

TSUBAME 共同利用 平成 25 年度 産業利用 成果報告書

三次元の広帯域地震動シミュレーションの実用化に向けた検討
Examination for practical application of 3-D waveform simulation in the broadband Frequency range正月 俊行
Toshiyuki Masatsuki株式会社 構造計画研究所
Kozo Keikaku Engineering Inc.
<http://www.kke.co.jp>

平成 23 年度の課題では三次元有限差分法による波動伝播プログラムを TSUBAME に移植して最適化を行い、大規模波動伝播シミュレーションを実施した。平成 24・25 年度には、プログラムの実用化に向けた取り組みとして、計算精度の向上および強震動評価結果の工学的な妥当性の検討を実施した。本報告書では、平成 24 年度に実施したランダム媒質を用いた短周期地震動 ($f \geq 1$) の計算精度向上に関する検討および平成 25 年度に実施した安定した計算を実施するための空気層導入モデルの工学的妥当性の検討についてまとめた内容を報告する。

In fiscal 2011 we ported the parallel code of 3-D Finite-Difference method for numerical simulation of seismic wave propagation to the TSUBAME, and performed code tuning to adopt the large-scale simulation. In 2012 and 2013 fiscal years we performed several examinations to make the program fit for practical use. We confirmed the technological validity of results derived from the program and improve the precision of the results. We make a final report of the results derived in both fiscal years, which are the simulation using random mediums to improve the precision of short-period wave propagation ($f \geq 1$) and the engineering verification for simulation using structure model with an air layer.

Keywords: Earthquake, Wave Propagation, Finite-Difference Method, Random Medium, air layer

背景と目的

2011 年 3 月に発生した東北地方太平洋沖地震では、広い範囲で甚大な被害が発生した。今後、発生確率が高いと言われている南海トラフの巨大地震や首都直下地震が起こった場合も同様に、都市部を含めた広い範囲で被害が発生することが予測される。このような被害を軽減するためには、地震による揺れや被害を事前に予測し、対策を立てておくことが重要である。関東平野や大阪平野などの大規模な盆地構造での地震動の増幅現象は、三次元的な地下構造を組み込んだ理論的な手法で計算を行うことで、従来よりも高精度の評価が可能となる。しかしながら、三次元地下構造を用いた高精度な地震動評価は、未だ一般建物の耐震設計等に用いられることが少ないのが現状である。また、理論的手法による地震波動伝播解析を、広範囲かつ耐震工学上重要な重要な周期帯まで行なう場合には、計算規模や計算量が膨大となるため、一般の PC クラスタでは、メモリや計算時間の制限から計算が困難となる。

そこで、平成 23 年度に地震波の大規模な波動伝播

問題に対応するために、既存プログラムの GPU 化および高性能な TSUBAME への移植を行った後、平成 24・25 年度には、プログラムの実用化に向けて、以下の検討を行った。本成果報告書では、実用化に向けた検討結果についてまとめた内容を報告する。

(1) 短周期地震動の計算精度の向上および結果の工学的妥当性の検討:

強震被害に大きく寄与する短周期地震動 ($f \geq 1$ Hz) は、伝播経路中のスケールの小さな地震波速度のゆらぎ(短波長不均質構造)や複雑な表層での散乱の影響を受け非常に複雑な伝わり方をすることが知られており、これらの影響を考慮した差分法による地震動シミュレーションの研究も行なわれている(例えば、古村・齊藤¹⁾, 2006; Kennett and Furumura, 2007³⁾; 武村・他, 2011⁴⁾)。これまでに当社では、既往研究で採用されている地震波速度のゆらぎ(ランダム媒質)を三次元地下構造モデルに導入した計算を実施した(田島・他, 2012a⁵⁾)。しかしながら、ランダム媒質の速

度ゆらぎは乱数初期値により変化し、それにより計算結果も変動すると考えられる。そこで、本検討では、複数の乱数を用いたランダム媒質導入モデルの計算(20 ケース)を実施し、計算結果のバラツキがどの程度であるかの確認を行った。

(2) 安定した計算を実施するための空気層導入モデルの工学的妥当性の検討:

これまでの三次元地震動シミュレーションの研究(田島・他, 2012b⁶⁾)では、地下構造モデルの表層(非常に薄い層)で計算不安定(発散)が起こることが分かっている。この計算不安定の対策としては「①原因となる層を取り除く」、「②地下構造の上に空気層を置く」などが考えられる。①の場合には原因となる層の特定のために計算の試行回数が増えるため大規模計算の場合、効率的ではない。一方、②の空気層を置いた場合の計算は平成 23 年度の大規模計算に適用し、計算不安定が解消されることが確認されているが、空気層の厚さ、物性値、計算結果への影響等をテストして適切な設定の妥当性を検証する必要がある。そこで、安定した計算を実施するための空気層導入モデルの工学的妥当性の検討を行った。

概要

まず、耐震工学上重要な短周期地震動の計算精度の向上のために、1 Hz 以上の地震動に影響する地下構造の物性値のゆらぎを考慮したランダム媒質を導入した計算を行い、観測記録との比較により計算精度の確認を行った。また、ランダム媒質作成に用いる初期乱数を変えた(地下構造モデルのランダム性が異なる)20 ケースの計算を行い、乱数の違いによる結果の変動量について調査した。

図 1 に、計算領域における対象地震および対象観測点の位置を示す。対象地震は、豊富な観測記録が得られている関東平野で起こった中規模地震(2008 年 8 月 8 日 12:57 の東京都多摩区直下の地震:Mw 4.6, 震源深さ 38 km)とし、地震規模が小さいため、点震源を仮定した。地震動の評価地点は関東地域の K-NET, KiK-net 観測点(59 地点)とした。シミュレーションで使用する地下構造モデルは、長周期地震動予測地図2012

年試作版(地震調査研究推進本部, 2012⁵⁾)において公開されている想定東海地震・東南海地震のための三次元地下構造モデルのうち、対象地震を取り囲む領域を抽出して使用した。計算領域の大きさは南北方向 102.4 km × 東西方向 102.4 km × 深さ方向 51.2 km で、格子間隔は 50 m、計算規模は約 43 億格子規模である。このモデルは層内が均質である従来の三次元地下構造モデルである(以後「従来モデル」と呼ぶ)。地下構造の物性値のゆらぎは、従来の三次元モデルにランダム媒質(相関距離 $A_x, A_y, A_z = 0.3$ km、標準偏差 4% のフォン・カルマン型の速度ゆらぎ分布)を掛け合わせることで作成した。図 2 にランダム媒質を導入したモデルと従来の境界内が均質モデルの地下構造の比較を示す。

つぎに、計算不安定解消のための検討として、従来の層内均質の地下構造モデルの最上層に空気層を置いた計算を 4 ケース実施した。表 1 に各ケースの空気層の設定を示す。対象地震、観測点、計算領域は、上記のランダム媒質導入モデルの場合と同様である。なお、空気層を置かない場合の計算(従来モデルおよびランダム媒質導入モデル)においては、60 秒あたりから計算不安定が起こっていたため、60 秒で波形をカットして結果の検討を行うこととした。

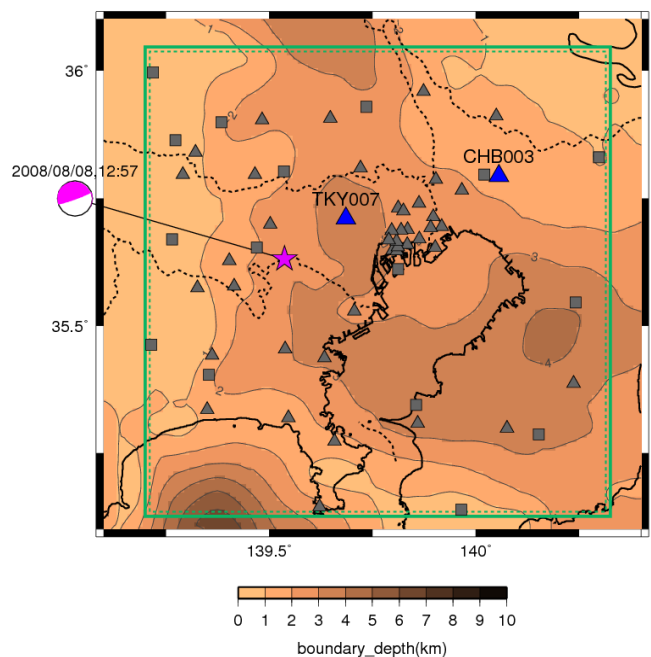


図 1 計算領域(緑色枠)における対象地震(星印)および観測点(▲:K-NET, ■:KiK-net)の位置
※コンター図は地震基盤($V_s=3.2$ km/s)の上面深度

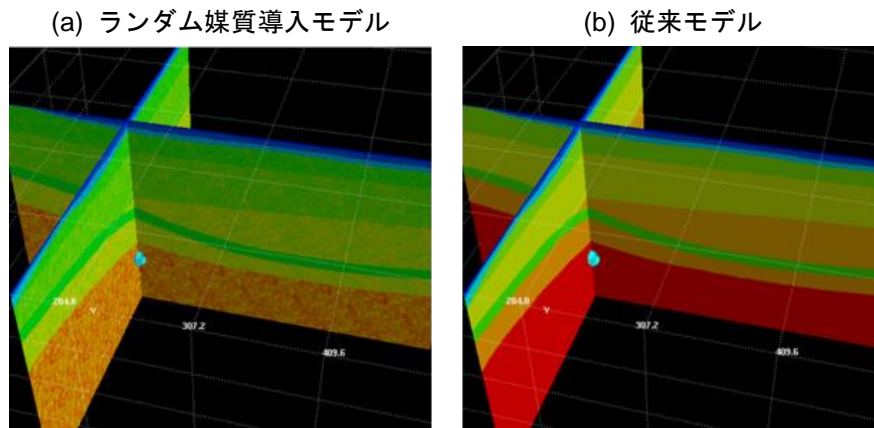


図 2 地下構造モデルの断面図(水色球:震源)

表 1 空気層の設定

ケース	厚さ (km)	密度 (g/cm ³)	S 波速度 (km/s)	P 波速度 (km/s)	Q 値 (減衰)	説明
1	1.0	2.0	0.0	1E-07	120	真空を仮定(H23 年度研究と同様の設定)
2	1.0	2.0	0.0	1E-07	10	減衰を大きく(Q 値を低く)設定
3	1.0	2.0	0.0	0.33145	10	ケース 2 の P 波速度を空気(乾燥)の音速に設定
4	0.5	2.0	0.0	1E-07	120	ケース 1 の物性値で層厚を 0.5km に薄くした場合

※地下構造モデルは従来の層内均質モデルである(ランダム媒質導入モデルではない)

結果および考察

(1) 短周期地震動の計算精度の向上および結果の工学的妥当性の検討

ランダム媒質導入モデルの結果として、図 3 に計算結果(1 ケースのみ)と観測記録の加速度波形の比較例を示す。図 3b の IBR016 観測点については、初期乱数を変えた 5 ケースのランダム媒質導入モデルの結果を比較として示す。これらの図より、ランダム性を考慮することで、地下構造モデル(媒質)の全体で地震波の散乱が起こり、観測記録に見られる初動および主要動の後に続く後続波の再現性が改善されることが分かった。ただし、図 3b(赤線)の比較のように、波形初期乱数を変えることで、ランダム媒質のランダム性が変動するため、計算結果(波形の様相)も変化することが確認された。

図 4 に、波動伝播の様子のスナップショットを示す。この図を見ると、深さ 38 km の震源から放出された地震波が地表に到達し伝播していく様子が分かる。S 波による主要動が地用に到達する付近(15 秒前後)では大局

的な伝播の様相は同様であるが、ランダム媒質導入モデルでは散乱による波面の乱れが見られ、20 数秒以降では、ランダム媒質導入モデルの方が散乱により大きな振幅の揺れが広範囲で継続している様子が分かる。このようなランダム媒質導入モデルによる後続波の再現性の向上は、より長い継続時間の波形を生成する大きな地震のシミュレーションにおいて効果的であることが示唆される。

図 5～図 7 に、ランダム媒質作成に用いる初期乱数を変えた 20 ケースの計算結果の加速度フーリエスペクトル(図 5)、加速度応答スペクトル(図 6)、擬似速度応答スペクトル(図 7)の重ね描きを示す(黒線)。これらの図には、20 ケースの平均スペクトル(ピンク色線)、従来モデルの結果(水色線)、観測スペクトル(緑色線)も比較のために示す。なお、波形データは 60 秒まで(従来のモデルで発散の影響が出ていない時間帯)でカットしたものをを用いている。

加速度フーリエスペクトルについては、高周波数帯域

になるほどランダム媒質導入モデルと従来モデルの振幅の差が大きくなる傾向があり、ランダム媒質導入モデルの方が観測記録にも調和的な結果となることが分かった。従って、本検討のランダム媒質の相関距離と速度ゆらぎの設定は妥当であったと考えられる。また、上下(UD)成分では、ランダム媒質導入モデルの結果の振幅が従来モデルの結果よりも全体的に増幅し、観測値にも調和的になる傾向がある。これは、主要動(S波)の後に来る後続波(コーダ波)について、ランダム媒質を導入することにより、震源でS波として放出された波動が伝播過程で散乱してP波(上下成分で卓越)に変換されるような現象を再現できているためと考えられる。以上より、計算結果の妥当性が確認されたが、震源距離が比較的遠い埼玉県や房総半島の観測点での計算結果については、観測記録を再現しないものも見受けられた。これは、元の三次元地下構造やランダム媒質の設定が現実とは異なっていることが原因と考えられる。

初期乱数が異なるランダム媒質導入モデルによる結果のばらつきについては、震源距離にもよるが、加速度および速度応答スペクトルのピークで平均値から1.5倍前後のばらつきを持つことが分かり、実用化の際の有用な情報が得られた。

ランダム媒質(短波長不均質)については、研究的な課題も多いため、今後、最新の知見を考慮して相関距離やゆらぎの度合いを調整する、上部地殻・下部地殻・マントルでの違いを考慮する等の改良を行っていくことで、より現実的なシミュレーションが可能になると考えられる。

(2) 安定した計算を実施するための空気層導入モデルの工学的妥当性の検討

図8に、従来モデルで計算不安定が起こる前後の時間帯での波動伝播の様子のスナップショットを示す。図8aの従来モデルの結果では、本来地震動による揺れが収まっている60秒辺りから計算領域の北西側の端で計算不安定が起こり、局所的に大振幅となっていることが分かる。一方、図8bの空気層付加モデル(ケース

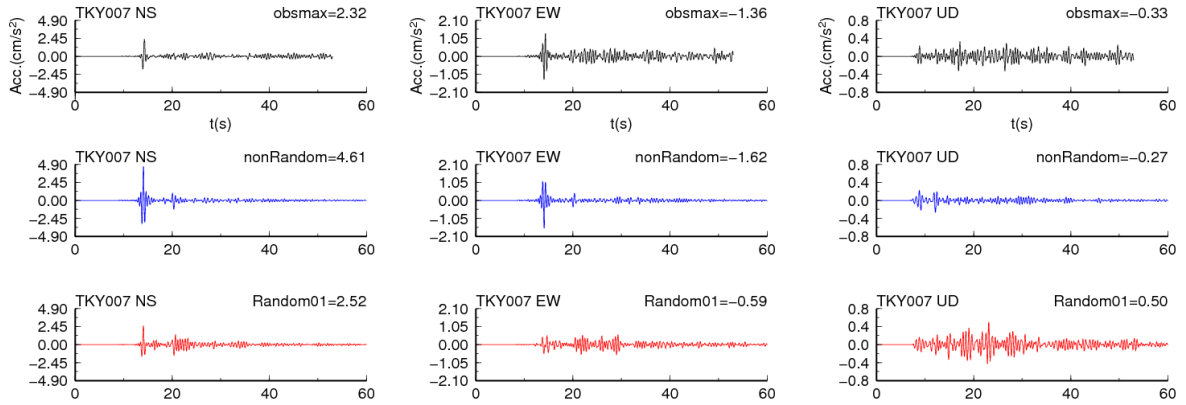
1)では60秒以降も計算不安定は発生せずに、地震動が収まっている。従って、地下構造モデルの最上層に空気層を置くことにより、計算の不安定を解消することができることを確認することができた。

続いて、空気層を置くことによる計算結果への影響を見るために、波形およびスペクトルについて従来モデルの結果との比較を行った。図9に空気層を付加したモデル(空気層の設定条件を変えた4ケース)と従来モデルの計算結果の加速度波形の比較例を示す。図10、図11、図12にはそれぞれ加速度フーリエスペクトル、加速度応答スペクトル、擬似速度応答スペクトルについて空気層付加モデルと従来モデルの計算結果の重ね描きを示す。なお、波形データは60秒まで(従来モデルで発散の影響が出ていない時間帯)でカットしたものをを用いている。これらの比較図より、空気層付加モデルの結果は従来モデルよりも多少過小評価になるものの、その違いは計算格子サイズを変化させた時の違い程度であり、ほぼ同様の結果が得られることを確認することができた。

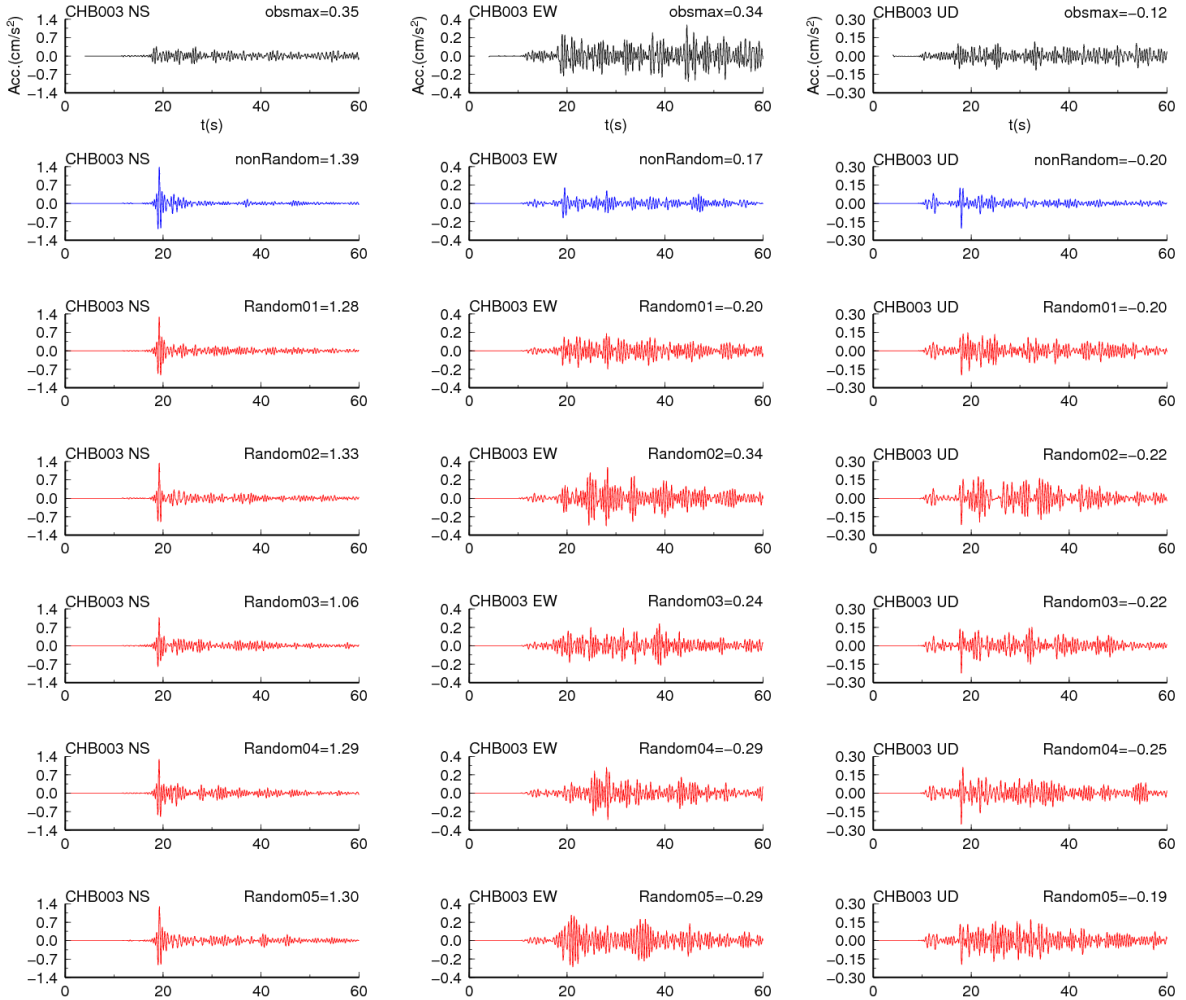
また、空気層の設定条件(物性値、層厚)を変えたケース1~4の間では、ほとんど結果に違いは見られないが、ケース1、2の結果がより従来モデルの結果に近い。従って、古村(2009)で示されているように空気層を真空と仮定し、さらに空気層の厚さを比較的厚くした(1 km程度)設定が本検討では適切と考えられる。

さらに、古村(2009)では空気層を置いた場合、格子間隔が粗い場合には表面波の波形が崩れるなどの影響があるとされているため、格子間隔を50 mから200 mに粗くした場合の結果の比較を図13に示す。この図を見ると、空気層を置いた場合の200 m格子の計算結果はやや従来モデル(50 m格子)との違いが大きくなっている。しかし、従来モデルのまま格子間隔を200 mにした場合でもやはり結果は変化しているため空気層をいたことによる影響は、50 mと200 mの格子サイズの違いではそれほど顕著ではないと考えられる。

(a) TKY007 (東京都: 新宿)



(b) CHB003 (千葉県: 白井)



— : 観測記録, — : 従来モデル, — : ランダム媒質導入モデル

図 3 観測記録と計算結果(従来モデルおよびランダム媒質導入モデル)の加速度波形の比較

K-NET 観測点 (a) TKY007(東京都: 新宿), (b) CHB003(千葉県: 白井)

※ $f \leq 2$ Hz のローパスフィルター処理

※IBR016 観測点については乱数を変えたランダム媒質導入モデルの結果(5 ケース)の比較を示す

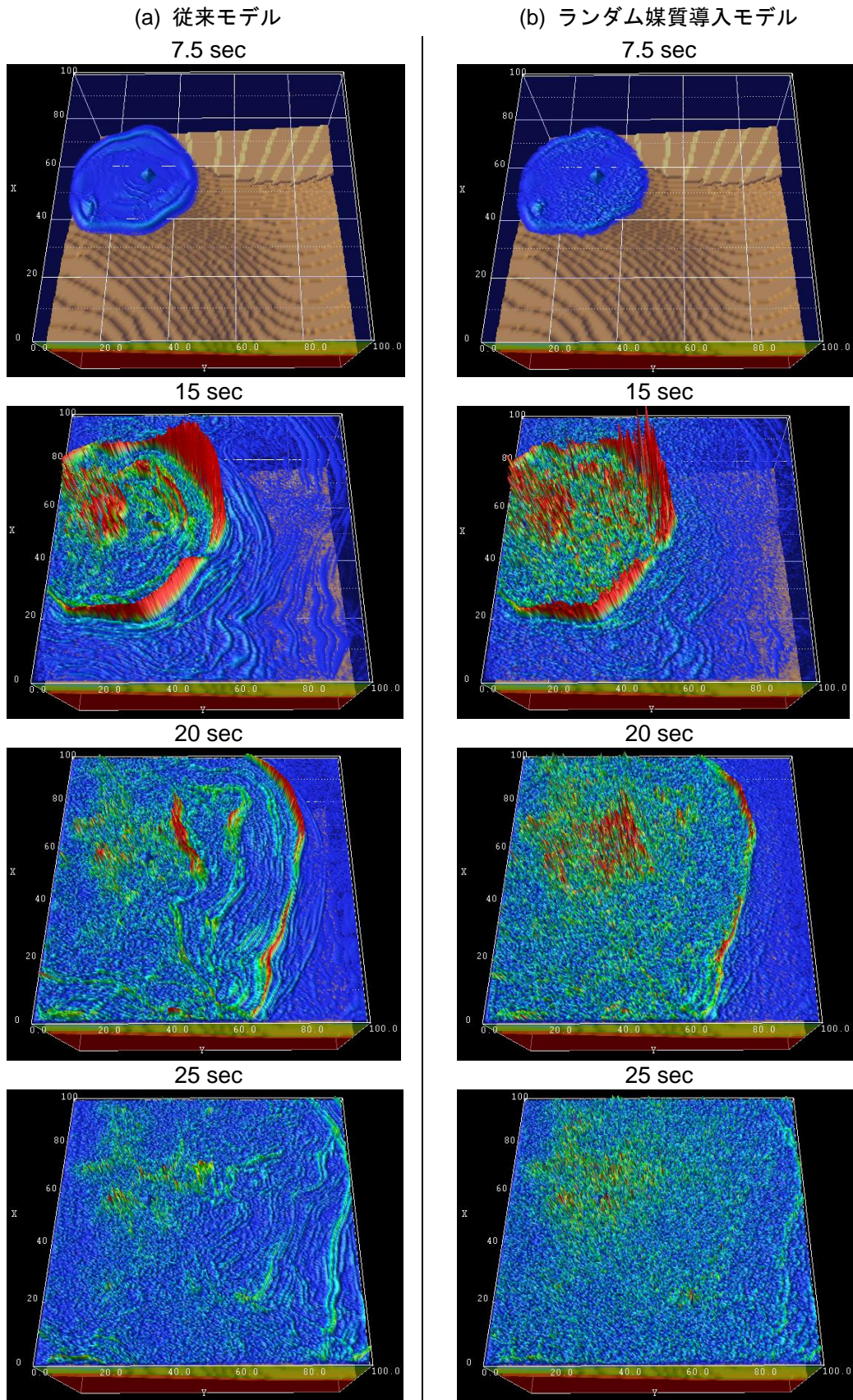
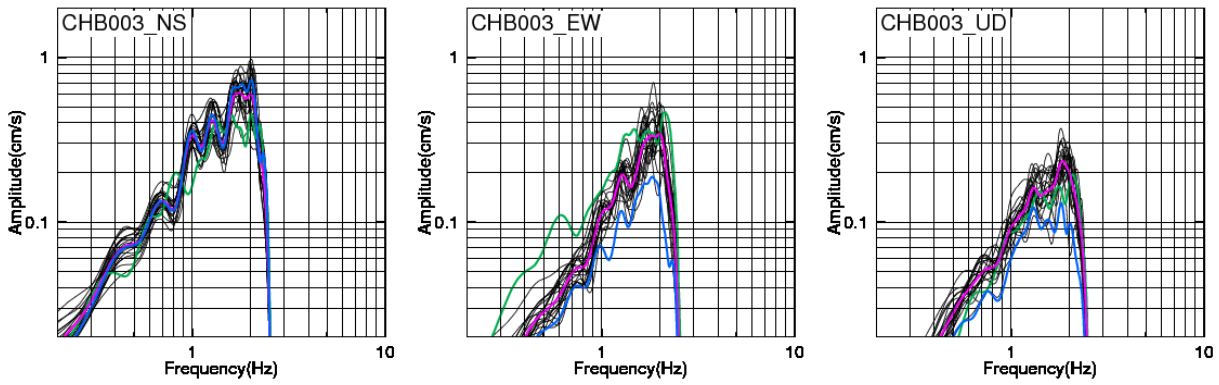


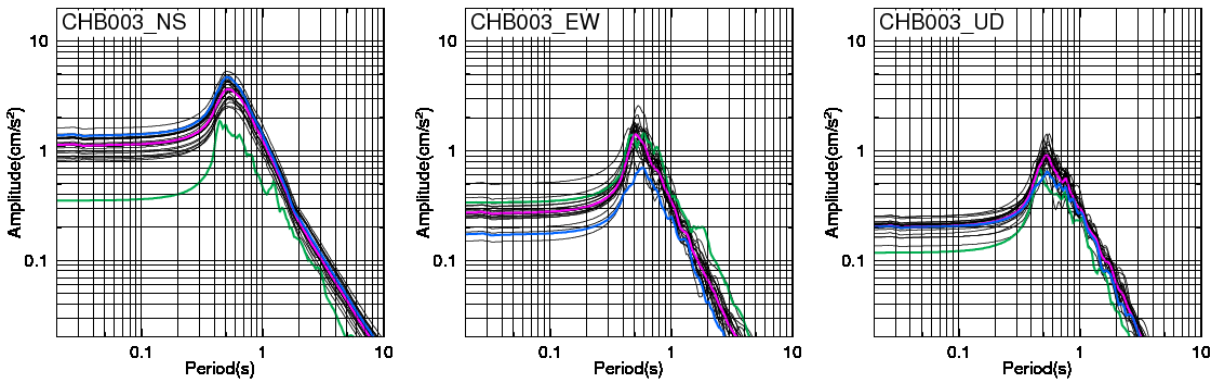
図 4 波動伝播の様子(従来モデルおよびランダム媒質導入モデルの比較)

※青丸は震央位置



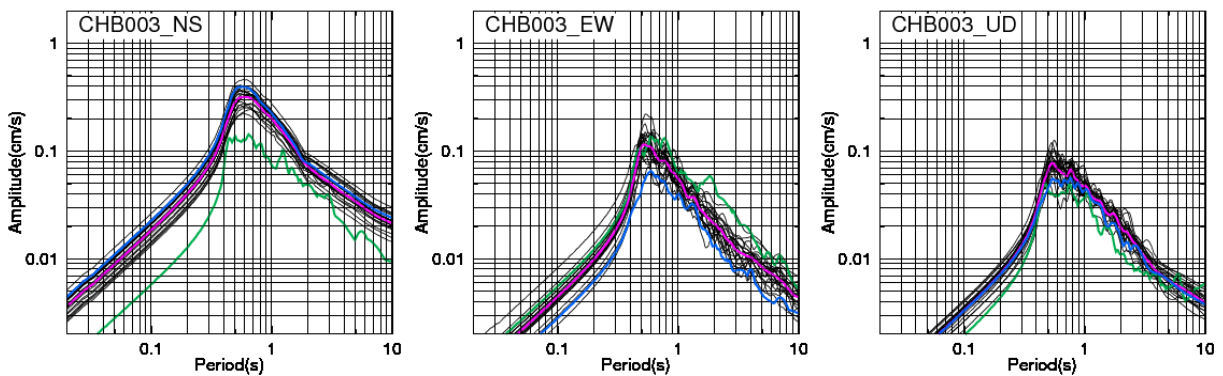
— : 乱数を変えたランダム媒質導入モデル (20 ケース),
— : 20 ケースの平均, — : 従来モデル, — : 観測記録

図 5 乱数を変えたランダム媒質導入モデル(20 ケース)、従来モデルの計算結果、観測記録の
加速度フーリエスペクトルの比較例(CHB003 観測点, $f \leq 2$ Hz のローパスフィルター処理)



— : 乱数を変えたランダム媒質導入モデル (20 ケース),
— : 20 ケースの平均, — : 従来モデル, — : 観測記録

図 6 乱数を変えたランダム媒質導入モデル(20 ケース)、従来モデルの計算結果、観測記録の
加速度応答スペクトルの比較例(CHB003 観測点, $f \leq 2$ Hz のローパスフィルター処理)



— : 乱数を変えたランダム媒質導入モデル (20 ケース),
— : 20 ケースの平均, — : 従来モデル, — : 観測記録

図 7 乱数を変えたランダム媒質導入モデル(20 ケース)、従来モデルの計算結果、観測記録の
擬似速度応答スペクトルの比較例(CHB003 観測点, $f \leq 2$ Hz のローパスフィルター処理)

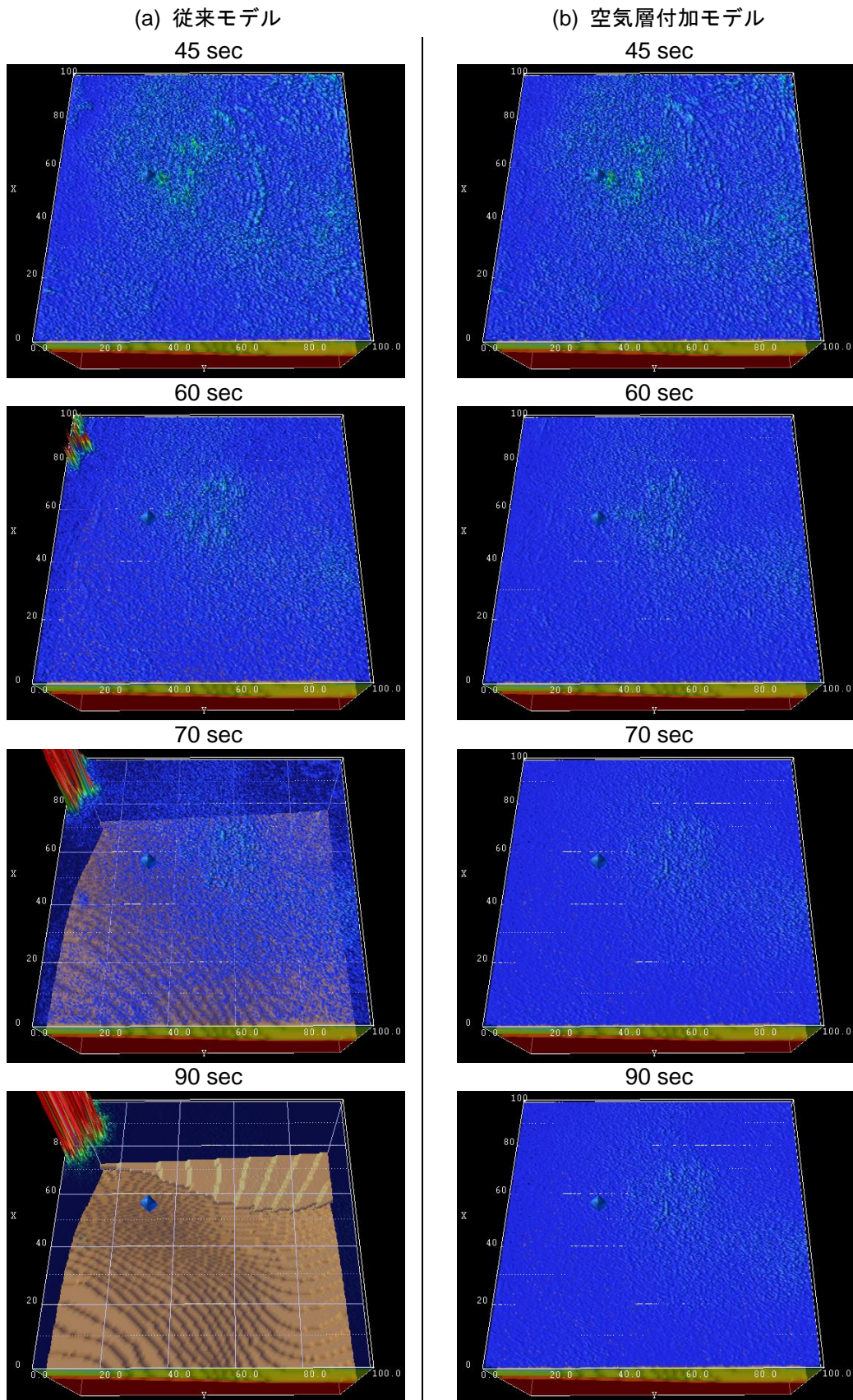
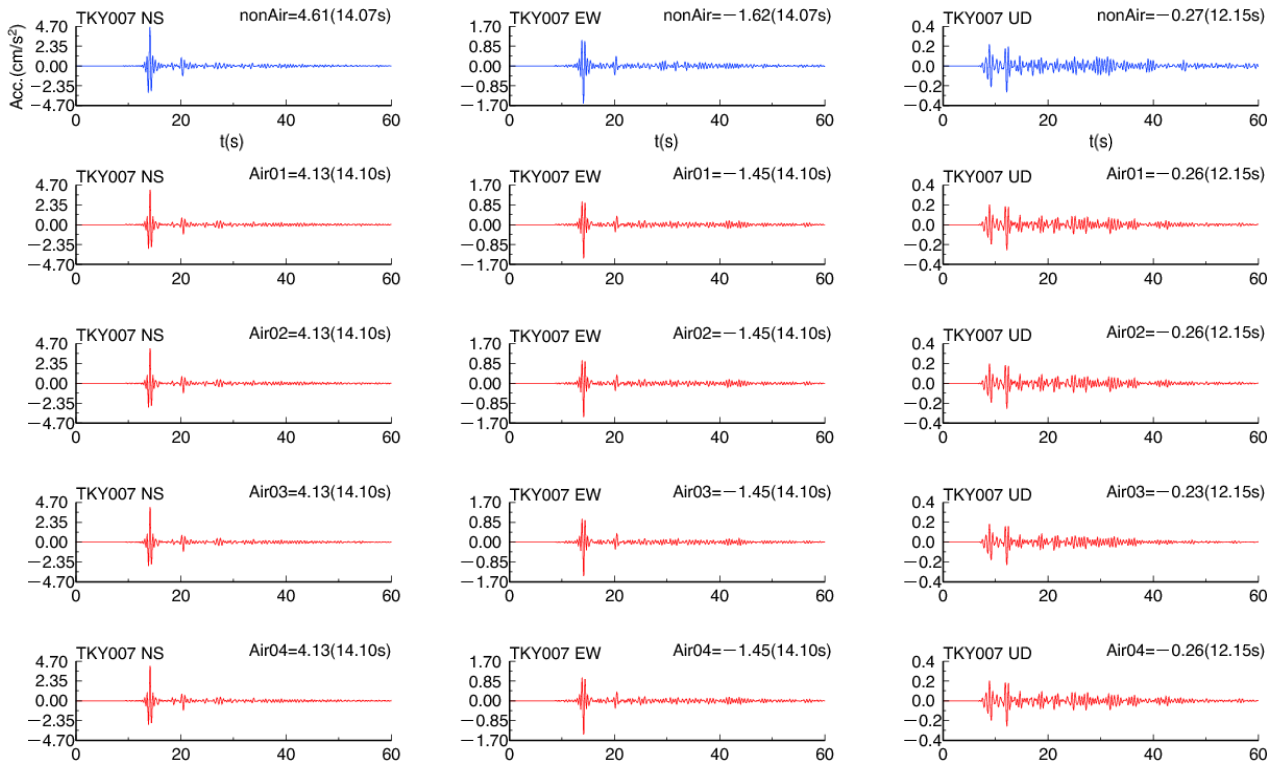


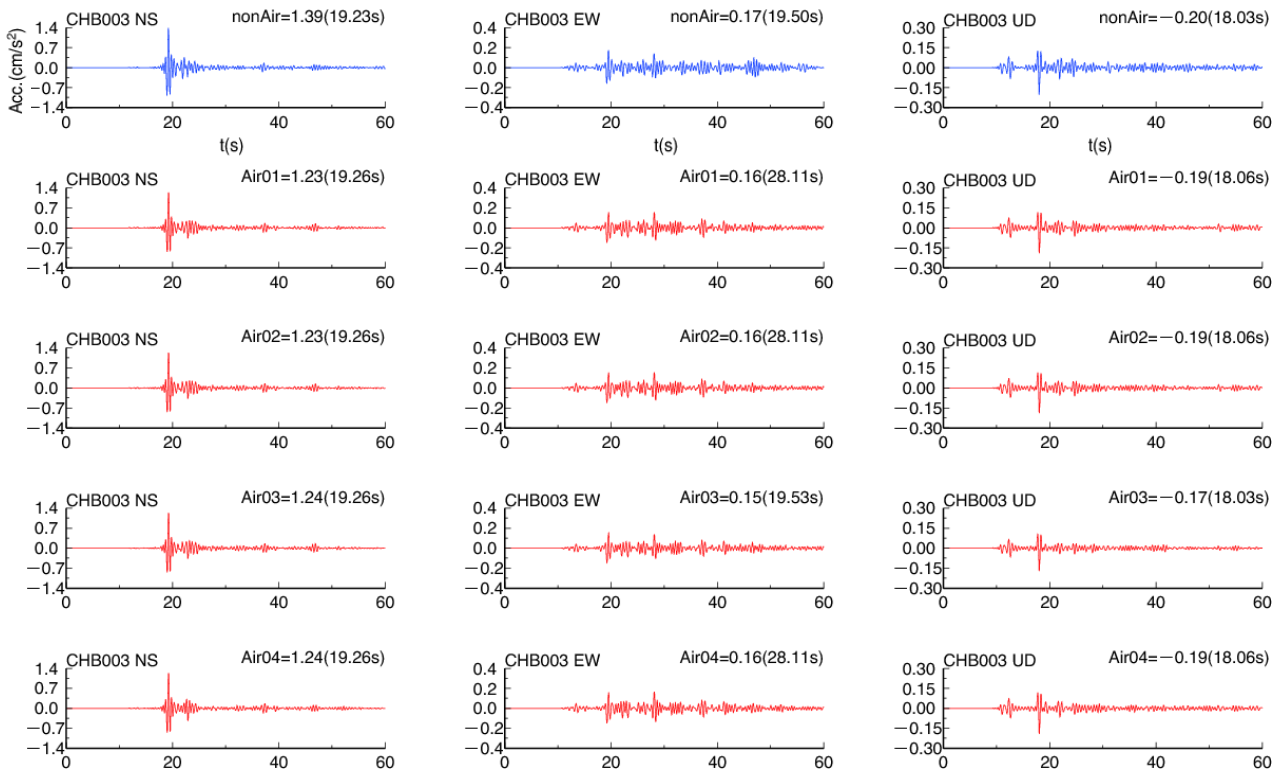
図 8 波動伝播の様子(a:従来モデルおよび b:空気層付加モデルのケース 1 の比較)

※青丸は震央位置、※(a)は図 4 の続き

(a) TKY007 (東京都:新宿)



(b) CHB003 (千葉県:白井)

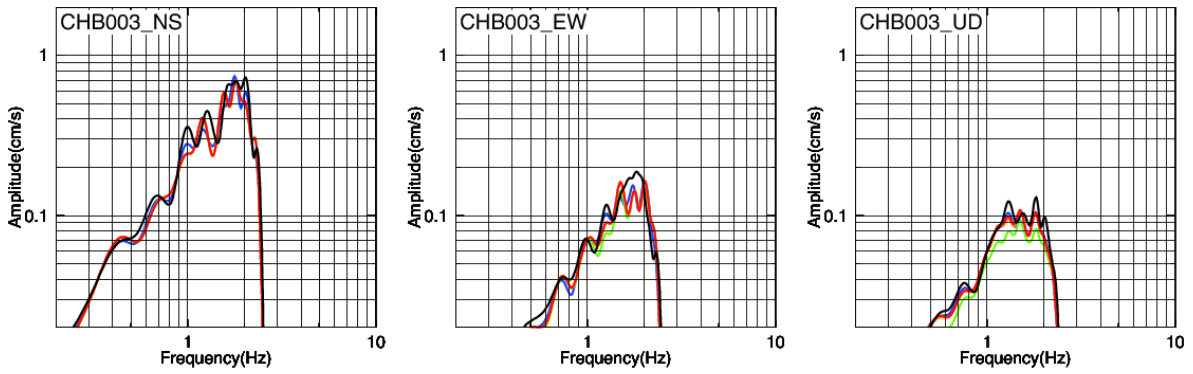


— : 観測記録, — : 従来モデル, — : ランダム媒質導入モデル(上からケース 1~4)

図 9 従来モデルおよび空気層付加モデルの計算結果(加速度波形)の比較

K-NET 観測点 (a) TKY007(東京都:新宿), (b) CHB003(千葉県:白井)

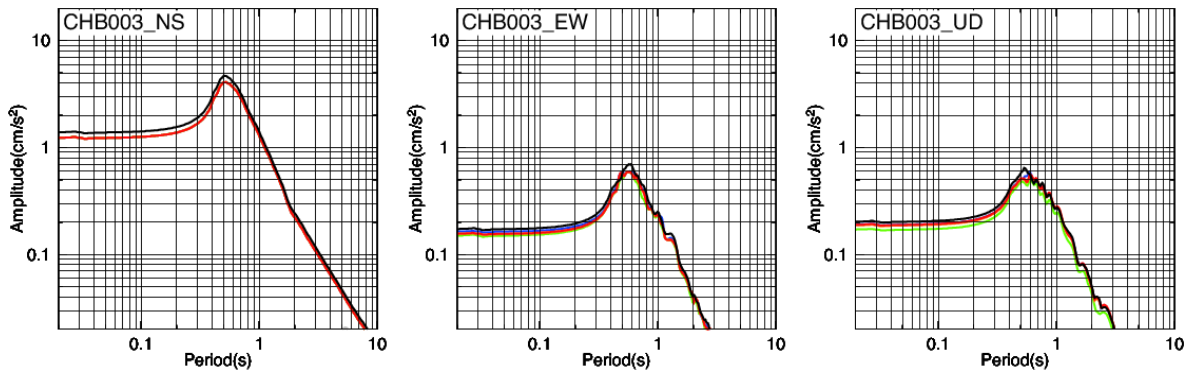
※地下構造モデルの格子サイズ=50m、 $f \leq 2$ Hz のローパスフィルター処理



黒線：従来モデル

色線：空気層付加モデル（—：ケース 1，—：ケース 2，—：ケース 3，—：ケース 4）

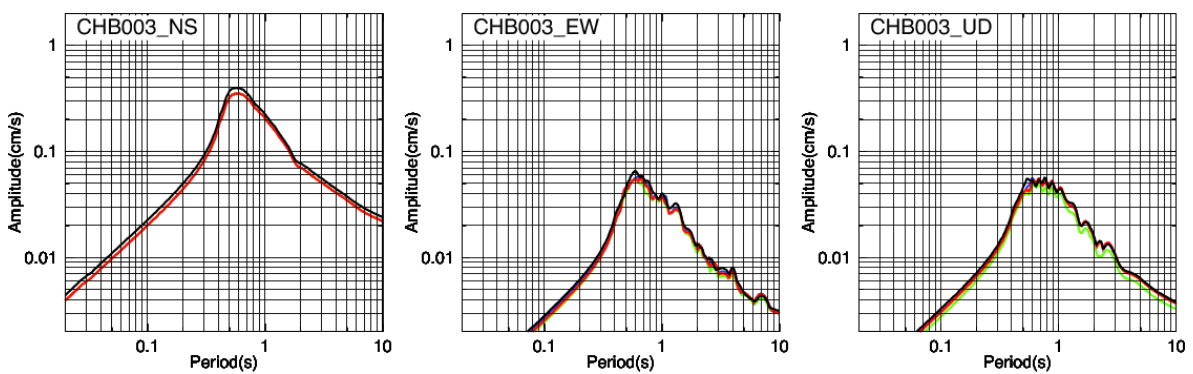
図 10 空気層付加モデルの各ケースおよび従来モデルの計算結果の加速度フーリエスペクトルの比較例(CHB003 観測点, $f \leq 2$ Hz のローパスフィルター処理)



黒線：従来モデル

色線：空気層付加モデル（—：ケース 1，—：ケース 2，—：ケース 3，—：ケース 4）

図 11 空気層付加モデルの各ケースおよび従来モデルの計算結果の加速度応答スペクトルの比較例(CHB003 観測点, $f \leq 2$ Hz のローパスフィルター処理)



黒線：従来モデル

色線：空気層付加モデル（—：ケース 1，—：ケース 2，—：ケース 3，—：ケース 4）

図 12 空気層付加モデルの各ケースおよび従来モデルの計算結果の擬似速度応答スペクトルの比較例(CHB003 観測点, $f \leq 2$ Hz のローパスフィルター処理)



(地下構造モデルの格子サイズ: 1・2 段目=50m, 3・4 段目=200m)

図 13 地下構造モデルの格子サイズを変化させた場合の従来モデルおよび空気層付加モデルの計算結果(加速度波形)の比較

K-NET 観測点 (a) TKY007(東京都:新宿), (b) CHB003(千葉県:白井)

※ $f \leq 0.5$ Hz のローパスフィルター処理(200m 格子での計算可能周波数に合わせている)

まとめ、今後の課題

大規模平野における 1 Hz 以上の短周期地震動の計算精度の向上を目的に、観測記録が豊富な関東地域で起こった中規模地震を対象に、従来の三次元地下構造モデルの層境界内の物性値にゆらぎを与えたランダム媒質導入モデルを用いた計算 (2 Hz まで) を実施した。その結果を観測記録と比較することにより、ランダム媒質導入モデルでは、特に後続波の再現性が向上することが分かった。波形の継続時間がより長くなる大地震のシミュレーションにおいても有効な手段となる可能性が示唆された。また、ランダム媒質作成に用いる初期乱数を変えた検討から、結果のばらつきについて検討し加速度および速度応答スペクトルのピークで平均値から 1.5 倍前後のばらつきを持つことを把握することができ、実用化に向けた有用な情報が得られた。ランダム媒質 (短波長不均質) については、学術的にも研究段階の部分が多いため、ランダム性の組み込み方などについては最新の知見に基づいて今後も改良を行っていく必要があると考えられる。

また、計算の安定性向上のために、同様の地震および地下構造モデル (ランダム媒質無し) の最上部に空気層を置いた場合の計算を実施し、地下構造の表層で起こっていた計算不安定が解消されることを確認した。さらに、空気層の設定を変えた複数ケースの計算を行うことにより適切な設定値および結果の妥当性を検証することができた。

以上より、三次元の広帯域地震動シミュレーションの高度化および工学的妥当性の確認を行うことができ、今後の実用化にとって有意義な情報が得られた。

参考文献

1) 古村孝志, 齊藤竜彦(2006): 構造不均質により生

まれる地震波伝播の異方性, 平成 18 年度東京大学地震研究所研究集会発表資料,

<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/viewdoc/scat2006/14-Furumura.pdf>.

- 2) 古村孝志: 地震波伝播と強震動の大規模並列 FDM シミュレーション, 東京大学情報基盤センター スーパーコンピューティングニュース, 11, 1-29.
- 3) Kennett, B.L.N, and T. Furumura (2007), Stochastic waveguide in the lithosphere: Indonesian subduction zone to Australian Craton, *Geophys. J. Int.*, 172, 363-382.
- 4) 武村俊介, 古村孝志, 前田拓人(2011): リソスフェア内の不均質構造と表層地形が地震波動場におよぼす影響 - 高密度地震記録とシミュレーションの比較による検討 -, 平成 23 年度東京大学地震研究所研究集会発表資料, [http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/viewdoc/scat2011/25Takemura et al2011.pdf](http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/viewdoc/scat2011/25Takemura_et_al2011.pdf).
- 5) 田島礼子, 西條裕介, 正月俊行, 司宏俊, 廣川雄一 (2012a): 3 次元差分法による関東平野での広帯域地震動シミュレーションの検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 147-148.
- 6) 田島礼子, 西條裕介, 正月俊行, 司宏俊, 廣川雄一 (2012b): 平野における高周波数帯域まで適用できる強震動評価技術の開発, 平成 23 年度先端研究施設共用推進事業「地球シミュレータ産業戦略プログラム」利用成果報告書, http://www.jamstec.go.jp/es/jp/project/sangyou_report/H23_KKE_jp.pdf.
- 7) 地震調査研究推進本部, 長周期地震動予測地図 2012年試作版, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/12_choshuki/.