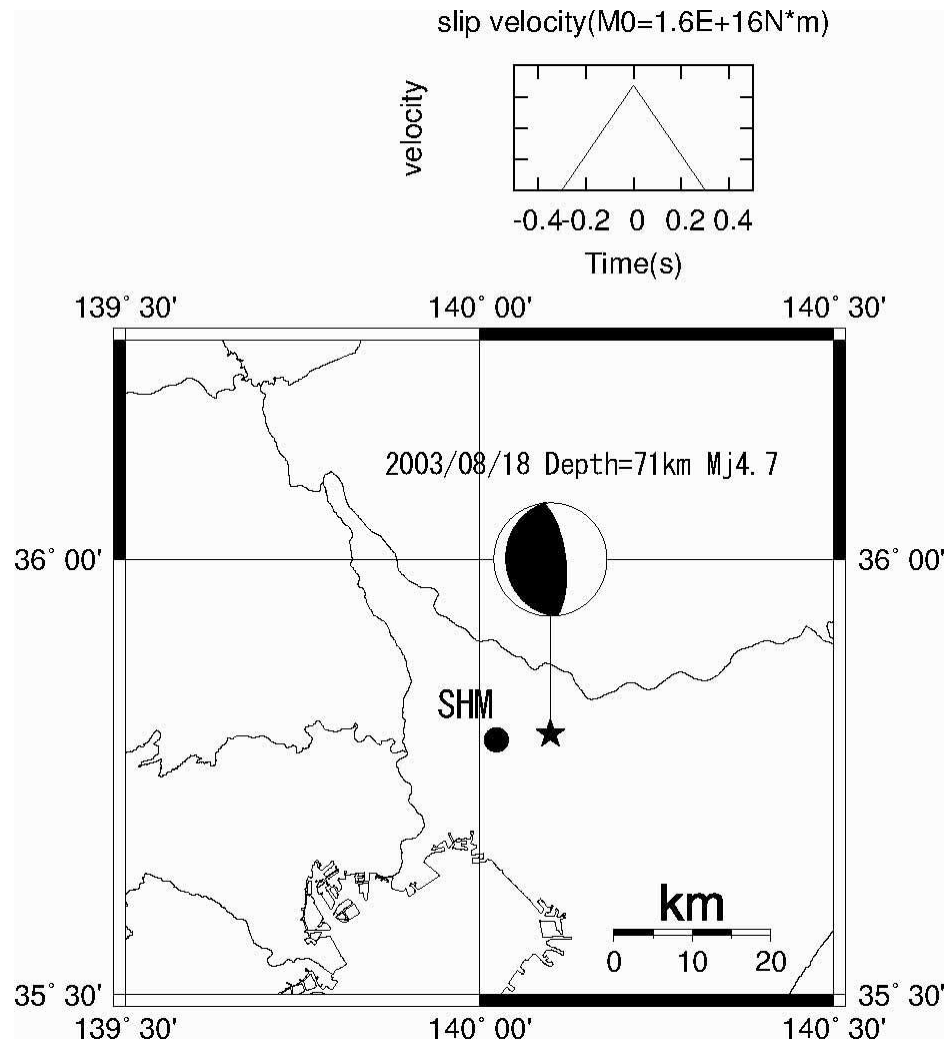


図 3 千葉県北西部で 2003 年 8 月 18 日に発生した Mj4.7 の小地震

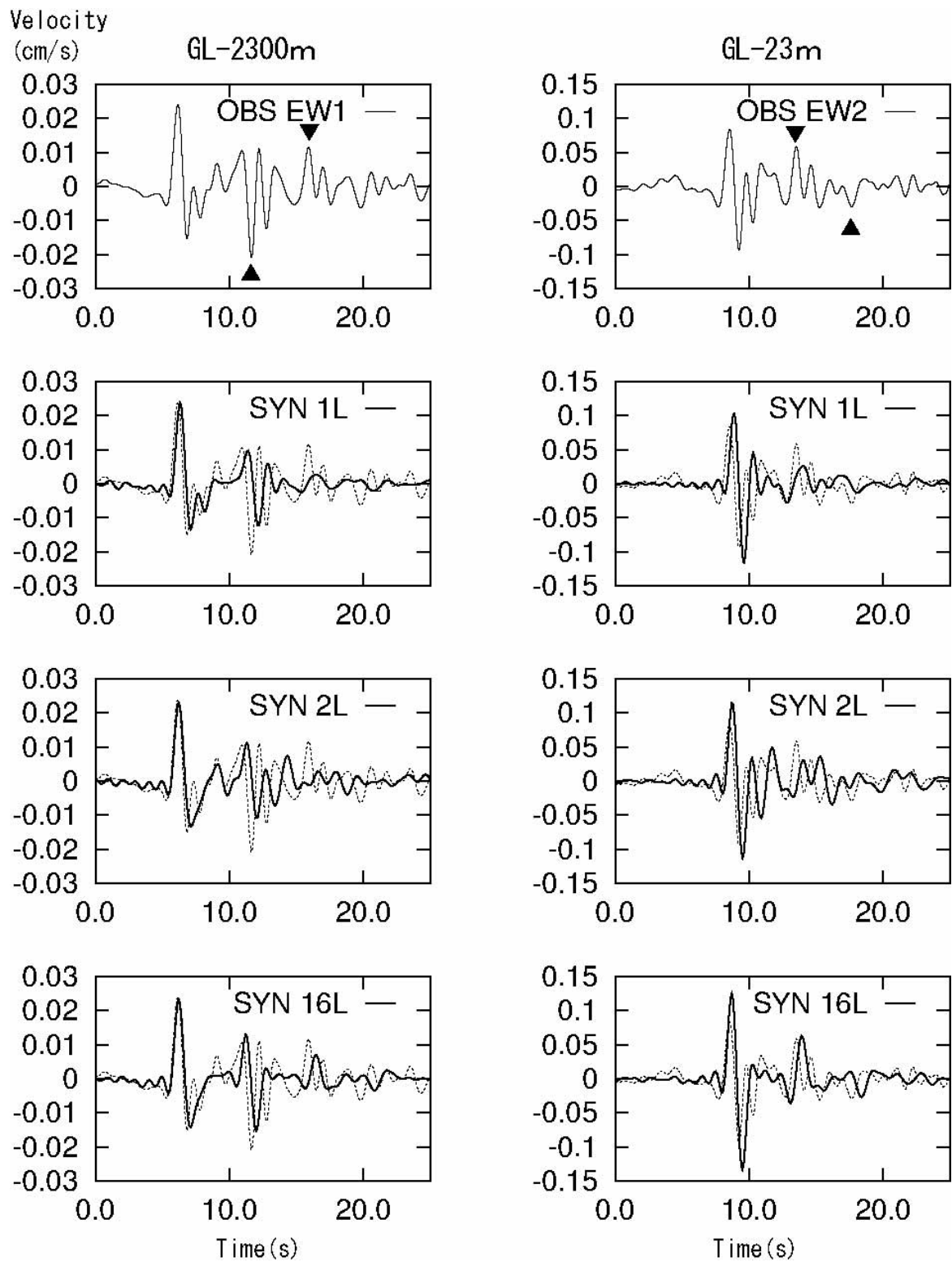


図4 小地震記録のシミュレーション

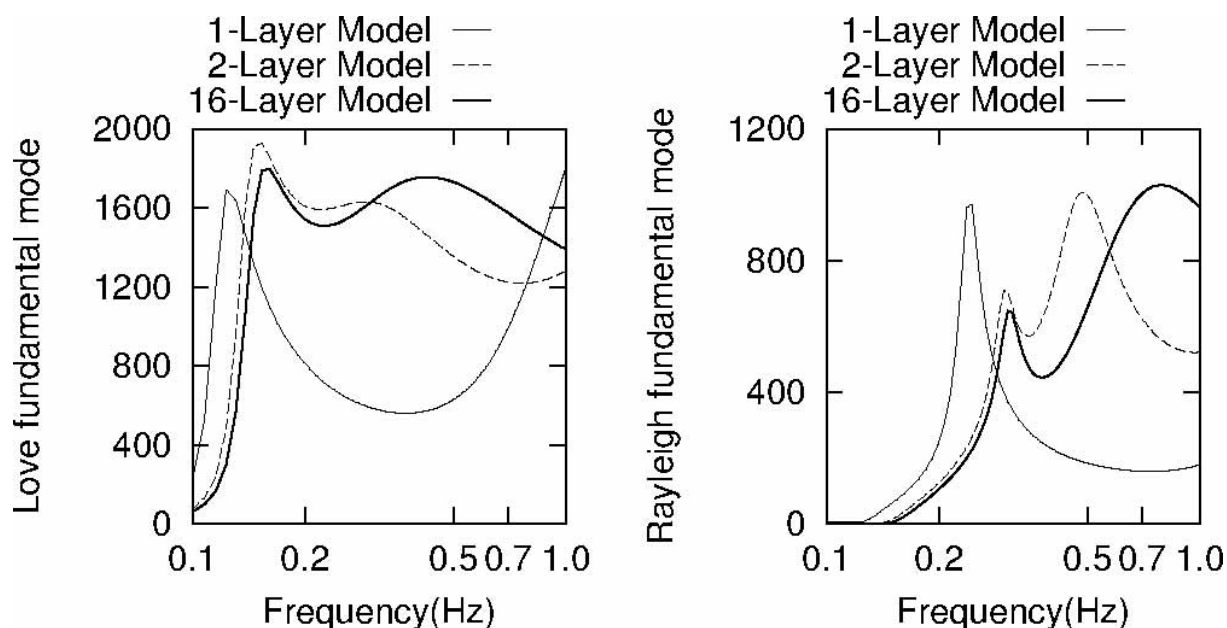


図5 各モデルによる Amplitude Response の比較

(d) 結論ならびに今後の課題

周期1秒以上で検討した結果、漸増構造の有無でS波の増幅率が変化し、地震シミュレーションにおいても漸増構造により観測記録をより良く説明できることが明らかとなった。また表面の励起効率も漸増構造の有無で大きく変化することが明らかとなった。今度構造物の耐震に重要な周期1、2秒といったより短周期までの強震動予測に有用な、高精度な三次元地下構造のモデル化には漸増構造の反映は重要であると考えられる。

(e) 引用文献

- 1) Sato, T., Graves, R.W. and Somerville, P.G.: Three-dimensional finite-difference simulations of long-period strong motions in the Tokyo metropolitan area during the 1990 Odawara Earthquake (Mj5.1) and the Great 1923 Kanto Earthquake (Ms8.2) in Japan, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.89, No.3, pp.579-607, 1999.
- 2) 山中浩明, 山田伸之: 微動アレイ観測による関東平野の3次元速度構造モデルの構築, 物理探査, Vol.55, No.1, pp.53-65, 2002.
- 3) 山水史生: 深層観測井VSPによるS波速度構造, 地震学会講演予稿集, pp.63-63, 2001.
- 4) 山水史生: 首都圏におけるやや深い構造の地震波速度, 防災科学技術研究所研究報告, Vol.56 pp.1-32, 1996.
- 5) 川崎市: <http://www.hp1039.jishin.go.jp/kozo/kawasaki3/mokuji.htm>, 1998.
- 6) Hisada, Y.: An efficient method for computing Green's functions for a layered half-space with sources and receivers at close depths (Part2), Bull. Seism. Soc. Am., 89(3) pp.579-607, 1999.
- 7) Harkrider, D.G.: Surface waves in multilayered elastic media. PartII., Bull. Seism. Soc. Am., Vol.60, No.6, pp.1937-1987, 1970.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

なし

(g) 特許出願

なし

(2-3) 3次元地震動シミュレーションにおける減衰構造モデルについての検討

佐藤浩章（電力中央研究所）

東 貞成（電力中央研究所）

芝 良昭（電力中央研究所）

(a) 業務の要約

より現実的な減衰構造のモデル化を目的として、鉛直アレイ観測記録から同定された Q 値の3次元シミュレーションにおける適用性、および Q 値の周波数依存性と S 波速度の揺らぎの関係について検討した。大深度ボーリングによる鉛直アレイ観測が実施されている千葉県北西部を対象に3次元シミュレーションを実施した結果、慣用的に用いられる Q 値 ($V_s/15$) を用いた場合では観測値を最大2倍程度上回るのに対し、同定された Q 値を用いた場合は、対象領域全体において観測記録に対して良好な結果を与えることが分かった。さらに、 S 波速度の揺らぎを考慮して Q 値の同定を行った結果、5Hz程度までは周波数依存性を考慮せずに観測記録をほぼ説明できること、また Q 値の周波数依存性は、速度構造の平均化による増幅効果の減少分を補うための見かけ上の減衰であることから、 S 波速度の揺らぎを考慮することにより、 Q 値の周波数依存性を結果的に考慮できる可能性を示した。

(b) 業務の実施方法

1) はじめに

3次元地震動シミュレーションの高精度化のためには、詳細な地下構造モデルの構築とともに減衰構造のモデル化が必要となる。地下構造モデルについては、近年、数多くの地下構造探査が精力的に実施されていることから、これらの結果を統合することによるモデル精度の向上が期待されている。その一方で、減衰構造モデルについては、これまでほとんど検討されていないのが現状である。減衰 (Q 値) の測定については、物理探査や室内実験における対象周波数が地震動シミュレーションと異なるということもあり、地震記録を用いる方法が妥当であるといわれている例えば¹⁾。地震記録を用いて3次元的な Q 構造を推定する方法としては、トモグラフィ手法²⁾が考えられるが、堆積層の減衰構造への適用事例はなく、その適用性については未知数である。一方、1次元を対象とした方法ではあるが、鉛直アレイの地中記録に対する地表記録のスペクトル比を地盤の伝達関数とみなし、重複反射理論を用いた逆解析により Q 値を求める方法は、これまでも数多くの適用事例があり例えば³⁾、1次元の波動計算においては最も現実的な Q 値であることが知られている。そこで当研究では、大深度ボーリングによる鉛直アレイ観測が実施されている千葉県北西部を対象として、鉛直アレイ記録の逆解析により推定された地震基盤までの堆積層の Q 値を用いて3次元地震動シミュレーションを実施し、1次元的な手法に基づく Q 値の空間的な広がりをもつ3次元シミュレーションに対する適用性を検討する。

また、鉛直アレイ記録の逆解析により推定される Q 値は周波数依存性を呈するが、差分法等による3次元シミュレーションでは Q 値の周波数依存性を考慮することは困難である。しかしながら、 Q 値の周波数依存性を散乱減衰と考えれば、堆積地盤の S 波速度の揺らぎを地下構造モデルに考慮することにより、3次元シミュレーションにおいて周波数依存型の減衰を結果的に考慮できる可能性がある。そこで当研究では、詳細な速度検層が実施さ

れている鉛直アレイ観測地点において、詳細な S 波速度構造を用いて鉛直アレイ記録から Q 値の同定を行い、平均的な S 波速度構造を用いた場合と比較することにより、地盤の S 波速度の微細な揺らぎによる減衰の周波数依存性の変化について検討した。

2) 3 次元地震動シミュレーションにおける同定 Q 値の適用性の検討

3 次元地震動シミュレーションは図 1 に示す 23.84km×29.28km の領域である⁴⁾。対象領域では、防災科学技術研究所の K-NET 以外に、千葉県による市役所（一部、町役場）の震度計ネットワークと電力中央研究所による計 15 地点の地震観測点がある。Q 値の同定は、図 1 の SHM 地点（下総地震観測井）における鉛直アレイ記録を用いて行った⁵⁾。本研究で対象とした地震記録は、モデル領域内の直下で発生した 1998 年 11 月 8 日の千葉県中央部の地震で M4.9、深さ 78km である。

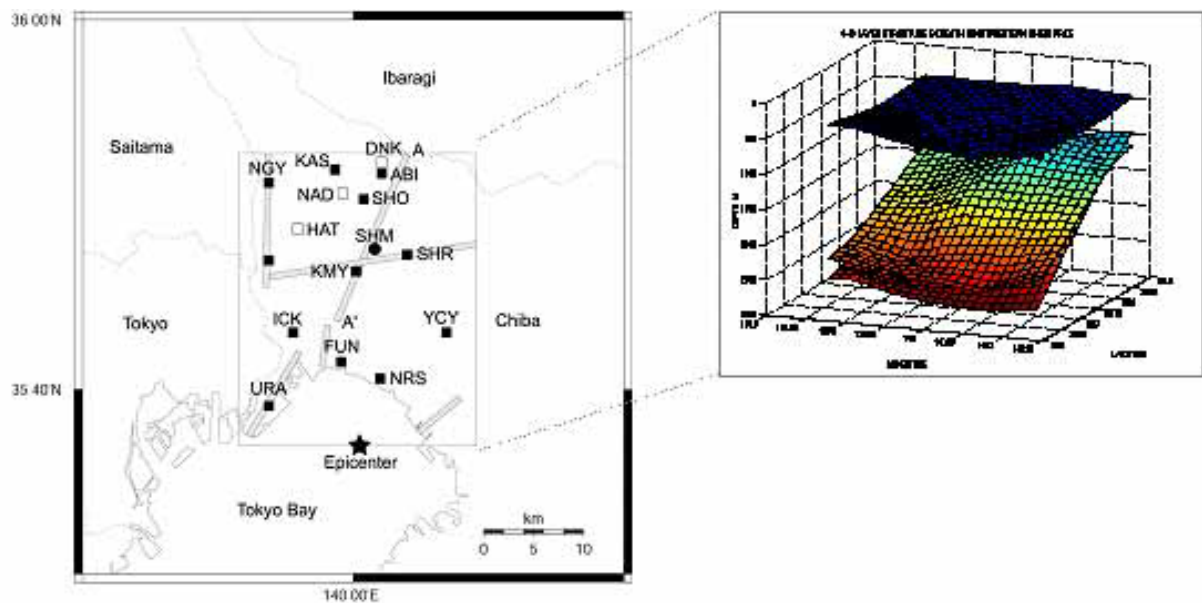


図 1 3 次元シミュレーションの対象領域と 3 次元地下構造モデル

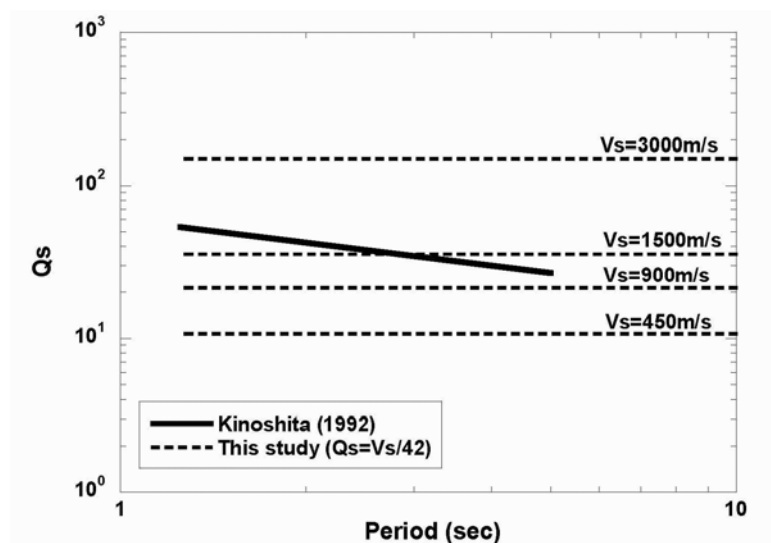


図 2 SHM 地点における同定 Q 値と既往の研究の比較

Q 値は昨年度の SHM 地点における鉛直アレイ記録の同定結果である $Q_s=V_s/42$ を用い、また慣用的に用いられている $Q_s=V_s/15$ を用いた 3 次元シミュレーションも同様に行うことにより、同定 Q 値の妥当性について検討した。なお、SHM 地点では、Kinoshita⁶⁾により Q 値が推定されており、本研究で対象とする周波数範囲において周波数依存性を考慮した値が得られている。図 2 に両者の比較が示されているが、SHM 地点において優位に存在する S 波速度 900m/s および 1500m/s 層の Q 値は、同定値によればそれぞれ 21.4 と 35.7 であり、Kinoshita⁶⁾による周期 1 秒以上の Q 値にほぼ含まれる値となっている。したがって、同定結果の Q 値は、対象とする周波数範囲でおおむね妥当な値であると考えられる。

震源については点震源を仮定し、震源時間関数は立ち上がり時間 1 秒の ramp 関数とし、その一階時間微分を時間幅 1 秒の擬似デルタ関数 (Herrmann 関数) とした。震源パラメータについては、F-net によるメカニズム解を用い、地震モーメントについては SHM 地点の深さ 2300m 地点における観測記録を用いて、その波形を説明できるような値を試行錯誤的に決定した。推定の結果として得られた地震モーメントは 2.90×10^{16} Nm であり、図 3 には SHM 地点の深さ 2300m における観測波形と計算波形の比較が示されている。

地震動シミュレーションは、X、Y 方向の応力に関する空間微分を FFT で行い、Z 方向の空間微分については 4 次精度の差分近似で行う、擬似スペクトル法 (PSM) と差分法 (FDM) のハイブリッド手法⁷⁾を用いた。Q 値の考慮方法については Graves⁸⁾による方法を採用し、基準周波数は Sato et al.⁹⁾と同様に 0.2Hz とした。

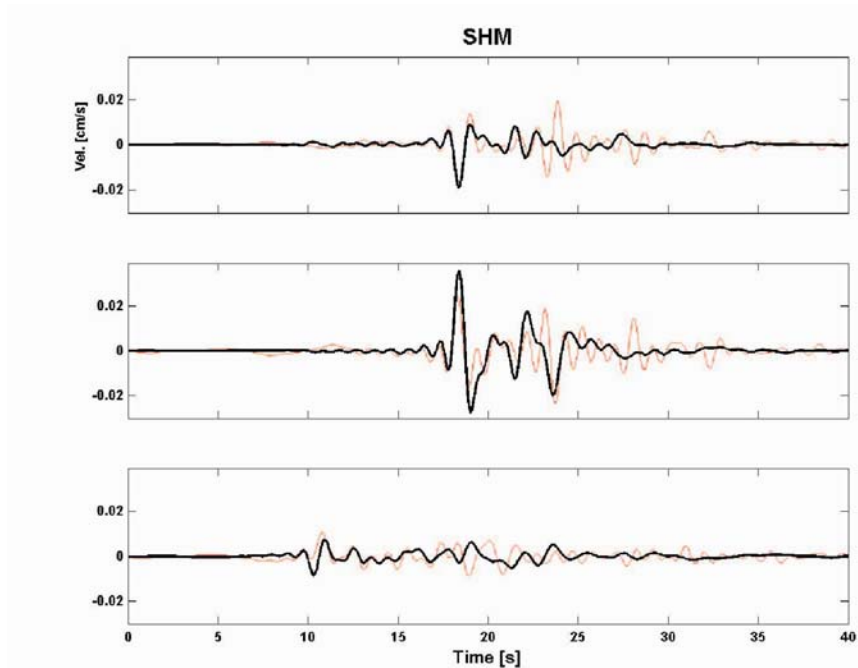


図 3 SHM 地点 (GL-2300m) における波形の比較 (太線：計算値，細線：観測値)

本研究では、対象とする地震の深さが 78km と深いため、計算にあたり地下構造モデルを演算プロセッサ (PU) の数だけ Z 方向について分割し、PU 毎にそれぞれの小領域の計算を行う並列化を施した。シミュレーションにおける地下構造モデルの離散化間隔は、X、Y 方向は 160m、Z 方向は堆積層を含む深さ 7.2km までの部分を 80m、モホ面までを 160m、それ以深を 320m とした。なお、時間刻みは 0.005 秒として 8000 ステップ (40 秒間) の計算を行

った。

3) 地盤の S 波速度の揺らぎと Q 値の周波数依存性に関する検討

対象地点は、茨城県鹿嶋市にある深さ 500m の厚い第四紀地盤における鉛直アレイ観測地点 (KSM) である。当該地点では、深さ 50m までは 1m おき、それ以深は 2m おきのサスペンション速度検層による S 波速度構造が得られている。図 4 に、速度検層結果による S 波速度構造が示す。また、差分法などによる 3 次元計算では、図 4 のような詳細な速度構造は高々 2 層程度で扱われることから、平均化した構造も図 4 に併せて示す。なお、これら 2 つの S 波速度構造における深さ 500m から地表までの S 波の走時は等しい。また、Q 値の同定解析には、周期 1 秒以上の成分を有意に含んだ 1996 年 3 月 18 日の千葉県東方沖の地震 (M6.2、深さ 52km) の記録を用いることとした。

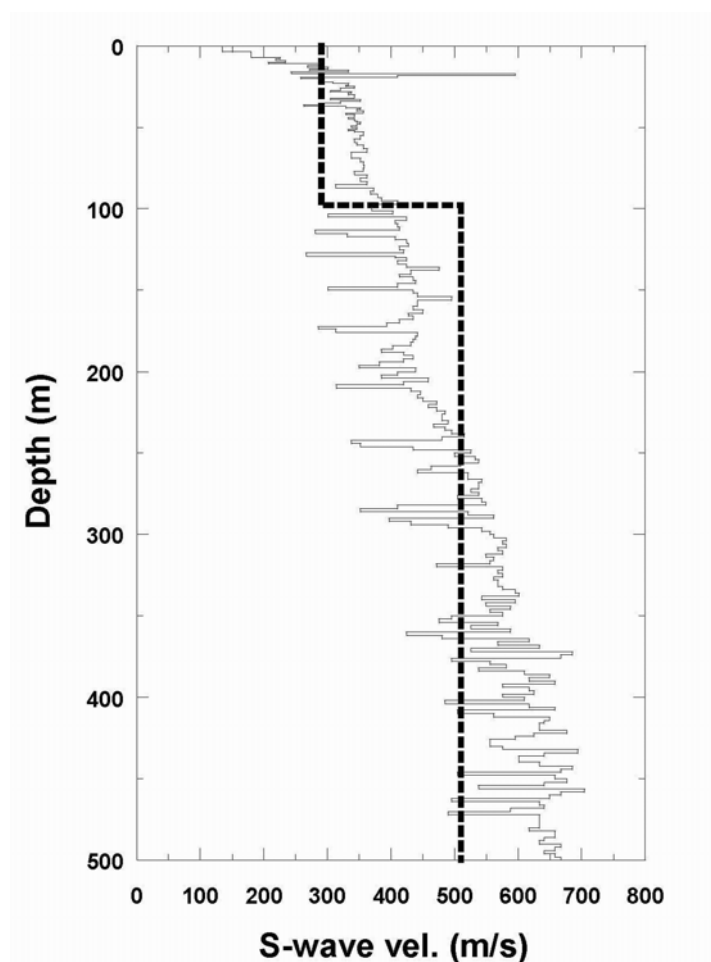


図 4 KSM 地点におけるサスペンション速度検層による S 波速度構造

鉛直アレイ記録を用いた Q 値の同定は、スペクトル比に対するフィッティングにより行われることが多いが、既往の研究から、詳細な速度構造と平均的な速度構造の違いは S 波主要動および後続波の波形に対して表れることが考えられる。そこで本研究では、地中記録 (GL-502m) から地表記録を計算し、地表での観測記録をフィッティングの対象として Q 値の同定を行った。同定する変数としては、S 波速度は層数が多いことから速度検層の値で固定し、周波数 (f) 依存性を考慮した Q 値 ($Q^{-1}=Q_0^{-1}f^{-\alpha}$) のみを対象とした。なお、Q

値については全層同一であると仮定している。同定には遺伝的アルゴリズム (GA) を用い、各変数の探索範囲は、 Q_0-1 については 0.01 から 1.0、 α については 0.01 から 1.5 とした。地中記録から地表面記録の計算については、SH 波の鉛直入射を仮定した 1 次元波動論により行った。そのため、観測記録は気象庁の震源位置情報をもとに座標変換により Transverse 成分に変換して用いた。

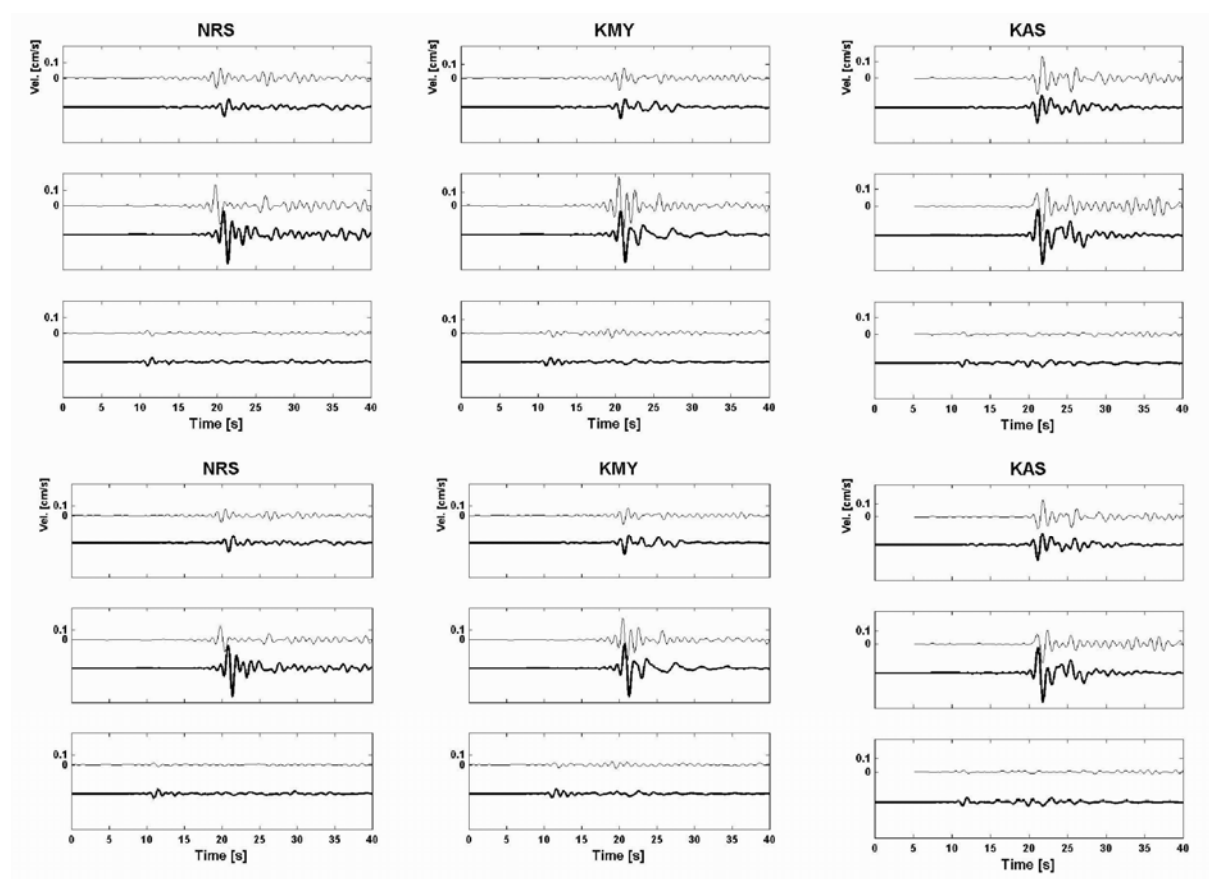


図 5 観測波形(細線)と計算波形(太線)の比較 (上: NS, 中: EW, 下: UD)

(c) 業務の成果

1) 3 次元地震動シミュレーションにおける同定 Q 値の適用性

図 5 上段に、同定 Q 値 ($V_s/42$) を用いて計算された柏 (KAS)、鎌ヶ谷 (KMY) および習志野 (NRS) における観測波形と計算波形の比較を示す。また、図 5 の下段には同様の 3 地点における慣用的な Q 値 ($V_s/15$) を用いた場合の観測波形と計算波形の比較を示す。なお、波形には周期 1 秒から 10 秒のバンドパスフィルター処理が施されている。

全体として計算波形は、観測波形にみられる S 波初動部の位相を良好に説明できている。ただし、対象領域の南部に関しては計算波形の初動の到達が観測波形に比べて遅れていることが分かる。図 1 の地下構造モデルによれば、南部では北部に比べて上総層が 2 倍以上も厚いことから、上総層の S 波速度について検討する必要性が考えられる。

Q 値の影響を受ける振幅に関しては、対象領域北部の KAS 地点において、慣用的な Q 値による計算波形は、観測波形を 2 倍近く上回る結果となっているのに対し、同定 Q 値による計算波形は観測波形を若干上回っている程度である。さらに対象領域中央部の KMY 地点に

においては、同定 Q 値による計算波形は観測波形に非常によく一致していることが分かる。これは、Q 値の同定が対象領域の中央部の SHM 地点における結果であるため、同じ中央部である KMY 地点においても同定 Q 値を用いるにより計算精度が向上したと考えられる。一方、慣用的な Q 値については KMY 地点においても観測波形を上回っている。対象領域南部の NRS 地点においては、慣用的な Q 値では計算波形の最大振幅が観測波形の 2 倍を超える程度となっているのに対し、同定 Q 値による計算波形は観測波形を若干上回る程度である。

2) 地盤の S 波速度の揺らぎと Q 値の周波数依存性の関係

図 6 には、2Hz のローパスフィルターを通した地中記録から詳細な S 波速度構造により計算された地表記録と観測記録との比較を示す。ここで同定された Q 値 (Q^{-1}) は 0.1 (減衰定数で 5%) である。また図 6 には、平均化された 2 層構造により計算された地表記録と観測記録の比較を示す。なお Q 値は、詳細な速度構造を用いて同定された値を用いている。地表面波形の比較から、詳細な S 波速度構造により計算された地表面波形は、Q 値の周波数依存性を考慮しなくても 2Hz までの観測波形を非常によく説明していることが分かる。また、平均化された 2 層構造においても、S 波主要動の部分若干過小評価してはいるが、おおよそ観測記録を説明できている。これは、本研究と同様に波形をフィッティング対象とした堀家¹⁰⁾の結果においても、2Hz 程度までは周波数依存性を考慮しない Q 値で観測記録を説明できており、妥当な結果であると考えられる。

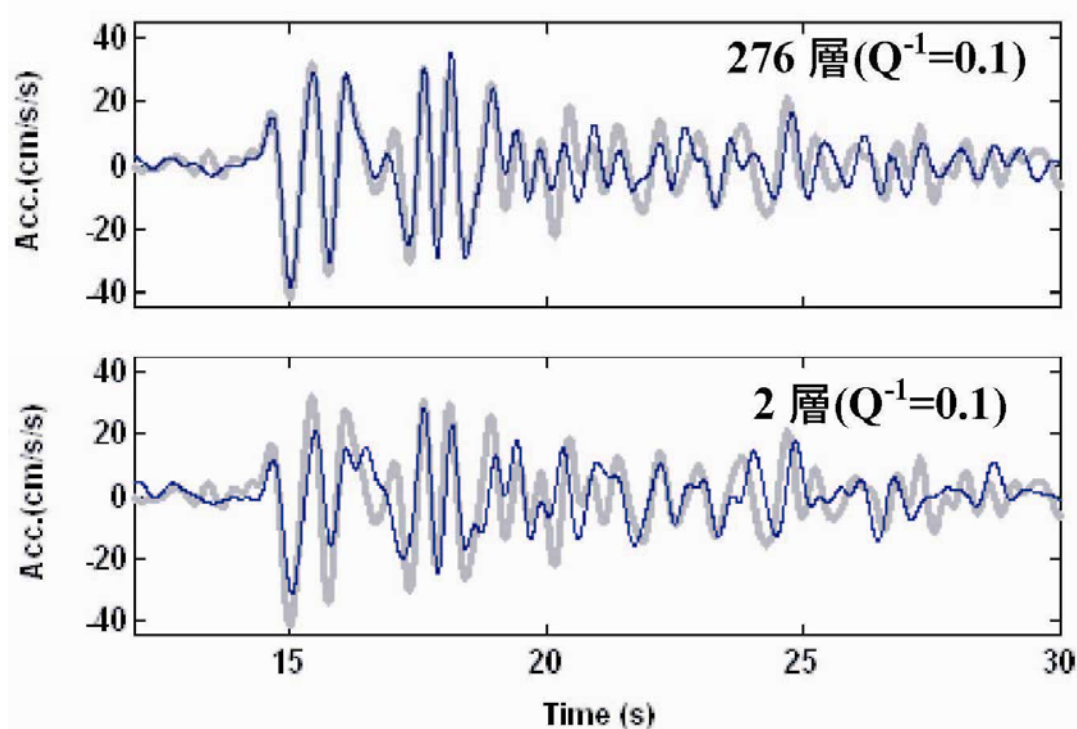


図 6 詳細な S 波速度構造 (上段) と平均化された S 波速度構造 (下段) による観測波形と計算波形の比較 (～2Hz)

さらに図 7 には、5Hz のローパスフィルターを通した地中記録から詳細な S 波速度構造により計算された地表記録と観測記録との比較を示す。ここで同定された Q 値 (Q^{-1}) も 2Hz のローパスフィルターを通した波形の場合と同様に 0.1 (減衰定数で 5%) であった。また、図 7 には平均化された 2 層構造により計算された地表記録と観測記録の比較も併せて示されており、図 7 の中段は詳細な速度構造により同定された Q 値、下段は同定値に対して周波数依存性 ($\alpha=0.7$) を考慮した Q 値を用いている。図 7(上)から、詳細な S 波速度構造による地表面波形は、Q 値の周波数依存性を考慮しなくても観測波形をほぼ説明できているが、図 7(中)に示すように平均化された S 波速度構造では振幅の過小評価の程度が 2Hz のローパスフィルターを通した波形の場合に比べて全体的に顕著になっている。一方、図 7(下)に示すように、高周波数ほど減衰が小さくなるような周波数依存性を考慮すると、平均化された速度構造による波形の一致度は改善され、詳細な S 波速度構造による結果に近くなっている。これはつまり、鉛直アレイ記録から同定される高周波数ほど減衰が小さくなる Q 値は、速度構造が平均化されたことによる高周波数側の増幅効果の減少分を補うための見かけ上の減衰であることを意味していると考えられる。ここで、当該地点の 100m 以浅における S 波速度の揺らぎの自己相関関数から 1 次散乱理論に基づいて散乱減衰を推定すると¹¹⁾、図 8 に示すように、散乱減衰は地震動予測の対象周波数 (0.1~10Hz 程度) において高周波数ほど増大し、鉛直アレイ記録から同定される Q 値とは逆の傾向を示すことが分かる。

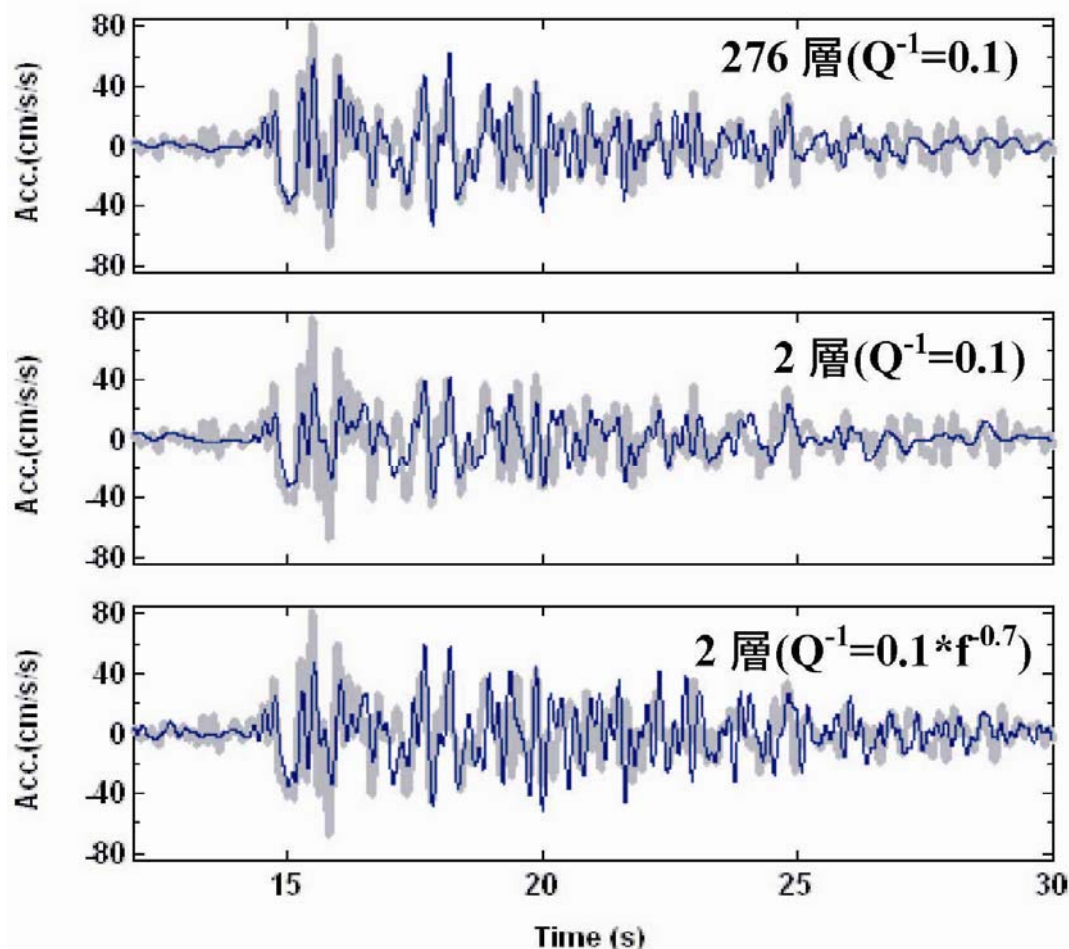


図 7 詳細な S 波速度構造 (上段) と平均化された S 波速度構造 (中・下段) による観測波形と計算波形の比較 (～5Hz)

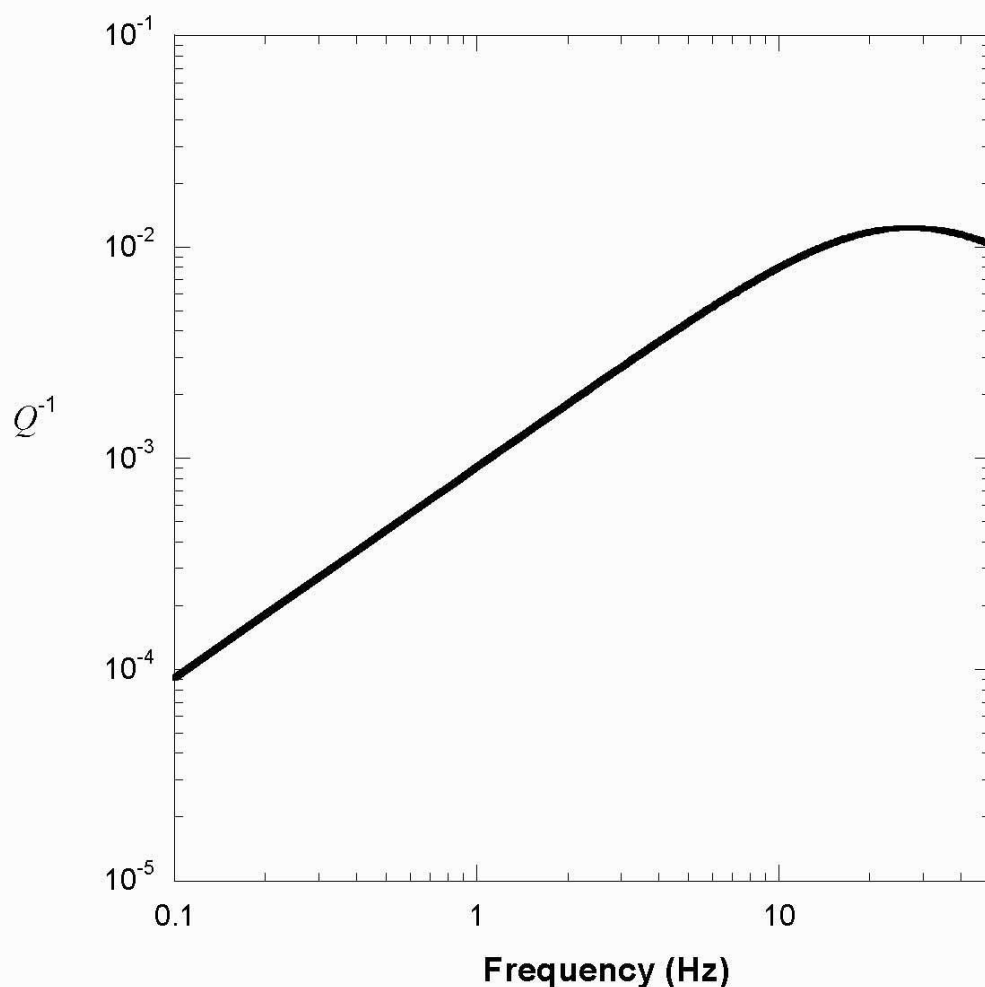


図8 KSM地点のS波速度の揺らぎ（～GL-100m）から推定される
散乱減衰の理論値

(d) 結論ならびに今後の課題

大深度ボーリングにおける鉛直アレイ観測が実施されている千葉県北西部地域においては、慣用的な Q 値と鉛直アレイ記録により同定された Q 値を用いて3次元地震動シミュレーションを実施した。その結果、慣用的な Q 値では振幅を最大で2倍程度大きく見積もる結果となるのに対し、同定された Q 値は観測波形の振幅レベル良好に再現することができた。これにより、1次元的な計算に基づく逆解析から同定された Q 値が、空間的な広がりをもつ3次元地震動シミュレーションにも適用可能であることが分かった。

詳細なS波速度構造を用いて Q 値の同定を行った結果、5Hz程度までは周波数依存性を考慮しない Q 値により観測記録をほぼ説明できることが分かった。一方、3次元計算に用いられるような平均化されたS波速度構造では、高周波数側の増幅効果が、詳細なS波速度構造に比べて低減されることから、高周波数ほど減衰が小さくなるような周波数依存性を Q 値に考慮しないと計算結果が過小評価となることが分かった。つまり、同定された Q 値にみられる周波数依存性は、速度構造が平均化されたことによる見かけの減衰効果によるものと考えられることから、S波速度の揺らぎを考慮した詳細なS波速度構造を用いることにより、さらに高周波数側までの3次元シミュレーションを Q 値の周波数依存性を考

慮することなく行うことができる可能性がある。

最近、関東平野の大深度ボーリングにおける地震記録が防災科学技術研究所の KiK-net において公開されている。したがって、今後はこれらの観測記録をもとに関東平野全域での厚い堆積層内部の Q 値の同定を実施する。また、当研究の後半部における検討は、1 次元的な計算であるため、3 次元波動場においても同様の結果が得られるか検証する必要がある。したがって、堆積平野における S 波速度の揺らぎに関する情報を収集し、 S 波速度の揺らぎを考慮した 3 次元 S 波速度構造を構築する必要がある。さらに平均的な 3 次元 S 波速度構造との比較を通して、 S 波速度の揺らぎを考慮することにより減衰構造が再現されているか検証する必要がある。

(e) 引用文献

- 1) 山中浩明：関東平野の地下構造のモデル化と地震波シミュレーション，強震動予測－その基礎と応用、日本地震学会強震動委員会，23-48，2003.
- 2) 中村亮一，植竹富一：加速度強震計記録を用いた日本列島下の三次元減衰構造トモグラフィ，地震 2，Vol. 54，pp. 475-488，2002.
- 3) 武村雅之，池浦友則，高橋克也，石田寛，大島豊：堆積地盤における地震波減衰特性と地震動評価，日本建築学会構造系論文報告集，Vol. 446，pp. 1-11，1993.
- 4) 千葉県：第 2 回堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集，平成 13 年 3 月，2001.
- 5) 佐藤浩章，東貞成，芝良昭：千葉県北西部における 3 次元地震動シミュレーション，大都市大震災軽減化特別プロジェクト I 地震動（強い揺れ）の予測「大都市圏地殻構造調査研究」平成 14 年度成果報告書，2003.
- 6) Kinoshita, S.: "Attenuation of shear waves in a sediment." Proceedings of 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Spain, Vol. 2, pp. 685-690, 1992.
- 7) 古村孝志，瀬瀬一起，竹中博士：大規模 3 次元地震波動場（音響場）モデリングのための PSM/FDM ハイブリッド型並列計算，物理探査，Vol. 53，pp. 294-308，2000.
- 8) Graves, R. W.: "Simulating seismic wave propagation in 3D elastic media using staggered-grid finite differences." Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 86: pp. 1091-1106, 1996.
- 9) Sato, T., Graves, R.W. and Somerville, P.G.: Three - dimensional finite - difference simulations of long-period strong motions in the Tokyo Metropolitan area during the 1990 Odawara earthquake (MJ5.1) and the great 1923 Kanto earthquake (MS8.2) in Japan, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 89, pp. 579-607, 1999.
- 10) 堀家正則：KiK-net データを用いた地盤入射波と地盤 Q 値の同定，日本建築学会大会梗概集，構造 2，pp. 179-180，2002.
- 11) Gorich, U. and Muller, G.: Apparent and Intrinsic Q : the one-dimensional case, J. Geophys., Vol. 61, pp. 46-54, 1987.

(f) 成果論文の発表・口頭発表等

1) 論文発表

なし

2) 口頭発表、その他

著者	題名	発表先	発表年月日
Sato, H., Higashi, S. and Shiba, Y.	Effects of Qs-model on three-dimensional simulation of seismic motion	13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada	平成 16 年 8 月
佐藤浩章	地盤の S 波速度の揺 らぎと Q 値の周波数 依存性の関係	日本建築学会大会 (北海道)	平成 16 年 8 月

(g) 特許出願

なし

(2-4) 関東平野の3次元深部基盤構造と長周期地震動の生成

古村孝志(東京大学地震研究所)

(a) 業務の要約

想定される東南海・東海地震に対する関東平野の地震動応答を、西南日本の地殻・マントル構造と関東平野の詳細な3次元基盤構造モデルを用いた高精度の数値シミュレーションをもとに評価した。高層ビルや長大橋などのような大型構造物の被害に大きく関与する周期数秒の長周期地震動の驚異は、2003年十勝沖地震における苫小牧の石油タンク火災を契機に再度認識されることとなった。そして、これと同様の現象が関東平野でも十分に起きうることを数値シミュレーション結果が示している。想定地震の強震動と被害の評価には、周期1秒以下の短周期地震動の強さを考える「震度」だけでなく、数秒を超える長周期地震動とその長い継続時間についても適切に見積もることが必要である。

(b) 業務の実施方法

1) はじめに

2003年9月26日未明に発生した十勝沖地震(M8.0)は、1994年北海道東方沖地震(M8.2)以来10年降りのM8クラスの巨大地震である。断層の長さが百kmを超える大きな震源断層からは、周期が数秒以上にもなるゆっくりとした揺れ「長周期地震動」が強く生成された。長周期地震動は、たとえば震度に表れるような周期1秒以下の短周期地震動とは全く異なった被害を生む。

2003年十勝沖地震では、震源から150km以上離れた苫小牧の震度は最大5弱に過ぎないにも関わらず、石油タンクの浮き屋根がスロッシングにより大きく損傷したことによる全面タンク火災が引き起こされた。波長の長い長周期地震動は、地下構造の不均質性による散乱減衰や非弾性減衰(Q)による距離減衰が小さく、遠地まで振幅が弱まらない。また、1000~4000mの厚い堆積層を持つ堆積平野に入射すると表面波を生成し、平野内には大振幅の揺れが長時間にわたって継続する。揺れを起す。そして、表面波の卓越周期と構造物の固有周期とが偶然に一致した場合には、共振により構造物が大きく長く揺れることになる。

苫小牧の位置する堆積平野は、日本各地に見られる。人口の密集する大都市の近傍で巨大地震が発生した場合には、同様の被害の発生が十分に考えられる。本研究では、想定される東南海・東海地震地の関東平野の揺れを、高分解能の3次元地下構造モデルと地球シミュレータによる大規模コンピュータシミュレーションから評価する。

2) 2003年十勝沖地震と長周期地震動

図1は2003年十勝沖地震の揺れの伝わる様子を、強震観測網(K-NET、KiK-net)で記録された地震波形記録を3D可視化処理¹⁾することにより示したものである。水平動2成分の加速度記録は速度波形に積分し、観測点間を空間補間することにより面的な震動分布を求めた。このとき、幾何減衰の効果を補正するために、各地点の波動振幅には震源距離に比例した係数を乗じている。

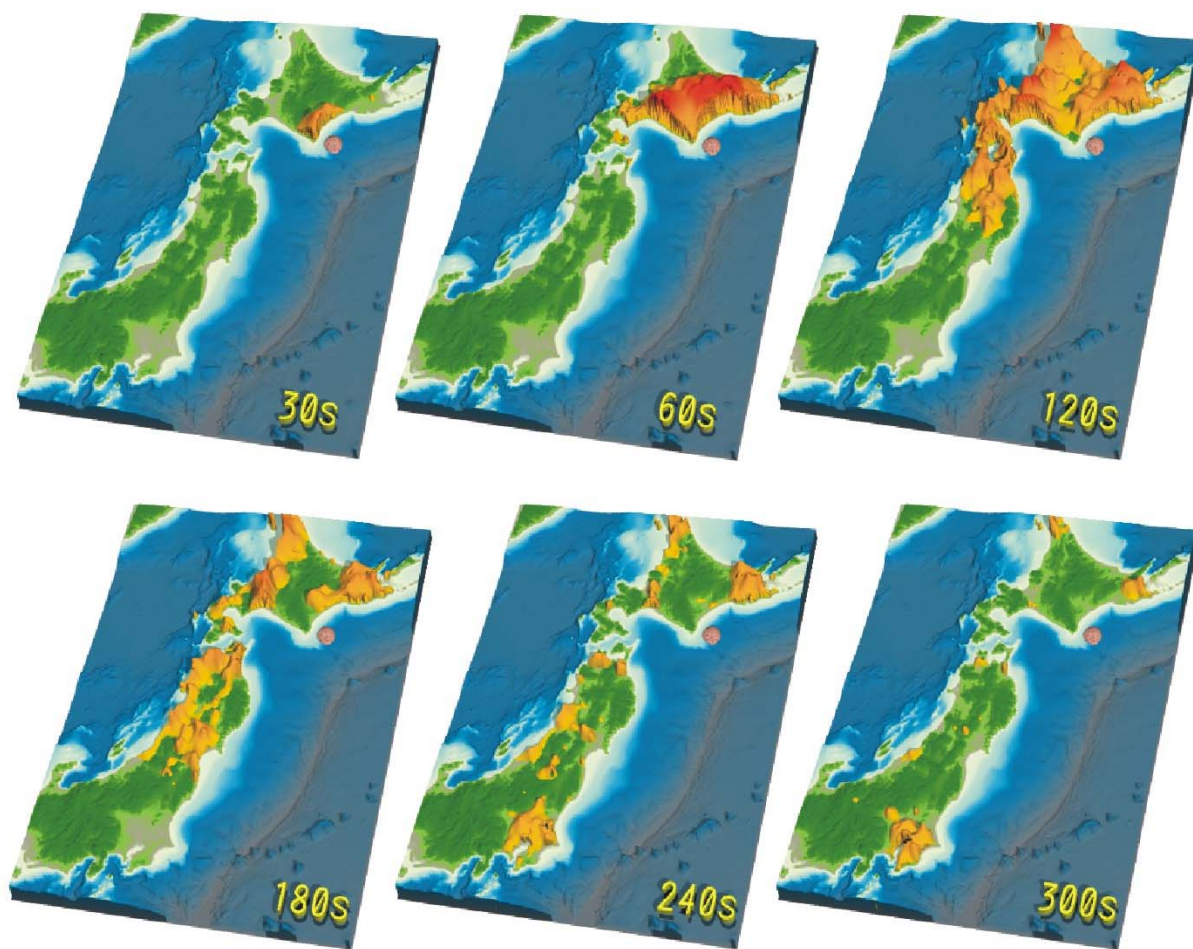


図1 2011年十勝沖地震の地震波動伝播の様子。
K-NET, KiK-net 高密度地震観測網による観測結果

スナップショットを見ると、地震発生から60秒で苫小牧にS波が到達し、120秒後には仙台に近づき、240秒後には関東平野へと伝わる様子がわかる。被害が起きた苫小牧では数cm/s以上の大きな揺れが3分以上にわたって続いていることもわかる。関東平野では震源距離が750km以上も離れているにもかかわらず、大きな揺れが長時間続いていることが確認できる。これには太平洋プレートが地震波が伝わることによる、「異常震域」の影響も含まれていると考えられる。

図2は2011年十勝沖地震の強震記録(K-NET)をもとに、苫小牧(HKD129)と東京(TKY021)の速度応答スペクトル(ダンピング係数 $h=0.05$ の場合)を調べたものである。苫小牧では周期5~8秒において100cm/sを超える大きな速度応答が見られ、これが損傷を起した石油タンクの固有周期(約7秒)とちょうど一致している。石油タンクの浮屋根はダンピング係数が小さい($h<0.01$)ため、実際にはこの2倍以上大きさの揺れが何分にもわたって続いたと考えられる。震源距離が大きい東京では速度応答スペクトルの値自体は小さいが、周期6~12秒において最大8cm/sの大きな応答が起きていることに注意しなければならない。このことは、観測波形にS波の到達の後に、周期が数秒以上の揺れが数分以上にわたって続いていることからわかる。

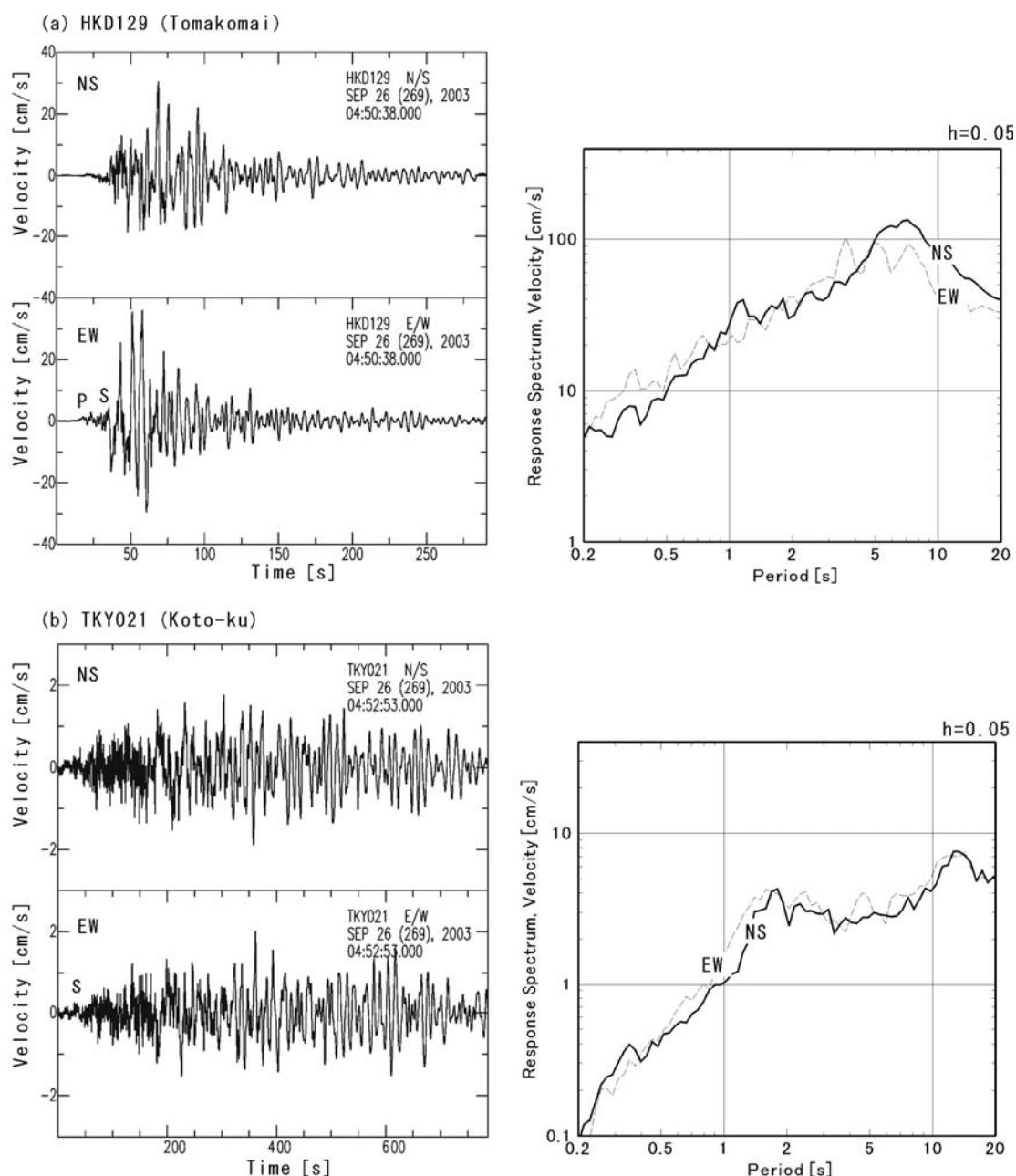


図2 2003年十勝沖地震の速度応答スペクトル、(a) 苫小牧 (HKD129) と (b) 東京都江東区 (TKY021)、ダンピング $h=0.05$ を仮定して計算。

これまでの関東平野における地震観測からも、平野では周期 5～8 秒の表面波が強く発達することがよく知られている（たとえば、Koketsu and Kikuchi, 2002²⁾）。従って、今後起きる東南海・東海地震では、苫小牧で見られたような長周期地震動の生成は確実である。

3) 関東平野の3次元地下構造と長周期地震動

想定される東南海・南海地震の強震動シミュレーションを行い、想定される長周期地震動の評価を行った。想定地震の震源モデルでは、1944年東南海地震 (M8) のもの³⁾と、想定東海地震 (M8) のモデル⁴⁾を結合し、この二つの断層セグメントが紀伊半島南東から東

側に連続して破壊することを考えた。ことき、破壊の進行方向にあたる関東平野では断層破壊のディレクティビティ効果によって強い地震動放射に見舞われる。計算には中央防災会議により編集された西南日本の地下構造モデル⁵⁾を用いた。このモデルでは4層($V_s=0.7\text{km/s}$, 1.4km/s , 2.4km/s , 2.9km/s)基盤の深さ分布が与えられている。また、 V_p 値は $V_p/V_s=1.73$ を仮定して決め、 Q 値や密度値はFurumura et al. (2003)¹⁾などの西南日本のモデルを参考に与えた。フィリピン海プレートの形状は馬場(2003, private comm.)が反射・屈折探査で求められた複数の側線でのデータを統合して作成したものを用い、海洋性地殻と海洋性マンタルの厚さはそれぞれ5kmと20kmとして与えた(図3a)。また海洋性地殻と海洋性マンタルの速度値は周囲のマンタルと比べてそれぞれ-8%、+5%大きく、 Q_s 値はそれぞれ $Q_s=200$ と1000とした。

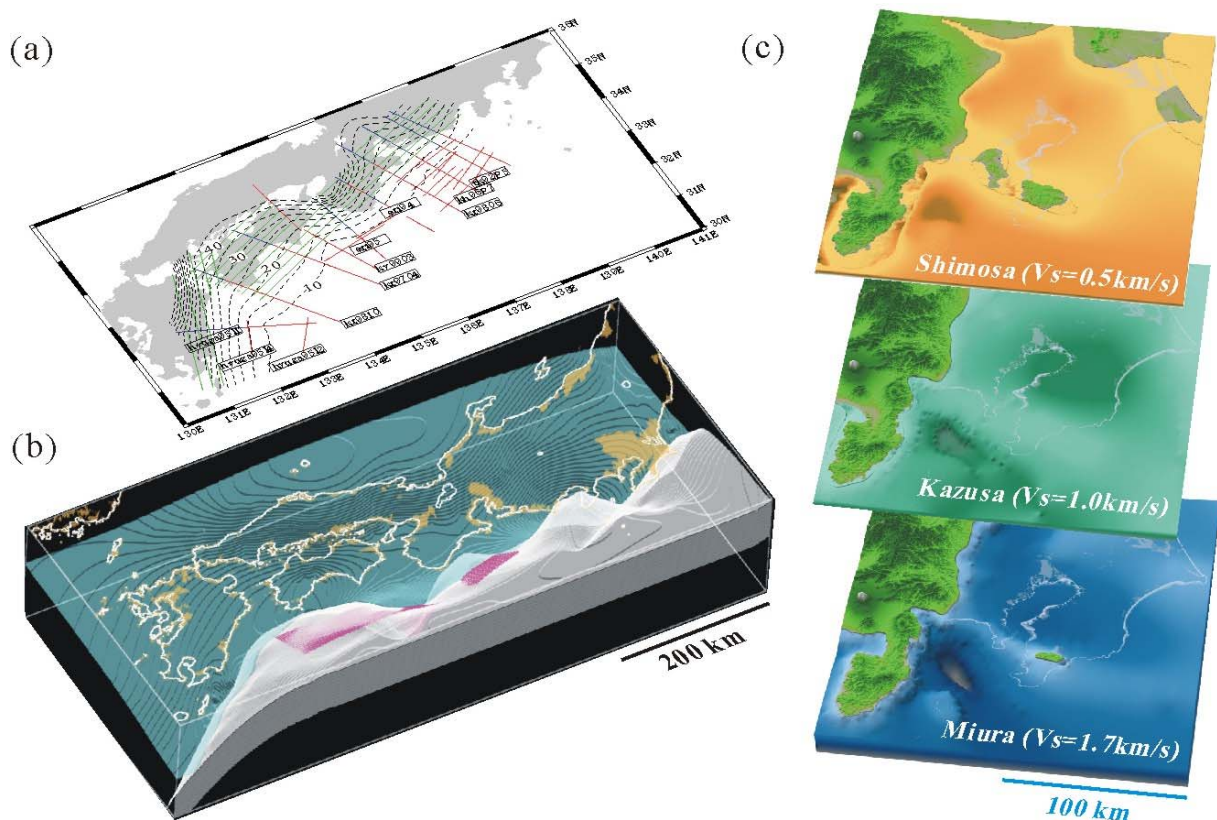


図3 数値シミュレーションに用いた3次元地下構造モデル、(a)フィリピン海プレートの地下構造探査測線(JAMSTEC, 馬場 2003 private comm.)、(b)西南日本の地殻・上部マンタル構造、(c)関東平野の基盤、堆積層構造⁶⁾。

作成した西南日本モデルに対し、関東平野の詳細な基盤深度分布モデル⁶⁾を組み込んだ(図3b)。関東平野の基盤構造は先新第三系基盤岩($V_s=3\text{km/s}$)の上に3層(下総層: $V_s=0.5\text{km/s}$; 上総層: $V_s=1.0\text{km/s}$; 三浦層: 1.7km/s)からなる堆積層により構成されている。

計算を行う領域は紀伊半島から北関東にかけての $820\text{km} \times 410\text{km} \times 120\text{km}$ の範囲とし、格子間隔0.4 kmで離散化した。深さ10km以深はこの2倍の大きさを持つ粗い格子で離散化する「マルチグリッド法」を採用することにより、計算メモリとCPU時間の節約をはかった。波動伝播計算は16次精度のスタガードFDMを用いて行い、周波数0.5Hz以下の地震動を評

価した。なお、地球シミュレータの 256CPU を用いた並列計算には 1.5 時間を要した。

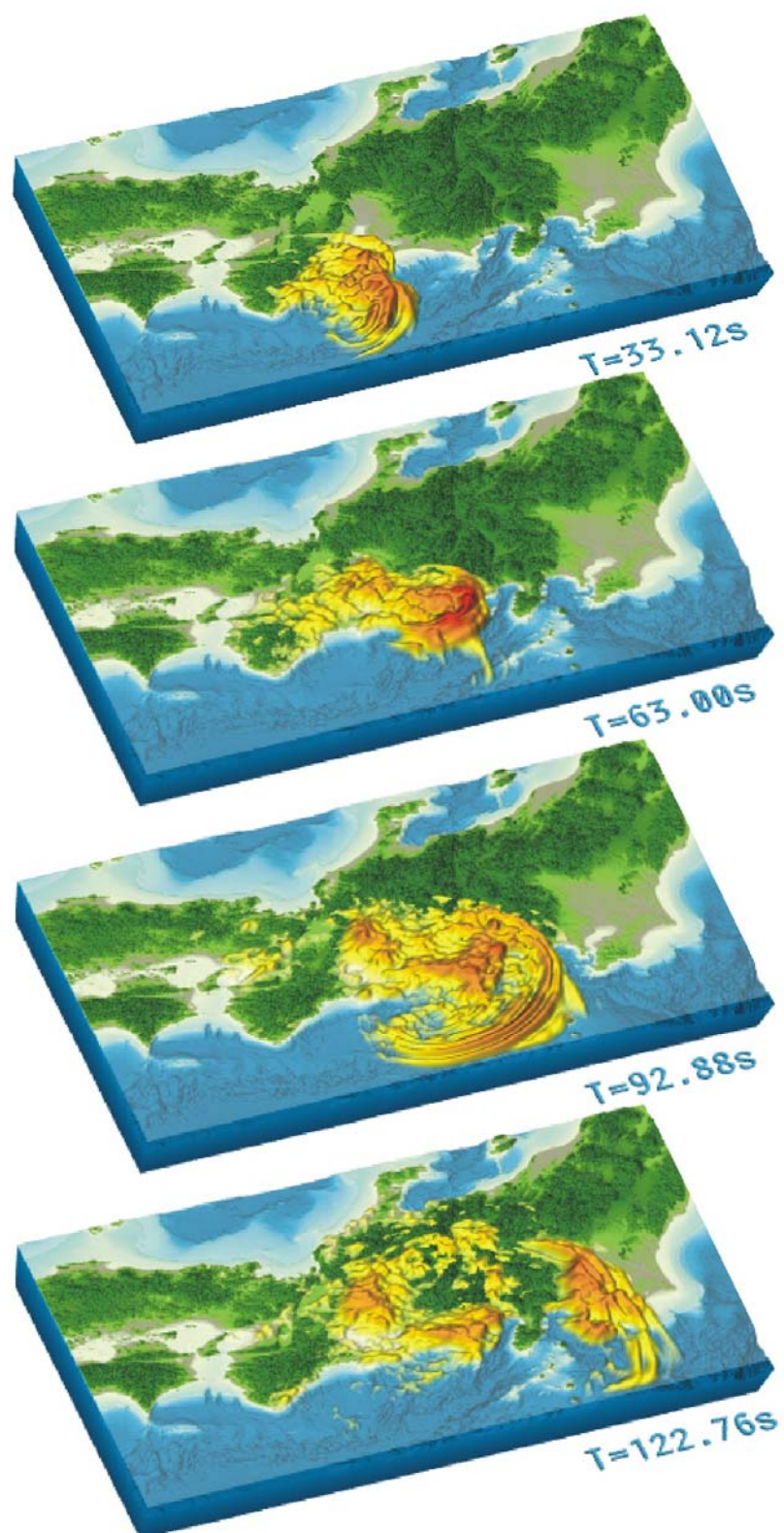


図 4 数値シミュレーションから求められた、想定東南海・東海地震の波動伝播のスナップショット。水平動地動速度を振幅の大きさに応じて色と高さで表示。

(c) 業務の成果

図 4 に、1944 年東南海地震 (M8) と想定東海地震 (M8) が同時に起きた場合を想定した、M8.2 地震の波動伝播のスナップショットを示す。潮岬南端から東側に向けて断層破壊が進行することにより、中部日本から南関東に向けて強い地震波が放射されることが分かる ($T=33s$)。断層サイズが数十 km 以上になる巨大地震では周期が数秒以上の長周期地震動が強く励起し、長い波群を形成しながら日本列島を伝播していく様子も分かる (63, 92s)。大阪や名古屋などの平野では入射波が強く増幅されるとともに、震動が数十秒以上にわたって続く様子も確認できる (92, 122s)。

地震動は関東平野で強く増幅される ($T=122s$)。長い波群を持つ入力波が平野の盆地端で新たな表面波を生成することにより、波群はいつそう長くなる。震動モードの解析から、この表面波には Rayleigh 波と Love 波の両方が含まれていることが確認できた。伊豆半島沖で起きた横ずれ断層型の浅い地震では、関東平野において周期 5~8 秒の Love 波が強く励起されることが報告されている (たとえば、Koketsu and Kikuchi、2002²⁾)。東海・東南海地震のような低角逆断層型のメカニズムを持つプレート境界地震では、SH 波と同時に SV 波も強く励起されるため、これらの波により Rayleigh 波と Love 波の両方が強く生成されることが考えられる。

関東平野の主な 3 地点 (横浜市磯子区、東京都新宿区、千葉県市原市) での速度応答スペクトルを求めると、基盤が比較的浅い (2.5km 程度) 磯子区周辺では周期 6 秒前後において 80cm/s を超える強い応答が見られ (図 5a)、十勝沖地震時の苫小牧と同様の揺れが起きていることがわかる。また基盤深度が 3km を超える新宿区では、大きな揺れが起きる周期帯が 6 秒から 8 秒へと長くなる (図 5b)。そして東京湾の基盤の最深点を通して地震波が到達する市原市ではさらに固有周期が延び、9~10 秒付近での応答が大きくなることもわかる (図 5c)。

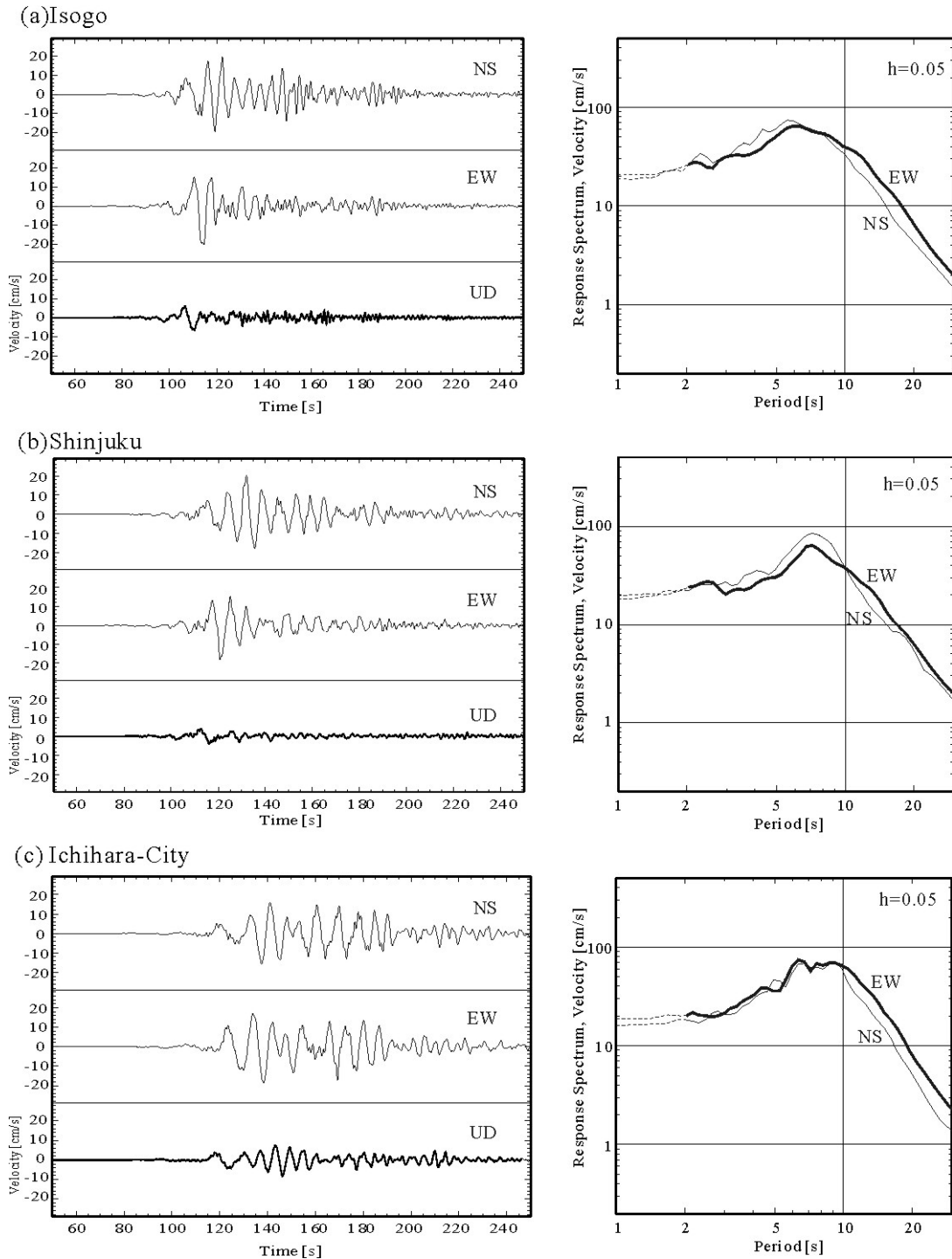


図5 想定東南海・東海地震時の関東平野の揺れの速度応答スペクトル
(a)横浜市磯子区、(b)東京都新宿区、(c)千葉県市原市

(d) 結論および今後の課題

関東平野の地下構造と想定東南海・東海地震の震源モデルを用いた数値シミュレーションにより、以下の結論を得た。

- (1) 将来発生する東南海・東海地震では、関東平野において2003年十勝沖地震時に苫小牧で見られたような長周期地震動が、広い範囲に現れる可能性が高い。
- (2) 周期が数秒を超える長周期地震動の生成とその特性には関東平野の深部(3000~4000m)

基盤構造が大きく関係しており、その予測のために 3 D 基盤深部構造の高精度化が重要である。

(3) 長周期地震動のポテンシャルは「震度」の指標では評価できないため、別の尺度で評価する必要がある。

また、今後の課題として、

(1) 本研究と平行して進められている「大深度弾性波探査」「大規模ボーリング調査」「断層モデル等の構築」などの最新の研究成果をもとに、シミュレーションに用いる地下構造・震源モデルの高精度化をさらに進めること。

(2) 地震防災で重要視される周期 0.5 秒前後の短周期地震動（震度）から大型構造物に影響する周期数秒の長周期地震動までをカバーする広帯域の地震動を評価すること高精度のシミュレーションモデルを構築すること。

以上があげられる。

(e) 引用文献

1) Furumura, T., Kennett, B.L.N. : Visualization of 3D Wave Propagation from the 2000 Tottori-ken Seibu, Japan, Earthquake: Observation and Numerical Simulation, BSSA, Vol. 93, pp. 870-881, 2003.

2) Koketsu, K. and Kikuchi, M. : Propagation of Seismic Ground Motion in the Kanto Basin, Japan, Science, Vol. 288, pp. 1237-123, 2002.

3) Kikuchi, M., Nakamura, M. and Yoshikawa, K. : Source rupture processes of the 1944 Tonankai earthquake and the 1945 Mikawa earthquake derived from low-gain seismograms, Earth Planets Space, 55, 159-172, 2003.

4) 中央防災会議：東海地震に関する専門調査会，第 10 回，説明資料 1，2002.

5) 中央防災会議：東南海・南海地震等に関する専門調査会，第 5 回，説明資料 1 - 1，2003.

6) 山中浩明，山田伸之：微動アレイ観測による関東平野の 3 次元速度構造モデルの構築，物理探査，Vol. 55, pp. 53-65, 2002.

(f) 成果の論文発表・口頭発表など

1) 論文発表

なし

2) 口頭発表、その他

著者	題名	発表先	発表年月日
Furumura, T.	Parallel 3D Simulation of Seismic Wave Propagation Using the Earth Simulator	AGU Fall Meeting, California	平成 15 年 12 月 11 日
古村孝志	地震波が巨大構造物を襲う	NHK スペシャル	平成 15 年 1 月 18 日

(g)特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の作成
なし

(3) 平成16年度業務計画案

関東平野の地下構造データの高度化を目指して、地下構造データ密度が低い地域において地下構造探査を実施し、地下構造データを蓄積する。さらに、平成15年度に収集した地下構造データと合わせて、堆積層の3次元S波速度構造の改良を行なう。さらに、改良したモデルを用いた地震動のシミュレーションを行い、観測記録との比較によりモデルの妥当性の検討を行う。また、平成15年度に収集した深層ボーリングでの速度構造を用いて、堆積層の詳細な速度分布および揺らぎのモデル化を行い、地震動特性への影響を評価する。

具体的研究項目は以下のとおりである。

- ・ 関東平野で微動アレイ探査を実施し、位相速度データを蓄積する。
- ・ 地震探査およびボーリング資料のデータを加味した堆積層の3次元モデルを構築する。
- ・ 位相速度の逆解析に速度勾配を導入し、堆積層モデルを高度化する。
- ・ 深層ボーリングによる速度構造の統計的分析から堆積層の速度勾配および不均質性をモデル化し、地震動特性への影響を評価する。
- ・ 強震記録の分析によりQ値を同定し、3次元シミュレーションへ適用し、Q値モデルの妥当性を検証する。
- ・ 堆積層の速度の揺らぎを考慮して、広帯域地震動のシミュレーションを行い、速度揺らぎのモデルの妥当性を検証する。