

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S15. 強震動・地震災害

2020年10月30日(金) 16:00 ~ 17:30 | 会場

## S15P

16:00 ~ 17:30

[S15P-01] 全国を対象とした地震による経済被害予測システムの試作

○中村 洋光<sup>1</sup>、藤原 広行<sup>1</sup>、高橋 郁夫<sup>1</sup>、石丸 晴海<sup>2</sup>、清水 智<sup>3</sup>、山崎 雅人<sup>4</sup> (1.国立研究開発法人防災科学技術研究所、2.三菱スペース・ソフトウェア株式会社、3.応用アール・エム・エス株式会社、4.名古屋大学)

16:00 ~ 17:30

[S15P-02] 速度計（固有周期1秒）を用いた計測震度計算についての検討

○中村 亮一<sup>1</sup>、石瀬 素子<sup>1</sup>、酒井 慎一<sup>2</sup> (1.東京大学地震研究所、2.東京大学情報学環)

16:00 ~ 17:30

[S15P-03] 2019年山形県沖の地震の震源モデルとその特性化

○芝 良昭<sup>1</sup> (1.電力中央研究所)

16:00 ~ 17:30

[S15P-04] 震源断層近傍の長周期パルスと地殻変動を考慮した2016年熊本地震の震源過程

○岩井 創<sup>1</sup>、瀬戸 一起<sup>1</sup>、小林 広明<sup>2</sup> (1.東京大学大学院地震研究所瀬戸研究室、2.株式会社小堀鐸二研究所 地盤地震研究部)

16:00 ~ 17:30

[S15P-05] 2019年リッジレスト地震( $M_w$ 7.0)の震源過程：2016年熊本地震との比較

○小林 広明<sup>1</sup>、元木 健太郎<sup>1</sup>、瀬戸 一起<sup>2</sup> (1.小堀鐸二研究所、2.東京大学地震研究所)

16:00 ~ 17:30

[S15P-06] 2019年Ridgecrest地震 ( $M_w$ 7.1) の強震動生成域と地震動シミュレーション

○染井 一寛<sup>1</sup>、宮腰 研<sup>1</sup> (1.一般財団法人地域地盤環境研究所)

16:00 ~ 17:30

[S15P-07] LMGAを考慮した特性化震源モデルによる地表地震断層近傍における永久変位量の評価ー逆断層地震の場合ー

○松元 康広<sup>1</sup>、宮腰 研<sup>2</sup>、入倉 孝次郎<sup>3</sup> (1.構造計画研究所、2.地域地盤環境研究所、3.愛知工業大学)

16:00 ~ 17:30

[S15P-08] 2016年熊本地震で観測された長周期速度パルスの生成に関する理論的解析

○垂水 洸太郎<sup>1</sup>、渡邊 禎貢<sup>1</sup>、小松 正直<sup>1</sup>、竹中 博士<sup>1</sup> (1.岡山大学)

16:00 ~ 17:30

[S15P-09] 波形フィッティングによる理論グリーン関数の改良手法の適用

○吉田 邦一<sup>1</sup>、郭 雨佳<sup>1</sup>、染井 一寛<sup>1</sup>、宮腰 研<sup>1</sup> (1.一般財団法人 地域 地盤 環境 研究所)

16:00 ~ 17:30

[S15P-10] Seismic intensity simulation of the entire 1923 Kanto earthquake sequence

○Hiroe Miyake<sup>1</sup>、Satoko Murotani<sup>2</sup>、Kazuki Koketsu<sup>1</sup> (1.Earthquake Research Institute, University of Tokyo、2.National Museum of Nature and Science)

16:00 ~ 17:30

[S15P-11] 2013年栃木県北部の地震の震源域における震源・サイト・伝播特性に関する検討

○引間 和人<sup>1</sup> (1.東京電力ホールディングス(株))

---

16:00 ~ 17:30

[S15P-12] Comparison of PGA, PGV, and acceleration response spectra between the K-NET, KIK-net, and S-net strong-motion sites

○Yadab Prasad Dhakal<sup>1</sup>、Takashi Kunugi<sup>1</sup>、Wataru Suzuki<sup>1</sup>、Takeshi Kimura<sup>1</sup>、Nobuyuki Morikawa<sup>1</sup>、Shin Aoi<sup>1</sup> (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

---

16:00 ~ 17:30

[S15P-13] 基盤面で得られた地震動記録による距離減衰特性のばらつきに関する検討

○西村 利光<sup>1</sup>、宮腰 研<sup>1</sup> (1.(一財)地域 地盤 環境 研究所)

---

16:00 ~ 17:30

[S15P-14] 伝播経路を特定した地震動予測ニューラル・ネットワーク

○岡崎 智久<sup>1</sup>、森川 信之<sup>2</sup>、岩城 麻子<sup>2</sup>、藤原 広行<sup>2</sup>、上田 修功<sup>1</sup> (1.理化学研究所、2.防災科学技術研究所)

---

16:00 ~ 17:30

[S15P-15] Comparison of scattering variation associated with 2016 earthquakes in Korea and Japan

○IQBAL MUHAMMAD<sup>1</sup>、Chung Tae Woong<sup>1</sup> (1.Sejong University)

---

16:00 ~ 17:30

[S15P-16] Estimation of earthquake ground motions on the ground surface at MeSO-net stations

○若井 淳<sup>1</sup>、先名 重樹<sup>1</sup>、清水 惇<sup>2</sup> (1.防災科学技術研究所、2.白山工業 (株) )

---

16:00 ~ 17:30

[S15P-17] 長周期地震動振幅の短距離間空間較差の簡易的な予測に向けた数値実験による検討

○畑山 健<sup>1</sup> (1.消防庁消防研究センター)

---

16:00 ~ 17:30

[S15P-18] SPAC 法の解析可能最大波長とSN比の関係式

○長 郁夫<sup>1</sup>、岩田 貴樹<sup>2</sup> (1.産業技術総合研究所、2.県立広島大学)

---

16:00 ~ 17:30

[S15P-19] 近年の地震における液状化地点情報に基づく液状化危険率推定式の提案

○先名 重樹<sup>1</sup> (1.防災科学技術研究所)

## 全国を対象とした地震による経済被害予測システムの試作

### Prototype of economic damage prediction system for earthquakes in Japan

\*中村 洋光<sup>1</sup>、藤原 広行<sup>1</sup>、高橋 郁夫<sup>1</sup>、石丸 晴海<sup>2</sup>、清水 智<sup>3</sup>、山崎 雅人<sup>4</sup>

\*Hiromitsu Nakamura<sup>1</sup>, Hiroyuki Fujiwara<sup>1</sup>, Ikuo Takahashi<sup>1</sup>, Harumi Ishimaru<sup>2</sup>, Satoshi Shimizu<sup>3</sup>, Masato Yamazaki<sup>4</sup>

1. 国立研究開発法人防災科学技術研究所、2. 三菱スペース・ソフトウェア株式会社、3. 応用アール・エム・エス株式会社、4. 名古屋大学

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2. Mitsubishi Space Software Co.,Ltd., 3. OYO RMS Corporation, 4. Nagoya University

総合科学技術・イノベーション会議が進めている戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）の課題「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」の一環として、防災科学技術研究所では巨大地震発生後の経済早期復旧支援を目的とする全国を対象とした経済被害予測システムの開発を進めている。このシステムは、全国を対象とした民間企業資本ストックモデルや、その資本ストックに対しハザードが与える影響の度合いを評価する手法、さらにその影響が地域や産業を超えて経済全体に波及する効果を適切に考慮した経済モデルを組み込むことによって実現する。具体的には試算した多数の経済被害シミュレーション結果や被害シナリオをデータベース化し、シナリオごとに経済被害を概観できる可視化システムを構築し、利用者による事前対策の効果算定や、地域や企業等のBCP・訓練の効果的な検討を支援可能にする。さらに、広域経済早期復旧支援のため、リアルタイム地震被害推定システム（J-RISQ）からの被害に関する推定情報を取り込み、地震発生後の広域での経済被害のモニタリングを目指す。ここでは、主に地震動や津波による経済の直接被害額に着目し、曝露モデルとしての産業別民間企業資本ストックモデルや、それぞれのハザードによる資本ストックの物的毀損に関する被害関数、それらを取り入れ試作した地震動を対象とするリアルタイムシステムについて述べる。

経済被害予測の対象とする産業別民間企業資本ストックのデータについては、公表されているものとしては都道府県単位であり、地震動や津波のハザード情報を十分に反映した空間解像度を有していない。そこで、それぞれのハザードの空間解像度に適応したメッシュ単位の産業別民間企業資本ストックモデルを構築した。具体的には、内閣府が公表する民間企業資本ストックの全国値データ等から、各年の新設投資額、除却額等を推定しながら都道府県別民間資本ストックを推計した上で、統計データや土地利用メッシュ等を基に空間分解能を細分化し、メッシュ単位の32産業別民間資本ストックモデルを構築した。構築したモデルは、内陸部は250mメッシュサイズ、沿岸部は50mメッシュサイズの空間分解能を持っており（全国で約5900万メッシュ）、地震動や津波浸水深のハザード情報を適切に反映した経済被害予測が可能となる。

地震動による資本ストックの物的毀損を評価する被害関数は、既往研究を参考に関数形状を正規分布の累積分布関数に固定し、過去の被害地震の推定震度分布と前述の曝露モデルに適用して得られる産業別被害額が実被害額に最も近い累積分布関数のパラメータの組み合わせを各産業の被害関数とした。また、津波に関しては、東北地方太平洋沖地震の浸水深と被害データから産業別の被害関数を構築した。

これまでに述べた資本ストックの曝露モデルや被害関数を実装した経済被害予測のプロトタイプシステムは、J-RISQから250mメッシュの推定震度分布を取得後、即時に直接的な経済被害予測を行う。具体的には資本ストックの毀損額および毀損率を、250mメッシュ、市区町村、都道府県単位で予測し、地図や表形式で表示することができる。また、Web APIを用いて予測結果を外部に提供する機能を実装している。構築したプロトタイプシステムは、稼働試験中である。なお、このプロトタイプシステムで扱う直接被害は民間企業資本ストックのみを対象としており、それ以外の民間住宅や公的固定資産等のストックは含んでいない。

最後に、経済被害については、ここで対象とした直接的な被害だけではなく、産業の関連性を考慮した間接的な被害の評価も経済早期復旧支援において重要であることから、今後は経済被害の波及を評価可能な経済モデルである多地域動学的応用一般均衡モデルをシステムに取り入れ、総合的に経済被害を評価できるシステムに高度化していきたいと考える。

謝辞：本研究は、総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）「国家レジリエンス（防災・減災）の強化」（管理法人：国立研究開発法人 防災科学技術研究所）によって実施された。

# 速度計（固有周期1秒）を用いた計測震度計算についての検討

## Study on calculation of measured seismic intensity using a velocity seismometer of natural period 1 second

\*中村 亮一<sup>1</sup>、石瀬 素子<sup>1</sup>、酒井 慎一<sup>2</sup>

\*Ryoichi Nakamura<sup>1</sup>, Motoko Ishise<sup>1</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>2</sup>

1. 東京大学地震研究所、2. 東京大学情報学環

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. The Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

### 1. はじめに

地震時の地面の揺れ方は、地盤や環境によるため、地域差を議論するためには、できるだけ多くの稠密な観測データが必要である。しかし、一般に公表されている揺れの情報である計測震度は、気象庁による検定を受けた計器（加速度計等）の記録を用いて算出されたものでなければならぬため、数が限られてしまう。臨時の現地調査や構造探査研究で得られた地震波形記録から計測震度が得られれば、より多くの地点における震度を知ることができるようになるが、臨時観測に用いられる地震計は、速度型地震計が使われることが多く、そのまま使うことはできない。昨年度、我々が北総地域（成田市・佐倉市・印西市・我孫子市周辺）において臨時地震観測を実施したときも、用いた地震計は固有周期1Hzの速度計（Lennartz electronic社製LE-3Dlite MkIII）であった。石瀬ほか（2020）では、北総地域の地面の揺れやすさの違いを比較するため、この記録を用いて計測震度相当値を計算している（石瀬ほか、2020:SSJ）。ただし、速度計の記録を用いて算出した震度相当値が、加速度計による計測震度と整合するのかが、確認する必要があるが、速度計と加速度計で同時に観測した記録が無い場合、比較できない。そこで、加速度計のデータを利用して、疑似的に速度計の波形データを作り、それを用いて計測震度相当値を算出して、比較検討を行ったので、簡単に報告する。

### 2. 地震計特性および検討方法

石瀬ほか（2020）で用いた速度計の特性は、2 Hzよりも短周期側でフラットな特性を持つが、それより長周期側でレベルが低下しはじめ、1 Hzよりも長周期側で、さらに急勾配でレベルが低下する3つの帯域に分かれた特性を持っている。

この地震計の記録により計算される計測震度相当値が、どの程度になるかを、短周期から長周期までフラットな特性を持つ強震加速度計で得られた記録を元に検討を行った。方法は、次の通りである。

- ① 特性フラットの加速度記録を用い、そのまま計測震度相当値（A）を計算。
- ② 積分して速度記録にし、上記1 Hz速度計の特性に応じ長周期成分を落とす。
- ③ これを微分し、再度、加速度記録として、計測震度相当値（B）をだす。
- ④ 計測震度相当値（A）と計測震度相当値（B）を比較する。

### 3. データおよび結果

首都圏地震観測網（MeSO-net ; Hirata et al., 2009）によって2011年～2015年に観測されたマグニチュード

4以上の8069記録を利用した。この地震計は、短周期から長周期までフラットな特性を持つ加速度計である。地中（地表から-20m）に設置されているため、地表に比べて小さな震度の値になるが、今回の検討には、この影響はない。

解析の結果、1Hz速度計特性による計測震度相当値（B）は、フラットな特性による計測震度相当値（A）に比べて平均的に0.1程度小さくなることが示された。その標準偏差は0.13程度であるが、中には、1.3程度小さくなるものもある。

今後、計測震度相当値の差の違いの要因について検討し、適用範囲と注意点などをまとめてゆきたい。

#### 謝辞

本研究は文部科学省受託研究「首都圏を中心としたレジリエンス総合力向上プロジェクト」の一環として実施されました。計測震度の計算では、工学院大学建築系学科久田研究室で公開されているプログラムを使用させていただきました。記して感謝いたします。

## 2019年山形県沖の地震の震源モデルとその特性化

### Source modeling and characterization for the 2019 Off-Yamagata earthquake

\*芝 良昭<sup>1</sup>

\*Yoshiaki Shiba<sup>1</sup>

1. 電力中央研究所

1. Central Research Institute of Electric Power Industry

2019年6月18日に発生した山形県沖の地震(Mj 6.7)では、震源域近傍の新潟県村上市府屋で最大震度6強を記録した。前報(JpGU, 2020)では経験的グリーン関数を用いた強震記録の震源インバージョン解析を実施し、破壊開始点の北側に主要なすべり領域を有する震源モデルを推定するとともに、1964年新潟地震(Mj 7.5)の震源域との関係について定性的に言及した。本報では、前報で推定された山形県沖の地震の震源過程について、1964年新潟地震の発生に伴う応力変化の観点から再度論じるとともに、震源モデルの特性化による広帯域強震動の再現性の検証を実施した。

Shiba and Uetake (2011)は、草野・浜田(1991)によって再決定された1964年新潟地震の余震分布に基づき、本震の断層面モデルとして長さ84 km, 幅24 kmで北西傾斜の逆断層解を設定した。新潟地震の余震分布、および設定した断層面モデルの北端部分は、2019年山形県沖の地震の余震分布および本震断層面と部分的に重なっている。ただし、山形県沖の地震の断層傾斜角は南東傾斜と推定されており、新潟地震の断層面モデルとは共役の関係にある。本報では、1964年新潟地震のすべり分布モデルから山形県沖の地震の断層面（すべり角90度）に対するクーロン破壊応力変化( $\Delta CFF$ )を算定した。その結果、新潟地震とは重ならない本震断層面の南東部では、 $\Delta CFF$ がすべりを促進する正の値を取ることを確認した。これは、震源インバージョン解析結果におけるすべりの大きい領域と空間的に整合する結果となっている。

次に、得られた震源インバージョン結果に基づき、広帯域強震記録を説明するための震源モデルの特性化を試みた。震源の特性化では、すべり量ならびに実効応力の大きいSMGAの位置及び面積、さらに動的パラメータとして実効応力、ライズタイム、破壊伝播速度などを決定する必要がある。ここではSMGAの位置と面積はインバージョン結果としてのすべり分布モデルから一意に設定し、動的パラメータについては焼きなまし法を用いて最適解の組み合わせを探索した。目的関数は、前報でのインバージョン解析と同じ14観測点の、速度波形と加速度包絡形のL2ノルム（残差二乗和）とした。なお、初期の検討ではSomerville et al. (1999)の基準に準拠して3個のSMGAを抽出したが、解析の結果、陸域から最も遠いSMGAについては解の収束が悪く、目的関数に対する感度がほとんどないことが明らかとなったため、最終的には2個のSMGAからなる特性化モデルとした。得られた最適モデルでは、2個のSMGAの実効応力がそれぞれ約13MPaと18MPaとなり、モデル全体の短周期レベルは壇・他(2001)のスケーリング則にほぼ一致する結果となった。一方でK-NETやKiK-net地表記録による本震の最大加速度分布は、既往の距離減衰式（司・翠川, 1999）と震源距離80km以下でよく整合することを確認しており、2019年山形県沖の地震の震源過程は、加速度地震動の放出レベルとしては平均的な地震であったと考えられる。

# 震源断層近傍の長周期パルスと地殻変動を考慮した2016年熊本地震の震源過程

## The rupture process of the 2016 Kumamoto earthquake considering long-period pulses and ground deformations in the near field

\*岩井 創<sup>1</sup>、瀬瀬 一起<sup>1</sup>、小林 広明<sup>2</sup>

\*Hajime Iwai<sup>1</sup>, Kazuki Koketsu<sup>1</sup>, Hiroaki Kobayashi<sup>2</sup>

1. 東京大学大学院地震研究所瀬瀬研究室、2. 株式会社小堀鐸二研究所 地盤地震研究部

1. Tokyo University, Earthquake Research Institute, Koketsu Laboratory, 2. Ltd.Takuji Kobori Research Institute, Ground Earthquake Research Department

### 1. はじめに

本研究では2016年熊本地震の最大イベントの震源過程を、震源断層近傍における「長周期パルス」（長周期のパルス波）の成因を主眼として再解析する。長周期パルスは、兵庫県南部地震のような大きな速度パルスで特徴づけられるだけでなく、大きな地殻変動（静的変位）を含むという特徴も持っている（岩田, 2016）。しかし、震源断層近傍にある西原村や益城町の震度観測点の速度波形データを含めて震源インバージョンを行っている研究は非常に限られるだけでなく（Kobayashi et al., 2017）、その限られた研究でも震源断層近傍の地殻変動データが取り入れられることはなかった。そこで本研究では、西原村や益城町における加速度記録から地殻変動を抽出する試みを行い、Kobayashi et al. (2017)のデータセットにそれら地殻変動データを追加して、震源過程のジョイントインバージョンを行う。

### 2. 震源断層近傍の地殻変動データ

西原村の震度観測点(以下93048)と益城町の震度観測点(以下93051)の加速度データに対して、台形積分を2回行うことによって変位波形を得ることを基本とする。まず加速度データについては余震と思われる箇所の手前まで55秒間のデータを用い、1回積分することによって速度波形を得た。得られた速度波形は、加速度波形の基線変化によって発散してしまっているため、基線補正を行った。基線補正前の速度波形を $v_1(t)$ 、基線補正後の速度波形を $v_2(t)$ とする。まず試行錯誤的に発散が始まる時間 $t_c$ を決定する。 $T$ を速度波形の全長、 $v_m$ を発散の傾斜線上の $T$ での値として、以下のように $v_2(t)$ を決定した。

$$v_2(t)=v_1(t) \ (t < t_c)$$

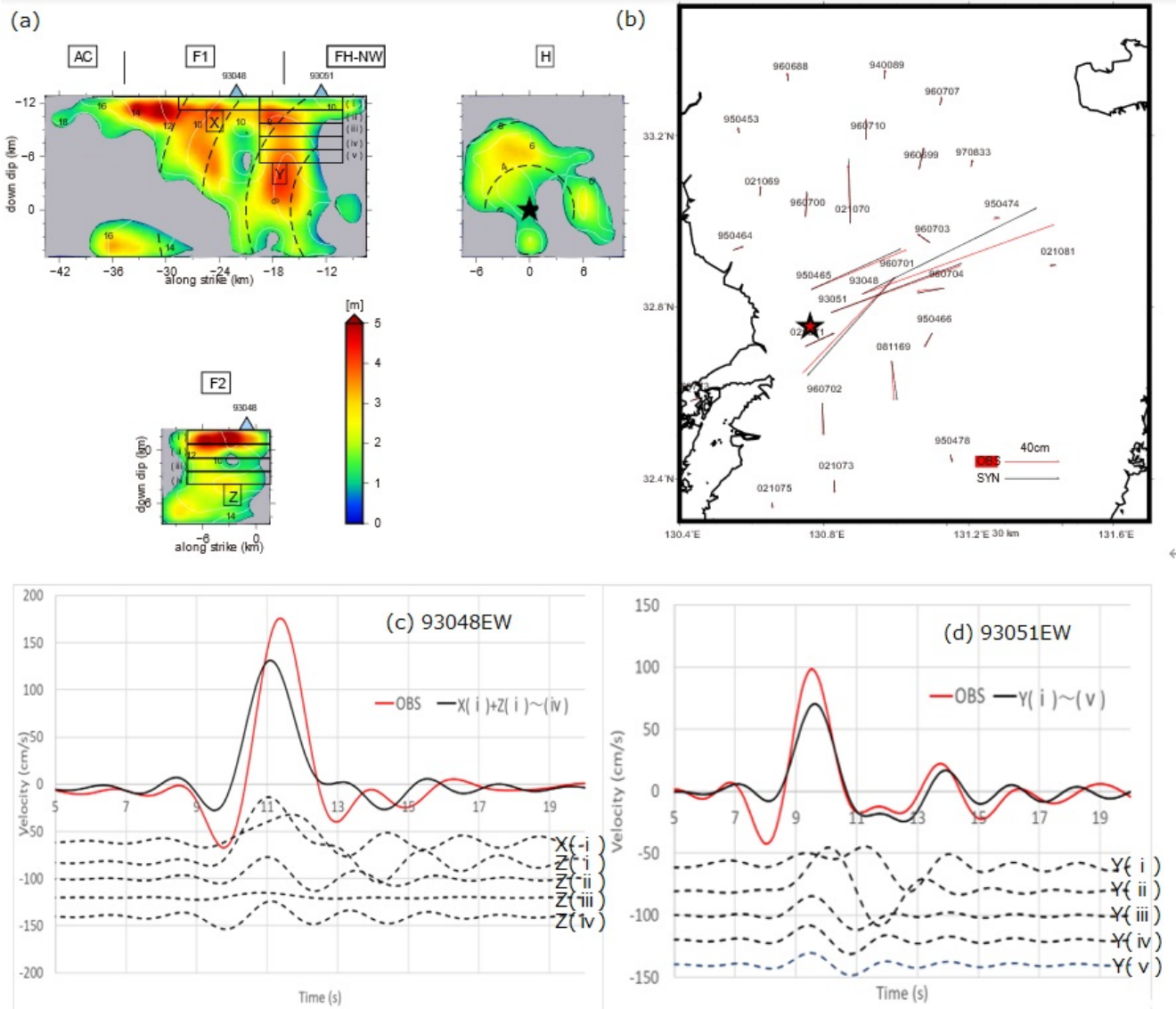
$$v_2(t)=v_1(t)-v_m(t-t_c)/(T-t_c) \ (t > t_c)$$

そして補正した速度波形をもう一度積分することによって得られた、変位波形の終わり20秒の平均値を地殻変動の大きさとして決定した。

### 3. 震源インバージョン

インバージョン手法、グリーン関数計算法、断層モデルについてはKobayashi et al. (2017)と同じものを用いた。インバージョンを行った結果のすべり分布は図中(a)のようになった。このすべり分布から計算された合成地殻変動（SYN）と観測地殻変動（OBS）の水平成分を図中(b)で比較したが、93048と93051を含め両者は概ね合っている。(a)のすべり分布をKobayashi et al. (2017)のものと比較すると、震源断層近傍の地殻変動データを追加することにより、F1におけるすべりの一部がF2に移動し、かつF2の浅い部分に集中する傾向が見て取れる。その結果、Kobayashi et al. (2017)と同じようにF1上の小断層X-(i)、F2上のZ-(i)～(iv)からのcontributionだけで93048の合成速度波形を描いてみると、それだけで長周期パルスを8割方説明できていることがわかる（図中(c)）。また、Z-(i)～(iv)それぞれのcontribution（点線）はほぼ同時刻に到達して、directivity効果を起こしていることが見て取れる。一方、93051直下の小断層Y-(i)～(v)のすべりは

Kobayashi et al. (2017)と大きく変わるところがないので93051に対する結論に変化はない。以上をまとめると、通常の震源インバージョンの結果により震源断層近傍の長周期パルスと地殻変動を説明できて、特別な震源モデルを考える必要はない。他の地震と比較すると、熊本地震の場合、浅いアスペリティと上向きの破壊伝播が特徴になっている。



## 2019年リッジレスト地震( $M_w$ 7.0)の震源過程：2016年熊本地震との比較

### Rupture process of the 2019 $M_w$ 7.0 Ridgecrest earthquake: Comparison with the 2016 Kumamoto earthquake

\*小林 広明<sup>1</sup>、元木 健太郎<sup>1</sup>、瀬瀬 一起<sup>2</sup>

\*Hiroaki Kobayashi<sup>1</sup>, Kentaro Motoki<sup>1</sup>, Kazuki Koketsu<sup>2</sup>

1. 小堀鐸二研究所、2. 東京大学地震研究所

1. Kobori Research Complex, 2. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

2019年7月6日にカリフォルニアのリッジレストで $M_w$  7.0の地震が発生した。この地震は2016年4月に発生した一連の熊本地震の最大イベントとほぼ同規模である。そこで、本研究ではこの $M_w$  7.0の地震の震源過程解析を行い、Kobayashi et al. (2017)による熊本地震の最大イベント（以下、熊本地震とする）の解析結果との比較を行った。

震源過程解析には強震波形、high-rate GNSS、static GNSSの3種類のデータを使用した。強震波形データはSCEDCより入手し、high-rate GNSSはMelgar et al. (2019)による、static GNSSはUNAVCOおよびFloyd et al. (2020)によるデータを用いた。強震波形およびhigh-rate GNSSデータは0.05-0.4 Hzのバンドパスフィルターをかけた速度波形を用いた。また、数点の強震観測点については、加速度記録から補正を加えて2回積分して得られた変位波形の残留変位もインバージョンに使用した。インバージョン手法はマルチタイムウィンドウ線形インバージョン法(Yoshida et al. 1996; Hikima and Koketsu, 2005)を用いた。グリーン関数の計算には、CVM-S4.26より構築した1Dの水平成層の速度構造モデルを使用した。

断層モデルは地表地震断層(Ponti et al., 2020)と余震分布(Lomax, 2020)を参考に北部・中部・南部の3つのセグメントからなるモデルを構築した。北部セグメントはやや南西傾斜、中部と南部のセグメントはやや南東傾斜とした。各セグメントの長さはそれぞれ16 km, 12 km, 24kmとし、幅はすべて14kmとした。震央はLomax (2020)によって再決定された位置を用い、震源深さは断層の離散化の都合上約5 kmとした。インバージョン解析では断層を2 km四方の小断層に分けた。各小断層の震源時間関数は幅1秒の箱型関数を12個置くことで表現した。

解析の結果、第一タイムウィンドウの破壊開始時刻を決める破壊伝播速度( $V_r$ )は2.3 kmとなった。破壊は震源からまず北西に進み、その後南東に進んだ。最大すべり(約7m)は震源から4~6 km南東の中部セグメントで得られた。そのほか、北部セグメントに5mのすべりのピークが複数個所得られたほか、南部セグメントに4m程度のピークを持つすべりが得られた。これら大すべりの位置や破壊過程は既往研究(例えば、Liu et al., 2019)と概ね整合的である。地震モーメントは $4.5 \times 10^{19}$  Nm ( $M_w$  7.0)となりGlobal CMTによる推定値の $4.4 \times 10^{19}$  Nmとほぼ一致する。

得られた結果を、Kobayashi et al. (2017)による熊本地震の結果と比較する。熊本地震の主断層の長さは54 kmで、ほぼリッジレスト地震と同じである。面積はKobayashi et al. (2017)が設定している副断層を除いても熊本地震のほうがやや大きい、これは幅の違いによる。なお、Somerville et al. (1999)の規範による断層のトリミングを行っても、両地震ともに面積は変わらなかった。熊本地震の地震モーメント( $4.3 \times 10^{19}$  Nm)はリッジレスト地震とほぼ同じである。また、全体のモーメントレート関数も最大値はほぼ同じであった。最大すべりは両地震とも浅い部分に位置しており、その量はリッジレスト地震のほうが大きい、熊本地震の最大すべり(4.4 m)は副断層を設定している部分で得られているため比較は難しい。熊本地震の震源は約13 kmと深く、 $V_r$ は2.5 kmと、リッジレスト地震と比べ速い、また、リッジレスト地震は必要なタイムウィンドウ数も多く、特に南東部への破壊伝播速度はかなり遅かったと考えられる、また、断層上の最大のすべり速度も熊本地震のほうが速い。

本研究では、2019年リッジレスト地震( $M_w$  7.0)の震源過程解析を行い、Kobayashi et al. (2017)による2016年熊本地震の結果と比較した。断層長、地震モーメント、モーメントレート関数のピークは両地震では

ほぼ同じであり，最大すべりも両地震共に浅い部分に位置している．一方，破壊伝播速度や最大すべり速度はリッジレスト地震のほうが遅く，その理由の一つとして破壊開始点深さの違いが関係している可能性が考えられる．

## 2019年Ridgecrest地震 ( $M_w$ 7.1) の強震動生成域と地震動シミュレーション

### Strong Motion Generation Areas and Ground Motion Simulation for the 2019 Ridgecrest $M_w$ 7.1 Earthquake

\*染井 一寛<sup>1</sup>、宮腰 研<sup>1</sup>

\*Kazuhiro Somei<sup>1</sup>, Ken Miyakoshi<sup>1</sup>

1. 一般財団法人地域地盤環境研究所

1. Geo-Research Institute

米国カリフォルニア州リッジクレスト (Ridgecrest) では、2019年7月4日17時33分 (協定世界時) に  $M_w$  6.4の地震を発端として地震活動が活発化し、翌々日の7月6日3時19分に  $M_w$  7.1の地震 (2019年Ridgecrest地震) が発生した。2019年Ridgecrest地震は、震源の深さが8kmで横ずれ型の内陸地殻内地震であった (USGS, 2019)。この地震によって、震央周辺のSouthern California Seismic Network (SCSN) の強震観測点のうち、断層最短距離が短い (約3 km) CLCとCCCの2地点の記録に注目すると、震源近傍のCLCでは、最大加速度 (3成分最大値)  $500 \text{ cm/s}^2$ 、最大速度  $40 \text{ cm/s}$  が観測され、震央から約35 km南東に位置するCCCでは、最大加速度  $556 \text{ cm/s}^2$ 、最大速度  $69 \text{ cm/s}$  が観測された。これらの記録を含む、周辺の最大速度は、地震動予測式 (司・翠川, 1999) の値と同程度であり、震源特性としては、同規模の内陸地殻内地震の平均像と近いことが想像されるが、観測速度波形に注目すると、2つ以上の波形パッケージが確認でき、複雑な震源破壊過程であったと考えられる。また、本地震後の地表踏査や測地記録によると、震源断層に沿って地表地震断層が生じていることが報告されている (例えば, USGS, 2019)。2019年Ridgecrest地震は、周辺の主として1 Hz以下の地震動記録や測地記録に基づいた震源インバージョン解析により、断層面上のすべり分布が推定されている (例えば, Liu et al., 2019)。本研究では、1 Hz以上の短周期を含む広帯域の地震動生成過程を議論するために、2019年Ridgecrest地震における0.2–10 Hzの観測地震動を再現する強震動生成域 (Strong Motion Generation Area: SMGA) によって構成される震源モデルを推定した。

本研究では、経験的グリーン関数法 (Irikura, 1986) を用いた広帯域地震動シミュレーション (0.2–10 Hz) を実施した。経験的グリーン関数は、2019年7月6日3時16分に発生した  $M_w$  5.0の地震 (要素地震) 記録を使用した。本研究の震源モデルは、できる限り単純なモデルで観測波形に見られる複数の波形パッケージを含む広帯域地震動を再現するために、正方形のSMGAを3枚仮定し、背景領域からの寄与は無いものとした。また、USGSから公開されているモーメントテンソル (MT) 解の幾何形状と余震分布を参考にして、北西–南東走向の横ずれ断層面を設定した。SMGA内の相対的な破壊開始点、破壊速度、SMGAの大きさ、ライズタイムは、震源周辺の16地点3成分の記録の再現性を見て、試行錯誤的に推定した。現時点で得られた3枚のSMGAは、地震発生層内に位置し、震源付近にSMGA1、震源から北西側にSMGA2、震源から南東側にSMGA3の順に破壊した。SMGA1とSMGA3の破壊は南東方向に、SMGA2の破壊は北西方向にそれぞれ進展し、SMGA2とSMGA3は、それぞれSMGA1の破壊開始から2秒後、8秒後に破壊を開始した。これらのSMGAによって、震源周辺で観測された0.2–10 Hzの観測地震動は広帯域に再現することができた。先述した観測速度波形に見られる複数の波形パッケージは、震央から南東側の観測点では、時系列で後半の波形パッケージの振幅が最も大きく、これは断層南東にあるSMGA3の影響と考えられる。一方で、震央から北西側の観測点では、前半の波形パッケージの振幅が大きく、これは主としてSMGA2の寄与であることが確認できた。今後、SMGAのパラメタについては、グリッドサーチ等によって最適解を決定するとともに、震源インバージョンによる震源破壊過程とSMGAモデルの比較を行い、広帯域の地震動生成過程について議論を行う予定である。

謝辞：Center for Engineering Strong Motion Data（CESMD）から公開されているSCSNの強震記録を使用しました。本研究は、原子力規制庁の令和2年度原子力施設等防災対策等委託費（内陸型地震の特性化震源モデルに係る検討）事業の一部として実施されました。

# LMGAを考慮した特性化震源モデルによる地表地震断層近傍における永久変位量の評価ー逆断層地震の場合ー

## Evaluation of permanent displacement near surface rupture based on characterized source model with LMGA –case study of reverse fault type -

\*松元 康広<sup>1</sup>、宮腰 研<sup>2</sup>、入倉 孝次郎<sup>3</sup>

\*Yasuhiro Matsumoto<sup>1</sup>, Ken Miyakoshi<sup>2</sup>, Kojiro Irikura<sup>3</sup>

1. 構造計画研究所、2. 地域地盤環境研究所、3. 愛知工業大学

1. Kozo Keikaku Engineering Inc., 2. Geo-Research Institute, 3. Aichi Institute of Technology

地表地震断層近傍の地震動記録には、2016年熊本地震 ( $M_w 7.0$ ) のような断層運動に伴い永久変位が現れる (岩田, 2016) . このような永久変位は、地震発生層以浅の浅部断層にLMGA (Long-period Motion Generation Area) や大すべり域のような領域を考慮した特性化震源モデルを用いることで評価可能であることが多くの先行研究 (例えば、松元・他 (2018)) で示されている. 地震動記録から評価される変位波形の永久変位や地殻変動は直下の断層面上のすべりの影響が強く反映されるため、これらの観測量からLMGAのすべり量 ( $D_{LMGA}$ ) を推定できると考えられる.

本検討では、1999年集集地震 ( $M_w 7.6$ ) や2014年長野県北部の地震 ( $M_w 6.2$ ) のような逆断層地震を対象に観測量から $D_{LMGA}$ を推定することを最終的な目的として、はじめに一様すべりの震源モデル、次にLMGAを考慮した特性化震源モデルを対象に、数値シミュレーションに基づいて地表地震断層近傍の永久変位量を評価し、観測点直下の断層面上のすべり量との関係性を検討する. 次に、これらの関係を用いて実地震の地表地震断層近傍の永久変位量から $D_{LMGA}$ を推定し、さらに $M_0$ - $D_{LMGA}$ の関係式の検討を行う. 本検討で用いる数値シミュレーション手法はOkada (1992)の地殻変動プログラムを用いる. 永久変位を含む地震動評価手法にHisada and Bielak (2004)の波数積分法があるが、均質地下構造モデルを仮定した場合、永久変位量は両手法で同じ結果が得られることを確認している.

### (1) 一様すべりの震源モデルに対する地表地震断層近傍の永久変位量

一様すべりで設定した震源モデルは、断層上端深さは地表、傾斜角は30から60°の複数ケース、すべり角は90°を基本とした (図1左). 数値シミュレーションで得られた主な特徴は次の通りである. なお、以降では評価点の永久変位量の水平成分を $D_{site\_hor}$ 、上下成分を $D_{site\_ud}$ 、3成分合成を $D_{site\_3comp}$ 、断層面上の平均すべり量を $D_{fault\_ave}$ と呼ぶことにする.

地表トレース近傍の評価点の $D_{site\_3comp}/D_{fault\_ave}$ は、傾斜角によって異なるが、上盤側は0.7から0.6程度、一方、下盤側は0.3から0.5程度と上盤側に比べて小さい (図1中央). また、ある一定の傾斜角ですべり角を変化させた場合、 $D_{site\_hor}/D_{fault\_ave}$ や $D_{site\_ud}/D_{fault\_ave}$ は変化する一方、 $D_{site\_3comp}/D_{fault\_ave}$ に顕著な変化は見られず、その値はロバストであることが分かった (図1右). すなわち、観測記録のある特定の成分に着目するのではなく、3成分合成 ( $D_{site\_3comp}$ ) からその評価点直下のすべり量を精度良く推定できることが示唆される.

### (2) LMGAを含む特性化震源モデルに対する地表地震断層近傍の永久変位量

従来の特性化震源モデル (SMGAと背景領域で構成) にLMGAを加えて設定した. SMGAの上端深さは2 kmとし、強震動予測レシピに従ってSMGAのすべり量 ( $D_{SMGA}$ ) は $D_{fault\_ave}$ の約2倍、また、宮腰・他 (2020)に従って $D_{LMGA}$ は $D_{SMGA}$ と同じと仮定した. 永久変位量の評価点は断層中央の断層直交方向に配置した (図2左). 数値シミュレーションで得られた主な特徴は以下の通りである.

地表トレース近傍の上盤側の $D_{site\_3comp}/D_{fault\_ave}$ は地表トレース近傍で1よりも大きい (図2中央). これは地表トレース近傍の評価地点の永久変位量 ( $D_{site\_3comp}$ ) は断層面上の平均すべり量 ( $D_{fault\_ave}$ ) ではなく、評価

地点直下のすべりの大きなLMGA ( $D_{\text{LMGA}} \cong 2 \times D_{\text{fault\_ave}}$ ) の影響を強く受けるためである。  $D_{\text{fault\_ave}}$  の代わりに  $D_{\text{LMGA}}$  で正規化すると、地表トレース近傍の  $D_{\text{site\_3comp}}/D_{\text{LMGA}}$  は一様すべりのモデルと同様の値が得られた (図2右)。

また、ここで設定したモデルの場合、地表トレースから1から3km程度以内の評価地点の永久変位量は、上端深さ2kmに設定したSMGAよりもそれ以浅のLMGAの寄与が大きいくとも確認できた。以上から、地表地震断層に近い評価地点の観測量 ( $D_{\text{site\_3comp}}$ ) から、LMGAのすべり量を推定できることが示唆される。

### (3) 本検討で得られた関係式に基づく $D_{\text{LMGA}}$ の推定

本検討で得られた  $D_{\text{site\_3comp}}/D_{\text{LMGA}}$  と地震動観測点の  $D_{\text{site\_3comp}}$  から、直下の  $D_{\text{LMGA}}$  を推定し、さらに  $D_{\text{LMGA}}$  と地震モーメント ( $M_0$ ) の関係 ( $M_0$ - $D_{\text{LMGA}}$ ) を検討した。なお、対象観測点は地表地震断層から約2 km以内とした。宮腰・他 (2020)は地表地震断層が現れた国内外の8個の内陸地殻内地震(Mw6.3~7.9)を対象に  $M_0$ - $D_{\text{LMGA}}$  のスケーリング則を提案しているが、本検討で得られたように傾斜角を考慮した  $D_{\text{site\_3comp}}/D_{\text{LMGA}}$  を適用した場合、特に下盤側に位置する観測点の永久変位から推定されるLMGAのすべり量が  $M_0$ - $D_{\text{LMGA}}$  のスケーリング則とよく一致することがわかった。

謝辞：本研究の一部は原子力規制庁による令和2年度原子力施設等防災対策等委託費（内陸型地震の特性化震源モデルに係る検討）事業として実施されました。また、Okada (1992)に基づく地殻変動プログラムは防災科学技術研究所のホームページより公開されているプログラムを使用させていただきました。記して感謝いたします。

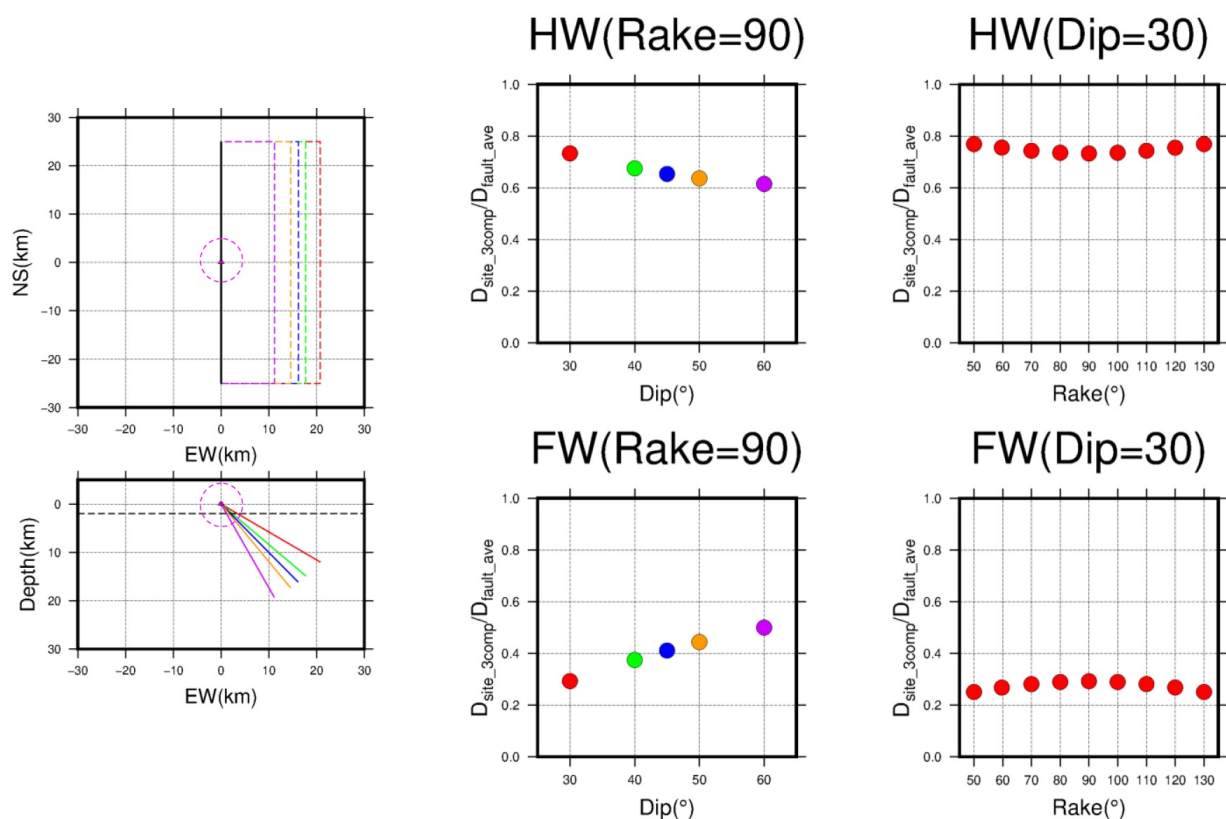


図1 (左) 一様すべりの震源モデルと中央図と右図で示した評価地点 (ピンク点線内のピンク三角印: 地表トレースから上盤側 (HW), 下盤側 (FW) にそれぞれ 0.2 km 地点). (中央) 傾斜角の違いによる  $D_{\text{site\_3comp}}/D_{\text{fault\_ave}}$ . 評価地点は地表トレースから 0.2 km 地点. (右) 傾斜角 30° の時のすべり角の違いによる  $D_{\text{site\_3comp}}/D_{\text{fault\_ave}}$ . 評価地点は地表トレースから 0.2 km 地点.

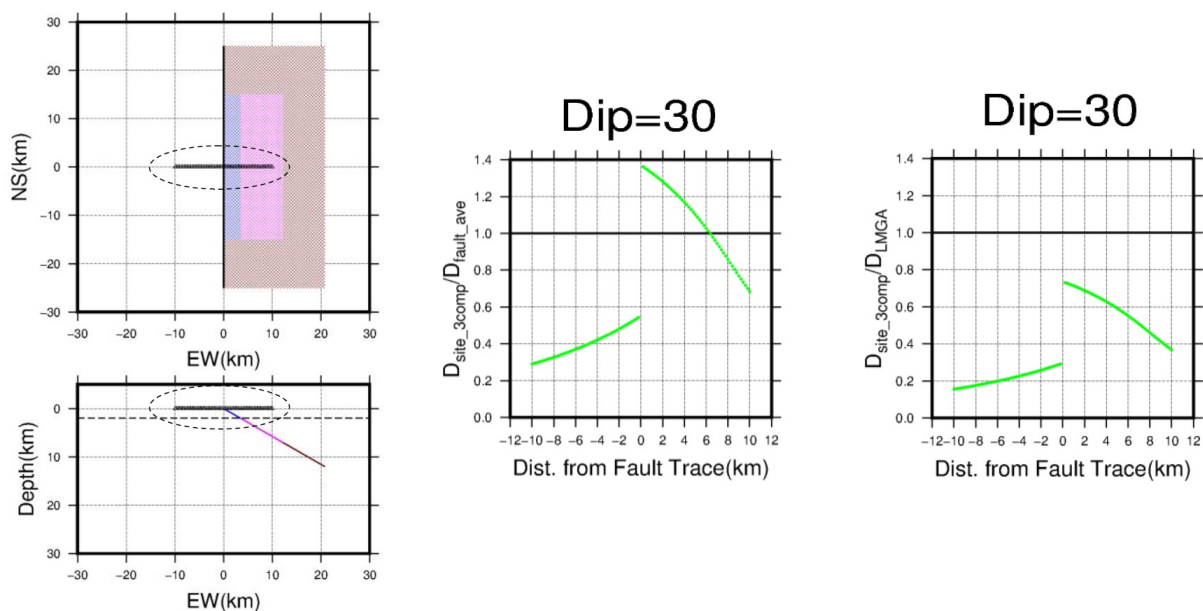


図2 (左) LMGAs を考慮した特性化震源モデル (傾斜角 30° の場合. ピンク: SMGA, 青: LMGA, 茶: 背景領域) と評価地点 (黒点線の楕円内の黒三角印: 地表トレースから 10 km の範囲内で 0.2 km 間隔に配置). (中央) 傾斜角 30° の時の  $D_{\text{site\_3comp}}/D_{\text{fault\_ave}}$  で横軸の正値は上盤側, 負値は下盤側. (右) 傾斜角 30° の時の  $D_{\text{site\_3comp}}/D_{\text{LMGA}}$ .

# 2016年熊本地震で観測された長周期速度パルスの生成に関する理論的解析

## Theoretical analysis of the long-period velocity pulses observed in the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence

\*垂水 洸太郎<sup>1</sup>、渡邊 禎貢<sup>1</sup>、小松 正直<sup>1</sup>、竹中 博士<sup>1</sup>

\*Kotaro Tarumi<sup>1</sup>, Tomotsugu Watanabe<sup>1</sup>, Masanao Komatsu<sup>1</sup>, Hiroshi Takenaka<sup>1</sup>

1. 岡山大学

1. Okayama University

### 1.Introduction

2016年熊本地震では、震源断層ごく近傍で震度7を記録した地震動が観測され、地殻変動を伴った大きな被害が発生した。特に本震( $M_{JMA}$  7.3)では、西原村小森（熊本県自治体震度観測計）において、観測された加速度記録からの積分によると、地動速度では時間幅約3秒の長周期速度パルスがEW成分とUD成分で見られ、地動変位では水平動、上下動共に約2 mの永久変位が生じたと推定されている。2016年熊本地震の前震と本震に関する震源断層のすべりインバージョンの研究は複数行われており、その多くで西原村の直下にアスペリティが存在し、その内部における破壊フロントはアスペリティ下端付近から地表面に向かって進行したことが示唆されている。そのため、西原村小森で観測された長周期速度パルスの原因が、破壊フロントの進行方向で遠地S波に起因して大振幅パルスが生じる破壊指向性（Forward directivity）なのか、あるいは震源断層ごく近傍で卓越する近地項、中間項の効果なのか議論されている。そこで本研究では、震源断層を単純化したモデルを設定し、全無限均質媒質中の有限矩形断層から生じる近地項、中間項、遠地項を分離した変位の解析解（垂水・竹中、2020, JpGU-AGU）を用いて、長周期速度パルスの成因について理論的に検討した。

### 2.Simple Asperity Model

Figure.1は本研究で設定した非常にシンプルなアスペリティモデルと西原村を模した観測点の例である。本研究では、Asano & Iwata (2016)を参考に、西原村直下と推定されたアスペリティのみをモデル化し、その寄与のみを考慮した。均質媒質中のP波速度は6.0 km/s, S波速度は3.5 km/sとし、アスペリティの長さは10 km, 幅14 km, すべり3.7 m, ライズタイム1.5 s, すべり角-140°とした。アスペリティ内部を進行する破壊フロントは水平で、破壊伝播速度はS波速度の0.78倍とし、地表面に向かって進行すると仮定した。また、地表面では自由表面の効果として、振幅を2倍している。

### 3.Numerical results

Figure.2に地動速度（水平成分）の数値計算結果を示す。全変位に加えて、近地項（本研究では近地項と中間項の和）と遠地項も同様に示している。結果は、非常にシンプルなモデルを用いたにもかかわらず、西原村で観測された（加速度記録から推定された）速度波形の特徴、特にEW成分とUD成分で観測された時間幅約3秒の長周期速度パルスを再現できている。この結果により、長周期速度パルスの生成には、近地項が主に寄与しているが、EW成分では遠地項（主に遠地S波）も寄与しており、破壊指向性の効果も考えられる。実際の震源過程の複雑さや背景領域の寄与等を考慮した綿密なモデリングをすることによって、より良く観測波形を再現できるかもしれない。

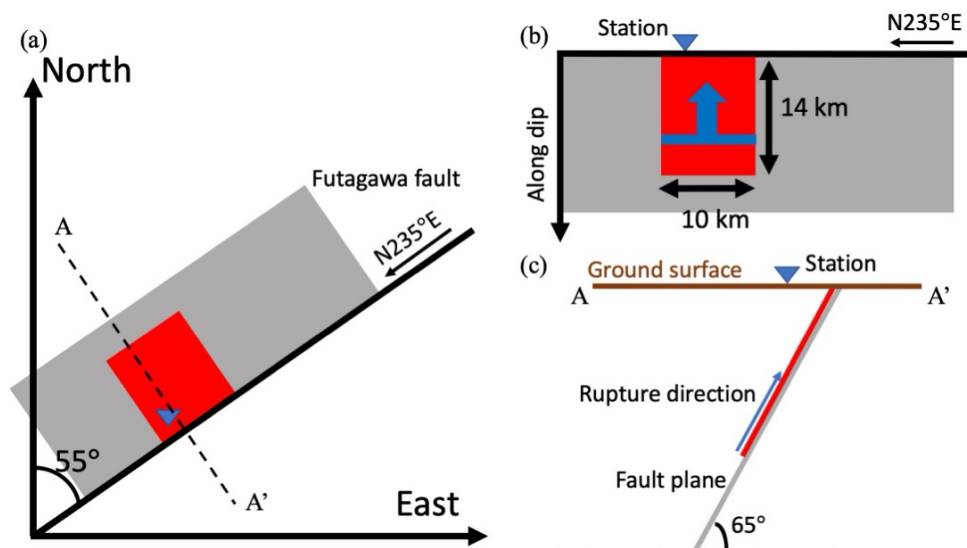


Figure.1 Simple asperity model in this study. Gray and red ((a) & (b):region, (c):line) show fault plane and asperity. Blue triangle denotes the station simulated as Nishihara-village. Blue line and vector indicate rupture front and its direction of propagation, it propagates from the bottom of the asperity to the top of that. (a)The relation between the fault plane/asperity and the station on North-East coordinate system. Strike angle is set as N235°E. (b)Cross-section of simple asperity model across fault plane. Length and width of asperity are 10 km & 14 km. (c)Cross-section across A-A' (Figure.1-(a)), showing the appearance of the fault under the ground. Dip angle is set as 65°.

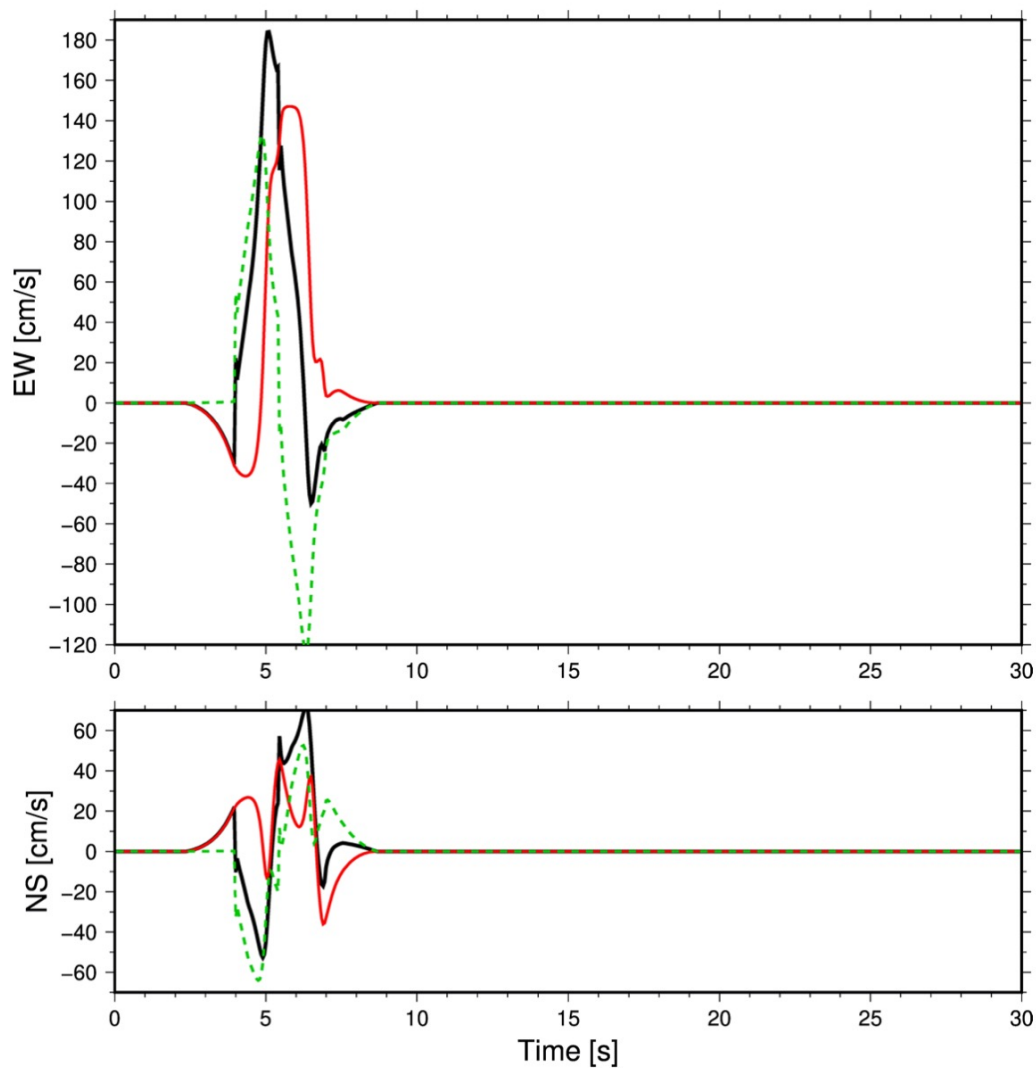


Figure.2 Numerical results of ground velocity of horizontal components. Black, red and green dashed lines indicate total displacements, the summation of near-field term and intermediate terms and far-field terms, respectively.

## 波形フィッティングによる理論グリーン関数の改良手法の適用 Application of improvement of Green's function by waveform fitting

\*吉田 邦一<sup>1</sup>、郭 雨佳<sup>1</sup>、染井 一寛<sup>1</sup>、宮腰 研<sup>1</sup>

\*Kunikazu Yoshida<sup>1</sup>, Yujia Guo<sup>1</sup>, Kazuhiro Somei<sup>1</sup>, Ken Miyakoshi<sup>1</sup>

1. 一般財団法人 地域 地盤 環境 研究所

1. Geo-Research Institute

近地強震記録を用いた震源過程の解析（震源インバージョン解析）では、解析の過程で小断層からのグリーン関数を理論的に計算する。グリーン関数の推定精度は、震源インバージョンの解析精度を大きく左右することから、これを適切に評価することは非常に重要である。グリーン関数を精度良く評価する方法として、小地震の理論波形が観測記録をよく再現するよう地下構造モデルを調整することで高精度のグリーン関数を求める波形フィッティング手法がある。本研究では、LMGAのモデル化を目標として地表地震断層が現れた2010年Darfield地震(Mw7.1)と2019年Ridgecrest地震(Mw7.1)を対象に震源インバージョン解析を予定しており、これらの地震の震源域付近の観測点を対象に、波形フィッティングによる1次元構造モデルによるグリーン関数の高精度化を試みた。

基本的な解析手順は、Yoshida et al. (2017, EPS)に従った。震源断層ごく近傍で発生した小地震を解析対象として選定し、震源位置、メカニズム解は既往研究の結果をもとに、ライズタイムは試行錯誤で設定する。観測波形には、震源インバージョンの解析周波数を考慮してそれを含むようにバンドパスフィルター（本検討ではおおむね0.2~1 Hz）を適用し、加速度波形は積分して速度波形とする。この条件で、理論波形が観測波形になるべく再現できるような速度構造モデルを探した。探索では、初期構造モデルとそこから乱数でパラメータを変化させた初期構造モデル群を1000個生成し、これらのモデル群を滑降シンプレックス法[Nelder and Mead (1965)]を用い改良してゆく。波形の一致度合いは、 $f=(O-C)^2+p$ として評価した。ここで、 $O$ ,  $C$ はそれぞれ観測および理論波形、 $p$ はペナルティである。ペナルティには、低速度層（上の層よりも速度の遅い層）に関するものと、 $V_p/V_s$ 比の経験式[狐崎・他(1990)あるいはBrocher (2005)]からのモデルのずれに関するものを組み込んだ。

2010年Darfield地震の発生したニュージーランドCanterbury地域については、主に地質情報などから構築された地下構造モデルがあり[Lee et al. (2017)など]、後期白亜紀以降の $V_s < 3$  km/sの堆積物が厚い所で2 km以上堆積している。地殻構造モデルにはトモグラフィによる3Dモデル[Syracuse et al. (2013)]がある。解析ではM4.4と4.7の2つの余震を対象とした。これらの地震の震源位置には、既往研究による再決定震源を用いた。観測点直下のLeeモデル（堆積層モデル）を参考に初期モデルを設定し、層境界深度は固定して堆積層の速度を調整して構造モデルを求めた。堆積層モデルの基盤以深では、上述の3D地殻構造モデルを平均化して水平成層モデルとしたものを設定した。なお、地殻モデルの深さ2~5 kmの $V_s$ は2.9 km/sである。ここでは堆積層モデルと地殻構造モデルはそのまま接続したが、S-P時間が大きく異なる観測点では地殻モデル浅部も調整対象とした。

解析で得られた構造モデルは、初期モデルからはそれほど大きく変化していない。得られた構造モデルを用いて小地震の波形を計算すると、S波部分の波形やS-P時間の理論と観測の対応はおおむね良好である。後続波はフィッティング対象とはしなかったが、一部の観測点での観測波形に今回のモデルでは再現できていない後続波が見られる観測点がある。特に、本震断層の東側のクライストチャーチ市街の観測点で後続波が見られ、付近の盆地構造の影響が考えられる。一方で、震源インバージョン解析で重要なS波付近の数秒間は多くの観測点である程度再現できている。

また、現在2019年7月6日(UT)に発生したカリフォルニア州Ridgecrest地震についても周辺観測点のグリーン

関数の解析を進めている。この地震については、余震群の震源再決定が複数の研究者により行われている。ここではM5.0の余震を解析対象としたが、再決定震源は深さが0.8～3.2 kmとばらついている。震源の深さは理論波形に大きく影響するため、震源のばらつきによる解析結果の変化を検討しているところである。また初期構造モデルとして文献調査等[例えばLee et al. (2014)]から複数のモデルを検討している。発表時には地下構造の地域性や、震源深さが結果に与える影響について議論する予定である。

**謝辞：**本研究は、原子力規制庁の令和2年度原子力施設等防災対策等委託費（内陸型地震の特性化震源モデルに係る検討）事業の一部として実施されました。

## Seismic intensity simulation of the entire 1923 Kanto earthquake sequence

\*Hiroe Miyake<sup>1</sup>, Satoko Murotani<sup>2</sup>, Kazuki Koketsu<sup>1</sup>

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. National Museum of Nature and Science

The 1923 Kanto earthquake has been extensively analyzed from seismic, geodetic, and earthquake engineering aspects. Most mainshock rupture models consisting of two slip regions extending from Kanagawa to southern Boso are well constraint by geodetic data. However, the seismic intensity distributions of the 1923 Kanto earthquake based on the housing collapse rate show a significant northern extension toward Saitama. It is well known that several M7-class aftershocks were associated with the 1923 Kanto earthquake, and some of those are seen in the mainshock waveform traces. We here simulate seismic intensity distributions of the entire 1923 Kanto earthquake sequence and discuss the degree of difference of the seismic intensity from the entire sequence and the mainshock only.

To estimate seismic intensity distributions, we employ a set of ground motion prediction equations, fault geometries, and velocity models with different engineering bedrock definitions. The exact locations, depths, and seismic moment of the aftershocks are still under discussion and earthquake catalogs show large variability. Therefore we perform a grid search to measure the sensitivity of hypocenters and moment magnitudes to seismic intensity. We also test ground motion simulations to reduce the overlap between large slip regions and strong motion generation areas for the mainshock, which is expected to shift the current seismic intensity distribution to the west or deep.

## 2013年栃木県北部の地震の震源域における震源・サイト・伝播特性に関する検討

### A study on source, path, and site effects around the source area of the 2013 Tochigi-Ken Hokubu Earthquake

\*引間 和人<sup>1</sup>

\*Kazuhito Hikima<sup>1</sup>

1. 東京電力ホールディングス(株)

1. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.

#### 【はじめに】

2013年2月25日に発生した栃木県北部の地震は、Mj 6.3の中規模地震にもかかわらず、震央から約4km離れたKiK-net栗山西観測点 (TCGH07)で大加速度の地震動が観測された。この要因分析として筆者は震源過程解析を実施する(引間, 2014)とともに、震源～観測点の伝播特性の影響を検討するため、余震記録などを用いてスペクトルインバージョンを実施した(引間, 2013; 2015)。その結果、TCGH07で卓越した5～8Hz程度の高周波数成分は、震源域であるTCGH07の西方向から到来する地震動に特徴的に見られ、伝播特性・サイト特性の影響を反映している可能性が高いことを示した。

一方、笠松・他(2019)は、中小地震の波形記録を使い5～8Hzの最大加速度の距離減衰式を作成し、TCGH07では周辺地点に比べてこの周波数帯域で揺れが大きくなり易いこと、さらに本震のすべりが大きな領域の北側で発生した地震では相対的に大きな増幅となることを示した。また、加藤・他(2019)では本震震源域の北側では震源特性として高周波数成分を強く励起する特徴が見られることを指摘している。前者は基本的には引間(2013; 2015)と同様に本震時のTCGH07での観測波形の特徴の要因を伝播・サイト特性として捉えるものであろう。対して、後者はそれに加えて震源特性も大きな影響があったものと考えている。しかし、ある特定サイトにおける狭い周波数での大振幅地震動の要因を震源特性の影響と捉えることは、他の観測点の記録でも特異な増幅が見られない限り考えにくいように思われる。

そこで、本検討では、筆者が行ったスペクトルインバージョン解析に新たなデータを追加して再解析を行い、求まった震源スペクトルをBruneの $\omega^{-2}$ モデルで評価し直し各地震の震源特性を定量化した。さらにそれらを基に、各地点のサイト特性を求めなおすことで、標準的な震源モデルに対するサイト特性を再評価した。そして、TCGH07において到来方向の違いによる増幅特性の違いについて再検討した。

#### 【スペクトルインバージョン解析】

スペクトルインバージョンはこれまでの解析(引間, 2013; 2015)とほぼ同様の条件で行った。震源域周辺のKiK-netの19観測点の加速度記録を使用し、各地点の地表・地中それぞれのサイト特性を求めた。使用した地震は2010年以降に発生したM3～5.1の95地震である。観測波形のS波初動から8秒間のNS, EW成分のフーリエ振幅スペクトルのRMSに対して1 Hz幅のParzenウィンドウにより平滑化したものをデータとしてインバージョン解析を行った。なお、水平2成分とも100 galを超える観測記録は解析から除いた。解析対象周波数は0.5～20 Hzとした。

インバージョンの際の拘束条件として、地中地震計位置で $V_s \geq 2500$  m/sとなる

FKSH07, TCGH17, GNMH14の地中観測点を基盤相当と仮定し、これらの位置の増幅率を1とする拘束条件を課した。一回目の解析では上記の拘束条件のみを付してインバージョンを実施し、そこで求まったQ値を周波数 $f$ に対して $Q=Q_0 \cdot f^n$ の関数形で近似した。二回目の解析ではそのQ値の関数を固定した上で震源スペクトルおよび増幅率を求めた。

次に、上記で求まった震源スペクトルに対して、残差が最小となるBruneの $\omega^{-2}$ モデルをグリッドサーチにより推定し、 $M_0$ および $\Delta \sigma$ を求めた。なお、F-netによりCMTが求まっている地震については、 $M_0$ の値としてそれらを採用した。

最後に、各観測点のサイト特性は推定した震源スペクトルと波動伝播のQ値を使って計算されるスペクトルに対する残差の平均値として評価した。

#### 【解析結果】

解析された地震の応力降下量について、震源位置による違いを確認したところ、2013年栃木県北部の地震の震源域で発生した地震は、他の領域で発生した地震に比べて相対的にやや小さな値を示すことがわかった(図1)。一方で、本震の震源域の値の変化を確認すると、北部での値が若干大きくなる傾向が見られ、その点は加藤・他(2019)の指摘と整合している。

さらに、TCGH07への到来方向によるサイト増幅率の違いを確認するために引間(2013; 2015)と同様の震源領域に分けてそれぞれの平均増幅特性を評価した(図2)。その結果TCGH07に西から到来する地震、すなわち本震の震源域で発生した地震では5~8Hz(周期0.1~0.2s程度)の増幅が顕著であるのに対して、他方向から到来する地震動ではそのような増幅は見られないことが確認された。

#### 【まとめと考察】

今回のスペクトルインバージョン結果をもとにした検討では、本震の震源域の応力降下量は他地点で発生した地震に比べて特に大きなものではない。そのため、震源特性そのものがTCGH07の大振幅の主要因となった可能性は小さいものと考えられる。一方で、TCGH07への到来方向により増幅特性が異なる傾向はこれまで同様に認められる。震源域からの地震動が増幅する周波数が本震で見られた卓越周波数とほぼ一致することから、やはりサイトの比較的近傍での伝播・サイト特性が本震時にも大きく影響したと考えることが妥当と思われる。

なお、到来方向による増幅特性の違いの要因については、TCGH07が山間部に位置していることから地形の影響が一因の可能性がある。その効果を検討するために、地形を考慮した波動伝播シミュレーションなども行っていきたい。

#### ＜関連発表＞

引間(2014)：2013年2月25日栃木県北部の地震(M<sub>j</sub> 6.3)の震源過程-3～経験的および理論グリーン関数を併用した解析～，日本地震学会2014年秋季大会，S15-P22.

引間(2013)：スペクトルインバージョンを用いた2013年2月栃木県北部地震の震源域におけるサイト・伝播特性に関する検討，日本地震工学会・大会－2013梗概集.

引間(2015)：2013年栃木県北部の地震の震源域におけるKiK-net観測点を用いたサイト・伝播特性に関する検討，日本建築学会大会(関東)学術講演梗概集，21026.

笠松・他(2019)：中小地震が励起した大振幅地震動の発生要因～2013年栃木県北部の地震(M<sub>j</sub>6.3)のKiK-net栗山西の検討～，日本地球惑星科学連合2019年大会，SSS13-13.

加藤・他(2019)：2013年栃木県北部の地震(M<sub>j</sub>6.3)の震源域における応力降下量の空間分布の検討，日本建築学会大会(北陸)学術講演梗概集，21226.

謝辞：本検討ではKiK-netおよびF-netメカニズム解，JMA一元化震源データを使用させて頂きました。

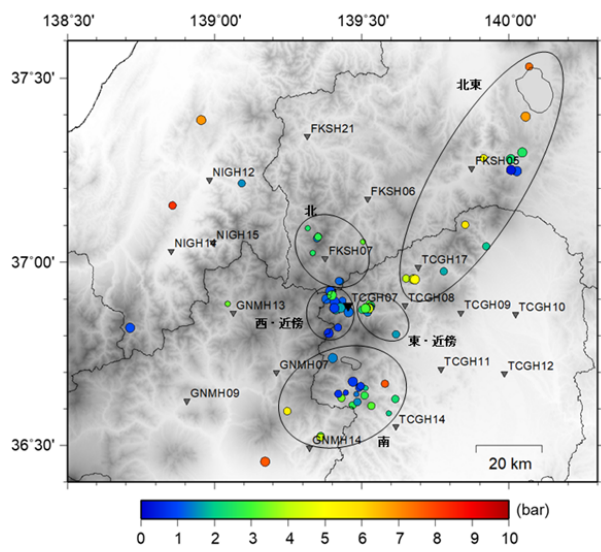


図1 スペクトルインバージョン結果から求めた対象地震の応力降下量

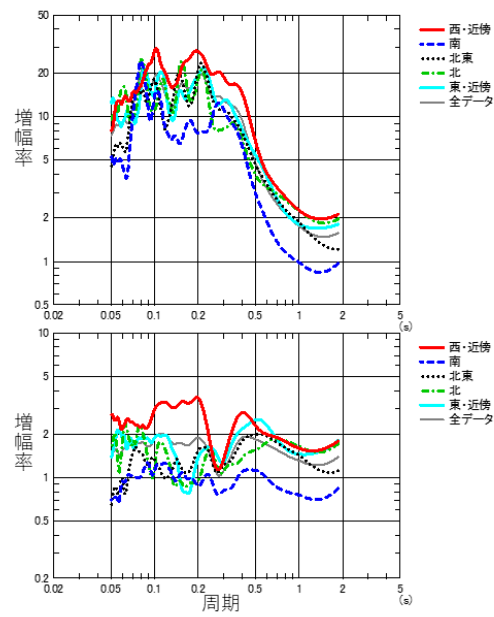


図2 TCGH07における到来方向別のサイト増幅特性 (上：地表地震計，下：地中地震計)

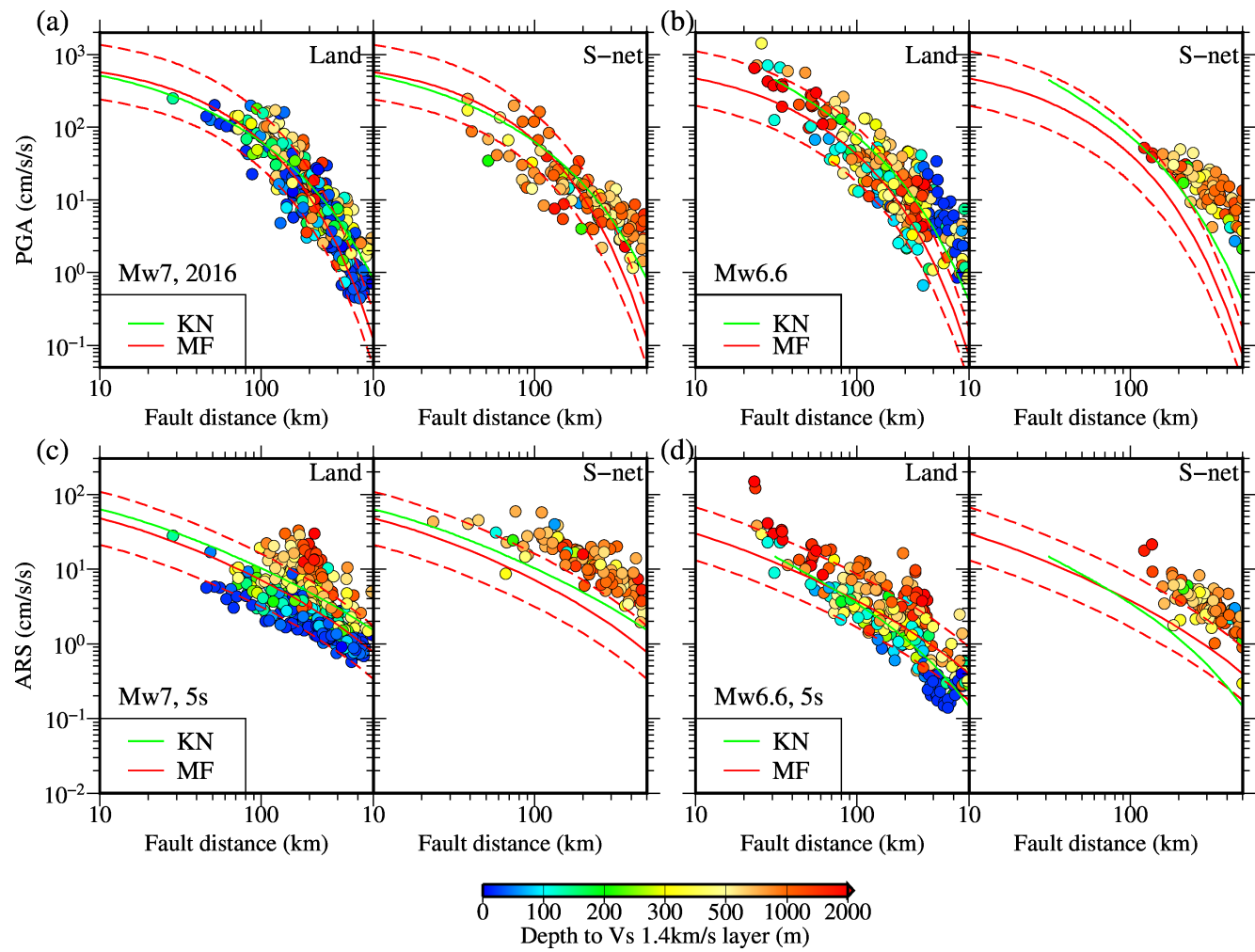
## Comparison of PGA, PGV, and acceleration response spectra between the K-NET, KIK-net, and S-net strong-motion sites

\*Yadab Prasad Dhakal<sup>1</sup>, Takashi Kunugi<sup>1</sup>, Wataru Suzuki<sup>1</sup>, Takeshi Kimura<sup>1</sup>, Nobuyuki Morikawa<sup>1</sup>, Shin Aoi<sup>1</sup>

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

A large-scale ocean bottom (OB) seismograph network (S-net) has been accomplished in northeast Japan and brought in operation since 2016. To understand the ground motion characteristics at the S-net ocean bottom seismograph sites, we analyzed and compared the peak ground motion parameters of accelerograms recorded at the S-net stations with those recorded at the K-NET and KIK-net stations on land. The analyzed ground motion parameters are the horizontal vector peak ground accelerations (PGA), peak ground velocities (PGVs), and 5% damped acceleration response spectra (ARS) for several earthquakes ( $5.3 \leq M_w \leq 7.0$ ) that occurred after the start of operation of S-net. The largest magnitude earthquake ( $M_w$  7) recorded by S-net was the 2016 Nov 22, 05:59 (JST), which occurred off the Fukushima Prefecture beneath the S2 segment of S-net. All earthquakes considered in this study were offshore earthquakes except the 2018,  $M_w$  6.6, Hokkaido Eastern Iburi earthquake. The offshore earthquakes were selected, such that a sizable number of good quality recordings were available at both land and S-net stations. We used the ground motion prediction equations (GMPEs) developed by Morikawa and Fujiwara (2013) and Kanno et al. (2006) as a basis of comparison between the land and S-net strong-motion data. The former and the latter papers are hereafter referred to as MF and KN, respectively.

Our analysis revealed that the PGAs and short period ( $T = 0.1, 0.2$  s) ARS at the S-net sites were generally similar to the values at the land sites. In contrast, the PGVs and ARS for periods longer than about 0.3 s were larger at the S-net sites, on average. Based on the subsea velocity model obtained from Japan Seismic Hazard Information Station (J-SHIS) (Fujiwara et al. 2012), it was found that most of the OB sites were underlain by thick sediments. The observed values at the S-net and land stations were generally comparable at sites located on deep sedimentary deposits. Also, the high Q path effect was found on short-period ground motions at distances beyond about 200 km at the S-net stations similar to those previously known in the forearc region in northeast Japan for deeper earthquakes. The tendency was seen for the deeper earthquakes in the present study, also for land sites located in the forearc region. Example plots of PGAs and ARS (5s) as a function of fault distance are shown in the image for the two largest earthquakes mentioned above. The panels (a) and (b) show the PGAs for the 2016,  $M_w$  7 event and 2018,  $M_w$  6.6 event, respectively. Similarly, the panels (c) and (d) show the ARS for the two events, respectively.



# 基盤面で得られた地震動記録による距離減衰特性のばらつきに関する検討

## Strong motion uncertainty determined from observed records on rock site for Ground-Motion Prediction Equation

\*西村 利光<sup>1</sup>、宮腰 研<sup>1</sup>

\*Toshimitsu Nishimura<sup>1</sup>, Ken Miyakoshi<sup>1</sup>

1. (一財)地域 地盤 環境 研究所

1. Geo-ResearchInstitute

### 1. はじめに

地震動予測の不確かさに関しては、近年、地震観測記録の蓄積とともに、多くの地震動予測式(GMPE)が提案されており、それらの予測式に対する観測最大加速度(PGA)や最大速度(PGV)のばらつきに関する知見が増えている。このばらつきを調べることは、その予測式を用いた地震動予測の精度や予測の不確実性を検討するために重要である。地震動予測の不確実性は「認識論的不確実性(Epistemic uncertainty)」と「偶然的な不確実性(Aleatory variability)」に分けられ、前者はデータや知識の増加で減らすことができる一方、後者は予測において避けられない偶然的な変動である。地震動予測式に対する観測値のばらつきには、震源(Source)、伝播(Path)、地盤(Site)にそれぞれの不確実性が含まれているが、既往の距離減衰式において、これらを含んだばらつきは対数標準偏差で0.3程度(自然対数標準偏差で0.69程度)となっている(例えば、司・翠川(1999),Kanno et al. (2006),佐藤(2008))。このような観測値のばらつきから、認識論的不確実性によるばらつきを分離するアプローチとして、基盤強震観測網(KiK-net)による、①同一地震で②地中岩盤点の地震動記録を用いることで、震源(Source)と地盤(Site)によるばらつきを低減することが期待できる。そこで、本研究では、KiK-net地中記録を用いて、基盤面における距離減衰特性のばらつきの検討を行った。

### 2. 地中の強震動データベース

距離減衰特性のばらつきの解析に用いたデータは、Miyakoshi et al. (2019)を参照して、KiK-netによって観測されたMw6.0以上(広帯域地震観測網F-netより取得)の内陸地殻内地震を対象とし、地中地震計が基盤岩中(S波速度 $\geq 2\text{km/s}$ )に設置された観測点のものを使用した。さらに、断層最短距離200km以内の地中観測記録が10点以上ある地震とした。その結果、2000年10月から2019年6月までの15地震(Mw6.1~7.1)が選択された。断層最短距離は既往の断層モデルから求めた。PGAは水平2成分の最大値とし、S波主要動部分(目視で確認)の最大値を取得した。震源距離-Mwのデータ分布を図2に示す。図から近傍でデータが少なくなるため、回帰曲線がデータに対して一意的に求められ標準偏差が極端に小さくなる可能性が考えられる。

### 3. 地震毎のばらつきの解析方法

地震毎のばらつきは、既往の距離減衰式の誤差評価と同様に、平均値として距離減衰式を用いて、対数標準偏差としてばらつきを求めた。ただし、既往の地震規模に基づいた距離減衰式と異なり、地震毎に距離減衰曲線を求めた。回帰モデルを式1として示す。ここで、 $i$ は地震を、 $j$ は観測点を示す添え字を表し、 $Y_{pre}$ は予測された地震動指標、 $R$ は断層最短距離(km)を表す。 $C_s$ 、 $C_e$ 、 $C_k$ は回帰係数であり地震毎に求められる。得られた地震毎の回帰曲線に対するばらつきは式2で求める。 $Y_{obs}$ は観測値を示す。ばらつきは、断層最短距離0~200kmの距離区間他に、10~50km、50~100km、100~200kmの距離区間でも求めた。なお、0~10kmの近傍データは地震によっては0~数個であったため、前節で示した通り精度の信頼性がないと判断して検討から除外した。

### 4. 考察

図2に各対象地震のPGAの対数標準偏差を示す。図は地震名を横軸に、川瀬・松尾(2004)を参考に、地域性の比較をするために東日本と西日本で分けて図示している。また、各領域の地震は震源規模順に図示している。図から、PGAについては、西日本の平均標準偏差(0.19)と比べて東日本の平均標準偏差(0.23)が大きく、さらにそのばらつき(東日本:0.07)は西日本(0.02)よりも大きい。筧他(2009)や佐藤(2010)はPGA距離減衰分布において火山フロントを境に背弧側と前弧側で減衰傾向が異なることを指摘している。図3は2003年宮

城県北部地震（Mw6.1）のPGA距離減衰式の例を示しているが、背弧側と前弧側でPGAの減衰傾向が異なっており、これが見かけ上、標準偏差を大きくしていることが示唆された。本検討結果から、基盤岩上の特性値のばらつきには、伝播特性における地域特性(東日本と西日本、あるいは火山フロントの前弧側、背弧側)による認識論的不確定性が含まれている可能性が示されたる。なお、今回はPGAのばらつきについて検討を行ったが、学会まではPGVのばらつきについても検討を進める予定である。

謝辞：本研究は、原子力規制庁の令和2年度原子力施設等防災対策等委託費（内陸型地震の特性化震源モデルに係る検討）事業の一部として実施されました。

$$\text{Log}_{10}Y_{pre}(i,j)=Cs(i)-\text{Log}_{10}(R(i,j)+Ce(i))-Ck(i)\times R(i,j)$$
 式 1

$$S(i)=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_j\left(Y_{obs}(i,j)-Y_{pre}(i,j)\right)^2}$$
 式 2

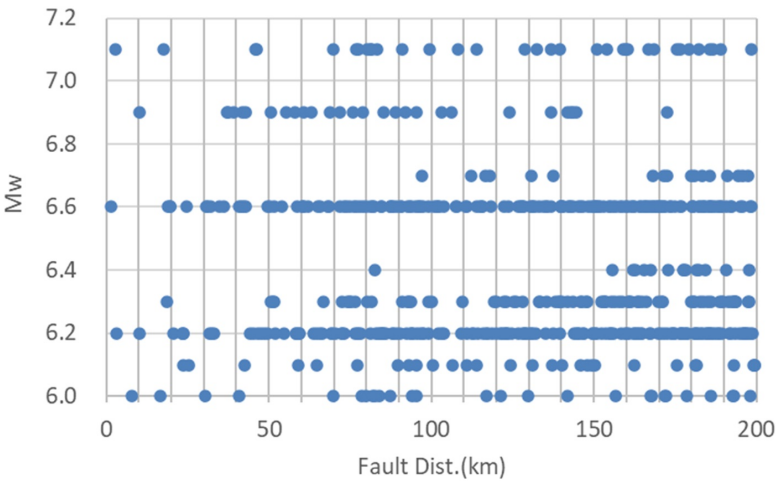


図 1 解析に用いた断層最短距離-Mw のデータ分布

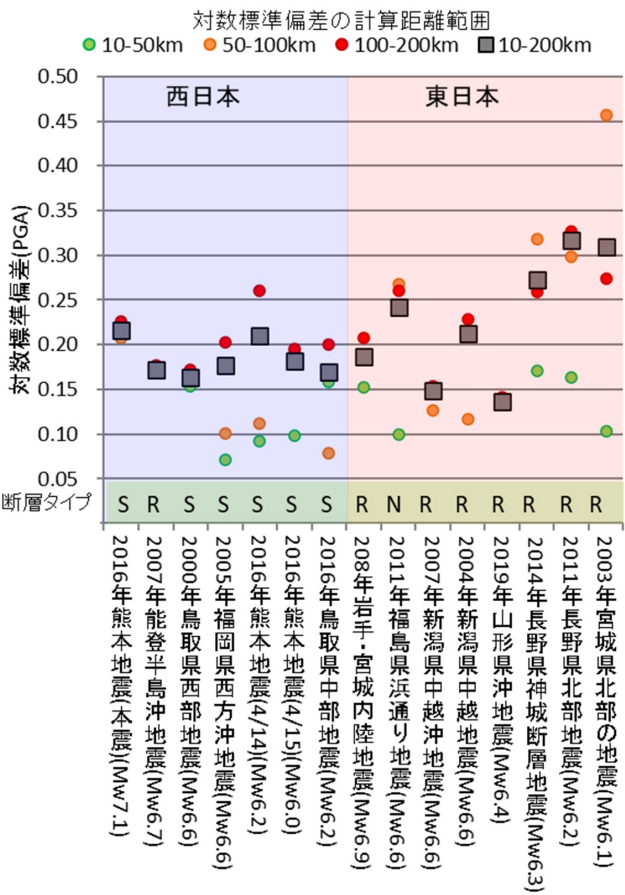


図 2 各地震の基盤における特性値の対数標準偏差

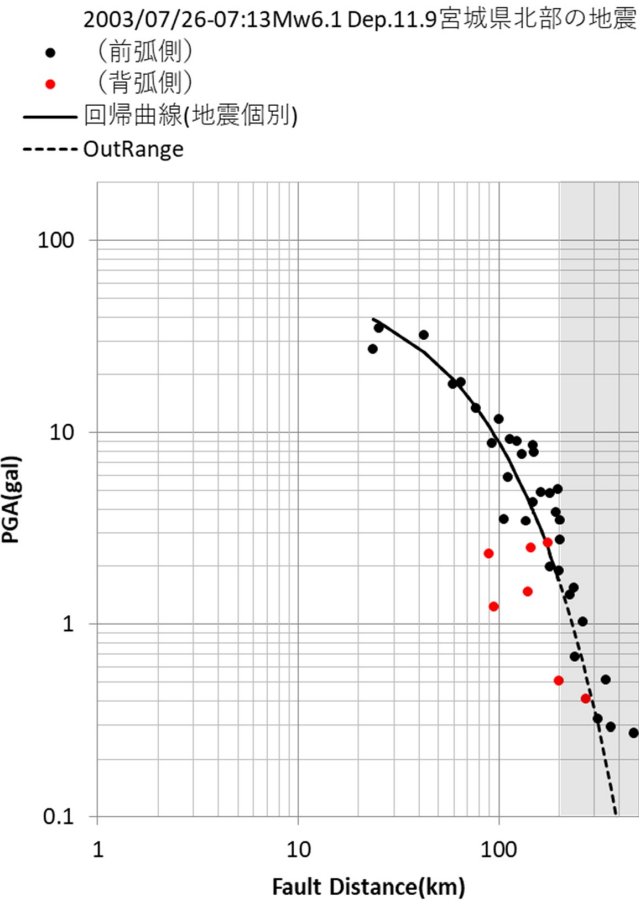


図 3 宮城県北部地震の距離減衰特性  
(●:前弧側観測点, ●:背弧側観測点)

## 伝播経路を特定した地震動予測ニューラル・ネットワーク Ground Motion Prediction Neural Network with Single-Path Uncertainty

\*岡崎 智久<sup>1</sup>、森川 信之<sup>2</sup>、岩城 麻子<sup>2</sup>、藤原 広行<sup>2</sup>、上田 修功<sup>1</sup>

\*Tomohisa Okazaki<sup>1</sup>, Nobuyuki Morikawa<sup>2</sup>, Asako Iwaki<sup>2</sup>, Hiroyuki Fujiwara<sup>2</sup>, Naonori Ueda<sup>1</sup>

1. 理化学研究所、2. 防災科学技術研究所

1. RIKEN, 2. NIED

地震動予測式（距離減衰式）は、観測記録の回帰分析により地震動指標の強さと不確定性を与える強震動予測手法で、確率論的地震ハザード評価の基礎となっている。予測の不確定性は想定地震動の上限を評価する際に重要であるが、多数の地震・観測点における観測記録を回帰すると、対象の地震・観測点における不確定性に比べて過大評価されるという指摘がなされている(Anderson and Brune, 1999)。実際、観測点毎のサイト特性や震源域を分離することにより、不確定性が大きく減少することが報告されている(e.g., Atkinson, 2006; Morikawa et al., 2008)。

岡崎・他(JpGU, 2020)では、観測点IDを入力とするニューラル・ネットワーク(NN)モデルを構成し、地盤特性の特徴量だけを入力するモデルよりも不確定性が顕著に減少することを示した。また、観測点IDをone-hotベクトルで入力することで、観測点毎の特性がデータ数に応じて適切に学習されていることを議論した。

本研究では、さらに地震発生位置を考慮することで、伝播経路を特定したNNモデルを設計する。将来の地震に対する予測を目的とするため、観測点の場合とは異なり、地震IDを直接入力して学習させることはできない。例えばMorikawa et al. (2008)では、地震学の見地から発生位置・地震種別が同一とみなせる震源域を複数抽出し、各領域に対してモデル化を行っている。本発表では機械学習の特性を活用して、震源域・観測点への依存性を観測記録の学習により抽出することを試みる。地震発生位置の指定方法として、震源（緯度・経度・深さ）の入力、震源分布のクラスタリングを利用した入力を行う。伝播経路の特定により不確定性が減少することを示し、地震・観測点の配置に対する地震動の依存性を議論する。

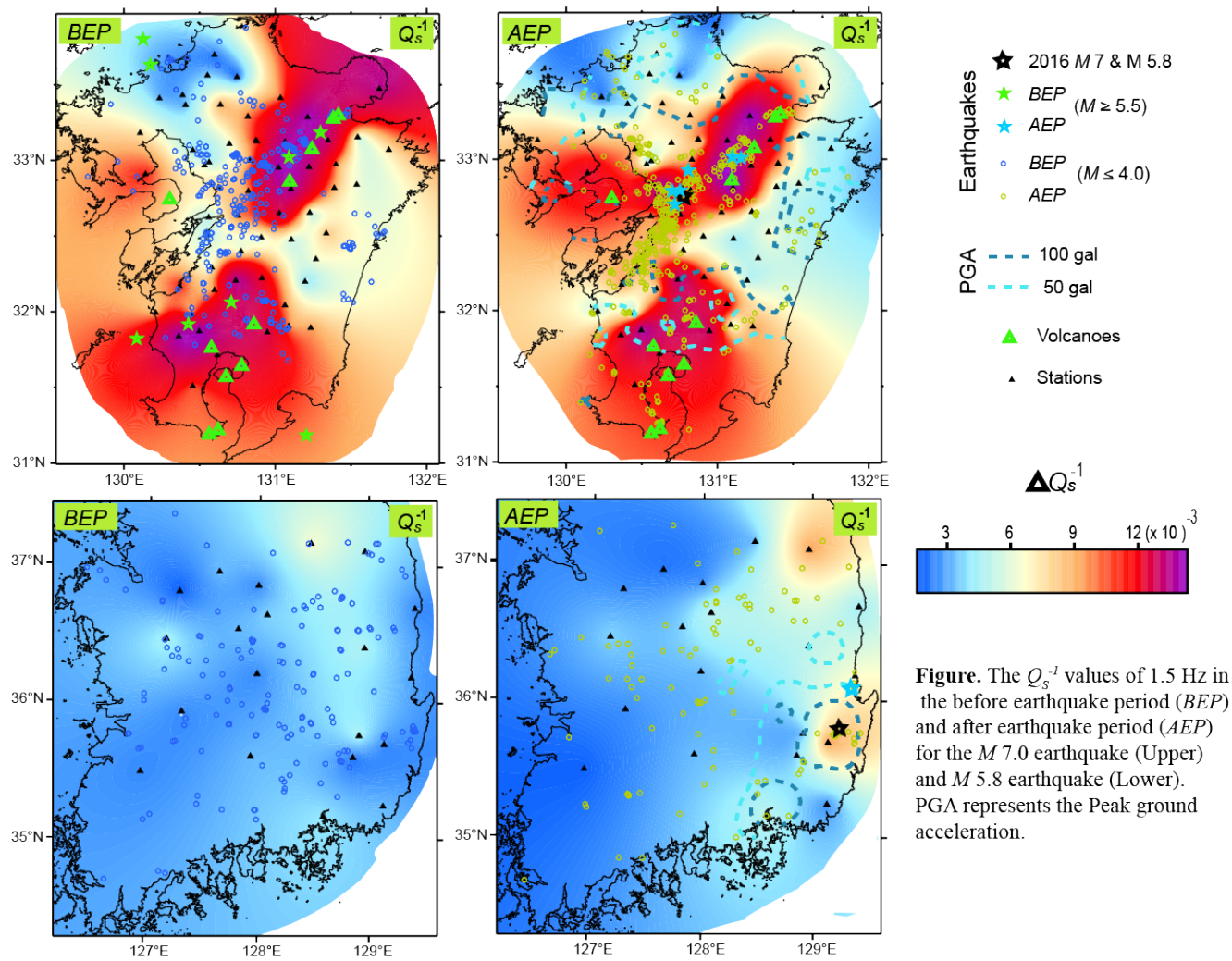
## Comparison of scattering variation associated with 2016 earthquakes in Korea and Japan

\*MUHAMMAD ZAFAR IQBAL<sup>1</sup>, Tae Woong Chung<sup>1</sup>

1. Sejong University

A remarkable increase of scattering attenuation ( $Q_s^{-1}$ ) at low frequency was found associated with hazardous earthquakes in Japan and Korea in 2016. Applying Multiple Lapse Time Window Analysis (*MLTWA*) to N-S component seismograms recorded in the before earthquake period (*BEP*) and after an earthquake period (*AEP*), the  $Q_s^{-1}$  values were compared for M7.0, 6.6, and 5.8, occurred in Kumamoto (*K*), Tottori (*T*), and Gyeongju (*G*). The *BEP* and *AEP* were set to obtain enough data; while *G* was 5 and 14 years, *K* and *T* event was 5 and 5 years, and 4 and 3 years, respectively. The obtained events of the periods were 186 and 117 for Korea, whereas 501 and 619, 176 and 194 for two Japan events, respectively. To find the crustal variation associated with earthquakes, focal depths of events were shallower than 30 km and the hypocentral distance of seismograms was shorter than 80 km. The observed stations were applied by coda normalization to correct different earthquake sources and site amplification factors. The magnitude range of events was selected between 2.0 and 4.0. For band-pass filtered with five central frequencies of 1.5, 3, 6, 12, and 24 Hz, the best fit values for  $Q_s^{-1}$  and  $Q_i^{-1}$  (intrinsic attenuation) were obtained by comparison between observed energy curves and theoretical energy curves derived from direct simulation Monte Carlo method (Yoshimoto, 2000) with a focal depth of 10 km. The error bars of the values, derived from Fisher's *F* distribution with the confidence value of 60 %, shows reliably shorter lengths with more than 20 observations. Between *BEP* and *AEP* of the  $Q_s^{-1}$  values, the higher difference was observed at lower frequencies –remarkable at 1.5 Hz and negligible for 24 Hz. Whereas *G* event being the greatest difference in the epicentral region, the *T* event showed reliable difference with over the error bar range. However, *T* events showed little relevance of differences in the epicentral region.

The crustal inhomogeneity caused by open cracks had been observed in the seismically active area by coda analysis using tomography developed by Nishigami (1991). *MLTWA* also showed the seismic inhomogeneity by comparison of difference of  $Q_s^{-1}$  between *BEP* and *AEP*. The difference corresponds well to event magnitude represented by peak ground acceleration (*PGA*). The high difference in *K* and *G* events generally correlated with the high *PGA* area. However, the *T* event shows less relevance despite the large magnitude. This may be due to earthquakes with a comparable magnitude that occurred in the vicinity, such as *M* 7.0 in 1943 and *M* 6.7 in 2000. In the *K* event, six earthquakes (*M* > 6.0) occurred in inland since 1920, but only one earthquake (1975 *M* 6.1) occurred near the event region. On the other hand, the Korean peninsula, including the *G* event region has been quite seismically stable land until *G* event - the largest event is only *M* 4.2 since 1905 and no inland events with estimated *M* > 5.2 for 270 years. Thus the duration period of seismic silence also strongly correlates with the difference of  $Q_s^{-1}$  between *BEP* and *AEP*.



## Estimation of earthquake ground motions on the ground surface at MeSO-net stations

\*若井 淳<sup>1</sup>、先名 重樹<sup>1</sup>、清水 惇<sup>2</sup>

\*Atsushi WAKAI<sup>1</sup>, Shigeki SENNA<sup>1</sup>, Atsushi SHIMIZU<sup>2</sup>

1. 防災科学技術研究所、2. 白山工業（株）

1. NIED, 2. HAKUSAN Corporation

In the past national project of Japan, “Metropolitan Seismic Observation network” (hereinafter, referred to as “MeSO-net”) was constructed for the investigation of the tectonic plate structures and earthquake ground motions in the Tokyo metropolitan area around ten years ago. The MeSO-net has about 300 stations with sensors installed around 20 meters underground in the area. Also, they are spatially distributed at intervals of 2 to 5 kilometers in the area.

In recent years, we have worked a subproject of “acquisition of spatially very-high-resolution earthquake observation data and development of the database by private-public partnerships” as a member in a national project or “Tokyo Metropolitan Resilience Project [<https://forr.bosai.go.jp/e/>].” As one of the topics, we have tackled estimation of seismic ground motions on the ground surface based on bore-hole seismic records observed at each MeSO-net station.

The point is as follows. First, a seismometer is installed on the ground surface at each MeSO-net station during two to three months and some earthquake observation records are obtained in addition to the bore-hole records at each MeSO-net station. And then, an observed frequency response function is obtained by calculating Fourier spectral ratios of records on the ground surface to ones in the bore-hole. Also, calculating JMA seismic intensity scale from records on the ground surface and ones of the bore-hole, increment of that is obtained. Secondly, a miniature and centerless array microtremor measurement is performed at each MeSO-net station. This method of measurement can be adopted principally for estimation of an S-wave velocity structure in the surface ground. It consists of 4-point miniature array with a radius of 60 centi-meters and 3-point centerless array with around 10 meters on a side. An S-wave velocity structure is estimated based on a disperse curve of a phase velocity and an H/V spectral ratio calculated from microtremor data. Then a transfer function can be obtained using 1-dimensional multiple reflection theory based on the S-wave velocity structure at each MeSO-net station. Finally, an S-wave velocity structure can be enhanced by tuning a transfer function based on an observed frequency response function at each MeSO-net station and the existing S-wave velocity structures and other geotechnical information can be enhanced based on S-wave velocity structures at MeSO-net stations.

In this project, we will develop the system for estimation of earthquake ground motions based on bore-hole seismic records by means of some amplification factors mentioned above. In this presentation, we will report on the results in the analyses of earthquake observation data and microtremor measurement ones at this moment.

# 長周期地震動振幅の短距離間空間較差の簡易的な予測に向けた数値実験による検討

## Numerical Experiments for Simplified Prediction of Short-Distance Variation of Long-Period Ground Motion Amplitudes

\*畑山 健<sup>1</sup>

\*Ken Hatayama<sup>1</sup>

1. 消防庁消防研究センター

1. National Research Institute of Fire and Disaster

堆積盆地で観測される周期数秒から十数秒の長周期地震動の主成分を表面波であるとした場合、その波長は水平方向におおむね数kmから20ないし30kmと見積もられるが、この波長に比べて1波長にも満たないような短い距離で長周期地震動のスペクトル振幅が大きく異なる（例えば1.5倍とか）事例またはそれを示唆するような事例（一つの石油コンビナート地域に立地する複数のほぼ同諸元の石油タンクにおいて、地震時に発生したスロッシング高さにタンクの立地場所による系統的な違いが見られることなど）がしばしば観測される。

このような短い距離での長周期地震動のスペクトル振幅の違いを、差分法等による地震波動場の計算に頼らず、精度が犠牲になったとしても、より簡易な方法で予測する方法の可能性について検討することが本研究の目的である。

横方向に不規則な構造における表面波の伝播に関しては、グローバルな長周期（周期20秒以上）表面波を対象として、波線理論を用いた研究がなされてきた。Tromp and Dahlen(1992)は、エネルギー流速の保存則から、ある波線上の地表面上の2地点間における表面波のスペクトル振幅の比は、幾何減衰の影響を無視できる場合には、それぞれの地点の直下の1次元速度構造から計算される(i)地表における表面波固有関数の値、(ii)群速度、(iii)エネルギー積分、による簡単な代数演算で表現できることを導いた（以下、表面波伝達関数という）。Bowden and Tsai(2016)は、この表面波伝達関数は、横方向の速度構造の変化が十分緩やかな場合には、周期数秒程度の表面波にも適用可能であると考えた。また、元々はある一つの波線上で成立する関係式ではあるものの、その条件を大胆に緩め、任意の2地点間（といっても堆積盆地内とその周辺における任意の2地点程度の意）の振幅比を与えうるものと仮定し、Los Angeles盆地で観測された表面波の周期2.5秒成分の増幅特性が、各地点直下の1次元速度構造に対するS波鉛直入射から計算される増幅特性（以下、「S波伝達関数」という）よりも、表面波伝達関数により、よく説明できることを定性的に示した。

著者は、昨年の本学会秋季大会において、Bowden and Tsai(2016)の結果を定量的に検証するため、2次元地下構造モデルに対して差分法により計算した2次元地震波動場の増幅特性が、表面波伝達関数によってどの程度説明できるか調べた。その結果として、

（1）短距離2地点間の長周期地震動の相対的スペクトル振幅は、表面波伝達関数を用いることにより、各地点直下の1次元地下構造から、2/3～2倍の精度で予測可能であること、

（2）各地点直下の1次元地下構造に対するS波鉛直入射伝達関数による予測精度は1/3～2倍で、表面波伝達関数に比べてばらつきが大きく、また過小評価するきらいがあること、

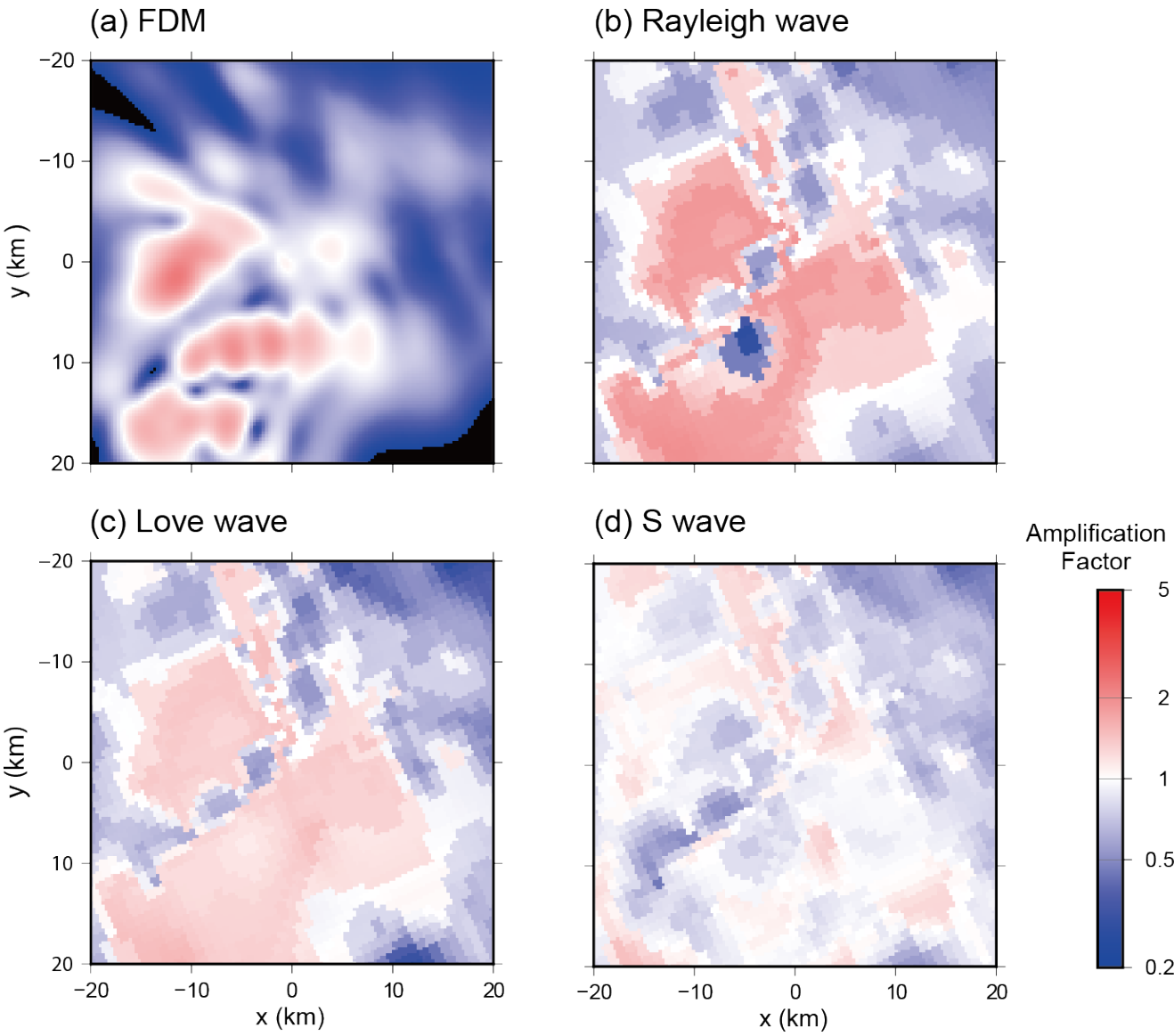
など、表面波伝達関数の有望性を示した。

今回の発表では、3次元地下構造モデルに対して差分法により計算した3次元地震波動場の増幅特性が、表面波

伝達関数によってどの程度説明できるかという数値実験を行う。実験対象領域は、苫小牧西港を中心とする水平方向80×90km程度の領域（勇払平野、石狩平野南部が含まれる）とし、速度構造モデルは、防災科学技術研究所のJ-SHIS深部地盤データ V2に基づいて設定した。この速度構造モデルの南東側からRayleigh波及びLove波の基本モードを入射させ、地表面での3成分速度波形を計算し、水平2成分のフーリエ振幅スペクトルの二乗和平方根について、苫小牧西港地点に対する各地点の比を得た。図(a)はこれにより得た周期7秒におけるスペクトル比である。図は、スペクトル比の基準点である苫小牧西港を中心とした水平方向20×20kmの領域（計算領域全体ではない）を示している。本研究の狙いは、短距離間での振幅較差の予測であり、平野・盆地全体の振幅較差の予測を“簡易な方法”で予測しようとするものではない。

この結果を観測された増幅率であるとみなし、表面波伝達関数から計算される増幅率と比較する。図(b)～(d)は、それぞれRayleigh波基本モードの表面波伝達関数、Love波基本モードの表面波伝達関数、S波鉛直入射の伝達関数から計算した苫小牧西港地点に対するスペクトル増幅率（同じく周期7秒）である。スペクトル振幅の空間較差の特徴、すなわち基準点の下側と左上側の領域で基準点よりも振幅が大きくなることなどは、S波伝達関数では予測できていない。一方、表面波伝達関数は、S波伝達関数に比べてよりよい予測を与えている。

以上のような比較をさまざまな周期について行う。また、実体波を含むなどしたより現実的な入射波を与えた場合の検討も行う。これらのことにより、横方向に不規則な構造における周期数秒程度の表面波の増幅率の評価に対する1次元速度構造に基づく表面波伝達関数の適用可能性を定量的に調べる。



## SPAC 法の解析可能最大波長とSN比の関係式

### Relationship between the upper limit of analyzable wavelength ranges of the SPAC method and the SNR

\*長 郁夫<sup>1</sup>、岩田 貴樹<sup>2</sup>

\*Ikuro Cho<sup>1</sup>, Takaki Iwata<sup>2</sup>

1. 産業技術総合研究所、2. 県立広島大学

1. Geological Survey of Japan, AIST, 2. Prefectural University of Hiroshima

産総研の構内で様々な地震計・サイズで構成される微動アレイを展開し（半径0.17mから200mの32種類）、SPAC法を適用した。直近のPS検層を基礎として構築された参照位相速度との比較により、解析可能最大波長(Upper Limit Wavelength, ULW)とそれに対応する周波数を同定した。次に、微動アレイデータからインコヒーレントノイズ成分とコヒーレントシグナル成分のパワー比（SNR）を同定するための式を別途開発して各データに適用した。最後に、解析可能最大波長をアレイ半径で正規化し(Normalized Upper Limit Wavelength, NULW), SN比との関係を両対数グラフにプロットした。その結果、データ点が傾き1/2の直線上に並ぶことが示された。すなわちAを定数として次の関係があることが示された。

$$(NULW)=A \sqrt{SNR}$$

本研究で用いたデータの場合、Aは概ね1/2から2の範囲にばらついた。

このような関係が得られることはTada et al. (2007)により示された理論（式45）を基礎とすれば説明可能である。したがって、定数Aについては経験的に決める必要があるが、NULWがSNRの1/2乗に比例することは一般性があると理解して良いだろう。

現在検討中の別のデータ（約450地点の微動アレイ）でも同様な関係があることが示されており、かつAはやはり同程度の範囲でばらついている。このことから第一近似的にはAのばらつきも含めて上式が成り立つものと見て良いと思われる。

参考文献：Tada et al. (2007). BSSA, **97**, 2080-2095.

# 近年の地震における液状化地点情報に基づく液状化危険率推定式の提案

## Estimation of Liquefaction Risk Ratio Based on Liquefaction Point Information in Recent Earthquakes

\*先名 重樹<sup>1</sup>

\*Shigeki Senna<sup>1</sup>

1. 防災科学技術研究所

1. NIED

2011年東北地方太平洋沖地震では、東北地方から関東地方にかけての極めて広い地域で液状化が発生し、2016年熊本地震や2018年北海道胆振東部地震においても多数の液状化被害が確認された（例えば若松・他（2017））。筆者らは、これまでに近年の液状化が発生した地震での液状化発生率を検討し、地震動の継続時間の影響で東北地方太平洋沖地震と他の地震での液状化発生率の違いを説明できることを示した（先名・他（2018））。これらは今後想定される南海トラフ等の巨大地震では、西日本から東海地方のみならず関東地方にかけて広域で液状化被害が発生することが懸念されることから、広域の液状化ハザードマップの作成や、自治体等が地震時の液状化被害の把握と初動体制に利用できるよう液状化被害の即時推定に利用可能である。しかしながら、250 mメッシュの微地形区分のみに基づくグループ分けや、地域性考慮のための県単位の地域区分方法では、境界における不整合が顕著に確認されるため、全国的な液状化ハザードマップの作成は難しい。また、既往の研究では、地震毎の液状化履歴データの精度や整理基準があいまいであり、検討の余地が残る。

そこで本研究では、まず、近年の地震の液状化発生地点のデータ整理方法<sup>2)-4)</sup>が実施可能な地震に基づき、地形、標高および水域距離データ等を用いたより詳細な微地形区分のグループ分けを行い、液状化発生率の計算を行った。次に、詳細な画像データを用いて、微地形区分毎の液状化面積率を計算した。これらの結果から、液状化発生率と液状化面積率のかけ算を行うことで液状化危険率を計算し、液状化発生率予測式の高精度化に関する検討を行った。本研究では、まず、松岡・他(2011)、先名・他(2018)等の方法にならない、最大速度(PGV)を指標として、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震、2016年鳥取県中部の地震および2018年北海道胆振東部地震の液状化地点情報と250 mメッシュの微地形区分と標高、比高、水域距離に基づいた液状化発生率のグループ化の検討を行った。さらに、地震動の最大速度（PGV）の指標より、液状化発生率および液状化面積率に与える影響について検討した上で液状化危険率を計算した。検討のフローチャートを（図1）に示す。

最終的な結果として、液状化発生率、液状化面積率については、既往の同様の手法で評価している損害保険料率算出機構（2008）による、液状化発生率および液状化面積率を用いた1 kmメッシュ間隔の評価結果等と比べ、250 mメッシュ単位および微地形区分の2区分化がなされていることで、より地域性等が考慮され、実際の液状化地点と調和的な結果を得ることができた。

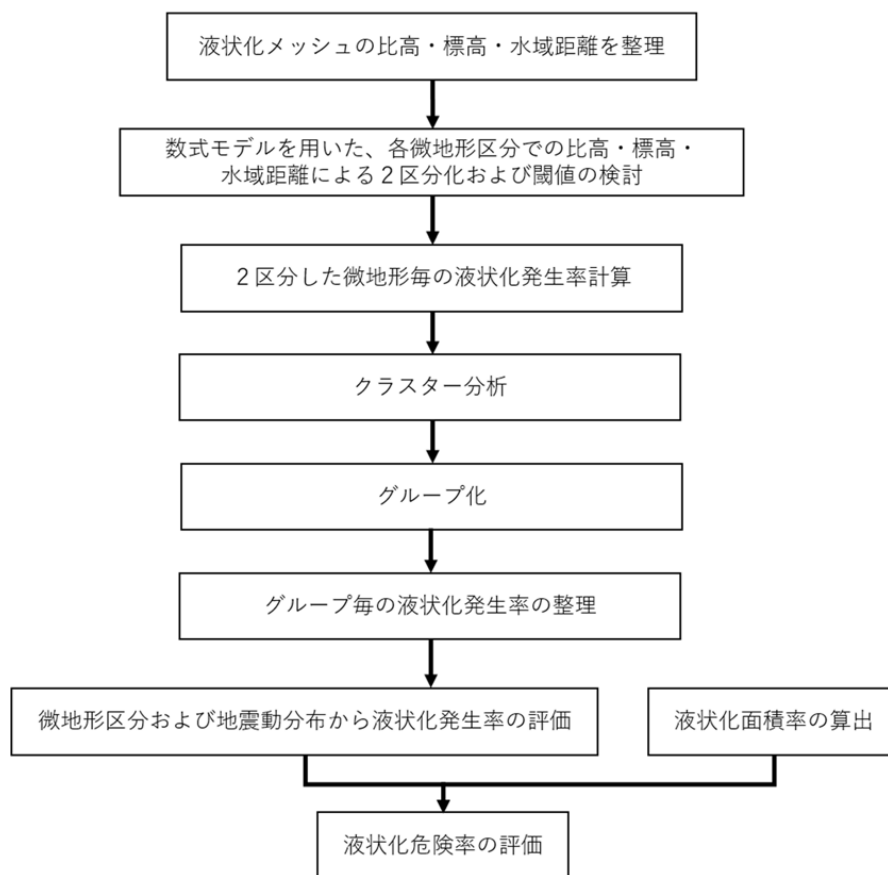


図1 液状化発生率および面積率，危険率を検討するフローチャート