

3.3.7 地下構造モデル化の研究（三次元速度・Q）

(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）

(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 (財)電力中央研究所	助教授	古村孝志	furumura@eri.u-tokyo.ac.jp
	主任研究員	佐藤浩章	hiroakis@criepi.denken.or.jp
	主任研究員	東貞成	higashi@criepi.denken.or.jp
	主任研究員	芝良昭	cbar@criepi.denken.or.jp
清水建設（株）・技術研究所	首席研究員	佐藤俊明	toshiaki.sato@shimz.co.jp
	副主任研究員	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カ年の年次実施計画

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16年度業務目的

平成15年度までに収集した既存の関東平野での地下構造データの密度が小さい北関東および房総半島地域において微動アレイ観測を実施し、既存のデータと合わせて平野全体の地下構造モデルの改良を行う。さらに、昨年度収集した関東平野での深層ボーリング資料の離散化およびモデル化を行ない、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。また、最近関東平野の高密度な地震観測網で観測されたやや長周期地震動のシミュレーションを行い、堆積平野での地震波の伝播を明らかにした。

(2) 平成16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15年度までに収集した既存の関東平野での地下構造データの密度が小さい北関東および房総半島地域において微動アレイ観測を実施し、レイリー波の位相速度データを取得し、S波速度構造を明らかにする。さらに、昨年度に収集した位相速度データと合わせて、関東平野の堆積層の3次元モデルを改良した。

(b) 業務の成果

1) 関東平野での微動アレイ探査

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15年度までに、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てきている。今年度も自治体などによる微動アレイ探査で得られている位相速度を収集した。図1には、収集した既存の微動アレイ探査の調査位置が黒い四角で示されている。観測点の数は、合計212地点である。これらの観測の分布をみると、北関東や房総半島東部で観測点の密度が低いことがわかる。そこで、今年度は、これらの地域を中心にして29地点において微動アレイ観測を実施した。観測点の位置は、図1の白抜き丸で示すごとくである。

各観測点では、半径0.5と1.5km程度のアレイの7地点の上下成分の地震計が設置された。対象地域の大半が市街地域であった観測点配置は、任意の形状となった。得られたアレイデータに対して、周波数-波数スペクトル解析を行う周期毎の位相速度を求めた、図2には、本年度の微動観測から得られた

位相速度が比較されている。群馬県西部から千葉県銚子市にいたる A-line 上では、平野中部から東部にかけての位相速度の形状がよく似ている。また、平野西部 (FKY、TAT 等) では周期 1 ~ 2.5 秒に対する位相速度が大きい。東京西部から茨城県中部を横断する B-line では、東側から西側に向かうほど位相速度の傾きが急になる。このことは、平野の西側ほど堆積層が厚くなることを示唆している。千葉県を南西から北東に横断する C-line では房総半島中央部に位置する KYN および KMT での位相速度が周期 1 ~ 2 秒で大きくなっている。

得られた位相速度を山中・石田 (1995) による遺伝的アルゴリズムによって逆解析を行い、各観測地点での観測値と計算値の差が最小になるような 1 次元 S 波速度構造を求めた。逆解析時の仮定は、山中・山田 (2002) によるものと同じである。第四紀堆積層、二つの新第三紀堆積層 (上総層群、三浦層群) および地震基盤である先新第三紀層の四つの層が存在すると考え、逆解析では全観測地点を通して 4 層モデルを仮定した。未知数は S 波速度、層厚として、P 波速度は狐崎等 (1990) の経験式によって S 波速度と対応させた。図 2 における観測地点で得られた位相速度に対して同様に行った逆解析結果を図 3 に示す。A-line 上の地下構造は、盆地構造を呈しており、最も深い ARA では基盤深度が 3 km である。B-line では、平野の中心部で堆積層が厚く、東に離れるにつれて基盤深度が浅くなる。KSM は筑波山に近いので、基盤深度が急激に浅くなる。C-line では、房総半島中央部で基盤深度が約 3 km と深いことがわかる。また、北東側ほど基盤深度が浅くなっている。

2) 3 次元 S 波速度構造モデルの作成

上記のように観測されたレイリー波の位相速度と収集した既往の探査による位相速度を用いて、昨年度と同様にして、同一の基準で逆解析を行い、3 次元 S 波速度構造を構築した。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 4 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。基本的には、昨年度に指摘したように、周期 0.6 秒から 5 秒の間でデータ数が多い。また、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。

つぎに、上述の 4 つの層のうち下の 3 つの層の S 波速度を 1.0, 1.5, 3.0 km/s と固定し、それらの厚さと表層の S 波速度を未知数として、すべての地点での位相速度の逆解析を行った。逆解析では、上記と同様の手法を用いた。図 4 は、第 2, 3 層および地震基盤までの深度分布および表層の S 波速度を示している。なお、作図にあたり関東山地では、基盤深度が露頭していると仮定している。S 波速度 1 km/s の第 2 層目までの深さは、平野北部と房総半島中央部で 0.6 km 以上と深く、南西部では浅くなっている。明瞭な地域性がある。S 波速度 1.5 km/s の第 3 層目までの深度も房総半島中央部や東京中心部では 2 km と厚い。この傾向は基盤深度分布でも認められ、房総半島中心部で基盤深さは 4 km に達している。一方、平野北部では基盤深度は 2 km 以下と浅く、その他の地域では、2.5 km 前後である。表層の S 波速度は、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、山中・山田 (2002) 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。

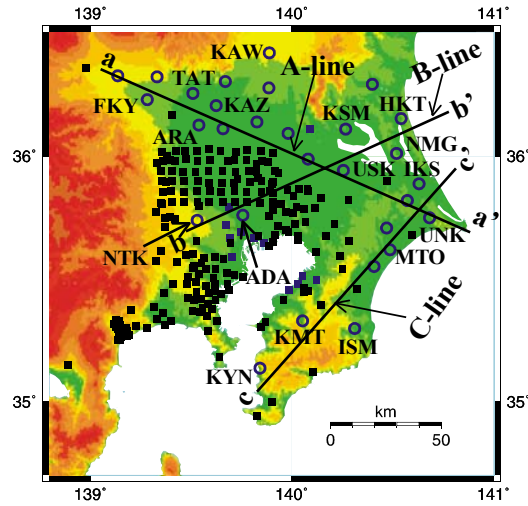


図1：関東平野での微動アレイ観測の位置。■は既往の調査，○は本研究による調査

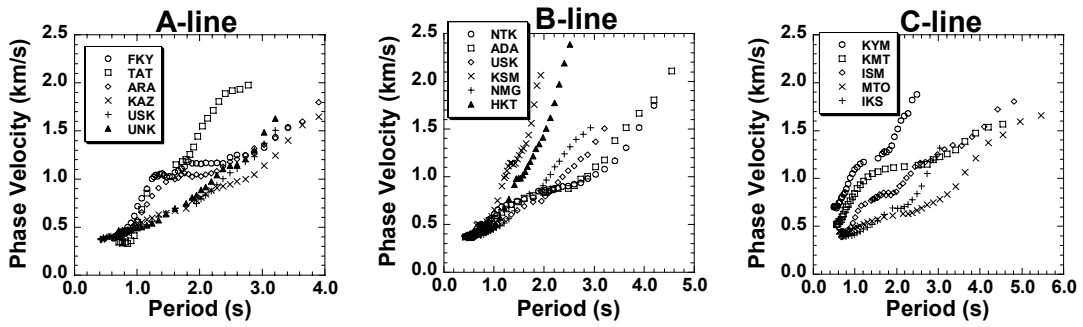


図2：本研究での微動観測により得られた位相速度

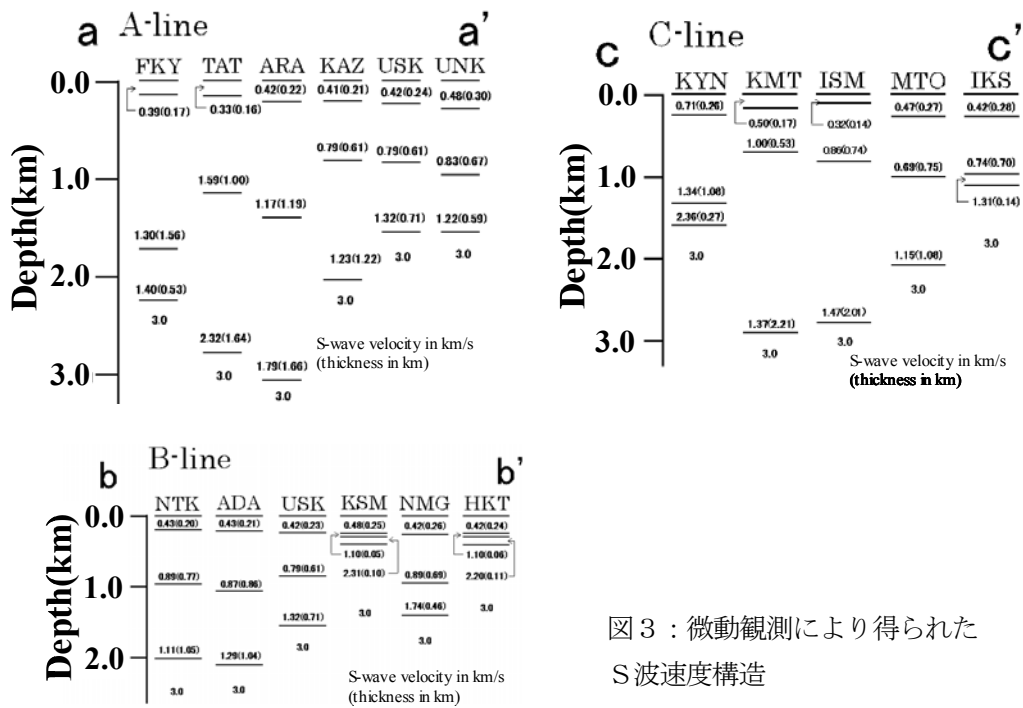


図3：微動観測により得られたS波速度構造

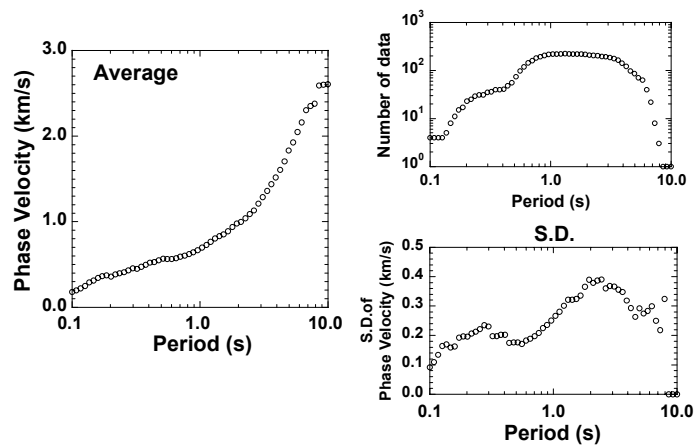


図4：本研究および既往の調査での微動観測による位相速度の平均，分散，データ数

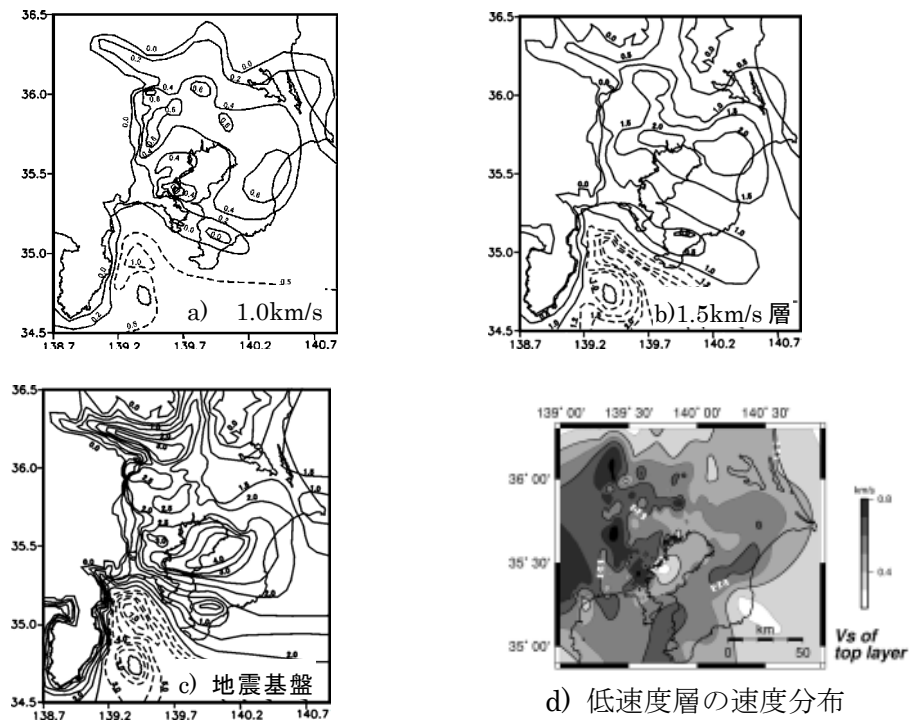


図5：3次元S波速度構造 a)Vs1.0km/s層の上面深度，b)Vs1.5km/s層の上面深度
c)Vs3.0km/s層（地震基盤）の上面深度，d)表層のS波速度

(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、北関東および房総半島東部において微動アレイ観測を29地点で実施し、S波速度構造を明らかにした。さらに、既存の微動アレイ探査により得られている位相速度データと合わせて、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波速度を新たに改良した。

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波速度の高度化なモデル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) 山中浩明、石田 寛, 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 No.468,9-17,1995
- 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
駒場 信彦, 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波速度構造の構築	2005年地球惑星関連科学合同大会	平成17年5月
山中浩明, 山田伸之, 駒場信彦,	レイリー波の位相速度に基づく関東平野の3次元S波速度構造	第111回物理探査学会学術講演論文集, 65-66, 2004	平成16年9月
H. Yamanaka, N.Komaba, N. Yamada	Estimation of 3D S-wave velocity model for the Kanto basin, Japan, for prediction of long-period strong ground motion,	Second International Conference on urban earthquake engineering, 227-232	平成17年3月

(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

(2-2) 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）

furumura@eri.u-tokyo.ac.jp

(a) 業務の要約

関東平野の3次元基盤構造と、大地震による平野の地震動応答を明らかにするために、2004年10月23日新潟県中越地震（Mj6.8）の高密度地震観測データ（K-NET, KiK-net）と首都圏強震動総合ネットワーク（SK-net）の観測データ解析と、地球シミュレータによる大規模数値シミュレーションを実施した。

これにより、関東平野平野の北端にあたる、群馬／埼玉県境付近で生成した周期7秒前後の表面波が秒速0.7km/s程度でゆっくりと南下する様子や、西縁部の山地から東京を横断するように表面波が回り込む複雑な波動伝播現象を捉えることができた。また、シミュレーションからは、この表面波の回り込み現象が平野の下の基盤面のすり鉢形状が原因で起きていることが確認できた。これにより、都心から東京湾の北部にかけての地域は表面波（長周期地震動）の通り道となり、マルチパスと焦点効果により揺れが大きく長く続くことがわかった。

(b) 業務の実施方法

新潟県中越地震の関東平野の揺れは、震源距離が180～250km以上も離れていることから、震度は3～4程度にすぎなかったが、都心では周期7秒前後の長周期地震動が3分以上にわたってゆ続いた。この長周期地震動により、60～70階建ての超高層ビルではエレベーターが停止するなど、都市機能に大きな影響を引き起こされた。幸い関東平野での大きな被害は報告されていないが、将来のM7クラスの内陸地震に備えて、長周期地震動の生成・伝播過程を詳しく調査することは重要である。

関東平野での長周期地震動の生成は、2004年9月5日の紀伊半島南東沖の地震（Mj7.6）や2003年9月26日十勝沖地震（Mj8.0）など、これまで繰り返し観測されていることから、平野の深い基盤構造と表面波の生成が大きく影響していることは疑いない。そこで、関東平野の基盤構造と長周期地震動の伝播特性を、高密度地震観測と数値シミュレーションにより詳しく評価した。

(c) 業務の成果

中越地震による関東平野での長周期地震動の生成

図1は中越地震の揺れの伝わる様子を、防災科学技術研究所のK-NET, KiK-net強震観測網、そして首都圏強震動総合ネットワーク（SK-net）の440観測点の地震波形記録に対して3D可視化処理（Furumura and Chen, 2004）を行ったものである。水平動2成分の加速度記録は1秒以下の短周期成分をフィルタにより除去して速度波形に積分し、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ている。ここでは、地面の揺れの強さを色と高さで表わしており、なお幾何減衰を補正するために、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見やすくしている。

スナップショットを見ると、地震発生から約20～30秒で平野の北端の群馬に主要動（S波）が到達し、40秒後に都心に伝わった大きな揺れは、その後3分以上にわたって留まっていることがわかる。同様に、名古屋や大阪、仙台などの平野でも揺れが長く続いている。

図2は中越地震のK-NET速度波形を、震源から房総半島にかけて北西—南東方向の側線に沿って並べ

たものである。図右には都心部の SK-net 記録を示している。このようにして地震波形を並べることにより、都心部で見られた“後揺れ”は、平野北端の群馬／埼玉県境付近で生成した表面波であることがわかる。Radial 成に現れた表面波 (Rayleigh 波) はおよそ 0.7km/s のゆっくりとした速度で関東平野を南下している。また、Transverse 成分には、見かけ速度の速い (1.1km/s) 大振幅の波群が突然現れており、都心部に横方向から回り込んできたものと考えられる。

都心部の長周期地震動の伝播の特性をよく見るために、粒子軌跡のアニメーションを作成した (図 3)。これを見ると、震源からまっすぐ都心を南下する表面波に加えて、関東平野の西縁部を熊谷～川越～国分寺付近へと伝わった後に、急に東方向に方向転換して都心部を横断する別の表面波の存在が確認できる。進行方向が急変するとともに、Rayleigh 波から Love 波へと震動モードが変換していることもわかる。都心部ではこれら複数の伝播経路 (マルチパス) を持つ表面波が通過するために、揺れが大きく長く続くことがわかる。このような関東平野での複雑な表面波の伝播特性は、伊豆半島沖で起きた地震を用いた解析からも詳しく調査されている (たとえば、Koketsu and Kikuchi, 2000)。

これらの二つの表面波が到達した都心部 (港区: TKY1030) での速度応答スペクトルを求めると、周期 7 秒で 30cm/s ($h=1\%$ で計算) を超える強い応答となり、70 階建ての超高層ビルが大きく長く揺れた事実と調和する。

中越地震の 3 次元数値シミュレーション

関東平野の 3 次元基盤構造と、観測で見られた複雑な波動伝播特性との対応を明らかにするために、中部日本の地下構造モデル (中央防災会議、2003) と中越地震の震源モデル (山中、2003) を用いて 3 次元波動伝播の数値シミュレーションを実施した。地下構造モデルは屈折・反射法探査や微動アレイ探査、そして深層ボーリング調査の結果を統合的に解釈して求められたものであり、地震基盤 ($V_s=3000\text{m/s}$) の上を被う堆積層は 6 層で表現され、最小 S 波速度は 500m/s である (図 5)。なお、非弾性減衰 (Q_s) には経験的に V_s 値の 1/3～1/5 の値を与えた。波動伝播計算は「マルチグリッド高次 FDM 並列計算法」を用いて行い、周期 1 秒より長い波動場を地球シミュレータの 40 ノードを用いた並列計算により求めた。

図 4 にシミュレーションから求められた波動伝播のスナップショットと、計算と観測波形の比較を示す。平野北端部で大振幅の表面波が生成され、これが平野の中心部に伝わるにつれ分散とマルチパスの効果で次第に波群が延びていくようすがわかる。また、粒子軌跡からは、平野の山地を南下した地震動が、東に急転して都心部を横断し、複数の経路を伝わる地震動が焦点を結び東京湾を横断する様子もシミュレーションによりよく再現されている (図 5)。

関東平野の基盤構造モデルを水平成層構造に置き換えると、先に見られたような複雑な波動現象は起きず、表面波は平野を最短距離で横断し、揺れは継続しない。都心部で見られる表面波の振幅も観測の 1/2 以下に小さくなる。このことから関東平野の 3 次元基盤構造が表面波の生成と伝播に強く影響を与えていることは確実である。

(d) 結論および今後の課題

中越地震の高密度地震観測データの解析と数値シミュレーションにより、以下の結論を得た

- (1) 中越地震では都心部で周期 7 秒前後の長周期地震動が強く生成され、30cm/s を超える強い速度応答 ($h=1\%$) が起きた。また、震動継続時間は 3 分を超えた。

- (2) 都心部での大きく長い震動とは、平野の複数の経路を伝わる表面波が都心部に集まり“焦点”を結んだことが関係している。
- (3) このようなマルチパスの効果は、関東平野直下のすり鉢状の基盤構造によるものであり、東京湾から千葉県東部にかけて基盤深度が4000m以上に深くなっているためである。

また、今後の課題として

- (1) M7.3程度の大地震が同程度の震源距離で起きた場合には、地震モーメントの単純換算から考えて中越地震(Mj6.8)よりも5.6倍大きくなる。このとき、都心部での長周期地震動(周期7秒)の応答は160cm/sにもなることから、十分な対策が必要である。
- (2) 長周期地震動の生成には深部基盤の3次元構造が大きく影響する。このため、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が必要である。
- (3) 都市部では、周期1秒以下の短周期地震動(震度)だけでなく、大型構造物に共振する周期数秒以上の長周期地震動の評価を含めた広帯域の強震動評価が地震防災上必要である。

ことがあげられる。

(e)引用文献

- 1) Furumura, T. and L. Chen, Parallel simulation of strong ground motions during recent and historical damaging earthquakes in Tokyo, Japan, *Parallel Computing*, 2005, in press.
- 2) Koketsu, K. and M. Kikuchi: Propagation of Seismic Ground Motion in the Kanto Basin, Japan, *Science*, V288, 1237-123, 2002.
- 3) 中央防災会議：日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震に関する専門調査会（第3回）、資料2図表集、2004.

(f)成果の論文発表・口頭発表など

1) 論文発表・口頭発表

著者	題名	発表先	発表年月日
古村孝志	新潟県中越地震と長周期地震動による関東平野の大揺れ	首都圏強振動総合ネットワーク (SK-net) 研究集会	平成17年3月22日

(g)特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の作成

なし

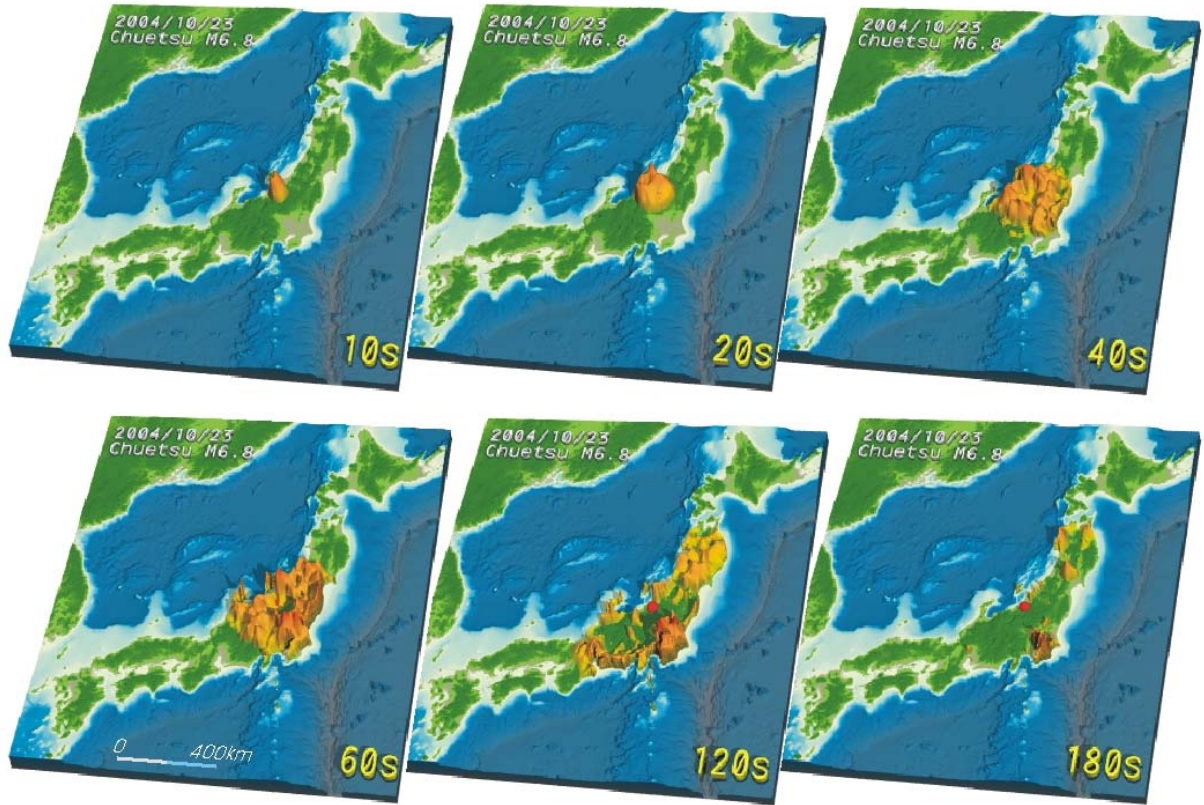


図1 2004年中越地震の地震波動伝播の様子。K-NET, KiK-net, SK-net 高密度地震観測網による観測結果。

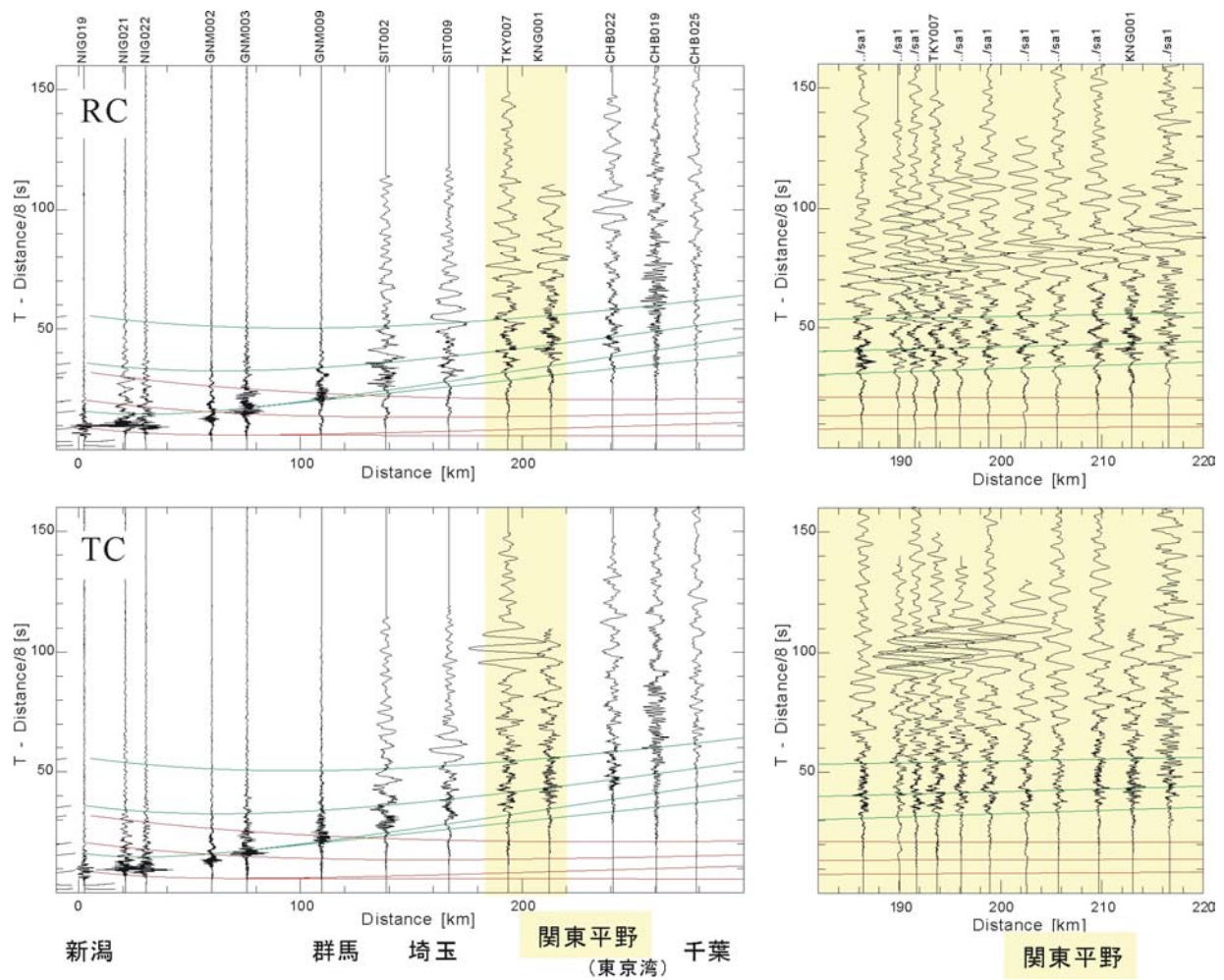


図2 中越地震の地動速度波形。震源(中越)から群馬、埼玉、関東、千葉を通る北西—南東断面。Radial(RC)およびTransverse成分(TC)。都心部の高密度観測を図右に示す。



図3 粒子軌跡を用いた、関東平野の揺れの様子。地震発生後85, 97, 120秒後。

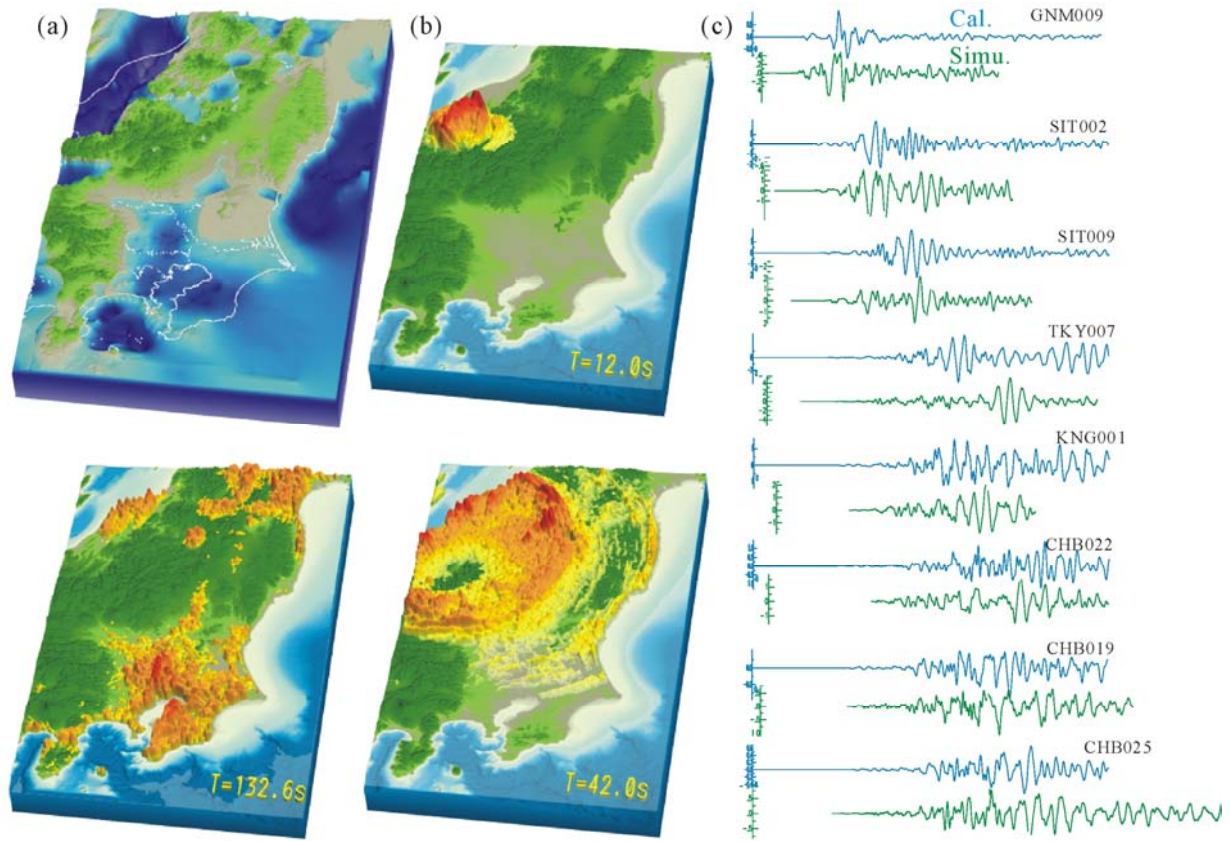


図4 中越～関東の基盤構造モデル（中央防災会議2004）と数値シミュレーションから求めた波動伝播のスナップショットおよび速度波形の比較（観測：緑、シミュレーション：青）。

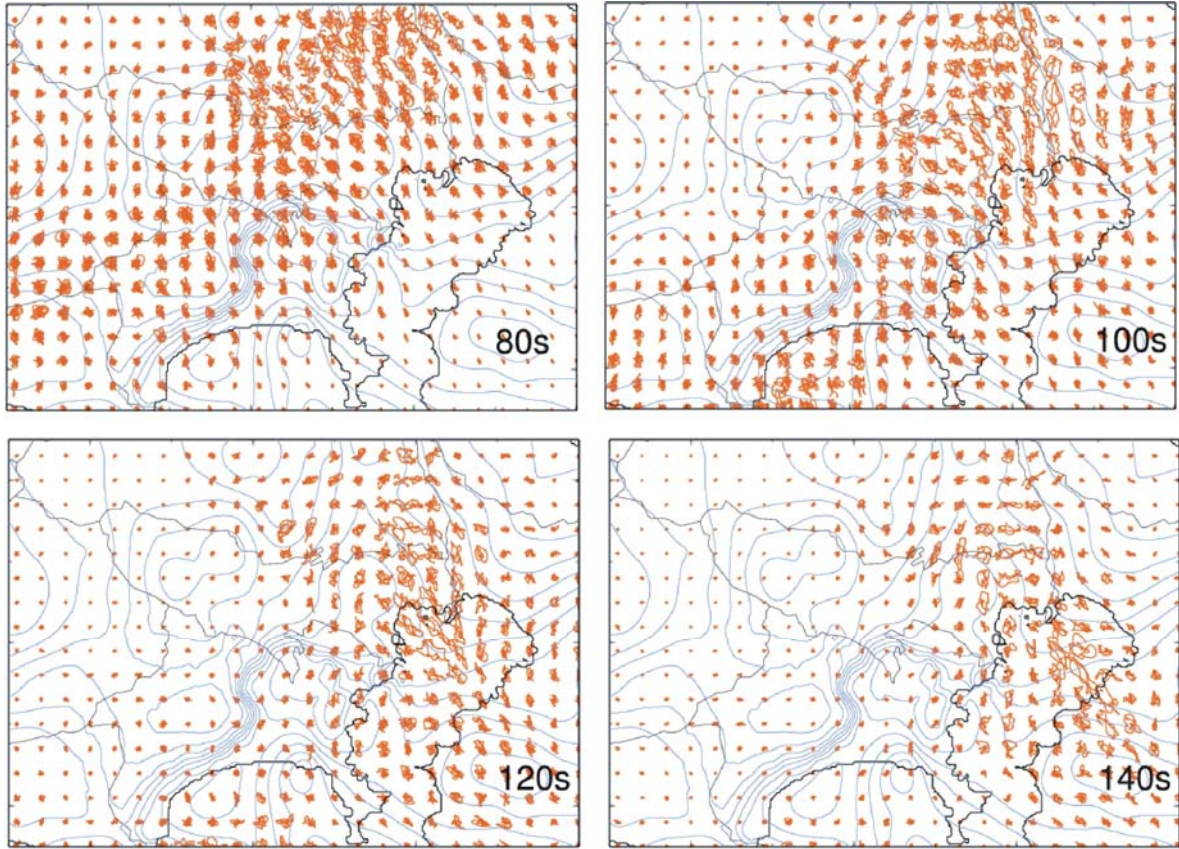


図5 シミュレーション結果の粒子軌跡表示。

(2-3) 検層データに基づく関東平野における堆積層の不均質構造

佐藤浩章（電力中央研究所）

hiroakis@criepi.denken.or.jp

芝 良昭（電力中央研究所）

cbar@criepi.denken.or.jp

東 貞成（電力中央研究所）

higashi@criepi.denken.or.jp

(a) 業務の要約

関東平野における 3 次元的不均質構造についての基礎的なデータを収集することを目的として、深層ボーリングにおける P 波速度の検層資料を用いて堆積層における速度の揺らぎの統計的性質について検討した。堆積層の揺らぎの統計的性質は、地震動予測における地下構造のモデル化の層区分として用いられている地質年代区分（第四系、新第三系）ごとに推定し、各層の特徴について検討した。その結果、地点毎にばらつきはみられるが、平均値として、揺らぎの相関距離については第四系で約 28m、新第三系で約 43m と新第三系の方が大きく、また標準偏差についても第四系で 0.057、新第三系で 0.077 と新第三系の方が大きくなることが分かった。

(b) 業務の実施方法

1) はじめに

近年、3 次元地下構造を考慮した地震動シミュレーションが、おもにやや長周期帯域を対象とした強震動予測に多く用いられている。一般に、平野規模の 3 次元地下構造は、地震基盤までの構造を 3~4

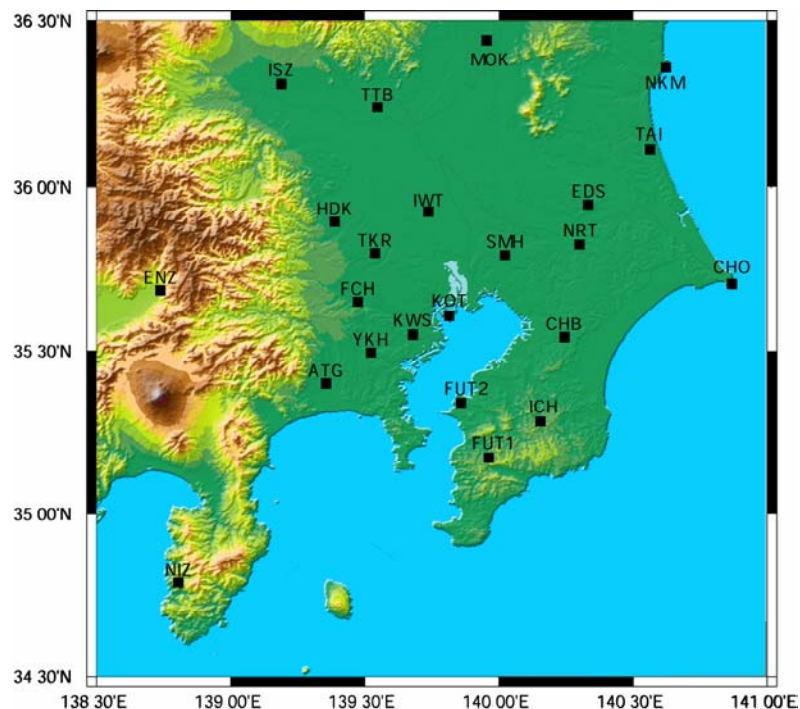


図-1 検討の対象とした地点

層程度でモデル化することが多く、各層内において弾性波速度は一定とされている。しかしながら、実際の地盤の速度構造には、揺らぎや深さ方向に対して緩やかに増加する性質があり、特に速度構造の揺らぎに関しては直達波の振幅の減衰、また後続波の生成に対する要因となることが知られている。したがって、こうした速度構造の揺らぎを地下構造モデルに考慮することができれば、より詳細な地震動評価が可能となることが考えられる。そこで本検討では、関東平野を対象として、深層ボーリングにおける検層資料を用いて堆積層における速度の揺らぎの統計的性質について検討した。

2) データ

検討の対象としたのは、図-1 に示す防災科学技術研究所の研究資料^{1)~6)}に記載されている孔井における速度検層結果 (P 波速度) であり、全部で 23 地点を対象とした。データの作成は、資料中にデータが記載されているものについてはそれを用い、データが記載されていない場合については、記載されている検層図をスキャナーにより画像データに変換し、市販のデジタルソフトにより数値データ化を行った。本検討では、15 地点において検層図からデジタル化してデータの読み取りを行った。

こうした読み取り処理によって数値化されたデータの信頼性については、表-1 に示す条件 (目標値) で揺らぎを与えた 3 種類の擬似検層データ (2 層モデル, 層厚 600m) をテストモデルとして作成し、その出力画像を同様の処理を行って数値データ化し、揺らぎの統計的性質を解析することにより確認した。なお、テストモデルについては、すべてのモデルに対してフォンカルマン型の自己相関関数 (Hurst 数 $\nu = 0.5$) を用いた。

表-1 テストモデルに対する読み取りデータの評価結果

	layer	Median P-wave vel. (m/s)			Standard deviation			Correlation dist. (m)		
		<i>estimated</i>	<i>target</i>	<i>error (%)</i>	<i>estimated</i>	<i>target</i>	<i>error (%)</i>	<i>estimated</i>	<i>target</i>	<i>error (%)</i>
model1	1	1926.9	(2000)	3.7	0.102	(0.10)	2.0	18.3	(20)	8.6
	2	4690.5	(4800)	2.3	0.048	(0.05)	4.0	28.8	(40)	28.0
model2	1	961.8	(1000)	3.8	0.103	(0.10)	3.0	19.3	(20)	3.7
	2	4659.4	(4800)	2.9	0.099	(0.10)	1.0	16.6	(20)	17.2
model3	1	1974.8	(2000)	1.3	0.099	(0.10)	1.0	3.2	(3)	7.3
	2	4605.6	(4800)	4.0	0.097	(0.10)	3.0	27.9	(40)	30.2

表-1 には、読み取り値による平均 P 波速度と揺らぎの標準偏差および後述する方法で読み取り値からの自己相関関数に対して理論自己相関関数をフィッティングすることにより推定した揺らぎの相関距離が併せて示されている。その結果、検層図からの読み取りデータは、平均 P 波速度については目標値に対する誤差が 1% から 4%、揺らぎの標準偏差については目標値に対する誤差が 1% から 4% であり、目標値をほぼ満足する推定結果となっている。一方、読み取りデータの自己相関関数から推定される相関距離については、目標値に対する誤差が 3% から 30% であり、推定値の精度は比較的ばらつく結果となっている。ただし、表-1 によれば、相関距離が 20m までは目標値を比較的満足する結果となっており、誤差が大きいのは相関距離が 40m の場合であることが分かる。このことは、相関距離の大きい場合に誤差が生じやすいことを意味している。既往の研究⁷⁾によれば、関東地方の先新第三系～古第三系における相関距離は下総で約 10m、岩槻や府中で 30m から 40m 程度と指摘されており、読み取りデータによる評価は可能であると考えられるが、相関距離が 40m 前後の場合、10m 程度の誤差が生じている可能性があることを考慮する必要がある。

3) 解析方法

揺らぎの統計的性質についての解析は、地震動予測における地下構造のモデル化の層区分として用いられている地質年代区分（第四系，新第三系）ごとにP波速度の検層データを分割して用いた。各層のデータは、まず堀家・他⁸⁾と同様に、検層データを $\alpha(Z)$ として、(1)式をフィッティングすることにより深さ方向に漸増するトレンド成分を推定した。

$$\alpha(Z) = A + B * Z + \xi(Z) \quad (1)$$

ここで、(1)式におけるAは初期値(切片)、Bはトレンド成分、 $\xi(Z)$ は揺らぎのデータ、Zは深さである。次に、検層データ $\alpha(Z)$ からトレンド成分を除去した揺らぎのデータ $\xi(Z)$ を、その平均値で除すことにより無次元化したP波速度の揺らぎデータを作成し、このデータの自己相関関数を推定する。揺らぎの統計的性質は、この自己相関関数に対してフォンカルマン型の自己相関関数をフィッティングすることにより推定した。本検討で推定するパラメータは、相関距離a、Hurst数 ν および標準偏差 ε であり、自己相関関数のフィッティングには焼きなまし法（以下、SA）を適用した⁹⁾。SAは、加熱炉の中で溶融した固体が冷却していく過程を模擬したアルゴリズムで、繰り返し計算において高温から低温へ状態を徐々に変化させることにより、大局的な解から局所的な解の探索へと最適解の探索能力が徐々に移行し、安定して最適解を発見する能力を持つ。なお、本研究ではSAのアルゴリズムとして、山中⁹⁾により位相速度の逆解析に適用され、その性能が高く評価されているVFSA（Very Fast Simulated Annealing）¹⁰⁾を用いた。

(c) 業務の成果

1) 関東平野における堆積層の揺らぎの統計的性質

初期解析の結果として、各層のP波速度の平均は、それぞれ第四系が約2.2(km/s)、新第三系が約2.8(km/s)という結果であった。これは既往の関東平野の3次元地下構造モデルで用いられている値とほぼ同等である。深さ方向のトレンドについては、第四系が0.87(1/sec)、新第三系が0.89(1/sec)であり、堀家・他²⁾により得られた地盤のS波速度の結果とほぼ同じ範囲の結果であった。

図-2には、各層についての自己相関関数が示されているが、地点毎において自己相関関数はばらついており、堆積条件の違いを示唆しているものと考えられる。全体的な傾向としては、第四系は距離ラグの

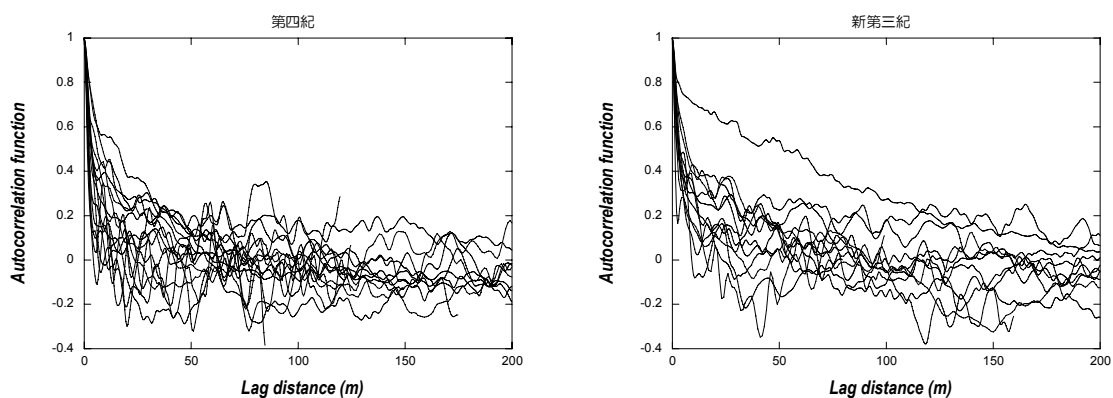


図-2 各層におけるP波速度の揺らぎの自己相関関数

増加とともに比較的急に相関関数が低下するのに対し、新第三系についてはそれよりも緩やかに低下していく傾向を示しており、堆積層の揺らぎの自己相関関数が地質年代毎にも異なった性質を示す可能性を示唆している。

表-2には、フォンカルマン型の自己相関関数を仮定してフィッティングすることにより各層ごとに得

られた揺らぎの標準偏差, Hurst 数および揺らぎの相関距離を示す。相関距離は平均値として第四系 28.1m, 新第三系 42.7m である。第四系と新第三系の差異については, 平均値としては違いがみられるが, 地点毎にみると, FCH, MOK, HDK, ISZ, ICH, TKR, TAI など多くの地点で明らかに第四系より新第三系の方が大きい, FUT1 や TTB では第四系と新第三系はほとんど変わらず, SMH や IWT では第四系の方が新第三系よりも大きくなっている。したがって, 第四系と新第三系の不均質性の差異はそれほど顕著ではないことも考えられる。また, 地域性については, 顕著な傾向を見出すことは難しく, 例えば, 第四系について千葉県において他の地域に比べて相関距離が大きくなる傾向がみられる程度である。次に Hurst 数については, 平均値として第四系 0.36, 新第三系 0.24 であったが, 地点毎のばらつきが大きく, また相関距離とのトレードオフもみられるため, Hurst 数を含め自己相関関数の形状については, あらかじめ設定して揺らぎの統計的性質を検討する必要性が考えられる。揺らぎの標準偏差については, 平均値として第四系で 0.057, 新第三系で 0.077 であり, 各地点でもおおそ新第三系よりも第四系が大きくなる傾向にある。

表-2 揺らぎの統計的性質の推定結果

(a) 第四系

SITE	standard deviation	ε	Hurst number	ν	Correlation dist. a (m)
CHB	0.033		0.07		186.9
YKH	0.095		0.61		17.7
ICH	0.033		0.17		10.1
EDS	0.022		0.06		38.3
FUT1	0.050		0.06		44.3
TKR	0.065		0.18		35.1
HDK	0.096		0.50		3.2
MOK	0.032		0.50		4.9
NRT	0.026		0.17		47.5
ISZ	0.139		0.33		22.5
ENZ	0.097		0.69		1.6
TTB	0.107		1.00		1.3
TAI	0.025		0.64		2.1
IWT	0.070		0.27		11.7
SMH	0.019		0.16		36.2
FCH	0.028		0.39		9.5
KWS	0.041		0.78		4.4
AVERAGE	0.057		0.39		28.1

(b) 新第三系

SITE	standard deviation	ε	Hurst number	ν	Correlation dist. a (m)
YKH	0.046		0.24		12.0
ICH	0.031		0.22		29.3
ATG	0.075		0.15		20.2
FUT1	0.043		0.06		49.1
TKR	0.126		0.10		83.1
HDK	0.081		0.53		69.4
MOK	0.075		0.09		131.1
ISZ	0.118		0.08		40.3
TTB	0.116		0.70		3.6
TAI	0.059		0.21		44.0
IWT	0.096		0.21		9.7
SMH	0.057		0.38		6.5
FCH	0.081		0.20		38.6
FUT2	0.079		0.03		60.9
AVERAGE	0.077		0.23		42.7

(d) 結論ならびに今後の課題

関東平野における3次元的不均質構造についての基礎的なデータを収集することを目的として、深層ボーリングにおけるP波速度の検層資料を用いて堆積層における速度の揺らぎの統計的性質について検討した。堆積層(第四系, 新第三系)の揺らぎの統計的性質は, 相関距離および標準偏差ともに, 平均値として第四系よりも新第三系の方が大きくなる傾向を示すことが分かった。しかしながら, 揺らぎの統計的性質は, 同一の地層年代でもばらつきが大きいため, 地層区分に対するモデル化は困難な印象を受ける。したがって, 第四系と新第三系については, P波速度の差異も大きくないことから, これらを一つの堆積層として揺らぎの統計的性質を求め, 地域性についての検討を進める必要性が考えられる。また, 地震動シミュレーションに対して地下構造のランダムな不均質性を導入するためには, 堆積層におけるP波速度の揺らぎの統計的性質とS波速度の揺らぎの統計的性質の関係性についても検討しておくことが重要である。

(e) 引用文献

- 1) 鈴木宏芳・池田隆司・御子柴正・木下繁夫・佐藤春夫・高橋博：関東・東海地域における孔井検層資料集, 防災科学技術研究資料, 65, 1-162, 1981
- 2) 高橋博・福田理・鈴木宏芳・田中耕平：岩槻深層地殻活動観測井の作井と坑井地質, 国立防災科学技術センター研究速報, 47, 1-113, 1983
- 3) 鈴木宏芳・高橋博・福田理：下総深層地殻活動観測井の作井と地質, 国立防災科学技術センター研究速報, 48, 1-61, 1983
- 4) 鈴木宏芳・高橋博：府中深層地殻活動観測井の作井と坑井地質, 国立防災科学技術センター研究速報, 64, 1-84, 1985
- 5) 鈴木宏芳：江東深層地殻活動観測井の地質と首都圏地域の地質構造, 防災科学技術研究所研究報告, 56, 1-84, 1996
- 6) 鈴木宏芳・小村健太郎：関東地域の孔井データ資料集, 防災科学技術研究資料, 191, 1-80, 1999
- 7) 佐藤春夫：リソスフェアにおける地震波の散乱と減衰ーランダムな不均質構造による一次散乱理論ー, 防災科学技術センター研究報告, 33, 101-186, 1984
- 8) 堀家正則・竹内吉弘・桑田和宏：地盤のS波速度の揺らぎの統計的性質, 地震2, 44, 267-269, 1991
- 9) 山中浩明：焼きなまし法による位相速度の逆解析ー遺伝的アルゴリズムとの性能比較ー, 物理探査, 54, 4, 197 - 206, 2001
- 10) Ingber, L. : Very fast simulated annealing, Math. Comput. Modeling, 12, 967-973, 1989

(f) 成果論文の発表・口頭発表等

1)論文発表

著者	題名	発表先	発表年月日
なし			

2)口頭発表、その他

発表者	題名	発表先、主催、発表場所	発表年月日
佐藤浩章・山中 浩明・古村孝 志・早川崇・岡 嶋眞一	関東平野における堆積層の速度 構造の揺らぎの統計的性質	2005年地球惑星関連学会合同大会	平成17年5 月

(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）

takashi.hayakawa@shimz.co.jp

佐藤俊明（清水建設（株）技術研究所）

Toshiaki.sato@shimz.co.jp

(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上総層群や三浦層群の中においてもP波速度は、深さとともに漸増する構造（以下、トレンド構造）となっている。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（例えば、佐藤,1999,山中,2002）。トレンド構造は強震動に影響を及ぼすと考えられるが、トレンド構造が正確に反映されているモデルは存在せず、その影響は十分把握されていない。

昨年度は地下構造が詳細に調査され、基盤までの高精度な一次元速度構造が得られている下総において、トレンド構造が強震動に及ぼす影響を一次元モデルで検討した。その結果、より高精度な強震動予測のためにはトレンド構造の反映が必要であると考えられた。

本年度は、関東平野の複数の観測井で実施された深層の音波検層によるP波速度の一次元鉛直構造から関東平野の平均的なトレンド構造を抽出し、トレンド構造の影響を関東平野の三次元構造を用いた中小地震のシミュレーションにより検討した。対象周期は3秒以上とした。今後、3秒以下の短周期においても検討してゆく必要がある。

(b) 業務の実施方法

本年度、本プロジェクトでは関東平野およびその周辺の観測井で実施された音波検層によるP波速度の数値化が実施された。我々はその中でも関東平野の中心付近に位置する府中、横浜、所沢、川崎、岩槻、江東、下総、富津、市原、千葉におけるデータを用いて、上総層群と三浦層群のP波速度の平均的なトレンド構造を回帰によりそれぞれ求めた。またS波速度のトレンド構造は関東平野の物理探査結果に基づき、P波速度を一次変換して作成した。トレンド構造の影響を考察するため、Sato(1999)のモデルにおける上総層群相当層 ($V_s \leq 0.84 \text{ km/s}$) と三浦層群相当層 ($0.84 < V_s < 2 \text{ km/s}$) にトレンド構造を付与したモデルと、一定の速度を付与したモデルを作成した。これらの三次元地下構造モデルを用いて、関東平野西部の浅い小地震 (M5.1) と直下の深い小地震 (M4.8) の強震動シミュレーションを実施し、両モデルの計算波と観測波の比較からトレンド構造の影響を検討した。

解析方法は以下のとおりである。

1)トレンド構造

トレンド構造には深度に依存したP波速度の増大傾向と適合性が良い指数関数型の関数形状を採用した（愛知県設計用入力地震動研究協議会，2002）。

$$V_p = a Z^b$$

ここで V_p はP波速度、 Z は深度である。上総層群と三浦層群で別々に回帰した。表1に回帰式を示す。図1、図2、図3、図4にそれぞれ横浜、江東、千葉、富津における回帰式と音波検層によるP波速度を示す。回帰は全地点でほぼ良好であった。S波速度のトレンド構造はP波速度のトレンド構造から一次変換して求めた。上総層群に関しては関東平野の堆積層のデータを回帰して作成された下式（千葉県，1998）、

$$V_s = 0.9V_p - 1.08 \quad \text{ただし、} V_s = \text{S波速度 (km/s)}、V_p = \text{P波速度 (km/s)}$$

を用いた。また三浦層群に関しては、関東平野におけるP波速度とS波速度のクロスプロット（川崎市，1999）からポアソン比が0.36と見積もって、下式でP波から変換した。

$$V_s = V_p / 2.14 \quad \text{ただし、} V_s = \text{S波速度 (km/s)}、V_p = \text{P波速度 (km/s)}$$

表1にトレンド構造を示す。S波速度のトレンド構造の妥当性を検討するために、府中及び下総においてはVSPによるS波速度（山水，2001）と、横浜、千葉においてはKiK-NETによるPS検層のS波速度と比較した。図5、図6、図7、図8にそれぞれ府中、下総、横浜、千葉における比較を示す。ほぼ物理探査結果と対応したS波速度となっている。

2) 三次元地下構造モデルの作成

P波速度およびS波速度のトレンド構造をSato（1999）による地下構造モデルの上総層群相当層および三浦層群相当層に付与して三次元地下構造モデル（gradientモデル）を作成した。図9にSato（1999）の地下構造モデルにおける、上総層相当層の下面の深度分布を示す。同様に三浦層相当層の下面の深度分布を図10に示す。

また一定のP波速度とS波速度を、トレンド構造と同様にSato(1999)の地下構造モデルに付与して、トレンド構造が非考慮の三次元地下構造を作成した（以後、constantモデル）。付与したP波速度とS波速度は下総、岩槻、府中におけるPS検層結果（山水，1996）を参考に、上総層群と三浦層群の平均的な値として設定した。表2にconstantモデルのP波速度とS波速度を示す。

gradientモデルとconstantモデルの比較を図5～図8に示す。

(c) 業務の成果

表面波の励起が少なく実体波が比較的卓越している2003年の千葉県北西部の地震（M4.6、震源深さ71km）と堆積層表面波が卓越した地震で1990年の小田原の地震（M5.1、震源深さ13km）を対象に強震動シミュレーションを実施した。計算には三次元有限差分法を用いた。図11、図12にそれぞれ、小田原の地震と千葉県北西部の地震の両モデルによるシミュレーション結果を観測波と比較して示す。

(d) 結論ならびに今後の課題

千葉県北部の地震のシミュレーション結果をみると、両モデルともEW成分で卓越する直達S波に関しては概ね全地点でよく観測波を再現できている。計算波は両モデルでほぼ一致しており、トレンド構造の顕著な影響が明確には認められない。直達S波は堆積層の伝播時間が短いこと、対象が周期3秒以上と長周期であったこと、からトレンド構造の影響が抑えられたことが原因と考えられる。ただし直達S波の到達時刻はKNGH10でgradientモデルの計算波は観測波と比較して遅れているのに対して、逆にTKY016ではわずかに早いなど、基盤深度のモデル化誤差が存在していることが分かる。

小田原の地震の計算波を両モデルで比較すると、千葉県北西部の地震の場合よりもトレンド構造の影響が特に後続動で認められる（図中○）。振幅レベルは両モデルでほぼ一致しているが、位相特性に違いが認められる。この原因にはトレンド構造に起因した堆積層表面波の分散特性の違いが考えられる。

三次元地下構造モデルを用いた大地震の強震動予測において、このような地下構造に起因する位相特性の差異が予測される最大速度等に影響することが考えられる。このような観点からトレンド構造は考慮すべき特性と考えられる。

小田原の地震の後続動部分において、計算波は観測を十分に説明できていない。この原因には前述した基盤深度のモデル化誤差が考えられる。基盤構造の高精度化は今後の課題と考えられる。

表1 gradientモデルの弾性波速度

	P波速度 (km/s)	S波速度 (km/s)
上総層群相当層	$V_p=0.931Z^{0.128}$	$V_s=0.9V_p-1.08$
三浦層群相当層	$V_p=0.226Z^{0.337}$	$V_s=V_p/2.14$

ただしZは深度 (m)

表2 constantモデルの弾性波速度

	P波速度 (km/s)	S波速度 (km/s)
上総層群相当層	2.0	0.7
三浦層群相当層	3.0	1.2

ただしZは深度 (m)

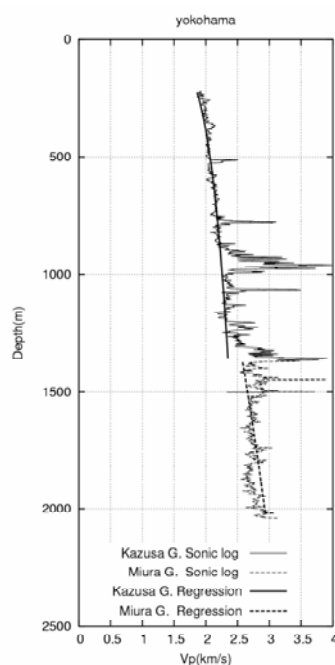


図1 回帰されたトレンド構造と横浜におけるP波速度構造

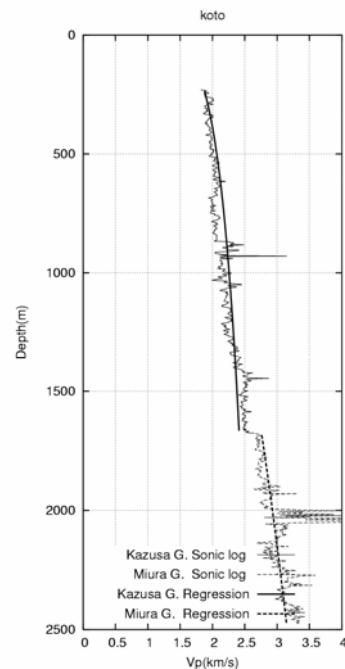


図2 回帰されたトレンド構造と江東におけるP波速度構造

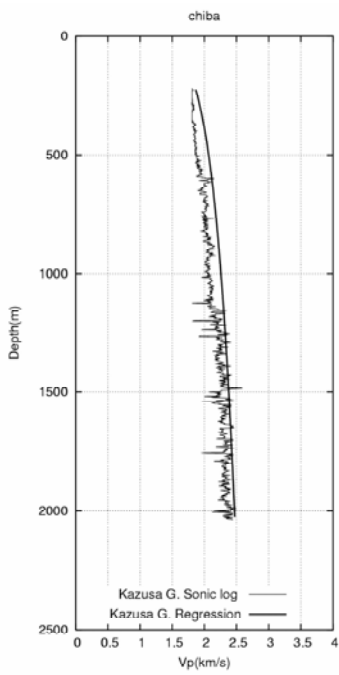


図3 回帰されたトレンド構造と千葉におけるP波速度構造

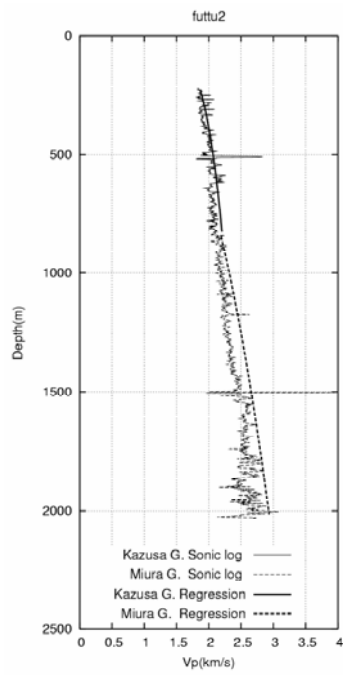


図4 回帰されたトレンド構造と富津におけるP波速度構造

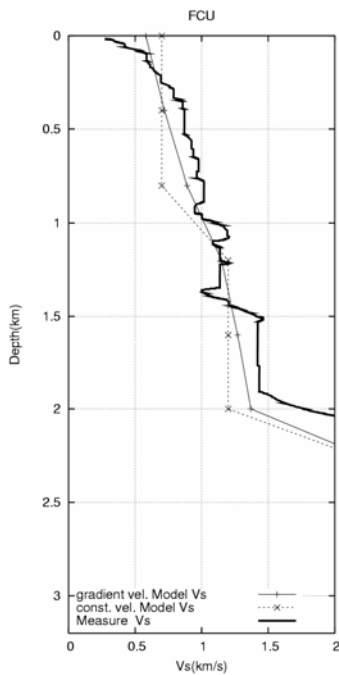


図5 府中のVSP検層とgradientモデルconstantモデルのS波速度の比較

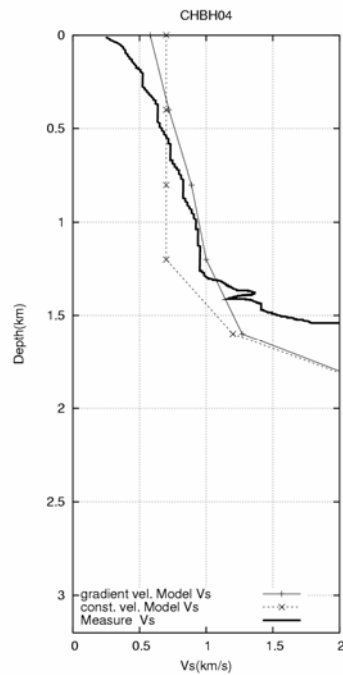


図6 下総のVSP検層とgradientモデルconstantモデルのS波速度の比較

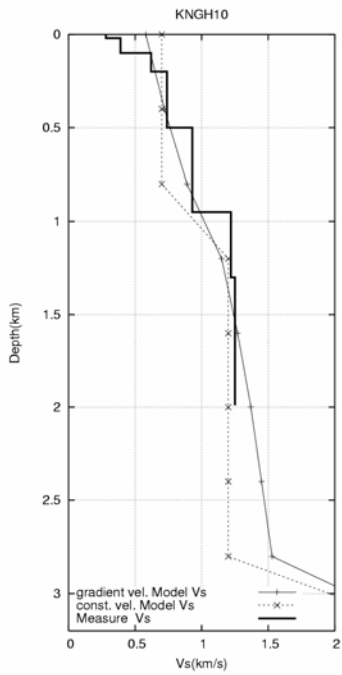


図7 横浜(KNGH10)のVSP検層と gradientモデル、constantモデルのS波速度の比較

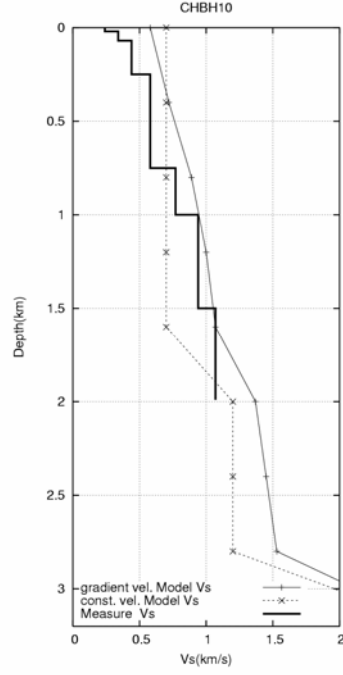


図8 千葉(CHBH10)のVSP検層と gradientモデル、constantモデルのS波速度の比較

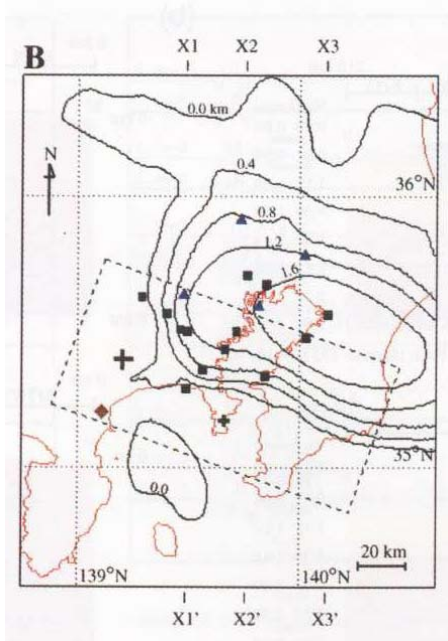


図9 Sato(1999)による三次元地下構造モデルにおける上総層群相当層の下面深度

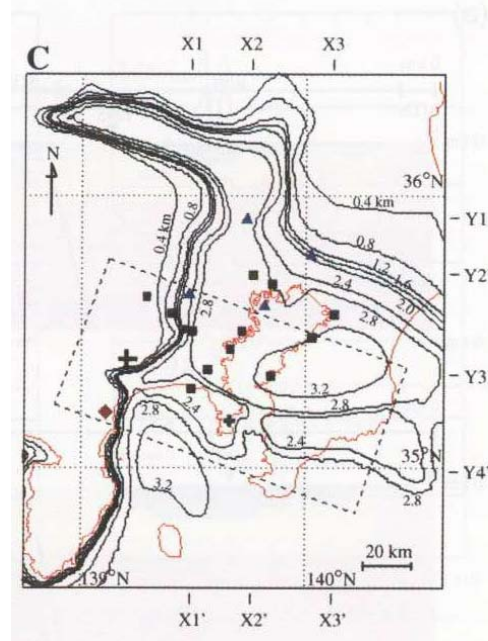


図10 Sato(1999)による三次元地下構造モデルにおける三浦層群相当層の下面深度

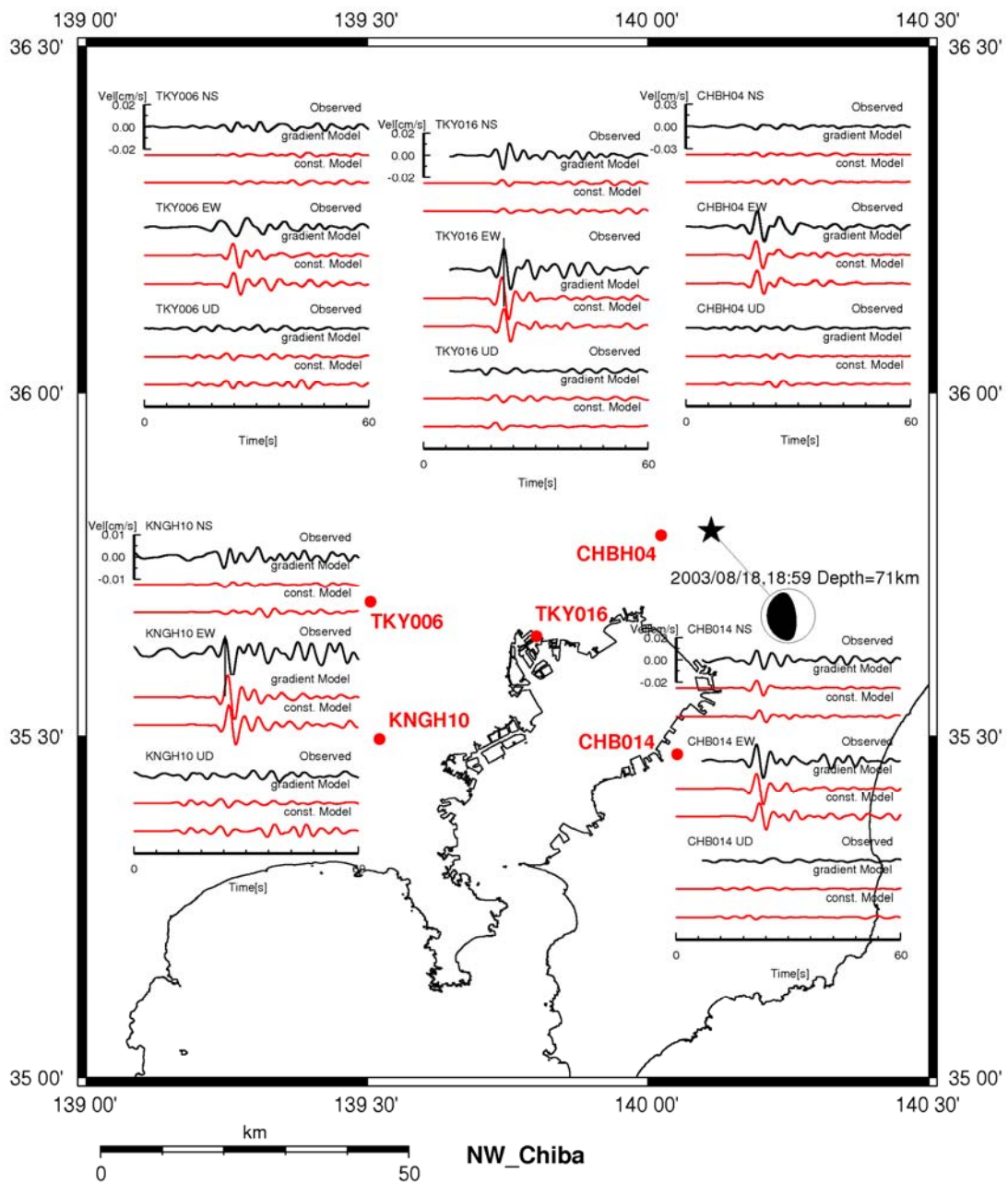


図11 2003年千葉県北西部の地震 (M4.6、震源深さ71km) のシミュレーション結果

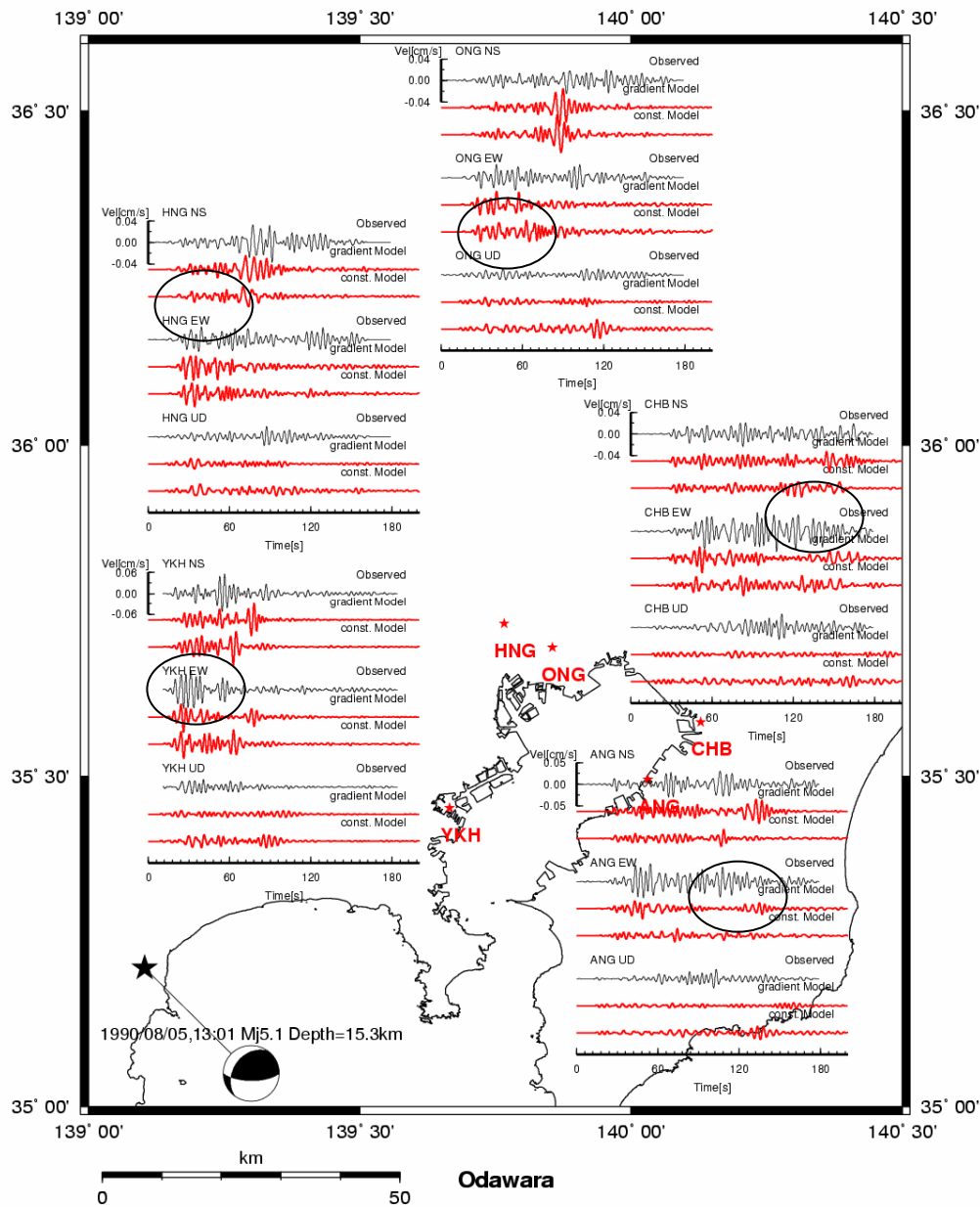


図12 1990年小田原の地震 (M5.1、震源深さ13km) のシミュレーション結果

謝辞

HNG、CHB、ANG、ONGは(独)消防研究所座間信作博士より、YKHは東京工業大学瀬尾先生、佐間野先生(当時)より提供して頂いた記録を用いました。また、K-NET、KiK-NETの観測記録を使用いたしました。記して感謝いたします。

(e) 引用文献

- 1) T. Sato, Robert W. Graves, and Paul G. Somerville: 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., 89(3) pp.579-607, 1999

- 2) 山中浩明,山田伸之:微動アレー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, 55(1) pp.53-65, 2002
- 3) 川崎市: <http://www.hp1039.jishin.go.jp/kozo/kawasaki3/mokuji.htm>
- 4) 千葉県: <http://www.hp1039.jishin.go.jp/kozo/Chiba3/mokuji.htm>
- 5) 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;
- 6) 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, 56 pp.1-32, 1996
- 6) 愛知県設計用入力地震動研究協議会(2002): 愛知県設計用入力地震動の作成—想定地震による強震動予測—報告書

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Takashi Hayakawa, Toshiaki Sato	MODELING OF INHOMOGENEITY IN SEDIMENT LAYERS IN TOKYO METROPOLITAN AREA IN JAPAN FOR STRONG GROUND MOTION PREDICTION	13 th WCEE	平成16年8月

(g) 特許出願

なし

(3) 平成17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平成16年度までに収集および取得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、堆積層の詳細な速度分布および揺らぎのモデル化および妥当性の検討を行い、上より短周期の地震動特性の評価を行う。

具体的研究項目は以下のとおりである。

- ・表面波の位相速度データの基づいて関東平野の3次元モデルを改良する。
- ・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および減衰特性の評価を行う。
- ・堆積地盤と地殻内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、短周期地震動の評価を行なう。