

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
LARGE-SCALE GROUND-MOTION SIMULATION OF
2008 SICHUAN EARTHQUAKE

黒瀬 健¹⁾、河路 薫²⁾、藤原 了³⁾、秋山伸一⁴⁾、山中浩明⁵⁾

Takeshi KUROSE¹, Kaoru KAWAJI², Satoru FUJIHARA³,
Shinichi AKIYAMA⁴, Hiroaki YAMANAKA⁵

1) 伊藤忠テクノソリューションズ(株)

¹ ITOCHU Techno-Solutions Corp.

e-mail: takeshi.kurose@ctc-g.co.jp

2) 伊藤忠テクノソリューションズ(株)

² ITOCHU Techno-Solutions Corp.

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

3) 伊藤忠テクノソリューションズ(株) 博士 (理学)

³ ITOCHU Techno-Solutions Corp., Dr.Sci.

e-mail: satoru.fujihara@ctc-g.co.jp

4) 伊藤忠テクノソリューションズ(株) 博士 (工学)

⁴ ITOCHU Techno-Solutions Corp., Dr.Eng.

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

5) 東京工業大学大学院、准教授 工学博士

⁵ Associate Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr.Eng.

e-mail: yamanaka@depe.titech.ac.jp

ABSTRACT: During the 2008 Sichuan Earthquake, long-period ground-motions with periods from a few to more than ten seconds were observed at the cities more than 1,500 km away from the focal area such as Beijing, Shanghai, Taipei, etc. In this study, we tried to reproduce the long ground-motions observed at main cities in the Eastern Asia, mainly in China, by voxel-type finite-element simulation using a parallel computer, considering effects of a 3D structure of the crust and mantle.

キーワード : 2008年四川地震、長周期地震動、ボクセル型有限要素法、並列計算

1.はじめに

2008 年四川地震の際には、震源域から1,500km 以上離れている北京、上海、台北などの平野部において、超高層ビル内で周期が数秒～十数秒を超える長周期地震動が観測され、また体感されたと報告されている¹⁾。このことは、近傍に震源となる断層やプレート境界が位置していない大都市においても、遠方から到来する長周期地震動が超高層建物の耐震安全性や居住者心理に影響を及ぼすことを示している。よって、従来、固有周期の短い中・低層の建物が主体であった地域に固有周期の長い超高層建物が建設されることにより、これまで長周期地震動の影響を考慮しなくてもよかった地域でも長周期地震動の影響を検討する必要性が生じてくる。

長周期地震動の予測や評価においては数値シミュレーションが有効な手法のひとつであると考えられる。ただし、震源から1,000～2,000km程度離れた地域の地震動を評価するためには、広域に渡る地下構造をモデル化し、さらに、超高層建物の固有周期まで考慮できる周期帯域を含んだ大規模な数値計算が必要となる。このような点を考慮し、本研究では広域を対象として2008 年四川地震の大規模地震動伝播シミュレーションを行い、中国を中心とする東アジアの主要都市における長周期地震動の再現を試みる。

2.地震と地震動の概要

2008年四川地震は現地時間の5月12日14時28分、中国四川省の龍門山断層帯で発生した。USGSによる震源位置は緯度31.10°、経度103.30°、深さ19kmである。地震の規模はMw7.9であり、死者約7万人、負傷者約37万人の人的被害をもたらした。この地震による地震動は、震源から遠く離れた北京や上海などの中国国内のみならず、タイ・バンコクやベトナム・ハノイでも観測・体感されたと報告されている²⁾。

この地震の記録が得られている中国国内およびその周辺の東アジアにおけるIncorporated Research Institutions for Seismology(IRIS)の観測点の位置を図1に、観測点の概要を表1に示す。

図2にIRISの観測点で取得された速度波形記録を、図3にそれらのFourierスペクトル示す。これを見ると、震源から1,500km以上離れたBJTやKNMBにおいて最大1cm/s 以上の振幅となっている。一方、LSAとULNにおける最大振幅はいずれもBJTやKNMBに比べて1桁ほど小さくなっている。また、LSAを除いては主に表面波と考えられる大振幅の地震動が長時間に及んで継続しているのが特徴的である。さらに、これらの波の卓越周期は10秒以上の長周期である。これらの特徴は、後述するように、観測点の周辺の地下構造および震源メカニズムの影響によるものと考えられる。

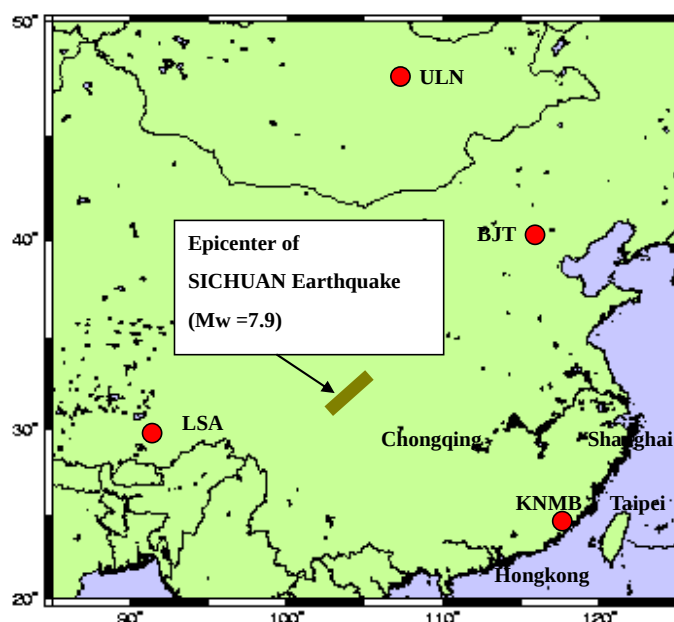


図 1 震源・観測点および主要都市の位置

表 1 観測点の概要

Station Name	Lat. (deg.)	Lon. (deg.)	Epicentral Distance (km)
BJT (Baijiatuan, Beijing, China)	40.0183	116.1679	1527
KNMB (KING-MEN, Taiwan)	24.4638	118.3882	1657
LSA (Tibet, China)	29.7031	91.1270	1179
ULN (Ulaanbaatar, Mongolia)	47.8651	107.0532	1889

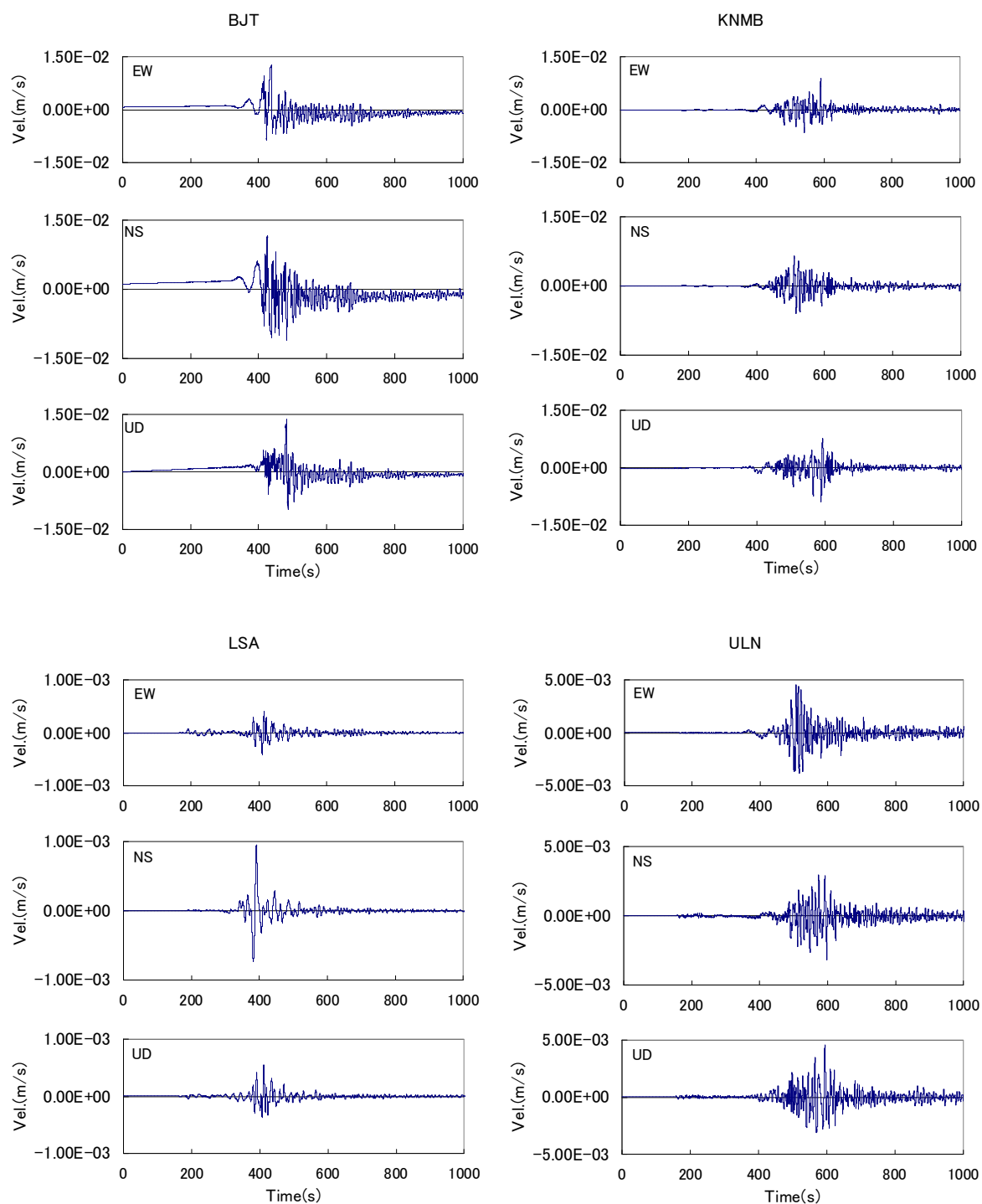


図2 IRIS 観測点における速度波形

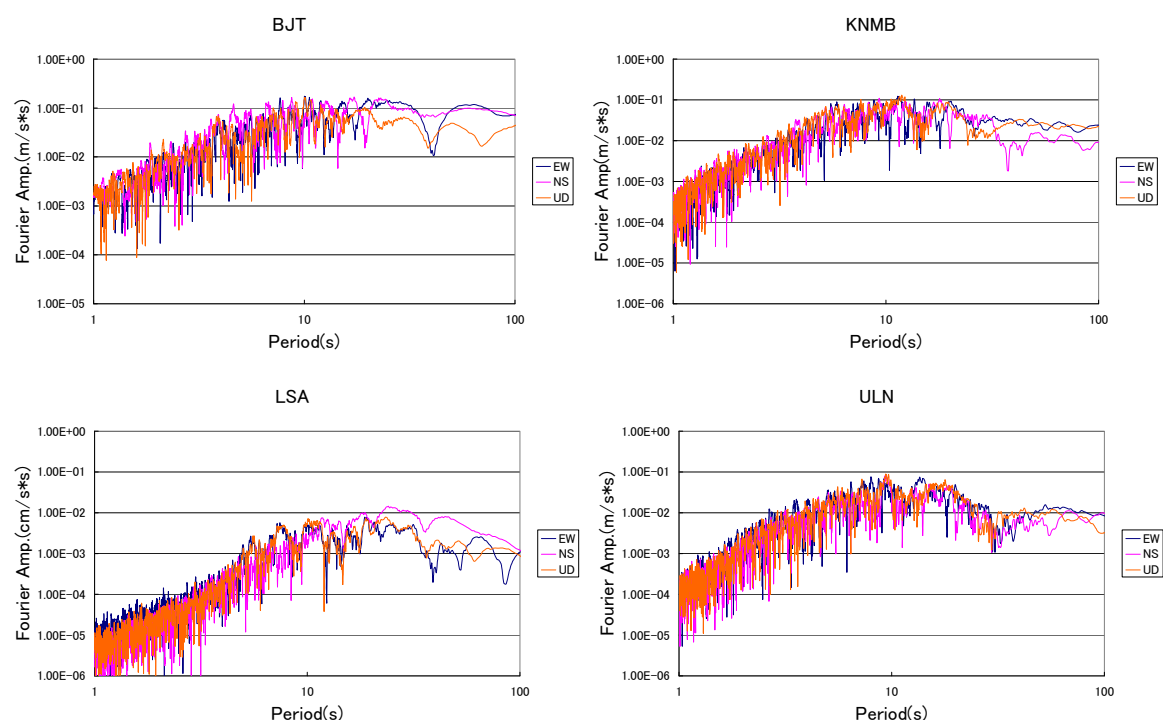


図 3 IRIS 観測点における速度スペクトル

3. 地下構造のモデル化

図 1 に示す領域を対象領域として、地震動シミュレーションに用いる地下構造モデルを作成する。第 1 節で述べたとおり、本研究の対象領域は広域に及ぶため、グローバルな地下構造に関する情報が必要である。そこで、地殻部分は Laske *et al.*³⁾の CRUST2.0 を元にモデル化し、マントル部分は Dziewonski and Anderson⁴⁾の Preliminary Earth Reference Model (PREM) を使用する。

CRUST2.0 は、緯度方向と経度方向に 2 度ピッチで物性値および層厚が与えられた 3 次元不均質地殻構造モデルであり、グローバルな地殻構造モデルとしては最も空間分解能が高い。本研究では、このうち対象地域内の物性値データの中央値を採用することにより均質成層構造とする。その際、物性値の与えられている地点と地点の間に関しては、層厚が滑らかに変化するように内挿して層境界をモデル化する。地殻部分の物性値を表 2 に、モデルの層境界深度を図 4 に示す。

PREM は地殻およびマントルの標準的な 1 次元地下構造モデルである。本研究では表 2 に示した地殻構造の下に PREM によるマントルの構造を付加して、深さ 600km までモデル化を行う。

表 2 CRUST2.0 に基づく地殻構造モデルの物性値

Layer Name	P-wave Velocity(m/s)	S-wave Velocity(m/s)	Density(kg/m ³)
Water	1500	0	1020
Soft Sediments	2500	1200	2100
Hard Sediments	4000	2100	2400
Upper Crust	6100	3500	2750
Middle Crust	6400	3600	2850
Lower Crust	7100	3900	3100

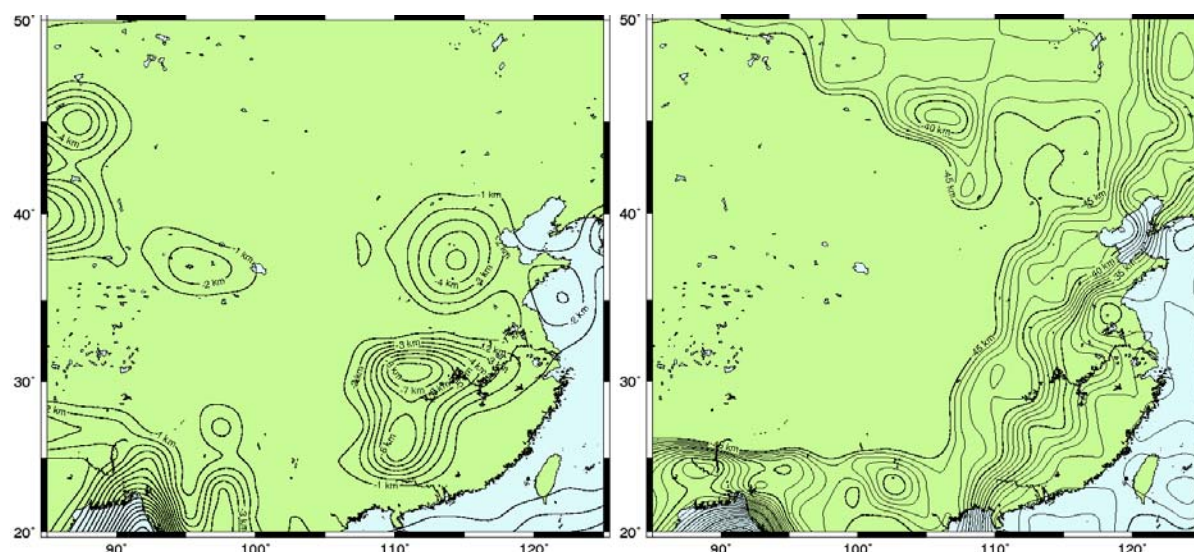


図 4 CRUST2.0 による層の下面深度
左: Hard Sediments、右: Lower Crust

4.震源モデル

震源モデルとして、Ji and Hayes⁵⁾のfinite fault modelを使用する。モデルのすべり量分布および断層面の地表面投影図を図5に示す。図5によると、断層破壊は南西から北東に向かって進展するモデルとなっている。このモデルについては断層を構成する各sub faultの位置、すべり量およびすべり角のデジタル値が公開されている。このすべり量の値および前節で示した地下構造モデルのパラメータから各sub faultに地震モーメントを与え、破壊伝播速度を考慮して各sub faultの地震モーメントを解放することによって断層運動を再現する。破壊伝播速度 V_r は断層位置のS波速度から計算して $V_r=2.52\text{km/s}$ とする。また震源時間関数は各sub faultで立ち上がり時間1秒のsmoothed ramp関数を仮定する。

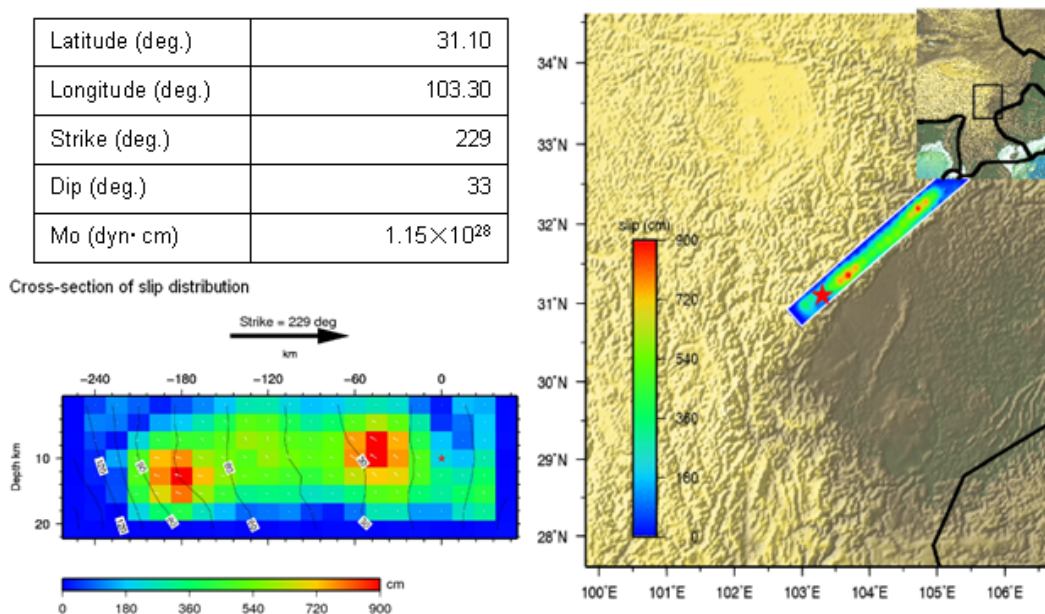


図 5 断層面上のすべり量分布および断層面の地表面投影図[Ji and Hayes (2008)]

5.地震動シミュレーション

第3節で示した地下構造モデルと第4節で示した震源モデルを用いて地震動シミュレーションを行う。2008年四川地震に関しては、古村⁶⁾、⁷⁾が地球シミュレータを用いた大規模地震動シミュレーションを行っているものの、観測記録の再現性までは議論されていない。これに対し、本研究では IRIS 観測点における観測波形を再現することを目的として大規模地震動シミュレーションを行う。

シミュレーションにはボクセル型有限要素法を用いる⁸⁾。地下構造をボクセル要素でモデル化する際は、地下深部から浅部に向かって要素サイズを小さくすることにより計算の効率化を図る。最小ボクセルサイズは1 km であり、対象周期帯域は10 秒以上である。クーラン条件から定まるタイムステップは Δt =約0.07 秒であり、17,370 ステップ（約1,200 秒間に相当）の計算を行う。このように、対象領域が広域に渡り大規模地下構造モデルを用いて計算を行う必要があるため、8CPU を有する Linux マシン 4 台を用いた並列計算によってシミュレーションを行う。

シミュレーションによる地震波の伝播（速度・3成分合成）を図6に示す。図6によると、震源で発生した地震波が周囲に広がる様子が見られるが、特に、中国北東部の北京周辺や南東部の堆積層の厚い地域において、長時間に渡り地震動が継続していることがわかる。

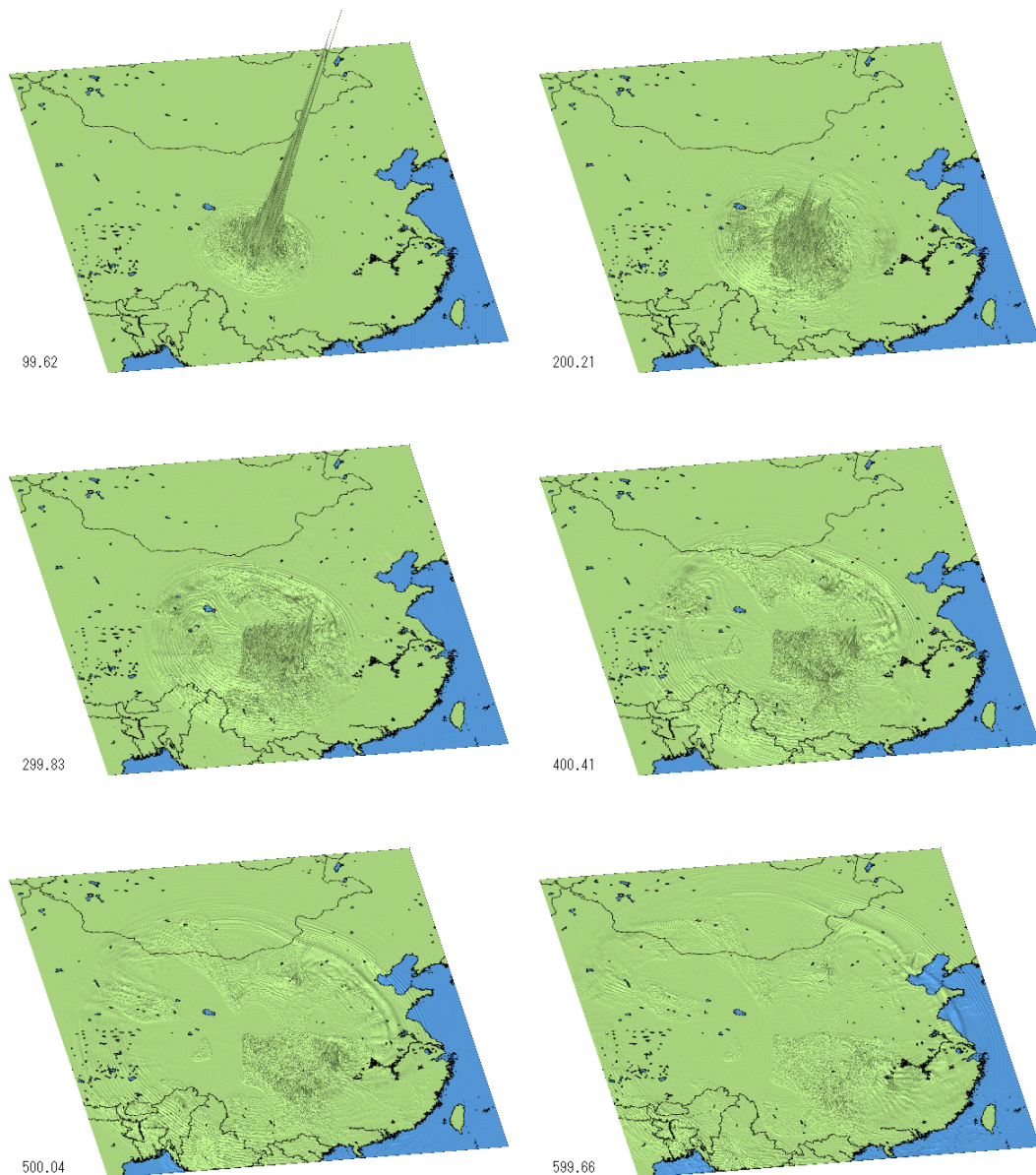


図6 シミュレーションによる波動伝播図（速度・3成分合成）

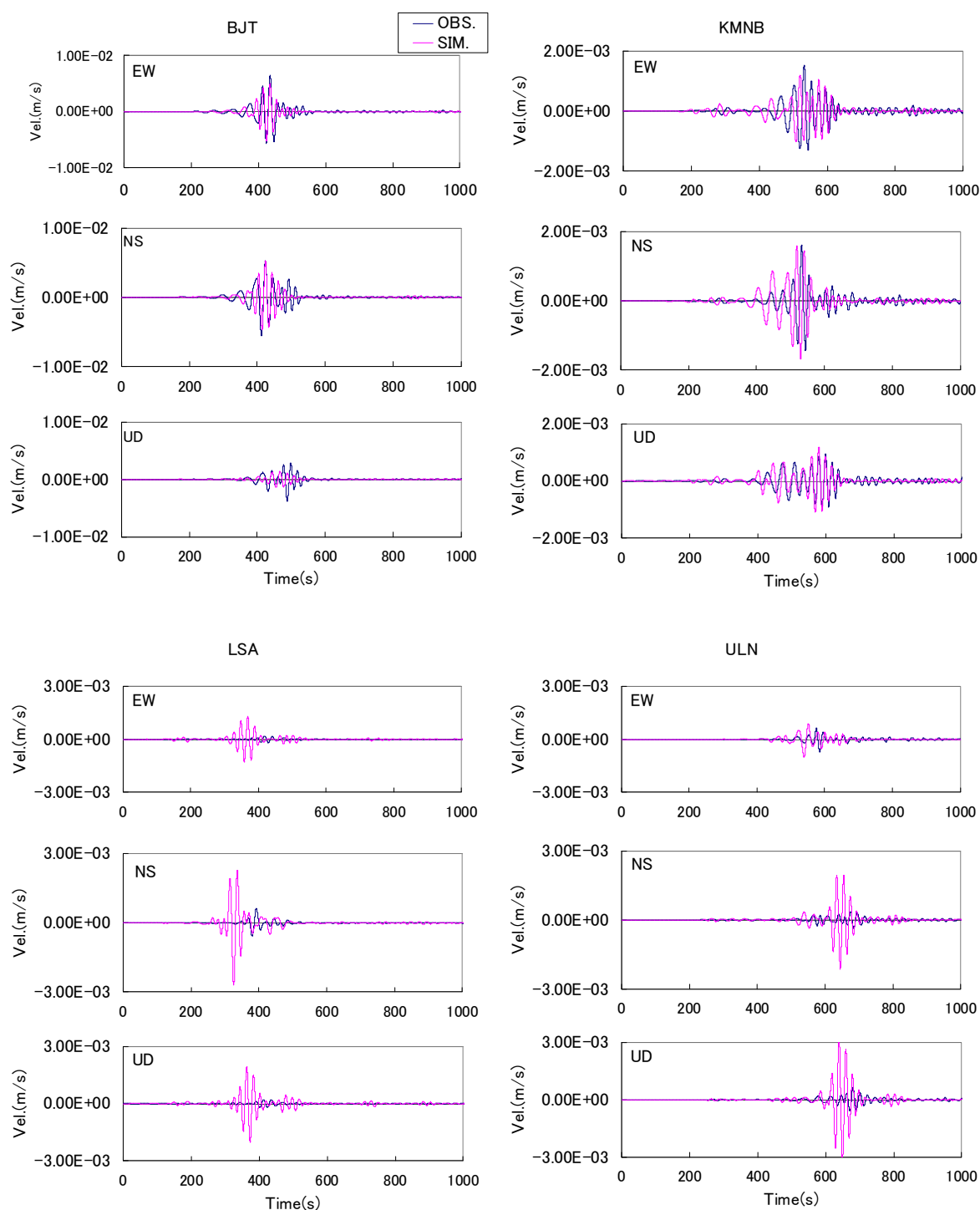


図7 IRIS 観測点における波形比較

6. 考察

IRIS観測点におけるシミュレーション波形と観測波形の比較を図7に示す。図7において、BJTではシミュレーション波形が位相・振幅ともに観測波形とよく一致している。BJTは地震基盤の深さ(図3のhard sedimentsの下面深さ)が最大5kmに達する盆地内に位置しており、この盆地内を通過する地震波のうち、堆積層構造の影響を受けて長周期成分が増幅される。こうした様子がシミュレーションによって再現されたものと考えられる。

また、KNMBではシミュレーション波形の水平2成分で観測波形と若干の位相のずれが見られるが、全体として振幅や継続時間はよく再現されている。特にBJTと比較すると、振幅の大きな長周期地震動が長時間にわたって継続していることが特徴的である。これは、震源からKNMBに至る伝播経路上に堆積層の厚さが最大8kmに達する盆地が位置しており、この盆地内の堆積層構造の影響を受けたためであると考えられる。これらのことは、震源から遠く離れている地点でも、厚い堆積層構造の影響を受ける地域では、主として表面波と考えられる長周期地震動が卓越する可能性が高いことを示唆している。

一方、LSAとULNにおいては、ULNのEW成分を除いて計算波形の振幅が観測波形を上回っていることがわかる。使用した地下構造モデルにおいて、これらの観測点の周辺には堆積層が存在していないことから、地殻構造のモデル化などに問題があることも考えられる。

7. まとめ

本研究では2008年四川地震の広域を対象とした地震動伝播シミュレーションを行い、中国を中心とする東アジアの主要都市における長周期地震動の再現を試みた。シミュレーションの結果、中国北東部および南東部では、観測された長周期地震動が良く再現されている。このことは、近傍に震源となる断層やプレート境界が位置していない大都市においても、遠方から到来する地震波が厚い堆積層構造の影響を受け、長周期地震動が卓越する可能性があることを示している。

近年の都市化の進展に伴い、従来固有周期の短い中・低層の建物が主体であった地域に、固有周期の長い高層あるいは超高層の建物が数多く建設されつつあり、従来は必要でなかった長周期地震動の問題を検討する必要性が生じてきている。特に、地震活動度の低い地域では耐震安全性への考慮が少ないが、遠地震による長周期地震動に対する検討が重要になると考えられる。このような検討において、本研究で実施した大規模地震動シミュレーションは有効であると考えられる。

一方、本研究で用いた地下構造モデルは緯度・経度2度ピッチのCRUST2.0に基づいており、グローバルな地下構造としては精度が高いと考えられる。しかしながら、工学的に必要と考えられる周期数秒〜十数秒程度の帯域の地震動特性を評価するには本モデルを用いた検討には課題も多く残されている。今後、より詳細な堆積層構造のモデル化などを行うことによって、工学的に重要なやや長周期帯域の地震動特性を評価する必要があるものと考えられる。

謝 辞

本研究ではIRISによる地震観測記録およびCRUST2.0による地殻構造モデルを使用しました。記して感謝致します。

参考文献

- 1) 瀬戸一・引間和人・三宅弘恵・丸山岳朗・王自法：四川大地震（汶川地震）の震源断層と地震動、首都圏大震災軽減のための実践的都市地震工学の展開・平成20年度成果報告シンポジウム、2009
- 2) レコードチャイナ、＜四川大地震＞揺れは東南アジアまで、一部日系企業では避難も-タイ・バンコク-、2008 (<http://www.recordchina.co.jp/group/g19048.html>)
- 3) Laske, G., G. Masters, C. Reif : CRUST2.0 -A New Global Crustal Model at 2x2 Degrees-, 2008 (<http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html>)
- 4) Dziewonski, A.M., D.L. Anderson : Preliminary Reference Earth Model. *Phys. Earth Planet. Inter.* Vol.25, 1981, pp297-356
- 5) Ji, C., G. Hayes : Finite Fault Model -Preliminary Result of the May 12, 2008 Mw 7.9 Eastern Sichuan, China Earthquake-, 2008 (http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2008/us2008ryan/finite_fault.php)
- 6) 古村孝志：北京や上海でも大きく揺れた四川大地震の長周期地震動、CIDIR研究最前線、Vol.1、2008 (<http://cidir.iii.u-tokyo.ac.jp/cidirR&C-front200807.htm>)
- 7) 古村孝志：3次元不均質場での波動伝播と強震動のシミュレーション、平成20年度地球シミュレータ利用報告会、2008 (<http://www.jamstec.go.jp/esc/projects/fy2008/13-furumura.html>)
- 8) 秋山伸一・池上泰史・アフニマル・瀬戸一：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