

Mon. Sep 16, 2019

ROOM A

Room A | General session | S15. Strong Ground Motion and Earthquake Disaster

[S15]AM-1

chairperson: Sayumi Yoshida (HANSHIN CONSULTANTS Co., Ltd.),
Ritsuko Matsu'ura (Association for the Development of
Earthquake Prediction)

9:30 AM - 10:30 AM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

[S15-01] Investigation to estimate high-frequency limit of
Empirical Green's tensor derivatives (EGTD)
using aftershocks

*SAYUMI YOSHIDA¹, MASANORI HORIKE¹ (1.
HANSHIN CONSULTANTS Co., Ltd.)

9:30 AM - 9:45 AM

[S15-02] 3D Complete Nonlinear Methods for Soil-
Building Interaction Based on an Input Wavefield

*Masahiro Iida¹ (1. University of Tokyo, Earthquake
Research Institute)

9:45 AM - 10:00 AM

[S15-03] Evaluation of seismic motion on a subsurface
level from the ground motion at a free surface
position without plane-wave incidence
assumption

*Hiroshi Takenaka¹, Masanao Komatsu¹, Tomotsugu
Watanabe¹, Mitsutaka Oshima², Takeshi Nakamura³
(1. Department of Earth Sciences, Okayama
University, 2. Shimizu Corporation, 3. National
Research Institute for Earth Science and Disaster
Resilience)

10:00 AM - 10:15 AM

[S15-04] Estimation of the maximum seismic intensity of
each 250m-mesh in Japan for 1585-2018

*Ritsuko S. Matsu'ura¹, Takeo Ishibe¹, Koji Iwasa¹,
Mitsuko Furumura¹ (1. Association for the
Development of Earthquake Prediction)

10:15 AM - 10:30 AM

Room A | General session | S15. Strong Ground Motion and Earthquake Disaster

[S15]AM-2

chairperson: Hongjun Si (Seismological Research Institute Inc.),
Yusuke Tomozawa (KOBORI RESEARCH COMPLEX INC.)

10:45 AM - 12:00 PM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

[S15-05] On the large peak ground motion observed
during the 2018 M6.6 Eastern Iwate, Hokkaido,
Earthquake

*Hongjun Si¹, Mitsuko Furumura², Ritsuko S.

Matsu'ura² (1. Seismological Research Institute Inc.,
2. Association for the Development of Earthquake
Prediction)

10:45 AM - 11:00 AM

[S15-06] A broadband source model of the 2018
Hokkaido Eastern Iwate earthquake

*Kaori Nagai¹, Kimiyuki Asano¹, Tomotaka Iwata¹ (1.
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto
University)

11:00 AM - 11:15 AM

[S15-07] Estimation of Inhomogeneous Attenuation
Structure, Source and Site Effects of the Western
Hokkaido Based on Block Inversion Analysis

*Yusuke Tomozawa¹, Kenichi Kato¹, Kiichiro Nojiri²
(1. Kobori Research Complex, 2. Hokkaido Electric
Power Company)

11:15 AM - 11:30 AM

[S15-08] Attenuation Curves of Bedrock Motions due to
Crustal Earthquakes in Japan and their Near
Source Characteristics

*Tomonori Ikeura¹ (1. Kajima Technical Research
Institute, Kajima Corporation)

11:30 AM - 11:45 AM

[S15-09] Dynamic rupture simulation for moderate-sized
strike-slip fault considering spatial
heterogeneities on various initial conditions

*Hiroshi Kawase Kawase¹, Jikai Sun², Arben Pitarka³,
Fumiaki Nagashima¹, Eri Ito¹ (1. DPRI, Kyoto
University, 2. Grad. School of Eng., Kyoto University, 3.
Lawrence Livermore National Laboratory)

11:45 AM - 12:00 PM

Room A | General session | S15. Strong Ground Motion and Earthquake Disaster

[S15]PM-2

chairperson: Hiroe Miyake (The University of Tokyo), Yosuke
Nagasaka (Port and Airport Research Institute)

2:45 PM - 3:45 PM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

[S15-10] Recipe for Predicting Strong Ground Motion on
the SCEC Broadband Platform

*Hiroe Miyake¹, Asako Iwaki², Nobuyuki Morikawa²,
Takahiro Maeda², Hiroyuki Fujiwara² (1. The
University of Tokyo, 2. National Research Institute for
Earth Science and Disaster Resilience)

2:45 PM - 3:00 PM

[S15-11] **Moment– Area Scaling Assuming Constant Stress**

Drop from Small to Great Crustal Earthquakes

*Kazuhito Hikima¹, Akihiro Shimmura¹ (1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.)

3:00 PM - 3:15 PM

[S15-12] Source Model of the 2008 Northern Iwate

Intraslab Earthquake using Ground Motion Records in Wide Area

*Shuji Kumagai¹, Shinya Tanaka², Kensuke Arai³ (1. Tohoku Electric Power Co.,Inc., 2. TOKYO ELECTRIC POWER SERVICES CO.,LTD., 3. SHIMIZU CORPORATION)

3:15 PM - 3:30 PM

[S15-13] Pseudo point-source model with variable corner frequency: application to the Miyagi-Oki earthquake of 26 May, 2003

*Yosuke Nagasaka¹, Atsushi Nozu¹ (1. Port and Airport Research Institute)

3:30 PM - 3:45 PM

Room A | General session | S15. Strong Ground Motion and Earthquake Disaster

[S15]PM-3

chairperson:Naoki Hayashimoto(Japan Meteorological Agency), Kenji Kanjo(Takamisawa Cybernetics Co.Ltd.)

4:00 PM - 5:15 PM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

[S15-14] Utilization of OBS data for Earthquake Early Warning

*Naoki Hayashimoto¹, Jun Akutagawa¹, Keishi Noguchi¹, Ken Moriwaki¹, Masahiko Morimoto¹, Kuninori Okamoto¹, Yuki Kodera², Koji Tamaribuchi², Mitsuyuki Hoshiba², Takeshi Nakamura³, Takashi Kunugi³, Shin Aoi³ (1. Japan Meteorological Agency, 2. Meteorological Research Institute, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 4:15 PM

[S15-15] Application of the Japanese Earthquake Early Warning Method (IPF method) to the 2018 Hualien earthquake in Taiwan

*Masumi Yamada¹, Dayi Chen², Koji Tamaribuchi³ (1. DPRI, Kyoto University, 2. CWB, Taiwan, 3. MRI)

4:15 PM - 4:30 PM

[S15-16] Estimation of fault geometry to obtain an accurate seismic intensity in real time

*YING XIAO¹, Masumi Yamada² (1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake

Administration, 2. DPRI, Kyoto University)

4:30 PM - 4:45 PM

[S15-17] Is Mw so useful for earthquake early warning? : from viewpoint of real-time prediction of ground motion

*Mitsuyuki Hoshiba¹ (1. Meteorological Research Institute, JMA)

4:45 PM - 5:00 PM

[S15-18] Importance of the high-density observation for seismic strong motion disaster prevention

*kenji kanjo¹, isao takahashi¹, yoshinori shinohara¹, rami ibrahim¹ (1. Takamisawa Cybernetics Co.Ltd.)

5:00 PM - 5:15 PM

Tue. Sep 17, 2019

ROOM A

Room A | General session | S15. Strong Ground Motion and Earthquake Disaster

[S15]AM-1

chairperson: Takashi Furumura (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), Kotoyo Tsuchida (HANSHIN CONSULTANTS Co., Ltd.)

9:15 AM - 9:45 AM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

[S15-19] Propagation of distinctive Love-wave pulses in continental and oceanic environment

*Takashi Furumura¹, Brian LN Kennett² (1.

Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Research School of Earth Sciences, Australian National University)

9:15 AM - 9:30 AM

[S15-20] Strong Motion Estimation based on Presumed Velocity Model of Yokote Basin

Keita Sato¹, *Shinichi Matsushima², Florent De Martin³

(1. West Japan Railway Company, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. French Geological Survey)

9:30 AM - 9:45 AM

Room A | General session | S16. Subsurface Structure and Its Effect

[S16]AM-1

chairperson: Takashi Furumura (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), Kotoyo Tsuchida (HANSHIN CONSULTANTS Co., Ltd.)

9:45 AM - 10:30 AM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

[S16-01] Seismological bedrock waves derived from site amplification factors by the generalized spectral inversion

*Eri Ito¹, Kenichi Nakano², Hiroshi Kawase¹ (1. DPRI, Kyoto University, 2. HAZAMA ANDO CORPORATION)

9:45 AM - 10:00 AM

[S16-02] Feasibility study on inference of the phase velocity of Love waves from horizontal array microtremor recordings by MLM method

*Kotoyo Tsuchida¹, Masanori Horike¹, Kouji Yamada¹, Masaki Suehiro¹, Sayumi Yoshida¹ (1. HANSHIN CONSULTANTS Co., Ltd.)

10:00 AM - 10:15 AM

[S16-03] Estimation of Velocity Structure Model in the Tsugaru Plain Using Microtremor Array Observation and Strong Motion Records

*Kimiya Asano¹, Tomotaka Iwata¹, Kunikazu Yoshida²,Michihiro Ohori³, Ken Miyakoshi² (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Geo-Research Institute, 3. Research Institute of Nuclear Engineering, University of Fukui)

10:15 AM - 10:30 AM

Room A | General session | S08. Earthquake Source Processes and Physics of Earthquakes

[S08]AM-2

chairperson: Ryosuke Ando (University of Tokyo), Akemi Noda (NIED)

10:45 AM - 12:00 PM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

[S08-01] Numerical experiments for estimating evolution of long-term slow slip in the Bungo Channel with Ensemble Kalman Filter, using GNSS data

*Megumi Fujita¹, Takuya Nishimura², Kazuro Hirahara^{3,4}, Mamoru Hyodo⁵, Shin'ichi Miyazaki¹ (1.

Graduate school of Science, Kyoto University, 2.

Disaster Prevention Research Institute, Kyoto

University, 3. Institute of Education, Research, and

Regional Cooperation for Crisis Management Shikoku, Kagawa University, 4. RIKEN, 5. JAMSTEC)

10:45 AM - 11:00 AM

[S08-02] Earthquake generation scenarios based on a mechanical model using geodetic data

*Akemi Noda¹, Tatsuhiko Saito¹, Eiichi Fukuyama^{1,2}

(1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Department of Civil and Earth Resource Engineering, Kyoto University)

11:00 AM - 11:15 AM

[S08-03] Dynamic rupture simulation of the 2019 M7.1 Ridgecrest, CA, earthquake: Effects of 3-D fault geometry

*Ryosuke Ando¹, Yosuke Aoki², Makoto Otsubo³ (1. School of Science, University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3. National Institute of Industrial Science and Technology)

11:15 AM - 11:30 AM

[S08-04] Comparison of Source Location Methods: CCF-based SSA and ASL

*Theodorus Permana¹, Takeshi Nishimura¹, Hisashi Nakahara¹ (1. Tohoku Univ.)

11:30 AM - 11:45 AM

[S08-05] Frequent observation of identical onsets of large and small earthquakes

*Satoshi Ide¹ (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

11:45 AM - 12:00 PM

Room A | General session | S08. Earthquake Source Processes and Physics of Earthquakes

[S08]PM-1

chairperson:Saeko Kita(Building research institute), Suguru Yabe(AIST)

1:30 PM - 3:00 PM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

[S08-06] **Enhanced dynamic triggering of a shallow slow slip event in the Nankai subduction zone due to the overlying sedimentary wedge**

*Satoshi Katakami¹, Yoshihiro Kaneko², Yoshihiro Kaneko¹ (1. DPRI, Kyoto Univ., 2. GNS Science, NZ)

1:30 PM - 1:45 PM

[S08-07] **Scaled energy estimation for shallow slow earthquakes in the Nankai trough**

*Suguru Yabe¹, Takashi Tonegawa², Masaru Nakano² (1. AIST, 2. JAMSTEC)

1:45 PM - 2:00 PM

[S08-08] **Slow earthquake signals in the microseism frequency band (0.1–1.0 Hz)**

*Koki Masuda¹, Satoshi Ide¹, Kazuaki Ohta², Takanori Matsuzawa³ (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

2:00 PM - 2:15 PM

[S08-09] **Detection of shallow low-frequency earthquakes beneath the Japanese Islands**

*Junichi Nakajima¹, Akira Hasegawa² (1. Earth and Planetary Sciences, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University)

2:15 PM - 2:30 PM

[S08-10] **Focal mechanisms of deep-low frequency earthquakes beneath Zao, Iwatesan and Hijiori**

*Genki Oikawa¹, Naofumi Aso¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

2:30 PM - 2:45 PM

[S08-11] **Interactions between the intraslab earthquakes and episodic slow slips beneath Kii Peninsula controlled by fluid migration**

*Saeko Kita¹, Heidi Houston², Sachiko Tanaka³, Youichi Asano³, Takuo Shibutani⁴, Naoki Suda⁵ (1. Building Research Institute, 2. USC, 3. NIED, 4. DPRI, Kyoto

University, 5. Hiroshima University)

2:45 PM - 3:00 PM

Room A | General session | S08. Earthquake Source Processes and Physics of Earthquakes

[S08]PM-2

chairperson:Takehito Suzuki(Aoyama Gakuin University), Naofumi Aso(Tokyo Institute of Technology)

3:15 PM - 4:45 PM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

[S08-12] **Inertia term governs displacement of stick-slip experiment**

*Shinichi Oba¹, Yuta Mitsui² (1. Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 2. Faculty of Science, Shizuoka University)

3:15 PM - 3:30 PM

[S08-13] **Paradox in Rupture Propagation Velocity**

*Eiichi Fukuyama^{1,2}, Shiqing Xu¹, Futoshi Yamashita¹ (1. Nat'l Res. Inst. Earth Sci. Disas. Res., 2. Dept. Civil and Earth Resources Eng., Kyoto University)

3:30 PM - 3:45 PM

[S08-14] **Understanding of temporal evolution of the eddy viscosity in porous media and its seismological implications**

*Takehito Suzuki¹ (1. Aoyama Gakuin University)

3:45 PM - 4:00 PM

[S08-15] **Numerical simulation of earthquake sequence on rough faults**

*So Ozawa¹, Eric M. Dunham² (1. University of Tokyo, 2. Stanford University)

4:00 PM - 4:15 PM

[S08-16] **Earthquake triggering by dynamic and static stress changes**

*Shingo Yoshida¹, Takuto Maeda², Aitaro Kato¹ (1. Earthquake Research Institute, Univ. Tokyo, 2. Hirosaki Univ.)

4:15 PM - 4:30 PM

[S08-17] **Rupture simulation in a temporally stochastic stress field**

*Naofumi Aso¹, Ryosuke Ando², Satoshi Ide² (1. Tokyo Institute of Technology, 2. University of Tokyo)

4:30 PM - 4:45 PM

Room A | General session | S15. Strong Ground Motion and Earthquake Disaster

[S15]AM-1

chairperson: Sayumi Yoshida (HANSHIN CONSULTANTS Co., Ltd.), Ritsuko Matsu'ura (Association for the Development of Earthquake Prediction)

Mon. Sep 16, 2019 9:30 AM - 10:30 AM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

[S15-01] Investigation to estimate high-frequency limit of Empirical Green's tensor derivatives (EGTD) using aftershocks

*SAYUMI YOSHIDA¹, MASANORI HORIKE¹ (1. HANSHIN CONSULTANTS Co., Ltd.)

9:30 AM - 9:45 AM

[S15-02] 3D Complete Nonlinear Methods for Soil-Building Interaction Based on an Input Wavefield

*Masahiro Iida¹ (1. University of Tokyo, Earthquake Research Institute)

9:45 AM - 10:00 AM

[S15-03] Evaluation of seismic motion on a subsurface level from the ground motion at a free surface position without plane-wave incidence assumption

*Hiroshi Takenaka¹, Masanao Komatsu¹, Tomotsugu Watanabe¹, Mitsutaka Oshima², Takeshi Nakamura³ (1. Department of Earth Sciences, Okayama University, 2. Shimizu Corporation, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

10:00 AM - 10:15 AM

[S15-04] Estimation of the maximum seismic intensity of each 250m-mesh in Japan for 1585-2018

*Ritsuko S. Matsu'ura¹, Takeo Ishibe¹, Koji Iwasa¹, Mitsuko Furumura¹ (1. Association for the Development of Earthquake Prediction)

10:15 AM - 10:30 AM

Investigation to estimate high-frequency limit of Empirical Green's tensor derivatives (EGTD) using aftershocks

*SAYUMI YOSHIDA¹, MASANORI HORIKE¹

1. HANSHIN CONSULTANTS Co., Ltd.

1. はじめに

地震動グリーン関数の空間微分は、地震動予測等に利用できる重要な情報である。これを数値的に推定するためには地下構造モデルが必要となるため、現状では1Hz以上の高周波数成分を含むことは難しい。高周波数成分を含むグリーン関数空間微分を作成する方法の1つとして、観測記録を利用する方法がある。Plicka and Zahradnik (1998)は、複数の小地震記録を用いて、グリーン関数の空間微分(EGTD)の推定法を提案した。この手法は、伝播経路や地盤のモデル化を必要とせず、また異なるメカニズム解の余震からでも任意のメカニズム解の地震動の計算ができる手法である。しかし、どの程度の範囲の余震を用いればどの程度の高周波数(限界高周波数)まで信頼できるEGTDが推定できるかが明らかになっていない。本研究では、これらの検討を、2016年に発生した熊本地震の余震記録を用いて実施した。

2. データと手法

今回使用した2016年熊本地震の余震記録はおおよそマグニチュード2～4の範囲の余震である。EGTDを推定するためには、断層パラメータ(走向・傾斜・滑り角)、地震モーメントやコーナー周波数からなる震源パラメータが必要となる。そのため、断層パラメータはP波初動から、地震モーメント、コーナー周波数は ω -2モデルを仮定してS波のフーリエスペクトルから算出した。

初めに、ある半径の球内に位置する6個以上からなる余震グループを設定し、次にPlicka and Zahradnik (1998)により提案された手法を用いてグループ化された余震群から3成分地震動のEGTDを推定した。更に、EGTDの推定に用いてない余震の観測波形(検証余震波形)と推定したEGTDを用いて算出した地震動波形を、相関関数を指標として比較し、EGTDの限界高周波数を評価した。

3. 結果

EGTD推定のための地震グループ化半径を500m、1000mにした場合、4 HzまでのEGTDが高精度で安定して推定できた。グループ化半径500mと1000mを比較すると半径500mの方がより高精度のEGTDが推定された。この結果は、グループ化をする余震はより接近したものを選択するとより高精度のEGTDが推定できることを意味する。これは、グループ化の範囲の代表的な長さ(直径)に対して、考慮している最短波長の比が、半径500mの方が大きいためであると考えられる。また、グループ化半径500mの場合はさらに10Hzまで高精度に推定できる可能性を示唆する結果となった。これらの結果は、比較的精度良く震源パラメータが決定できた余震記録を用いた場合である。一般に、規模の小さい地震の震源パラメータを一意的に決定することは難しい。しかし、震源インバージョン等に利用することを考えると、震源パラメータの精度がやや悪い余震記録からもEGTDを推定できるようにしたい。

EGTDの推定に利用することができる地震を増やすために、震源パラメータの決定精度が悪い余震記録に遺伝的アルゴリズム(GA)を用いて、余震波形に良く合う震源パラメータとEGTDの同時推定を行った。その結果、走向・傾斜・滑り角の検索範囲(± 0.1 radians)でパラメータの決定精度が悪い余震を用いても、4 HzまでのEGTDが求められることが確認できた。また、余震グループによっては、4 Hzより高い高周波数限界まで利用できるEGTDを推定できる場合があることもわかった。

この研究の結論は、以下の3点である。

- (1) 余震地震動波形から推定したEGTDは、少なくとも4Hzまでは充分信頼できる。
- (2) グループ化する余震はより接近したものを選択するとより高精度のEGTDが推定できる。
- (3) 余震の震源パラメータの精度がやや悪くてもEGTDの推定に利用できる。

3D Complete Nonlinear Methods for Soil-Building Interaction Based on an Input Wavefield

*Masahiro Iida¹

1. University of Tokyo, Earthquake Research Institute

1. 序 軟弱地盤で重要な短周期（周期数秒以下）表面波を適切に取り扱うために、入力地震波動場（波動が伝播している状態）に基づく、3次元建物-地盤相互作用解析法を提案した。その第一歩として、水平地震動を受ける多層地盤において、3次元線形相互作用解析を実施した [1]。次に、その解析法に、地盤の材料非線形を導入した [2]。提案法では、相互作用系と、波動場評価のための（数十mの浅い地下構造を含む）数百m以上の深い地下構造を使用する(図1)。短周期表面波が、浅い構造と深い構造の両方の物性に強く依存するからである。

本研究では、さらに上部構造と杭の材料非線形を導入し、垂直動も考慮する。解析法の効果を確認するために、メキシコ市の軟弱地盤の中層鉄筋コンクリート(RC)ビルと、東京湾の埋立区域の中層RCビルと木造建物、の3ケースの解析を実施する。そして、東京湾の埋立区域の中層RCビルのケースを説明する [3]。

2. 方法 図1の3次元相互作用系において、上部構造は集中質量のせん断モデル、摩擦杭に支えられる基礎は剛体である。杭は円筒要素、土は直方体要素、でモデル化される。数式は、ここでは割愛する。

3. 地盤応答 本研究に先立ち、3成分入力波動場に基づく、3次元非線形地盤解析法を使用して、東京湾の埋立区域の越中島観測点において、1923年関東地震(M=8.1)による線形、非線形、液状化地盤応答を実施した [4]。

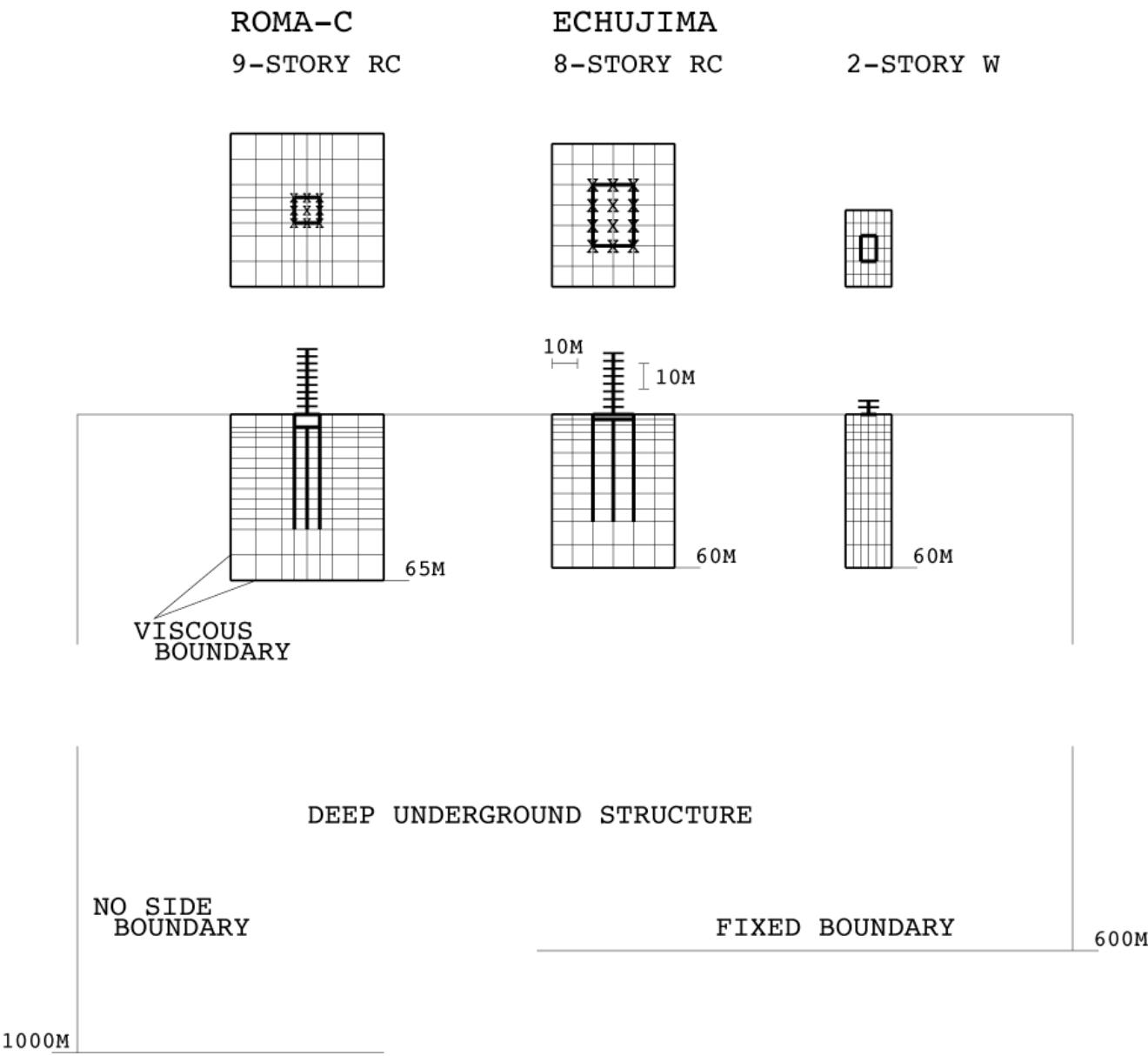
非線形地盤では、地震動の振幅はあまり大きくならなかった。液状化地盤では、その剛性低下によって、表面波の振幅がきわめて大きくなった。

4. 非線形地盤における建物応答 本研究では、まず、非線形地盤において、8階建RCビルの非線形相互作用解析を実施する。建物（上部構造と杭）は、多少非線形挙動をする。1階や中間階、杭頭において被害が発生する可能性がある。

5. 液状化地盤における建物応答 次に、液状化地盤において、同じビルの非線形相互作用解析を実施する。建物の応答は、きわめて大きくなる。上部構造の層間変位とせん断力を見ると、1階だけが特に大きな応答になる。曲げモーメントを見ると、4mから8mの液状化層と、2mに位置する杭頭を含むその上の層において杭は降伏する。杭を有するRCビルでは、建物全体が液状化地盤の大きな応答に抵抗するので、1階で大きな層間変位やせん断力が発生すると考えられる。

6. 議論と結論 他の2つのケースでは、特徴が異なる建物応答が得られたが、ここでは割愛する。また、建物の応答に、垂直動の影響は見られない。解析法は適切に機能し、特に中層RCビルの応答を適切に説明できた。

参考文献 [1] Iida (2013). Int. J. Geomechanics, ASCE, 13(4), 430-440. [2] Iida (2017). Int. J. Geomechanics, ASCE, 17(3), 04016081. [3] Iida (2019). Int. J. Geomechanics, ASCE (submitted). [4] Iida (2016). Int. J. Geomechanics, ASCE, 16(1), 04015026.



Evaluation of seismic motion on a subsurface level from the ground motion at a free surface position without plane-wave incidence assumption

*Hiroshi Takenaka¹, Masanao Komatsu¹, Tomotsugu Watanabe¹, Mitsutaka Oshima², Takeshi Nakamura³

1. Department of Earth Sciences, Okayama University, 2. Shimizu Corporation, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

地震動による基礎地盤や施設の安定性評価などにおいて、解析地盤モデルの下端（基盤面）に入力する地震動を作成する際に、地表1点の地震動（以下「基準地震動」と呼ぶ）から地中のある深さにおける地震動（入射波）の分布を算定する必要がある（図1(a)）。従来、基準地震動を平面波の鉛直入射を仮定して1次元の多重反射理論に基づいて地中に戻し、鉛直入射平面波として解析モデル下端に入力することがしばしば行われている。しかし、このような鉛直入射平面波を仮定する設定では、入力地震動の水平動成分はS波として扱われる一方、上下動成分はP波として扱われる。その結果、主要動であっても、モデルでは上下動はP波として伝播することになり、自然現象を模擬（シミュレート）しているとはいえない。また、鉛直ではなく斜め入射の平面波を仮定する場合においても、一般に地震動には様々な水平スローネスを持つ波線の波が含まれており、それをひとつの水平スローネスの平面波を仮定して地中に戻すことは、特に多成分の継続時間の長い地震動を扱う場合には、やはり理論的な矛盾を生じてしまう。本研究では、平面波入射の仮定に基づかない、ひとつのシンプルな方法を提案する。

その方法とは、震源を含む地下構造モデル（図1(b)）を用意し、時間関数がインパルス（デルタ関数）の食い違い震源を仮定して、地表の基準地震動の観測点と入力地震動が必要な地中位置（例えば、2次元解析モデルでは水平な直線状に分布）における地震動（理論波形）を計算し、地表位置の理論波形に対する地中位置の理論波形の伝達関数を基準地震動に作用して得られる波形を入力地震動に用いるというものである。この伝達関数は地中位置各点の理論波形を地表の理論波形でデコンヴォリューション（周波数領域で割り算）して得られるが、実際には以下のようにすれば直接伝達関数を計算する必要はない（地中の点の数だけデコンヴォリューションを実施する必要はない）。実際には、基準地震動を地表の理論波形でデコンヴォリューションして得られる波形（一種の「実効的な震源時間関数」）を地中の理論波形にデコンヴォリューション（周波数領域で掛け算）するだけで（基準地震動に対応した）地中地震動が得られる。「実効的な震源時間関数」は一度計算すれば、それを地中の任意の点（今の場合は、入力地震動が必要な地中の全ての点）で共通に適用できる。理論波形の計算には、震源を含む地下構造モデルとして水平成層構造を採用すれば、reflectivity法（離散化波数法や波数積分法など）などの準解析的な手法で十分短周期まで計算可能である。また、地中の点の地震動を上昇波と下降波（いずれもエバネッセント波を含む）に分解することが可能なので、地中の理論波形に上昇波成分だけを用いることにより、入射波を算定することができる。この方法だと、平面波入射を仮定することなく、解析モデルの下端全体の入力地震動を設定することができる。本発表では、地表における基準地震動から地中における入力地震動（入射波）を算定する具体的な手順を式と計算例によって示す。

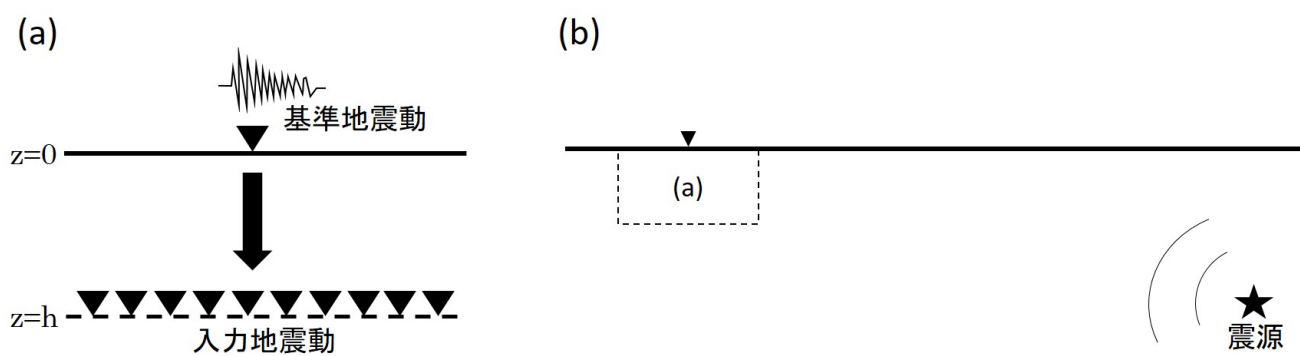


図1:(a)解析地盤モデル. (b)震源を含む地下構造モデル.

Estimation of the maximum seismic intensity of each 250m-mesh in Japan for 1585-2018

*Ritsuko S. Matsu'ura¹, Takeo Ishibe¹, Koji Iwasa¹, Mitsuko Furumura¹

1. Association for the Development of Earthquake Prediction

これまで、四半世紀近く、近世の被害地震の系統的な解析を実施して、震源域・深さ・規模の推定を系統的に蓄積し [e.g. 中村・松浦(2018)], 種々の歴史地震によって地震動の強さが推定された地点は、250mメッシュ以上の分解能で8000点以上蓄積されている [e.g. Matsu'ura (2017)]. 未だ安政東海・南海地震など解析が完了していない地震が1割程度残されているものの、この8000余点の分布と、Miyazawa and Mori (2009) による最近500年間の各地の既往最大震度分布図とには、大きな乖離がある。

最近、地震の場所とMw, 震源タイプ, 地点のAVS30と関連する直下のスラブの深さ, が与えられれば, 地点の計測震度を予測できる簡単な式ができた [Matsu'ura et al. (2019)]. この式は, 表層の影響も, 東日本の太平洋側で顕著である異常震域等も含まれており, 一切の後付け補正項が必要ない. 震源の深さの精度で式が切り替わる心配もない。

そこで, J-SHISの250mメッシュのAVS30の値, 及びCAMPモデル [Hashimoto et al. (2004)] を利用した国内陸地の各250mメッシュ直下のPAC及びPHSスラブの上面深さを用意して, 1585年以降2018年までに日本で発生したM6.8以上の地震による日本の全メッシュ毎の震度を推定した. 推定に用いた震源は, 1884年~1922年は宇津 (1999), 1923年~2018年は気象庁震源カタログ, さらに両者に松浦・石辺 (2018) など近代に関する個別の検討を加えた. 1585年から1884年までは松浦・ほか (2010) などの近世の解析結果 [e.g. Matsu'ura (2017)] をMに関わらず含め, 未解析のM6.8以上とされる大地震は宇佐美・ほか (2013) などを参考に震源および震源域を補充して用いた. 利用したカタログはすべて気象庁Mが与えられているので, Mwは気象庁Mより0.2小さいと仮定した. 使用した震度推定式は, Mw7.5以上は震源域からの最短距離を用いるので, 「日本の地震活動」等に示された震源域を参考とした。

こうして, 1585年以降434年間の既知の大地震による, 各メッシュの既往最大震度の全国推定図が得られた (図1). 比較のために, 1585年天正地震以降288年間の史料から判る範囲での既往最大の震度の分布図 [Matsu'ura (2017)] を示す. 比較して全国推定図の方が著しく赤い部分は, 例えば1894年根室沖, 1952年と2003年十勝沖地震等, 北海道東部の巨大地震のような明治以降しか地震履歴が判らない場所で発生した地震による高震度や, 濃尾地震・福井地震・鳥取地震・東北地方太平洋沖地震とその後の一連の珍しい場所の地震など, 近代以降の大地震による震度が既往最大となっている地域である. その他で両者は良く合致している. 蓄積された歴史地震の震度データ, 推定された歴史地震の震源, 現代データから導出された震度推定式が相互によく合致しており, 3つが一貫していることが確認できた. 一方, Miyazawa and Mori (2009) で周囲より高くなる中国山地は, この推定図では震度5.5以上にならない. 彼らの空間補間がうまく機能していない証左であり, 確率論的予測地図の検証には不向きであることを示している。

震度に対する地盤の影響は大きいので, 歴史地震データを用いて震源推定を行う際は, 史料地点の地盤の影響考慮が不可欠である. 逆に地盤の影響を推定できる程度の精度で位置が決まっている歴史地震の震度でなければ, 確率論的な震度予測の検証には使えないことがよく判る. 長期間の予測地図があれば, 今回のような全国推定最大震度を対応期間用に作成可能なので, 地図の検証が可能である。

本研究は地震調査研究推進本部の評価等支援事業の一部として文部科学省からの委託によって実施された。

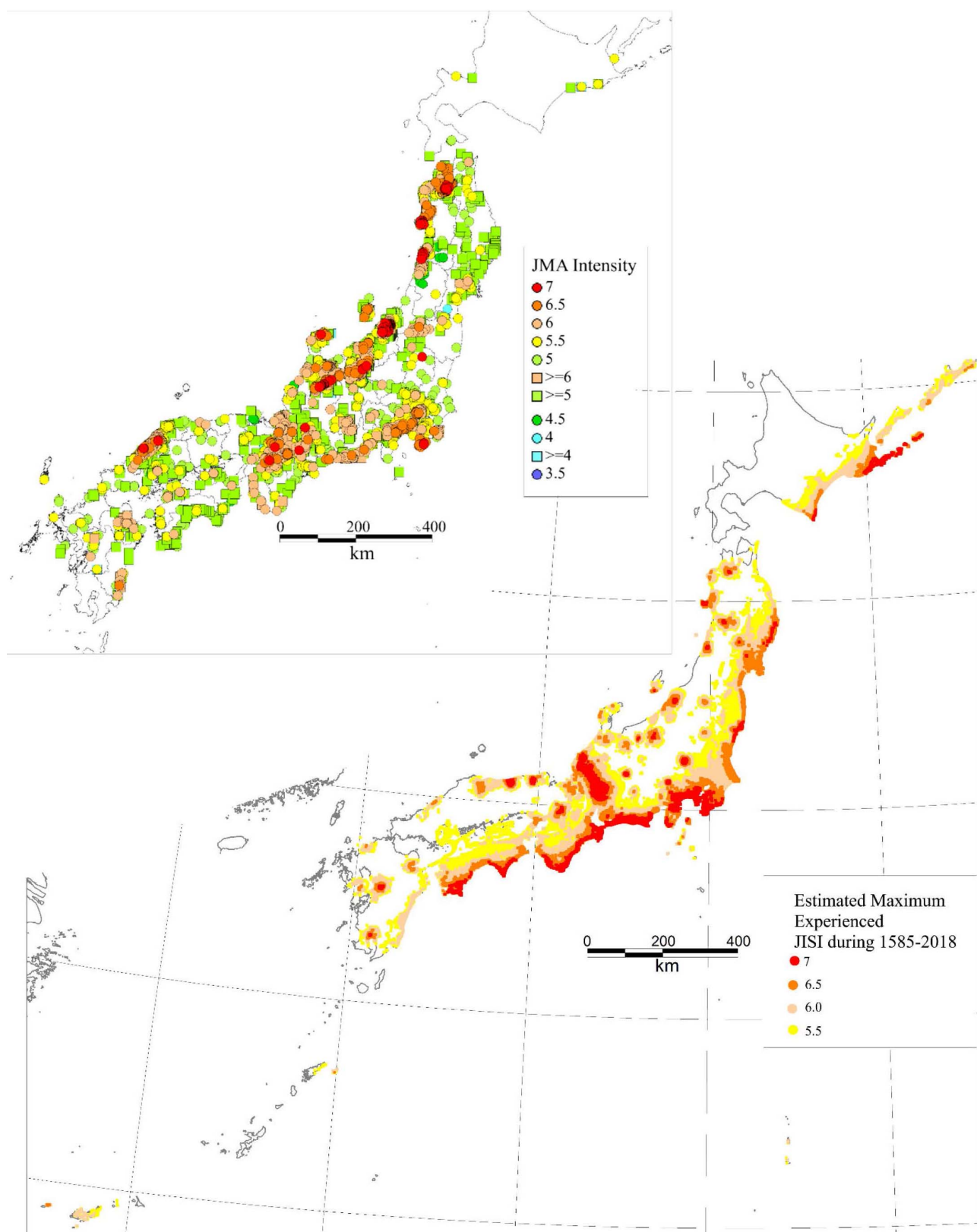


Fig. 1. 250m-mesh areas estimated to be experienced 5.5 or larger Japanese Instrumental Seismic Intensity in 1585-2018. Upper figure shows the maximum intensities experienced in the early modern [after Matsu'ura (2017)]. Intensities due to 1854 Ansei Tokai and Nankai earthquakes and some known historical large earthquakes are not yet included in the upper map.

Room A | General session | S15. Strong Ground Motion and Earthquake Disaster

[S15]AM-2

chairperson: Hongjun Si (Seismological Research Institute Inc.), Yusuke Tomozawa (KOBORI RESEARCH COMPLEX INC.)

Mon. Sep 16, 2019 10:45 AM - 12:00 PM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

[S15-05] On the large peak ground motion observed during the 2018 M6.6 Eastern Iburi, Hokkaido, Earthquake

*Hongjun Si¹, Mitsuko Furumura², Ritsuko S. Matsu'ura² (1. Seismological Research Institute Inc., 2. Association for the Development of Earthquake Prediction)

10:45 AM - 11:00 AM

[S15-06] A broadband source model of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake

*Kaori Nagai¹, Kimiyuki Asano¹, Tomotaka Iwata¹ (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

11:00 AM - 11:15 AM

[S15-07] Estimation of Inhomogeneous Attenuation Structure, Source and Site Effects of the Western Hokkaido Based on Block Inversion Analysis

*Yusuke Tomozawa¹, Kenichi Kato¹, Kiichiro Nojiri² (1. Kobori Research Complex, 2. Hokkaido Electric Power Company)

11:15 AM - 11:30 AM

[S15-08] Attenuation Curves of Bedrock Motions due to Crustal Earthquakes in Japan and their Near Source Characteristics

*Tomonori Ikeura¹ (1. Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation)

11:30 AM - 11:45 AM

[S15-09] Dynamic rupture simulation for moderate-sized strike-slip fault considering spatial heterogeneities on various initial conditions

*Hiroshi Kawase¹, Jikai Sun², Arben Pitarka³, Fumiaki Nagashima¹, Eri Ito¹ (1. DPRI, Kyoto University, 2. Grad. School of Eng., Kyoto University, 3. Lawrence Livermore National Laboratory)

11:45 AM - 12:00 PM

On the large peak ground motion observed during the 2018 M6.6 Eastern Iburi, Hokkaido, Earthquake

*Hongjun Si¹, Mitsuko Furumura², Ritsuko S. Matsu'ura²

1. Seismological Research Institute Inc., 2. Association for the Development of Earthquake Prediction

1. はじめに

2018年9月6日に発生した北海道胆振東部地震の際に、震央距離10km~20km程度の震源に近い観測記録を含む多数の強震記録が得られている。これらの観測記録には、断層最短距離において25km以上になっているにもかかわらず、最大加速度で1300ガル程度（IBUH01追分観測点）、最大速度で150カイン強（IBUH03厚真観測点）の大振幅地震動も含まれており、震源域周辺における地震動が大きかったことが示され、地震被害の原因を物語っている。本研究では、これらの強震記録を分析して、地震動距離減衰特性の観点から地震被害をもたらした地震動の特性を明らかにすることを目的としている。

2. データ

検討に用いた強震記録は、K-NET、KiK-netで得られた観測記録のうち、断層最短距離（FD）が300km以内のものとした。検討対象とした地震動指標は、最大加速度（PGA）と最大速度（PGV）で、その求め方は検討対象の地震動予測式にあわせて、（1）水平2成分のうち大きい方の値、（2）水平2成分のベクトル和または（3）その平均値、（4）ラジアル成分及びトランバース成分の最大値、などとした。一方、断層最短距離の計算に用いた断層モデルは、国土地理院による断層モデルを気象庁震源を含むように深い方にずらして25km~45kmの範囲にある部分とした。計算に用いた地震のマグニチュードは気象庁により M_w は6.6、 M_{JMA} は6.7とし、震源深さは37kmとした。

3. 検討方法

本研究では、国内で提案されている主な地震動予測式と観測記録の残差を計算し、残差の平均値が最も小さい3つの地震動予測式を選択し、観測値と予測値の比較検討を行ったうえ、その残差を用いて大振幅PGA、PGVの生成について考察を行う。なお、残差を計算する際には、それぞれの地震動予測式にあわせて必要な入力パラメータを与え、さらにその地震動予測式で用いられている地盤増幅率で観測記録を補正した。

4. 結果

国内で提案されている主な地震動予測式と観測記録の残差を計算し、その残差の平均値を求めた。その結果、平均残差の最も小さかった3つの地震動予測式はKanno et al. (2006、Kanno06と略す)、司・翠川（1999、SM99）及びMorikawa and Fujiwara（2013、MF13）によるものであった。これらの地震動予測式の予測値と観測値の比較検討の結果をPGVを例にして図1に示す。図の上段は予測値と観測値の比較、下段は残差と距離の関係をそれぞれ示しており、上段の図の凡例に地震動予測式の略称を示している。なお、これらの図のうち、Kanno06とMF13の2式についてPGVは水平2成分のベクトル和、対象地盤はそれぞれ V_{s30} 300m/sと V_{s30} 350m/sのものである。SM99についてPGVは水平2成分のうち大きい方の値、対象地盤は V_{s30} 600m/sである。図1から、いずれの結果も遠距離では地震動予測式と観測記録の整合は比較的よいが、近距離では観測記録は予測値を大きく上回ることが分かった。そこで、断層最短距離（FD）が35km程度以内の観測記録とKanno06式による残差と野津・長尾（2005）によりスペクトルインバージョンで求められた地震基盤相当からの増幅率との関係を調べた。その際に、野津・長尾（2005）による増幅率の周期0.5秒~1.6秒の平均増幅率をPGVと対応するものとした。その結果、平均増幅率が大いほど残差が大いことが見受けら

れ、振幅の大きい観測記録に深部地盤の影響がみられることが示唆された。

参考文献

Kanno et al. (2006), BSSA;

気象庁、<http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/mech/cmt/fig/cmt20180906030759.html>;

国土地理院、<https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H30-hokkaidoiburi-east-earthquake-index.html>;

野津・長尾(2005)、港空研資料1112;

Morikawa and Fujiwara (2013), JDR;

司・翠川(1999), 日本建築学会構造系論文集。

謝辞

K-NET及びKiK-netの観測記録を使用した。本研究は文部科学省からの委託事業である「地震調査研究推進本部の評価等支援事業」の一部として実施した。記して関係者に感謝を申し上げます。

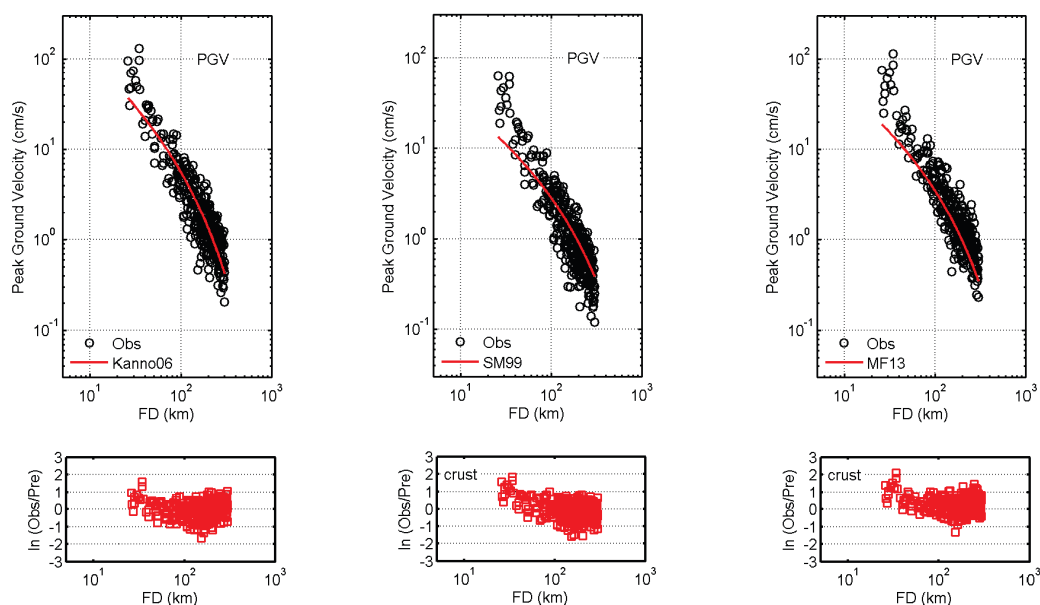


図1 観測値とGMPEの比較(上段)及び残差と距離の関係(下段)

A broadband source model of the 2018 Hokkaido Eastern Iburi earthquake

*Kaori Nagai¹, Kimiyuki Asano¹, Tomotaka Iwata¹

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

2018年9月6日3時7分にMj 6.7の2018年北海道胆振東部地震が発生した。気象庁による震源の深さは約37 kmであり、地震調査委員会（2018）によると、この地殻内地震の震源域を含む地域では、通常の陸域における地殻内の地震よりも深い場所でも多くの地震活動が見られる。したがって、今回のように震源が深く、複数の観測点で最大振幅が100 cm/sに達するような強震動をもたらした地震の震源特性と、この地域の観測点における強震時の地盤のふるまいを知ることは重要である。

この地震の震源近傍における複数の強震記録には、破壊開始点からの直達S波に続き、3つの顕著な波群が見られ、観測点によって波群間の振幅比や走時差が異なっている。それぞれの波群が強震動生成領域

（SMGA）[Miyake et al. (2003)] で発生したと仮定し、各波群の到着時刻を読み取り、Asano and Iwata (2012)の方法によりそれぞれの波群を生成したSMGAの破壊開始点について、震源に対する相対的な位置、時刻を推定した。断層面は、浅野・岩田（2019）による強震記録を用いた震源インバージョンで用いられている3つの面から構成されるものを参考にした。その結果、SMGA1（最初の主破壊）の破壊開始点は震央の約8 km南、SMGA2の破壊開始点は震央の約14 km南、SMGA3の破壊開始点は震央の約5 km北に位置し、順に破壊が開始したと推定された。この破壊の進展の特徴は、浅野・岩田（2019）による震源インバージョンの、破壊開始から約5秒後に主破壊が始まって南西に進展し、破壊開始から約11秒前後に北へと破壊が伝播したという特徴とおおまかに一致する。SMGA1、SMGA2の直上にはそれぞれ気象庁震度計47004とK-NET HKD126が存在し、どちらもEW成分で100 cm/sを超える大振幅を記録している。またSMGA3は、震源東側のK-NET HKD103とKiK-net HDKH01で観測された速度波形EW成分における明瞭なパルス波をもたらしたと考えられ、それぞれの波群の振幅の特徴と対応しているように見える。なお、47004とHKD126の2観測点における波形には地盤の非線形応答の影響が見られている。

推定した破壊開始点とK-NET, KiK-net, 気象庁震度計の強震記録を用いて、経験的グリーン関数法 [Irikura (1986), 入倉・他(1997)] により広帯域地震動を再現するSMGAモデルの構築を試みる。特に3つの波群をよく再現するSMGAモデルの推定によって観測点ごとの強震動の成因を探るとともに、推定したモデルを用いて地盤の非線形応答の影響が見られる観測点における波形を合成し検討を行う。

謝辞

本研究には、国立研究開発法人防災科学技術研究所K-NET, KiK-net, 気象庁震度計による強震記録を使用しました。また防災科学技術研究所F-netモーメントテンソル解、気象庁・文部科学省による一元化震源を使用しました。記して感謝申し上げます。

Estimation of Inhomogeneous Attenuation Structure, Source and Site Effects of the Western Hokkaido Based on Block Inversion Analysis

*Yusuke Tomozawa¹, Kenichi Kato¹, Kiichiro Nojiri²

1. Kobori Research Complex, 2. Hokkaido Electric Power Company

1. はじめに

北海道では活火山が存在するため、減衰構造が均質ではない可能性が考えられる。そこで、平成30年北海道胆振東部地震を含む北海道西部で発生した強震観測記録を収集し、震源特性、伝播経路特性、サイト増幅特性をブロックインバージョン解析により推定した。その際、伝播経路特性については空間的な不均質減衰構造を推定した。

2. データセット

K-NET、KiK-net及び泊地震観測点で観測された北海道西部で発生した地震の強震観測記録を収集した。記録の選定条件を以下に挙げる。2018年10月31日までに発生した地震を対象とした。M_jは4.5以上とし、震源深さは北海道胆振東部地震の震源域では40 km以浅、その他の領域では30 km以浅とした。ただし、海溝型地震は対象外とした。震源距離は200 km以下とした。K-NET記録は、地盤の非線形化の影響を避けるため最大加速度が三成分ともに200 Gal以下の記録を用いた。KiK-netと泊地震観測点は地中観測記録を用いた。インバージョン結果を安定させるため5観測点以上の記録が得られている地震、5地震以上の記録が得られている観測点を対象とした。観測記録の健全性を確認し、選定した観測記録は、40地震207観測点の2798記録である。

3. 解析手法

対象領域に活火山がある場合などは減衰構造が複雑であることが予想される。このような領域において全領域で均質なQ値を仮定することは、同時に推定される震源特性とサイト増幅特性に誤差を生じさせる要因となる。本検討では、友澤ほか（2019）の手法を用いて伝播経路特性の最適な領域分割とそれに基づく不均質減衰構造を推定した。幾何減衰項は、仲野ほか（2014）に倣い、等価震源距離 $X_{eq} \leq 100$ kmでは $\gamma = 1.0$ 、 $X_{eq} > 100$ kmでは20 kmごとの距離範囲で周波数ごとの γ を推定した。ただし、 γ に1.0の上限を設けた。

KiK-net新冠（HDKH05）を基準観測点として選定し、その理論増幅特性を拘束条件として震源特性とサイト増幅特性のトレードオフを解消した。HDKH05では笠松ほか（2014）による最適化地盤モデルが得られており、地中観測点位置のS波速度と密度はそれぞれ1.882 km/s、2.33 g/cm³である。地震基盤相当まではインピーダンス比を考慮して補正した。地中観測点位置の理論増幅率 $(E+F/2E)$ を拘束条件とした。

ブロックインバージョン解析では、まずブロックサイズを0.8°×0.8°と大きく設定し、広域の不均質減衰構造を求めた。次に、最小ブロックサイズを0.4°×0.4°、0.2°×0.2°と段階的に小さくして、より詳細な不均質減衰構造を推定した。

推定した震源スペクトルに対して ω^{-2} モデルを当てはめた。規模の大きな地震では本検討の解析周波数範囲0.2~20 Hzの中にコーナー周波数 f_c が含まれない可能性があるため、地震モーメント M_0 をF-netで公開されている値に固定して f_c のみを推定した。 M_0 を固定したのは平成30年北海道胆振東部地震の本震のみであり、その他の地震では M_0 と f_c の両方を推定した。

4. 推定結果

推定された領域分割に着目すると、恵庭岳や樽前山を含む領域ではlow-Qが推定された。平成30年北海道胆振

東部地震の震源域から高減衰帯がある方向への伝播は、特に短周期成分で大きく減衰したと考えられる。また、対象領域の東側にはややlow-Qな領域が広範囲に広がっている。日本海東縁部を含む領域のQ値は他の領域よりも相対的にhigh-Qとなった。2004年留萌支庁南部の地震の周辺では、活火山が無いにもかかわらずlow-Qが推定されている領域があった。これらの領域のQ値と佐藤（2010）によるQ値を比較すると定性的には整合した。

建物被害が集中したK-NET鶴川 (HKD126) では、1～3 Hz のサイト増幅率が10倍程度と大きかった。平成30年北海道胆振東部地震の本震の短周期レベルは、壇ほか（2001）の平均の1.5倍程度と推定された。

参考文献

笠松健太郎，池浦友則，岡崎敦：KiK-net地点における応答スペクトルのはぎとり倍率，日本建築学会大会学術講演梗概集，413-414，2014.

佐藤智美：逆断層と横ずれ断層の違いを考慮した日本の地殻内地震の短周期レベルのスケーリング則，日本建築学会構造系論文集，第75巻，第651号，pp.923-932，2010.

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，第66巻，第545号，pp.51-62，2001.

友澤裕介，加藤研一，野尻揮一郎：地震動の伝播経路特性の領域分割に着目した不均質減衰構造・震源特性・サイト増幅特性の推定 2008年岩手・宮城内陸地震の震源域を対象とした検討，日本建築学会構造系論文集，第84巻，第756号，pp.171-181，2019.

仲野健一，川瀬博，松島信一：スペクトルインバージョン手法に基づく強震動特性の統計的性質に関する研究，日本地震工学会論文集，第14巻，第2号，pp.67-83，2014.

Attenuation Curves of Bedrock Motions due to Crustal Earthquakes in Japan and their Near Source Characteristics

*Tomonori Ikeura¹

1. Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation

強震動予測の高精度化に向けてK-NET・KiK-netデータをもとに基盤地震動の距離減衰特性を検討している。この検討でははじめに隣接観測地点のNetworkを用いた方法で広域の距離減衰関数を仮定せずに地震基盤相当の基準観測点に対する相対サイトファクター(RSF)を評価し[池浦(2009), 池浦・加藤(2011)], その結果を用いて観測地震動(OBS)から基盤地震動 $BRM(=OBS/RSF)$ を求めて距離減衰特性を観察してきた[池浦(2010), 池浦・友澤(2012), 池浦(2013), 池浦(2015a), 池浦(2017), 池浦(2018a), 池浦(2018b)]。本報告では1997年以降に我が国で発生したM6以上の内陸地殻内地震29地震について, BRM の周波数4Hz付近における振幅の距離減衰曲線を概観し, 震源近傍における特徴について議論する。

図1では, a.東北・関東, b.中部・関東, c.近畿地方とその周辺, d.中国・九州の地方毎に, それぞれの地域で発生した内陸地震について, 震源距離を r として $\ln(r)$ の多項式近似で評価された周波数4Hz付近の BRM の加速度フーリエ振幅の距離減衰曲線を示しており, 地震発生年月日時分の数値で地震の区別をしている。図1a東北・関東では今年発生した山形県沖地震(201906182222)のみが火山帯の背弧側の地震, それ以外が前弧側の地震であり, 両者の勾配には大きな違いがある。また, 図2b中部・関東は火山帯あるいはその背弧側の地震で占められており, 図1aと比較すると, 背弧側の距離減衰特性が前弧側に比べて急峻であることが確認される。図1c近畿地方とその周辺, および図1dのうち中国地方の地震は極めてよく類似した曲線となり, いずれもS字型の特徴を示す。図1dのうち1997年の鹿児島県北西部の2地震と2016年の熊本の3地震の曲線はよく似た形状であり, 中国地方の3地震との違いが明確である。

これらの図のうち, 近畿・中国地方や東北・関東地方の太平洋側で火山帯から離れた地域で発生した地震で $r=20\sim30\text{km}$ よりも近距離側で振幅が急増する特徴があることは特筆に値する。経験的な方法の地震動評価では距離減衰関数を $(1/r)\exp[-br]$ で仮定することが多いが, この関数形では回帰分析した場合に遠方の特徴で b が決まり上に凸になる曲線となる。このため, 近距離側で下向きに凸になる特徴は再現されない。

もともと $(1/r)\exp[-br]$ は全無限一様媒質を仮定した距離減衰関数であるが, 現実の速度構造としてVJMA2001[上野他(2002)]を用い波線追跡でSH波の透過率[Aki and Richards(1980)](C_{TRS})を算定すると図2のようになる。なお, 震源深さによるインピーダンスの違いは除去している。これによると, C_{TRS} は震源深さの3~4倍程度の震央距離でほぼ0であり, 内陸地殻内地震の深さを20kmとすると直達S波がほぼ0となりつつも到達できるのはせいぜい60~80km前後である。この辺りで観測される地震動は既に様々な反射波と屈折波の合成波群であり, その距離減衰特性をそのまま近距離側に伸ばしても正しい予測とはならない。そこで, 観測地点への直達S波の距離減衰特性につき, 2013/04/13淡路島の地震($M6.3, h=15\text{km}$)を取り上げて検討した結果を図3に示す。図3(1)は r に対する C_{TRS} の分布であり直達S波は約60kmで消失する。図3(2)は C_{TRS}/r の r に対する分布であるが, 直達S波の場合は震源特性が重なることを考慮してS波のRadiation Pattern係数(C_{RPS} ; SHとSVのベクトル和)を C_{TRS}/r に乗じた結果も示した。図3(3)では $f_c=1.3\text{Hz}, 4\text{Hz}, 13\text{Hz}$ の BRM と $C_{\text{TRS}}/r^*C_{\text{RPS}}$ の対応関係を示している。これによると, $C_{\text{TRS}}/r^*C_{\text{RPS}}\geq 0.003$ 程度以上では基盤地震動振幅との間で比例関係が見出せるので, その範囲では直達S波の寄与でモデル化できる可能性がある。

今後は他の地震でも同様の検討を行うとともに, この結果を踏まえて震源近傍における距離減衰特性のモデル化を試みたい。

【謝辞】 防災科学技術研究所K-NET, KiK-netのデータを活用させていただきました。記して感謝します。

【参考文献】 Aki and Richards(1980)Quantitative Seismology, 池浦(2009)地震学会秋季大会, 池浦(2010)地震工学シンポジウム, 池浦(2013)地震学会秋季大会, 池浦(2015)地球惑星科学学会連合大会, 池浦(2017)地球惑星科学学会連合大会, 池浦(2018a)鹿島技術研究所年報, 池浦(2018b)地震工学シンポジウム, 池浦・加藤(2011)地震工学会論文集, 池浦・友澤(2012)地震工学会年次大会, 上野他(2002)験震時報

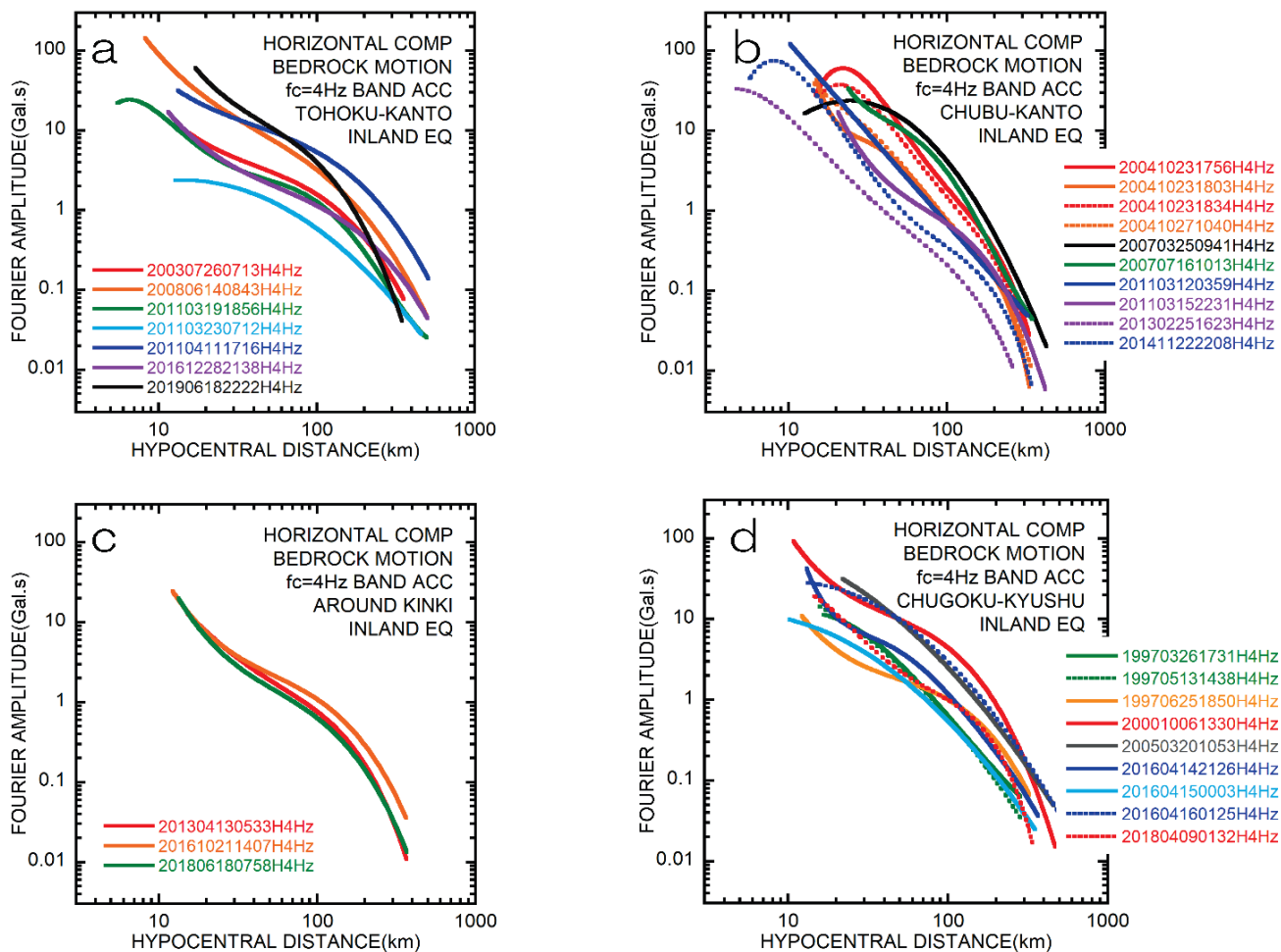


図1 周波数 4Hz 付近における基盤地震動水平成分加速度フーリエ振幅の距離減衰曲線

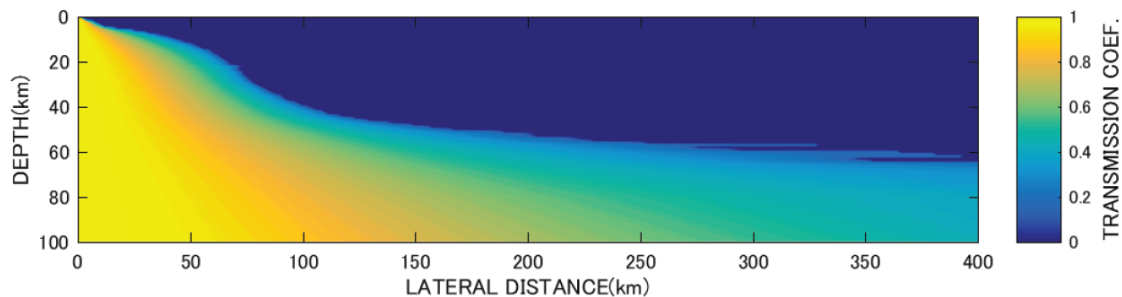
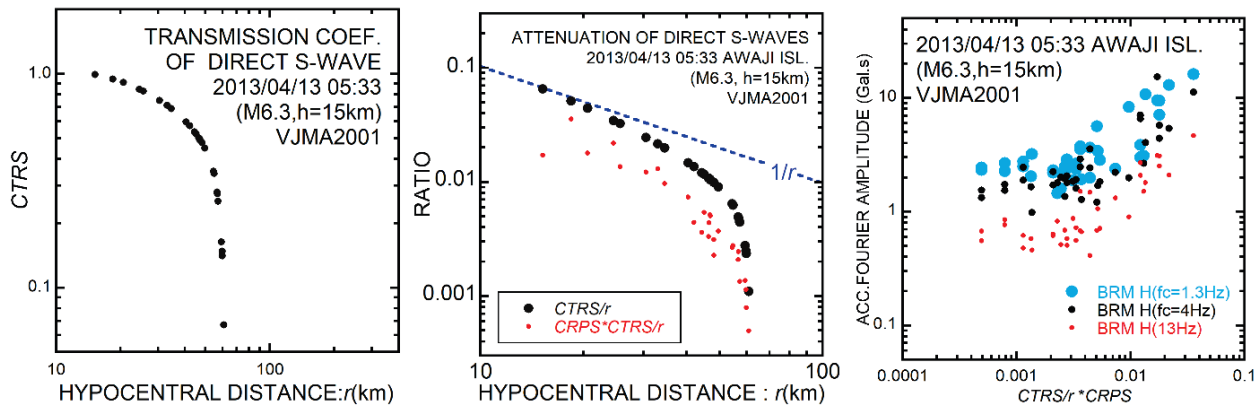


図2 JMA2001 の S 波速度構造に基づく直達 SH 波の透過率



(1) C_{TRS} と r の関係

(2) $C_{RPS} * C_{TRS}/r$ と r の関係

(3) $C_{RPS} * C_{TRS}/r$ と BRM の関係

図3 2013/04/13 05:33 淡路島の地震(M6.3,h=15km)による直達 S 波の距離減衰特性

Dynamic rupture simulation for moderate-sized strike-slip fault considering spatial heterogeneities on various initial conditions

*Hiroshi Kawase¹, Jikai Sun², Arben Pitarka³, Fumiaki Nagashima¹, Eri Ito¹

1. DPRI, Kyoto University, 2. Grad. School of Eng., Kyoto University, 3. Lawrence Livermore National Laboratory

滑り弱化モデルに基づく震源の非線形動的破壊シミュレーションにより、長周期から周期1秒前後のやや短周期域まで計算可能になってきた。その結果、これまで運動学的震源インバージョン結果に基づいて推計されてきたアスペリティあるいはSMGAの応力降下量を動的に再評価することが可能となってきた。またパラメタを適切に与えればこれらの運動学的インバージョンで得られた滑り量分布を再現できる可能性も見えてきた。

そこで本検討では、動的断層パラメタのうち断層面の微視的構成則を支配するパラメタの平均値とばらつき、およびその深さ方向分布に着目して、特に強震動予測レシピで設定されている明瞭なアスペリティあるいはSMGAを背景領域のランダムな不均質モデルに組み込み、その位置や深さ、応力降下量分布等に関するパラメトリック解析を行った。ベースとしたモデルはPitarka et al. (2009)が用いた、運動学的震源インバージョンによる滑り量の空間分布から求めた k^2 モデル(Mai and Beroza, 2002)に基づき断層面上のパラメタをランダムに変動させたモデルである（応力変動は k^1 を仮定）。解析方法はDalgner and Day (2007)のsplit-node FDMであり、通常の滑り弱化構成則を用いる。解析対象とした断層モデルは長さ最大25km、幅最大18kmで、マグニチュードは6.5~6.7相当の地殻内地震で、鉛直の完全横ずれ断層である。地盤構造は一次元平行成層地盤で厚さ500mの堆積層、500mの軟岩層の下に5kmの深さまで浅部岩盤構造を仮定し、5km以深には半無限の基盤が広がっているものとした。アスペリティはレシピに従って大小2つを設定し、その応力降下量は断層全体の平均応力降下量3.2MPaの2倍の6.4MPaとした。主要なパラメタとして、アスペリティ深さ、アスペリティ間距離、破壊開始点位置、臨界滑り弱化変位量 D_c 、地表面付近の応力降下量の勾配、応力降下量変動幅の深さ依存性、および堆積盆地構造を選定した。

例えば、アスペリティ深さをパラメタとして、断層面上の平均滑り量と最大滑り量、および地表面上の平均速度と最大速度について得られた結果からは、アスペリティが浅いほど平均滑り量も最大滑り量も大きくなること、アスペリティが浅いほど平均地表面速度(PGA)も大きくなること、アスペリティが浅いほど最大PGAも大きくなる傾向にあるがその変動幅が大きいこと、がわかった。同様に、破壊開始点位置をパラメタとして得られた結果から、破壊開始点位置に平均滑り量・最大滑り量とも大きな影響は受けないが、わずかに浅い方が大きいこと、平均PGAも最大PGAも大きな影響を受けないが、非常に深い場合や浅い場合にはわずかに小さめとなること、がわかった。このパラスタの結果から、アスペリティ内の滑り量分布には破壊伝播のフォワードディレクティブティ効果が影響していることがわかった。これは当然地表面での断層表出位置とサイズにも影響を与える。

地表面表出長さとその滑り量（オフセット量）に最も大きな影響を与えるのが断層浅部の応力降下量の設定である。添付図の左には浅部5kmでの応力降下量の勾配を小さくして0kmでも多少の応力降下量を与えたケース、中央にはそれを大きくして0kmでは負の応力降下量になるようにしたケースの応力降下量分布（上）と計算された滑り量分布（下）を示す。アスペリティ間距離は最小としている。この図から、アスペリティが深くても浅部に応力降下量を与えると地表面表出する断層滑り量はかなり大きくなること、浅部に応力降下量を与えなければそれは滑り量も小さく地表表出長さも短くなることがわかる。図の右には応力降下量の勾配を変動させた際の最大滑り量・平均滑り量の変動（上）と、PGAの最大値と平均値の変動（下）を示したが、最大滑り量は浅い部分に応力降下量を仮定した場合には少し増大するが、平均滑り量はほとんど変化しないこと、しかしPGAには大きな影響があり、勾配が緩いほど最大PGAは著しく大きくなることがわかる。これは断層運動が表出することでその近傍観測点に対するその運動に伴う速度パルスが観測されるためで、破壊に伴ってエネルギーが放出され能動的に浅い部分が動くことは結果として局所的に大きな速度パルスを生成する

地点が生じることを示しており、そこでは非現実的な解を与える可能性が指摘できる。

今回は導入アスペリティの応力降下量自体は深さによらず同じとしたが、応力降下量の深さ依存性を与える影響は大きく、断層浅部での運動をコントロールする断層面上のパラメタに深さ依存性を導入することで、SMGAからのパルスと地表に表出する断層すべりの両者を統一的に表現する現実的な断層破壊シミュレーションが可能になるものと期待される。

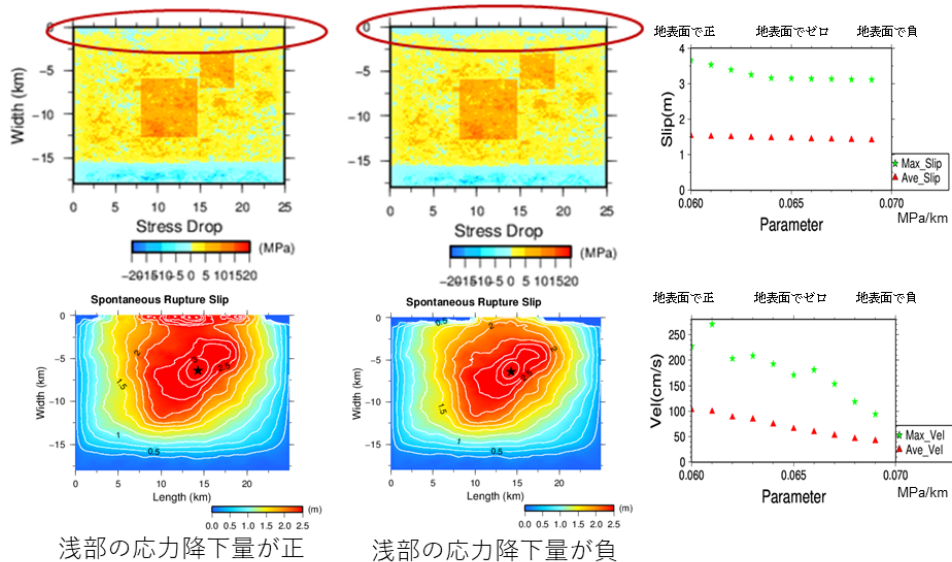


図 浅部の応力降下量の勾配による最終滑り量の変化と地表面最大速度

Room A | General session | S15. Strong Ground Motion and Earthquake Disaster

[S15]PM-2

chairperson:Hiroe Miyake(The University of Tokyo), Yosuke Nagasaka(Port and Airport Research Institute)
Mon. Sep 16, 2019 2:45 PM - 3:45 PM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

[S15-10] Recipe for Predicting Strong Ground Motion on the SCEC Broadband Platform

*Hiroe Miyake¹, Asako Iwaki², Nobuyuki Morikawa², Takahiro Maeda², Hiroyuki Fujiwara² (1. The University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)
2:45 PM - 3:00 PM

[S15-11] **Moment– Area Scaling Assuming Constant Stress Drop from Small to Great Crustal Earthquakes**

*Kazuhito Hikima¹, Akihiro Shimmura¹ (1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.)
3:00 PM - 3:15 PM

[S15-12] Source Model of the 2008 Northern Iwate Intraslab Earthquake using Ground Motion Records in Wide Area

*Shuji Kumagai¹, Shinya Tanaka², Kensuke Arai³ (1. Tohoku Electric Power Co.,Inc., 2. TOKYO ELECTRIC POWER SERVICES CO.,LTD., 3. SHIMIZU CORPORATION)
3:15 PM - 3:30 PM

[S15-13] Pseudo point-source model with variable corner frequency: application to the Miyagi-Oki earthquake of 26 May, 2003

*Yosuke Nagasaka¹, Atsushi Nozu¹ (1. Port and Airport Research Institute)
3:30 PM - 3:45 PM

Recipe for Predicting Strong Ground Motion on the SCEC Broadband Platform

*Hiroe Miyake¹, Asako Iwaki², Nobuyuki Morikawa², Takahiro Maeda², Hiroyuki Fujiwara²

1. The University of Tokyo, 2. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

米国・南カリフォルニア地震センター SCEC で構築されている広帯域地震動プラットフォームは、第三者が Verification と Validation (コード検証と妥当性確認) が行える国際的な強震動ツール群である。内陸地震を対象とした複数の震源モジュールとグリーン関数モジュールが公開され、随時更新されている。シミュレーションによる偶然的バラツキの評価を目的としており (e.g., Iwaki et al., 2017), 1つのシミュレーション当たり50ケースを計算し、平均と標準偏差を得ることを基本としている。そのため、アスペリティ位置を含むすべり分布は常に、場合によっては破壊開始点もランダムに配置する特徴がある。2019年4月に公開された v19.4.0 バージョン <https://github.com/SCECcode/BBP> では、米国・韓国・日本の約8種類の強震動予測手法が実装されており、地震調査研究推進本部の強震動予測レシピに関しては、下記2種類の手法が実装されている。

＜Irikura Recipe Method 1＞ 単一セグメントと複数セグメントに対応している。震源モジュールは、地震調査研究推進本部の強震動予測レシピを実装している。特性化震源モデルの破壊伝播速度は可変であるが、Pitarka et al. (2017, 2019) の検討に基づき、強震動予測レシピで採用しているS波速度の72%ではなく80%を基準値として設定している。グリーン関数モジュールは、Graves and Pitarka (2010, 2016) に準拠し、長周期側は一次元水平成層構造を対象としたFK法と、短周期側は Boore (2009) および Frankel (1995) に基づく統計的グリーン関数法のハイブリッド波形合成計算が行われる。

＜Irikura Recipe Method 2＞ 単一セグメントに対応している。震源モジュールは、Irikura Recipe Method 1 と同じく地震調査研究推進本部の強震動予測レシピを実装している。グリーン関数モジュールは、長周期側は Irikura Recipe Method 1 と同じく一次元水平成層構造を対象としたFK法であるが、短周期側は地震調査研究推進本部の強震動予測レシピで採用されている壇・佐藤 (1998) の統計的グリーン関数法のハイブリッド波形合成計算が行われる。このうち、地震調査研究推進本部の強震動予測レシピの統計的グリーン関数法は、v19.4.0 に先駆けて、先名・藤原 (2011) および防災科学技術研究所 J-SHIS から公開されている。SCEC 広帯域地震動プラットフォームの Irikura Recipe Method 2 の説明書に記載しているが、注意事項として、長周期側と短周期側の地震動計算を行う前に、ユーザーは両者に入力する震源の応力降下量 (stress drop) の整合性を確認する必要がある。また、断層上端が極めて浅い場合に地盤増幅特性が足りないことがあるため、現在調整を進めている。

これらの2手法は震源モデルおよび長周期側のグリーン関数の計算は同一であるが、短周期側のグリーン関数が異なるため、現時点では2手法による広帯域地震動計算結果が若干異なることを確認している。原因として、Irikura Recipe Method 1 の短周期側の計算には、応力パラメータ (Brune stress parameter) が一律 5 MPa と仮定されているが、Irikura Recipe Method 2 では、強震動予測レシピでその都度計算された応力降下量を使用する違いがある。また、Pitarka et al. (2019) では、2016年熊本地震の計算において最適な応力パラメータはやや高めの 6 MPa であるとの報告がなされており、地域性や破壊伝播速度を含めた今後の検討が必要である。本発表では、単一セグメントの日米の内陸地震を対象として、SCEC 広帯域地震動プラットフォームに実装されている複数の手法による検証結果を紹介する。

本研究の一部は、独立行政法人日本学術振興会の二国間交流事業オープンパートナーシップ共同研究による支援を得た。

Moment–Area Scaling Assuming Constant Stress Drop from Small to Great Crustal Earthquakes

*Kazuhito Hikima¹, Akihiro Shimmura¹

1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.

【はじめに】 断層面積(S)と地震規模(地震モーメント(M_0), マグニチュード(M))とのスケーリングは地震活動の理解や, 想定地震の地震動予測等に不可欠である. 内陸地殻内地震のスケーリングについては, 地震発生層の厚さの制限のために, 地震規模によりスケーリングが変化し, $M < 7$ 程度の小～中規模地震では応力降下量($\Delta\sigma$)=一定を仮定し, 大地震ではすべり量(D)が断層長さ(L)に比例するL-modelを前提とした式(2-stage, bilinear scaling)や, さらに長大な断層では D =一定(W-Model)となる3-stageのスケーリングも提案されている(Murotani *et al.*, 2015). しかし, これらでは各ステージでの物理条件が異なるため, 中小地震と大地震で地震規模との関係や $\Delta\sigma$ の値が変化する. 一方で, 物性値としての観点からは $\Delta\sigma$ は地震規模によらずほぼ一定となるのが適当なように思われる. 引間・新村(2018)では既存の応力降下量の計算式をもとに, 中小～大地震まで $\Delta\sigma$ が一定となるような $M_0 \sim S$ のスケーリングについて検討を行った. 本報告ではそれを元に既存データとの関係を整理し直した結果を紹介する.

【スケーリングの定式化】 Chinnery (1964) による地表垂直横ずれ矩形断層に対する応力降下量の計算式をもとに検討を行う. Anderson *et al.* (2017) は, 既にこの式を使い $M_w \sim L$ のスケーリングを検討している. それらを発展させ, $M_0 \sim S$ の関係を導出した. これらの関係は地表断層が生じるような規模の地震に適応可能である. 一方, 地中断層については, Chinnery (1969)による地中横ずれ矩形断層に対する応力降下量の計算式を元に, 同様に $M_0 \sim S$ の関係を導出した. なお, これらの応力降下量計算式では, 一般的なクラックモデルのような断層面上で応力降下量が一樣となるモデルと異なり, すべり量が一樣な場合の断層中心での応力降下量が計算される. そのため, その補正として, Chinneryの式により求まる応力降下量の値を2倍したものが, クラックモデルでの応力降下量に相当するとしてスケーリング式を導出した. 導出した式の概要は図に示す. また, 仮定した補正係数が妥当かどうかをチェックするため, 定式化したスケーリング式により設定される平均すべり量を仮定した断層モデルにより, 実際に仮定した応力降下量が計算されることを, Okada (1992)を用いた静的ひずみのモデル計算を行って確認した.

【実地震データとの比較】 過去の実地震のパラメータのデータベースとしては, 長大地震の震源パラメータを含み, また信頼性の観点から既に整理がされているものを既往文献を参照して使用した. 具体的には, Somerville *et al.* (1999), Murotani *et al.* (2015), 及び, Stirling *et al.* (2002)の断層パラメータのうち信頼性の高いデータを整理したHashimoto (2007)からパラメータを収集し, 重複する地震を除外して使用した. これらの地震のうち, $M_0 = 7.5 \times 10^{18}$ Nm 以上の地震を対象に適切なパラメータを設定した. はじめに, 断層長さと断層幅の関係について整理し, 長大断層では断層幅が概ね飽和していることを確認した. その平均値は17.8 kmであった. 次に, その値をもとに, 飽和断層幅 $W_{\max} = 18$ km と設定した上で, 各地震との残差が最小となる応力降下量の値をグリッドサーチにより求めた. その結果, $\Delta\sigma = 3.0$ MPa が得られた. これらの値により, 地表地震断層に対するスケーリング式が設定される. なお, 横ずれ断層と縦ずれ断層との間に有意な差は見られなかったため, 両者を一括して検討した.

【おわりに】 飽和断層幅 $W_{\max}$ を18 km程度, 応力降下量 $\Delta\sigma = 3.0$ MPaと設定した場合に, 提案式と既存データとは良い対応を示した. 今後は, これらの式に対して, 国内外の地震を含む, より新しいデータベースを精査した上で追加し検討していく必要がある. また, 地中断層となる規模が小さな地震についても, 合わせて検討を進めていきたい.

<参考文献> 引間和人・新村明広: 地震規模によらず応力降下量が一定となる内陸地殻内地震のスケーリング

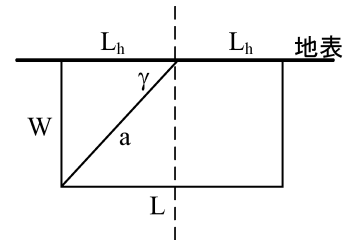
に関する検討, 第15回日本地震工学シンポジウム, PS1-01-01, PP.2656-2665, 2018.

○地表垂直横ずれ矩形断層を仮定した M_0 - S の関係式

$$M_0 = \frac{\pi}{\sqrt{C_{LW}C(\gamma)}} \Delta\sigma S^{3/2}, \quad L/C_{LW} < W_{max} \quad (1a)$$

$$M_0 = \frac{\pi}{C(\gamma)} \Delta\sigma W_{max} S, \quad L/C_{LW} \geq W_{max} \quad (1b)$$

(1a)は飽和断層幅 W_{max} 以下の幅の場合, (1b)は断層幅が飽和した場合



両辺の対数をとると以下で表される.

$$\log M_0 = \frac{3}{2} \log S + \log \Delta\sigma + \log \left\{ \frac{\pi}{\sqrt{C_{LW}C(\gamma)}} \right\}, \quad L/C_{LW} < W_{max} \quad (2a)$$

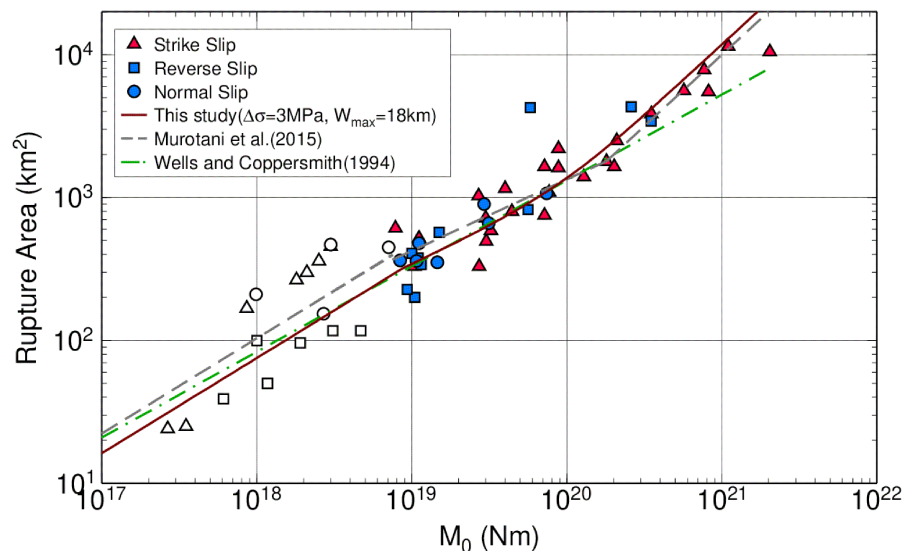
$$\log M_0 = \log S + \log \Delta\sigma + \log \left\{ \frac{\pi}{C(\gamma)} W_{max} \right\}, \quad L/C_{LW} \geq W_{max} \quad (2b)$$

$$L_h = L/2, \\ a = (L_h^2 + W^2)^{1/2}, \\ C_{LW} = L/W$$

ここで, $C(\gamma)$ は形状を表す係数で, 以下の式で計算される.

$$C(\gamma) = 2 \cos \gamma + 3 \tan \gamma - \frac{\cos \gamma \sin \gamma (3 + 4 \sin \gamma)}{(1 + \sin \gamma)^2} \quad (3)$$

○既存データとの比較



$\Delta\sigma=3.0$ MPa, $W_{max}=18$ km としたときの (2) 式の関係 (実線) と断層パラメータとの比較.

Murotani *et al.* (2015), Wells and Coppersmith (1994) も比較のためにプロットした. 白抜き点は規模が小さいためパラメータ設定に用いなかった地震.

Source Model of the 2008 Northern Iwate Intralab Earthquake using Ground Motion Records in Wide Area

*Shuji Kumagai¹, Shinya Tanaka², Kensuke Arai³

1. Tohoku Electric Power Co.,Inc., 2. TOKYO ELECTRIC POWER SERVICES CO.,LTD., 3. SHIMIZU CORPORATION

2008年7月24日0:26の岩手県沿岸北部のスラブ内地震（Mw6.8）を対象として、浅野・岩田(2009)では経験的グリーン関数法により震源モデルの推定を行っている。しかしながら、震源モデルの推定に用いたのは岩手県内のKiK-net観測点のみであり、特に破壊開始点やライズタイムといったパラメータは、震源直上の4観測点のみから決定されている。このように、震源との位置関係が限定された観測点のみで震源モデルを推定すると、決定されたモデルパラメータに本震時の指向性効果が含まれてしまう可能性がある。そこで、本稿においては、より広域で観測記録を再現可能な震源モデルの推定を目指して、青森県の観測点も加えて浅野・岩田(2009)のモデルパラメータの再検討を行った。

検討対象観測点として、浅野・岩田(2009)で用いられている岩手県内のKiK-net観測点に加えて、青森県内の観測点も用いた。経験的グリーン関数としては、浅野・岩田(2009)と同様に2008年7月24日11:27の余震（Mw5.1）を用いた。

まず、岩手県内の観測点と青森県内の観測点それぞれについて、本震と余震のフーリエスペクトル比を確認した。その結果、岩手県内と青森県内ではフーリエスペクトル比の特徴に有意な差が見られた。また、浅野・岩田(2009)の震源モデルを用いて経験的グリーン関数法で青森県内の観測点の地震動を計算したところ、観測記録と必ずしも整合しない結果となった。

そこで、浅野・岩田(2009)モデルのパラメータを再検討することで、青森県内の観測点にも適用可能な震源モデルの構築を試みた。具体的には、ライズタイム及び強震動生成域（SMGA）の破壊開始点、破壊開始時刻を再検討した。これらのパラメータを変動させ、検討対象とした全ての観測点で再現性が高くなる最適モデルの選定を行った。最適モデルの選定には減衰定数5%の擬似速度応答スペクトルの適合度を基準とした。適合度の定量化のために、Dreger *et al.* (2015)によるCombined Goodness-of-fit(CGOF)を用いた。その結果、2つのSMGAのうち、大きいほうのSMGAの破壊開始点を中央下端付近に変更すると再現性が向上することが分かった。また、ライズタイムについては、青森県内の観測点では、長めにした方が観測記録の再現性が良く、岩手県内の観測点では短めの方が観測記録の再現性が良いことが分かった。浅野・岩田(2009)モデルのライズタイムの値は同規模のスラブ内地震と比較して短くなっており、この傾向を反映していると考えられる。SMGAの破壊時刻は浅野・岩田(2009)と同程度となった。得られた震源モデル(図1)を用いて地震動評価を行うことで、浅野・岩田(2009)の震源モデルに比べて青森県内の観測点の再現性が向上することと共に、岩手県内の観測点においても、浅野・岩田(2009)の震源モデルと同程度の再現性となることを確認した(図2)。

謝辞： 本研究では、防災科学技術研究所KiK-netの強震記録を使用しました。

参考文献： 浅野・岩田(2009), 日本地球惑星科学連合2009年大会, S152-009. Dreger *et al.* (2015), Seismological Research Letters, Vol. 86, pp. 39-47. Suzuki *et al.* (2009), Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 99, No. 5, pp. 2825-2835.

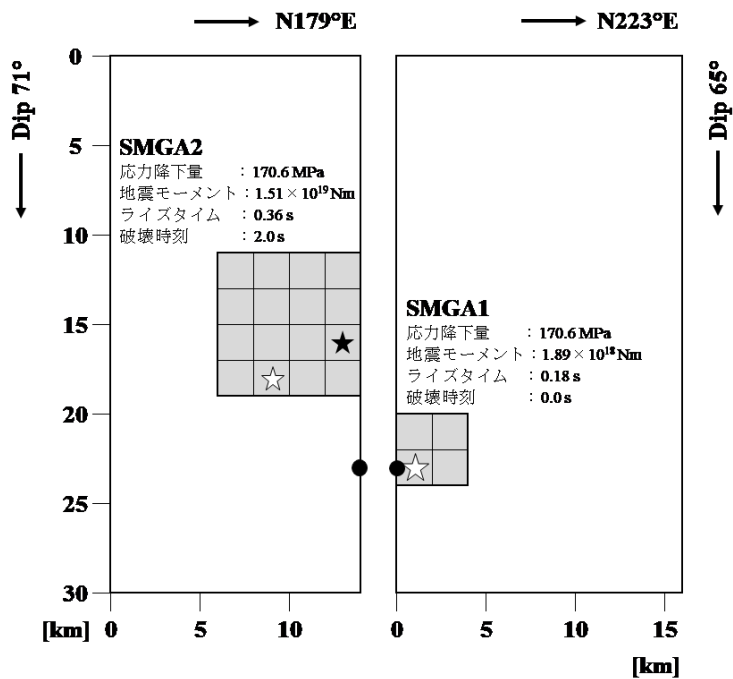


図1 震源モデルの概念図

巨視的断層面はSuzuki *et al.* (2009)、☆：破壊開始点、●：セグメントが接する点
★：Asano and Iwata (2009)の破壊開始点 (SMGA1は共通)

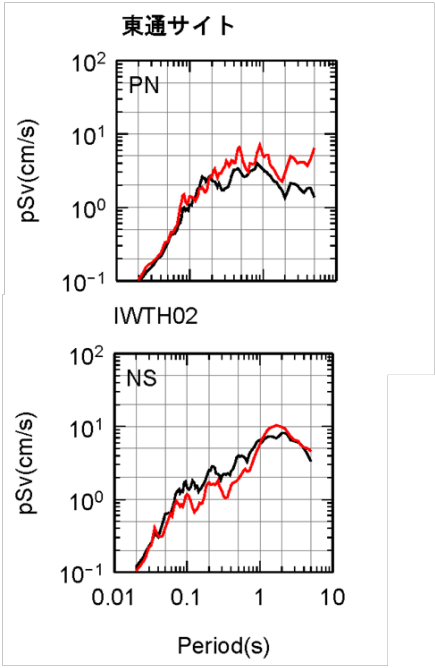


図2 地震動評価結果と観測記録の比較

赤線：地震動評価結果、黒線：観測記録
東北電力東通サイトはプラントノース成分、IWTH02はNS成分

Pseudo point-source model with variable corner frequency: application to the Miyagi-Oki earthquake of 26 May, 2003

*Yosuke Nagasaka¹, Atsushi Nozu¹

1. Port and Airport Research Institute

2003年5月26日に発生した宮城県沖の地震(M_j7.1)は逆断層成分を主とするスラブ内地震であり、これまでに様々な強震動シミュレーションのための震源モデルが提案されている。若井ら(2014)、野津・長坂(2019)は疑似点震源モデルと呼ばれるサブイベントの時空間的な広がりや陽には考慮しないモデルにより、3つのサブイベントを用いて強震動シミュレーションを行った。全体的な再現性は良好であったが、3つめのサブイベントについては観測記録に見られるディレクティビティの影響を再現できなかったことを課題として挙げている。また、浅野ら(2004)は経験的グリーン関数法を用いて3つの強震動生成領域(SMGA)からなるモデルを提案している。このモデルによると、最後に破壊する3つ目のSMGAは南側から破壊し北へ広がるとしている。そこで、本検討では、疑似点震源モデルにおいてディレクティビティの影響を考慮するため、新たにコーナー周波数に方位依存性を導入する改良を行った。また、改良したモデルを2003年5月26日に発生した宮城県沖の地震に適用し、モデルの検証を行った。

モデルの改良の出発点としては野津・長坂(2019)の震源モデルを用いた。最後に破壊するサブイベント3にのみコーナー周波数の方位依存性を導入してディレクティビティを考慮するが、コーナー周波数は理想的なユニラテラル破壊でのコーナー周波数の理論式を参考に次のように表すこととした。 $f_c() = f_{c0} / (1 - A \cos \theta)$ 、ここで f_{c0} はディレクティビティの影響がないときのコーナー周波数、 θ は破壊進行方向と対象地点方向のなす角、 A はディレクティビティの程度を表す係数である。理想的なユニラテラルな破壊であれば $A = V_r / V_s$ となり、 A がこの値より小さければ破壊がより等方的であることを意味する。本モデルでは対象地点が破壊進行方向にあるときはコーナー周波数は大きくなり、バックワード側では小さくなる。既存の疑似点震源モデルに対して新たに導入されたパラメータは、係数 A 、および破壊進行方向を表す角度の2つである。本手法は小断層の重ね合わせを行わないため、合成スペクトルに干渉による谷が現れないことが利点として挙げられる。

野津・長坂(2019)の震源モデルのサブイベント1および2のパラメータは固定し、フォワードモデリングによりサブイベント3のパラメータを再決定した結果、地震モーメントは 0.9×10^{19} Nm、 $f_{c0} = 0.5$ Hz、 $A = 0.70$ 、破壊進行方向は -20° となった。なお、破壊進行方向は滑り角の表示方法を参考に角度で表すこととし、走向方向に破壊が進むとき 0° 、浅部に破壊が進むとき 90° とした。浅野ら(2004)に従い、サブイベント3は走向 190° 、傾斜 69° の面にあるとしたため、 -20° は北向きで少し深部へ進む破壊を表し、浅野ら(2004)の傾向と一致している。その他のパラメータは野津・長坂(2019)と同じとした。野津・長坂(2019)ではサブイベント3の地震モーメントは 1.2×10^{19} Nm、コーナー周波数は 0.4 Hzであった。

対象地点および速度波形(0.2-2 Hz)の観測との比較を図に示す。野津・長坂(2019)では特に震源直上付近と南側の地点でS波部後半のパルスが過大評価であったが、本モデルでは改善されている。今後は他の地震での検証が課題となるが、内陸地殻内地震などで対象地点によって大きく異なるときにどの程度コーナー周波数が変動するかなどを調べる必要がある。

謝辞

本検討では防災科学技術研究所の強震観測記録を使用しました。ここに記して謝意を表します。

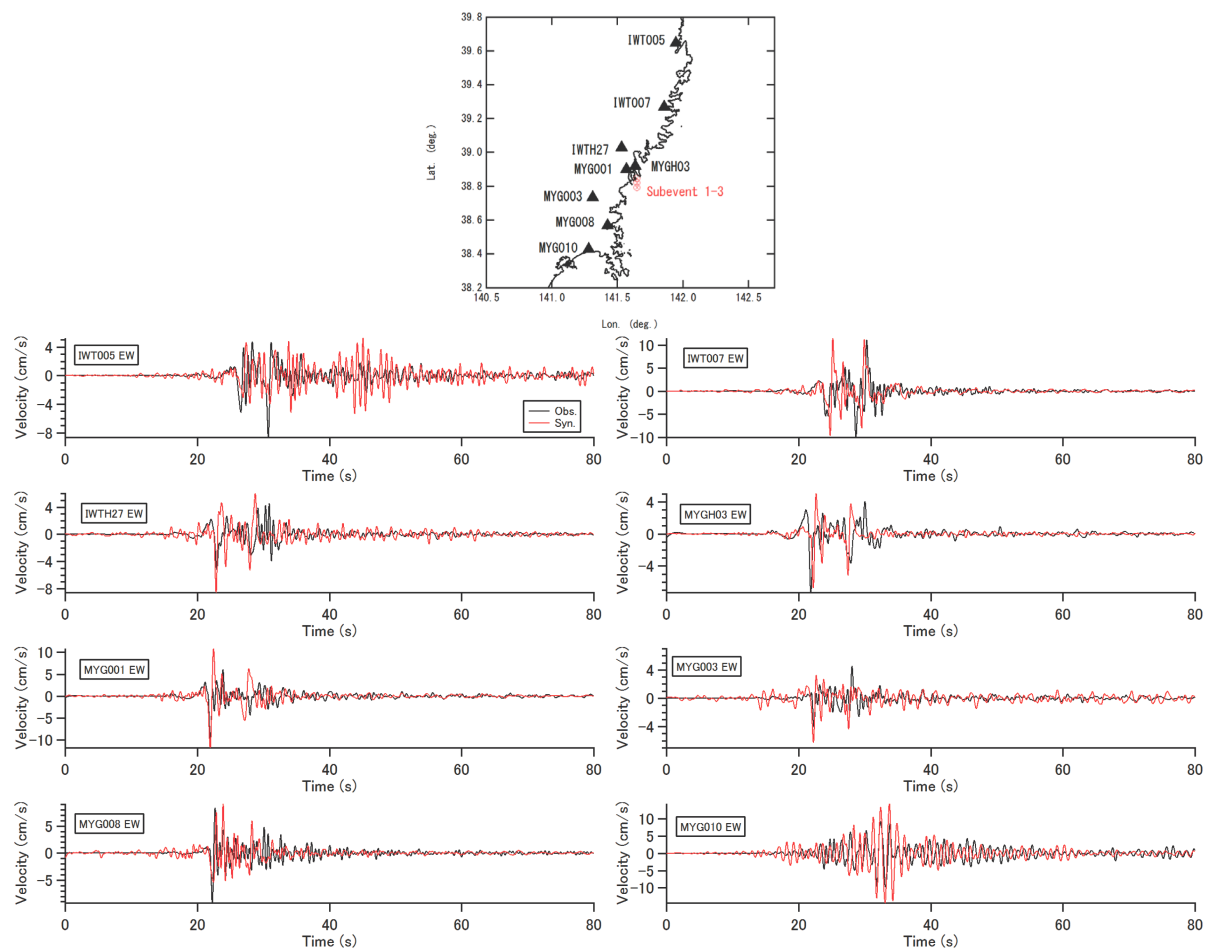
参考

浅野公之, 岩田知孝, 入倉孝次郎, 2004, 2003年5月26日に宮城県沖で発生したスラブ内地震の震源モデルと強震動シミュレーション, 地震2, 57, 171-185.

野津厚, 長坂陽介, 2019, 疑似点震源モデルによる強震動シミュレーションのスラブ内地震への適用, 港湾空港技術研究所報告, 58, 41-71.

若井淳, 長坂陽介, 野津厚, 2014, 疑似点震源モデルによる2003年5月26日宮城県沖スラブ内地震の強震動

シミュレーション, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), 70, I_818-I_829.



Room A | General session | S15. Strong Ground Motion and Earthquake Disaster

[S15]PM-3

chairperson: Naoki Hayashimoto (Japan Meteorological Agency), Kenji Kanjo (Takamisawa Cybernetics Co.Ltd.)
Mon. Sep 16, 2019 4:00 PM - 5:15 PM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

[S15-14] Utilization of OBS data for Earthquake Early Warning

*Naoki Hayashimoto¹, Jun Akutagawa¹, Keishi Noguchi¹, Ken Moriwaki¹, Masahiko Morimoto¹, Kuninori Okamoto¹, Yuki Koder², Koji Tamaribuchi², Mitsuyuki Hoshiba², Takeshi Nakamura³, Takashi Kunugi³, Shin Aoi³ (1. Japan Meteorological Agency, 2. Meteorological Research Institute, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:00 PM - 4:15 PM

[S15-15] Application of the Japanese Earthquake Early Warning Method (IPF method) to the 2018 Hualien earthquake in Taiwan

*Masumi Yamada¹, Dayi Chen², Koji Tamaribuchi³ (1. DPRI, Kyoto University, 2. CWB, Taiwan, 3. MRI)

4:15 PM - 4:30 PM

[S15-16] Estimation of fault geometry to obtain an accurate seismic intensity in real time

*YING XIAO¹, Masumi Yamada² (1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2. DPRI, Kyoto University)

4:30 PM - 4:45 PM

[S15-17] Is Mw so useful for earthquake early warning? : from viewpoint of real-time prediction of ground motion

*Mitsuyuki Hoshiba¹ (1. Meteorological Research Institute, JMA)

4:45 PM - 5:00 PM

[S15-18] Importance of the high-density observation for seismic strong motion disaster prevention

*kenji kanjo¹, isao takahashi¹, yoshinori shinohara¹, rami ibrahim¹ (1. Takamisawa Cybernetics Co.Ltd.)

5:00 PM - 5:15 PM

Utilization of OBS data for Earthquake Early Warning

*Naoki Hayashimoto¹, Jun Akutagawa¹, Keishi Noguchi¹, Ken Moriwaki¹, Masahiko Morimoto¹, Kuninori Okamoto¹, Yuki Kodera², Koji Tamaribuchi², Mitsuyuki Hoshiba², Takeshi Nakamura³, Takashi Kunugi³, Shin Aoi³

1. Japan Meteorological Agency, 2. Meteorological Research Institute, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

気象庁では令和元年6月27日より、国立研究開発法人防災科学技術研究所が運用している「日本海溝海底地震津波観測網（S-net）」および「地震・津波観測監視システム（DONET）」の観測データの緊急地震速報への活用を開始した。

海底地震計のデータは、海域で発生する地震に対して情報発表の迅速化に寄与することが期待される反面、陸上の観測点とは異なる設置環境や地盤特性に起因した地震波の増幅や、地震計が傾くことによって地震による揺れが過大に観測されるなどといった海底地震計特有の課題に対処する必要があった。本発表では、海底地震計データの活用のために実施した自動処理での対策と活用による効果について紹介する。

緊急地震速報では地震波を観測してから可能な限り早く情報を発表するため、発表する処理中枢の処理だけではなく、個別の観測点で自動処理（地震波の検出や到来方向の推定、最大振幅の算出など）を実施している。観測点での処理において、S-netは地震計の3成分が任意の方向を向いていることから各成分の回転補正が必要となる。加えて、特に強震動に見舞われた際には、揺れの途中で地震計の姿勢がわずかに変化し、重力加速度成分が地震動中に加速度オフセット変化として混入することがある。海底地震計の観測点処理においては、これらの異常を検知する処理を搭載し、中枢側に送信する情報に追加した。また、中枢側では、海底地震計データの振幅値をマグニチュード（M）計算に安定的に取り込むため、上下動変位M（林元・他、2019）の利用や、海底地震計においては多点で有効な振幅が得られるまで当該観測点での地点MをM計算の統計処理に参加させないなどといった異常振幅対策を実装した。

発表では、実事例をもとに海底地震計データの活用の効果について紹介する予定である。

Application of the Japanese Earthquake Early Warning Method (IPF method) to the 2018 Hualien earthquake in Taiwan

*Masumi Yamada¹, Dayi Chen², Koji Tamaribuchi³

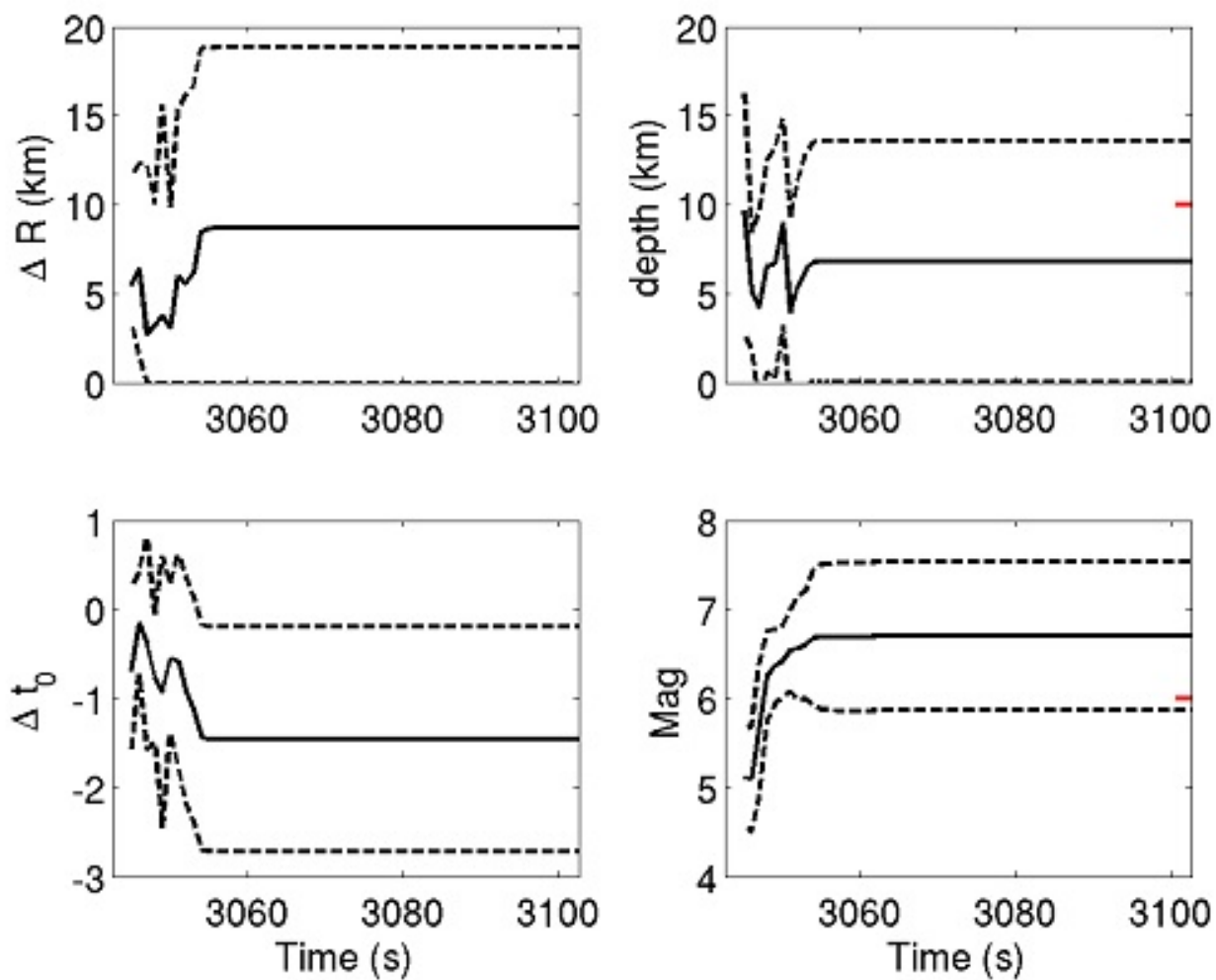
1. DPRI, Kyoto University, 2. CWB, Taiwan, 3. MRI

In Japan, earthquake early warning has been issued to public people since 2007 October. During the 2011 Tohoku earthquake, 44 false warnings (i.e., the largest expected seismic intensities were overestimated by at least two intensities or larger) were issued in a month, due to a large number of aftershocks (Sagiya et al., 2011).

The IPF method was developed in order to classify multiple earthquakes occurred at the same time (Liu and Yamada, 2014; Tamaribuchi et al., 2014; Yamada et al., 2014; Wu et al., 2015). Classical hypocenter determination method treats the P-wave arrivals of multiple stations within a certain short period of time as a single earthquake. Therefore, it becomes unreliable in the case of multi-event, because of the mixed waveforms from different sources. The IPF method uses Bayesian formulation that considers the possibility of having more than one event present at any given time, by using a likelihood function including the information of amplitude and non-triggered stations. The method has an advantage to determine the source location of multiple earthquakes occurred simultaneously. The method is effective especially right after a large earthquake, when many aftershocks occur closely in time and space.

We applied the IPF method used for the Japanese earthquake early warning system to the dataset of the 2018 Hualien earthquake in Taiwan. Figure shows the time series of the estimated source parameters (location error, depth, origin time, and magnitude). Note that the left side of the horizontal axis is the occurrence time of the earthquake. We assume there is no data transmission latency. At 3 s after the earthquake occurrence, the three stations were triggered and the event was detected. The location error is less than 10 km, but the magnitude was estimated as 5.1. The magnitude increased as the rupture propagated and the amplitude of the seismic signal became larger. The estimation was converged at 13 s after the origin time.

The offline simulation shows that we can detect the mainshock at 3 s after the origin time, and the magnitude is estimated as 6.3 at 7s after the origin time. The largest foreshock was detected at 4 s after the origin time, but the following $M_{\text{p}}5.2$ earthquake was not detected, since the P-wave arrival was contaminated by the coda of the first event. The result shows that the IPF method can be applicable for the Taiwanese seismic network.



Time series of the estimated source parameters.
Origin time is 15:00 on February 6

Estimation of fault geometry to obtain an accurate seismic intensity in real time

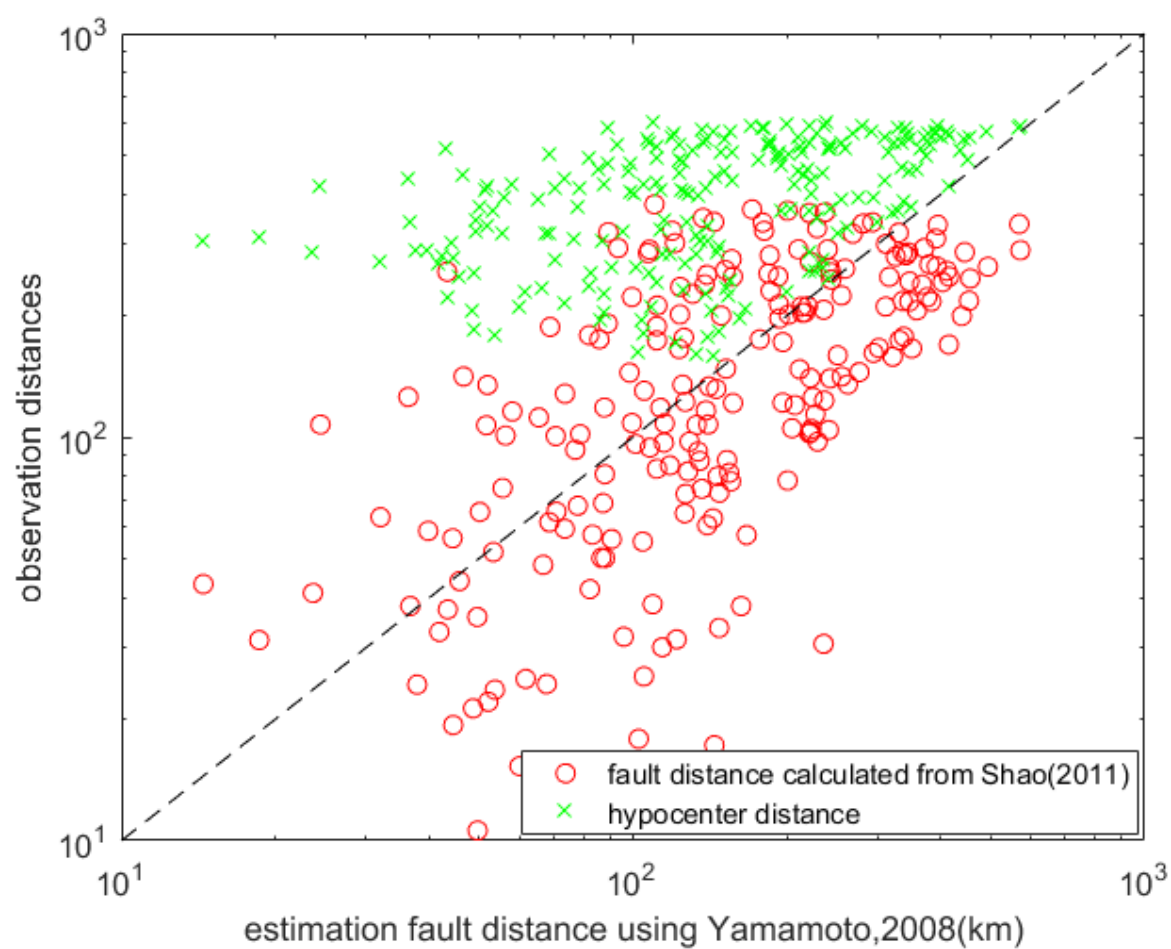
*YING XIAO¹, Masumi Yamada²

1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2. DPRI, Kyoto University

To get the seismic intensity more rapidly and accurately, we find a method to inferring the geometry of the rupture in real-time. Most of the Earthquake Early Warning system can determine the magnitude and hypocenter location only few seconds after P-wave data. For small earthquakes, we use point source model to predict seismic intensity. But for moderate-to-large earthquake, the extent of fault rupture may be hundreds of kilometers, which will cause underestimation of seismic intensity in the place near to the fault but far from the epicenter. To get the seismic intensity more accurately and rapidly, we propose a method to estimate the surface projection of a fault in real-time.

The method is based on the GMPE of shaking intensity proposed by Yamamoto et al. (2008). As the shaking intensity has a good correlation with fault distance, we can get fault distance of every site from estimated shaking intensity and published magnitude. We parameterize the fault geometry with epicenter, fault length, fault width, strike, and relative location of the fault to the epicenter. We find the most suitable parameters for fault dimension by minimizing the fault distance estimated from the GMPE and the fault distance estimated from the parameterized source model. The most probable parameter set is obtained by the grid search. We test the performance of this method on the 2011 Tohoku earthquake dataset.

Figure 1 shows the fault distance estimated from the GMPE, and observed distance. For the observation, we used hypocenter distance and fault distance based on the Shao' s source model. It shows the station close to the fault will cause more difference between hypocenter distances and fault distance. And the fault distance we calculated from the GMPE have a good correlation with observed fault distance. In our example of Tohoku earthquake, we showed that using the site with hypocenter distance less than 400km can get a good prediction of fault geometry. The azimuthal coverage is important for the robust parameter estimation.



Is Mw so useful for earthquake early warning? : from viewpoint of real-time prediction of ground motion

*Mitsuyuki Hoshiba¹

1. Meteorological Research Institute, JMA

はじめに：

地震動即時警報の分野で、我々は、“揺れから揺れを直接予測する”という考え方に則り、現時点の波動場を推定し、そこから未来の波動場を予測する手法（波動場推定法）の構築を進めている。一方で、いったん震源位置とモーメントマグニチュード（Mw）、さらにはスリップ量分布を迅速に推定し、地震動予測式（GMPE）により揺れの大きさを予測する考え方（震源情報推定法）を進めている研究も多くある。後者の考えでは、Mwやスリップ量分布をいかに正確に、また、迅速に推定するかがカギとなるので、それらを追求する研究が多いものの、揺れの予測の正確性や迅速性の観点まで進めて議論しているものは多くない。

そこで、地震動の即時予測の観点から、地震動即時警報でのMwやスリップ量分布の有効性について考察する。

周波数の違い：

（超高層ビルなどの特殊な建築物を除けば）被害に関係する地震動の周波数は、数秒から数Hz、つまり、およそ1Hz付近であることが知られており、地震動即時警報でも、この帯域の地震動の即時予測が求められる。一方、Mwは永久変位、あるいは、かなりの低周波から求められることが多い。Mwが同じ地震であれば、震源からの輻射量は、低周波側では同じと思われるものの、1 Hz付近の高周波側では、ストレスドロップの違いなどにより異なることも多い。よって、Mwを正確に求めたとしても、必ずしも、1 Hzの波の輻射量を正確に推定したことにはならない。

輻射域の違い：

2011年の東北地方太平洋沖地震（Mw9.0）では、多くの研究者が日本海溝付近に大きなスリップ量が分布する震源像を求めている。これらは、低周波側の解析により求められたものであり、高周波の解析による震源像はかなり異なっている（Kurahashi and Irikura, 2011; Asano and Iwata, 2012, など）。彼らは、4～5個の強震動生成域（SMGA）から高周波が輻射したと推定している。これらのSMGAは、大きなスリップの場所とは異なり陸域にかなり近い（図1）。同様に、低周波と高周波の生成域の違いは、2004年Sumatra地震（Mw9.2）や2010年Maule地震（Mw8.8）でも報告されている（Lay et al., 2012）。このことは、正確にスリップ量分布を求めても、かならずしも、1 Hzの波の輻射の分布を推定したことにはならないことを示唆している。

タイミングの違い：

最近の報告（Minson et al. (2018), 干場（2016）など）では、破壊の進展に伴うMwの時間発展をリアルタイムで推定できたとしても、震源域付近では、GMPEを介した予測は強震動の出現の後になる（つまり、警報が間に合わない）ことを指摘している。Mwの時間発展は単調増加すること、また、GMPEを介した揺れの強さの予測もMwの増加とともに時間的に単調増加することにより、揺れの強さの予測が最も大きくなるのは、破壊の終了時点になる。一方、強い揺れが輻射するのは、当然、破壊の終了よりも前である。同様に、破壊の途中の時刻tcの時点でMwの時間発展をリアルタイムで推定できたとしても、Mwが最大となるのはtcの時

点であって、強い揺れが輻射していた時間は t_c よりも前である。強い揺れが輻射する時間は M_w が最大になる時間（つまり、 t_c ）よりも前であることにより、警報が間に合わないことが生じる。

さいごに：

一般に、波動現象の予測は、波源（域）と輻射量が分かれば行うことができる。これを地震動現象に当てはめると、震源（域）と”マグニチュード”が分かれば未来を予測することができる、となる。では、このマグニチュードとして、 M_w が最も適切なのだろうか。地震動即時警報で求められているのは、1 Hz付近の揺れであって、 M_w に対応する周波数ではない。この周波数の違いにより、輻射量や輻射域、輻射のタイミングが異なることが生じうる。地震動即時警報にとって、かなり低周波から推定される M_w やスリップ量は、強い揺れを予想するための直接的な証拠ではなく、間接的なものと位置づけられるだろう。

謝辞：K-net, KiK-net, 気象庁観測点の波形を使用した。

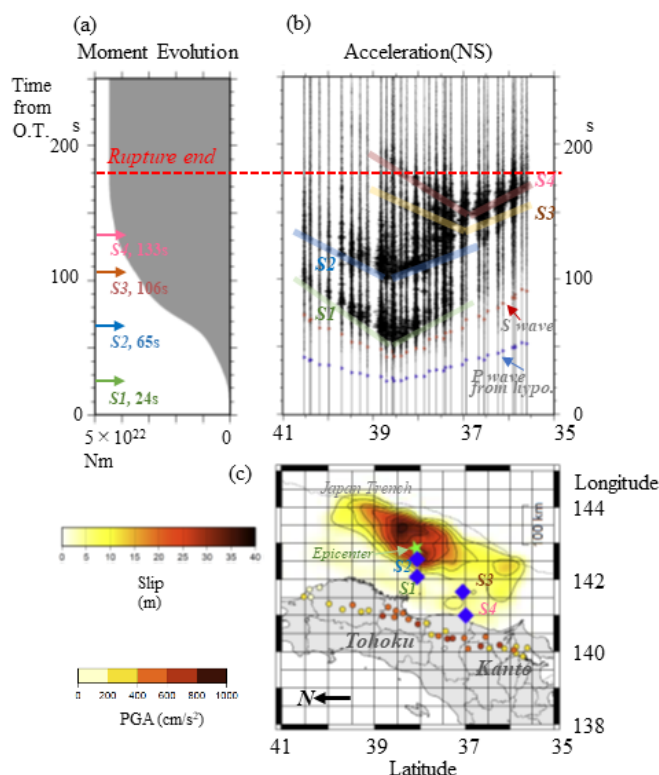


図1. (a) 2011年東北地方太平洋沖地震の地震モーメントの時間発展 (JMA, 2012) と強震動が生成した時間 (Asano and Iwata, 2012). (b) 図1cの地点で観測された加速度 (NS成分). (c) スリップ量分布 (JMA, 2012) と4つのSMGA (青ダイヤモンド, Asano and Iwata, 2012). 小さな丸は、図1bで用いた観測点を示す。

Importance of the high-density observation for seismic strong motion disaster prevention

*kenji kanjo¹, isao takahashi¹, yoshinori shinohara¹, rami ibrahim¹

1. Takamisawa Cybernetics Co.Ltd.

観測される地震動は震源・経路・サイトの項の相乗効果で示される。強震動はサイトの効果により震度分布の細部が大きく異なる場合があるため防災上高密度観測の必要性が求められる。また、地震波はP波で約6km/sec.、S波で約3.5km/sec.で伝播する現象であるため、これをリアルタイム（秒単位）に捉えるためには、観測点間の距離は伝播する波の速度と同等ないしはそれ以下でなければならないことは自明のことである。

1996年から、日本全国の県レベルの自治体では計測震度計の整備を行いその数は4,000点を数え市街部では4～5kmの設置間隔を示し、都市部(東京都・大阪・京都府)では2～3kmの設置間隔を示しているが、その仕様は地震検知後10秒毎に計測震度を求め60秒後にその最大値をモデム通信により気象庁に送信して、地震発生約3分後に各地の震度として集計・発表されている。

我々は、上記自治体計測震度計で観測された秒パケットのPGA（表層最大加速度）をJ-SHIS（NIED）に示された表層増幅率から工学基盤でのPGAを求め、この工学基盤のPGAから再度J-SHISの表層増幅率を用いて、P、S伝播速度内の表層の1kmメッシュの震度をもとめ、面的なリアルタイム震度と最大値でクリップした最大震度分布図を作成した【手法-1】。また、震源で放射されるS/P波の振幅比5倍を用いて、上下動成分を5倍した面的震度分布は入射数秒でほぼ最大震度分布を近似しているため予測に使用できることを示している【手法-2】。

現在、世界各国で強震動予測をリアルタイムで行なうための、緊急地震速報（EEW）の配信が実現しているが、地震波検出およびデータ処理時間により制約を受ける”ブラインド・ゾーン”（Kuyuk and Allen（2003））が問題となっている。日本の気象庁（JMA）の発表するEEWも使用している観測網（平均観測点間距離20km）と震度5弱以上の判定（求めた震源情報（震央・規模（M）と距離減衰の経験式による）のため、約8秒の時間を要していることから、約40kmほどのブラインドゾーンをしめすため、内陸直下に発生する被害地震では、最も警報を必要とする破壊域中心部にその情報が届かないという現実問題を抱えている。

講演では、上記自治体データを用いてリアルタイム（秒単位）に震度および最大震度分布を動画で示すことにより、高密度観測網は発生した地震の規模（大・小）、深い・浅い、遠い・近いという震源情報を即時に得ることが出来ることを、P波検知は主要動到達前にゆれの強さと分布を把握できることを示す。

また、東京都周辺で深さ50～60kmに発生したM5クラスの地震をOmega-Squea-Source-Modelにより、M7クラスに波形を評価し、上記手法により”首都直下地震”の強震動予測も試みた。

このように自治体独自の観測網で強震動予測が可能であり、得られた情報は地震防災に役立つものである。気象庁は処理データを集約することで、各観測点データをテレメータすることなく、緊急地震速報を改善することが可能である。

Room A | General session | S15. Strong Ground Motion and Earthquake Disaster

[S15]AM-1

chairperson: Takashi Furumura (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), Kotoyo Tsuchida (HANSHIN CONSULTANTS Co., Ltd.)

Tue. Sep 17, 2019 9:15 AM - 9:45 AM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

[S15-19] Propagation of distinctive Love-wave pulses in continental and oceanic environment

*Takashi Furumura¹, Brian LN Kennett² (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Research School of Earth Sciences, Australian National University)

9:15 AM - 9:30 AM

[S15-20] Strong Motion Estimation based on Presumed Velocity Model of Yokote Basin

Keita Sato¹, *Shinichi Matsushima², Florent De Martin³ (1. West Japan Railway Company, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. French Geological Survey)

9:30 AM - 9:45 AM

Propagation of distinctive Love-wave pulses in continental and oceanic environment

*Takashi Furumura¹, Brian LN Kennett²

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Research School of Earth Sciences, Australian National University

Abstract: The dispersion of Love waves traveling in low-velocity layer below the surface attenuates and elongates the wave shape with distances. However, in a typical continental structure, the group velocity of the Love wave becomes nearly constant in period 10-20 sec., leading to pulses of Love-waves over a distance of several hundred kilometers. A similar phenomenon in the much longer-period band (50-400 s) was called the G-wave by Gutenberg. In this study we examined the generation and propagation of Love-wave pulses observed from regional to teleseismic distances in continental and oceanic structure based on the analysis of observed broadband record and numerical simulation of wave propagation.

1. 大陸構造とLove波の伝播特性

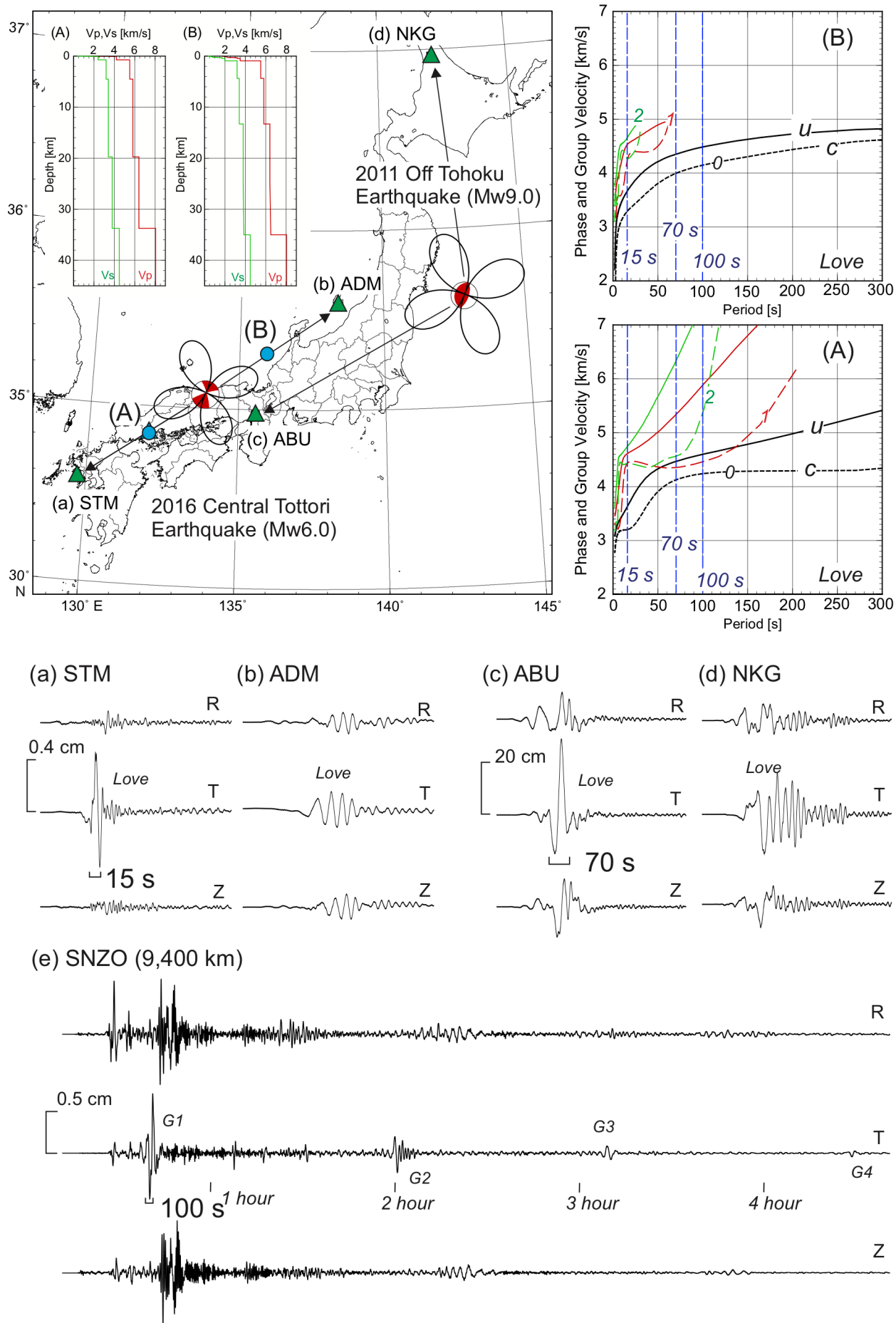
地表下の低速度層内を伝わるLove波は、伝播につれて分散により波群が長くそして振幅が小さくなる。ところが、一定の堆積層を有する大陸構造では、周期10-20秒にLove波の群速度が一定となる周期帯があり、パルス状のLove波が大きな振幅を保ちながら遠地まで伝播することができる（Furumura and Kennett, 2001；河本, 2017）が、海域経路では分散を起こして減衰する。同様の大幅Love波パルスは、より長周期帯（50秒～400秒）でも見られ、GutenbergによりG波と名付けられている。G波は、大陸構造より海域構造のほうが分散が少ない。本研究では、これらLove波パルスの大陸地殻ないし海域構造における伝播特性を、広帯域観測データ解析と地震波伝播シミュレーションにより評価する。

2. 近地で見られる15秒Love波パルス

2016年鳥取県中部地震（Mw6.2；深さ8 km）では、横ずれ断層の走行とその直交方向に周期15秒のLove波パルスが強く生成・伝播した（図a-STM）。九州のF-net STM観測点への中間地点（図A）の1次元速度構造（JIVSM；Koketsu, 2012）を用いてLove波の分散曲線を計算すると、周期15秒前後でLove波の基本モードの群速度が一定（ $u=3.2$ km/s）となり、パルス状のLove波が生成することがわかる。こうした特徴はRayleigh波の分散曲線には見られない。また、Love波パルスの位相速度（ $c=3.6$ km/s）は群速度よりずっと大きいために、パルス形状（位相）をサイクリックに変化させながら伝播することが、近地波動場のレコードセクションや地震波伝播シミュレーションから確認できる。一方、地殻が薄く（ <20 km）、堆積層が厚い日本海沿岸を伝播経路とする佐渡（ADM）観測点ではLove波パルスは見られず、振幅の小さな分散波形を示している（図b）。

3. 遠地で見られる40～300秒Love波パルス（G波）

より地震規模の大きな（Mw9.0）2011年東北地方太平洋沖地震（深さ24 km）の震源からは、Love波の放射の強い西南西方向の本州～九州～南西諸島にかけて、長周期（50～100秒）のLove波パルス（G波）の伝播が認められる（図c-ABU）。しかし、北海道（図d-NKG）では伝播経路の海域構造や石狩低地帯の厚い堆積層により長周期Love波パルスは分散を起こして崩れ、振幅が小さい。さらに遠地のIRIS 広帯域観測記録を調べると、震源距離とともにG波の卓越周期は長くなり、たとえばニュージーランド（図e-SNZO; 9,400 km）では周期100秒のG波が0.8 cmの振幅で記録されている。地殻が薄い海洋構造では、大陸構造よりも広い周期帯域（40～300秒）でG波が生成され、また群速度が位相速度に近い値を持つために、パルス形状（位相）を保ったまま、遠地まで伝播することができる。そして、対蹠点あるいは震央を通過する毎にPolar phase shiftにより位相が90度進む。



Observed Love wave pulses at regional distances; (a) (b) from the 2016 Central Tottori (Mw6.6) earthquake, and (c)(d) from the 2011 Off Tohoku (Mw9.0) earthquake. (e) shows a teleseismic record with long-period Love wave pulses (G1, G2,...). Focal mechanism and radiation pattern of Love wave is also shown. Right panels demonstrate the phase (c) and group (u) velocities of the fundamental (0) and 1st and 2nd higher-modes of Love wave

Strong Motion Estimation based on Presumed Velocity Model of Yokote Basin

Keita Sato¹, *Shinichi Matsushima², Florent De Martin³

1. West Japan Railway Company, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. French Geological Survey

常時微動観測で得られた水平上下スペクトル比及びRayleigh波位相速度分散曲線に基づいて推定された3次元地盤構造モデル（佐藤・他，2018）に基づき，横手盆地東縁断層帯北部を震源断層とした強震動シミュレーションを行うことで1896年陸羽地震の被害と強震動との関係について検討するとともに，横手盆地東縁断層帯南部を震源断層とした地震が発生した場合の横手市域における強震動予測を行う。

まず，横手盆地内で大きな被害をもたらした，1896年陸羽地震の強震動シミュレーションを行う。地震調査研究推進本部（以下，地震本部）が公開している横手盆地東縁断層帯北部の想定地震ケース1の断層モデル（地震本部，2005）を震源断層と想定する。地盤構造による影響を比較するため，佐藤・他(2018)の推定地盤構造モデルに加え，防災科学技術研究所のJ-SHISで公開されている深部地盤構造モデルを用いた強震動シミュレーションも行った。計算には，スペクトルエレメント法の一つである，EFISPEC3D（De Martin, 2011）を用いる。その結果，佐藤・他(2018)の推定地盤構造モデルを用いた場合に，横手市西側まで達する最大速度（PGV）が大きい領域が現れた。このようなPGV分布はJ-SHIS深部地盤構造モデルを用いた場合には見られず，1896年陸羽地震の際に被害の大きい地域が横手市周辺にも現れた原因については，横手市周辺で基盤深さが深くなる地盤構造による影響が大きいと考えられる。

次に，横手市付近を通る横手盆地東縁断層帯南部において，横手市に近い北側のアスペリティから破壊が開始する想定地震ケース4の断層モデル（地震本部，2005）を用いて，佐藤・他(2018)の推定地盤構造モデルに基づく強震動予測を行う。その結果，図に示すように横手市西側において基盤が急激に深くなっている領域においてPGVが大きくなり，特に東西方向で顕著に見られる。これは，横手市周辺における東西方向の基盤深さ変化の方が南北方向に比べて急峻であることや，破壊開始点が横手市のほぼ真東に位置していることが影響していると考えられる。

謝辞：本研究はJSPS科研費JP16K06573と東大地震研－京大防災研拠点間共同研究課題募集型研究「詳細地盤構造と活動セグメントの新たな解釈に基づく歴史地震の断層モデル構築に関する研究」の助成を受けた。

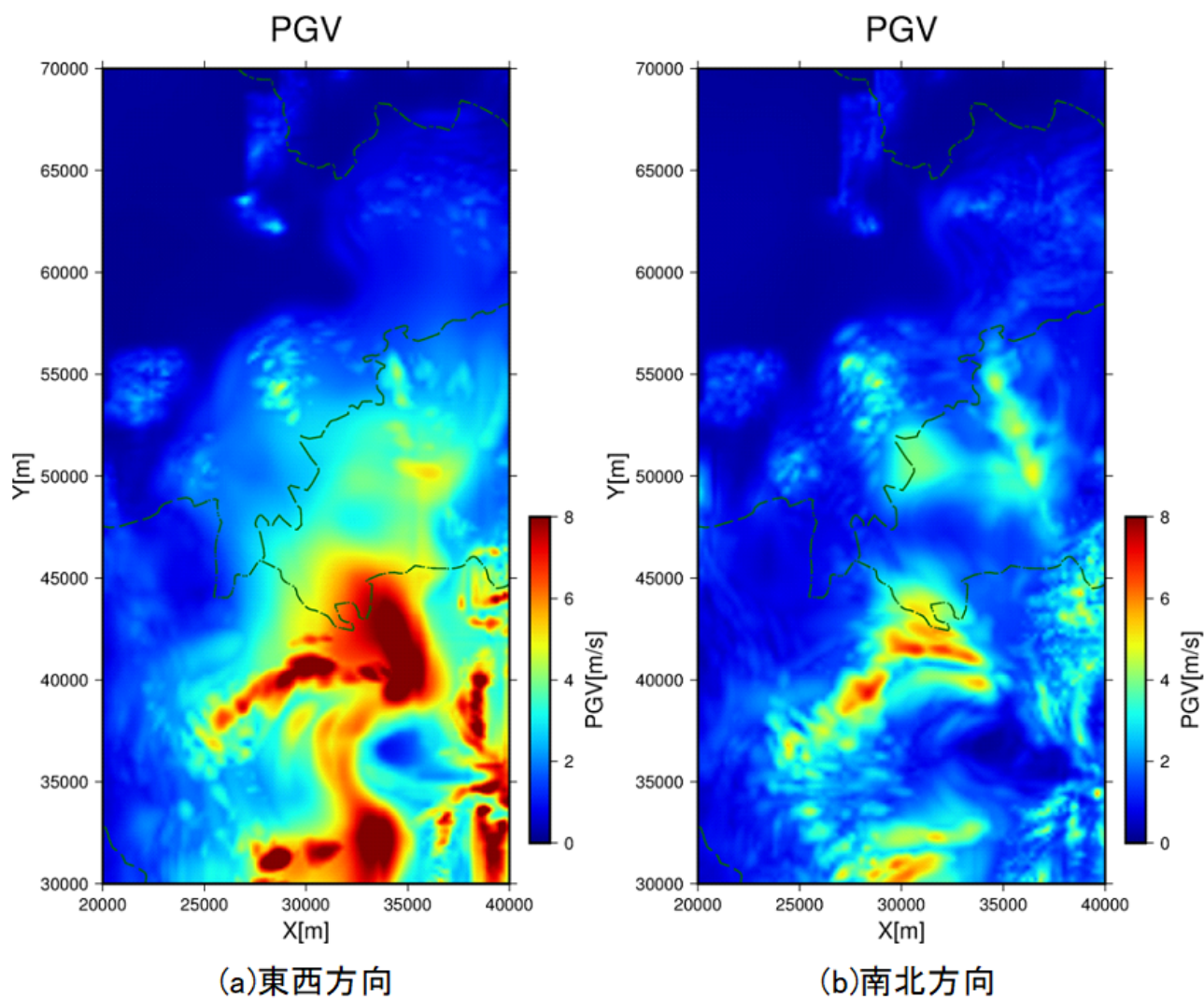


図 横手盆地東縁断層帯南部を震源とする地震の強震動予測による最大速度分布
($f < 1.0\text{Hz}$)

Room A | General session | S16. Subsurface Structure and Its Effect

[S16]AM-1

chairperson: Takashi Furumura (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), Kotoyo Tsuchida (HANSHIN CONSULTANTS Co., Ltd.)

Tue. Sep 17, 2019 9:45 AM - 10:30 AM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

[S16-01] Seismological bedrock waves derived from site amplification factors by the generalized spectral inversion

*Eri Ito¹, Kenichi Nakano², Hiroshi Kawase¹ (1. DPRI, Kyoto University, 2. HAZAMA ANDO CORPORATION)

9:45 AM - 10:00 AM

[S16-02] Feasibility study on inference of the phase velocity of Love waves from horizontal array microtremor recordings by MLM method

*Kotoyo Tsuchida¹, Masanori Horike¹, Kouji Yamada¹, Masaki Suehiro¹, Sayumi Yoshida¹ (1. HANSHIN CONSULTANTS Co., Ltd.)

10:00 AM - 10:15 AM

[S16-03] Estimation of Velocity Structure Model in the Tsugaru Plain Using Microtremor Array Observation and Strong Motion Records

*KimiYuki Asano¹, Tomotaka Iwata¹, Kunikazu Yoshida², Michihiro Ohori³, Ken Miyakoshi² (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Geo-Research Institute, 3. Research Institute of Nuclear Engineering, University of Fukui)

10:15 AM - 10:30 AM

Seismological bedrock waves derived from site amplification factors by the generalized spectral inversion

*Eri Ito¹, Kenichi Nakano², Hiroshi Kawase¹

1. DPRI, Kyoto University, 2. HAZAMA ANDO CORPORATION

多数のサイトで観測された多数の地震からの強震動を用いた一般化スペクトル・インバージョン手法(GIT)では、適切な基準観測点を選択すれば極めて安定的に震源・伝播経路・サイトの各特性を観測波形のフーリエスペクトルから直接分離することができる。得られたサイト特性は、基準観測点を地震基盤露頭波相当の水平動スペクトルとすれば、各サイトの水平動からは地震基盤入射波に対するS波増幅特性が得られる。上下動についても、同じ基盤露頭波の水平動を基準にすれば、それに対するP波増幅特性が得られる。このようにGITで求めた水平動と上下動のサイト増幅特性から、直接水平動の露頭波相当のスペクトルを逆算することができる。これはすなわち通常構造同定した上でなければできない入射波成分の逆算が経験的に（モデルを経ることなく）可能となるということを意味する。ただし、位相特性については地表面観測波のそれと同じと仮定するしか方法がない。

本検討では、提案する剥ぎ取り手法のフィジビリティの検討を目的として、最新の仲野・他(JAEE, 2018)で得られたサイト特性を利用し、熊本地震の本震を対象に予備的検討を実施した。彼らのGITでは幾何減衰 n には100km以上で周波数依存性を導入し、また減衰項 b は地域性を考慮して6地域に分割している点が特徴である。また地震タイプをプレート境界地震、スラブ内地震、地殻内地震の3つにわけ、異なる n や b を求めている。

GITでは、対象スペクトルが各特性の対数和となった方程式を解くためには拘束条件が最低1つは必要であるが、仲野・他(2018)ではYMGH01(防府)を基準点とし、同地点の地表で観測された水平動から風化層の理論サイト特性を剥ぎ取り、露頭岩盤相当のスペクトルに補正している。剥ぎ取り後の最下層S波速度は3,450m/sに達しており、分離サイト特性は地震基盤に対する地盤増幅率とみなせる。観測データとしては、1988年～2016年12月に観測されたJMA87型・JMA95型・K-NET・KiK-net・CEORKAの地震記録を収集し、気象庁マグニチュード $M_{JMA} \geq 4.5$ 、震源深さ ≤ 60 km、震源距離 ≤ 200 km、最小加速度 $\geq 0.2 \text{ cm/s}^2$ 、最大加速度 $\leq 200 \text{ cm/s}^2$ 、同一地震トリガー地点数 ≥ 3 の条件を満足するものを選定した。

分離されたサイト増幅特性で割り込んで得られた剥ぎ取り基盤波のPGAとPGVについて検討する。図1には九州全域のK-NET・KiK-net観測点、計185点における2016年熊本地震本震の観測波と分離したサイト増幅特性で割り込んで得られた剥ぎ取り基盤波の最大加速度PGAと震源距離の関係を示す。左が水平動から求めたもの、右が上下動から求めたものである。同様に剥ぎ取り基盤波の最大速度PGVと震源距離の関係を図2に示す。水平動の図ではNS・EW2成分とも同一距離に図化している。図中の式は回帰直線で、 R^2 はその決定係数である。この図から平均的にいってPGAは水平成分で観測波の約25%、上下成分で約50%に、PGVは水平成分で約40%、上下成分で約50~100%に振幅が減少していることが分かる。ばらつきを見ると多くの地点で平均からの偏差が有意に減少している。その結果、決定係数もPGAでは剥ぎ取り基盤波の方が高くなっている。ただしPGVについては、その決定係数は地表面データよりも悪化している。注目すべきは水平動と上下動から求めた基盤波最大値の違いで、地表面観測波では両者の差が大きいのに対して、剥ぎ取り基盤波ではその差は小さくなっており、これは上下動からも水平動の剥ぎ取り基盤波が得られることを示している。

図1・図2から明らかなのは、もともと偏差の大きい観測点では剥ぎ取りによってもその偏差が減少しない観測点が多いことで、その結果としてPGVでは決定係数が悪化したものと推察される。これらの地点の水平2成分と上下成分からの剥ぎ取り基盤波スペクトルを比較したところ、上下成分から求めたスペクトルが広い周波数範囲で平坦化しているのに対して、水平成分から求めたスペクトルではサイト増幅特性のピーク振動数以外の

振動数でピークが生じており、本震の際にサイト特性が非線形化し、弱震時のサイト特性とはずれが生じたため適切に剥ぎ取りができなかったものと推察された。

以上、多数の弱震動から求めたサイト増幅特性を除去して剥ぎ取り基盤波を作成し、その最大値PGA・PGVの距離減衰特性を調べたところ、剥ぎ取り基盤波の最大値は直線性が高く、ばらつきは平均的には減少しているが、剥ぎ取っても平均値には近づかずうまうま行かなかった観測点も散見された。その原因には本震時の地盤の非線形化が可能性として考えられ、これに対する解析上の対策が今後の課題である。

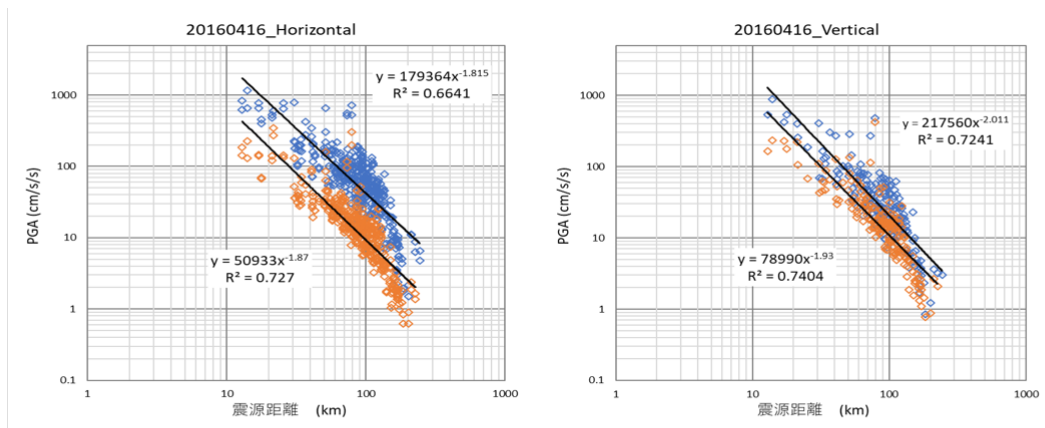


図1 剥ぎ取り基盤波の最大加速度PGAの距離減衰特性

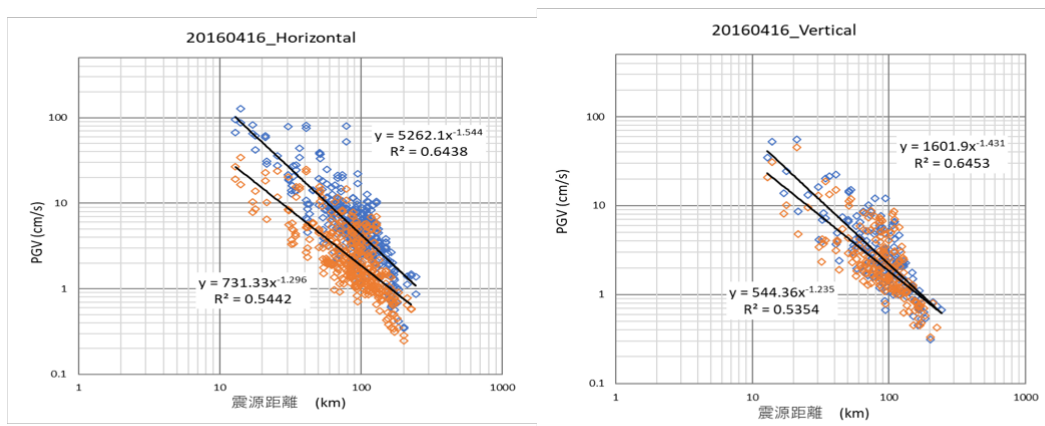


図2 剥ぎ取り基盤波の最大速度PGVの距離減衰特性

Feasibility study on inference of the phase velocity of Love waves from horizontal array microtremor recordings by MLM method

*Kotoyo Tsuchida¹, Masanori Horike¹, Kouji Yamada¹, Masaki Suehiro¹, Sayumi Yoshida¹

1. HANSHIN CONSULTANTS Co., Ltd.

1. はじめに

地震動の増幅にとって最も重要とされる地盤のS波速度構造を調べるため、近年、簡易的かつ低コストで、大まかな速度構造の推定ができる微動探査が普及している。実用化されている手法としては、例えば、Horike (1985)、Capon (1969) によるf-k法や、Aki (1957)、Okada (2003) による空間自己相関関数 (SPAC) 法、長 (2004) によるCCA法などが挙げられる。これらの手法は全て、上下動成分からRayleigh波をターゲットとし、位相速度の分散性を推定する手法である。Rayleigh波は、地盤のS波速度構造に加え、P波の速度構造の影響も受ける。一方、同じ表面波であるLove波は、S波の速度構造のみの影響を受ける震動であるため、Rayleigh波より簡単にS波速度構造の推定に利用できる。しかし、Love波は水平動成分に含まれるため、Radial成分とTransverse成分を分離する必要がある。このため、需要があるにもかかわらず、実用的な手法が現れなかった。

今日、観測技術の発展で、3成分の地震計による観測が主流となり、容易に水平動成分が取得できるようになった。水平動成分からLove波の抽出を可能とする手法の開発は、実観測において、より正確なS波速度構造の推定を目指す上で重要であると考えられる。

我々は、以前に、Love波の抽出を可能とする水平動成分を用いた手法として、土田他 (2016) で最尤法に基づく新たなf-k法を提案した。本研究の目的は、この手法を観測した水平微動アレイデータに適用し実用性を確認することである。

このため、本発表では、愛知県西尾市において7点の微動アレイ観測を行った微動記録を用いる。推定した位相速度の妥当性の確認方法として、(1) 正分散、(2) Vertical 成分とRadial成分の位相速度の一致、(3) Vertical 成分の位相速度がTransverse成分の位相速度より小さい、の3評価基準で判定する。

更に、提案した手法の優位性を確認するため、既往の水平動成分を用いた位相速度推定法 (Tada et al. (2009) によるSPAC法、CCA法) により得られた位相速度との比較も行う。

2. 観測

愛知県西尾市において、7点の微動アレイ観測を行った。3成分の速度型地震計KVS300 (近計システム社製) を用いて、上下動、水平2成分の記録を200Hzサンプリング、24bitでおよそ30分間の連続収録を行った。

3. 解析手法

水平2成分を用いた位相速度推定法は、土田他 (2016) のf-k法である。この手法により得られた位相速度の妥当性や優越性を確認するため、他の2手法 (Tada et al. (2009) のSPAC法、CCA法) による位相速度の推定

も行った。

さらに、Rayleigh波が卓越すると、Radial 成分の位相速度とVertical成分の位相速度は、一致するはずである。これらが同じになれば、Love波を示すTransverse成分の位相速度も妥当である可能性が高くなる。この比較のため、Vertical成分の位相速度も推定する。具体的な手法として、f-k法（Capon, 1969）、SPAC法（Aki, 1957）、CCA法（Cho et al., 2004,2005）を用いた。ただし、f-k法以外の解析については、一部に、微動アレイ解析ツール“BIDO2.0” softwareを使用している。（Tada et al., 2010）

4. 評価基準

評価基準は、①推定された位相速度が、正分散していること、②推定されたRayleigh波の位相速度がVertical成分とRadial成分で一致すること、③推定されたTransverse成分（Love波）の位相速度が、位相速度が収束する低周波数帯域、高周波数帯域を除いて、Rayleigh波の位相速度よりも小さいこと、の3点である。

5. 結果

4節で述べた評価基準を満たすのは、土田他（2016）のf-k法で推定された位相速度のみであった。これは、この手法のみがLove波の位相速度推定の実用的な手法であることを示している。

Estimation of Velocity Structure Model in the Tsugaru Plain Using Microtremor Array Observation and Strong Motion Records

*KimiYuki Asano¹, Tomotaka Iwata¹, Kunikazu Yoshida², Michihiro Ohori³, Ken Miyakoshi²

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2. Geo-Research Institute, 3. Research Institute of Nuclear Engineering, University of Fukui

文部科学省委託事業「日本海地震・津波調査プロジェクト」（2013～2020年度予定）では、日本海沿岸地域での地震動予測の高度化に資するため、微動アレイ探査等を用いた堆積平野の速度構造調査を進めている。2018年度からは青森県西部の津軽平野を対象とした調査を行っている。津軽平野は、ジュラ系付加体や白亜系花崗岩体を基盤とし、新第三系及び第四系が厚く堆積している。津軽平野の東縁には津軽山地西縁断層帯が存在し、特に断層帯南部において、平野側が相対的に沈降している（宮内・他, 1999）。津軽平野では、工学的基盤以浅の地盤構造や地震時サイト増幅特性に関する研究は片岡・菅原(2003)、片岡・山本(2007)などで行われているが、深部地盤速度構造に関する情報は国内の他の大規模堆積平野に比べると十分ではない。

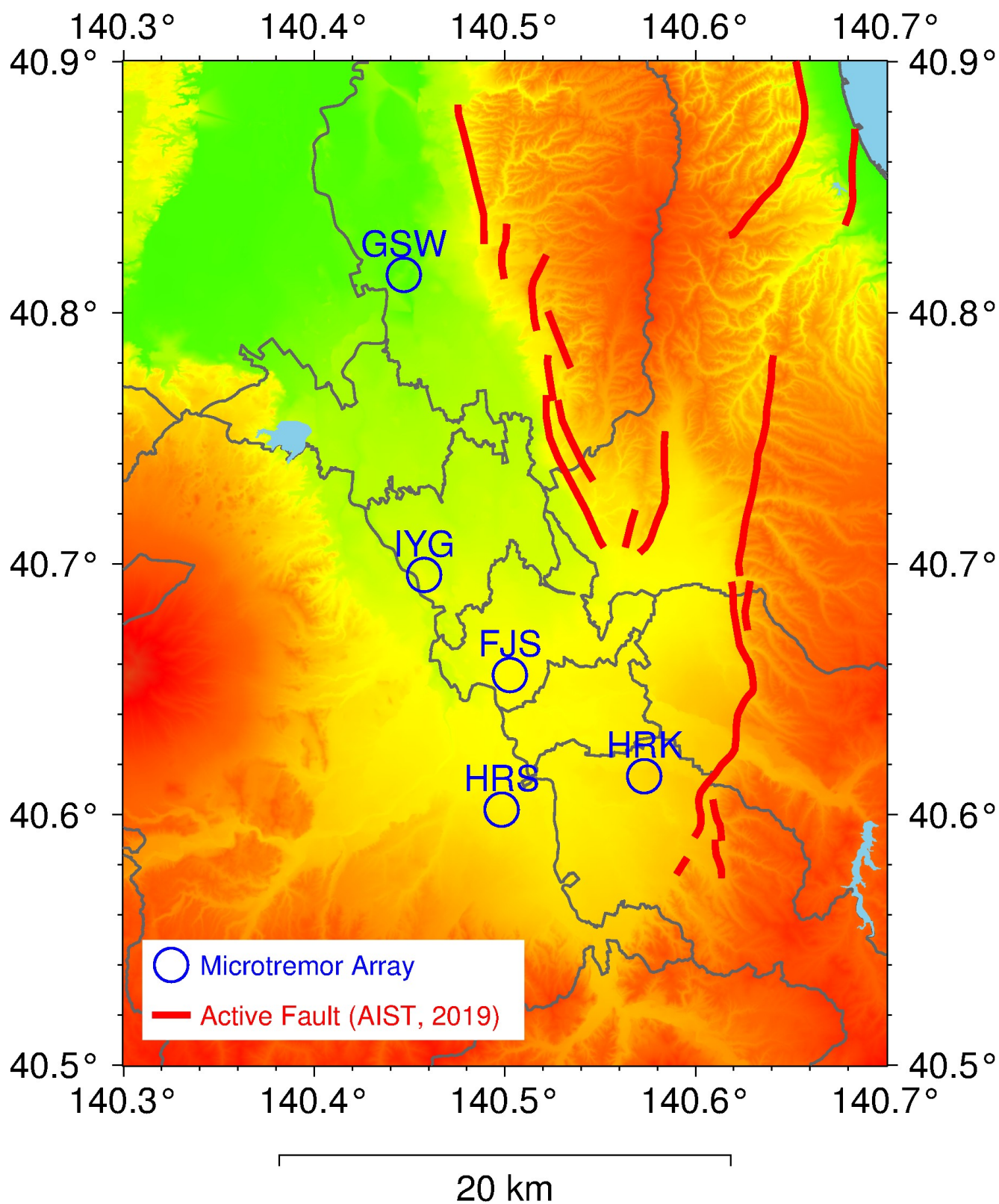
2018年11月に津軽平野中～南部の5強震・震度観測点（K-NET弘前、K-NET五所川原、藤崎町役場、板柳町役場、平川市尾上総合支所）周辺にて、アレイ半径15 m～1.5 kmの微動アレイ探査（LE-3D/5s+LS-8800を使用）を実施した。SPAC法により求めた位相速度を遺伝的アルゴリズム（GA）により逆解析し、S波速度構造を推定した。その結果、 V_s 2.7 km/s以上の基盤相当層の上面深度は、五所川原（GSW）で1.5 km、尾上（HRK）で2.1 km、弘前（HRS）で2.6 km、藤崎（FJS）で3.1 km、板柳（IYG）で3.7 kmと推定された。また、日本海拡大時に形成された新第三系に相当すると考えられる V_s 1.0～2.1 km/sの範囲の層厚が特に大きいという特徴がある。得られた基盤深度をBouguer重力異常（産総研, 2013）と比較すると、五所川原の基盤深度が相対的に浅いことは、五所川原周辺での高重力異常と対応しているが、藤崎及び板柳が低重力異常と対応しているようには見えなかった。そこで、本研究では微動アレイ探査とは独立のデータ及び解析手法によって、微動アレイ探査の結果を検証し、推定した速度構造モデルを高度化することを試みた。

地震動記録を用いた速度構造の解析法の一つとして、地震動記録の自己相関解析（地震波干渉法）により、観測点直下の速度不連続面により生じる反射波を検出する研究が堆積平野等でも行われている。例えば、国内では、関東平野の吉本・他(2008, 2009, 2014)、濃尾平野の渡辺・他(2011)などによる研究例がある。本研究では、微動アレイ中心点に近い、既設の強震・震度観測点で観測された強震記録に地震波干渉法を適用し、反射波相を検出することで、基盤面深度の推定を試みた。ここでは、S波Transverse成分（S波到着1秒前から11秒間）及びP波Vertical成分（P波到着1秒前から6秒間）を解析した。得られた自己相関関数から、Hilbert変換により解析信号を作成し、その瞬時位相を用いて、イベント記録間でcoherenceな位相を強調してスタックする手法であるPhase-weighted stacking (Schimmel and Paulssen, 1997)によりスタックした。

例えば、藤崎では基盤面（ V_s 2.7 km/sと仮定）からのS波反射波と見られる相の往復走時は約4.6秒と推定された。微動アレイ探査による最適解の往復走時は5.2秒であった。反射波の往復走時から期待される基盤深度は、微動アレイ探査による最適解の基盤深度よりは少し浅いが、観測位相速度を説明し得る範囲内であり、反射波往復走時と微動位相速度分散曲線を同時逆解析することでよりよい速度構造モデルを推定できる可能性もある。引き続き、地震波干渉法の解析に必要とするパラメータ（フィルターの帯域等）の検討を行うとともに、本発表では、微動アレイを実施した5地点について、同様に解析を行った結果を示し、重力異常分布や地質構造との関係について議論する。

謝辞：本研究は文部科学省科学技術試験研究委託事業「日本海地震・津波調査プロジェクト」として実施した

ものである。国立研究開発法人防災科学技術研究所強震観測網及び青森県震度情報ネットワークシステムの強震波形記録を使用しました。関係の皆様には深く感謝いたします。



Room A | General session | S08. Earthquake Source Processes and Physics of Earthquakes

[S08]AM-2

chairperson: Ryosuke Ando (University of Tokyo), Akemi Noda (NIED)

Tue. Sep 17, 2019 10:45 AM - 12:00 PM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

[S08-01] Numerical experiments for estimating evolution of long-term slow slip in the Bungo Channel with Ensemble Kalman Filter, using GNSS data

*Megumi Fujita¹, Takuya Nishimura², Kazuro Hirahara^{3,4}, Mamoru Hyodo⁵, Shin'ichi Miyazaki¹ (1. Graduate school of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Institute of Education, Research, and Regional Cooperation for Crisis Management Shikoku, Kagawa University, 4. RIKEN, 5. JAMSTEC)

10:45 AM - 11:00 AM

[S08-02] Earthquake generation scenarios based on a mechanical model using geodetic data

*Akemi Noda¹, Tatsuhiko Saito¹, Eiichi Fukuyama^{1,2} (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Department of Civil and Earth Resource Engineering, Kyoto University)

11:00 AM - 11:15 AM

[S08-03] Dynamic rupture simulation of the 2019 M7.1 Ridgecrest, CA, earthquake: Effects of 3-D fault geometry

*Ryosuke Ando¹, Yosuke Aoki², Makoto Otsubo³ (1. School of Science, University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3. National Institute of Industrial Science and Technology)

11:15 AM - 11:30 AM

[S08-04] Comparison of Source Location Methods: CCF-based SSA and ASL

*Theodorus Permana¹, Takeshi Nishimura¹, Hisashi Nakahara¹ (1. Tohoku Univ.)

11:30 AM - 11:45 AM

[S08-05] Frequent observation of identical onsets of large and small earthquakes

*Satoshi Ide¹ (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo)

11:45 AM - 12:00 PM

Numerical experiments for estimating evolution of long-term slow slip in the Bungo Channel with Ensemble Kalman Filter, using GNSS data

*Megumi Fujita¹, Takuya Nishimura², Kazuro Hirahara^{3,4}, Mamoru Hyodo⁵, Shin'ichi Miyazaki¹

1. Graduate school of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. Institute of Education, Research, and Regional Cooperation for Crisis Management Shikoku, Kagawa University, 4. RIKEN, 5. JAMSTEC

長期的スロースリップイベント(L-SSE)は海溝型巨大地震発生域深部のプレート境界面で発生する応力解放過程であると同時に、隣接する巨大地震発生領域への応力擾乱を与える過程でもある。L-SSEの活動が海溝型巨大地震の発生前に変化、もしくは直接的に海溝型巨大地震をトリガーする可能性が示唆されている。したがってL-SSEのすべりの時空間発展の推定及びその予測は、海溝型巨大地震発生域での応力蓄積過程を定量的に評価する上で重要な課題である。

Hirahara and Nishikiori (2018, JpGU)では、豊後水道L-SSEを想定して、逐次データ同化手法の一つであるアンサンブルカルマンフィルタ(EnKF)を人工の模擬GNSSデータに適用し、L-SSE発生域でのすべり発展と摩擦パラメータを推定する数値実験を行い、手法の有効性を示した。その発展として本研究では、実際のGNSS観測データにEnKFを適用し、豊後水道L-SSE発生域におけるすべり発展の推定を目指す。本研究においては、従来の平面断層のモデルにフィリピン海プレートの三次元形状を導入したより実際の豊後水道長期的SSEに近いモデルを用いて同化実験を行った。

フィリピン海プレートの境界面上に図1のように解析領域を設定し、12000個の三角形小断層セルに分割した。各小断層セルでの単位すべりによる応力変化はCominou and Dundurs (1975)により計算した。断層面上の摩擦力は速度状態依存摩擦則に従うとし、状態変数の時間発展にはスローネス則を用いた[Dieterich, 1979; Ruina, 1983]。速度強化($A-B>0$)の断層面に半径 $R=35\text{km}$ の円形の速度弱化($A-B<0$)パッチを設定した。本研究では臨界サイズ R_c [Rubin and Ampuero (2005), Chen and Lapusta (2009)]に対して $R/R_c<1$ の条件を満たすような摩擦パラメータを設定し豊後水道L-SSEを再現した。この時摩擦パラメータ A , L は断層面上で一様とし、 B についてはパッチ内外でそれぞれ一定とした。また、SSE領域の浅部に固着域(全7855セル)を設定し、深さ5~10 km (固着域Ⅰ), 10~25 km (固着域Ⅱ), 25-30 km (固着域Ⅲ)のそれぞれで固着速度を一定とした。このモデルから得られるすべり発展を真の状態とし、そこから計算される地表のGNSS観測点における変位速度に観測誤差を加えたものを模擬観測データとした。模擬観測データに対してEnKFを適用し、各小断層セルのすべり速度、状態変数及び、断層面での摩擦パラメータ A , L , SSEパッチ内の $B-A$, 固着域のすべり欠損速度を推定し、真値と比較した。なお、固着域におけるすべり速度の時間発展は考慮せず、時間発展はそれ以外のセルについてのみ計算した。またこの時、摩擦パラメータ及び固着域Ⅲの初期アンサンブルとしては、パラメータ空間からL-SSEを発生させるメンバーのみを選んで初期アンサンブルを生成した。固着域Ⅰ及びⅡのすべり欠損速度は真値の周りに10%の振幅で分布する初期アンサンブルを生成した。地表のGNSS観測点としてはGEONETの92観測点を使用し、同化間隔は5日とした。

結果として、複数回のL-SSEを経て真値への収束が見られ、プレート形状を入れたモデルの場合でもEnKFの有効性を確認することができた。本研究では観測データとしてはGNSS観測点における地表変位速度を使用していたが、実際のGNSS観測データは地表変位である。したがって今後実データを適用していくにあたり、地表変位から地表変位速度を得る、もしくは地表変位をそのまま観測データとして使用するという2通りの方法が考えられる。以前の平面断層モデルにおいては既にそれぞれの方法について開発が進んでおり[Fujita et al., 2019 JpGU]、今回導入したモデルにおいても同様の検証が必要である。また現在はSSEパッチ内で摩擦パラメータは一様としているが、より複雑なモデルの設定や実際のGNSS観測データの丁寧な補正が今後の課題として挙げられる。

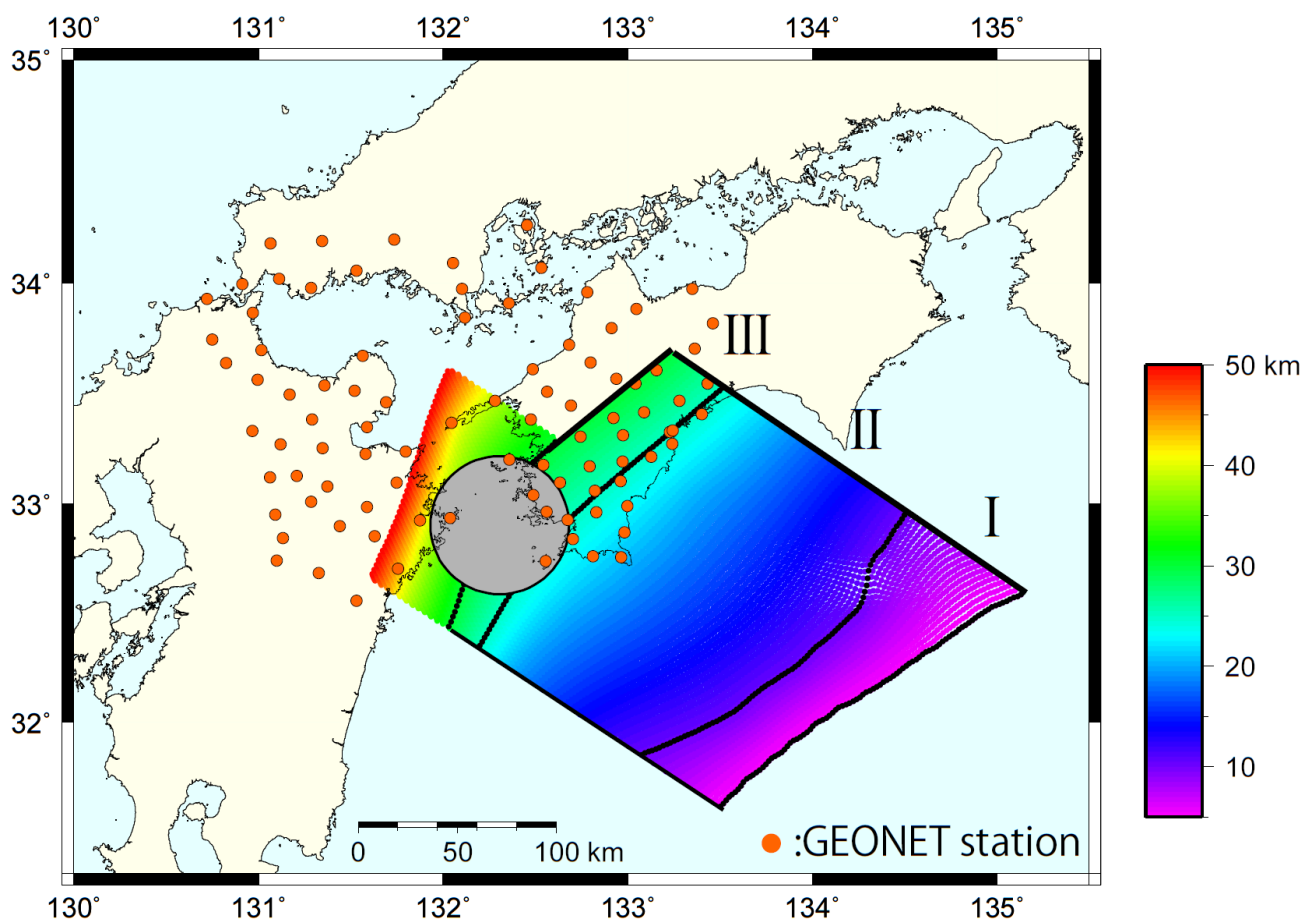


図1：解析領域(全12000セル)

灰色の円は半径35kmの速度弱化パッチ、I～Ⅲはそれぞれ固着域ですべり欠損速度の真値は順に4.0cm/yr, 5.0cm/yr, 4.5cm/yr.

摩擦パラメータの真値はA=100 kPa, B= 120 kPa(SSE領域内), B=30 kPa(SSE領域外), L=16 mm

Earthquake generation scenarios based on a mechanical model using geodetic data

*Akemi Noda¹, Tatsuhiko Saito¹, Eiichi Fukuyama^{1,2}

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Department of Civil and Earth Resource Engineering, Kyoto University

1. はじめに

過去に南海トラフで発生したプレート境界地震の震源域はいくつかの破壊セグメント（固有地震断層面）に分かれると考えられており、その組み合わせは地震イベントによって異なる（石橋・佐竹, 1998, 瀬野, 2012, 地震2）。また、安政東海・南海地震や昭和東南海・南海地震のように複数のセグメントが時間差を置いて連動破壊したケースも見られる。異なるセグメントの組み合わせで地震が発生する例は、相模トラフでも報告されている（Sato et al., 2016 EPS）。

従来の地震発生シナリオ構築では、基本的に、過去に発生した地震から経験的に震源域が設定されてきた。しかし、将来の地震が過去の地震の連動パターンと全く同じように発生するとは限らない。一方で、測地観測の稠密化・高精度化の恩恵を受け、今や測地インバージョン解析を通じてプレート間すべり遅れ速度が推定できるようになった。そして、すべり遅れ速度の推定結果からプレート境界におけるせん断応力の変化速度も計算することができる。本講演では、プレート境界の応力蓄積に基づく震源域の設定と、それを用いた地震発生シナリオの構築方法を提案する。

2. 測地観測に基づく震源域の設定

プレート境界の破壊挙動が、駆動力としてのプレート境界のせん断応力と、それに抵抗する摩擦力に支配されることを考慮すれば、震源域のセグメンテーションは、せん断応力と摩擦特性の空間不均質性に規定されると考えられる。

せん断応力の増加は弾性歪みエネルギーの蓄積を意味する。地殻内に蓄えられた弾性歪みエネルギーを消費して断層すべりが進展するため、せん断応力の大きさはすべりを引き起こすポテンシャルに対応する。一方、摩擦特性は、すべりがどのように起こるか、その破壊様式（定常すべり、スロースリップ、地震時の高速破壊、余効すべり）を決定する。動力学的なシミュレーションでは、せん断応力と摩擦特性の空間分布を入力として、破壊の自発的な成長と停止といった動的な震源過程を計算することが出来るが、摩擦パラメータの推定には不確定性が大きく、現状では高精度な予測は難しい。本研究では、すべりを引き起こすポテンシャルに注目し、せん断応力の蓄積量に基づいて地震時の最終すべり分布を予測する。これは、蓄えられた弾性歪みエネルギーがすべて地震時の高速破壊で解消されると仮定することと同義である。

南海トラフ沿いのプレート境界に関しては、GNSS変位速度データからプレート間すべり遅れ速度分布が推定されている（Noda et al., 2018 JGR）。このすべり遅れ速度からプレート境界のせん断応力の変化速度を計算すると、室戸半島沖、紀伊半島南西沖、南東沖に局所的ピークを持つ分布が得られた。今後、この局所的ピークをアスペリティと呼ぶ。地震は、単独あるいは複数のアスペリティに蓄積したせん断応力を解放する過程であると考え、シナリオを構築する。

3. 地震発生シナリオの構築

まず、地震時に応力解放するアスペリティを選択する。単独のアスペリティ、あるいは隣り合う複数のアスペ

リティの組み合わせが候補となる。そして、地震間のせん断応力の増加分が地震時に解放されると考え、選択されたアスペリティのせん断応力速度と蓄積時間の積を、地震時の応力降下量として設定する。次に、応力降下量の設定と同じ応力変化を引き起こす地震時すべり分布をインバージョン解析により求める。さらに、地震時すべりが周辺の応力蓄積域に及ぼすローディングの影響を評価するために、周辺のアスペリティにおけるせん断応力の変化量を計算する。

本講演では、上記の手順で構築したシナリオの検討結果について報告する。

Dynamic rupture simulation of the 2019 M7.1 Ridgecrest, CA, earthquake: Effects of 3-D fault geometry

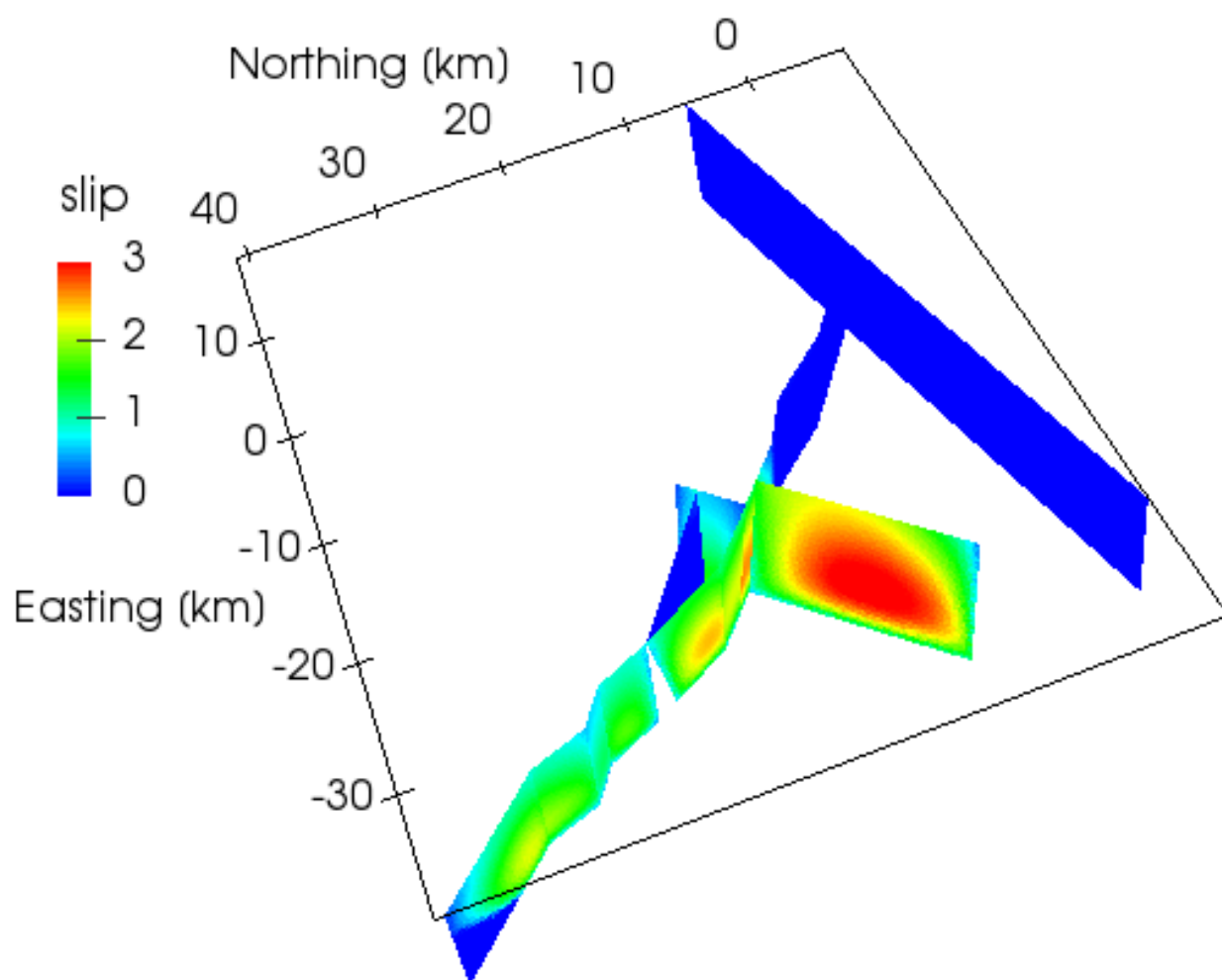
*Ryosuke Ando¹, Yosuke Aoki², Makoto Otsubo³

1. School of Science, University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 3. National Institute of Industrial Science and Technology

The 2019 M7.1 Ridgecrest earthquake occurred on July 6, 2019, preceded by the M6.4 foreshock on July 4. This earthquake sequence presents observational evidence indicating the involvement of the geometrical fault complexity in controlling dynamic rupture processes. Aftershock distributions clearly show the foreshock rupture propagates through a conjugate fault system with two major fault surfaces. The surface breaks deduced from the InSAR imageries shows several kinks in the main strand of the surface fault, leading to the along-strike variation of the fault surfaces. Although the earthquake seems not to occur on a known major fault, the observed surface breaks appear to match with the previously documented quaternary fault traces (<https://earthquake.usgs.gov/hazards/qfaults/>) in some part. In this study, we aim to simulate the dynamic rupture process of the Ridgecrest earthquake to understand the effects of the non-planar fault geometry.

We construct our physics-based model considering the 3-D fault geometry, the slip-weakening friction law, and the regional stress field. The 3-D fault embedded in the elastic half-space (Fig.) is constrained based on the aftershock distributions and the InSAR derived surface deformation. The regional stress field is constrained by referring to the previous estimates (Hardebeck and Hauksson, 2001), indicating the predominant N-S compression and the strike-slip regime. The characteristic slip weakening distance D_c is a few tens of cm.

Preliminary simulations confirm the existence of spatially varying potential stress drop (initial tractions) on the fault surfaces, which can play important roles to control the dynamic rupture process. The NE-SW trending conjugate fault broken during the foreshock oriented optimally in the applied regional stress field, while the NW-SE trending main fault broken during the mainshock is also in the optimal orientation. The simulations demonstrate the dynamic rupture transfer among multi-fault segments and the rupture sometimes hesitates on misoriented segments, which may explain the occurrence of the foreshock.



Comparison of Source Location Methods: CCF-based SSA and ASL

*Theodorus Permana¹, Takeshi Nishimura¹, Hisashi Nakahara¹

1. Tohoku Univ.

Source location determination of volcanic tremors is a challenge in seismology due to unclear phase arrivals of P- and S-waves, which makes conventional hypocenter methods using phase arrival times inapplicable. Previous studies have proposed alternative methods using spatial distributions of seismic amplitudes, called the amplitude source location (ASL) method (e.g. Battaglia & Aki, 2003; Kumagai *et al.*, 2010), which have been applied at various volcanoes. Another is the method using the seismic cross-correlation functions (CCFs), which is called the CCF-based Source Scanning Algorithm (CCF-based SSA) method proposed by Droznin *et al.* (2015). Both methods work by performing a grid search to find an optimal point that represents the source location. However, the CCF-based SSA method by the previous study does not determine the source depth, and there are only a small number of studies that apply the method to real data. We recently modified the CCF-based SSA method to determine the horizontal location and source depth (Permana *et al.*, submitted). In this study, the performances of CCF-based SSA and ASL methods to locate seismic sources are compared. We use seismic records of volcano-tectonic earthquakes (VTs) at Izu-Oshima and Sakurajima volcanoes. The VT hypocenters located by using an arrival time method (Hirata and Matsuura, 1987) are used as the reference. By assuming that S-wave is dominant in the waveforms, we locate the VTs using CCF-based SSA and ASL methods and calculate the misfits by comparing the obtained source locations with the reference hypocenters.

The results show that the misfits for the ASL method are more horizontally shifted from the reference than those for CCF-based SSA method, although the standard deviations of the ASL method are smaller. The results also show that the ASL method is much affected by the selection of the constant S-wave velocity, quality factor Q, and site amplification factors: S-wave velocity and Q have a more significant effect on the source depth, while the site amplification factor affects the horizontal location. On the other hand, the CCF-based SSA method does not show such systematic biases in the locations, but slightly larger standard deviations of up to about 2 km are obtained. In both methods, the configuration of seismic stations has an important role in constraining the source location.

We finally point out the advantage of using CCF-based SSA method as it requires smaller number of the initial information and is able to consider a complex velocity model.

Frequent observation of identical onsets of large and small earthquakes

*Satoshi Ide¹

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo

どんな巨大地震でも、その始まりは小さな岩盤の破壊である。その破壊が複雑な断層システム上で次々に広がっていけば小地震から中規模地震、超巨大地震になることもある。このような破壊成長プロセスの予測可能性は地震発生物理学の長年の問題であり、緊急地震速報などの可能性に関わる問題である。Okuda and Ide (2018)は那珂沖の約M5の地震の始まりが、M3の地震の始まりとよく似ていることを発見した。これまでも統計的に地震の始まりが自己相似的だという報告であったが、特定の地域の地震について、多数の観測点でほぼ同じ地震波形が同定されたことは初めてである。この発見がどの程度珍しいのか、もしくはむしろ普遍的なのか、北海道から関東までの沈み込み帯について網羅的に調査したのが本研究である。

約15年の気象庁カタログから、解析地域において約2000個のM4.5以上の地震（大地震）を抽出し、個々の大地震の付近10 km以内で発生したM4未満の地震（小地震）とのペアを作る。国内の地震観測点（防災科学技術研究所、気象庁、北海道大学、東北大学、弘前大学、東京大学、青森県、東京都、海洋研究開発機構）のうち大地震から近い順に10点を選び、上下動P波の立ち上がり最初0.2秒を比較する。2つの波形のうち大きいほうのRMS振幅で規格化した相互相関係数の10点での平均を最大化するように、相関係数を比較する範囲を決定する。同じような操作をUchida and Matsuzawa (2013)の繰り返し地震カタログに含まれる繰り返し地震のペアについて行くと、最大化した相互相関係数CCmaxの平均は0.85になるところ、大小地震の組み合わせでは、80ペア（57地震）でCCmax>0.9、356ペア（200地震）でCCmax>0.8以となる。ほとんどは低角逆断層の海溝型地震であり、それ以外のメカニズムのものは少ない。またこのようなペアは主に陸地に近いところに検出されるのは減衰の影響であろう。

海溝型の地震のペアの時間間隔は様々で10年以上になるものも多いが、それ以外の地震は前震や余震としてしか似た小地震を見つけることができない。それでも数時間以内の直前前震は海溝型でない地震により多く観察される。これは両タイプの地震発生準備過程の違いを示唆する。

この大小地震の始まりの類似性は、プレート境界に永続的に存在する階層的な構造不均質を示唆する。ある時はその小階層しか破壊しないが、別の時には小階層から大階層までを破壊することが起きると考えると理解しやすい。その違いが震源近傍のわずかな物理条件の違いに依存するとすると、破壊の最終サイズの予測可能性は大幅に制限されるだろう。

Room A | General session | S08. Earthquake Source Processes and Physics of Earthquakes

[S08]PM-1

chairperson:Saeko Kita(Building research institute), Suguru Yabe(AIST)

Tue. Sep 17, 2019 1:30 PM - 3:00 PM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

[S08-06] Enhanced dynamic triggering of a shallow slow slip event in the Nankai subduction zone due to the overlying sedimentary wedge

*Satoshi Katakami¹, Yoshihiro Kaneko², Yoshihiro Kaneko¹ (1. DPRI, Kyoto Univ., 2. GNS Science, NZ)

1:30 PM - 1:45 PM

[S08-07] Scaled energy estimation for shallow slow earthquakes in the Nankai trough

*Suguru Yabe¹, Takashi Tonegawa², Masaru Nakano² (1. AIST, 2. JAMSTEC)

1:45 PM - 2:00 PM

[S08-08] Slow earthquake signals in the microseism frequency band (0.1–1.0 Hz)

*Koki Masuda¹, Satoshi Ide¹, Kazuaki Ohta², Takanori Matsuzawa³ (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

2:00 PM - 2:15 PM

[S08-09] Detection of shallow low-frequency earthquakes beneath the Japanese Islands

*Junichi Nakajima¹, Akira Hasegawa² (1. Earth and Planetary Sciences, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University)

2:15 PM - 2:30 PM

[S08-10] Focal mechanisms of deep-low frequency earthquakes beneath Zao, Iwatesan and Hijiori

*Genki Oikawa¹, Naofumi Aso¹, Junichi Nakajima¹ (1. Tokyo Institute of Technology)

2:30 PM - 2:45 PM

[S08-11] Interactions between the intraslab earthquakes and episodic slow slips beneath Kii Peninsula controlled by fluid migration

*Saeko Kita¹, Heidi Houston², Sachiko Tanaka³, Youichi Asano³, Takuo Shibutani⁴, Naoki Suda⁵ (1. Building Research Institute, 2. USC, 3. NIED, 4. DPRI, Kyoto University, 5. Hiroshima University)

2:45 PM - 3:00 PM

Enhanced dynamic triggering of a shallow slow slip event in the Nankai subduction zone due to the overlying sedimentary wedge

*Satoshi Katakami¹, Yoshihiro Kaneko², Yoshihiro Kaneko¹

1. DPRI, Kyoto Univ., 2. GNS Science, NZ

The dynamic triggering of slow slip events (SSEs) is rarely observed, even though regional earthquakes often trigger tectonic tremors and very low-frequency earthquakes. Shallow SSEs have been inferred from temporal changes in borehole pressure across the DONET network (offshore of Kii Peninsula, Japan) that immediately followed the 2011 Tohoku-Oki (~700 km hypocentral distance), 2016 Mieken Nanto-Oki (occurred beneath the borehole network), and 2016 Kumamoto (~600 km hypocentral distance) earthquakes and lasted for up to two weeks in the shallow part of the Nankai subduction zone. Here we identify the shallow SSEs that may have been dynamically triggered by regional earthquakes. We identify a possible shallow SSE in 2004 that was triggered by the Kii-hanto Nanto-Oki earthquake using tectonic tremor and very low-frequency earthquakes, as the borehole network was not yet installed. We quantify the dynamic Coulomb stress changes due to causal events in the Philippine Sea Plate that could be distributed shallow SSE source faults. The passing seismic waves from the Tohoku-Oki, Mie-ken-Oki, and Kumamoto earthquakes induced calculated Coulomb stress changes of >100, 50, and 20 kPa, respectively. Furthermore, the clear causal earthquakes (Kii-hanto Nanto-Oki, Tohoku-Oki, and Mieken Nanto-Oki earthquakes) that triggered shallow SSEs induced large, long-duration Coulomb stress perturbations (>10 kPa for ~30 sec), which suggests that a shallow SSE may be triggered under these conditions. Shallow SSEs are therefore more likely to be dynamically triggered than their deep counterparts due to enhanced stress perturbations induced by the sedimentary wedge.

Scaled energy estimation for shallow slow earthquakes in the Nankai trough

*Suguru Yabe¹, Takashi Tonegawa², Masaru Nakano²

1. AIST, 2. JAMSTEC

南海トラフでは地震・津波観測システム（DONET）が整備され海域観測が発展したことにより、スロー地震の地震波シグナルである浅部低周波微動や浅部超低周波地震が観測され、海溝近傍のプレート境界浅部で浅部スロー地震が発生していることが明らかになった。南海トラフの深部スロー地震は深さ30-40kmで発生しているのに対して、浅部スロー地震は深さ数kmで発生しており、両者の地震発生環境は大きく異なる。地震発生環境の違いは、地震活動の特徴に反映される可能性がある。南海トラフのスロー地震は、巨大地震の固着域から安定滑り領域にプレート境界の特性が変化する脆性塑性遷移領域で発生していると考えることができ、塑性的な振る舞いを支配する岩石の流動則は温度や圧力といった地震発生環境に依存するため、深部と浅部のスロー地震の間にはその挙動に違いがある可能性がある。

Yabe et al. (2019, JGR) では、熊野沖に展開されるDONET1のデータを用いて、浅部スロー地震のScaled Energyの推定を試みた。浅部低周波微動から地震波エネルギーを、浅部超低周波地震から地震モーメントを推定した。両者の比であるScaled energyを計算したところ、 10^{-9} - 10^{-8} 程度と、深部スロー地震の値とほぼ同程度か若干高い値となった。本研究では、Yabe et al. (2019, JGR) の手法を四国沖に展開するDONET2のデータに適用することで、四国沖の浅部スロー地震に対してScaled energyの推定を行った。浅部スロー地震に対するScaled energyのデータ数を増やすことで、深部スロー地震よりも若干高いと推定された熊野沖浅部スロー地震のScaled energyが普遍的なものであるのか、空間的なばらつきの範囲内であるのかを検証した。その結果、DONET2の室戸沖（Gノード）付近のクラスターではScaled energyが 10^{-9} - 10^{-8} 程度と熊野沖浅部スロー地震のScaled energyに近い値が求まったのに対して、紀伊水道沖（Fノード付近）のクラスターではScaled energyが 10^{-10} - 10^{-9} 程度と深部スロー地震の値に近い値が求まった。このことから浅部スロー地震のScaled energyには震源クラスターごとにばらつきがあり、その範囲内で深部スロー地震と同程度の値を持つと考えられる。

Slow earthquake signals in the microseism frequency band (0.1–1.0 Hz)

*Koki Masuda¹, Satoshi Ide¹, Kazuaki Ohta², Takanori Matsuzawa³

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 3. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

スロー地震は大地震の発生領域に隣接した領域で発生する、プレート境界の応力変化に敏感といった性質を持っており、この約20年間精力的に調べられてきた。スロー地震はその特徴的な時定数で微動と低周波地震（2-8 Hz）、超低周波地震（10-100秒）、スロースリップイベント（>1日）に分けられる。低周波地震と超低周波地震の間の周波数帯域は脈動ノイズが卓越しており、スロー地震の信号を検出するのは難しい。我々が脈動帯域と呼ぶこの帯域では、例外的に、沈み込み帯浅部での海底地震計による近地観測、ノイズの偶然小さいタイミング、という状況で低周波地震と超低周波地震に伴う信号が検出された例が報告されているが（Kaneko et al., 2018）、深部スロー地震のこの周波数帯域における信号の特徴は全く明らかになっていない。

本研究では、南海トラフ沈み込み帯に属する四国西部の領域について、高周波数帯域の信号を用いて大規模な波形重合を行い、脈動帯域におけるスロー地震の信号の解析を行う。まず、合成テンプレート波形を作成し、マッチドフィルタ解析を行うことで四国西部の領域での低周波地震の検出を行った（Ohta & Ide, 2017）。GPUを利用することで計算の高速化を達成し、Hi-netの9観測点における2005年から2015年までの速度計データから約70万の波形を検出した。これらの時間分布から低周波地震はエピソード的な現象であること、空間分布からイベントが発生しやすいパッチ上の領域が断層面上に存在することが分かり、このことは既往研究と整合的である。次に、この検出結果を用いてHi-netの観測点と同じ場所に設置されている高感度加速度計の波形を重合する。重合した波形に0.25秒から0.5秒、0.5秒から1秒、1秒から2秒、2秒から4秒、4秒から8秒、8秒から16秒、16秒から32秒、32秒から64秒の8種類のバンドパスフィルタを適用したところ、全ての帯域で位相のそろった波形が確認できた。これはスロー地震が0.25秒から64秒までの広い周期帯で信号を持っていることを示している。さらに、バンドパスフィルタを適用する前の重合波形に対する各帯域の相対振幅の周波数帯域依存性は ω^2 -モデルに従う合成波形と異なっており、スロー地震が普通の地震と異なる物理を持っていることを示唆する。

Detection of shallow low-frequency earthquakes beneath the Japanese Islands

*Junichi Nakajima¹, Akira Hasegawa²

1. Earth and Planetary Sciences, School of Science, Tokyo Institute of Technology, 2. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University

内陸で発生する深部低周波地震は、卓越周波数が約2～5 Hzで、一般にP波が不明瞭でS波の励起が大きいという特徴がある（鶴川・小原, 1993; Hasegawa & Yamamoto, 1994）。1990年代までは、深部低周波地震は主に火山周辺で発生すると考えられてきたが、近年では大阪湾から琵琶湖にかけての領域や島根県東部など、火山から遠く離れた領域でも深部低周波地震が数多く発生していることがわかってきた。深部低周波地震の多くはモホ面近傍（深さ25–35 km）で発生していることから、地殻深部のメルトまたはメルトの固化により生じた流体の移動が深く関係していると考えられてきた。

一方で、データが蓄積されるにつれて上部地殻でも低周波地震が発生し、深さ10–50 kmの広い深さ範囲で発生していることがわかってきた（例えば、小菅, 2016）。また、2008年岩手・宮城内陸地震や2016年熊本地震の余震の中に低周波成分に富む地震があることが報告されている（例えば、防災科学技術研究所, 2008; 小菅・他, 2010; 木村・鶴川, 2018）。さらに、函館市周辺の活動では、低周波地震と通常の地震がほぼ同じ場所で発生していることも分かってきた（野口・他, 2018; 吉田・他, 2019）。このように、低周波地震は必ずしも「深部」で発生するわけではなく、地殻浅部の発生例も多く報告されている。そこで本研究では、日本列島の内陸で発生した地震の波形解析から、気象庁が低周波地震と認定していない地震を新たに検出し、その時空間分布の特徴を明らかにしたので報告する。

解析に使用したのは、2003年から2016年までに陸域下で発生した約920,000個の地震（M0–2.5, 深さ35 km以浅で太平洋プレートとフィリピン海プレートよりも浅い地震）であり、気象庁一元化のS波読み取り値から3秒の時間窓で速度振幅スペクトルを計算した。そのスペクトルに対して、低周波帯（Al: 2–5 Hz）と高周波帯（Ah: 10–15 Hz）の平均振幅から $FI = \log(Ah/Al)$ で定義されるFI値（Buurman & West, 2010; 小菅・春山, 2018; Hotovec-Ellis et al., 2018）を計算した。低周波成分が卓越するとFI値は負の大きな値となる。また、速度振幅スペクトルのピーク周波数（fp）を計算し、FIとfpの2つの指標で低周波地震の検出を行った。ここでは気象庁一元化震源に含まれる低周波地震のFI値とfpの分布を参考に、FI<-0.75, fp<5 Hzを低周波地震候補とした。選ばれた低周波地震候補は約9200個であり、そのうち約1200個は深さ15 km以浅で発生した地震である。

深さ15 km以浅で発生している低周波地震候補の多くはM6.5以上の内陸地震の余震の中に多く含まれ、本震発生直後に集中して発生しているという特徴がある。この結果は、2016年熊本地震などで報告されているように、余震活動の中に多くの低周波地震が含まれることを示している。また、日高地方と北海道北部においては比較的広い範囲で低周波地震が発生している領域があることも明らかになった。これらの結果は、低周波地震は必ずしも「深部」で発生するわけではなく、上部地殻においても少なからず発生していることを示している。火山地域ではない地殻浅部でも低周波地震が発生しているという事実は、低周波地震の発生にはマグマやメルトの存在や脆性破壊領域よりも高温の条件などは必須ではないことを示唆している。今後は低周波地震候補とされた地震の波形を精査し、誤検出を減らすとともに、内陸地震（本震）と低周波地震発生の時空間関係を定量化するなど、低周波地震の発生条件を明らかにしていく予定である。

謝辞：本解析には気象庁一元化震源及びその読み取り値を使用いたしました。感謝いたします。

Focal mechanisms of deep-low frequency earthquakes beneath Zao, Iwatesan and Hijiori

*Genki Oikawa¹, Naofumi Aso¹, Junichi Nakajima¹

1. Tokyo Institute of Technology

1. 背景

東北日本の活火山周辺では深さ20~40kmといった地殻内部地震よりも深い領域で微小地震が観測されている。この地震は2~8Hzの地震波を励起することから低周波地震(以下LFE)と呼ばれている。そのメカニズムはCLVDや体積変化成分といった非Double-Couple成分を持った多種多様な解が推定されており(例えば Nakamichi et al., 2003)、クラックと断層の相互作用やマグマの冷却などが発生モデルとして考えられている。しかし、LFEは規模が小さいため解析例は少なく、普遍的な発生プロセスの解明には未だ至っていない。そこで、本研究では東北日本でLFE活動が活発な蔵王、岩手山、肘折の3領域についてメカニズムを決定し、火山ごとのメカニズムの比較及び、蔵王や肘折で見られている2011年の東北地方太平洋沖地震前後での活動変化とメカニズムの関連性を調べた。

2. データ・手法

本研究ではHi-net、東北大学、気象庁の100Hzサンプリング地震計によって記録された地震波形を用いた。気象庁のカタログのうち2003年~2017年に発生し、マグニチュード0.5以上のLFEを解析対象とした。震源は気象庁により決定されたデータを用い、射出角や入射角の計算にはJMA2001を使用した。メカニズムの決定にはS波とP波の振幅比を用いた。本研究では、伝搬経路や自由表面の影響を補正するために、最初にメカニズムが既知である通常の地震を使って振幅比を補正し、次にDouble-Couple、Single-Force、CLVD、Tensile-Crackの4つのモデルから期待される理論振幅比と補正された観測振幅比の残差が最小となる解をグリッドサーチにより推定した。最後にモデル間の比較をAIC(赤池情報量基準)によって行い、イベントごとに最適なモデルと震源パラメータを決定した。

3. 結果と議論

蔵王で29個、岩手山で24個、肘折で21個のLFEについてメカニズムを決定した。全体的な特徴としてはDouble-Couple型のLFEが多く、その割合は蔵王で62%、岩手山で75%、肘折で86%であった。特に岩手山ではNakamichi et al., 2003と似たメカニズムを持つイベントも得られた。また蔵王、肘折では2011年東北地方太平洋沖地震の前後でメカニズムや発生位置に変化が見られた。蔵王では地域応力場と整合的であったDouble-Couple型のメカニズムが活動の活発化とともに変化しており、肘折では東北地震前の発生領域より深い場所でDouble-Couple型の規模が大きいイベントが発生しているという特徴が得られた。これらの活動やメカニズムの変化は東北地震によって生じた応力変化の粘弾性的応答や流体の拡散によって発生していると考えられる。一方、岩手山では東北地震前後で明瞭な活動やメカニズムの変化は見られなかったが、発生場所ごとに違いが見られた。岩手山では山体北部、山体直下、山体南部の3箇所でLFEが発生しており、領域毎に見るとメカニズムは多様であったが、同じ領域内では似通っているLFEも存在した。この結果は領域毎に発生プロセスは異なるが、同じ領域では単一の物理過程が発生に寄与していると考えられる。特に山体直下に関しては非Double-CoupleのLFEが多い傾向であった。山体直下のLFEは深さ10km以浅で発生しており、岩手山では浅部における活発なマグマ活動の存在を示しているのかもしれない。

謝辞：本研究では防災科研、気象庁、東北大学地震・噴火予知研究観測センターの波形記録を用いました。また、解析には気象庁の一元化読み取り値を使用しました。記して感謝いたします。

Interactions between the intraslab earthquakes and episodic slow slips beneath Kii Peninsula controlled by fluid migration

*Saeko Kita¹, Heidi Houston², Sachiko Tanaka³, Youichi Asano³, Takuo Shibutani⁴, Naoki Suda⁵

1. Building Research Institute, 2. USC, 3. NIED, 4. DPRI, Kyoto University, 5. Hiroshima University

Slow slips are thought to be related to geofluids and sometimes occur near the times of intraslab earthquakes. Studies have examined the interaction of slow slip with intraslab earthquakes, showing that even slow deformation on the plate interface has the potential to change the stress field (Warren-Smith et al. 2019) and seismicity (Han et al. 2014) within the subducting slab. However, detailed processes and relationships between intraslab earthquakes, slow slip phenomena and geofluids are not known. In the present study, we found changes in seismicity rates, b-values, and stresses in the Philippine sea slab before and after the times of slow slip episodes beneath Kii peninsula, southwestern Japan. At 1 month before the slow slip times, seismic rate and b-value of intraslab earthquakes become high, which is consistent with the effects of fluid-induced seismicity (Bachmann et al. 2012) and “geofluid injection” seismicity beneath northeastern Japan (Yoshida et al. 2017; 2018). Stress orientations in the upper-plane earthquakes suggest that the plate boundary just beneath the slow slip zone is weakly locked before slow slip times, becoming unlocked afterwards, whereas updip of the zone, it becomes more locked after slow slip. These interpretations of the degree of locking on plate boundary are consistent with results from Cascadia based on LFE recurrence patterns (Sweet et al. 2019) in that the locking on the plate boundary there appears to increase as one goes updip through the ETS zone. Our results suggest that monitoring of intraslab earthquakes may provide a means to evaluate not only slow slip activity but also plate boundary conditions.

Room A | General session | S08. Earthquake Source Processes and Physics of Earthquakes

[S08]PM-2

chairperson: Takehito Suzuki (Aoyama Gakuin University), Naofumi Aso (Tokyo Institute of Technology)

Tue. Sep 17, 2019 3:15 PM - 4:45 PM ROOM A (Clock Tower Centennial Hall)

[S08-12] Inertia term governs displacement of stick-slip experiment

*Shinichi Oba¹, Yuta Mitsui² (1. Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 2. Faculty of Science, Shizuoka University)

3:15 PM - 3:30 PM

[S08-13] Paradox in Rupture Propagation Velocity

*Eiichi Fukuyama^{1,2}, Shiqing Xu¹, Futoshi Yamashita¹ (1. Nat'l Res. Inst. Earth Sci. Disas. Res., 2. Dept. Civil and Earth Resources Eng., Kyoto University)

3:30 PM - 3:45 PM

[S08-14] Understanding of temporal evolution of the eddy viscosity in porous media and its seismological implications

*Takehito Suzuki¹ (1. Aoyama Gakuin University)

3:45 PM - 4:00 PM

[S08-15] Numerical simulation of earthquake sequence on rough faults

*So Ozawa¹, Eric M. Dunham² (1. University of Tokyo, 2. Stanford University)

4:00 PM - 4:15 PM

[S08-16] Earthquake triggering by dynamic and static stress changes

*Shingo Yoshida¹, Takuto Maeda², Aitaro Kato¹ (1. Earthquake Research Institute, Univ. Tokyo, 2. Hirosaki Univ.)

4:15 PM - 4:30 PM

[S08-17] Rupture simulation in a temporally stochastic stress field

*Naofumi Aso¹, Ryosuke Ando², Satoshi Ide² (1. Tokyo Institute of Technology, 2. University of Tokyo)

4:30 PM - 4:45 PM

Inertia term governs displacement of stick-slip experiment

*Shinichi Oba¹, Yuta Mitsui²

1. Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University, 2. Faculty of Science, Shizuoka University

自然地震の大スケールにおける各種スケーリング関係はよく研究されているが、小スケールの研究は、観測分解能の限界のために難しい。一方、室内スティック・スリップ実験は、自然地震と様々な面で違いがあるものの、小スケールの現象を調べることが出来る。ここでは、すべり-長さスケーリング関係の観点から、せん断によって発生するガウジの影響や、荷重・剛性といったパラメータの影響を調べる。既往のスティック・スリップ実験のデータ（出版済論文14編）をもとに、試料の長さ、すべり量、荷重、剛性そしてガウジの層厚の相関分析、重回帰分析を行った。その結果、荷重と剛性値から成る特徴的時間とすべり量との間に強い正相関（0.936）が見られた。このことは、スティック・スリップ実験のすべり量が、慣性項で第一に支配されていることを示唆する。また、ガウジの層厚とすべり量との間にも強い負相関が見られたが、これは偏相関分析により、擬似相関と判断した。

Paradox in Rupture Propagation Velocity

*Eiichi Fukuyama^{1,2}, Shiqing Xu¹, Futoshi Yamashita¹

1. Nat'l Res. Inst. Earth Sci. Disas. Res., 2. Dept. Civil and Earth Resources Eng., Kyoto University

According to the Griffith fracture criterion, rupture propagation velocity is determined by the balance between the supplied energy (e.g. elastic strain energy) and the consumed one (e.g. fracture energy). Generally, rupture propagates with the velocity slower than S- wave velocity for Mode 3 and slower than Rayleigh wave velocity for Mode 2 rupture. In Mode 2 case, when the supplied energy is extremely large or the consumed energy is extremely small, the rupture propagates faster than the S wave velocity but still slower than the P wave velocity (termed supershear or intersonic rupture).

Recently, there are some experimental reports that the rupture can propagate faster than the P wave velocity (termed supersonic rupture). Gori et al. (2018) observed supersonic rupture propagation along a polymeric material interface by identifying the shock wave front of P waves with the high speed DIC measurement. Fukuyama et al (2019) found an emergent slow slip (EMS) events that propagates faster than the P wave velocity during the meter-scale biaxial rock friction experiments. The characteristics of the EMS events are as follows: 1) The onset of source time function was gentle compared to the regular stick slip (RGS) events. 2) Elastic waves were emitted at the rupture front of the EMS events. 3) Predominant frequency of the emitted waves was low compared to the RGS events. 4) Amount of stress drop was similar to that of the RGS but total amount of slip was about 1/5 of RGS.

It was reported that supersonic rupture occurred only when the extremely large energy was supplied for the rupture initiation (e.g. Gori et al., 2018). However, Fukuyama et al. (2019)'s data indicated that the supersonic rupture could occur even without large external energy supply. This could be achieved since the onset of the EMS rupture was very gentle and the consumed energy at the rupture front was small. Nevertheless, wave radiation was observed, which could be considered as a sort of shock wave generated at the supersonic rupture front.

If we assume that the EMS events occurred on a zero-thickness boundary between two rock specimens, all materials will behave elastically and all information has to propagate with elastic wave velocity. In this case, the rupture velocity cannot exceed the elastic wave velocity. In contrast, when a thin layer exists on the fault, which sheared during the EMS events, the thin layer could be deformed nonlinearly with high strain rates as Fukuyama et al. (2019) proposed. In this case, the rupture can propagate faster than the elastic wave velocities.

In summary, recent experimental observations raise a paradox with regard to rupture propagation velocity, which seemed difficult to resolve by the classical fracture mechanics theories. Therefore, we need to construct physical models to explain these new phenomena.

Understanding of temporal evolution of the eddy viscosity in porous media and its seismological implications

*Takehito Suzuki¹

1. Aoyama Gakuin University

断層岩をはじめとした多孔質媒質中の流れにおいて、それが乱流となる場合は広く理論的・実験的に扱われてきた。それを記述するモデルも多数あるが、特にk-epsilonモデルはしばしば用いられている [例えばPedras and de Lemos, 2001 (PdL)]。ここでkとepsilonはそれぞれ乱流エネルギーとその高波数領域への散逸率を表す。これらを用いて渦粘性率を求め、乱流の状態を考察していくというモデルである。

特に、kとepsilonの時間発展を考えるにあたって、多孔質媒質中では、平均流から擾乱へのエネルギーの移送が起こり続けることに注意されたい。平均流が空隙の壁に衝突することで乱れが生成されるからである。それゆえ、一様な平均流を伴う定常状態で有限のkとepsilonが存在し得る (PdL)。通常の乱流においては見られない特徴であるこの事実は、k-epsilon相空間上でアトラクタの連続的な分布を示唆する。このような特殊なアトラクタが存在する場合の解軌道の振る舞いを明らかにし、特に上述の渦粘性率の時間発展との関係を調べることは、地震学的・物理学的観点から重要である。

定式化についてはPdLに従う。大きさ u_D の一様平均流が存在するとすれば、系の並進対称性から支配方程式中の空間微分の項が全て消える。この時直線 $\epsilon = c_k u_D k / \sqrt{K}$ が二変数に共通のヌルクラインであることが分かり、また解軌道として $\epsilon = \epsilon_0 (k/k_0)^{C_2}$ も得られた。ここで c_k と C_2 はモデルパラメータ、 K は透水係数、 k_0 と ϵ_0 はそれぞれkとepsilonの初期値である。しばしば $c_k = 0.28$, $C_2 = 1.9$ が用いられる。ここで、k-epsilon相空間上で $0 < u_D k / \sqrt{K}$ を満たす領域を領域I, $\epsilon > c_k u_D k / \sqrt{K} > 0$ を満たす領域を領域IIとする。支配方程式から、領域I (II) では解軌道上を時間とともに右上 (左下) に移動することがわかった。これはヌルクラインが線状のアトラクタになることを示す。

一方渦粘性は $\nu_T = C_{\mu} k^2 / \epsilon$ で与えられることに注意する。ここで C_{μ} は正定数である。ゆえに、その上では渦粘性が一定値となる曲線 (等渦粘性線) は $\epsilon = C_{\mu} k^2 / \nu_T$ で与えられ、原点を頂点とする放物線であることが分かる。先の解軌道の方程式と比較してみると、 $C_2 = 1.9 < 2$ から、等渦粘性線と解軌道の交点で前者の勾配の方が後者のそれより大きい。従って、解の運動方向も合わせて考えれば、領域I (II) では渦粘性率は増加 (減少) することが分かる。多孔質媒質中の乱流においては、渦粘性の時間変化がk-epsilon相空間上の領域によって異なることになる。

この振る舞いは、物理的には領域Iでは平均流から擾乱へのエネルギー供給が支配的、領域IIではエネルギー散逸の効果が支配的であることによる。これを理解するために、 $k = \text{const.}$ の直線を考えよう。この時、領域IIの方が領域Iよりもepsilonの値が大きい。変数epsilonはエネルギー散逸を表すため、領域IIではその効果がより強く働くのである。

こういった渦粘性の時間発展は、平均流の振る舞いにも影響を与え得る (例えばAkbari and Namin, 2013)。本モデルではこの効果を取り入れていないが、第一近似として本結果を拡張すると、領域I (II) ではより平均流を増加 (減少) させることが示唆される。こういった振る舞いから、例えば亀裂型とパルス型、あるいは通常の地震とゆっくり地震の振る舞いの違いを、乱流の観点から統一的に説明することを目指す。

Numerical simulation of earthquake sequence on rough faults

*So Ozawa¹, Eric M. Dunham²

1. University of Tokyo, 2. Stanford University

Faults have geometric complexity at a wide range of spatial scales and forms; here we focus on fractal roughness of the fault surface (e.g., Candela et al., 2012). Slip on a nonplanar fault causes spatially heterogeneous stress field (Dieterich & Smith, 2009), modulating the style of the next slip event on the same fault. Thus, it is important to investigate rupture dynamics on rough faults using sequence simulations of multiple spontaneously nucleating and propagating events, instead of a single dynamic rupture simulation with artificial nucleation procedures.

In this study, we model earthquake sequences on rough faults, using a finite-difference model which captures inertial dynamics and plastic deformation during dynamic rupture and a quasi-dynamic boundary integral model which simulates the interseismic period and nucleation. We use rate and state friction with dynamic weakening on the fault and Drucker-Prager off-fault plasticity.

Our numerical simulations show that the stress field becomes more heterogeneous with accumulating slip. Stress heterogeneity makes the rupture process of subsequent events increasingly more complicated (in terms of slip and rupture velocity fluctuations). Later events are more sensitive to the local geometry of the fault due to accumulated stress heterogeneity. The place of nucleation is highly sensitive to subtle changes in fault geometry and used parameters. Furthermore, we are going to show some preliminary results which account for viscoelastic relaxation during the interseismic period in the presentation.

Earthquake triggering by dynamic and static stress changes

*Shingo Yoshida¹, Takuto Maeda², Aitaro Kato¹

1. Earthquake Research Institute, Univ. Tokyo, 2. Hirosaki Univ.

動的小よび静的応力変動が地震をトリガーすることは知られている。遠地では静的応力変動がわずかなため、地震がトリガーされた場合は動的応力変動によると考えられるが、近地では両者が作用するので、余震発生等に対しどちらの寄与が大きいかわからない。本研究は動的小よび静的応力変動のトリガー効果を比較できるようにすることを目指している。

動的応力変動はOpenSWPC (Maeda et al., 2017)を前田が応力テンソルも求められるように改良したソフトウェアにより計算した。その計算手法では、粘弾性、複雑な地形形状、日本列島全体の不均質速度構造の仮定のもと安定な計算を可能とする最新鋭の数値計算技法を盛り込んでいる。

三重県沖でM6.1の地震が発生したと仮定し、プレート境界のある点におけるクーロン応力変動CFF(t)を計算した結果をFig.1に示す。点震源を仮定し、構造速度モデルはKoketsu et al. (2012)によるJIVSMを用いた。振動がおさまった後の値から静的なCFFsも求まる。動的なCFFdの最大値CFFd_maxはCFFsの値より大きいですが、動的なCFFのトリガー効果の方が大きいわけではない。静的なトリガー効果に焼き直すには、Yoshida(2018)が示したように応力変動の時間積分、摩擦パラメータ、間隙水圧などを含む関数CFFeqで評価する必要がある。

動的応力変動と静的応力変動のCFFの値が同じでも、擾乱が生じてから地震が発生するまでの時間は異なり、CFFの大きさでトリガー効果を比較することはできない。講演では、摩擦パラメータや間隙水圧がどのような値のときに、動的変動によるトリガー効果の方が静的なCFFによる効果より大きくなるか等について議論する。

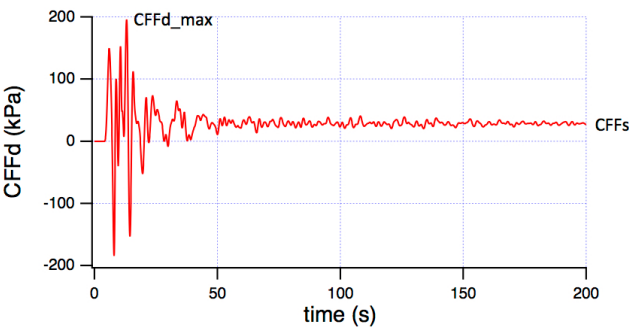


Fig.1

Rupture simulation in a temporally stochastic stress field

*Naofumi Aso¹, Ryosuke Ando², Satoshi Ide²

1. Tokyo Institute of Technology, 2. University of Tokyo

In statistical seismology, we handle an earthquake sequence as a stochastic process. For example, temporal stochasticity determines the exact timing of earthquakes. In seismic wave propagation, we also consider the stochastic term to account for the scattering effect. In source physics of earthquake rupture, on the other hand, people assume deterministic physics. For example, we run a rupture simulation by prescribing conditions deterministically, including fault geometry, initial stress, and friction law. However, we never know such conditions perfectly in real faults, and therefore, the rupture would evolve as if it was a stochastic process. Hence, the consideration of temporal stochastic term is necessary to understand the earthquake rupture process better.

Here, we perform mode III rupture simulation under the existence of temporally stochastic external stress. Different strength drop and initial stress level result in various ruptures from both crack-like and pulse-like ruptures to slow ruptures. It becomes pulse-like for low initial stress conditions, which is consistent with the previous study with spatial heterogeneity (Zheng and Rice, 1998). In these conditions, rupture propagates by inertia while less slip occurs in the central part of the fault. Low strength drop and low initial stress conditions will result in slow earthquakes. In these conditions, rupture can propagate only by stochastic force. The stress concentration at the rupture front gets smaller as it advances, and the chance of the propagation gets smaller and smaller, resulting in decelerating rupture propagation. Our model is a realization of previous Brownian walk model for slow earthquakes (Ide, 2008; Ide and Yabe, 2018) in a continuum system. Compared to the simplified model with nearest-neighbor assumptions, our model has an advantage in explaining “pulse-like” tremor front as we observe.