

## 地震動シミュレーションによる長周期地震動の振幅と卓越周期についての考察：関東堆積盆地を対象とした検討

### A study on the characteristics of amplitude and dominant period of long-period ground motions via 3D finite-difference simulation: A case study for the Kanto sedimentary basin

\*吉本 和生<sup>1</sup>、鍛治川 謙吾<sup>1</sup>、和泉 綾華<sup>1</sup>、島津 香織<sup>1</sup>、武村 俊介<sup>2</sup>

\*Kazuo Yoshimoto<sup>1</sup>, Kengo Kajikawa<sup>1</sup>, Ayaka Izumi<sup>1</sup>, Kaori Shimazu<sup>1</sup>, Shunsuke Takemura<sup>2</sup>

1. 横浜市立大学大学院生命ナノシステム科学研究科、2. 国立研究開発法人防災科学技術研究所

1. Graduate School of Nanobioscience, Yokohama City University, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

#### はじめに

関東堆積盆地では周期数秒以上の長周期地震動が頻繁に観測され、その卓越周期は観測地点の地震基盤深度と関係があることが指摘されている（例えば、Yoshimoto and Takemura, 2014b）。より詳細な解析からは、複雑な地震基盤構造の影響で震央方位による長周期地震動の励起の大きさに差異（震央方位依存性）が現れることや東京湾周辺の地域での長周期地震動の卓越周期の長周期化などが報告されている（例えば、湯沢・南雲, 2012; 鍛治川・他, 2016 SSJ）。しかしながら、このような長周期地震動の励起と発達の素過程についての理解は必ずしも十分には進んでいない。

そこで本研究では、関東堆積盆地における長周期地震動の励起と発達の素過程の把握を目的として、単純化した堆積層－地震基盤系の地震波速度構造モデルを使用して、堆積層の地震波速度構造と地震基盤の形状が長周期地震動の振幅と卓越周期に与える影響について詳しく調べた。また、大規模な実地震動シミュレーションを実施し、既往の関東堆積盆地の地震波速度構造モデルの問題点を明らかにするとともに、今後の研究の課題について検討した。

#### 長周期地震動シミュレーション

浅発の中規模地震による長周期地震動の発生を模擬した3次元差分法地震動シミュレーションを実施した。解析対象とする長周期地震動の周期を4秒以上とし、堆積層－地震基盤系構造と震源を含む150×60×72 km<sup>3</sup>の領域を計算対象として、この領域を0.15 km間隔で離散化した。堆積層の地震波速度構造モデルには、中深層観測井におけるVSP検測結果（Yoshimoto and Takemura, 2014a）を基にした横浜モデル（Yモデル）、千葉モデル（Cモデル）、岩槻モデル（Iモデル）を使用した。地震基盤の形状は、簡単のため、水平な形状（深度3.5km）とその一部が盛り上がった形状（3種類）を仮定した。地震基盤以深はJIVSM（Koketsu et al., 2012）を模擬した水平成層構造とした。震源には、横ずれ断層型と逆断層型の点震源モデルを採用し、それぞれLove波とRayleigh波の励起源とした。地震動シミュレーションは、小規模なワークステーション（2 Intel Xeon E5-2640V3, 16 cores）で行った。

#### 長周期地震動シミュレーションの結果

##### (1) Love波とRayleigh波の特徴

横ずれ断層型の震源モデルを用いた地震動シミュレーションでは単峰性のLove波エンベロープが見られたのに対して、逆断層型の震源モデルを用いた場合には分散性の強いRayleigh波エンベロープが見られた。これはLove波では基本モードが卓越するのに対して、Rayleigh波では基本モードだけではなく高次モードも発達するためであると解釈された。Rayleigh波の水平動成分と上下動成分の最大地動速度振幅（PGV）を比較したところ、水平動成分の方が大きなPGVを示す傾向が見られた。この特徴は、高次モードの振幅が優勢に発現したためと解釈される。

## (2)地震基盤形状とPGV

地震基盤の盛り上がりの大きなモデルほど大きなPGVを示す傾向が見られた。この傾向は、堆積層浅部で励起された比較的短周期のLove波によるAiry相の強化によって発生するものと解釈された。この結果は、関東堆積盆地の北部および西部で観測される単峰性のエンベロープをもった大振幅の長周期地震動が、堆積盆地端部でのLove波の強い励起によって引き起こされる事例を説明する。

## (3)長周期地震動の局所的な増幅

一定速度の堆積層からより低速度の堆積層に表面波が伝播することにより、長周期地震動の振幅が増幅することが確認された。例えば、YモデルからCモデルにLove波が伝播する場合には、フーリエスペクトルのうち周期5秒以上でスペクトル振幅が増幅し、特に周期10秒程度で東京湾周辺の地域で観測されたような大きな増幅が見られた。

上記の地震動シミュレーションで確認された長周期地震動の特徴は、JIVSMやSBVSM（増田・他、2016 SSJ）を用いた大規模な実地震動シミュレーションにおいても共通して見られる。しかしながら、これらの地震波速度構造モデルには、観測波形の再現性において東京湾周辺や関東平野西縁などの地域で改善の余地が残されている。今後の研究では、大規模な地震動シミュレーションによる逆解析（例えば、Iwaki and Iwata, 2011）を基本としながらも、本研究のようなフォワードモデリングによる表面波の励起と伝播の素過程の把握、さらに小規模地震動シミュレーションに局所的な実構造モデルを取り入れた逆解析などにより、総合的に関東堆積盆地の地震波速度構造モデルを高度化する必要があるものと考えられる。

キーワード：長周期地震動、関東堆積盆地、堆積層構造、表面波、最大振幅、卓越周期

Keywords: Long-period ground motion, Kanto sedimentary basin, Sedimentary structure, Surface wave, Maximum amplitude, Predominant period

# 大規模粘弾性有限要素解析を用いた準静的な地震サイクルシミュレーション手法の開発

## Quasi-static earthquake cycle simulation based on large-scale viscoelastic finite element analyses

\*縣 亮一郎<sup>1</sup>、市村 強<sup>2</sup>、兵藤 守<sup>1</sup>、Barbot Sylvain<sup>3</sup>、堀 高峰<sup>1</sup>

\*Ryoichiro Agata<sup>1</sup>, Ichimura Tsuyoshi<sup>2</sup>, Mamoru Hyodo<sup>1</sup>, Sylvain Barbot<sup>3</sup>, Takane Hori<sup>1</sup>

1. 海洋研究開発機構、2. 東京大学地震研究所、3. 南洋理工大学

1. JAMSTEC, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Nanyang Technological University

地震サイクルシミュレーションは、固体地球分野で地震発生過程を説明するために研究されているほか、地震発生シナリオを抽出して地震被害予測に役立てるなど、地震工学的側面においても重要な役割が期待される。シミュレーション手法として、地殻変動計算に半無限媒質でのグリーン関数を用いた境界要素法的なアプローチと、断層面上の速度・状態依存摩擦則を組み合わせた方法(e.g. Hori 2009; Barbot et al. 2012)がよく研究され、広く用いられている。一方、地殻変動計算においては、三次元的に複雑かつ不均質な地殻構造の影響や、マントルレオロジーや重力など非線形な物理からの影響が無視できない場合があると考えられる。これらを考慮するためには、有限要素法などの数値解析手法を用いた地殻変動計算と速度・状態依存摩擦則を組み合わせたサイクルシミュレーション手法を構築することが望ましい。このようなアプローチは従来計算コストの問題で実現が難しかったが、近年のスーパーコンピュータに適した高速有限要素ソルバー開発(Ichimura et al. 2016)などで解決可能と考えられる。そこで本研究ではIchimura et al. (2016)で開発された粘弾性有限要素解析による地殻変動計算手法を、速度・状態依存摩擦則に基づいた地震サイクルシミュレーションに適用する。

地震サイクルシミュレーションの支配方程式は、運動方程式、速度・状態依存摩擦構成則、状態変数の時間発展則の式からなる。ただし、従来は応力変化の計算にすべり応答関数の重ねあわせを用いていた部分を、有限要素法による粘弾性変形の時刻歴応答計算に置き換える。時間積分やその他の手法についてはすべてHyodo and Hori (2014)と同じものを用いる。

現在、正方形断層面の中央部に円形のすべり弱領域を配置した規範的な三次元問題(Noda and Hori, 2014)により、開発したコードの動作確認等を行っている。発表当日には、弾性変形のみを考慮したシミュレーションにより、既往手法における結果との比較を示す。また可能であれば、マントルレオロジーの例として粘弾性変形を考慮した場合の地震発生過程の変化についても考察する。

キーワード：地震サイクルシミュレーション、有限要素法、速度・状態依存摩擦則、大規模数値シミュレーション

Keywords: Earthquake cycle simulation, Finite element method, the rate- and state-dependent friction law, large-scale numerical simulation

# 南海トラフ地震震源域内で中～大規模地震が発生した後の推移の フォワードシミュレーションと対応する地殻変動

## Forward simulation of postseismic process after moderate and large interplate earthquakes along the Nankai Trough

\*兵藤 守<sup>1</sup>、縣 亮一郎<sup>3</sup>、市村 強<sup>2</sup>、堀 高峰<sup>1</sup>

\*Mamoru Hyodo<sup>1</sup>, Ryoichiro Agata<sup>3</sup>, Ichimura Tsuyoshi<sup>2</sup>, Takane Hori<sup>1</sup>

1. 海洋研究開発機構 地震津波海域観測研究開発センター、2. 東京大学 地震研究所、3. 東京大学大学院工学研究科  
1. Earthquake and Tsunami Forecasting System Research Group R&D Center for Earthquake and Tsunami, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. School of Engineering, The University of Tokyo

従来の描像からは南海トラフでは、地震間における地震活動は低調で、蓄積した歪は、M8クラスの巨大地震によってのみ間欠的に解消されると考えられていた。しかし、2016年4月1日に南海トラフ地震の想定震源域内で且つ1944年の東南海地震震源近傍の熊野灘においてM6クラスの地震が発生している。また、最近の研究成果によると、宝永地震のような過去の超巨大イベントでは日向灘にまで南海トラフ地震の震源域が拡大していたことが示唆されており、過去においては南海トラフ地震の震源域内でM7クラスの地震(例えば1498年日向灘地震)も発生していたことになる。

巨大地震の震源域内で中～大規模地震が発生した後の挙動としては、上で述べた2016年の南海トラフにおける熊野灘の地震のようにそのまま収束する場合もあれば、東北地方太平洋沖地震の前震(2011年3月9日)のように、その後に引き続いて巨大地震に至ることもある。このように中～大規模地震後に多様な変動が起こり得るのは、震源域の巨大地震への切迫度に応じて中～大規模地震後の余効すべりの起こり具合が変化するためである。つまり、M6-7地震の地震が巨大地震の想定震源域内で発生した際には、引き続いて地表・海底で観測される地殻変動の推移を適切に捉えることにより、余効すべりの進展パターンや、その後引き続いて発生しうるシナリオを絞り込むことができる可能性がある。

本講演では、南海トラフを対象に、これまでに蓄積されている様々な地震サイクルシミュレーション結果に対し、日向灘でのM7地震や熊野灘でのM6地震を様々なタイミングで発生させることによって、余効すべりの進展パターンと巨大地震との切迫度の関係をまずは調べる。次に余効すべりの進展パターンによって、既存地殻変動観測網でどういった地殻変動が期待されるかを整理し、既存の地殻変動観測から余効すべりの進展パターンが区別できるのかの検討や、より進展パターンを識別しやすくするために必要な観測量・観測点配置の検討を実施する。なお、余効すべりから期待される地殻変動の評価には、半無限弾性モデルのみならず、高詳細な地殻構造や地表形状を考慮した有限要素モデルを用いた地殻変動のフォワードシミュレーション(例えば Agata et al., 2015, Ichimura et al., 2016) を通しても実施し、より現実的な条件で期待される地殻変動を見積もる。

キーワード：南海トラフ地震、地殻変動、巨大地震の切迫度

Keywords: Nankai Trough earthquake, crustal deformation, urgency of the great earthquake

## Challenge of Preparing for Careers in Big Data in Geosciences

Larry Zheng<sup>1</sup>, \*Gabriele Morra<sup>2,1</sup>, David A. Yuen<sup>3,1</sup>, Davin Loegering<sup>1</sup>, Henry Tufo<sup>4,1</sup>, Chuck Li<sup>5,1</sup>

1. Mc Data , Wuhan, 2. Department of Physics, University of Louisiana at Lafayette, LA, 3. Department of Earth Sciences, University of Minnesota, Minneapolis, MN , 4. Department of Computer Science, University of Colorado, Boulder, CO, 5. Wuhan Huawei Technology Co., Ltd

In the aftermath of the 2008 financial crisis we have seen the steady encroachment of Big Data into every facets of society, from finances to medical services. Students graduate lacking technological skills despite needing them in the lab and on the field. We believe that putting a stronger emphasis on programming and technology will prepare them for the demands of today' s modern job market in the geosciences and to use better measurement and analysis technology.

Our curriculum in educating students needs some changes, but universities move too slow. Therefore training centers are sorely needed. For this reason, we have established Mc Data Consult Ltd., based now in Wuhan, but poised to move anywhere.

Our aims are four fold:

- (1) To establish training courses at both fundamental and advanced levels, which will be taught with customized software embedded within a affordable data-analytic tool box built with (a) cheap processors such as Raspberries Pi and (b) higher-end Nvidia TX1. Students can learn and perform exercises according to their available time slots.
- (2) To provide professional consulting for various Big Data challenges encountered in industries.
- (3) To hold workshops and international conferences where we can mix people from various disciplines and engage them in Big Data immersion.
- (4) We also see the need to prepare suitable textbooks , focusing on high-performance computing, visualization and data analytics. We maintain that Python holds the key for preparing the students in Big Data analytics.

To be sure, the big data problem is not a new paradigm for geoscience. For instance, Peter Shearer (1991) used a relatively simple 1-dimensional velocity model to stack thousands of long-period body waves, revealing two upper mantle discontinuities, which was the first successful "big data" application: the primary computing happens for data processing, not for artificial modeling. Thus, we believe that geoscientists can be prepared to adapt to the big data era once they master the modern tools: they should master an open programming language suitable for large data, such as Python, and know how to harness parallel and distributed systems. They should learn sound software engineering skills, just as a wet chemist needs to learn to wash glassware. They should learn to produce a reproducible work: all analyses should be scripted and point-and-click tools should be avoided. They should have skills in data visualization and should master the rudiments of nonparametric, computationally based statistical inference, such as permutation tests.

Keywords: Big Data, Machine Learning, High Performance Computing, Python, Education