

# 大規模 3次元地下構造のモデル化と 強震動シミュレーション

秋山伸一<sup>1</sup>・池上泰史<sup>2</sup>・アフニマル<sup>3</sup>・瀧澤一起<sup>4</sup>

<sup>1</sup>CRCソリューションズ 科学システム事業部社会基盤ソリューション部  
(〒136-8581 東京都江東区南砂2-7-5)

E-mail: s-akiyama@crc.co.jp

<sup>2</sup>CRCソリューションズ 科学システム事業部エネルギー産業技術部 (〒136-8581 東京都江東区南砂2-7-5)

E-mail: y-ikegami@crc.co.jp

<sup>3</sup>東京大学地震研究所 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)

E-mail: afnimar@eri.u-tokyo.ac.jp

<sup>4</sup>東京大学地震研究所教授 (〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1)

E-mail: koketsu@eri.u-tokyo.ac.jp

地震災害の軽減を目的とした大規模な強震動シミュレータを開発した。本シミュレータではGISを活用した大規模な3次元地下構造のモデル化から断層破壊による強震動シミュレーション、統計的Green関数法との組合せによる広帯域地震動作成、地形分類図から求めた表層地盤増幅率データを用いた現実的な地表面地震動の算出まで一貫して行える。特に、長周期地震動のシミュレーションにボクセル型有限要素法を用いており、非均質な地下構造のみならず、地形や海の影響を考慮した数値計算を安価なクラスターPC上で効率的に実行できる点に本シミュレータの特長がある。本論文では1923年関東地震のシミュレーションを通して本シミュレータの有用性を示す。

**Key Words** : prediction of strong motion, deep underground structure, voxel FEM, broadband ground motion

## 1. はじめに

地震災害の軽減対策を立案する上で、巨大地震によって発生する強震動を精度良く予測することは必要不可欠である。計算科学の進歩により、最近では大規模な3次元地下構造を直接モデル化して断層破壊による地震の発生、地下構造内の波動伝播を一貫して高精度にシミュレーションできる環境が整いつつある。

例えば、地震調査研究推進本部<sup>1)</sup>では2003年十勝沖地震の震源域を含む北海道の広域地下構造をモデル化し、差分法による長周期地震動のシミュレーションを行い、短周期地震動とのハイブリッド合成から広帯域地震動を算出し、観測記録との比較検討を行っている。

一方、市村ら<sup>2)</sup>は都市情報の詳細なモデル化を目指し、GISデータを用いて実際の都市をコンピュータ上に丸ごと再現したデジタルシティを構築し、地震動シミュレーションを行う高分解能シミュレータを開発し、基礎的な検証を行っている。

こうした中、本研究では実用化を目指す立場から、東京など大都市圏における巨大地震に対する精度の高い強震動予測を目的とした強震動シミュレータを開発した。このシミュレータでは震源断層での地震の発生から地盤内の波動伝播、さらには地表面で観測される強震動までを一貫して解析することができる。さらに東京など大都市圏周辺の地下構造モデルをデータベースとして保有する点も本シミュレータの特徴となっている。

3次元広域地下構造の地震波伝播解析には、少ない計算メモリと演算時間で結果が得られることから、現状では差分法<sup>3)</sup>が広く普及している。ただし、この方法では山・谷のような複雑な地形をモデル化するための自由表面の境界処理<sup>4)</sup>が煩雑となる点に問題が残る。

一方、有限要素法では自由表面における境界条件が定式化の段階で自動的に設定されているために、差分法に見られる煩雑な操作が必要なく、地形を自由にモデル化できる利点がある。さらに、ボクセル型有限要素法<sup>5)</sup>を用いれば、通常の有限要素法に比べて、煩わしいメッシュ

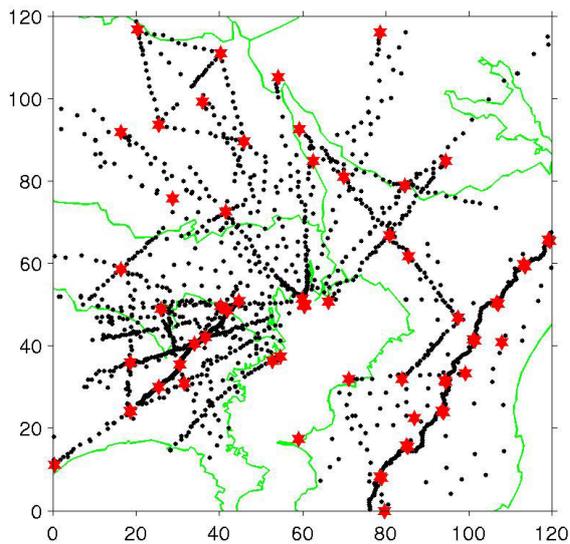


図-1 屈折法探査の概要 (★発振点, ・受信点)

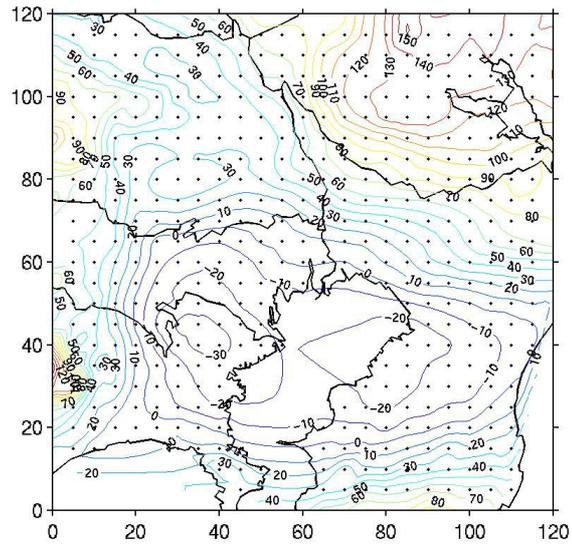


図-2 重力探査データ

生成が効率的に行える上に、並列化処理を行うことで計算に必要なメモリや演算時間を大幅に減少させることができ、差分法に相当する計算効率の実現が可能となる。

以上の観点から、本研究では強震動シミュレータのうち、長周期地震動の解析に上述のボクセル型有限要素法を用いる。これによって地形の影響を容易に反映することができ、より精度の高いシミュレーションが可能となる。さらに、統計的Green関数法による短周期地震動と長周期地震動とのハイブリッド合成により広帯域地震動を作成することで現実的な強震動の推定が可能となる。

本論文では、関東平野の地下構造のモデル化と1923年関東地震を対象とした強震動シミュレーションを通して、本シミュレータの有用性について検討する。

## 2. 強震動シミュレータの概要

本シミュレータは広域3次元地下構造をデータベース化したモデル化モジュールと地震の発生から波動伝播までのシミュレーションを行う強震動シミュレーションモジュール、さらに、これらの結果をわかりやすく表示するプレゼンテーションモジュールによって構成されている。

まず、地下構造のモデル化モジュールでは、東京、名古屋および大阪の大都市圏で行われた各種地下構造探査データがGIS技術を活用してデータベース化されている。しかもこのモジュールでは、これらのデータベースを逆問題として総合的に解析することにより、関東平野、濃尾平野および大阪平野の3大都市圏における深部地下構造のモデル化を可能にしている。

一方、工学的基盤の地震動から地表面での地震動を推

定するために、関東平野、濃尾平野および大阪平野については、地形分類に従って周期特性を考慮して計算された表層地盤の増幅率<sup>6)</sup>がデータベース化されている。これらの増幅率データは地域全域で500mメッシュの精度で構築されている。さらに、関東平野については上記のデータに加えて50mメッシュを用いた高密度な増幅率<sup>7)</sup>も求められている。

つぎに、強震動シミュレーションモジュールでは断層で発生する地震動を長周期地震動と短周期地震動に分けて計算が行われる。長周期地震動についてはボクセル型有限要素法<sup>8)</sup>による波動伝播解析(地震波伝播モジュール)を行い、工学的基盤面での応答が求められる。なお、本手法は、これまでに1995年兵庫県南部地震のシミュレーションや海域まで考慮した2003年十勝沖地震のシミュレーション<sup>8,9)</sup>に適用され、良好な結果を得ている。

一方、短周期地震動については、統計的Green関数法<sup>10)</sup>を用いて地震基盤面までの応答が求められた後、一次元重複反射理論により工学的基盤面での応答が算出される。ここで、上記の長周期地震動と短周期地震動をハイブリッド合成することにより、工学的基盤面における広帯域地震動が作成される。さらに、この広帯域地震動に上述した表層地盤の増幅率を掛け合わせることで、地表面における現実的な地震動が求められる。

## 3. 3次元地下構造のモデル化

### (1) 深部地下構造のモデル化

Koketsu and Higashi<sup>11)</sup>は屈折法探査データのインバージョン解析を行い関東平野の深部地下構造を推定している。

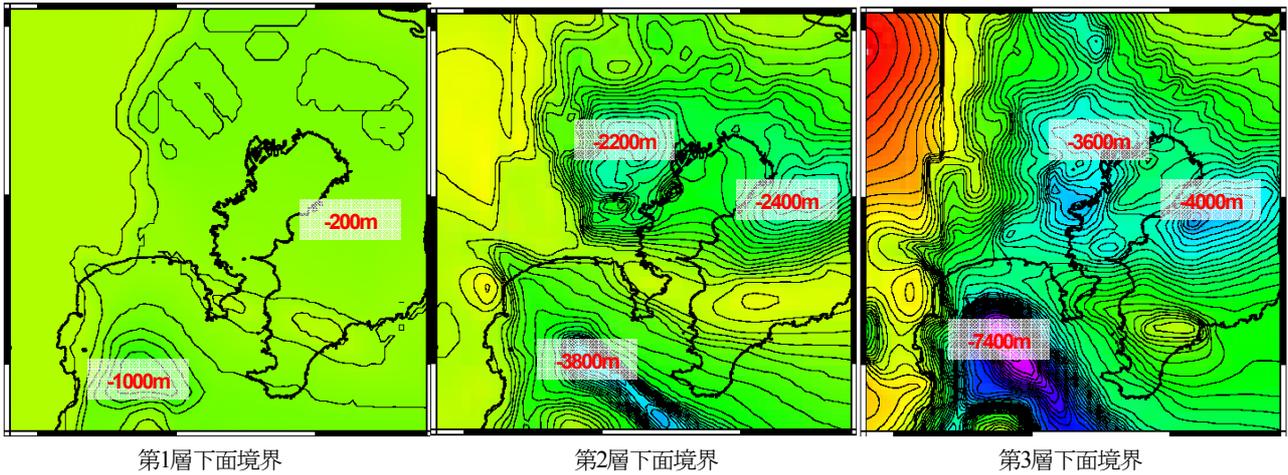


図3 地下構造の推定結果

ただし、地下構造が急激に変化する地域では波線が不規則に分布したり、あるいは波線が現れない、いわゆる shadow zone の発生により、走時データから地下構造がうまく推定できない地域が存在する<sup>12)</sup>ことが指摘されている。こうした問題を解決するためには屈折法探査による計測地点を十分な密度で設ける必要があるが、費用や労力の面で難しい場合が多い。

ところで、重力探査は計測機器を手軽に持ち運びできることから、屈折法探査に比べて十分な密度で計測が可能である。Afinimar<sup>12)</sup>はこうした点に着目して、屈折法探査データに重力探査データを加えてインバージョン解析を行い、地下構造を推定する手法を提案している。この方法では、地震波の走時と重力異常に関する観測方程式をパラメータである層境界の深さおよび各層の遅度で Taylor 展開し、非線形最小自乗問題として繰返し計算を行うことによって、これらのパラメータを設定し、地下構造を決定する。

本研究では東京、名古屋および大阪の各都市圏についてこの手法を用いて総合的な解析を行い、地下構造のモデル化を行った。このうち、関東地方についてのモデル化の概要を以下に示す。図-1に屈折法探査に用いた発振点と受振点を示し、図-2には重力探査結果を示す。

これらのデータに基づいて推定される関東地方の地層境界面を図-3に示す。図-3によると、地層境界面は関東平野西部の山地から東に向かって深くなり、特に相模湾、千葉県中部および都心付近で大きく落ち込んでいる点がこの地域の地下構造の特徴となっている。

ここで、鈴木<sup>13)</sup>あるいは Koketsu and Higashi<sup>11)</sup>による地下構造推定結果に比べて、図-3に示す地層境界面は複雑な形状を示している。これは地下構造を推定する上で重力データの影響がが大きく関与しているためである。そこで、図-3に示す地下構造モデルの妥当性を検証するために、関東地方で発生した中小地震のシミュレーションを行い、計算波形を観測波形と比較している<sup>14)</sup>。その結

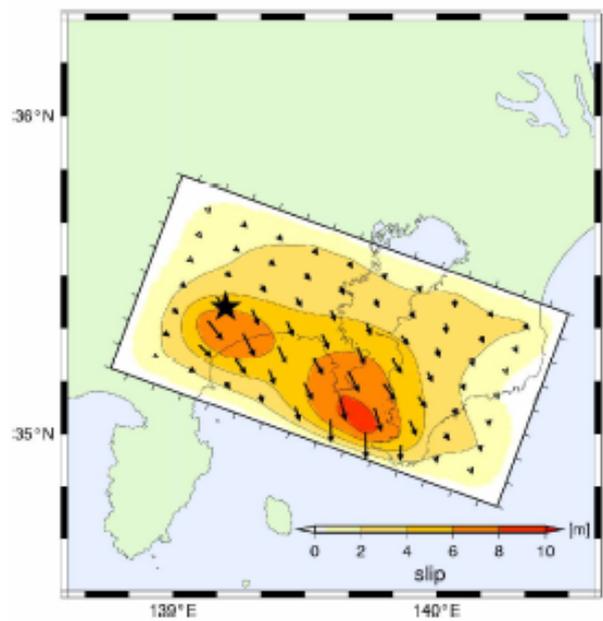


図4 1923年関東地震の震源断層モデル<sup>15)</sup>

果、計算波形は観測記録を良好に再現していることを確認している。したがって、強震動シミュレーションに本モデルを用いることは妥当であると判断される。

## (2) 震源断層のモデル化

強震動シミュレーションに用いる1923年関東地震の断層モデル<sup>15)</sup>を図-4に示す。このモデルは関東地震の際に国内で観測された強震記録に加えて地殻変動記録、さらには世界各地で観測された遠地実体波の波形記録までを用いてインバージョン解析を行った結果から求められている。

この断層モデルは小田原北部を震源とし、震源付近および三浦半島から房総半島にかけての2箇所にあすぺリティを持つ。これらのあすぺリティのうち、震源付近では地震モーメントが急激に解放されるのに対し、三浦半島から房総半島にかけてのあすぺリティではゆっくり解

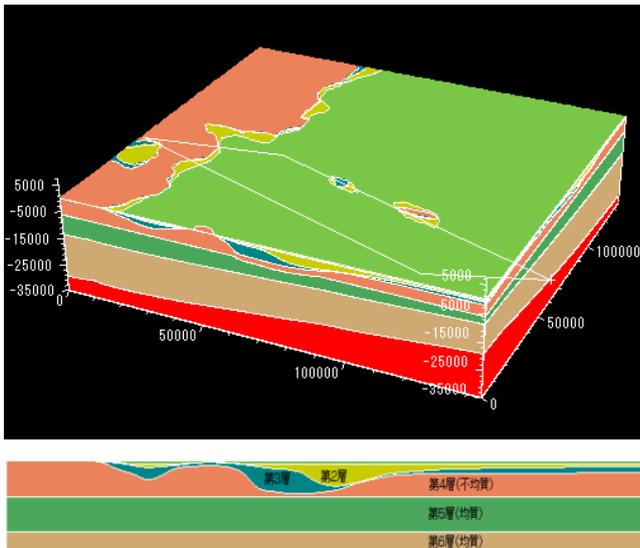


図-5 強震動シミュレーションモデル

表-1 シミュレーションモデルの物性値

	$V_p$ (km/s)	$V_s$ (km/s)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	Q 値
第1層	1.8	0.6	1.9	100
第2層	2.2	1.0	2.1	100
第3層	3.0	1.3	2.2	150
第4層	4.0	3.1	2.5	300
第5層	5.7	3.3	2.7	300
第6層	6.6	3.7	2.8	1000
第7層	8.1	4.8	3.3	1000

放される。最大すべり量は震源付近よりも三浦半島の方が大きく10mを超える。

### (3) 強震動シミュレーションモデル

先に示した関東地方の地下構造および1923年関東地震の震源断層に基づき作成した強震動シミュレーションモデルを図-5に示す。このモデルは東西約150km、南北約140km、深さ約35kmの広がりを持つ。

表-1にシミュレーションモデルの物性値を示す。表-1に示す物性値のうち、第4層までの物性値はAfimiar<sup>14)</sup>に従って設定する。一方、第5層から第7層まではSato et al.<sup>16)</sup>による地下構造モデルの物性値を用いる。さらに、Kohketsu and Shima<sup>17)</sup>に従い、Q値を設定する。

長周期地震動のシミュレーションを行うために、このモデルを地表面において100m四方のボクセルメッシュに分割を行う。ここで、モデルの自由度を節約するために、深さ3000mおよび6500m位置で可変グリッドを採用し、各々200m四方および400m四方のメッシュ分割としている。このようにして作成されたモデルの要素数は $8.1 \times 10^7$ 要素の規模となっている。

長周期地震動のシミュレーションに用いる計算機はPentium IV 2.0GHz×8CPU(4ノード)のクラスターPCで、使

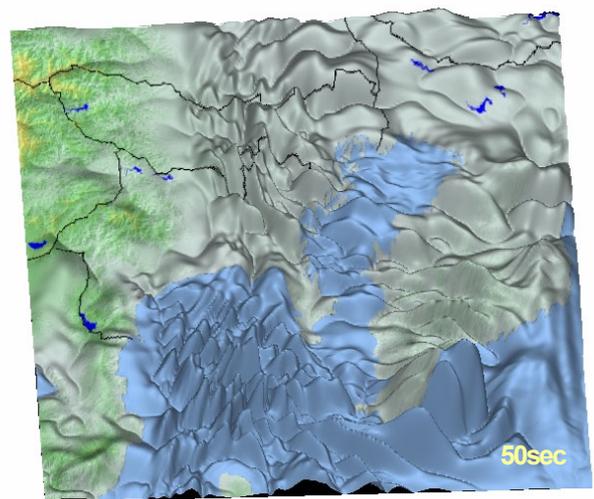
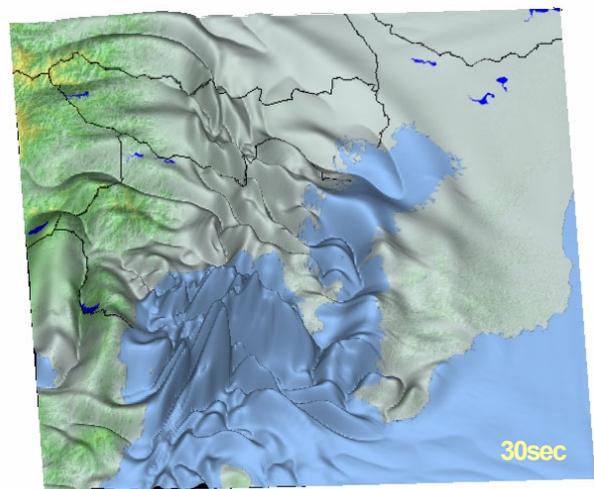
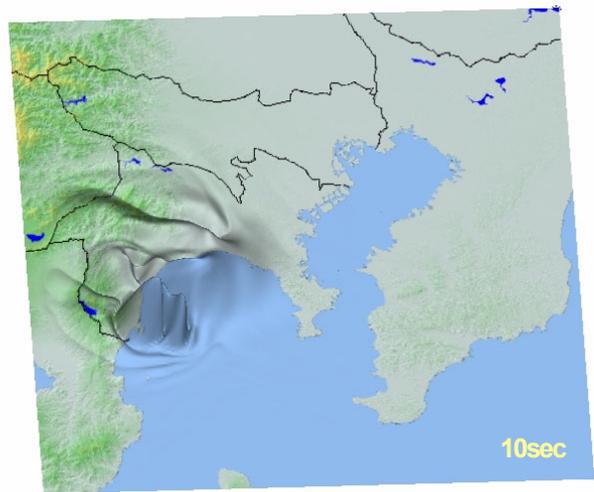
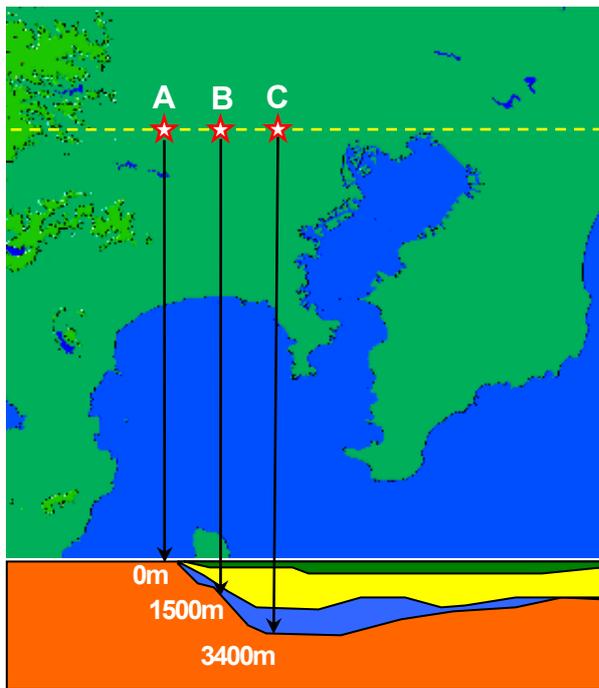


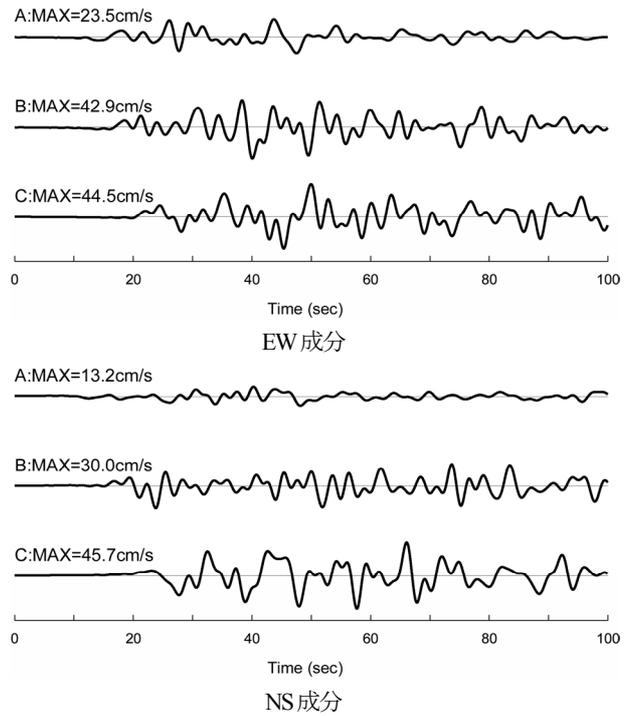
図-6 波動伝播(速度応答)のスナップショット

用メモリは4.5GBである。地震動の継続時間100秒間の計算を10,124ステップで約47時間掛けてシミュレーションを行う。



各観測点における第4層までの深さ

図-7 地下構造と長周期地震動の関係



## 4. 強震動シミュレーション

### (1) 長周期地震動のシミュレーション

ボクセル型有限要素法を用いて長周期地震動のシミュレーションを行う。その結果得られる速度応答のスナップショットを図-6に示す。図-6によると、小田原付近で現れた地震波は相模湾を東に進み三浦半島付近で勢力をさらに強め房総半島館山に向う。一方、震源で発生した地震波は、また北東方向の都心から千葉県中央部の東京湾沿岸に向かって進む。さらに、これと同時に北側の関東山地を回り込んだ地震波が関東平野の西端部付近で振幅の大きな表面波となり都心部に向かう様子が見取れる。都心部ではこれらの地震波の襲来を受け振幅の大きな地震動が発生する。

つぎに、こうした地震動の励起を地下構造との関連から見てみる。図-7には、関東平野の東西断面における地下構造と断面上の3観測点における速度波形を示す。各観測点での地下構造を見ると、点Aでは第4層が露頭しているのに対し、点Bでは第4層までの深さが1500m、点Cでは3400mと東に向かうほど深くなり、堆積層が厚くなる構造となっている。

各観測点の速度波形を見ると、点Aから点Cに向かうに従って振幅が増幅される様子が顕著に現れている。また、第4層が露頭する点Aに比べて点Bおよび点Cでは地震動の継続時間も長くなっている。以上の結果から、各点の速度波形は地下構造の影響を強く反映し、点Aから点B、Cに向かって堆積層が厚くなるにつれて周期2秒から10秒にかけての長周期成分が増幅され、地震動の継続

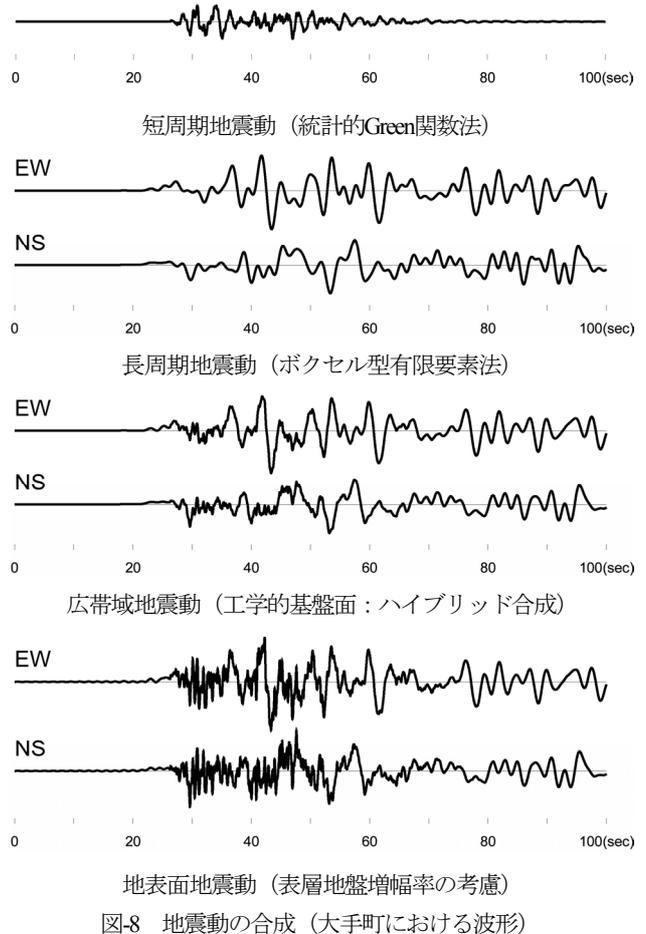


図-8 地震動の合成 (大手町における波形)

時間も長くなる。また、点Aから点Cに向かって波形の立ち上がり時刻が遅くなっていることから、地震波は西から東に向かって伝播することも確認される。

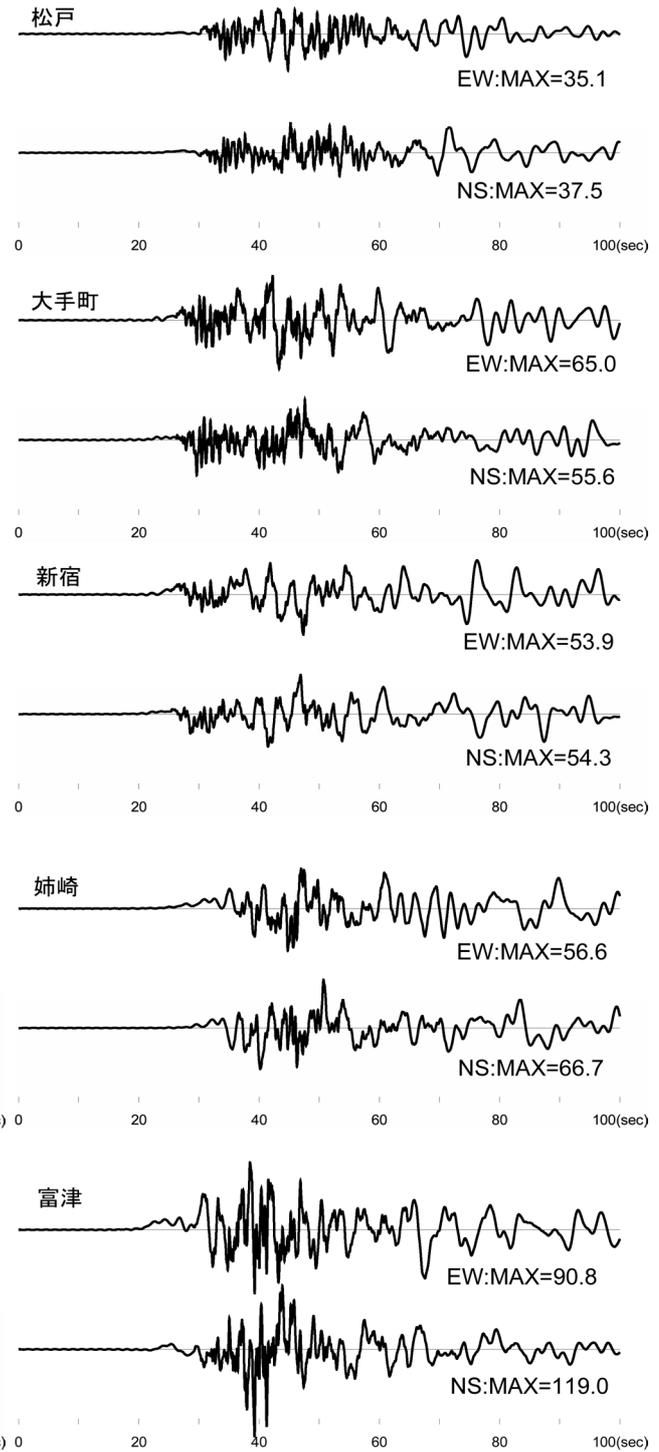


図-9 地表面での広帯域速度波形(単位: cm/s)

(2) 短周期地震動とのハイブリッド合成と地表面地震動の算出

統計的Green関数法を用いて関東地方の工学的基盤面における短周期地震動を算出する。つぎに、この短周期地震動と先に示した長周期地震動をハイブリッド合成し、広帯域地震動を求める。ここでは、長周期地震動と短周期地震動の接続振動数を0.5Hzとしてハイブリッド合成を行う。さらに、地形分類図から得られる工学的基盤よりも浅い表層地盤の増幅率をこの広帯域地震動に掛け合

わせ、地表面における地震動を求める。

東京大手町における計算波形に基づき、短周期および長周期地震動からハイブリッド合成、さらに地表面地震動の算出過程までを図-8に示す。図-8によると、短周期地震動の最大振幅は23.0cm/sで70秒付近で震動が収まるのに対して、長周期地震動の振幅はEW成分で51.8cm/s、NS成分で37.8cm/sと短周期地震動よりも大きく、しかも100秒経過しても震動は収まらず、継続時間が長い。

つぎに、これらの地震動をハイブリッド合成して得ら

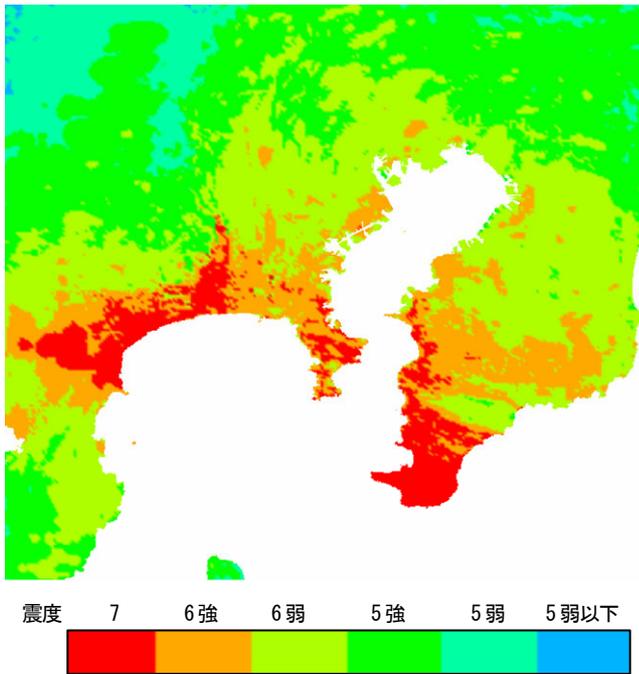


図-10 1923年関東地震による震度分布の推定結果

れる工学的基盤の広帯域地震動は、主要動が励起され始める30秒から40秒付近で短周期地震動の影響が見られるが、全体的には長周期地震動によって支配されており、両者の特徴を兼ね備えていることが見て取れる。さらに、この地震動に表層地盤の増幅率を掛け合わせて求められる地表面地震動では特に短周期成分の増幅が著しい。

### (3) 関東地方における強震動

図-9には関東地方各地の地表面における速度波形を示す。これらの波形では主要動部分に短周期成分が見られるが、全体として周期2～10秒にかけての長周期成分が卓越している。このような震動特性は先に示した地下構造の影響によって現れる。

この地震では、断層破壊が震源である小田原付近から三浦半島に向かって進行する。このため、震源に近い秦野では主要動が比較的早い時刻に現れるが、断層破壊が離れる方向に位置することや基盤面が浅いために大きな震動が長時間続くことはない。これに対して、震源から断層破壊が向かって来る方向に位置する二俣川や富津では指向性の影響により大きな震動が現れる。また、これらの地点は堆積層が深く複雑な基盤形状の影響を受け、長周期の震動が長時間に渡って現れる。

一方、大手町、新宿および姉崎は断層破壊の方向からは若干外れるために振幅は余り大きくない。ただし、これらの地点では深い基盤構造の影響を受けて長周期地震動が長時間継続する。さらに、松戸はこれらの地点のうちで震源から最も離れており、また比較的堆積層が浅いことから、他の地点に比べて地震動は小さい。

図-10には強震動シミュレーションから求められた震度分布を示す。断層上に位置する相模湾沿岸から三浦半島、房総半島南部にかけて震度7の地域が広範囲に広がっている。この結果は武村<sup>18)</sup>が家屋の全潰率から推定した震度分布に対応している。

## 5. まとめ

本研究では大規模な3次元地下構造のモデル化から強震動シミュレーションまでを一貫して行える強震動シミュレータを開発した。本論文では、このシミュレータを用いて1923年関東地震を対象に関東平野の地下構造のモデル化および強震動シミュレーションを行った。

本シミュレータの中核を成す地震波伝播モジュールには、これまで実用化が困難と考えられていた有限要素法を採用し、アルゴリズムに並列化処理などの改良を加えることにより実用的な地震波解析を可能としている点が大きな特徴となっている。

強震動シミュレーションの結果から、関東地方各地の強震動は断層破壊および3次元地下構造の影響を受けて複雑に変化することが確認される。このシミュレーション結果から求められる震度分布は既往の研究によって推定されている震度分布と対応する。したがって、本シミュレーション結果の信頼性は高いと考えられる。

以上により、本シミュレータは実用面で有用であることが確認される。今後は、このシミュレータを用いて様々な強震動予測を行う予定である。

**謝辞：**本研究は(独)科学技術振興機構JST-ACT 13C-2の一環として実施しました。強震動シミュレーションでは共同研究グループである(独)消防研究所および工学院大学で作成された表層地盤増幅率データベースを用いました。ここに記して感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 地震調査委員会強震動評価部会：2003年十勝沖地震の観測記録を利用した強震動予測手法の検証，平成16年12月20日，地震調査研究推進本部HP，<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>
- 2) 市村強，堀宗朗，寺田賢二郎，山川貴弘：統合地震シミュレータにおける高分解能強震動シミュレータと都市域の電子情報の利用について，応用力学論文集，Vol.6, 615-622, 2003.
- 3) Graves, R. W.: Simulating Seismic Wave Propagation in 3-D Elastic Media Using Staggered-grid Finite Differences, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, 1091-1106, 1996.

- 4) Hestholm, S. : Three-dimensional Finite Difference Viscoelastic Wave Modelling Including Surface Topography, *Geophys. J. Int.*, 139, 852-878, 1999.
- 5) Koketsu, K., Fujiwara, H. and Ikegami, Y.: Finite-Element Simulation of Seismic Ground Motion with a Voxel Mesh, *Pure and Applied Geophysics*, 161, No.11-12, 2463-2478, 2004.
- 6) 久保智弘, 久田嘉章: 全国地形分類図による周波数特性を考慮した表層地盤特性について, 2004年日本建築学会大会(北海道), 2004.
- 7) 鄭炳表, 久保智弘, 久田嘉章, 畑山健, 座間信作: 地震災害予測のための大都市圏強震動シミュレータの開発, 日本地震工学会・大会-2004, 386-387, 2005.
- 8) Furumura, T. and K. Koketsu : Specific Distribution of Ground Motion during The 1995 Kobe Earthquake and Its Generation Mechanism, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 785-788, 1998.
- 9) Koketsu, K., K. Hatayama, T. Furumura, Y. Ikegami and S. Akiyama : Damaging Long-period Ground Motions from The 2003 Mw 8.3 Tokachi-oki, Japan, Earthquake, *Seism. Res. Lett.*, 75, 1, in press, 2005.
- 10) Boore, D.M. : Stochastic Simulation of High-Frequency Ground Motions based on Seismological Models of Radiated Spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.73, No.6, pp.1865-1894, 1983.
- 11) 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.
- 12) Afnimar, K. Koketsu and K. Nakagawa : Joint Inversion of Refraction and Gravity Data for The Three-dimensional Topography of a Sediment-basement Interface, *Geophys. J. Int.*, 151, 243-254, 2002.
- 13) 鈴木宏芳: 首都圏における深部地質構造と地震活動, 地学雑誌, 108, 336-339, 1999.
- 14) Afnimar : Joint Inversion of Refraction and Gravity Data for 3-D Basin Structures, 東京大学学位論文, 2002.
- 15) Kobayashi, R. and K. Koketsu : Source Process of the 1923 Kanto Earthquake Inferred from Historical Geodetic, Teleseismic, and Strong Motion Data, *Earth Planets Space*, 57, 261-270, 2005.
- 16) Sato, T., R.W. Graves and P. G. Somerville : Three-dimensional Finite-difference Simulation of Long-period Strong Motion in The Tokyo Metropolitan Area during The 1990 Odawara Earthquake (Mj5.1) and The Great Kanto Earthquake (Ms8.2) in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 89, 579-607, 1999.
- 17) Koketsu, K. and E. Shima : Q<sub>p</sub> Structure of Sediments in The Kanto Plain, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, Univ. Tokyo, 60, 495-505, 1985.
- 18) 武村雅之: 関東大震災, 大東京の揺れを知る, 鹿島出版会, 2003.

(2005. 3.17 受付)

## MODELING OF LARGE SCALE 3-D UNDERGROUND STRUCTURE AND SIMULATION OF STRONG GROUND MOTION

Shinichi AKIYAMA, Yasushi IKEGAMI, AFNIMAR and Kazuki KOKETSU

We have developed a strong motion simulator to predict earthquake disaster in a wide region including large cities. This simulator has the merit that can efficiently execute the following. (1) A large scale 3-D underground structure is modeled by GIS technology. (2) Generation of ground motion by fault destruction and seismic wave propagation are calculated by a voxel FEM with parallel processing. (3) The realistic strong ground motion is obtained by combining short period motion using the statistical Green's function and multiplying the surface ground amplification factor. The utility of this simulator is shown in this paper through the analysis of the Kanto earthquake in 1923.