

3.5 地下構造モデル化の研究

3.5.1 三次元速度・Q構造モデル

3.5.1.1 研究課題全体の成果

山中浩明（東工大総合理工）

山田伸之（京大防災研）

古村孝志（東大地震研）

佐藤浩章・東貞成・芝良昭（電力中央研）

早川崇・佐藤俊明（大崎総研）

(1) 研究の背景と目的

強震動評価において堆積平野の3次元地下構造の影響を考慮することの重要性は、1970年代から指摘されており、関東平野ではいくつもの地下構造探査が実施されてきている。近年、交付金による自治体の調査も活発に進められ、地下構造データは急速に蓄積され、3次元堆積層構造モデルがいくつか提案されている（Koketu and Higashi, 1992; Sato et al., 1999; 山中・山田, 2002）。しかし、これらのモデルは、空白の地域があることや単純すぎることなどの理由で強震動シミュレーションのために必ずしも十分ではなく、観測記録の再現は現状でも容易ではない。

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、強震動の強さと被害の関係についても明らかにする。

(2) 地下構造情報データの収集

近年、微動アレイ探査は、S波速度構造探査として実績が積み重ねられつつあり、関東平野でも多数探査が行われている。とくに、自治体の地下構造調査によりその数は飛躍的に増加している。ここでは、3次元S波速度構造モデルの構築のために、周期数秒までの微動アレイ探査結果の収集を行った。とくに、最終結果であるS波速度構造モデルだけでなく、その基礎になっているレイリー波の位相速度データも収集することとした。これは、得られるS波速度構造モデルが逆解析時の仮定により異なる可能性があるためである。現在までに収集したデータ（一部は図面のデータのみ）は、図1に示す182地点での結果である。関東平野北部および東部でデータ密度が疎であることがわかる。今後、こうした地域で微動アレイ探査を実施し、データの蓄積を行うことを考えている。

つぎに、関東平野周辺で発生した中小地震の強震記録を用いて、P波とS波初動を読み取り、堆積層のない地殻・マントルのモデルから期待される理論走時を計算し、その差（走

時残差)を求めた。処理するデータが多量になることから、ニューラルネットワークにより自動決定するアルゴリズムを開発し、関東平野周辺でのK-Net観測点でのデータに適用した。図2には、得られたS波の走時残差が示されている。走時残差は、堆積層の存在による走時の遅れであると解釈でき、関東平野中央部で大きくなっている。既存の3次元モデル(山中・山田,2002)に対する理論走時残差を計算したところ、類似する走時残差分布が得られた。しかし、詳細にみると異なる部分もあり、モデル修正の必要があることがわかった。とくに、相模湾については大幅にモデルを修正しなければならない。

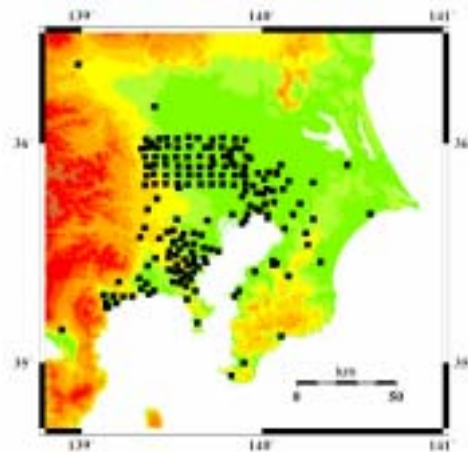


図1：微動アレイ探査の位置

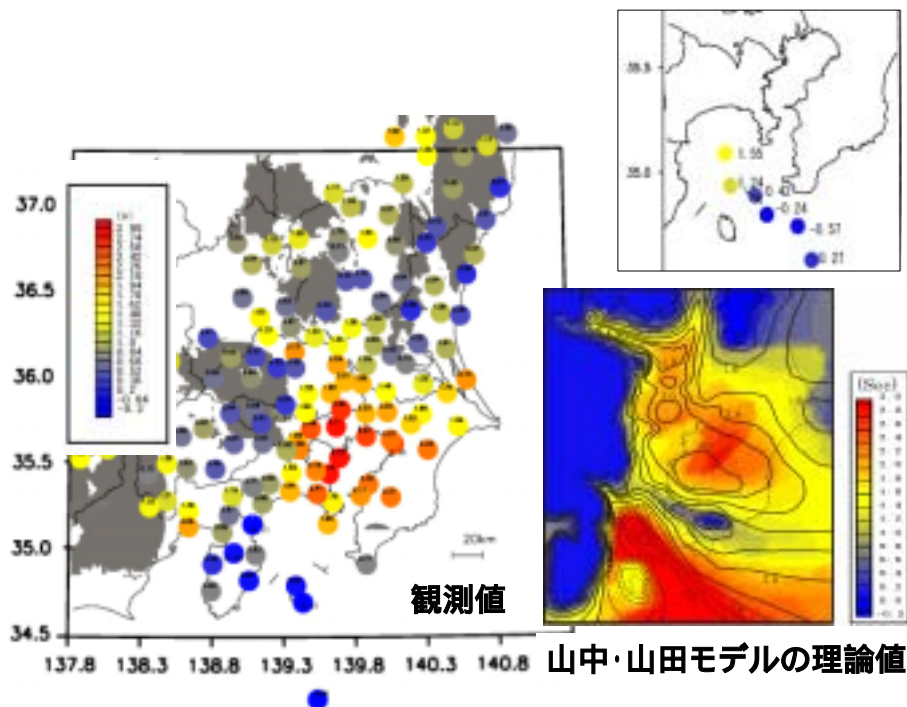


図2：S波初動の走時残差の分布(左)と山中・山田(2002)によるモデルに対するS波初動の理論走時遅れの比較

(3) 長野県西部地震による地震動のシミュレーション

1984年長野西部地震による熊谷気象台での地震記録は、堆積層の3次元構造の影響が顕著に現れたものであると指摘されている(小山・他, 1992)。彼らによれば、図3の熊谷気象台での1倍強震計の記録にみられる後続位相(主要動の約1分後)は、熊谷から北西のつながる地溝状の堆積層を伝播する表面波であると考えられている。ここでは、既往の3次元地下構造モデル(山中・山田, 2002)を用いて、差分法により長野県西部地震の記録の再現を試みた。図4は、用いたモデルの地震基盤(S波速度3km/s)の深さ分布を示しており、関東平野以外の主要な平野にも堆積層を設定している。ただし、そうした地域ではそれほど詳細にモデル化していない。また、地震基盤より深い部分は、マントルまでの速度層を考慮したが、成層モデルで近似した。水平方向には格子間隔0.4kmで離散化し、深さ方向には、堆積層の最深部の深さ約11kmまでを0.4kmで、それより深い部分を1.5kmの格子間隔で離散化し、合計554*822*54個の格子点でモデル化した。震源モデルとしてYoshida and Koketsu (1990)で示されているすべり分布を、長さ15km幅10kmの断層面上の格子点に点震源を置くことで表現した。断層での破壊については開始点より破壊伝播速度2.5km/sとして同心円状に伝播する形式を想定した。震源時間関数は、三角波を1回積分した関数を用い、立ち上がり時間を0.5sとした。計算には、時間方向に2次、空間方向に4次精度のスタッガードグリッド系の差分式を用いた。

計算された速度波形から1倍強震計の変位出力相当の波形を計算して、図5に観測結果と比較した。熊谷の主要動も含めて、関東平野北西部の観測点での記録は比較的よく再現されている。しかし、熊谷の後続位相は、NS成分では、到着時間が早すぎ、EW成分についてはあまり振幅が大きい。スナップショットで確認したところ、小山・他(1992)の指摘のとおり、この後続位相は前橋の方向から伝播してくることがわかり、前橋から熊谷に至る間の地下構造を修正する必要があると考えられる。さらに、平野南西部の観測点では定性的には観測記録の特徴を再現しているが、定量的な再現にはまだモデルの完成度は十分でないと考えられる。

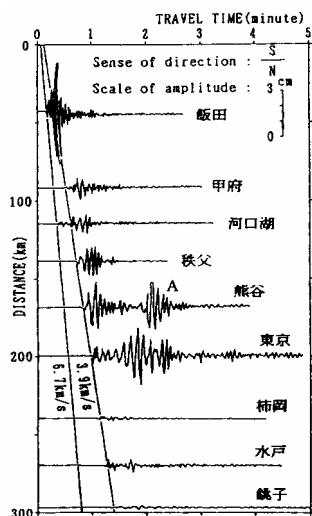


図3：長野県地震の記録
小山・他(1992)

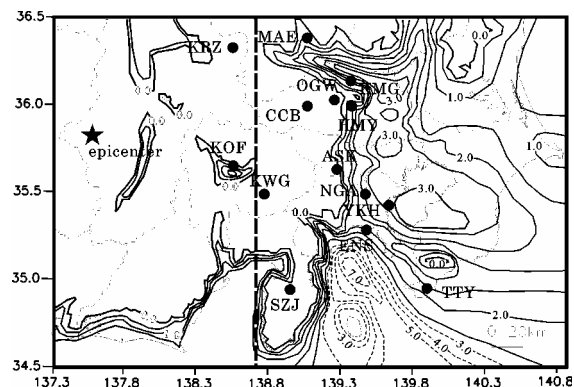


図4：シミュレーションに用いた地下構造モデル
コンターは、地震基盤までの深度。

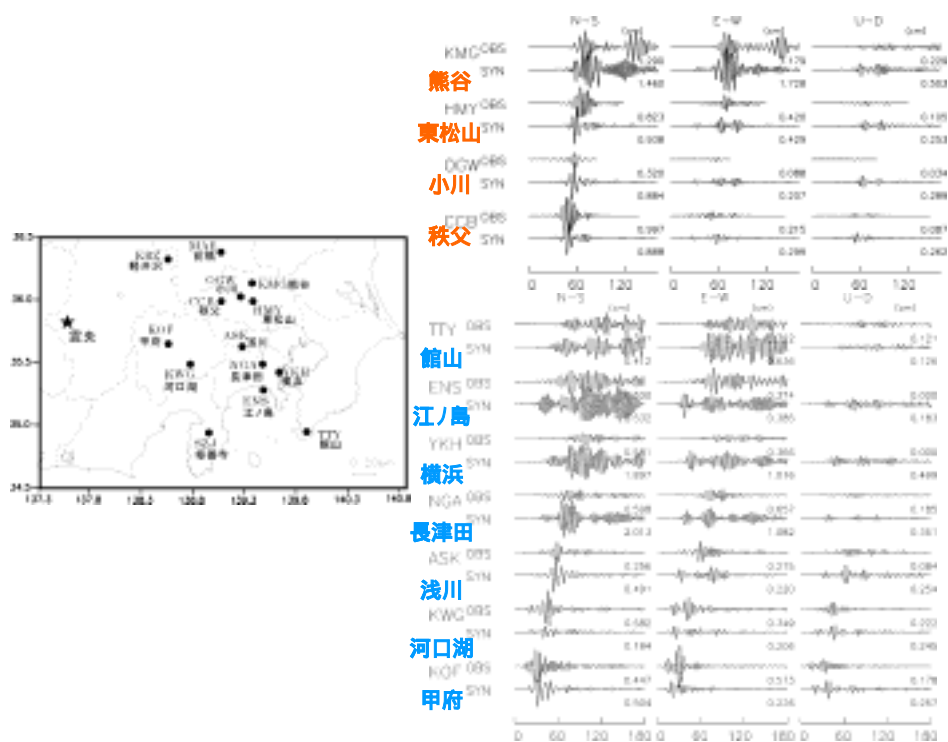


図 5：計算波形と観測波形の比較

(4) 千葉県北西部における 3 次元地震動シミュレーション

千葉県北西部では数多くの地下構造調査が行われ、最近ではこれらの調査結果を統合した 3 次元的地下構造も提案されている（千葉県，2001）。これらのデータを強震動予測に活用するためには、地下構造調査結果から作成された地下構造モデルが実際の地震動記録を説明できることを確認し、また説明できない場合には修正を施していくことが重要である。そこで、千葉県によって提案された地下構造モデルの妥当性を検証するために、モデル領域の直下で発生した地震の 3 次元地震動シミュレーションを実施した。

対象とした地震は、1998 年 11 月 8 日の千葉県中央部の地震で M4.6、深さ 71km である。調査の対象が地震基盤 ($V_s 3\text{km/s}$ 相当) 以浅の堆積層であるため、それ以深については Sato et al. (1999) を参考にしてモデル化し、モホ面以深は一様とした。堆積層の Q 値は、モデル領域内にある防災科学技術研究所の下総地震観測井の鉛直アレー記録から、伝達関数の同定手法（例えば、佐藤・他，2000）により求め、 $Q_s = V_s / 42$ となった。また震源時間関数には、周期 1 秒の擬似デルタ関数を用いた。なお、3 次元の地震動計算には、擬似スペクトル法と差分法のハイブリッド手法（Higashi and Sato, 2003）を用いている。

図 6 に、対象領域の北部に位置する我孫子市 (ABK) と南部に位置する八千代市 (YCY) での計算結果を示す。ABK では S 波初動から数波がよく再現できている。また YCY ではシミュレーション結果が観測記録よりもかなり小さく、観測結果の再現性は良好ではない。他の地点においても南部が過小評価される傾向は同様であり、現状の地下構造モデルにおいてはより堆積層の厚い南部の地下構造を修正する必要性が明らかとなった。

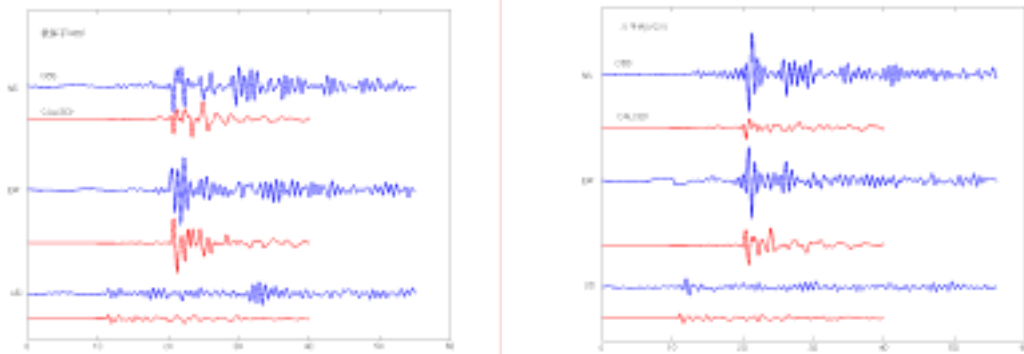


図6：我孫子市と八千代市での観測記録と計算波形の比較

(5) 堆積層における速度の不均質性の評価

上述のような既往の関東平野の堆積層のモデルは、比較的周期の長い地震動を評価することを目的として作られたモデルである。しかし、首都圏に建つ建造物の多くは、中低層ビルや木造家屋のような短周期建造物であり、その地震時安全性もあわせて考えることが首都圏全体の地震防災上、避けて通れない状況である。このようなことから、より短周期帯域まで含む広帯域地震動予測に有効な速度構造モデルの構築が必要である。ここでは、既存の反射法やボーリング調査の結果から、より微細な速度構造の特徴を把握し、速度構造の不均質性のサイズとそれにより影響される地震動の周期帯域を把握した上で、より短周期までの地震動が説明可能な三次元速度構造と減衰構造のモデル化について検討する。

まず、不均質構造は、トレンド構造と揺らぎの構造の和として表現できると考え、関東平野の複数地点における深井戸の速度検層（防災科学研究所，1999）等から、トレンド構造における速度の深さによる漸増傾向、ならびにそのようなトレンド構造だけでは表現できない速度の揺らぎの構造に注目した。図7は、厚木での深井戸の検層結果であり、トレンドと揺らぎの2つの構造があることがわかる。トレンド構造は地質によって異なる速度勾配モデルで近似できると考えられる。一方、揺らぎについて検討したところ、2つの地層とも相関距離が3~4m、分散が0.1程度（平均Vpに対して10%程度）の値が得られた。

トレンド構造に関しては、主として深さとともに漸増する速度構造と地震動増幅特性との関係を検討する。また、揺らぎの構造に関しては、影響する周期帯域や散乱減衰との対応を検討している。さらに、複数地点での速度の揺らぎを

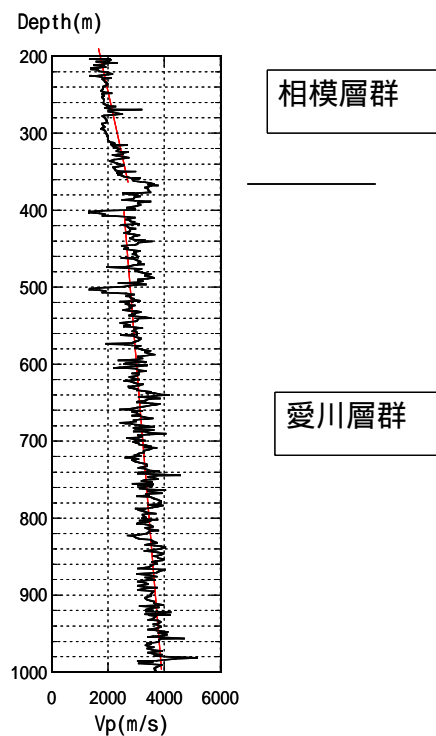


図7：厚木での深井戸での検層結果

調査して、その特性を把握することを考えている。

(6) 関東地震による強震動の評価

1923年関東地震(Ms8.2)時の、関東平野における地震波の伝播特性と、強震動の生成過程を明らかにするために、関東平野の3次元地下構造モデル(山中・山田, 2002)と震源モデル(Wald and Sameville, 1995)を用いた強震動シミュレーションを行った。関東地震の3Dシミュレーションは、これまでにSato et al. (1999)や山中・山田(2002)によって行われており、やや低い周波数帯($f=0.25\sim 0.5\text{Hz}$)の強震動の評価がよく行われている。ここでは、木造建造物の被害と震度に対応する、周波数1~2Hz以上の短周期地震動の評価することを目的に試験計算を行った。

計算領域を関東平野周辺の約 $205\text{km}\times 205\text{km}\times 80\text{km}$ に選び、これを水平0.2km鉛直0.1kmの格子間隔で離散化した。速度構造モデルには山中・山田(2002)のものを用い、下総群、上総群、三浦層群の堆積層と先新三系基盤の3次元形状をモデル化した。最小S波速度は 0.5km/s であり、最大周波数1Hzまでの地震動を評価可能である。また、地殻・上部マントル構造にはフィリピン海プレート、太平洋プレート、モホ面の3次元形状を組み込んでいる。Wald and Sameville (1995)の震源モデルは遠地地震記録と地殻変動データをもとに求められたものであり、このままでは周波数0.25Hz以上の短周期地震動の放射が十分でない。そこで、本研究ではこの震源モデルに対して、すべり分布に揺らぎを与えることにより短周期地震波の放射を試みた。揺らぎ分布にはvon Karman型のものを用い、相関距離の大きさを断層の走行、傾斜方向の長さのそれぞれ1/4と仮定した。計算は地震研究所の並列計算機(SGI Altix3000)を用いて行った。32CPUを用いた並列計算では20時間を要した。

図8に示した波動伝播のスナップショットでは、M8クラスの断層から放射される周期数秒以上の大振幅の地震動が特徴的である。計算から求められた震度分布では、断層面に沿って南関東全域に震度5~7の揺れを再現しており、これは武村・諸井(2001)が住家全壊率から推定した震度の分布をよく説明する。

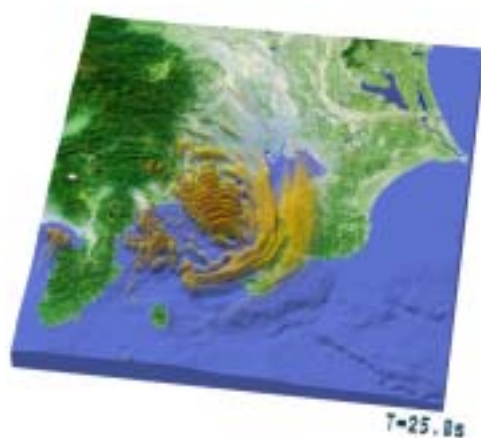


図8：1923年関東地震の強震動シミュレーション。地動のスナップショット(地震発生から25秒後)。

今後の課題として、周波数 1Hz 以上の短周期強震動シミュレーション実用化のための緊急の課題として、1)短周期震源モデルの高精度化(すべり分布、破壊伝播速度、Rise Time の揺らぎの定量的評価)、2)高分解能地下構造モデル(速度構造の水平不均質性とその揺らぎの大きさ)、3)表層地盤における増幅特性の評価、などがあげられる。

(7) 平成 15 年度の研究計画

以上の研究成果を踏まえて、平成 15 年度の研究を以下のように計画している。

- ・ 微動アレイ探査の実施及び地下構造データの統合
- ・ 地震記録の分析による地下構造モデル修正
- ・ 速度の深度勾配および不均質モデルの作成
- ・ 既存の地下構造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
- ・ 関東周辺の被害地震による強震動シミュレーション

引用文献

- 1) Koketsu, K. and S. Higashi : Three dimensional topography of the sediment/basement interface in the Tokyo metropolitan area, central Japan, Bull. Seism. Soc. Am. 82, 2328-2349, 1992
- 2) Sato, T., R. W. Graves, and P. 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, 579-607, 1999
- 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 次元速度構造モデルの構築, 物理探査, Vol. 55, No.1, 53-65, 2002
- 4) 小山信, 瀬尾和夫, 佐間野隆憲: 熊谷地方気象台の地震観測記象に認められる顕著な後続位相, 日本建築学会構造系論文報告集, 440, 221-227, 1992.
- 5) Yoshida, S. and K. Koketsu: Simultaneous inversion of waveform and geodetic data for the rupture process of the 1984 Naganoken-Seibu, Japan, earthquake, J. Int., 103, 355-362, 1990.
- 6) 千葉県: 第 2 回堆積平野地下構造調査成果報告会予稿集, 2001
- 7) 佐藤浩章, 金谷 守, 石川博之, 金戸俊道: 鉛直アレイ記録に基づく上下動の減衰特性とシミュレーション, 日本建築学会大会梗概集, 構造 2, pp.149-150, 2002
- 8) Higashi, S. and H. Sato: Three-dimensional simulation of seismic motions in the northwestern Chiba Prefecture, Japan, IUGG2003, 2003
- 9) 防災科学技術研究所: 関東地域の孔井データ資料集, 防災科学技術研究所研究資料, Vol. 191, 1999
- 10) Wald, D. J. and P. G. Somerville: Variable-slip Rupture model of the Great 1923 Kanto, Japan, Earthquake: Geodetic and body-waveform analysis, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 85, pp. 159-177, 1995

成果の論文発表・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
枇谷亜紀 山中浩明	ニューラルネットワークによる強震記録の初動自動検出に関する研究	2003年地球惑星科学合同大会	平成15年 5月
山田伸之 山中浩明	1984年長野県西部地震のやや長周期地震動のシミュレーション～その2～	2003年地球惑星関連科学合同大会	平成15年 5月
東 貞成 佐藤浩章	千葉県北西部における3次元地震動シミュレーション	2003年地球惑星関連学会合同大会	平成15年 5月
早川崇	関東平野西部における堆積層の上下方向の不均質特性と人工地震波伝播	日本地震学会 2002年秋季大会	平成14年 11月13日

3.5.1.2 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（清水建設和泉研究室）
佐藤俊明（清水建設和泉研究室）

(1) 研究の背景と目的

関東平野においては早くから地下構造探査が進められ、現在では盆地内のやや長周期帯域(周期数秒から20秒)の地震動が説明可能な三次元速度構造モデルがいくつか提案されている[Koketsu et al.(1992), Sato et al.(1999), 山中・他(2002)]。このようなモデルが有効なやや長周期帯域の地震動予測は、超高層ビルや免震構造物のような長周期構造物の地震時安全性を考える上で重要である。しかし、首都圏に建つ構造物の多くは、中低層ビルや木造家屋のような短周期構造物であり、その地震時安全性もあわせて考えることが首都圏全体の地震防災上、避けて通れない状況である。このようなことから、より短周期帯域まで含む広帯域地震動予測に有効な速度構造モデルの構築が必要である。

近年反射法探査や深層ボーリングが多く実施され、より微細な地下構造のモデル化に有用な高精度なデータが急激に蓄積されつつある。本研究では、これらのデータから現状の三次元速度構造モデルでは反映されていない、より微細な速度構造の特徴を把握し、速度構造の不均質性のサイズとそれにより影響される地震動の周期帯域を把握した上で、より短周期までの地震動が説明可能な三次元速度構造と減衰構造のモデル化について検討する。

(2) 関東平野における堆積層の速度構造の特性とそのモデル化

図1に関東平野の複数地点における鉛直方向のP波速度構造[防災科学研究所(1999)]を示す。同図をみると全地点でP波速度は深さとともに漸増していることがわかる。図2に厚木におけるP波速度構造を拡大して示す。P波速度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の重ね合わせとみなすことが可能である。

このような速度構造の特徴は未だ三次元速度構造には反映されていない。以下(3)、(4)においてそれぞれトレンド構造、揺らぎ構造が地震動増幅に与える影響について述べる。

(3)トレンド構造が地震波の増幅に与える影響

トレンド構造が地震動増幅に与える影響について検討する。図3は水平成層地盤における4層モデルと8層モデルでの表面波(Love波)と実体波の増幅率[Hisada et al.(1990)]である。4層は現状の地下構造の層数レベル、8層は4層モデルにトレンド構造を付与したモデルとみなすことができ、両者の増幅率の差はトレンド構造によるものと近似的考えられる。8層モデルと4層モデルで増幅率を比較すると実体波、表面波とも一次固有周期より短周期側で大きな違いが認められる。このことは三次元速度構造の各地点で適切なトレンド構造をモデル化すれば、現状の三次元速度構造モデルをより高精度にできることを示唆していると考えられる。関東平野の複数地点で存在する深井戸のP波速度の検層データ

を主として、これに近年急激に増大した反射法探査、常時微動および地震観測データを援用すれば、関東平野の面的なトレンド構造の検討は可能であると考えられる。

(4)不均質速度構造が地震波の散乱減衰に与える影響

揺らぎの構造に関しては、深井戸の P 波検層データから P 波速度の揺らぎを検討し、影響する周期帯域や散乱減衰との対応を検討した。

図 2 の厚木における堆積層の P 波速度構造から各層毎にトレンド構造を除去してうえで、ゆらぎの統計的な性質を各層で求めた。P 波速度の揺らぎは下式で算定する。

$$\sigma(z) = [Vp(z) - Vp'(z)] / Vp0 \quad (1)$$

$Vp'(z)$ はトレンド構造で各層の P 波速度構造を深度の一次式で回帰し算定した。 $Vp0$ は各層の平均 P 波速度である。

つぎに揺らぎの自己相関関数を 2) 式で算定し、3) 式で表現される Exponential 型の自己相関関数で相関距離 a を回帰した (図 4)。

$$R(z) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_0 + z) \quad (z_0) \quad (2)$$

はアンサンブル平均

$$\text{Exponential 型: } R(z) = \exp(-z/a) \quad (3)$$

相関距離 a と分散 σ^2 を表 1 に示す。両層とも相関距離が 3~4m、分散が 0.01~0.02 程度 (平均 Vp に対して 10%程度) の値が得られた。

不均質構造の自己相関関数が得られれば、一次散乱仮定に基づく散乱 Q を概略算定することが可能である [Sato et al.(1997)]。相模層群の S 波の散乱減衰 Qs^{-1} を、平均 S 波速度を 700m/s とし、さらに同層 P 波速度の不均質構造の相関距離と分散を用いて算定した。S 波速度と P 波速度の揺らぎの相関距離と分散が等しいことは同層内でポアソン比が一定である場合成立する。図 5 に散乱減衰 Qs^{-1} を示す。散乱減衰は 0.0146 秒にピークを有し、我々の主な対象である 0.1 秒以上では Qs が 1000 以上となった。この結果は深井戸の調査による Qs [木下(2001)] と比較して非常に大きな値である。

(5) 平成 15 年度の研究計画

今後関東平野全域の不均質構造をモデル化するため、他地点での速度検層データも検討する予定である。また一方で速度の揺らぎの相関長さと強度が地震動の減衰の周期特性に及ぼす影響についてさらに詳細な解析を進め、定量的な評価に資する予定である。

表 1 厚木における P 波速度のゆらぎの統計的性質

	相関距離	分散
	a(m)	σ^2
相模層群	3.6	0.010
愛川層群	3.3	0.017

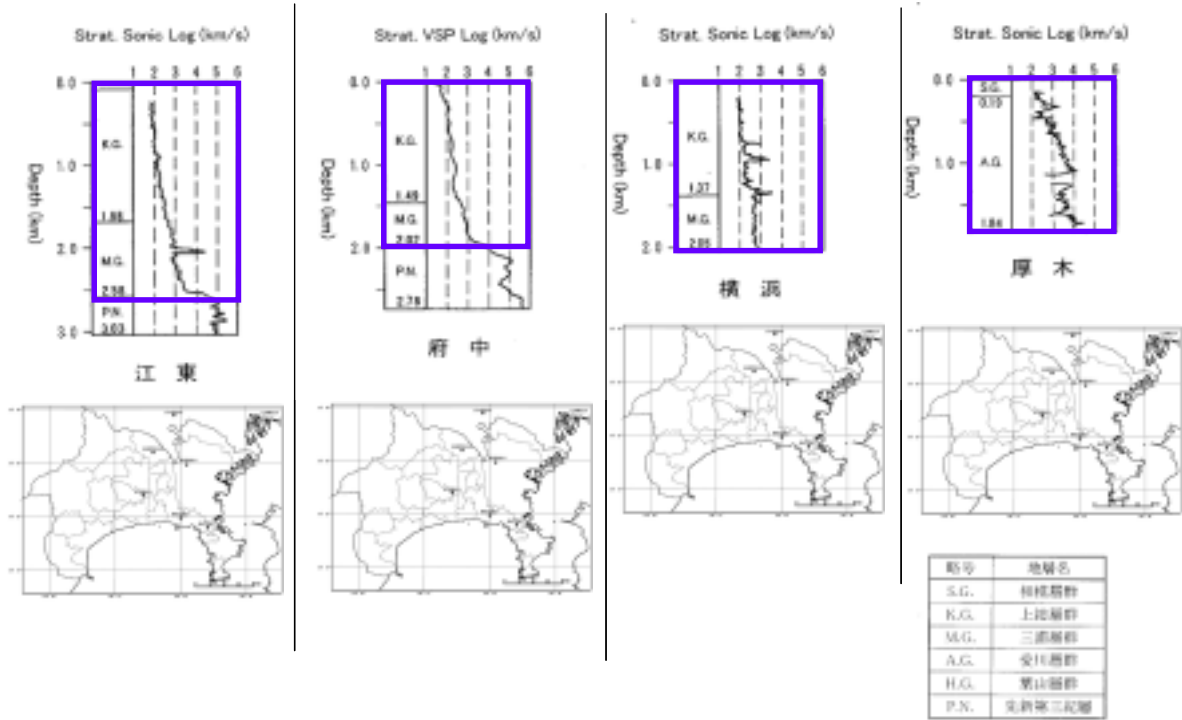


図1 関東平野の複数地点における鉛直方向のP波速度構造 [防災科学研究所(1999)]

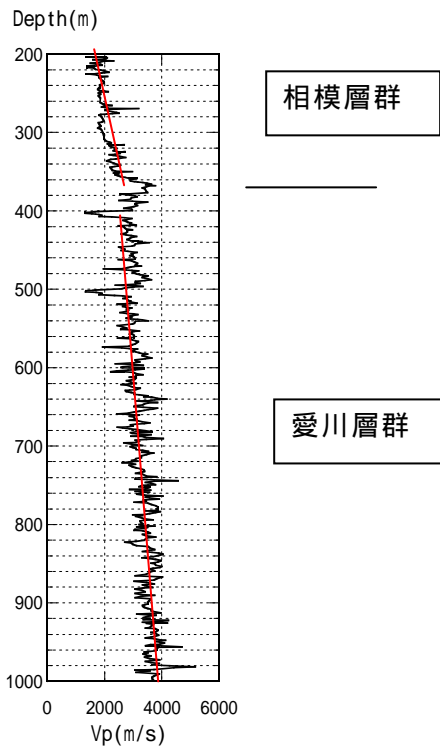


図2 厚木観測井におけるP波速度構造 (図1の一部拡大) [防災科学研究所(1999)]

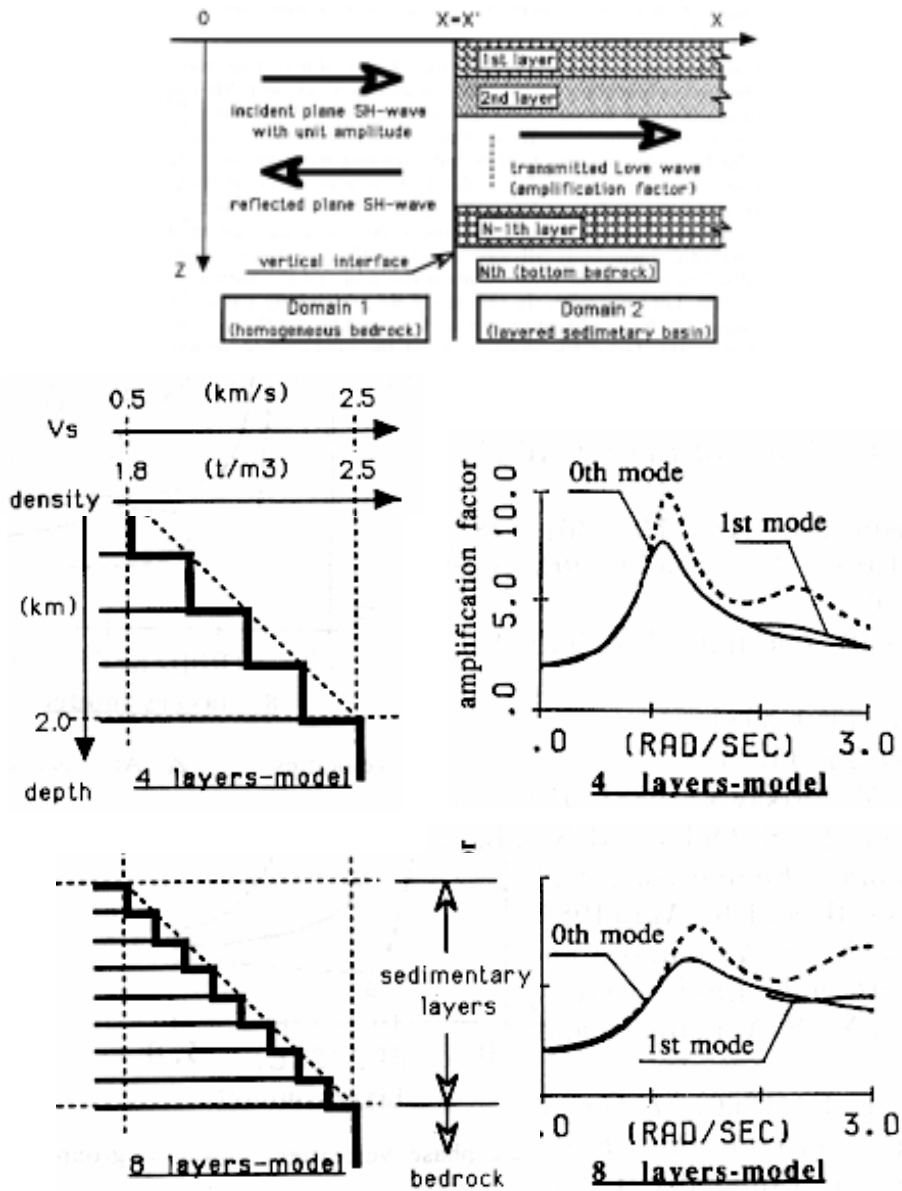


図3 水平成層地盤における表面波と実体波の増幅率[Hisada et al. (1990)]

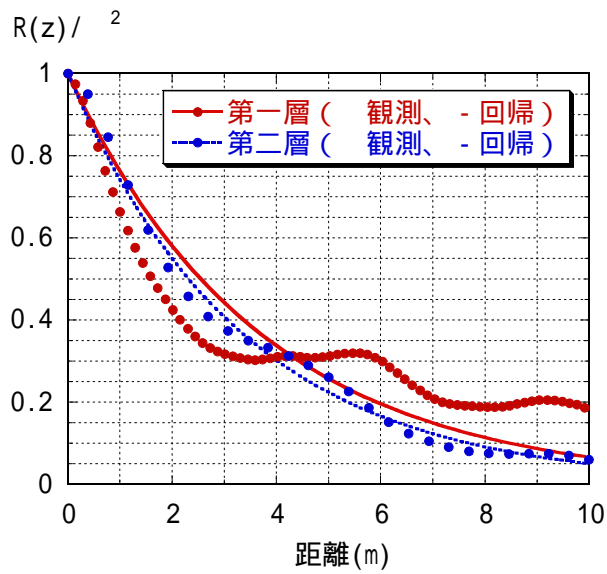


図4 自己相関関数の回帰

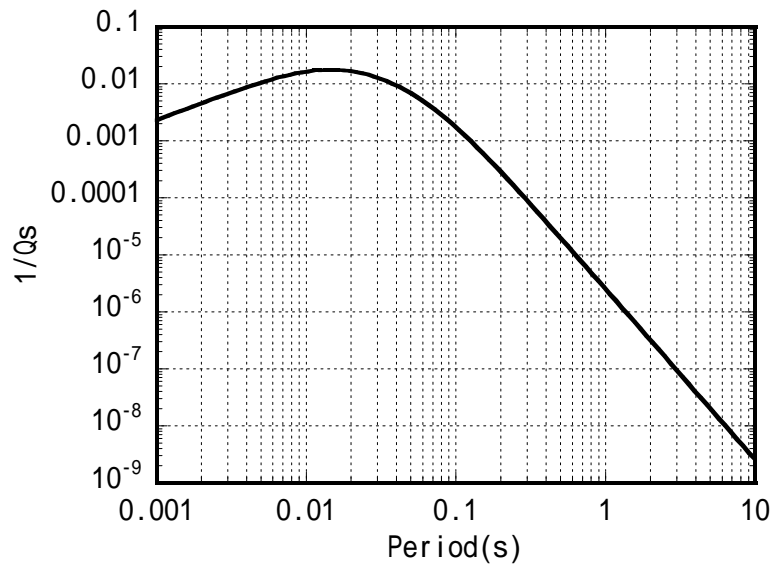


図5 厚木の不均質構造による散乱減衰 Qs^{-1}
(後方散乱の最小角度は 30° を仮定)

引用文献

- 1) Frankel.A. and R. W. Clayton: Simulations of Seismic Scattering, J. Geophys. Res., Vol. 91, 6465-6489, 1986.
- 2) Hisada, Y., Yamamoto, S., and Tani, S., : AMPLIFICATION FACTOR DUE TO LOVE WAVES IN MULTI-LAYERED SEDIMENTARY BASINS, 第8回日本地震工学シンポジウム, Vol.1, 433-438, 1990
- 3) Koketsu, K. and S. Higashi : Three dimensional topography of the sediment/basement interface in the Tokyo metropolitan area, central

- Japan, Bull. Seism. Soc. Am. 82, 2328-2349, 1992
- 4) Sato, H. and Michael C. Fehler : SEISMIC WAVE PROPAGATION AND SCATTERING IN THE HETEROGENEOUS EARTH, Spinger-Verlag, 1997
 - 5) 日本建築学会：地震荷重-内陸直下地震による強震動と建築物の応答，2000
 - 6) Toshiaki Sato, S., Robert W. Graves, and Pau 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, 579-607, 1999
 - 7) 防災科学技術研究所：関東地域の孔井データ資料集，防災科学技術研究所研究資料，Vol. 191，1999
 - 8) 木下繁夫，大池美保：関東地域の堆積層-基盤系における減衰特性 $-0.5 \sim 16 \text{ Hz}$ -，地震 2，Vol. 55，No. 1，19-31，2002
 - 9) 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，Vol. 55，No. 1，53-65，2002

成果の論文発表・口頭発表等

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
早川崇	関東平野西部における堆積層の上下方向の不均質特性と人工地震波伝播	日本地震学会 2002 年秋季大会	平成 14 年 11 月 13 日

3.5.1.3 千葉県北西部における3次元地震動シミュレーション

佐藤浩章（電力中央研）

東貞成（電力中央研）

芝良昭（電力中央研）

(1) 研究の背景と目的

千葉県北西部では、近年数多くの地下構造調査が行われ、最近ではこれらの調査結果を統合した3次元的な地下構造も提案されている¹⁾。これらのデータを強震動予測に活用するためには、地下構造調査結果から作成された地下構造モデルが実際の地震動記録を説明できることを確認し、また説明できない場合には修正を施していくことが重要である。そこで本年度は、千葉県によって提案された地下構造モデルの妥当性を検証するために、モデル領域の直下にある地震を用いて3次元地震動シミュレーションを実施した。

(2) 対象とした地震と3次元地下構造モデル

対象とした地震は、図1に示す本研究で対象とした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M4.6、深さ71kmである。地震動シミュレーションに用いた地下構造モデルは、堆積層以浅については、図2に示す千葉県によって提案されている地下構造モデルを用い¹⁾、それ以深の地震基盤($V_s3\text{km/s}$ 相当)からモホ面までのより深い部分については、Sato et al.²⁾を参考にして、それ以深は一様としてモデル化を行った。各層の物性値は表1に示されている。

(3) 堆積層におけるQ値の同定

堆積層のQ値については、情報が得られていないため、モデル領域内にある防災科学技術研究所の下総地震観測井の鉛直アレー記録から、伝達関数の逆解析手法^{例えは3)}により求めた。具体的な手順は、次の通りである。まず、地表と地中(GL-2,300m)の観測記録のNSおよびEW成分からそれぞれS波部分のスペクトルを求め、地中記録に対する地表記録の各水平成分のスペクトル比を求めることにより、伝達関数を推定する。次に、この伝達関数を満たすような地盤モデルを、逆解析手法により推定する。地盤モデルに基づく理論的な伝達関数の計算は、1次元の重複反射理論により行い、逆解析には遺伝的アルゴリズム⁴⁾を用いて、NS成分とEW成分を同時に満たすようなQ値を同時インバージョンにより求めた。一般に、伝達関数の逆解析においては、S波速度とQ値を変数にした解析が行われるが、本研究ではS波速度については前節で仮定したS波速度をそのまま使用することとし、Q値のみを変数とした。なお、本研究ではシミュレーションの対象とする周波数の上限を1Hzとするため、Q値の同定は0.1Hz~1Hzの周波数領域に対して行い、Q値のモデルについては周波数依存性を考慮せず、各層におけるS波速度の関数として定式化した。

解析の結果としては、 $Q_s=V_s/42$ が得られ、堆積地盤において簡易的に用いられている $Q_s=V_s/15$ よりも小さい値となった。図3には、NS成分、EW成分の観測スペクトル比と逆解析により求められたQ値を用いた理論スペクトル比を示す。図によれば、観測スペクトル比と理論スペクトル比のピーク位置が、EW成分において若干異なっていることが分かる。

伝達関数のピーク位置は、おもに V_s の値に起因することが知られており⁵⁾、これは V_s を同定しなかったことによる影響と考えられる。しかしながら、NS 成分については、同定した Q 値を用いた伝達関数は、全体的に観測値をほぼ満足しており、また EW 成分についてもその振幅レベルは観測値とほぼ同等である。また、他の観測記録を用いた逆解析においても、ほぼ同じ Q 値が得られたことから、今回得られた Q 値は妥当な値であると考えられる。

(4) 3次元地震動シミュレーション

地震動シミュレーションには、3次元擬似スペクトル法を並列化し、大規模シミュレーションに対応できるように拡張した PSM-FDM ハイブリッド法を用いた⁶⁾。本手法は、深さ方向のマルチグリッド化が可能なため、モデルの離散化間隔は、水平 (x-y) 方向は 160m、深さ (z) 方向は、情報量に合わせて、堆積層内部を 80m、モホ面までを 160m、それ以深を 320m とした。対象とする周波数領域は、前述の通り 1Hz までとし、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。震源は、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) とする。境界の処理については、計算領域の水平面内の周囲に 20 格子点の幅で Cerjan et al.⁷⁾ の吸収領域を設けて地震波動場の回りこみを吸収する設定にしたほか、領域の下端には 60 格子点幅で同様の吸収境界を設定すると同時に座標変換 (マッピング) によって下端の境界面を遠方にする工夫を行なった。

計算結果の一例として、千葉県我孫子市 (ABK) と八千代市 (YCY) における速度波形の比較を図 4 に示す。対象領域の北部に位置する ABK では、S 波初動から数波がよく再現できていることが分かる。一方、南部に位置する YCY では、シミュレーション結果が観測記録よりもかなり小さく、観測結果の再現性は良好ではない。今回のシミュレーション結果においては、全体的に北部は、ABK 以外の地点においてもシミュレーション結果は良好であり、また南部は、他の地点においても YCY と同様にシミュレーション結果が過小評価される傾向がみられた。このことは、現状の地下構造モデルについては、おもに対象領域の南部を中心に修正を施していく必要があることを示唆していると考えられる。

(5) 平成 15 年度の研究計画

これまでの地下構造調査結果や地震記録をもとに、千葉県北西部地域における地下構造モデルの見直しおよび修正を実施する。また、当該地域の Q 構造を地震観測記録に基づきさらに詳細に検討する。また、強震動シミュレーションとして観測記録が豊富な千葉県東方沖地震の 3次元シミュレーションを実施する。

引用文献

- 1) 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.
- 2) Sato, T., R. W. Graves, and P. G. Somerville: Three-dimensional finite-difference simulations of long-period strong motions in the Tokyo Metropolitan area during the 1990 Odawara earthquake ($M_s 5.1$) and the great 1923 Kanto earthquake ($M_s 8.2$) in Japan, Bull. Seism. Soc. Am., 89, 579-607.
- 3) 佐藤浩章，金谷守，石川博之，金戸俊道：鉛直アレー記録に基づく上下動の減衰

- 特性とシミュレーション，日本建築学会大会梗概集，構造 2，pp.149-150，2002
- 4) 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報告集，468，pp.9-17，1995
- 5) 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，446，pp.1-11，1993
- 6) 古村孝志，瀧澤一起，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，53，pp.294-308，2000
- 7) Cerjan, C., Kosloff, D., Kosloff, R., and M. Reshef: A nonreflecting boundary condition for discrete acoustic and elastic wave equations. , Geophysics, 50, 705-708, 1985

成果の論文発表・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
東 貞成 佐藤浩章	千葉県北西部における 3 次元地震動シミュレーション	2003 年地球惑星関連学会合同大会	平成 15 年 5 月

謝辞

千葉県消防地震防災課の浅尾一巳氏には多大なご協力をいただくとともに、Kknetchiba のデータを使用させていただきました。また、Q 値の同定では、防災科学技術研究所の下総地震観測井の記録を使用させていただきました。記して謝意を表します。

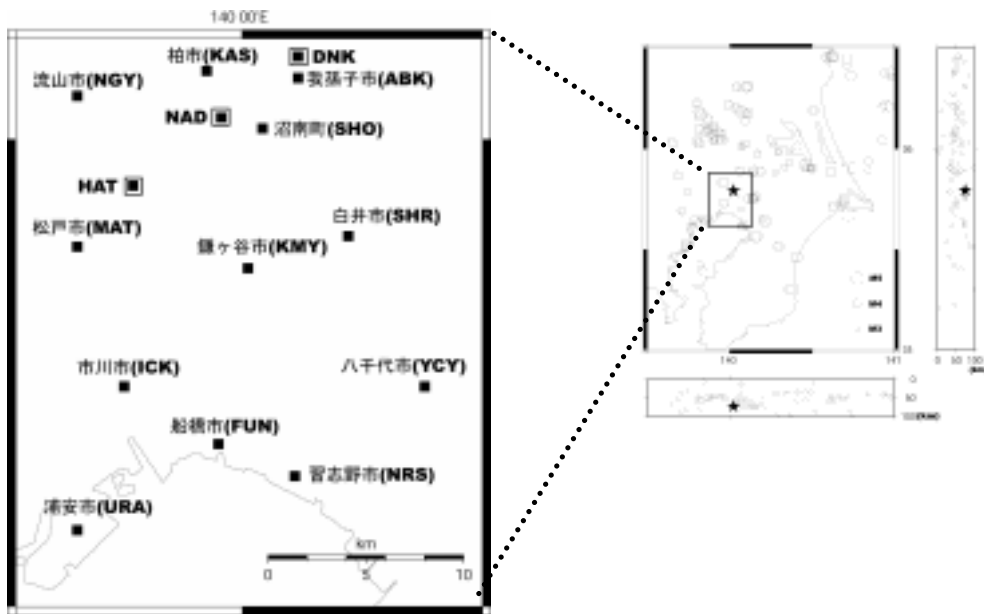


図1 シミュレーション領域と対象地震の震源位置
 (左図の各地点は千葉県及び電中研による地震観測点を表す)

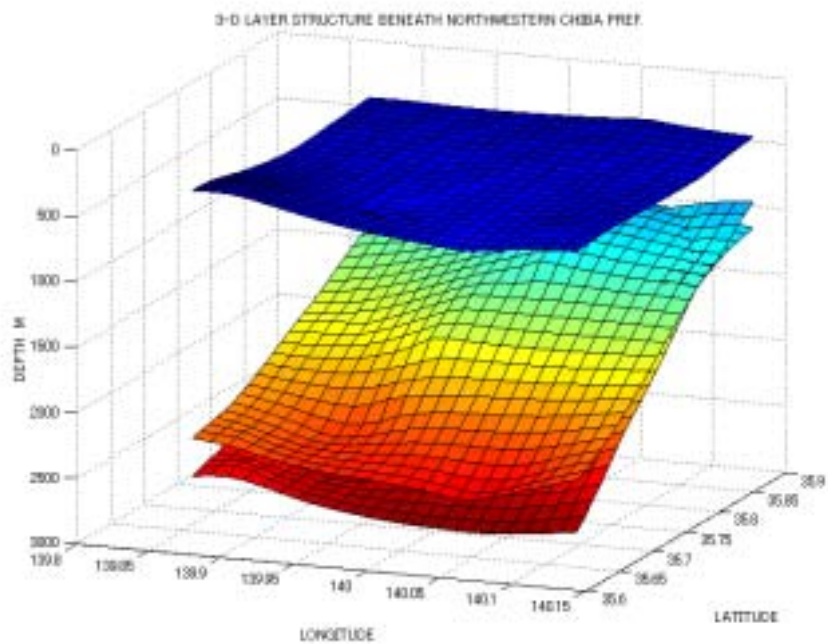


図2 堆積層の地下構造モデル
 (上から, 上総層, 三浦層, 先新第三系基盤の上面位置を表す)

表 1 各層の物性値

層番号	P 波速度 m/s	S 波速度 m/s	密度 t/m**3	Q 値
1	1700	450	1.8	10.7
2	2200	900	2.0	21.4
3	2900	1500	2.3	35.7
4	5700	3000	2.5	150
5	5700	3330	2.6	150
6	6600	3710	2.8	250
7	6700	3740	2.8	250
8	7000	3930	3.0	250
9	7900	4440	3.2	500

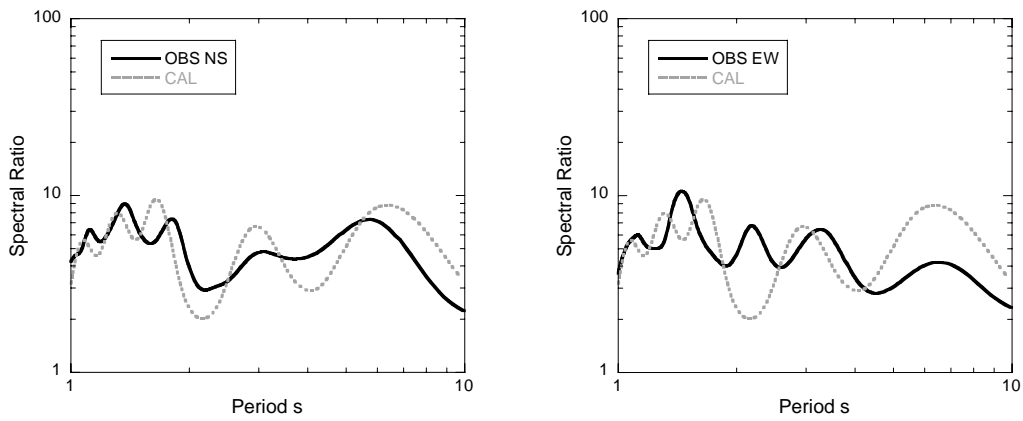


図 3 スペクトル比の比較

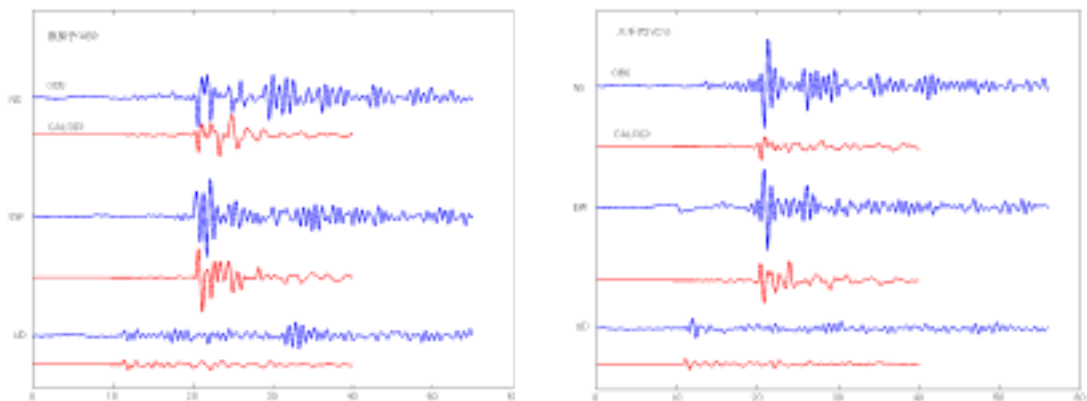


図 4 数値シミュレーション結果
(左：我孫子市，右：八千代市)

3.5.1.4 1923年関東地震の強震動シミュレーション

古村孝志（東大地震研）

(1) 研究の背景と目的

1923年関東地震（ $M_s8.2$ ）時の関東平野における地震波の伝播特性と、強震動の生成過程を明らかにするために、関東平野の3次元地下構造モデル（山田・山中、2002）と震源モデル（Wald and Sommerville, 1995）を用いた強震動シミュレーションを実施した。関東地震の3次元波動伝播シミュレーションは、これまでに Sato et al. (1999) や山田・山中(2002)により実施されており、やや低い周波数帯（ $f=0.25\sim 0.5\text{Hz}$ ）の強震動と3次元地下構造との対応が詳しく検討されている。

木造家屋などの低層構造物の被害や歴史地震の震度の記録との対応を調査するためには、より高周波数（ $1\sim 2\text{Hz}$ 以上）の地震動シミュレーションが必要になる。これまでは I）計算機、II）地下構造モデル、そして III）震源モデルの3つの制約により 0.5Hz 程度以上の高周波地震動の計算は難しかった。本研究では、現存の関東平野の地下構造と震源モデルを用いて、最新の高速並列計算による強震動シミュレーションを試行する。そして、シミュレーション結果と観測とを比較することにより、現在の強震動シミュレーションの現状と高精度化に関わる今後の課題を明らかにすることを目的としている。

(2) 関東平野の3次元数値シミュレーション

地震動計算を行う領域を関東平野周辺の約 $204\text{km}\times 204\text{km}\times 100\text{km}$ に選び、これを水平 0.2km 鉛直 0.1km の格子間隔で離散化した。関東平野の速度構造には、人工地震探査や微動探査、ボーリング調査などを総合的に解釈して作成した山中・山田(2002)のモデルを用いた。関東平野では下総層群、上総層群、三浦層群の三層の堆積層が先新三系基盤岩の上を厚く覆っている。堆積層は東京湾の中心から房総半島にかけての地域で最大 3km 以上の厚さを有し、相模湾では基盤深度が 8km 以上になると考えられている（図1）。堆積層の最小S波速度は 0.5km/s （上総層群）であり、本計算では周波数 1Hz までの地震動を評価することができる。計算モデルの深部では、モホ面、フィリピン海プレート（Ishida, 1989）、そして太平洋プレートの3次元形状が組み込まれている（図2）。



図1 関東平野の基盤面（三浦層群と先新第三系基盤岩の境界面）の水平分布。

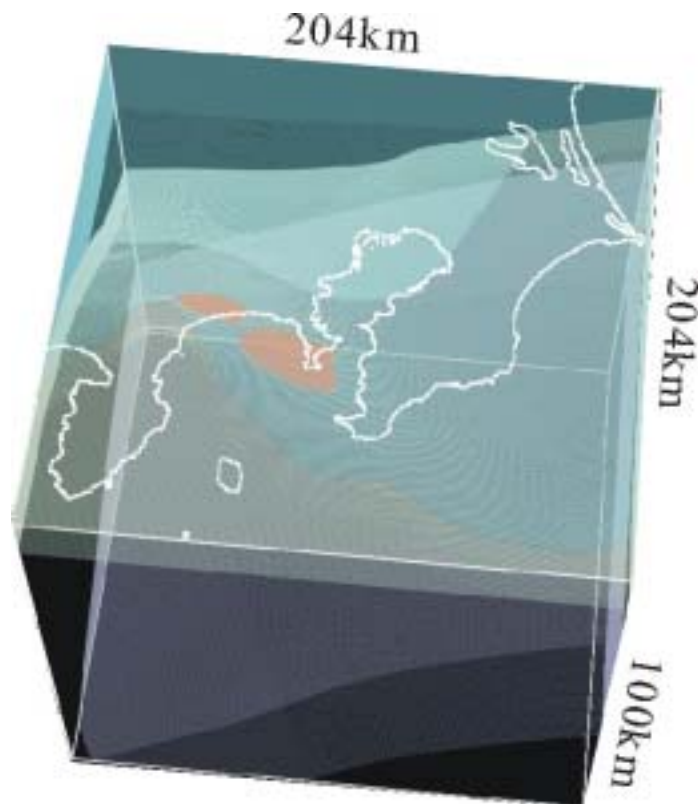


図2 関東平野地下構造モデル（地殻・上部マントル構造）。図中のオレンジの二つの楕円領域は、1923年関東地震での断層すべり領域（アスペリティ）を表す。

1923年関東地震の震源モデルは Wald and Sameville (1995) や Takeo and Kanamori (1997) などにより調査されている。このうち、Wald and Sameville (1995) の震源モデルは遠地地震記録と地殻変動データをもとにインバージョンから求められたものであり、周

波数 0.25Hz 程度以上の短周期地震動の放射には対応していない。そこで、本研究ではこの震源モデルをもとに、さらに断層すべりの空間分布に“揺らぎ”を与えることにより短周期地震波の放射を試みた。断層すべり量の不均質分布には von Karman 型のものを採用し、相関距離の大きさは断層の走行・傾斜方向の長さのそれぞれ 1/4 と仮定した。計算は PSM/FDM ハイブリッド並列計算法 (Furumura et al., 2002) を用いて行なった。これは並列化のために、方程式の水平方向の微分演算にはフーリエスペクトル法 (PSM) を、そして、鉛直方向には低次 (4 次精度) の FDM を用いて計算を行うものである (古村・他、2000)。なお、地震研究所の並列計算機 (SGI Altix3000, Itanium2 1GHz, 88CPU) の 32CPU を用いた並列計算には 28GB のメモリと 20 時間を要した。



図 3 1923 年関東地震の強震動シミュレーション。地動のスナップショット (地震発生から 12, 35 秒後)。

図 3 に計算から求められた波動伝播のスナップショット (地震発生から 12, 35 秒後) を示す。神奈川県下の一つ目のアスペリティから放射される S 波が丹沢から秩父の山地に沿って早い速度で北側に伝播していく様子が見える。断層破壊の進む東側に向かってやや周期の長い (2~5 秒) 大振幅の地震動が形成され、これが相模湾と関東盆地の厚い堆積層で強く増幅されている様子も認められる。大振幅の S 波は関東平野を 1~1.7km/s の比較的ゆっくりした速度で房総半島沖に向けて通過していく。また、相模湾では地震動が長い間継続している様子も確認できる (35s)。

計算から求められた震度分布を図 4 に示す。地震断層面上の 2 つの大きなアスペリティの周囲に震度 5~7 の領域が現れており、これは諸井・武村 (2002) が木造住家全壊率から推定した 1923 年関東地震の調査震度の分布形状と良く対応している。ただし、地震時に旧江戸川から利根川に沿って北に数十 km 以上にわたって延びる震度 6~7 の被害域は本シミュレーションからは再現できていない。これは、ごく浅い (深さ数十メートル程度以下) 表層地盤が計算モデルに組み込まれておらず、軟弱地盤での地震動の増幅効果が現在のシミュレーションでは正しく評価できないためである。

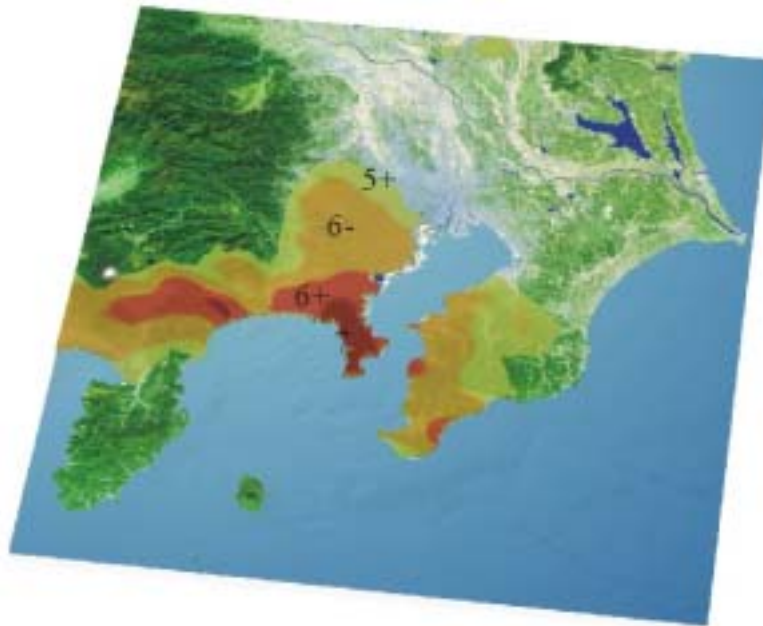


図4 計算から求められた1923年関東地震の震度分布（震度5強以上の揺れの範囲を示す）。

(3) 平成15年度の研究計画 - 実用的な（短周期）強震動予測を目指して -

近年の計算機の性能の向上と並列計算技術の進歩により、関東地域では周波数1Hz以上の短周期強震動シミュレーションは十分に実行可能である。これにより現在の緊急の課題は短周期震源モデルと高分解能地下構造モデルを整備することである。以下にこれに関する研究計画を述べる。

(a) 地下構造モデルの高精度化

関東周辺の小中地震の地震動記録と数値シミュレーション結果との比較から、観測波形を説明できない地域（たとえば、相模湾の周辺など）の地下構造を重点的に再評価する。人工地震探査のほかに、表面波の分散曲線の解析やレシーバー関数（SP変換面のマッピング）など、自然地震の利用も考える。堆積層の水平不均質性とその揺らぎの特性（速度構造の分散、相関距離）をモデルに組み込むことにより、高周波地震動の等方的な伝播特性を正しく評価できるようにする。数値シミュレーション結果に対して、地盤種別から求められた地盤増幅率を用いて表層地盤の増幅特性を補正する。

(b) 震源モデルの高精度化

本研究で行った、断層すべり分布の揺らぎに加え、さらに破壊伝播速度とライズタイムにも空間的に揺らぎを持たせた“疑似Dynamic”シミュレーション（たとえば、Guatteri et al., 2002）を実施する。これらの地震断層の不均質性は、過去の大地震の震源モデルの分類研究（たとえば、Mai and Beroza, 2002）を参考に評価する。

引用文献

1. 古村孝志, 瀧澤一, 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、V53、294-308、2000.
2. Furumura, T., K. Koketsu, and K.-L. Wen: Parallel PSM/FDM Hybrid Simulation of Ground Motions from the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake, Pure. Appl. Geophys., V159, 2133-2146, 2002.
3. Guatteri, M., P. M. Mau, G. C. Beroza and J. Boatwright: Strong Ground Motion Prediction from Stochastic-Dynamic Source Models, Bull. Seism. Soc. Am., 2003 in press.
4. Ishida, M.: The configuration of the Philippine Sea plate beneath the Kanto-Tokai district, Japan, Abstract the 25th IASPEI, 1989.
5. 諸井孝文, 武村雅之: 関東地震(1923年9月1日)による木造住家被害データの整理と震度分布の推定、日本地震工学会論文集、Vol2、35-71, 1992.
6. Mai, P. M. and G. C. Beroza, A spatial random field model to characterize complexity in earthquake slip, Journal Geophys. Res., V107, B11 2308 ESE10-1-22.
7. Sato, T., R. W. Graves, and P.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. V89, 579-607, 1999.
8. Takeo, M. and H. Kanamori: Simulation of Long-Period Ground Motion near a Large Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am., V87, 140-156, 1997.
9. Wald, D. J. and P. G. Somerville: Variable-slip Rupture model of the Great 1923 Kanto, Japan, Earthquake: Geodetic and body waveform analysis, Bull. Seism. Soc. Am., 85, 159-177, 1995.
10. 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、Vol55、53-65、2002.
11. 山田伸之, 山中浩明: 関東平野における3次元差分法による強震動シミュレーション、地震工学ニュース、東京工業大学総合理工学研究科、1-13、2002.

成果の論文発表・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
古村孝志	地震研究最前線	NHK教育テレビ「サイエンスZERO」	平成15年4月30日