

2007年新潟県中越沖地震強震動シミュレーションのための
地下構造モデルのボクセル有限要素法による検証
VALIDATION OF VELOCITY STRUCTURE MODEL FOR
STRONG GROUND MOTION SIMULATION
OF THE 2007 CHUETSU-OKI, JAPAN, EARTHQUAKE
USING THE VOXEL FINITE-ELEMENT METHOD

刀田健史¹⁾, 瀨瀬一起²⁾, 三宅弘恵³⁾

Kenji TODA¹, Kazuki KOKETSU², Hiroe MIYAKE³

1) 東京大学地震研究所, 大学院生

¹Graduate Student, Earthquake Research Institute, University of Tokyo

2) 東京大学地震研究所, 教授 理博

²Professor, Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Dr. Sci.

3) 東京大学地震研究所, 助教 理博

³Assistant Professor, Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Dr. Sci.

ABSTRACT: The strong ground motion recorded at the Kashiwazaki-Kariwa nuclear power plant during the 2007 Chuetsu-oki, Japan, earthquake exceeded the design basis significantly. This amplification attributes to the source characteristics of this earthquake and the velocity structure beneath the Chuetsu region. In order to assess the effects of the velocity structure, we carried out strong ground motion simulations using the voxel finite-element method and validated the velocity structure model. The results show that this model needs adjustment of velocities to reproduce all the components of the observed records.

キーワード: 新潟県中越沖地震, 柏崎刈羽原子力発電所, 強震動シミュレーション, ボクセル有限要素法, 地下構造モデル

1. はじめに

時刻歴応答解析による構造計算を必要とする重要建築物, 殊に原子力発電所のように耐震安全性の確保が最優先される建築物においては, 入力地震動がより正確に推定されることが強く要請されている. しかしながら, 2007年7月16日10時13分頃に発生した新潟県中越沖地震 (M_w 6.6) により柏崎刈羽原子力発電所で観測された地震動は, 設計時に想定された地震動レベルを大幅に上回るものであった. 原子炉基礎版上における擬似速度応答スペクトルは耐震設計用の標準的なスペクトルから算出されるものに比べ5~7号機側で約3倍, 1~4号機側で約6倍に及んでいた.

このような大幅な増幅が見られた原因として, 震源特性の影響, 地下構造の影響などを考慮した検討が行われている (例えば 原子力安全基盤機構¹⁾²⁾ (以下ではJNESと略記), 東京電力³⁾⁴⁾. これらの検討では, 震源特性の影響により本地震の短周期レベルが壇・他⁵⁾により示される同規模の地震のそれよりも1.5倍程度高いことが示されている. 残りの増幅をもたらした要因として, 有限差分法による強震動シミュレーションによって, 深部地盤の三次元的な不整形性による影響が指摘された. さらに東京

電力⁴⁾では、敷地直下の褶曲構造による影響が指摘されている。

本論文ではまず柏崎刈羽原子力発電所内で観測された強震動の特徴を整理した上で、上述とは異なる解析手法であるボクセル有限要素法を用いた強震動シミュレーションの結果を示す。さらに、使用した三次元地下構造モデルの特徴の整理・改良を進め、地下構造の影響による増幅の要因を検証する。

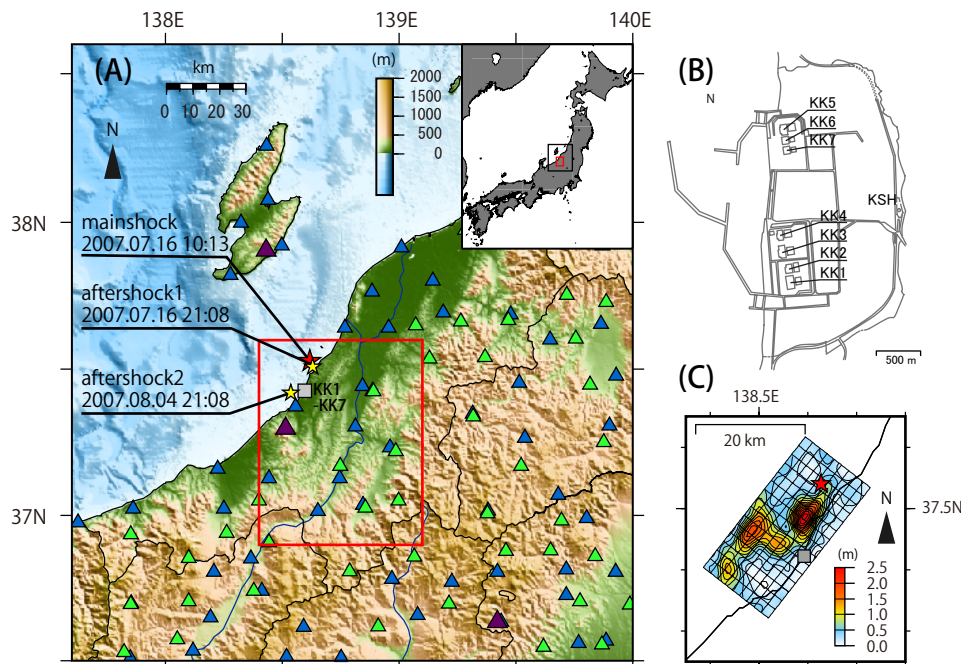


図 1 (A) 新潟県中越地域におけるJNES (2008) モデル²⁾の範囲 (赤の四角) と新潟地域三次元速度構造 1 次モデル^{6),7)}の範囲 ((A)の領域全体) . ★, ☆はそれぞれ2007年新潟県中越沖地震の震央と余震の震央. ■, ▲, ▲, ▲はそれぞれ柏崎刈羽原子力発電所, K-NET観測点, KiK-net観測点, F-net観測点を示す. (B) 柏崎刈羽原子力発電所内の観測点位置と名称 (文献8に加筆) (C) 本震のすべり分布 (引間・瀧澤⁹⁾). ★は本震の震央を, ■は柏崎刈羽原子力発電所を示す.

2. 柏崎刈羽原子力発電所内で観測された地震動

2-1. 観測された地震動の特徴

図 1 に柏崎刈羽原子力発電所の位置および発電所内の強震観測点の配置を示す。発電所内には 1 号機、5 号機、6 号機の建屋及び敷地地盤に設置されていた既設地震計 67 台と、2004 年新潟県中越地震を踏まえ、新たに全号機に設置された新設地震計 30 台 (2007 年 4 月より観測開始) がある。まず加速度波形について特徴を整理する。図 2 (A) に 1 ~ 7 号機の原子炉基礎版上及びサービスホールに設置された新設地震計における加速度波形⁸⁾ (EW 成分) を北東から南西方向に示す。どの波形にも明瞭なパルス波が二つ見え、さらに両者の間にやや不明瞭なパルス波が見える。これらは震源断層上の 3 つのアスペリティから生成されたことが示されている^{10),11)}。また、最大加速度 (EW 成分) の傾向として、1 ~ 4 号機の方が 5 ~ 7 号機よりも有意に大きい³⁾ (ただし 3 号機は除く)。NS 成分や UD 成分の振幅の大きさや各号機間の相違は EW 成分ほど顕著ではない。以上より柏崎刈羽原子力発電所で観測された加速度波形について特徴的であるのは比較的大きな振幅を示した EW 成分であり、これらの波形を検討することが本地震による地震動を理解する上で重要と考えられる。

次に速度波形について特徴を整理する。図 2 (B) には (A) と同様の順番に、加速度波形を積分して求めた速度波形を示した (EW 成分、左からフィルターなし、0.03 ~ 1.0 Hz、0.03 ~ 0.5 Hz のバンドパスフィルタをかけた波形)。これらの速度波形においてもパルス波がみられ、また 1 ~ 4 号機側が 5 ~ 7 号機側に比べて有意に大きい。また、より長周期側までみても 1 ~ 4 号機側の最大速度が大きいという傾向は変わらず、本論文の解析手法であるボクセル有限要素法といった理論的手法による強震動シミュレーションを用いてもその原因を探求することが可能であると考えられる。

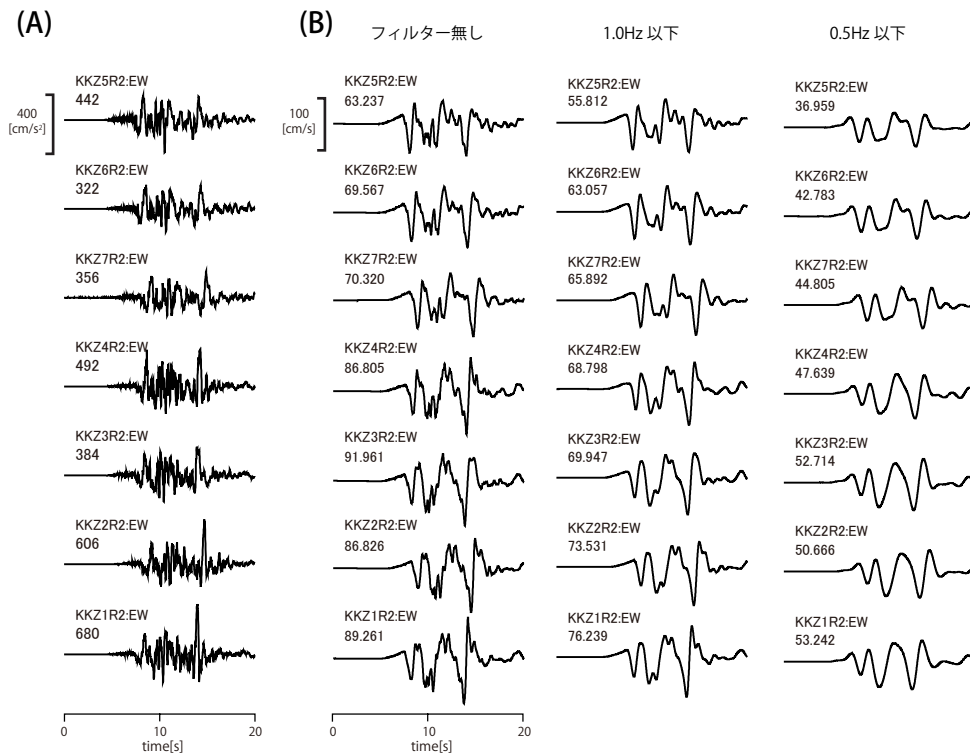


図2 (A) 柏崎刈羽原子力発電所内で得られた加速度波形(EW成分). 上より順に, 北東から南西方向に並べている. 左上の観測点名の下の数字は最大加速度 (cm/s²) を示す. (B) 加速度波形を積分して得られた速度波形(EW成分). 左より順に, フィルター無し, 0.03~1.0Hz, 0.03~0.5Hzのバンドパスフィルタをかけている. 左上の観測点名の下の数字は最大速度 (cm/s) を示す.

2 - 2. 地震動増幅の要因分析

本地震において柏崎刈羽原子力発電所内で観測された強震動は, 前節のような特徴を持っているが, 設計時に想定された入力地震動に比べて大きい特徴もあった. 1号機, 5号機の原子炉基礎版上における加速度応答スペクトルは, ほぼ全ての周期帯で設計用基準地震動を上回っていた¹⁰⁾. この傾向は擬似速度応答スペクトルにおいても同様であった¹⁾. 1号機, 5号機の原子炉基礎版上で得られた観測波形から解放基盤での地震動を推定し, その擬似速度応答スペクトルと耐専スペクトル¹²⁾ (内陸補正あり) を比較すると, 1号機では6倍, 5号機では4倍の増幅がみられている⁴⁾. 本地震において観測された地震動レベルが想定されたものより大きくなった要因は, 震源特性によるものと伝播経路特性や地盤増幅特性を含む地下構造によるものに分類されている. このうち, 全号機において震源特性によって1.5倍が説明されることがJNES¹⁾によって示されている. 残りの増幅は広域な地下構造による影響に加え, 敷地直下の褶曲構造による影響が指摘されている. これらのうち, 広域な地下構造による影響を理論的な強震動シミュレーションによって説明するため, 本研究では, JNES (2008) の地下構造モデルの検証を行った.

3. 地下構造モデル

本論文で使用した地下構造モデルは原子力安全基盤機構が2004年新潟県中越地震の検討用に作成したモデルを, さらに本地震の検討用に修正したモデルである (以下JNES (2008)). このモデルは次のステップを経て作成された²⁾. まずボーリングデータ, 物理探査, 地表地質分布等のデータを用いて, 地質構造断面図を作成する. 次に, 地質構造断面図から地層境界を読み取り, その空間分布を補間し, 各地層の上面深度のコンター図を作成する. そして旧石油公団の基礎試錘での検層データ, KiK-netでの検層データから深度とP波速度, S波速度の関係を設定し, 各地層の物性値を設定する. 最後に観測H/Vスペクトルや観測点間の地震波の走時など観測地震動と整合するように物性値や地層境界深度を

チューニングする。JNES (2008) モデルでは2007年新潟県中越沖地震の震源周辺及び柏崎刈羽原子力発電所周辺の海域や沿岸域の地層構造と速度構造の修正が反映されている。

JNES (2008) モデルの詳細を図3に、また、モデルの物性値を表1に示した。まず、各地層上面標高のコンター（図3(A)）からわかるように新潟県中越地域は深い堆積層に覆われており、その厚さは約4~8 kmにまで及ぶ。基盤岩上部に折り重なるのはグリーンタフ、七谷層、下部および上部寺泊層、椎谷層、西山層および魚沼+灰爪層である。断面（図3(C)）をみると海側から敷地側へ地層が持ち上がっており、敷地直下はちょうど地層の向斜部と背斜部の中間にあることがわかる。このようにJNES (2008) モデルは新潟県中越地域の厚い堆積層と複雑な地下構造を表現している。

JNES (2008) モデルと新潟地域三次元速度構造1次モデル⁶⁾（以下、1次モデル）との比較を行った。図3(B)にJNES (2008) モデルと1次モデルの断面図を示した。これらを見てみると、柏崎刈羽原子力発電所の敷地より海側では地下構造はおおよそ同じである一方で、内陸側では地層の形に大きな違いがあることがわかる。

4. ボクセル有限要素法によるシミュレーション

広域的な地下構造による増幅特性を調べるため、ボクセル有限要素法による強震動シミュレーションを行う。まずは余震を用いた点震源のシミュレーションによりモデルの妥当性を確かめた。

4-1. 余震を用いた点震源のシミュレーションの概要

3. で述べた地下構造モデルを用いて、ボクセル有限要素法^{13),14)}による余震を用いた点震源シミュレーションを行った。用いた余震は二つである。余震1として本地震の3つのアスペリティのうち最も北側のものに近く、比較的規模が大きい2007年7月16日21時8分発生のもので (M_w 4.4) を用いた。余震2として最も南側のアスペリティ近くで2007年8月4日0時16分に発生したものをを用いた。余震1は位置を文献¹¹⁾より、メカニズムをF-netより取得した。余震2は位置とメカニズムをHi-netより、地震モーメントを文献¹⁵⁾より取得した。これら余震の位置を図1に、諸元を表2に示す。震源時間関数には継続時間1秒のベル型を用いた。解析には前述のJNES (2008) の地下構造モデルを用い、元の約500 m 間隔のグリッドをSmith and Wessel¹⁶⁾の方法によって補間し、構造格子の大きさのグリッドに配置しなおした。モデル範囲は図1(A)の赤の四角に示した領域で、東西約61.8 km×南北約77.5 km×深さ25 kmとし、東西方向100 m×南北方向100 m×深さ方向100 mの構造格子に分割した。本解析の有効周波数は0.7 Hz以下となる。解析領域の周辺境界には吸収帯境界を設けた。Q値の与え方は地震調査研究推進本部の長周期地震動予測地図2009年試作版¹⁷⁾を参考にし、 Q_s は V_s の1/5（但し、 $Q_s > 400$ なら $Q_s = 400$ ）、 Q_p は Q_s の1.7倍として与えた。

表1 JNES (2008)²⁾ による地下構造モデルの物性値

地層	V_p (km/s)	V_s (km/s)	ρ (kg/m ³)
魚沼層群+灰爪層	1.7	0.70	1860
	2.0	0.98	1980
	2.5	1.08	2130
西山層	1.7	0.70	1860
	2.0	0.98	1980
	2.5	1.08	2130
椎谷層	1.9	0.84	1940
	2.5	0.98	2130
	3.3	1.68	2300
上部寺泊層	3.7	1.87	2300
下部寺泊層	4.1	2.20	2400
七谷層+グリーンタフ	4.7	2.64	2500
基盤岩類	5.5	3.15	2650

表2 点震源シミュレーションに用いた余震の諸元

余震名	余震1	余震2
発生時刻	2007年7月16日 21時8分	2007年8月4日 0時16分
M_w	4.4	3.4
M_0 (Nm)	5.21×10^{15}	1.56×10^{14}
緯度 (°)	37.509	37.420
経度 (°)	138.630	138.537
深さ (km)	13.6	17.9
走向 (°)	187	35
傾斜 (°)	54	45
すべり角(°)	70	-11

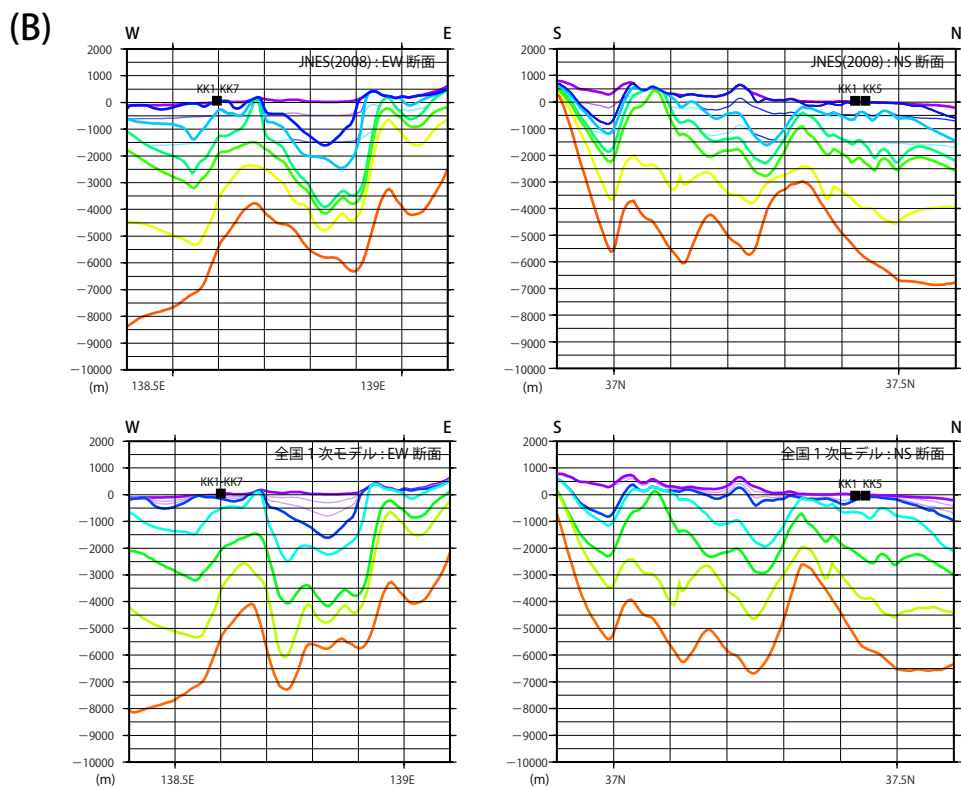
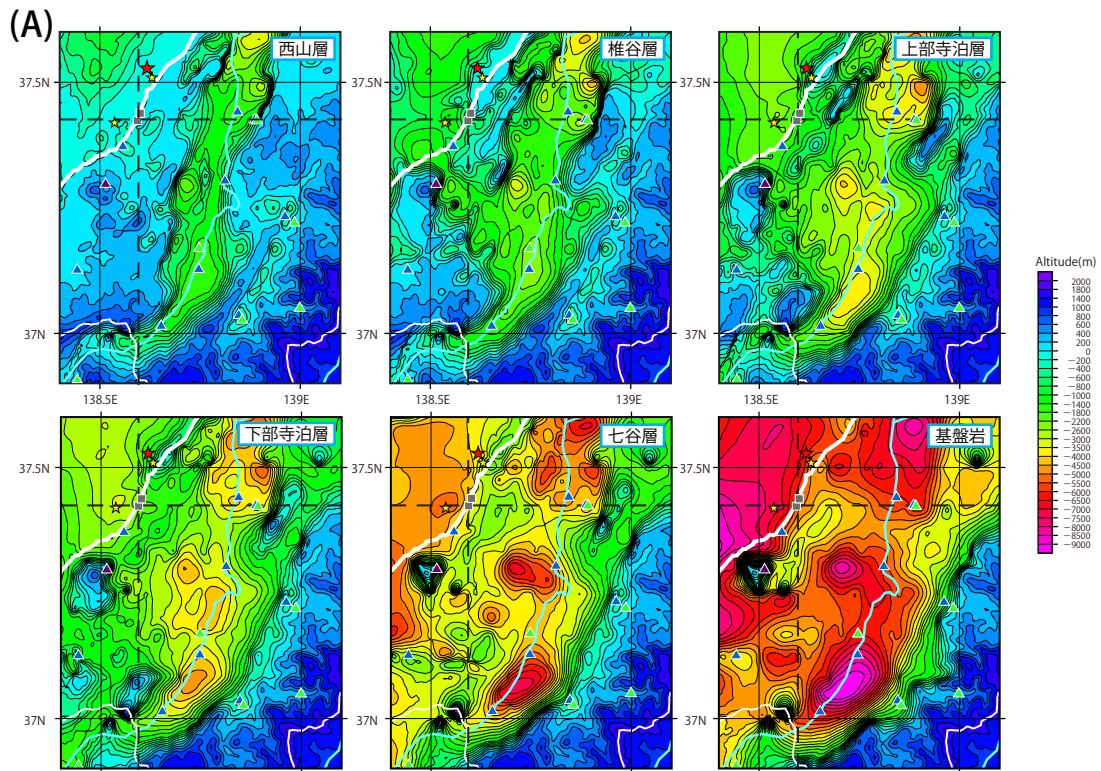


図3 使用した地下構造モデルの詳細 (A) JNES (2008) モデルの各層上面標高. 黒の破線は(B)における断面取得位置. ★, ☆はそれぞれ2007年新潟県中越沖地震の震央と余震の震央. ■, ▲, ▲, ▲はそれぞれ柏崎刈羽原子力発電所, K-NET観測点, KiK-net観測点, F-net観測点を示す. (B) JNES (2008) モデルと新潟地域三次元速度構造1次モデルの比較. 図3(A)内の黒破線の地下構造モデル断面(左:EW方向, 右: NS方向).

4-2. 点震源シミュレーション結果

図4に速度波形のシミュレーション結果を示す。シミュレーション結果の波形と観測波形は、余震1では0.03~0.7Hz、余震2では0.2~0.7Hzのバンドパスフィルタをかけている。まず余震1に関して波形の比較を行う。NS成分は振幅、走時ともに合いがよく、ほぼ観測波形を再現している。EW成分は初期の走時は合っているものの後続部分は合いが悪く、振幅も観測波形の約三分の一しかない。UD成分は、ほぼ観測速度波形の振幅を再現しているがシミュレーションの走時がEW・NS成分と比べて相対的にやや早い。次に余震2について波形の比較を行う。EW成分、NS成分については余震1と同様の傾向がみられる。UD成分に関しては波形の再現性が低く、余震1のような特徴はみられない。

シミュレーション波形が観測を再現できていない要因としては、地下構造モデルの他に震源メカニズムの妥当性が考えられる。今回の結果は水平成分のうちNS成分ではほぼ観測波形を再現できているがEW成分では振幅が小さくなるというものであったため、より地震波の伝播方向に直接影響を与える震源メカニズムの修正をまず試みる必要がある。また余震1におけるUD成分でシミュレーション波形の走時が相対的に早かった理由としては、地下構造モデルの速度の設定が大きく関係していると考えられる。表1を参照すると、基盤岩類では $V_s/V_p \approx \sqrt{3}$ であり一般的な値となっているが、最も表層の魚沼層群+灰爪層では $V_s/V_p \approx 2.4$ となっておりかなりその比が大きい。JNES (2008) モデルのP波速度は基礎試錘等におけるVSP・音波検層結果から、S波速度はP波速度との経験的な関係から与えられている²⁾が、三成分の波形合成にはこれら速度の調整が効果的であると考えられる。

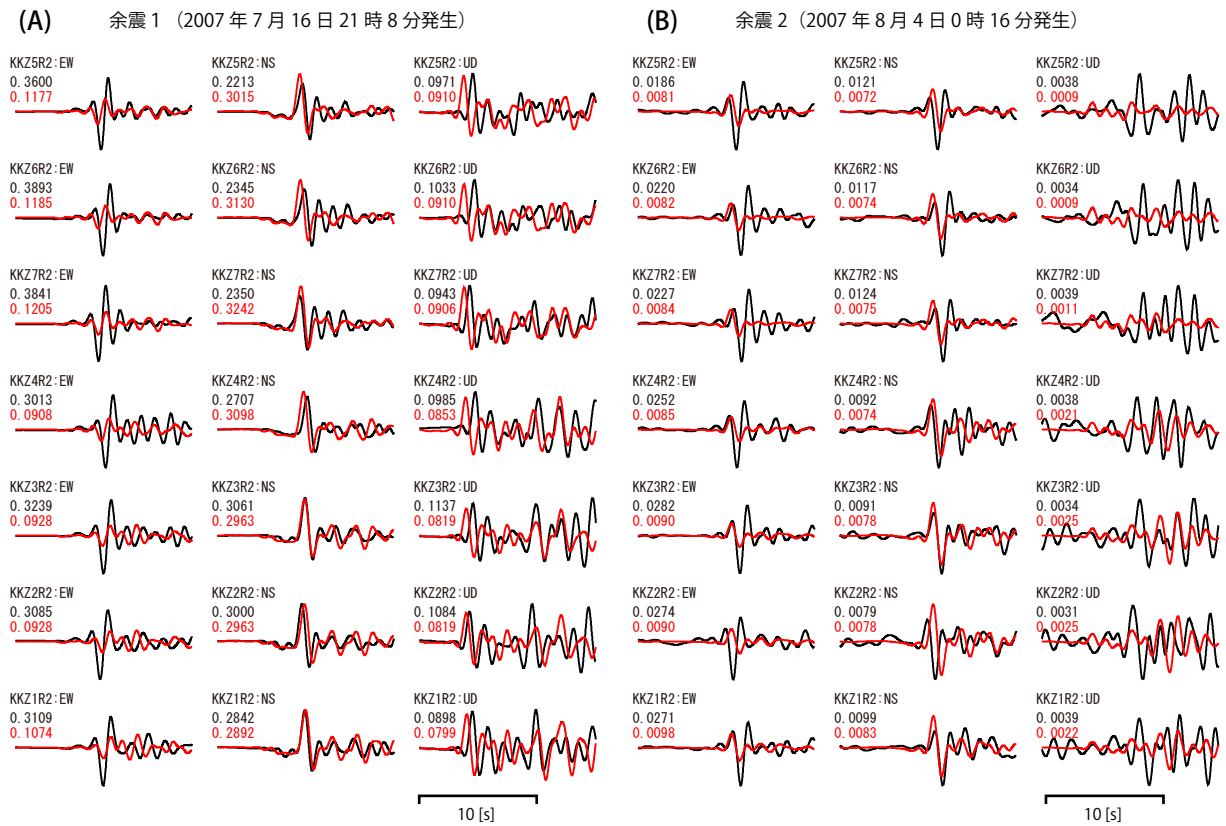


図4 (A) 余震1の観測速度波形(黒線)と点震源シミュレーション結果(赤線)の比較。左上の観測点名の下の数字は最大速度(黒:観測、赤:シミュレーション)を表す。(B) 余震2の場合。

5. まとめ

2007年新潟県中越沖地震の余震を用いてボクセル有限要素法による点震源シミュレーションを行い、JNES (2008) の地下構造モデルの検証を行った。その結果、水平成分の走時は概ね合い、NS方向の振幅の再現は良好であった一方、EW方向では振幅が過小となった。また、UD成分では振幅を再現できたものの、走時が水平成分に比べて早く計算される結果となった。これらを修正する為に、用いた余震の震源メカニズムや地下構造モデルの再検討と調整を行う必要がある。他の余震によるシミュレーション結果も踏まえて地下構造モデルを改良した上で本震のシミュレーションを行い、柏崎刈羽原子力発電所内の観測点で見られた地震動の大きな増幅の原因としてどの程度広域的な地下構造が影響したかを検討する。

謝 辞

東京電力(株)および防災科学技術研究所の強震記録を使用させて頂きました。また、JNESには地下構造モデルを提供いただきました。記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 原子力安全基盤機構：2007年新潟県中越沖地震により柏崎刈羽原子力発電所で発生した地震動の分析，合同WG9-2-1，総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会地震・津波、地質・地盤合同ワーキンググループ 第9回，2008年5月22日
- 2) 原子力安全基盤機構：2007年新潟県中越沖地震により柏崎刈羽原子力発電所で発生した地震動の分析 -5/22合同WG報告内容・質問事項の補足説明-，合同WG10-1，総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会・津波、地質・地盤合同ワーキンググループ 第10回，2008年6月6日
- 3) 東京電力株式会社：柏崎刈羽原子力発電所における平成19年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析及び基準地震動について，総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会地震・津波、地質・地盤合同ワーキンググループ 第9回資料，2008年5月22日
- 4) 東京電力株式会社：柏崎刈羽原子力発電所における平成19年新潟県中越沖地震に取得された地震観測データの分析に関する補足説明，総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会・津波、地質・地盤合同ワーキンググループ 第10回，2008年6月6日
- 5) 壇一男，渡辺基史，佐藤俊明，石井透：断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化，日本建築学会構造系論文集，Vol.545，2001年，pp.740-757
- 6) 引間和人，鈴木晴彦，三宅弘恵，古村孝志，額額一起：新潟地域の3次元速度構造一次モデルの構築，日本地震学会講演予稿集2007年度秋季大会，2007年，D22-01
- 7) Koketsu K., H. Miyake, H. Fujiwara, and T. Hashimoto : Progress towards a Japan integrated velocity structure model and long-period ground motion hazard map, Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008, S10-038
- 8) 東京電力株式会社：柏崎刈羽原子力発電所における加速度時刻歴波形データ，財団法人震災予防協会，2007年
- 9) 引間和人，額額一起：遠地実体波と強震波形から推定される2007年新潟県中越沖地震の震源過程，日本地震学会2007年度秋季大会講演予稿集，2007年，P1-085
- 10) 額額一起，三宅弘恵：2007年新潟県中越沖地震の震源断層面と柏崎刈羽の強震動，地震ジャーナル，45，2008年，pp.27-35
- 11) Miyake H., K. Koketsu, K. Hikima, M. Shinohara, and T. Kanazawa : Source Fault of the 2007 Chuesu-oki, Japan, Earthquake, Bulltein of the Seismological Society of America, Vol.100, No. 1, 2010, pp.284-391
- 12) Noda S., Y. Yashiro, K. Takahashi, M. Takemura, S. Ohno, M. Tohdo, and T. Takahashi : Response spectra for design purpose of stiff structures on rock sites, Proc. of the OECD-NEW Workshop on the

- relations between seismological data and seismic engineering analysis, 2002
- 13) Koketsu K., H. Fujiwara, and Y. Ikegami : Finite-element Simulation of Seismic Ground Motion with a Voxel Mesh, *Pure and Applied Geophysics*, Vol.161, No.11-12, 2004, pp.2183-2198
 - 14) 池上泰史：広帯域減衰特性・地形・海を考慮したボクセル有限要素法による地震動シミュレーション, 東京大学博士論文, 2008
 - 15) 入倉孝次郎, 香川敬生, 宮腰研, 倉橋奨：2007年新潟県中越沖地震の強震動-なぜ柏崎刈羽原子力発電所は想定以上の破壊的強震動に襲われたのか？ -, <http://www.kojiro-irikura.jp/pdf/cyuetsu_080319.pdf>, 2008年3月19日
 - 16) Smith, W. H. F., and P. Wessel : Gridding with continuous curvature splines in tension, *Geophysics*, Vol.55, No.3, 1990, pp.293-305
 - 17) 地震調査委員会：「長周期地震動予測地図」2009年度試作版, 2009年, 66pp.