

# ボクセルFEMによる地形・海を考慮した 大規模3次元地震動伝播シミュレーション

河路 薫<sup>1</sup>・秋山 伸一<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 (〒100-6080 東京都千代田区霞が関3-2-5)

E-mail:kaoru.kawaji@ctc-g.co.jp

<sup>2</sup>正会員 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社 (〒100-6080 東京都千代田区霞が関3-2-5)

E-mail:shinichi.akiyama@ctc-g.co.jp

地形や海のモデル化が地震動に及ぼす影響について検討するために、ボクセル有限要素法を用いて関東平野の地震動伝播シミュレーションを行った。地下構造モデルは、文部科学省の地震調査研究推進本部が2012年1月に公開した地形と海を取り入れた全国1次地下構造モデルに基づいて作成した。このモデルを用いて地形・海を考慮したシミュレーションを行うとともに、地形を考慮しないモデルと海を考慮しないモデルのシミュレーションも行った。シミュレーションの結果、山地を伝播する地震動には地形の影響が見られなかった。これは、山地が岩盤から構成されるために今回対象とした周期帯域では影響が現れなかったためと考えられる。一方、平野部では山地と盆地の境界部付近で地形の影響を受けて発生する地震波に違いが見られた。また、海水を考慮したシミュレーションでは、海水を考慮しなかった場合と比較して表面波の振幅が小さくなることを確認した。

**Key Words :** voxel FEM, large-scale land and sea structure, parallel computing  
long period earthquake ground motion

## 1. はじめに

日本にある都市の多くは沖積平野に広がる。このような平野は一方が海に面し、他方は山地によって囲まれていることが多い。そのため、地震時にこれらの都市には山側から、あるいは海側から地震波が伝わってくることになる。このような山地や海が多く存在する領域での強震動シミュレーションを高精度に行うためには、陸域の地形や海底の地形、海を考慮したシミュレーションを行うことが望ましい。

従来の3次元強震動シミュレーションでは、大規模なメッシュ生成を容易に行える点や少ないメモリで高速に計算できるといった点から有限差分法<sup>1)</sup>(以下、FDMと呼ぶ)が一般的に普及している。しかしながら、FDMでは地表面などの境界条件の処理に特別な取り扱いが必要となることやシミュレーションモデル内に流体が存在すると数値的不安定が生じる恐れがあることから、地表面は水平面が仮定され、海は考慮されないことが多い。

2012年1月に文部科学省の地震調査研究推進本部から「長周期地震動予測地図」2012年試作版の全国1次地下構造モデル<sup>2)</sup>(以下、1次モデルと呼ぶ)が公開された。このモデルでは、従来の地下構造<sup>3)</sup>が

更新された他に陸域の地形と海底の地形が新しく追加されている。このモデルに基づいてシミュレーションモデルを作成し、地震動伝播シミュレーションを行うことにより、地形さらには海の影響まで考慮した地震動が評価できる。

そこで、本研究では、ボクセル型有限要素法<sup>4)</sup>(以下、ボクセルFEMと呼ぶ)を用いて地震本部モデルによる関東平野の地震動伝播シミュレーションを行い、地形と海が地震動へ及ぼす影響について検討を行う。ボクセルFEMでは、FDMで用いるような地表面境界に特別な処理が必要ないため、地形に沿ってボクセル要素によってモデルを組み立てる。また、海水には、せん断剛性を持たない要素を配置することにより海水の影響を考慮する。ここでは、海と地形を考慮したモデル、地形のみを取り除いたモデル、海水を取り除いたモデルの3ケースについてシミュレーションを行い、これらの結果を比較することにより、地形や海が地震動に及ぼす影響について検討した。

## 2. 1次モデル

1次モデル<sup>2)</sup>は、長周期地震動の震源域および震源域から地震動予測対象地域までの主要な伝播経路を

含むように太平洋沿岸の海域まで作成されている。従来の地下構造モデル<sup>3)</sup>と比較すると、陸域の地形データと海域の地形データが含まれていることが大きな特徴といえる。

本研究では1923年関東地震を対象とする。そのため、震源域を囲む地形と海を含んだ領域をシミュレーションモデルとして設定する。このモデルの地形を図-1に示す。図-1によると、関東平野西部の関東山地から富士山、伊豆半島において標高の高い地形がみられる。図-2にはシミュレーションモデルの海底地形を示す。図-2によると駿河湾、相模湾、東京

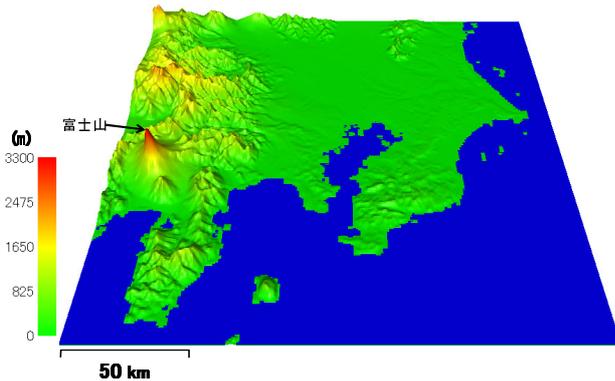


図-1 シミュレーションモデルの陸域地形

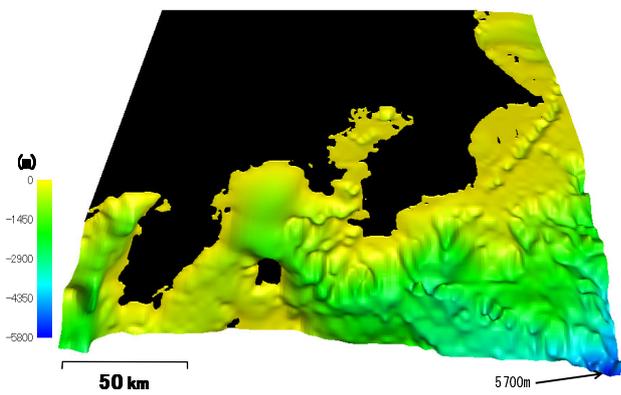


図-2 シミュレーションモデルの海底地形

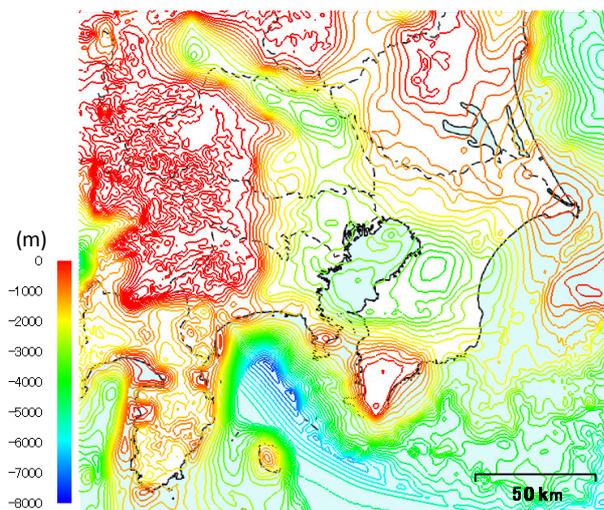


図-3 地震本部モデルにおける地震基盤 ( $V_s=3.2\text{km/s}$ ) の上面深度の等深線図

湾といった陸地に接する海の複雑な地形のデータが含まれている。また、相模湾、房総半島沖から日本海溝に向かって水深が深くなっている。

つぎに、シミュレーションモデルにおける地震基盤の等深線図を図-3に示す。図-3によると、埼玉県の西北西から北東部、都心から千葉県房総半島中央部にかけて地震基盤が約3000mとなり、相模湾では8000m近くの深さに達している。

### 3. 地形・海のモデル化

従来の3次元強震動シミュレーションでは、少ない計算メモリと計算時間で結果が得られることからFDMが用いられてきた。しかし、この手法では山や谷といった複雑な地形をモデル化するにはその境界部分において特別な処理が必要となる。一方、FEMでは地表面の境界条件が運動方程式の定式化の段階で自動的に組み込まれるため、FDMで必要となる地表面での特別な境界条件を考える必要はなく、地形を自由にモデル化できる。

ボクセルFEMでは図-4に示すように、ボクセル要素を用いて地形をモデル化する。地形の表面は図-4に示すように階段状となる。

海水の計算については体積変化のみを考慮するため、せん断剛性をゼロ ( $V_s=0\text{m/s}$ ) として取り扱う。海水については図-5に示すように、海底面から標高0mまでを海水とし、ボクセル要素を用いてモデル化する。

### 4. 3次元FEMによる地震動シミュレーション

#### (1) シミュレーションモデル

地形や海が地震動へ及ぼす影響を調べるために、表-1に示す3ケースのモデルを用いて地震動シミュレーションを行う。ケース1は海と地形の両方をボクセル要素で考慮したモデル、ケース2はケース1のモデルから標高0m以上の要素を除いたモデル、ケ



図-4 地形のボクセルメッシュによるモデル化

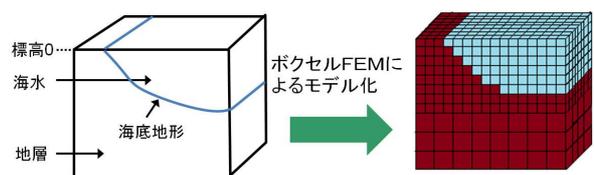


図-5 海水のボクセルメッシュによるモデル化

ース3はケース1のモデルから海水の要素を除いたモデルである。地形の影響についての検討は、ケース1とケース2のシミュレーション結果を比較する。また、海水の影響についての検討は、ケース1とケース3のシミュレーション結果を比較する。

図-6にはシミュレーションで対象とする領域、観測点位置と震源位置を示す。このシミュレーションモデルは、東西約230km、南北220km、深さ50kmの広がりを持つ。各層の物性値は表-2に示す通りである。ここでは、マントル以下の層には一律の物性値を設定する。震源モデルにはKanamori<sup>7)</sup>を参考に、1923年関東地震の震源を設定する。シミュレーションに用いる震源パラメータを表-3に示す。この震源

表-2 地下構造物性値

層番号	Vp(m/s)	Vs(m/s)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Qp値	Qs値	備考
1	1700	350	1800	119	70	
2	1800	500	1950	170	100	
3	2000	600	2000	204	120	
4	2100	700	2050	238	140	
5	2200	800	2070	272	160	
6	2300	900	2100	306	180	
7	2400	1000	2150	340	200	付加体
8	2700	1300	2200	442	260	
9	3000	1500	2250	510	300	
10	3200	1700	2300	578	340	
11	3500	2000	2350	680	400	
12	4200	2400	2450	680	400	
13	5000	2900	2600	680	400	
14	5500	3200	2650	680	400	地震基盤(上部地殻第1層)
15	5800	3400	2700	680	400	上部地殻第2層
16	6400	3800	2800	680	400	下部地殻
17	7500	4500	3200	850	500	マントル

表-1 シミュレーションケース

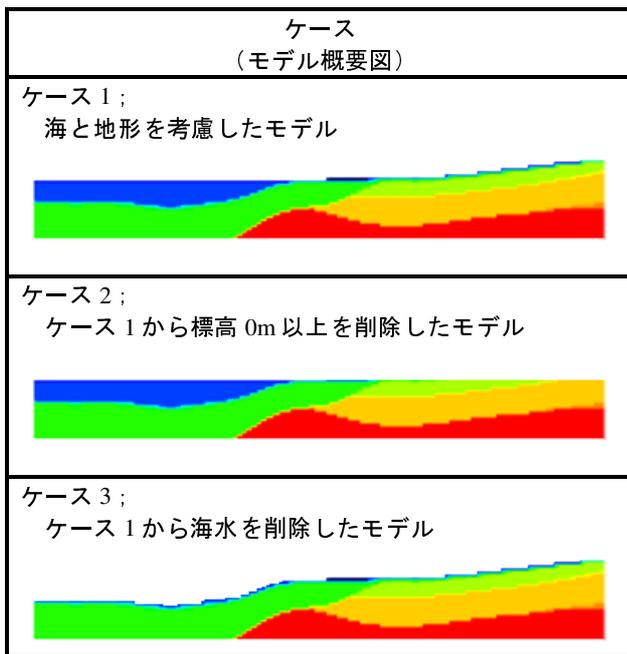


表-3 震源パラメータ

震央の緯度	35.1°
震央の経度	139.5°
震源モーメント	$7.6 \times 10^{20}$ N/m
断層長さ	130 km
断層幅	70 km
断層上端深さ	2 km
走向 [°]	290°
傾斜 [°]	34°
すべり角 [°]	162°
破壊伝播速度	3.0km/s

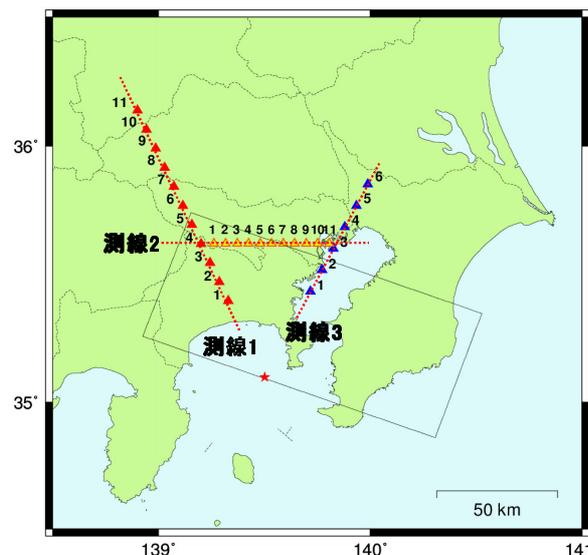


図-6 シミュレーションで対象とした領域における波形観測点位置(△)と震源位置(黒枠は断層モデル位置、★は震央)

モデルは、図-6に示す断層面を走向方向に10分割、傾斜方向に7分割の要素に分割し、各要素毎に震源モーメントと破壊開始時刻を与えて断層運動を表わす。なお、破壊伝播速度は3.0km/sとし、破壊形式は図-6に示す★印の震央からBilateralに破壊すると仮定する。また、図-6には、シミュレーションから得られる地震動の観測点も示す。このうち、測線1と2の観測点の地震動は地形の影響についての検討に用い、測線3の観測点の地震動は海水の影響についての検討に用いる。

## (2) シミュレーション方法

シミュレーションにはボクセルFEMによる大規模地震動伝播解析コード<sup>4)</sup>を用いる。

ボクセルFEMは、通常の有限要素法に比べて要素の作成が効率的に行える利点がある。また、このコードでは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る。さらに、地下構造をボクセル要素でモデル化するにあたり、地質の速度構造に応じて要素サイズを変化させることにより、要素数の増大を抑えて計算の効率化を図ることができる。本研究では、地震動の対象周期を5秒以上とするため、最小ボクセルサイズは140mとなる。この場合、モデル全体の要素数は約10億である。

## 5. シミュレーション結果

### (1) 地形の影響

ケース1とケース2における測線1と測線2の観測点波形の比較し、地形が地震動に与える影響を調べる。図-6に示した測線1と測線2の観測点におけるケース1とケース2のシミュレーション結果の速度波形の比較を図-7、図-8に示す。図-7で示した速度波形は、周期5秒～50秒、図-8で示した速度波形は周期10秒～50秒のバンドパスフィルタをかけた波形である。

図-7によると、測線1、測線2の観測点では両者のシミュレーション結果とも初めに実体波が到達する様子が表れている。このうち、測線1では実体波が到達した後に振幅が収まる。一方、測線2では実体波の後に大きな振幅の波が西から東に向かって伝播している。これは、関東山地側から平野に向かって伝播し、平野の堆積層で増幅された表面波である。

つぎに、ケース1とケース2の地震動の違いについて見てみる。測線1の観測点では、速度波形の違いが見られない。測線1の観測点は山地に位置し、地震基盤が露頭している。そのため、ケース1とケー

ス2のモデルでは地下構造には違いがなく地形のみが異なる。今回対象とした周期5秒以上の帯域では速度波形の違いが見られないことから、地形の影響は周期5秒よりも短周期側で生じると考えられる。

これに対し、測線2では観測点1と観測点2の地震動には違いがほとんどないものの、観測点3～観測点11の地震動では振幅の大きい表面波の違いが見られる。こうした地震動の違いを各観測点での地下構造との関連から見てみる。図-9に、測線2における地震基盤までの層厚の関係を示す。観測点1～11における地下構造を見ると、観測点1では地震基盤が露頭しているの、ケース1とケース2の違いは地形のみである。観測点2～5の標高0mよりも高い位置に観測点がある。したがって、ケース1とケース2では地形と地下構造が異なる。観測点6～11では標高0mとなっているので、ケース1とケース2で違いはない。図-7の速度波形によると観測点3～11に違いが見られる。観測点1は地形のみが違うため、波形の違いはない。観測点2では地形と地下構造が異なるものの、観測点直下の地下構造から計算される卓

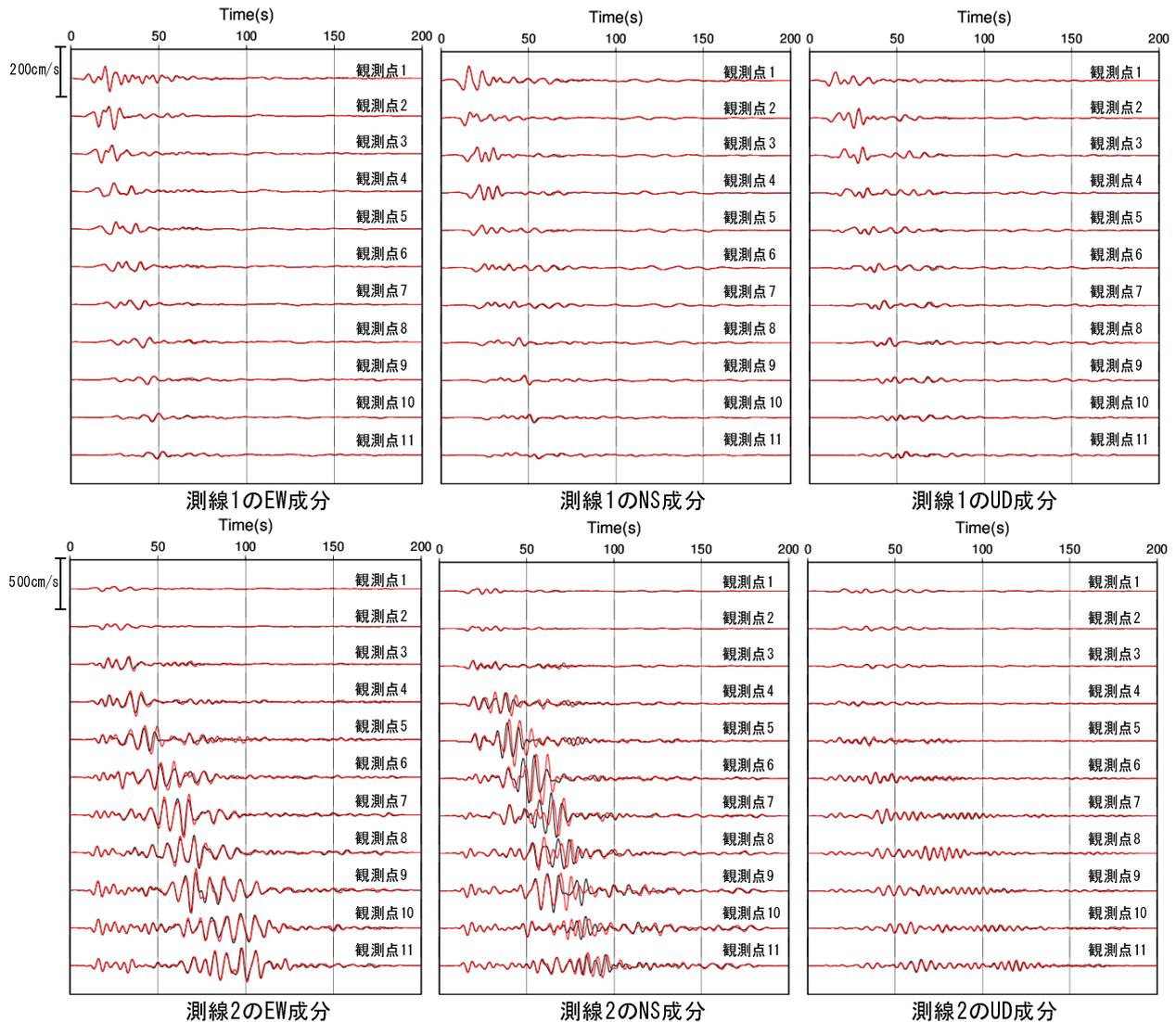


図-7 バンドパス5秒～50秒をかけた速度波形  
(赤：ケース1，黒：ケース2)

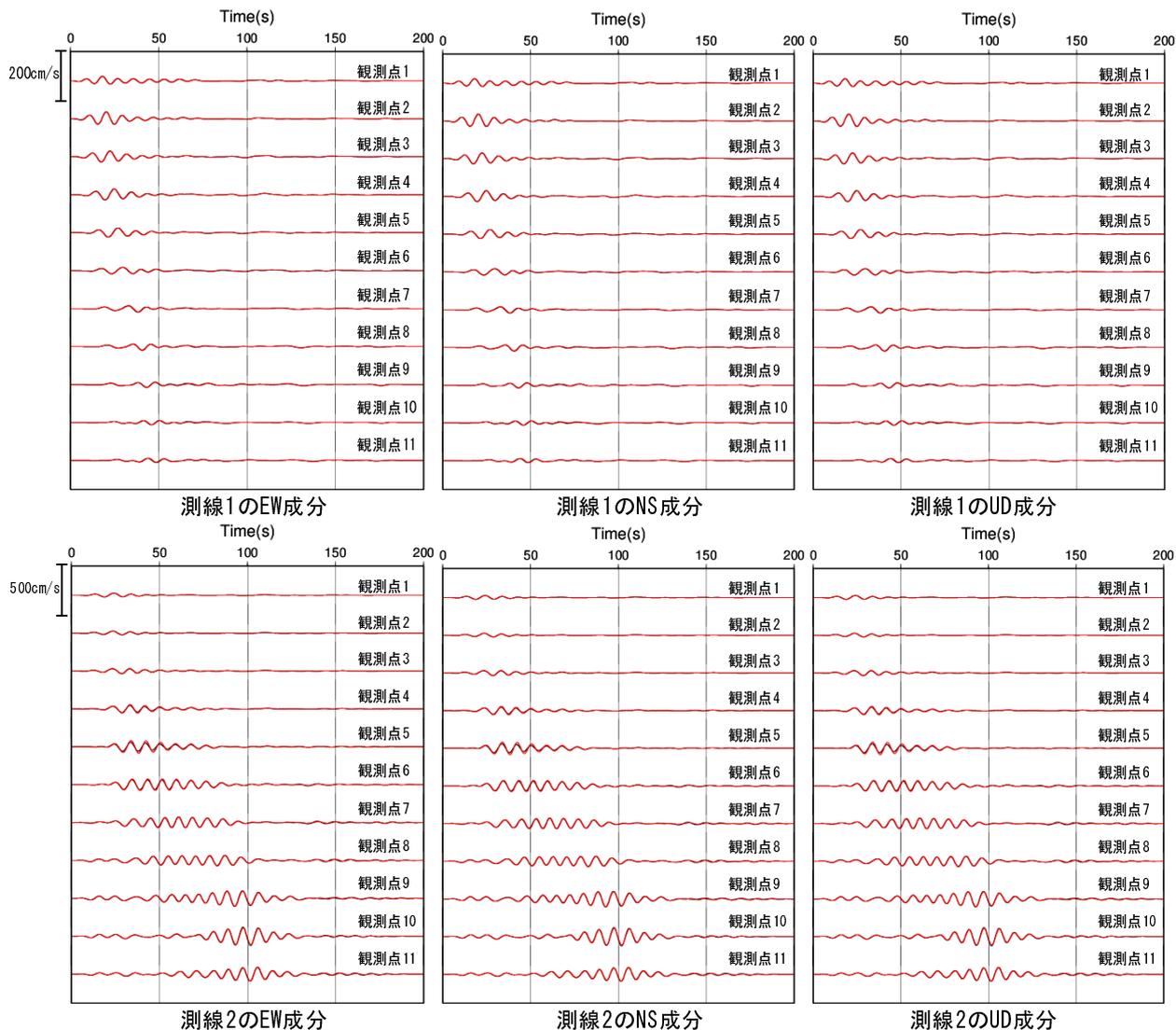


図-8 バンドパス10秒～50秒をかけた速度波形  
(赤：ケース1，黒：ケース2)

卓越周期が今回対象とした5秒以上の周期帯域よりも短周期側にあるため、今回のシミュレーションでは影響が見られない。一方、観測点3～5では卓越周期が周期5秒～8秒程度となる。そのため、観測点3～5では地形と地下構造の違いの影響を受けて、ケース1とケース2で観測される地震波に差異が生じる。この地震波が西から東に伝播するので、地形と地下構造に違いがない観測点6～11でも波形に違いが現れることになる。

図-8の周期10秒～50秒のバンドパスフィルターを

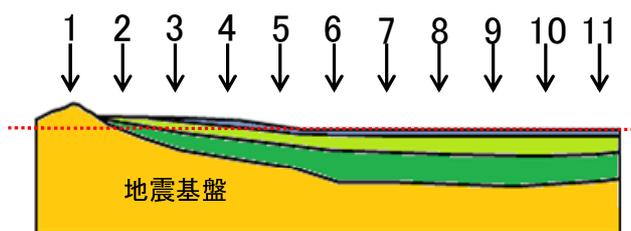


図-9 測線2における地震基盤までの層厚の関係  
(赤点線は標高0m)

かけた速度波形を見ると、図-7に示した速度波形で差異が見られた測線2でも、ケース1とケース2の地震波の違いはほとんど見られない。これは先にも述べたように、観測点の卓越周期が周期5秒～8秒程度であるため、この周期帯域より長周期側でバンドパスフィルターをかけると差異の生じた周期帯域がカットされるためである。

## (2) 海水の影響

ケース1とケース3における測線3の観測点波形の比較をし、海水が地震動に与える影響を調べる。図-6に示した測線3の観測点におけるケース1とケース3のシミュレーション結果の速度波形の比較を図-10、図-11に示す。図-10で示した速度波形は、周期5秒～50秒、図-11で示した速度波形は周期10秒～50秒のバンドパスフィルターをかけた波形である。

図-10によると、測線3における速度波形では実体波が到達した後、遅れて大きな振幅の表面波が到達する。ケース1とケース3を比較すると表面波に違いがみられ、ケース1の方が振幅が小さくなっている。

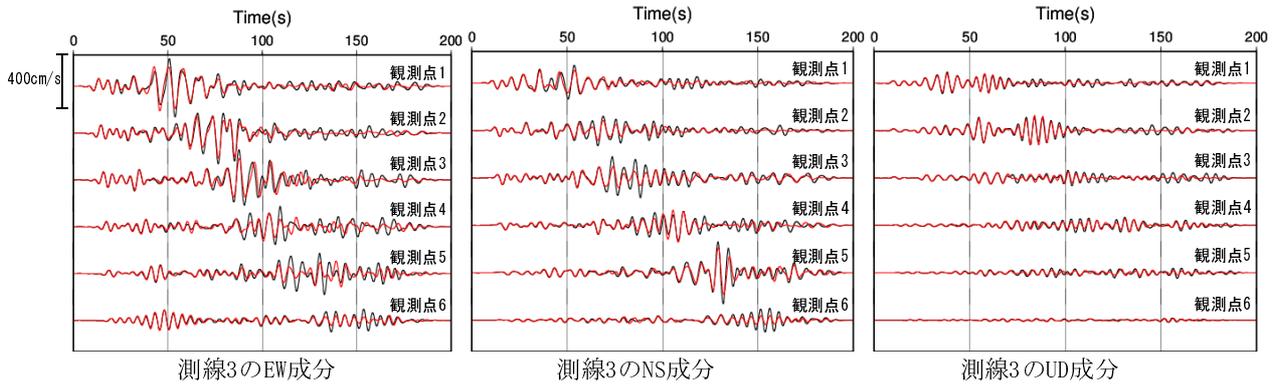


図-10 バンドパス5秒～50秒の速度波形  
(赤：ケース1，黒：ケース3)

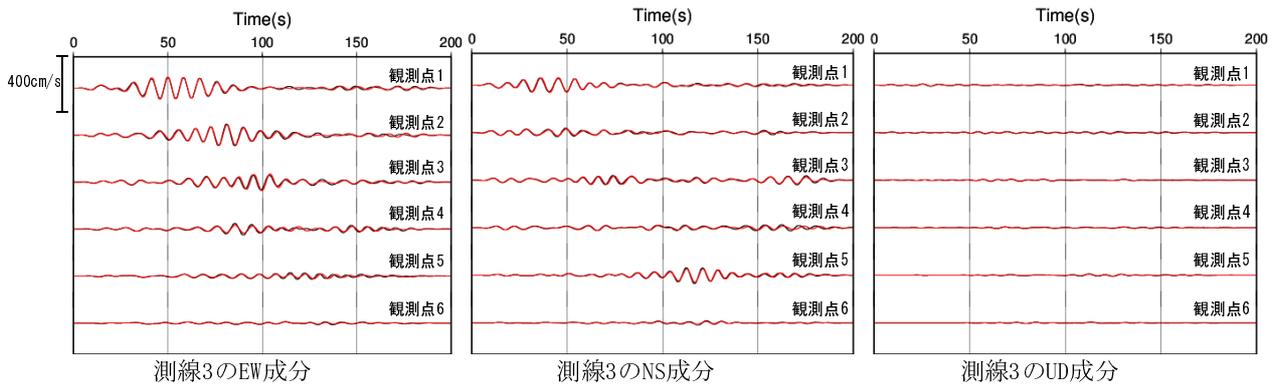


図-11 バンドパス10秒～50秒の速度波形  
(赤：ケース1，黒：ケース3)

Ikegami et. al.<sup>8)</sup>は、海底面を伝播する地震動は海水の影響により振幅が小さくなり、その影響は後続波ほど大きくなることを指摘している。今回のシミュレーション結果も地震動が海底面を伝播する過程で、地震波のエネルギーの一部が海水中にP波として放出される結果、表面波の振幅が小さい地震動になっているものと考えられる。

つぎに、図-11の周期10秒～50秒のバンドパスフィルターをかけた速度波形を見ると、ケース1とケース3では違いがほとんどない。これは、海水の影響を受けるのは表面波の部分であり、表面波が励起される周期がバンドパスフィルターを掛けた周期帯域より短周期側にあるためである。

## 6. まとめ

本研究では、ボクセルFEMを用いて関東平野の地震動伝播シミュレーションを行い、地形や海のモデル化が地震動に及ぼす影響について検討した。

まず、地形が地震動に与える影響を検討するために、ケース1とケース2のシミュレーション結果の比較を行った。その結果、山地にある観測点では地震動に違いが見られなかった。この結果から、山地における地形の影響は周期5秒以上の長周期側では

現れないと考えられる。一方、平野部にある観測点では、表面波に違いが見られた。これは、地下構造によって地震動が増幅する周期帯域が5秒以上であり、地形を除いたことで地下構造が変化し、励起される地震動に違いが生じるためである。

つぎに、海水が地震動に与える影響を検討するために、ケース1とケース3のシミュレーション結果の比較を行った。その結果、海水を考慮した場合は海水を考慮しない場合に比べて表面波の振幅が小さくなることを確認した。これは地震動が海底面を伝播する過程において、地震波のエネルギーの一部が海水中にP波として放出されるためと考えられる。

本研究では周期5秒以上の地震動を対象としたシミュレーションを行った。ただし、山地のように地形のみが違い地下構造に違いがない観測点では、より短周期の帯域で影響を受けると考えられる。したがって、周期5秒よりも短周期の地震動を考慮に入れた検討が今後の課題である。

謝辞：地下構造モデルには、文部科学省・地震調査研究推進本部の「長周期地震動予測地図」2012試作版を使用しました。

## 参考文献

- 1) Pitarka, A.: 3D elastic Finite-difference modeling of seismic motion using staggered grids with nonuniform spacing, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 89, 54-68, 1999.
- 2) 地震調査研究推進本部地震調査委員会:長周期地震動予測地図2012年試作版,平成24年1月13日,地震調査研究推進本部HP,  
[http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12\\_choshuki/index.htm](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/index.htm)
- 3) 地震調査研究推進本部地震調査委員会:長周期地震動予測地図2009年試作版,平成21年9月17日,地震調査研究推進本部HP,  
[http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09\\_choshuki/index.htm](http://www.jishin.go.jp/main/chousa/09_choshuki/index.htm)
- 4) 秋山伸一,池上泰史,アフニマル,額額一起: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,土木学会地震工学論文集,第28巻,CD-ROM, No.24, 2005.
- 5) 黒瀬健,河路薫,藤原了,秋山伸一:広域を対象とした2008年四川地震の地震動伝播シミュレーション,日本地震工学シンポジウム論文集,第13頁, GO47-FRI-PM-2, 2010.
- 6) 池上泰史,額額一起,三宅弘恵:海溝型地震における長周期地震動(2):伝播経路における発達過程,日本地震学会2005年秋季大会予稿集, S15-08111656-0356A, 2005.
- 7) Kanamori, H.: Faulting of the great Kanto earthquake of 1923 as revealed by seismological data, *Bull. Earthq. Res. Inst.*, 49, 13-18, 1971.
- 8) Ikegami, Y., K. Koketsu, T. Kimura and H. Miyake : Finite element simulations of long-period ground motions : Japanese subduction-zone earthquakes and the 1906 San Francisco Earthquake. *J Seismol.* DOI10.1007/s10950-008-9091-5, 2008

## LARGE SCALE 3-D SEISMIC WAVE PROPAGATION SIMULATION WITH VOXEL FEM INCLUDING EFFECT OF TOPOGRAPHY AND SEAWATER

Kaoru KAWAJI and Shinichi AKIYAMA

In order to evaluate the effects of modeling of topography and seawater on the seismic wave propagation, the simulation of seismic wave propagation in Kanto Plain is performed using the voxel finite element method (voxel FEM). We make the three-dimensional voxel FEM model based on the structure model (The Headquarters for Earthquake Research Promotion, 2012), which includes the information of topography and ocean. Using this model, we perform the simulation of seismic wave propagation considering the effects of topography and seawater, and the simulation not considering those effects. The results show that the influence of topography is not dominant in any seismic waveforms propagating right beneath mountain regions. This is considered to be because the mountain regions are mainly made up of hard rocks and are not sensitive to the frequency band that we are looking at in this study. On the other hand, the results also show that seismic waves propagating beneath the plain region can be fluctuated in amplitude and phase. This fluctuation phenomena in the plain region is created by the topography change between the mountain region and basin. Also, we observed that the amplitude of surface waves is reduced by the effect of seawater.