

Sat. Oct 31, 2020

## ROOM A

Room A | Special session | S24. Pioneering the future of seismology with machine learning

## [S24]AM-1

chairperson:Takahiko Uchide(Geological Survey of Japan, AIST),  
 chairperson:Hisahiko Kubo(NIED), chairperson:Yuki  
 Kodera(Meteorological Research Agency, JMA)  
 9:00 AM - 10:15 AM ROOM A

## [S24-01] Regional characteristic of seismic activity

inferred from unsupervised machine learning of  
 F-net moment-tensor catalog

○Hisahiko Kubo<sup>1</sup>, Takeshi Kimura<sup>1</sup>, Katsuhiko Shiomi<sup>1</sup>  
 (1.National Research Institute for Earth Science and  
 Disaster Resilience)

9:00 AM - 9:15 AM

## [S24-02] Deep learning model for spatial interpolation of real-time seismic intensity

Ryota Otake<sup>1,2</sup>, Jun Kurima<sup>2</sup>, ○Hiroyuki Goto<sup>2</sup>, Sumio  
 Sawada<sup>2</sup> (1.OC Global, 2.Kyoto University)

9:15 AM - 9:30 AM

## [S24-03] False alarm and its measure on the earthquake early warning for the off-Torishima earthquake on July 30, 2020

○Masumi Yamada<sup>1</sup> (1.DPRI Kyoto Univ.)

9:30 AM - 9:45 AM

## [S24-04] Attempt to detect tectonic tremors in Sanriku-oki by applying a Convolutional Neural Network to S-net data

○Keisuke Yano<sup>1</sup>, Hidenobu Takahashi<sup>2</sup>, Kazuya  
 Tateiwa<sup>2</sup>, Masayuki Kano<sup>2</sup> (1.The Institute of  
 Statistical Mathematics, 2.Tohoku University)

9:45 AM - 10:00 AM

## [S24-05] Development of 3D Convolutional Neural Network to locate hypocenter around Hakone with theoretical seismograms of time series as training data.

○Daisuke Sugiyama<sup>1</sup>, Seiji Tsuboi<sup>1</sup>, Yukutake Yohei<sup>2</sup>  
 (1.JAMSTEC, 2.Hot Springs Research Institute,  
 Kanagawa Prefectural Government)

10:00 AM - 10:15 AM

Room A | Regular session | S17. Tsunami

## [S17]AM-2

chairperson:Tatsuhiko Saito(NIED), chairperson:Ayumu  
 Mizutani(Hokkaido University)  
 10:30 AM - 11:45 AM ROOM A

## [S17-01] Rapid estimation of tsunami earthquake

magnitudes at local distance

○Akio Katsumata<sup>1</sup>, Masayuki Tanaka<sup>1</sup>, Takahito  
 Nishimiya<sup>1</sup> (1.Meteorological Research Institute,  
 JMA)

10:30 AM - 10:45 AM

## [S17-02] Tsunami Data Assimilation of S-net Pressure Gauge Records

○Yuchen Wang<sup>1</sup>, Kenji Satake<sup>1</sup> (1.Earthquake  
 Research Institute, The University of Tokyo)

10:45 AM - 11:00 AM

## [S17-03] Frequency characteristics of bottom pressure recordings induced by a typhoon

○Hiroyuki Matsumoto<sup>1</sup>, Emoto Kuniaki<sup>1,2</sup>, Kentaro  
 Imai<sup>1</sup>, Narumi Takahashi<sup>1,3</sup> (1.JAMSTEC, 2.Wakayama  
 Prefecture, 3.NIED)

11:00 AM - 11:15 AM

## [S17-04] A meteotsunami on 1 July 2020 recorded by the S-net deep ocean pressure gauge network

○Tatsuya Kubota<sup>1</sup>, Tatsuhiko Saito<sup>1</sup>, Naotaka  
 Yamamoto Chikasada<sup>1</sup>, Osamu Sandanbata<sup>1</sup>  
 (1.NIED)

11:15 AM - 11:30 AM

## [S17-05] Tsunami generation by sea-surface pressure change: A 3-D model for open ocean observations

○Tatsuhiko Saito<sup>1</sup>, Tatsuya Kubota<sup>1</sup>, Naotaka  
 Yamamoto Chikasada<sup>1</sup>, Yusuke Tanaka<sup>2</sup>, Osamu  
 Sandanbata<sup>1</sup> (1.NIED, 2.JAMSTEC)

11:30 AM - 11:45 AM

Room A | Regular session | S17. Tsunami

## [S17]PM-1

chairperson:Yusuke Yamanaka(The University of Tokyo),  
 chairperson:Osamu Sandanbata(NIED)  
 1:00 PM - 2:15 PM ROOM A

## [S17-06] Multiple-shock Characteristic of the 1933

Showa-Sanriku Earthquake

○Nobuo HAMADA<sup>1</sup> (1.non)

1:00 PM - 1:15 PM

## [S17-07] Forward modeling of tsunami for the 1933

Showa-Sanriku earthquake using normal faults  
 based on marine surveys

○Toshitaka Baba<sup>1</sup>, Naotaka Chikasada<sup>2</sup>, Yasuyuki  
 Nakamura<sup>3</sup>, Go Fujie<sup>3</sup>, Koichiro Obana<sup>3</sup>, Seiichi Miura<sup>3</sup>,  
 Shuichi Kodaira<sup>3</sup> (1.Tokushima University, 2.NIED,

3.JAMSTEC)

1:15 PM - 1:30 PM

[S17-08] Study on resonance characteristics along western coasts of Japan Sea and amplification of 1833 Shonai-Oki tsunami

○Yusuke Yamanaka<sup>1</sup>, Kiku Shimazu<sup>2</sup>, Takenori Shimozono<sup>1</sup>, Yukimasa Higaki<sup>3</sup> (1.The University of Tokyo, 2.Central Nippon Expressway Company Limited, 3.East Japan Railway Company)

1:30 PM - 1:45 PM

[S17-09] Nonlinear Inversion of Tsunami waveforms, Estimation of Slip Distribution by Grid Search Part 1

○Masaaki MINAMI<sup>1</sup> (1.Meteorological Research Institute Japan Meteorological Agency)

1:45 PM - 2:00 PM

[S17-10] Physical mechanism of volcanic tsunami earthquakes repeating at Curtis Island, north of New Zealand

○Osamu Sandanbata<sup>1,2</sup>, Shingo Watada<sup>2</sup>, Kenji Satake<sup>2</sup>, Hiroo Kanamori<sup>3</sup>, Luis Rivera<sup>4</sup>, Zhongwen Zhan<sup>3</sup> (1.Now at NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience), 2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3.California Institute of Technology, 4.Université de Strasbourg, CNRS, IPGS UMR 7516, F-67000 Strasbourg)

2:00 PM - 2:15 PM

Room A | Regular session | S17. Tsunami

[S17]PM-2

chairperson:Yutaka Hayashi(Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

2:30 PM - 3:15 PM ROOM A

[S17-11] Reconstruction of the inundation height by spatial interpolation method in the Sendai plain after the 2011 Tohoku Tsunami

○Yuuki Eguchi<sup>1</sup>, Yoshinori Shigihara<sup>1</sup>, Tsuyoshi Tada<sup>1</sup> (1.National Defense Academy of Japan)

2:30 PM - 2:45 PM

[S17-12] Numerical study on tsunamis propagating into river channel

○Kento Koseki<sup>1</sup>, Yusuke Yamanaka<sup>1</sup> (1.Department of Civil Engineering, The University of Tokyo)

2:45 PM - 3:00 PM

[S17-13] Characteristics of tsunami flotsam behavior on vulnerable of embankment foundation by strong

motion

○Kentaro Imai<sup>1</sup>, Ryoko Obayashi<sup>1</sup>, Kuniaki Emoto<sup>2</sup>, Hiroyuki Iwase<sup>3</sup>, Kentaro Nakai<sup>4</sup> (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Wakayama Prefecture, 3.JIFIC, 4.Nagoya University)

3:00 PM - 3:15 PM

---

Room A | Special session | S24. Pioneering the future of seismology with machine learning

## [S24]AM-1

chairperson:Takahiko Uchide(Geological Survey of Japan, AIST), chairperson:Hisahiko Kubo(NIED),  
chairperson:Yuki Kodera(Meteorological Research Agency, JMA)

Sat. Oct 31, 2020 9:00 AM - 10:15 AM ROOM A

---

### [S24-01] Regional characteristic of seismic activity inferred from unsupervised machine learning of F-net moment-tensor catalog

○Hisahiko Kubo<sup>1</sup>, Takeshi Kimura<sup>1</sup>, Katsuhiko Shiomi<sup>1</sup> (1.National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

9:00 AM - 9:15 AM

### [S24-02] Deep learning model for spatial interpolation of real-time seismic intensity

Ryota Otake<sup>1,2</sup>, Jun Kurima<sup>2</sup>, ○Hiroyuki Goto<sup>2</sup>, Sumio Sawada<sup>2</sup> (1.OC Global, 2.Kyoto University)

9:15 AM - 9:30 AM

### [S24-03] False alarm and its measure on the earthquake early warning for the off-Torishima earthquake on July 30, 2020

○Masumi Yamada<sup>1</sup> (1.DPRI Kyoto Univ.)

9:30 AM - 9:45 AM

### [S24-04] Attempt to detect tectonic tremors in Sanriku-oki by applying a Convolutional Neural Network to S-net data

○Keisuke Yano<sup>1</sup>, Hidenobu Takahashi<sup>2</sup>, Kazuya Tateiwa<sup>2</sup>, Masayuki Kano<sup>2</sup> (1.The Institute of Statistical Mathematics, 2.Tohoku University)

9:45 AM - 10:00 AM

### [S24-05] Development of 3D Convolutional Neural Network to locate hypocenter around Hakone with theoretical seismograms of time series as training data.

○Daisuke Sugiyama<sup>1</sup>, Seiji Tsuboi<sup>1</sup>, Yukutake Yohei<sup>2</sup> (1.JAMSTEC, 2.Hot Springs Research Institute, Kanagawa Prefectural Government)

10:00 AM - 10:15 AM

# Regional characteristic of seismic activity inferred from unsupervised machine learning of F-net moment-tensor catalog

\*Hisahiko Kubo<sup>1</sup>, Takeshi Kimura<sup>1</sup>, Katsuhiko Shiomi<sup>1</sup>

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

## ○はじめに

本研究では、防災科研F-netのモーメントテンソル解カタログを、次元削減による構造抽出やクラスタリングなどの教師なし機械学習で解析することで、地震活動の地域特性を調べる。

## ○データセット

防災科研は、日本周辺で発生する地震を対象として、広帯域地震観測網F-netの地震動記録を用いたモーメントテンソル解析を1997年からルーティン的に行っており、そのカタログをWeb上で公開している。ここではF-netの観測体制がほぼ同一である2003年から2019年までの期間に発生し、モーメントマグニチュードが4以上である、計15810の地震のモーメントテンソル解を用いた。

F-netによるモーメントテンソル解は、緯度・経度・深さ・モーメントテンソル6成分の情報を持つ。このモーメントテンソル6成分をダブルカップルとCLVDに分解し、それぞれに関する情報をデータセットに登録した。ダブルカップルの情報としては、P軸のazimuthとplungeおよびT軸のazimuthとplungeを登録するとともに、P軸・T軸の単位ベクトルも登録した。さらに断層タイプに関する情報として、P軸・T軸の情報から、Kavarnia et al. (1996)・Kagan (2005)によるsource-mechanismダイアグラムのxとyも登録した。xが大きいと逆断層成分が、xが小さいと正断層成分が卓越していることを意味する。またyが大きいと横ずれ成分が卓越していることを意味する。CLVDの情報としては、Aso et al. (2016)のsource-typeダイアグラムの定式化(j)によるダブルカップルとCLVDの比を登録した。

## ○次元削減による構造抽出

ここでは上記データセットのうち緯度・経度・深さ・source-mechanismダイアグラムのxとyの計5成分の情報を、カーネル主成分分析によって3次元に削減し、データセット内の構造抽出を試みた結果を紹介する。地震のメカニズム解の空間分布は非線形要素が強いため、主成分分析などの線形な次元削減手法ではなく、非線形な次元削減手法であるカーネル主成分分析を用いた。カーネル主成分分析はカーネル法を用いて非線形変換を行うことができ、より柔軟な解析をすることが可能である。カーネルにはガウシアンカーネル Radius Basis Functionを用いた。なお日本周辺で発生する地震の空間分布はもともと北東-南西の方向に広がっており、緯度と経度の情報には強い相関がある。そのため、まず緯度と経度に対して主成分解析による軸変換を行った上で、次元削減を行った。また次元削減前に各成分の正規化を施した。

解析の結果、カーネル主成分分析で得られる三つの主成分と地域ごとの特徴的な地震活動が対応することが分かった。第一主成分が大きい地震グループは、西日本・南西諸島・台湾にかけた地域の内陸および海域で起きている浅い正断層型の地震で主に構成される。第一主成分が小さい地震グループは、東日本の太平洋沖のプレート境界付近で発生している逆断層型の地震が多い。第二主成分が大きい地震グループは、横ずれ成分を多く含む台湾周辺の地震が多い。第二主成分が小さい地震グループは、千島海溝沿いの浅い正断層型の地震で主に構成される。第三主成分が大きい地震グループは、正断層成分を多く含む、深さ100km以上の深い地震で主に構成される。第三主成分が小さい地震グループは、東日本の内陸および日本海溝周辺の浅い逆断層型の地震や九州・南西諸島・台湾にかけた地域の逆断層型の地震で構成される。この結果はF-netモーメントテンソル解カタログを教師なし学習することによって、似た性質を持つ地震のグループを抽出することが可能であることを示唆する。

## Deep learning model for spatial interpolation of real-time seismic intensity

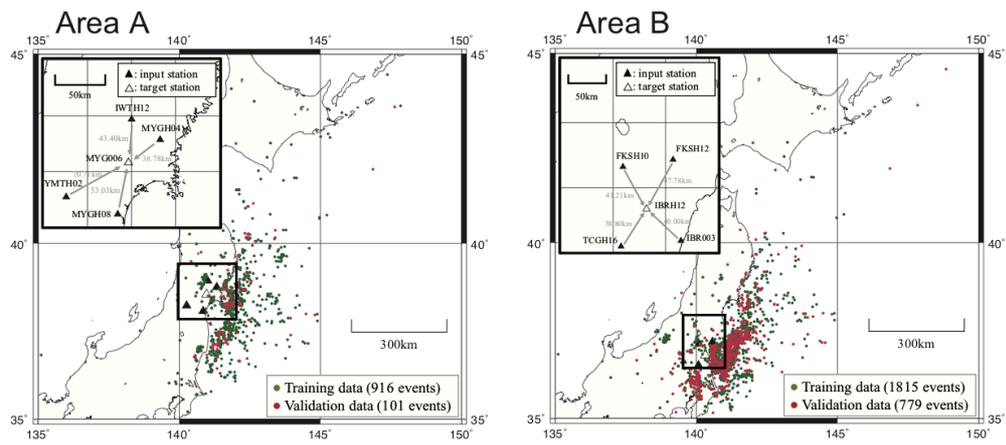
Ryota Otake<sup>1,2</sup>, Jun Kurima<sup>2</sup>, \*Hiroyuki Goto<sup>2</sup>, Sumio Sawada<sup>2</sup>

1. OC Global, 2. Kyoto University

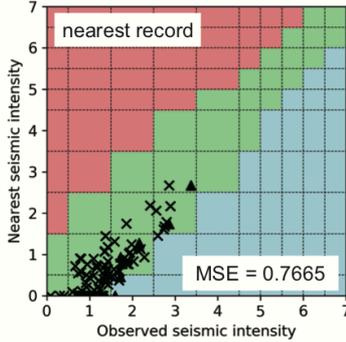
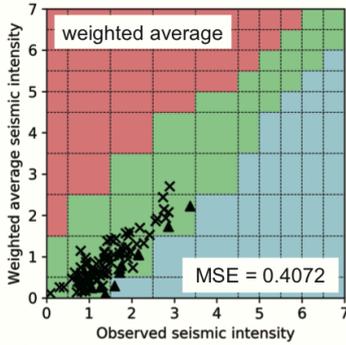
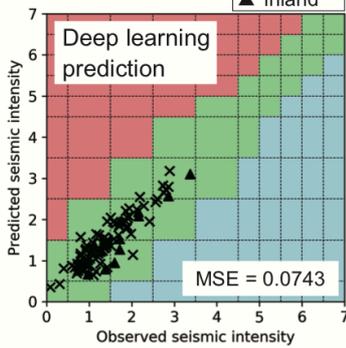
地震直後、あるいは発生後即時に震度の空間分布を把握することは、緊急対応において非常に重要である。本研究は、機械学習の一種である深層学習を利用して、ある地点における震度を周辺の地震記録から予測することを試みた。周辺と対象地点におけるリアルタイム震度をそれぞれ入力データ・出力データとし、ここでは地盤情報等は考慮しない。この問題設定は、ある地域に地震計を一定期間敷設して記録を収集し、観測終了後に周辺にある常設観測点から震度を予測する方法を想定しているが、即時予測が可能であれば緊急地震速報への応用も期待できる。

深層学習モデルは、因果関係を持つ系列データに高い有効性を持つLong Short-Term Memoryを用いて構成した。対象地点としてK-NET MYG006 (Area A), KiK-net IBRH12 (Area B)をそれぞれ選定し、周辺にあるK-NET/KiK-net 4観測点のリアルタイム震度を入力データに、対象地点のリアルタイム震度を出力データとしてモデルを訓練させた。なお、利用できる記録のうち70%を訓練データに、残り30%を検証データに用いている。Area A, Area Bそれぞれに対して得られた深層学習モデル (case 1, case 2) は、距離加重平均値 (weighted average) や最近傍観測点の値を採用した場合 (nearest record) に比べて、二乗誤差 (MSE) の意味で精度が高い。地震記録を直接学習させているため、地盤増幅 (サイト特性) の影響を自然に取り込んでいると考えられる。

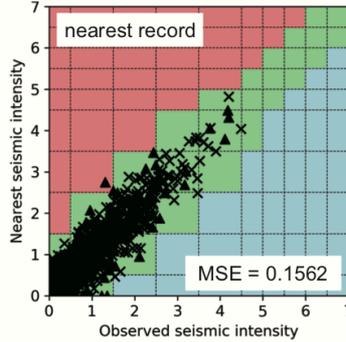
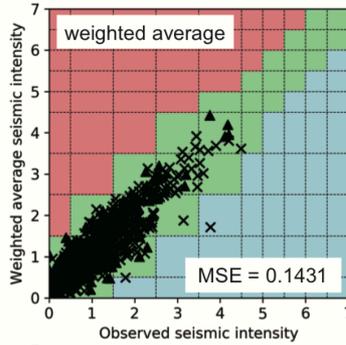
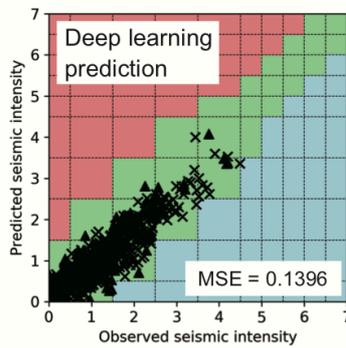
また、Area Bを対象に緊急地震速報を想定した深層学習 (case 3) を試みた。訓練データとして与える出力データをステップ関数とし、リアルタイム震度の最大値をステップ値に、周辺でのリアルタイム震度値が0を超えた時刻をステップ時刻とする。これにより、周辺で有意な震動が検出された場合に対象地点の震度を予測するという問題設定となる。深層学習による推定精度は、case 2の距離加重平均値より低いがこの即時予測という問題設定の難しさに起因するものと考えられる。猶予時間 (warning time) と精度とのトレードオフで見れば、深層学習は地盤増幅や距離減衰といった地震動の性質を自然に取り込めるため、周辺で計測された最大震度値を採用する方法より精度が高いことがわかった。



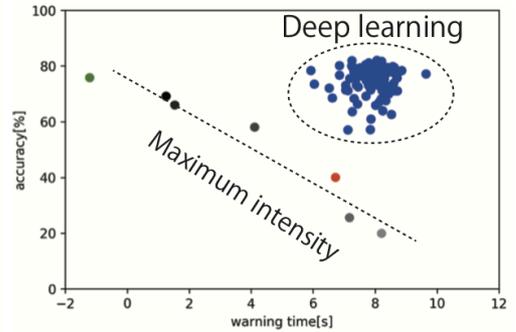
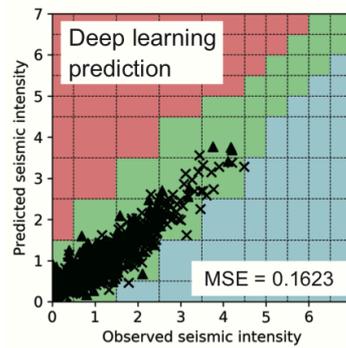
Case 1 (Area A) × offshore ▲ inland



Case 2 (Area B)



Case 3 (Area B - EEW)



## False alarm and its measure on the earthquake early warning for the off-Torishima earthquake on July 30, 2020

\*Masumi Yamada<sup>1</sup>

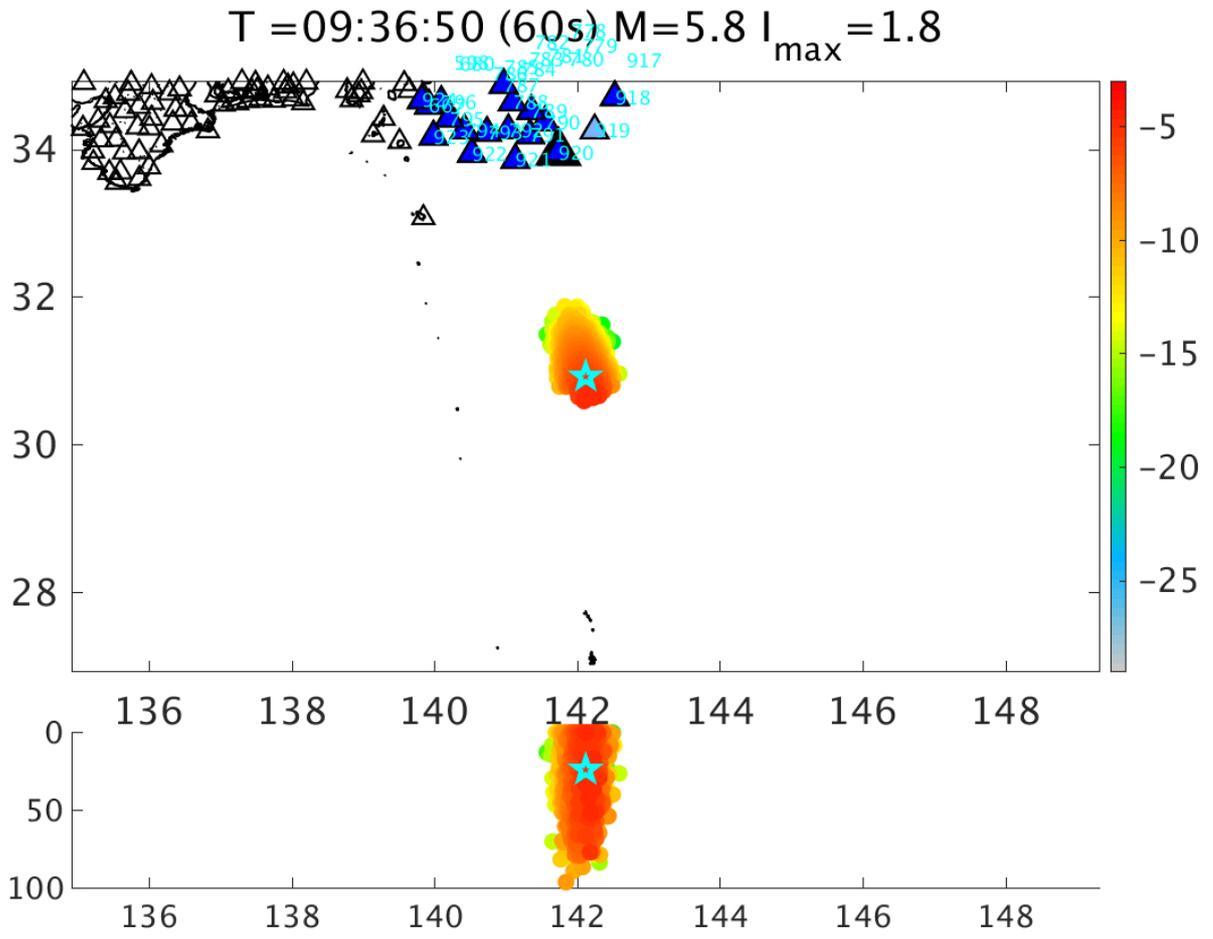
1. DPRI Kyoto Univ.

2020年7月30日に鳥島近海で発生した地震では、震度5弱以上を予測して一般向けに緊急地震速報が発表された。しかしながら、実際には震度1を観測した地点はなく、結果的に過大な警報となった。緊急地震速報が発表された原因として、(1)地震の場所を誤って予測し、実際の震源より400km以上北側に決めてしまったこと(2)誤った震源により、マグニチュードを過大評価してしまったこと、が挙げられる。

現在の緊急地震速報では、震源決定手法として、IPF法（気象庁の地震観測網+S-net）、着未着法（Hi-net観測網）、EPOSによる自動震源決定法（気象庁の地震観測網+Hi-net）と3つの手法を利用している。鳥島沖の地震では、島嶼部で観測点の数が少なかったため震源決定精度が悪く、実際の震源より400km以上北側に決めてしまった。これが第一の問題点である。

2つ目の問題点はマグニチュードの過大評価である。たとえ震源位置が誤っていたとしても、震源近傍の観測点を利用してマグニチュードを計算していれば、振幅が小さいため地震のマグニチュードは小さく予測されるはずである。しかしながら、マグニチュードの決定には予測震源から800km以上離れた小笠原諸島の母島観測点で観測されたデータを用いていた。マグニチュードの計算には閾値があり、振幅の小さい観測点(<50 $\mu$ m)はマグニチュード推定に利用されない。また、2018年1月5日の茨城県沖の地震の誤報の後の改修により、理論P波到着時刻よりも前の振幅は、マグニチュード推定に利用されなくなった。おそらくこれらの制約条件によって、マグニチュードの計算に利用できたのは母島観測点のみとなり、その振幅値を利用したために、過大なマグニチュードを予測する結果となった。なお、気象庁では9月上旬より、マグニチュードの算出には震源からの距離が700km以下のものを使用する予定である。

島嶼部での震源決定精度を上げるための改善策は、観測点の密度を増やすことである。現在、気象庁の地震観測網、Hi-net、S-netのデータは上述のように別々の手法によって計算されている。しかしながら、これらのデータを統合して同じ手法で利用する事ができれば、新たな観測網を設置することなく、既存の観測網を利用して観測点密度を増やすことが可能である。本研究では、全国地震観測データ流通ネットワークを利用して、防災科学技術研究所のHi-netとS-netのデータを統合して解析した。解析には、パーティクルフィルタを利用して統合的にデータを処理するIPF法の改良版を使用している。この計算は、10秒程度のバッファを設けているが、オンラインで逐次計算されている。その結果、震源の誤差は30km程度とほぼ正確に震源決定することができ、予想されるマグニチュードも5.8と正しく推定できることが分かった。発表では詳細な解析結果について報告する。



# Attempt to detect tectonic tremors in Sanriku-oki by applying a Convolutional Neural Network to S-net data

\*Keisuke Yano<sup>1</sup>, Hidenobu Takahashi<sup>2</sup>, Kazuya Tateiwa<sup>2</sup>, Masayuki Kano<sup>2</sup>

1. The Institute of Statistical Mathematics, 2. Tohoku University

近年、世界各地の沈み込み帯を中心に、スロー地震と呼ばれる、通常地震に比べてゆっくりとした断層の滑り現象が観測されるようになった(Obara & Kato, 2016)。低周波微動はスロー地震の一形態と考えられており、南海トラフやカスケディア、日本海溝では想定巨大地震震源域の深部や浅部で観測されている。微動は海溝型巨大地震同様、プレート境界面上の断層の滑り現象である可能性が高く、その時空間的活動の把握は巨大地震震源近傍のプレート境界面の断層のすべりを捉えるという観点から重要である。

微動検出の際、観測点間の波形のエンベロープの類似性に着目したイベント検出・震源決定手法であるエンベロープ相関法 (e.g., Obara, 2002) がよく使用される。しかし、その原理として微動のみならず、通常地震も検出してしまふ。この問題に対し、Nakano et al. (2018)は、畳み込みニューラルネット(CNN)を利用した通常地震・微動・ノイズの判別器を作成し、南海トラフ沿いの海域に設置されている地震・津波観測監視システム(DONET)の観測記録に対してその有効性を示した。Nakano et al. (2018)のCNNの特徴として、CNNの入力データにランニングスペクトルを利用している。ランニングスペクトルは、観測波形そのものと比較して、イベントの継続時間や震源の物理的な性質を示す周波数成分を顕著にするため、通常地震と微動の判別に適していると考えられる。

一方、近年敷設された日本海溝海底地震津波観測網(S-net)により、日本海溝における低周波微動の存在が明らかになった(Nishikawa et al., 2019)。微動検出にはエンベロープ相関法を用い、継続時間により微動と通常地震の区別をしている。S-netはDONETに比べて観測点数が多く日本海溝全域に渡って配置されており、三陸沖のみならず、襟裳沖、宮城沖、そして茨城沖など広域で発生する地震や低周波微動の検出、モニタリングが期待される。

本研究では、S-netを用いた日本海溝で発生する通常地震・微動・ノイズのリアルタイム波形分類を最終目標として据え、手始めに1観測点を対象とした波形のランニングスペクトルを入力データとするCNNに基づく通常地震、微動、ノイズの判別器を作成した。対象の観測点として微動が時空間的に続発する領域の一つである、三陸沖の観測点を使用した。この観測点で捉えられた微動、通常地震、ノイズの典型例を図1に示す。ノイズ波形では、時間窓全体でおおよそ均質にパワーが分布している。微動と通常地震では、S波到着時に最も強いシグナルが観測される。通常地震ではS波到着後もコーダ波などの観測シグナルは続くが、微動では通常地震に比べてシグナルは小さく、S波到着後ただちにノイズレベルに収束する。CNNの教師データとして、通常地震については気象庁一元化カタログに記載されている通常地震のうち震央が観測点近傍120kmにあるものを、微動についてはNishikawa et al. (2019)による微動カタログに記載されている微動のうち震央が観測点近傍120kmにあるものを利用した。観測期間は、通常地震と微動のカタログの期間が重複する2016年8月15日から2018年8月15日の2年間とした。2017年12月3日までのイベントを学習用に、以降のイベントを検証用に利用した。微動、通常地震共にS/Nの良いイベントを教師データとして学習させることを目的に、イベントを含む時間窓でのPower spectral density (PSD) のレンジが大きい上位1/4のデータを教師データとして用いた。この操作により学習に利用した通常地震・微動・ノイズの個数はそれぞれ633個、1593個、1407個となった。

CNNの構成はNakano et al. (2018)を参考にした。ただし、DONETとS-netで観測されるイベント波形の違いを考慮して、以下のような変更を行った。周波数領域の信号のパワーの大小関係ではなく、形状の違いを特徴量として抽出することを狙い、入力をPSDの最大値で規格化した。PSDが周波数方向に必ずしも細かく変化し

ないため、周波数方向に対するプーリングを導入した。時間窓長に関して、時間分解能の向上を期待して、Nakano et al. (2018)で用いられた240秒より短い120秒の時間窓を用いた。

学習の結果、通常地震・微動・ノイズに関してそれぞれ100%,94.5%,100%の精度で分類を行うことに成功した(図2)。また、CNNの判別確率と震央距離とマグニチュードの関係を調べた結果、微動に関しては震央距離が近いほど判別確率が高くなり、通常地震に関してはMwが大きいくほど、震央距離が近いほど判別確率が高くなる傾向を示した。最後に連続記録に対して適用した結果、微動全体が入力時間窓に入ると微動の判別確率が上がり、窓から外れると下がることを確認した(図3)。

謝辞：防災科学技術研究所より公開されているS-netの波形データを使用しました。

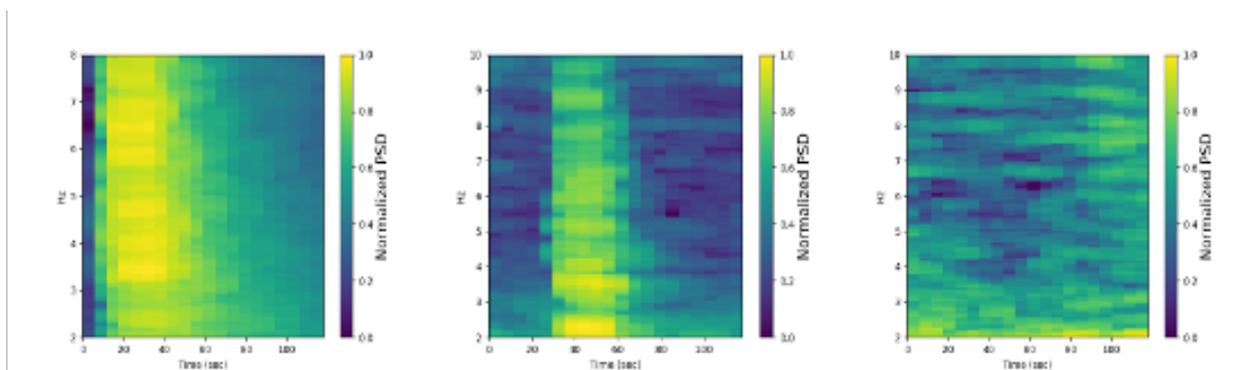


図1：規格化したPSDの例。左から順に、通常地震・微動・ノイズ。

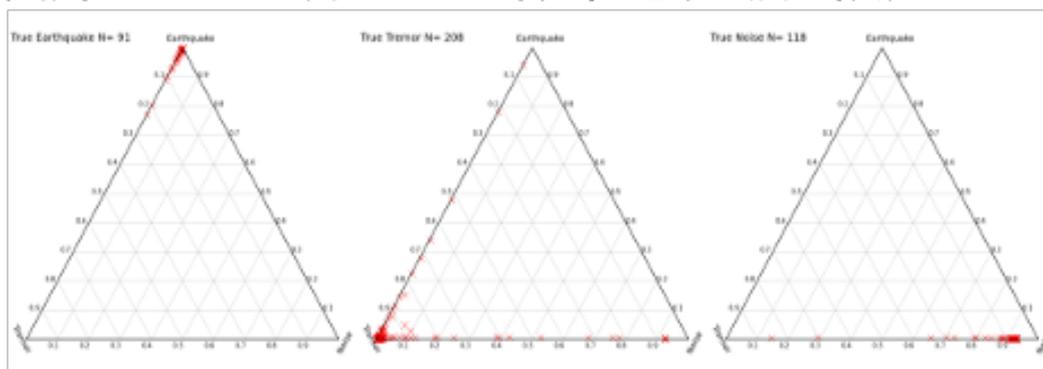


図2：正解が通常地震・微動・ノイズであるときのCNNの出力確率。

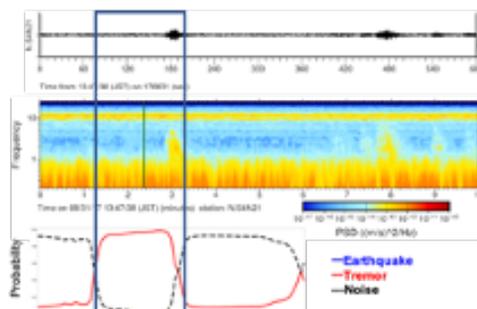


図3：連続波形(上段)，対応するPSD(中段)，CNNの出力確率(下段)。

## Development of 3D Convolutional Neural Network to locate hypocenter around Hakone with theoretical seismograms of time series as training data.

\*Daisuke Sugiyama<sup>1</sup>, Seiji Tsuboi<sup>1</sup>, Yukutake Yohei<sup>2</sup>

1. JAMSTEC, 2. Hot Springs Research Institute, Kanagawa Prefectural Government

我々は昨年の地震学会秋季大会において理論地震波形記録を生成し、これを教師データ（ある入力データとその正解となるデータを対応付けたもの）として機械学習を行うことにより、震源パラメータの推定を行うニューラルネットワークを構築する試みについて報告した。前回の発表では、日本列島規模の領域にて、震源や規模の異なる多数のパターンの仮想地震を網羅的に計算し、得られた理論地震波形記録から、地表の空間的な地震波伝播画像を生成し、深層学習を行い、震源パラメータを自動推定するニューラルネットワークを構築することが出来ることを示した。

我々はこのニューラルネットワークによる震源パラメータ推定を、神奈川県温泉地学研究所が保有する箱根火山地域の地震観測網（図1）に適用することを目的とし、様々な学習の試みを行った。

一般に、畳込み層を有する深層学習モデルは画像や映像など高次元データの学習に優れる特徴がある。本研究では、この深層学習での画像や映像の学習における技術を活用する方針を取った。通常の波形データとしてではなく、地震波形の各観測点での空間的広がり方を画像と考え、さらに地震波形の震源からの広がり状況、震源近くの細かな振動など時間発展のパターンを映像として捉え、教師データの作成を行った。また我々は、このような映像的な高次元データに、地震学の知識を取り入れる試みも行った。LTA/STAの計算を行い両者の差を画像や映像とする、速度を対数スケールとする、速度のZ成分とNE成分の絶対値の差を計算するなど、地震学における特徴抽出手法を高次元データへ持ち込み応用し、教師データとした。

作成した教師データは、3次元データ及び映像の学習に特化した3次元畳込みニューラルネットワーク（3DCNN）をベースとしたモデルを用いて学習を行い、実際の観測データの推定を行うことができる推論モデルを得る。ある時間範囲の理論地震波形記録の観測点における速度分布は、図2のような3次元データとして変換処理され、学習が行われる。なお、理論地震波形記録生成については、前回と同様にスペクトル要素法のSPECFEM3Dを用いている。箱根火山地域に対して用いた地下構造モデルはYukutake et al (2015)で、2304コアを用いた。理論地震波形の精度は周期5.6秒である。震源深さや位置など震源パラメータを変化させた1998個の仮想地震に対して約30秒間の理論地震波形を計算し、約60万枚の地震波伝播画像を生成した。

これを用い、32x32の空間伝搬データの6秒程度の時間発展パターンを3次元形状データとして生成し、教師データとした。もちろん、この3次元形状データは実際の地震波形観測データからも同様に自動的に生成が可能であり、自動的な震源パラメータの推定も可能である。また、先に述べた特徴抽出計算を行ったデータも同様の3次元形状データとして変換し教師データとする。

このように生成した教師データを基に、先に述べた3DCNNを用いた深層学習を行った。3層の3D畳込み層を用い、各震源パラメータを推定する推論モデルを機械学習により生成した。深層学習フレームワークはTensorFlow (<https://github.com/tensorflow>)を用いた。教師データの生成および機械学習は海洋研究開発機構・地球情報基盤センターが運用する計算機システムのGPGPUノードを利用して行い、ニューラルネットワークから推論モデルを構築した。

学習は1998個の地震が混ざらないように8:2に分割し、80%を学習に用い、学習に使用しない残り20%の地震を用いて交差検証を行ったところ、概ね良好な結果が得られた。最終的に完成した推論モデルの詳しい推定結果や他手法との比較、および実際の観測データに適用した場合の推定結果について発表の際に述べる。

### 謝辞

本研究は科研費19K12011の助成を受けたものです。また、海洋研究開発機構・地球情報基盤センターの計算機システムを用いました。記して感謝いたします。

図1 箱根火山地域の観測点分布図

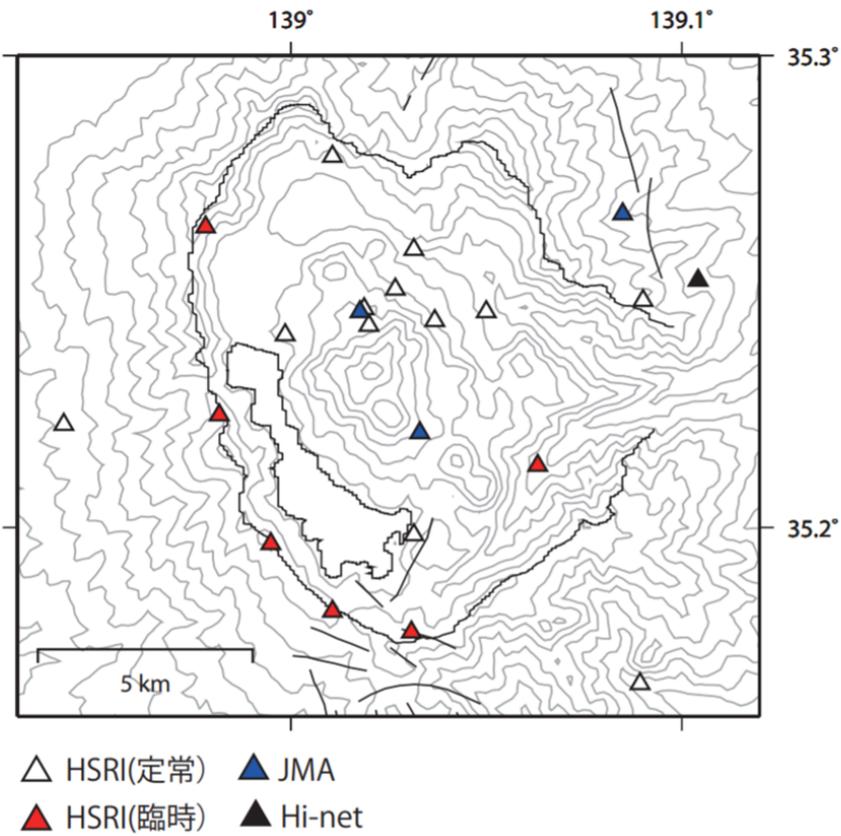
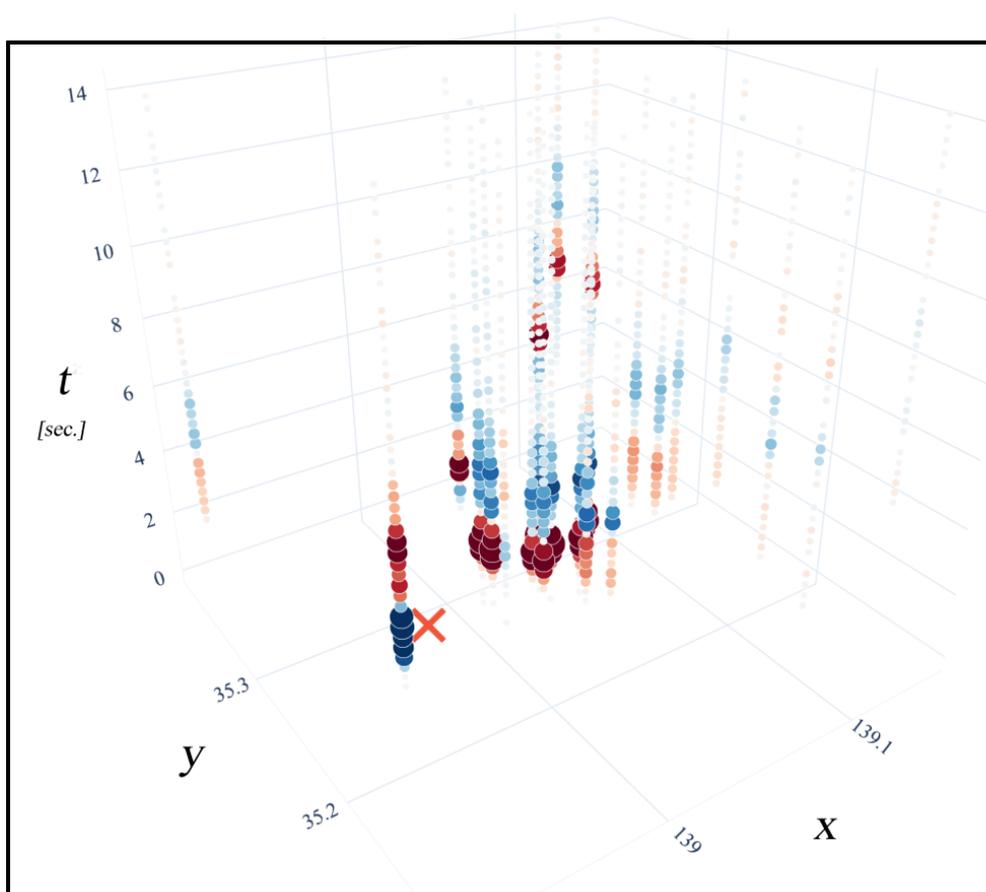


図2 地震波動伝播の3次元構造データ



---

Room A | Regular session | S17. Tsunami

## [S17]AM-2

chairperson:Tatsuhiko Saito(NIED), chairperson:Ayumu Mizutani(Hokkaido University)

Sat. Oct 31, 2020 10:30 AM - 11:45 AM ROOM A

---

### [S17-01] Rapid estimation of tsunami earthquake magnitudes at local distance

○Akio Katsumata<sup>1</sup>, Masayuki Tanaka<sup>1</sup>, Takahito Nishimiya<sup>1</sup> (1.Meteorological Research Institute, JMA)

10:30 AM - 10:45 AM

### [S17-02] Tsunami Data Assimilation of S-net Pressure Gauge Records

○Yuchen Wang<sup>1</sup>, Kenji Satake<sup>1</sup> (1.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

10:45 AM - 11:00 AM

### [S17-03] Frequency characteristics of bottom pressure recordings induced by a typhoon

○Hiroyuki Matsumoto<sup>1</sup>, Emoto Kuniaki<sup>1,2</sup>, Kentaro Imai<sup>1</sup>, Narumi Takahashi<sup>1,3</sup> (1.JAMSTEC, 2.Wakayama Prefecture, 3.NIED)

11:00 AM - 11:15 AM

### [S17-04] A meteotsunami on 1 July 2020 recorded by the S-net deep ocean pressure gauge network

○Tatsuya Kubota<sup>1</sup>, Tatsuhiko Saito<sup>1</sup>, Naotaka Yamamoto Chikasada<sup>1</sup>, Osamu Sandanbata<sup>1</sup> (1.NIED)

11:15 AM - 11:30 AM

### [S17-05] Tsunami generation by sea-surface pressure change: A 3-D model for open ocean observations

○Tatsuhiko Saito<sup>1</sup>, Tatsuya Kubota<sup>1</sup>, Naotaka Yamamoto Chikasada<sup>1</sup>, Yusuke Tanaka<sup>2</sup>, Osamu Sandanbata<sup>1</sup> (1.NIED, 2.JAMSTEC)

11:30 AM - 11:45 AM

# Rapid estimation of tsunami earthquake magnitudes at local distance

\*Akio Katsumata<sup>1</sup>, Masayuki Tanaka<sup>1</sup>, Takahito Nishimiya<sup>1</sup>

1. Meteorological Research Institute, JMA

## (1)はじめに

津波地震は表面波マグニチュードなどに比べて、異常に高い津波を発生させる地震である。このような比較的小さな地震波振幅の地震に伴う高い津波は破壊継続時間の長さに関連しているとされている。地震発生直後に、適切な津波予報を行うためには、その地震の規模を適切に推定する必要がある。気象庁などによる最初期の津波予報は、地震モーメントが推定される前に発表され、地震波の振幅から決まるマグニチュードに基づいている。地震波振幅に基づくマグニチュードは津波地震の場合に、規模を過小評価する可能性が高い。津波地震の規模を適正に推定するために、いくつかの手法について評価した。

## (2)方法

周期200秒までの変位振幅を用いた手法( $M_{D200}$ )、積分変位の振幅を持ちた手法(カットオフ200s,  $M_{ID200}$ )、長周期変位振幅を用いた手法(帯域200-400s,  $M_{D200-400}$ )、複数帯域振幅分布を用いた手法( $M_{BA}$ )などについて検討した。周期200秒までの変位振幅を用いた手法、積分変位の振幅を持ちた手法、長周期変位振幅を用いた手法は経験的な手法であり、日本列島周辺において発生した地震の観測振幅の対数に距離補正を加えて、モーメントマグニチュードとなるような経験式を構築した。

複数帯域振幅分布に基づく手法は、複数の帯域通過フィルターを施した記録の最大振幅の分布と理論波形の振幅分布と比較する手法である(図1)。理論波形を計算する際に震源の位置に点震源を置き、走向と傾斜角はプレート形状から仮定し、すべり角は $90^\circ$ を仮定した。理論波形の振幅は仮定する破壊継続時間によって大きく異なる。 $10^{0.1}$ 倍おきの複数の破壊継続時間を仮定し、観測振幅分布と理論波形の振幅分布が最もよく合う破壊継続時間を選択した。その破壊継続時間のときの振幅から規模を推定した。

## (3)結果

これらの手法を評価するため、USGSが公開している津波地震の震源過程解析結果のモデルを用いて、津波地震が三陸沖の海溝軸付近で発生したとして震源から1000kmまでの理論波形を計算し、その理論波形を模擬的な観測波形とみなして各手法によってマグニチュードを算出した。その結果を以下に示す。

	$M_w$	$M_{D200}$	$M_{ID200}$	$M_{D200-400}$	$M_{BA}$
1992 Nicaragua	7.6	6.7	6.9	7.2	7.5
1994 Java	7.8	7.5	7.5	7.2	7.6
1996 Peru	7.5	7.4	7.2	7.2	7.4
2006 Java	7.7	6.9	6.9	7.2	7.3
2010 Mentawai	7.8	7.3	7.2	7.3	7.5

結果を見ると、経験的手法では全て津波地震の規模を過小評価した。複数帯域振幅分布に基づく手法では過小評価の例もあるものの、モーメントマグニチュードに近い値が得られた。

## 謝辞

防災科学技術研究所及びIRISの提供する地震波形を使用した。震源過程解析結果はUSGSのサイトにて公開されているものを参照した。理論波形の計算にはTakeo(1985)のプログラムを使用した。

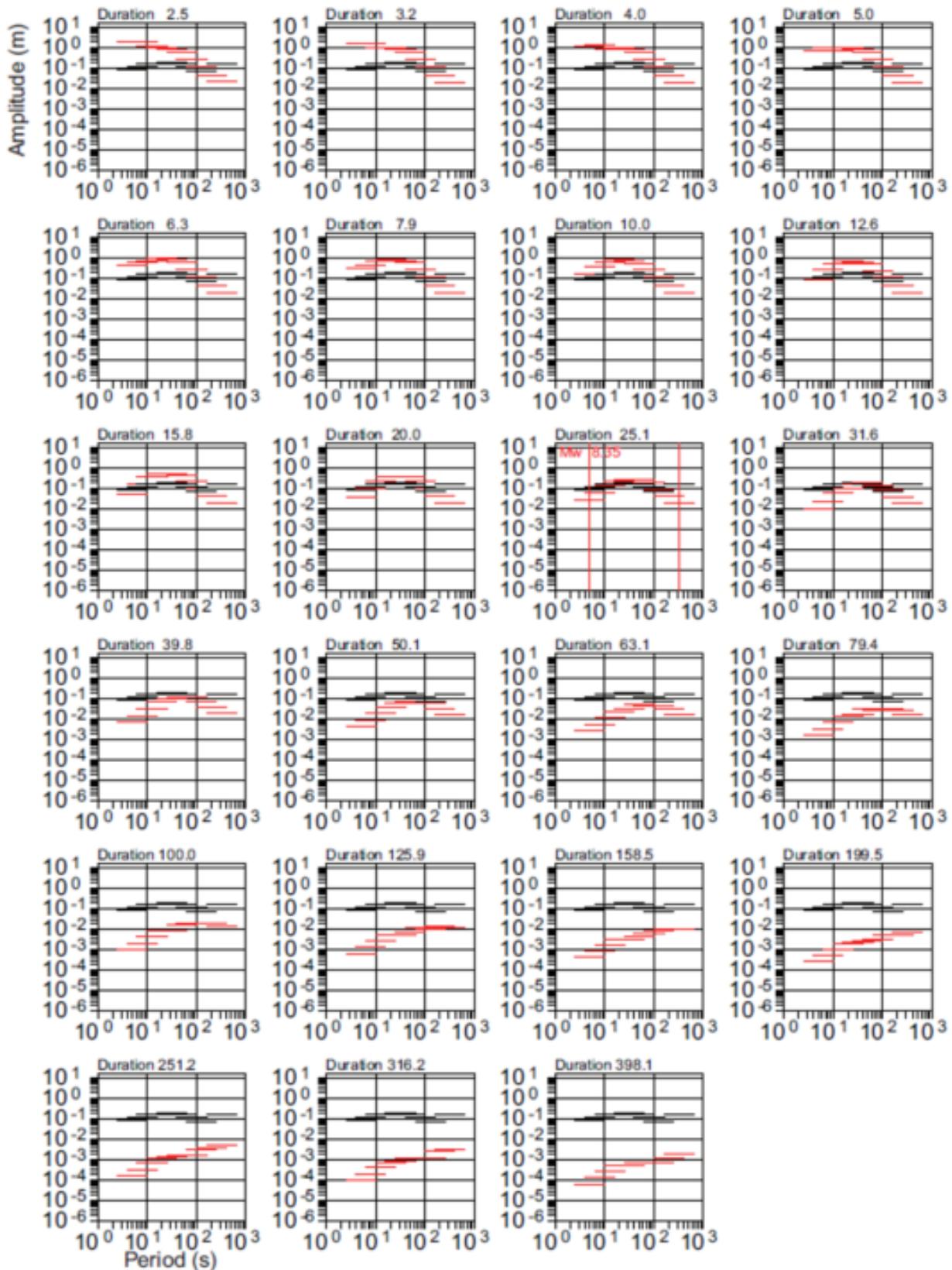


図1 複数帯域振幅分布。黒：観測、赤：理論。様々な破壊継続時間(Duration)を仮定して比較し、最適な破壊継続時間を推定している。

## Tsunami Data Assimilation of S-net Pressure Gauge Records

\*Yuchen Wang<sup>1</sup>, Kenji Satake<sup>1</sup>

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

The 2016 Fukushima Earthquake (M7.4) generated a moderate tsunami, which was recorded by the offshore pressure gauges of the Seafloor Observation Network for Earthquakes and Tsunamis (S-net). The S-net has a very short distance between two neighboring stations (~30 km), and records the water pressure and transmits the data to land in real time. Hence, it enables us to forecast the tsunami by data assimilation. Tsunami data assimilation is an early warning approach based on offshore observed data. It does not need the source information (Maeda et al., 2015 *GRL*). In this study, we used the S-net pressure gauge records for data assimilation, and retroactively forecasted the tsunami waveforms at three coastal tide gauges (Ofunato, Kamaishi and Miyako) to validate our method.

We processed the S-net raw records by two methods. In the first method, we removed the tidal components by polynomial interpolation, and applied a low-pass filter. This method is widely used in retrospective studies for waveform post-processing. However, the acausal digital filters require future data to filter the past data. So this method is not applicable in real-time operation. In the second method, we used the Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) real-time tsunami detection algorithm to extract the tsunami signals (Wang et al., 2020 *SRL*). EEMD decomposes the input data into several Intrinsic Mode Functions (IMFs), and separates the tsunami signals, seismic waves and tidal components automatically. The IMF2 represents the tsunami signals that are detected in real time. Then, the processed waveforms at 28 S-net pressure gauges were used for data assimilation.

The waveforms forecasted by assimilation with digital filter and EEMD were both consistent with the real observations in the first tsunami peak at coastal tide gauges. Though the assimilation results with digital filter had a better performance in the following waveforms, we note that only the EEMD results can be obtained in real-time operation. In summary, the data assimilation of S-net pressure gauge records is able to forecast the tsunami waveforms accurately, and the tsunami data assimilation approach can be really put into practice with the help of EEMD real-time detection algorithm.

## Frequency characteristics of bottom pressure recordings induced by a typhoon

\*Hiroyuki Matsumoto<sup>1</sup>, Emoto Kuniaki<sup>1,2</sup>, Kentaro Imai<sup>1</sup>, Narumi Takahashi<sup>1,3</sup>

1. JAMSTEC, 2. Wakayama Prefecture, 3. NIED

日本の周辺海域に設置されている海底観測ネットワークの津波計（海底津波計）のリアルタイムデータは津波警報の更新だけでなく、一部の観測データは自治体が提供する津波情報へも利用されている。しかしながら台風接近時に運用上の課題が顕在化してきた。本研究では、リアルタイム津波検知手法の高度化のために、台風接近時に観測された海底津波計データを精査して、地震による津波との相違点を明らかにする。

「地震・津波観測監視システム（DONET）」の観測にもとづき自治体が提供する津波情報では、50秒の短時間平均（STA）と300秒の長時間平均（LTA）による判定値としきい値の比較から津波検知を自動判定する（Takahashiほか、2015）。しかしながら、台風接近時にはこの判定値が大きくなるのが運用上の課題として顕在化してきた。本研究では、DONETに接近した2018年台風第24号を対象として、海底津波計のデータ解析を行った。台風がDONETに最接近したのは9月30日12時頃（時刻はUTC、以下同じ。）である（図1）。台風の接近を含む4日間のKMB05観測点の観測データを図2に示す。上から順に潮汐を除去した観測データ、STAとLTA、津波検知の判定値の変化を示す。台風が四国沖に到達する9月30日06時頃から判定値が急激に大きくなり、16時頃に最大値に到達した後、10月1日00時頃に収束する。同じ期間のスペクトログラムを図3(a)に示す。台風接近時には、長周期波（高潮）（ $\approx 10^{-3}$  Hz）、うねり（ $\approx 10^{-2}$  Hz）、脈動（ $\approx 10^{-1}$  Hz）の周波数帯域が卓越し、広帯域にエネルギーをもつ。9月30日14時頃から分散性の高潮が厳然と観測されている。台風からの距離や水深による振幅の違いを除き、卓越周波数の特徴は観測点間で一致する。

次に台風接近時と津波をともなう地震発生時に海底津波計で観測されるデータの特異性を明らかにする。2016年4月1日にDONETの直下を震源とする地震（M 6.5）が発生した（図4）。地震を含むKMD15観測点の1時間のスペクトログラムを図3(b)に示す。02時39分頃の高周波（ $\approx 10^{-1}$  Hz）のエネルギーが地震動によるもので、直後に津波に関連する低周波（ $\approx 10^{-3}$  Hz）のエネルギーが続く。台風接近時とは異なり、それらの中間周波数帯域（ $\approx 10^{-2}$  Hz）にはエネルギーが卓越しない。

本研究では、台風接近時に観測された海底津波計データを精査して、地震による津波との相違点を明らかにした。本研究で得られた知見は以下の通りである。(1) 台風接近時と津波発生時では、海底津波計の観測波形の卓越周波数の特徴に差異がある。台風接近時は広帯域にエネルギーが分布するのに対し、津波発生時は低周波（ $\approx 10^{-3}$  Hz）のエネルギーが卓越する。(2) 運用中の海底津波計による津波検出の判定値が台風接近時に大きくなる要因は、うねり成分が卓越するためである。津波検出の判定を高度化するには、台風接近時のうねり成分（ $\approx 10^{-2}$  Hz）を除去する必要があることを示唆する。

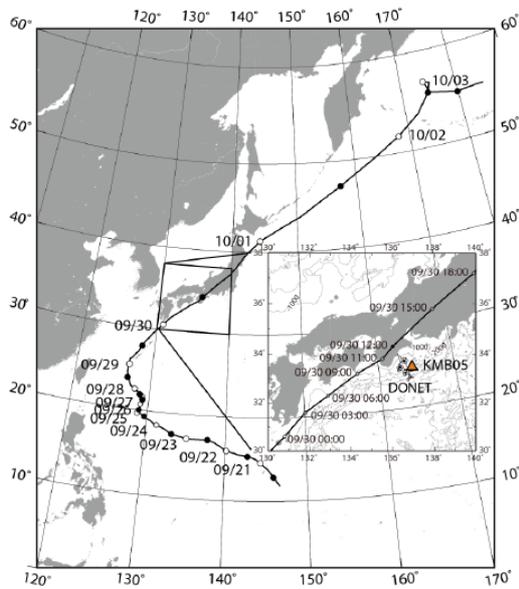


図 1 : 2018 年台風第 24 号経路図と DONET 観測点

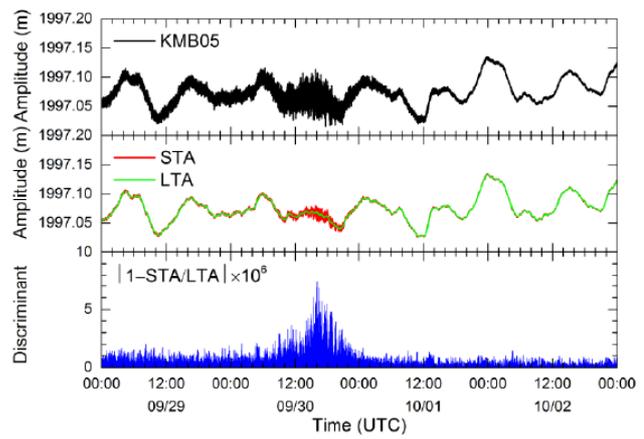


図 2 : DONET 観測点の津波検知のための STA と LTA による判定値 (KMB05 観測点の例)

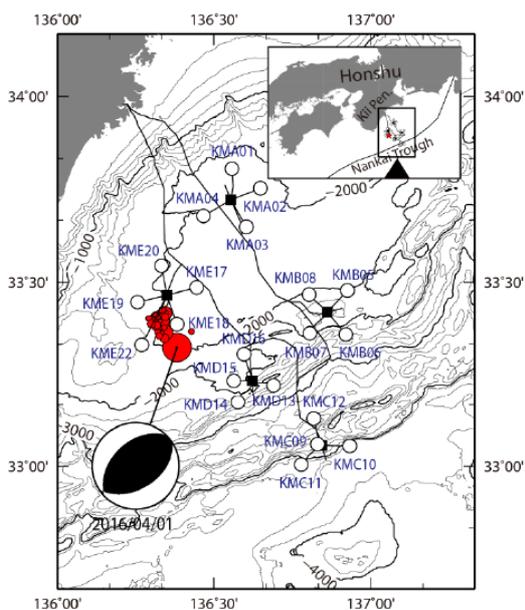


図 4 : 2016 年 4 月 1 日三重県南東沖地震で発生した地震と地震時に運用中の DONET 観測点

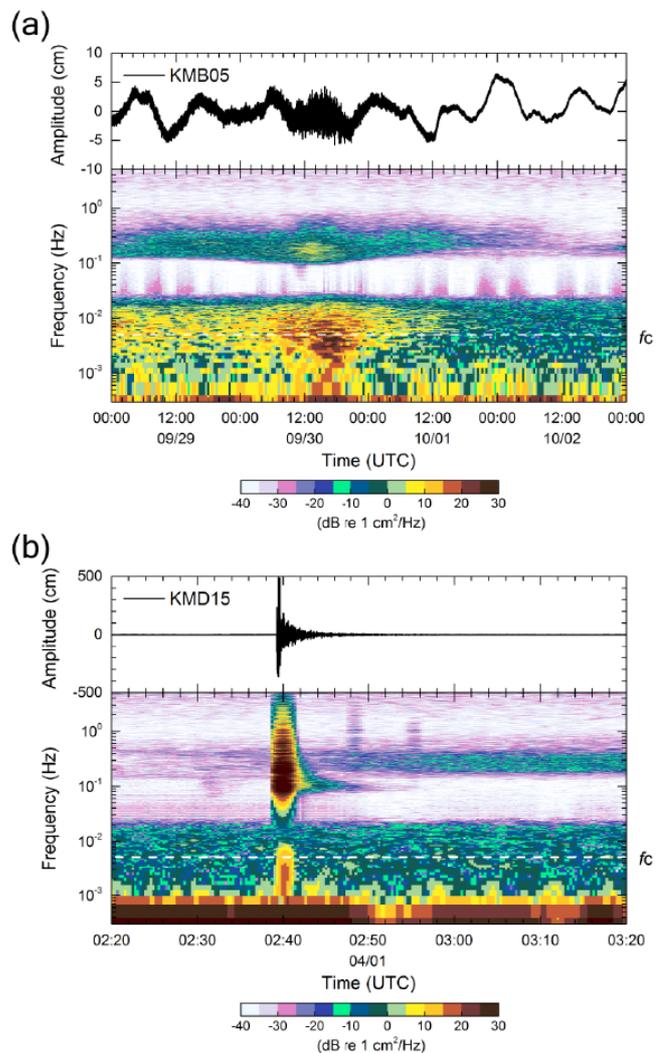


図 3 : (a)2018 年台風第 24 号接近時の KMB05 観測点ならびに (b)2016 年三重県南東沖地震時の KMD15 観測点のスペクトログラム

# A meteotsunami on 1 July 2020 recorded by the S-net deep ocean pressure gauge network

\*Tatsuya Kubota<sup>1</sup>, Tatsuhiko Saito<sup>1</sup>, Naotaka Yamamoto Chikasada<sup>1</sup>, Osamu Sandanbata<sup>1</sup>

## 1. NIED

### はじめに

近年、海底圧力計を用いた沖合の津波観測網 (e.g., Kanazawa et al. 2016) の発展により、沖合での広域・高密度な津波観測が可能になりつつある (e.g., Kubota et al. 2020). 2020年7月1日の17:00–19:00 UTC (7月2日 2:00–4:00 JST), 東北日本の沖合に展開された日本海溝海底地震津波観測網S-netの海底圧力計のうち福島～岩手沖の観測点で北に向かって伝播する圧力変動波群を記録した (図1). しかし、この時間帯に津波を励起するような顕著な地震は報告されていない. 本研究では、S-netにより観測された圧力変動波群の特徴を整理し、その要因を考察した.

### S-net水圧記録の特徴とその原因

まず、S-net圧力観測波形の特徴を整理した. 図1aに周期100–3600 s のバンドパスフィルタを適用した観測波形を、図1b, 1cにS-net観測点における最大波の振幅とその到達時刻をそれぞれ示す. 水深の比較的浅い ( $H_0 \sim 1000$  m) 観測点で振幅が大きい (1 hPa). また、最大波の到達時刻 (図1c) から、ほぼ真北 (方位角  $\sim 350\text{--}360^\circ$ ) に向かって見かけ速度  $c' \sim 80\text{--}90$  m/s で伝播していた. この波群の押し波・引き波それぞれの継続時間はおよそ600 s (卓越周期  $T_0 \sim 1200$  s) であり、押し波部分の南北方向の空間広がりを概算すると  $c' T_0 / 2 \sim 50$  km程度と推測される.

津波を引き起こす要因としては地震時の断層すべりによって生じる海底地殻変動が最も一般的である. それ以外にも海底地すべり (e.g., Baba et al. 2019; Heidarzadar et al. 2020), 海底火山活動 (e.g., Fukao et al. 2018; Sandanbata et al. 2018) が知られているが、周辺の海陸の地震計で顕著なシグナルが検知されていないことを考慮するとこれらが原因ではないと思われる. ある空間広がりをもつ大気圧擾乱が移動すること (気圧波) によっても津波が励起されることが知られており、「気象津波」と呼ばれている (e.g., Hibiya and Kajiura 1982). 今回S-netで観測された圧力変動も、大気圧擾乱の移動によって生じた気象津波であると考えられるのがもっともらしい.

### 気象津波シミュレーション

東北沖を北に移動する低気圧を仮定して津波シミュレーションを行い、観測を説明する大気圧変動モデルを検討した. 大気圧擾乱の移動により生じる気象津波のふるまいは、津波の長波方程式に大気圧擾乱の空間微分に比例する項が加えられた形で表される (e.g., Hibiya and Kajiura 1982; Inazu et al. 2012; An et al. 2012; 齊藤・他2020 地震学会). ここでは、東西に十分広く、南北50 kmの空間広がりをもつガウス分布型の低気圧 (ピーク振幅 -1hPa) が真北 (方位角  $0^\circ$ ) に移動すると仮定し、移動速度を様々変えて計算を行った. また、気象津波において海底水圧計が観測する圧力変化は津波 (海面高変化) だけでなく大気圧変化による成分も加わることを考慮し、両者による圧力変動を足し合わせたものを観測と比較した.

低気圧の移動速度を、 $V = 100$  m/s と仮定することで、観測される波形の特徴や見かけ速度を再現することができる. 気象津波の成長する条件として、低気圧の移動速度  $V$  と津波の伝播速度  $c_0$  が近い値となる ( $c_0 \sim V$ ) ととき、低気圧の移動距離 (あるいは津波の伝播距離) の増大に伴って振幅が大きくなる (Proudman 1929). 長波近似における水深1000 mでの津波伝播速度  $c_0 = (g_0 H_0)^{0.5} \sim 100$  m/sとなることから、今回S-netにおいて観測された気象津波の波源は、水深  $\sim 1000$  mの等深線に沿って南北に分布すると考えられる.

さらに、計算された海面高変化と海底圧力変化の分布の時空間変化を比較すると、気象津波の波源域外では両者の分布は一致するが、波源域内では大気圧擾乱の影響により分布が異なっていた. この結果は、海底水圧計の気象津波記録から海面波高分布を正しく得るには、海面での大気圧分布の情報が必要であることを示している.

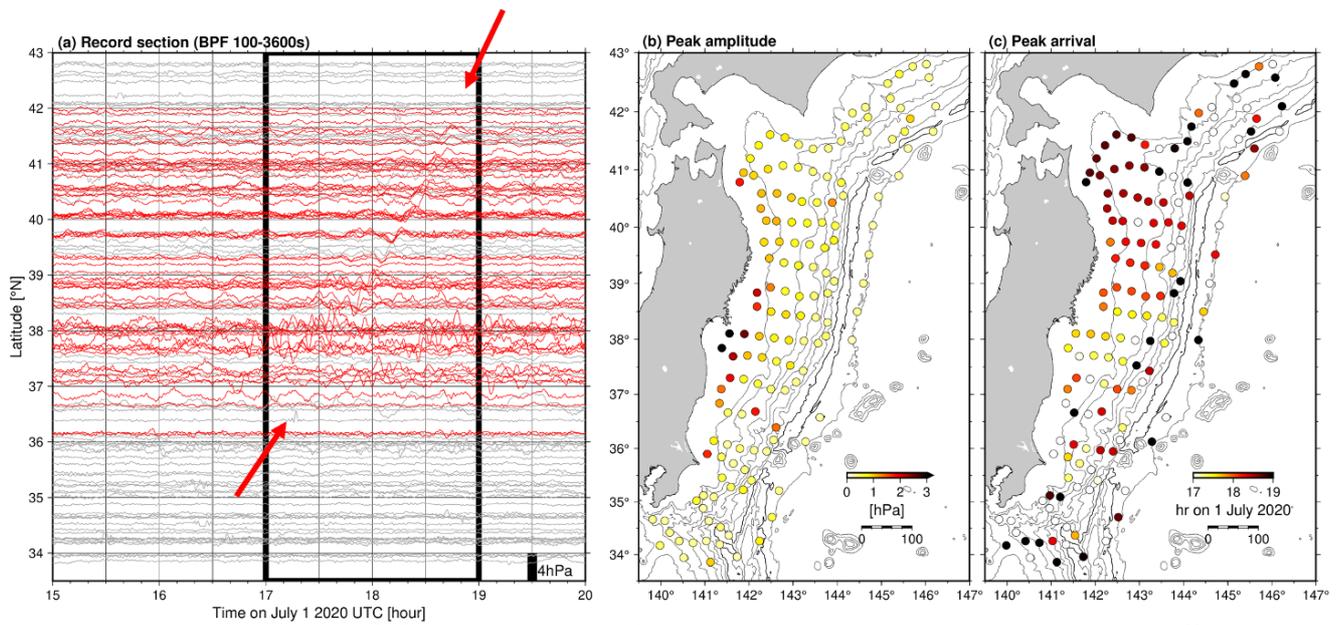


Figure 1. (a) S-net海底圧力計記録のレコードセクション (2020年7月1日 UTC, 周期100–3600s のバンドパスフィルタを適用). 品質の悪い観測点の記録は灰色で示した. 7月1日 17:00–19:00 (Figure 1aの黒枠内) における最大波の (b) 振幅および (c) 到達時刻.

# Tsunami generation by sea-surface pressure change: A 3-D model for open ocean observations

\*Tatsuhiko Saito<sup>1</sup>, Tatsuya Kubota<sup>1</sup>, Naotaka Yamamoto Chikasada<sup>1</sup>, Yusuke Tanaka<sup>2</sup>, Osamu Sandanbata<sup>1</sup>

1. NIED, 2. JAMSTEC

## はじめに

気圧変化によって発生する津波は気象津波と呼ばれる。観測データは驗潮記録がほとんどであり、長波を想定した水平2次元のモデルが主にデータ解析に利用されている（例えば、Hibiya and Kajiura 1982; 坂本・他 2012; 久保田・他 2020地震学会）。

一方、現在では海底圧力計が広く実用化され、沖合や津波発生域での海底圧力変化が観測できるようになり、津波発生プロセスの理解が進展している。例えば、地震による津波発生の場合、震源域内に設置された海底圧力計によって、津波と海底運動の両者を含む海底圧力変化が明瞭に観測され、流体-弾性体力学のシミュレーション（例えば、Saito 2019; Maeda et al. 2020）に基づく解析から破壊継続時間や応力降下量を通常の津波解析より詳細に推定することができる（Kubota et al. 2020）。

本研究では、3次元流体運動を考慮することで海面の気圧変化によって生じる津波発生の素過程を明らかにし、発生過程で観測されうる海底水圧変化を検討する。

## 3次元流体運動

一定水深のもと海面に圧力変化を与えることで、3次元運動方程式で記述される非圧縮流体運動を波数積分法で計算し、海面波高分布、海水流速分布、海底圧力分布を求める。発生メカニズムを理解するために、まず、移動しない気圧変化によって励起される津波を考え、後に、気圧変化が移動する場合を考える。

## 気圧変化が移動しない場合

急激に海面に気圧変化が起こる場合として、海面にステップ関数で表される気圧変化があるときの3次元流体応答の解を導出した。海面に急激に圧力が加わることで（高気圧の発生）、高気圧直下の海面は徐々に鉛直下方に変位し、海水は脇に押し出される。その結果、高気圧の脇では海面が隆起する。隆起した海面は、重力波（津波）として伝播する。この際、高気圧の外に位置する海底圧力計では、海底地殻変動によって海面が隆起した場合と等価な圧力記録となる。一方、高気圧のある領域内の海底に位置する圧力計は、海底地殻変動によって海面が隆起した場合と異なるふるまいをする。高気圧発生と同じタイミングで圧力が増大し、その後、海面が下方に変位するにともない、徐々に圧力が下がっていく、最終的に海底圧力変化はほぼゼロになる。これは、海底の永久変位によって圧力のオフセットがのこる海底地殻変動によって海面が隆起する場合と異なる。

## 気圧変化が移動する場合

低気圧が移動することで津波が成長する。気圧変化の移動は、移動しない気圧変化の解の重ね合わせで表現する。インパルス応答（時間・空間ともにデルタ関数震源の応答）に、一定速度で動く引張圧力源を畳み込で取り入れ、低気圧の移動による津波の発生を計算する。低気圧が平面的に伝播する場合、3次元流体応答に関する解を得ることができる。これに、長波近似を適用すればProudman (1929) の解と同じになる。低気圧の移動速度が津波の伝播速度と同程度の場合、気圧変化が進行する方向では、海面変位分布は圧力分布の空間微分（もしくは時間微分）の形で与えられ、伝播距離の増大に伴い海面変位が増大する（例 宇野木 1993）。気圧変化の空間スケールが小さい場合、分散効果によって、より急激に波高が増大する場合もある。海底の圧力変化は、津波波高だけでなく、気圧変化による圧力変化も加わる。そして、波長が短い場合には、有限波長-水深効果が現れ、静水圧近似から期待される圧力変化より圧力変化は小さくなる。気圧変化の移動により発生する津波は海底圧力計で検知可能である。しかし、海底圧力計から波高を正確に計測するためには、海面圧力分

布の情報が必要となる.

---

Room A | Regular session | S17. Tsunami

## [S17]PM-1

chairperson:Yusuke Yamanaka(The University of Tokyo), chairperson:Osamu Sandanbata(NIED)

Sat. Oct 31, 2020 1:00 PM - 2:15 PM ROOM A

---

### [S17-06] Multiple-shock Characteristic of the 1933 Showa-Sanriku Earthquake

○Nobuo HAMADA<sup>1</sup> (1.non)

1:00 PM - 1:15 PM

### [S17-07] Forward modeling of tsunami for the 1933 Showa-Sanriku earthquake using normal faults based on marine surveys

○Toshitaka Baba<sup>1</sup>, Naotaka Chikasada<sup>2</sup>, Yasuyuki Nakamura<sup>3</sup>, Go Fujie<sup>3</sup>, Koichiro Obana<sup>3</sup>, Seiichi Miura<sup>3</sup>, Shuichi Kodaira<sup>3</sup> (1.Tokushima University, 2.NIED, 3.JAMSTEC)

1:15 PM - 1:30 PM

### [S17-08] Study on resonance characteristics along western coasts of Japan Sea and amplification of 1833 Shonai-Oki tsunami

○Yusuke Yamanaka<sup>1</sup>, Kiku Shimazu<sup>2</sup>, Takenori Shimozono<sup>1</sup>, Yukimasa Higaki<sup>3</sup> (1.The University of Tokyo, 2.Central Nippon Expressway Company Limited, 3.East Japan Railway Company)

1:30 PM - 1:45 PM

### [S17-09] Nonlinear Inversion of Tsunami waveforms, Estimation of Slip Distribution by Grid Search Part 1

○Masaaki MINAMI<sup>1</sup> (1.Meteorological Research Institute Japan Meteorological Agency)

1:45 PM - 2:00 PM

### [S17-10] Physical mechanism of volcanic tsunami earthquakes repeating at Curtis Island, north of New Zealand

○Osamu Sandanbata<sup>1,2</sup>, Shingo Watada<sup>2</sup>, Kenji Satake<sup>2</sup>, Hiroo Kanamori<sup>3</sup>, Luis Rivera<sup>4</sup>, Zhongwen Zhan<sup>3</sup> (1.Now at NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience), 2.Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3.California Institute of Technology, 4.Universit  de Strasbourg, CNRS, IPGS UMR 7516, F-67000 Strasbourg)

2:00 PM - 2:15 PM

# Multiple-shock Characteristic of the 1933 Showa-Sanriku Earthquake

\*Nobuo HAMADA<sup>1</sup>

## 1. non

### 1. はじめに

1933年昭和三陸地震の震源についてはglobalなISSのデータを用いた調査が幾つも行われて来た。しかし国内の観測データを基に決められた気象庁カタログの震源は、図に示すようにそれらの震源からは東の沖合、海溝から大きく離れた地域に位置し、かねてよりその違いに疑問を持っていた。その原因を調査し突き止めたので紹介する。なお震源の深さについては議論するだけの精度がないと判断されることから、すべて震源の深さを0kmと仮定し検討した。

### 2. 震央位置の違いを生じた主要因

国内外の観測データ及び地震計の記録を参照した結果、地震はM6前後の大きさの前震とその4~5秒後に起きた本震からなることが明らかとなった。Matuzawa(1935)は、当時はmultiple shockの概念はまだ存在しなかったためか、約4秒間隔で2種類のP波が遠地の8観測点で観測されたことを報告しているのみである。図の下部はMatuzawa(1935)に掲載されているPasadena(PSA)、RiverSide (RVR)、Zurich(ZUR)の記録Fig3を部分拡大したものである。当時の地震観測網の中でPAS、RVRでは倍率10000倍を超える高感度の光学式Benioff地震計の稼働が始まったばかりの頃であり、またZURの記録も機械式地震計としては最高の倍率(1000倍以上)を有するQuervain- Piccard地震計の記録であることを考えると当時観測の主力であった普通の機械式地震計では、遠地観測点で前震のP波を検知することは困難であったことが想像される。国内の地震計の記録は、倍率が低く記録の紙送りが30mm/分と遅いこと、前震の立ち上がりは必ずしも顕著ではなかったことから、時間分解能は乏しいものの、初動の3~6秒後に大きな揺れが始まっていることが共通に認められ、やはり前震に引き続き本震が起きたと解釈できる。

今回の結果はアナログ記録の保存の重要性を改めて認識させられるものであるが、ともかく、大部分の遠地観測点ではISSに本震のP波を報告し、中央気象台の観測網ではパラオ ( $\Delta$  = 約3600km) を除きほとんどの観測点では前震のP波を報告したことになる。つまりJMA震源は前震の震源であり、ISSのデータを用いて決めた震源は、近くは前震の観測値と、遠くは本震の観測値を混合して決められた仮想震源ということになる。定性的に考えるだけでも、前震と本震の検測値を混ぜると、origin timeを遅くすることになり、近くの観測点の前震のP波の読み取りは、その分だけ短くなる走時を合わせるため震源を観測網の方に、この場合西側に引き寄せよう作用することが分かる。本多・竹花(1933)、JMA以外の、ISSのデータを用いて決められた各震央は、仮想震源の沖合から陸側への引き寄せ効果を見事に表している。

### 3. 本震の震源

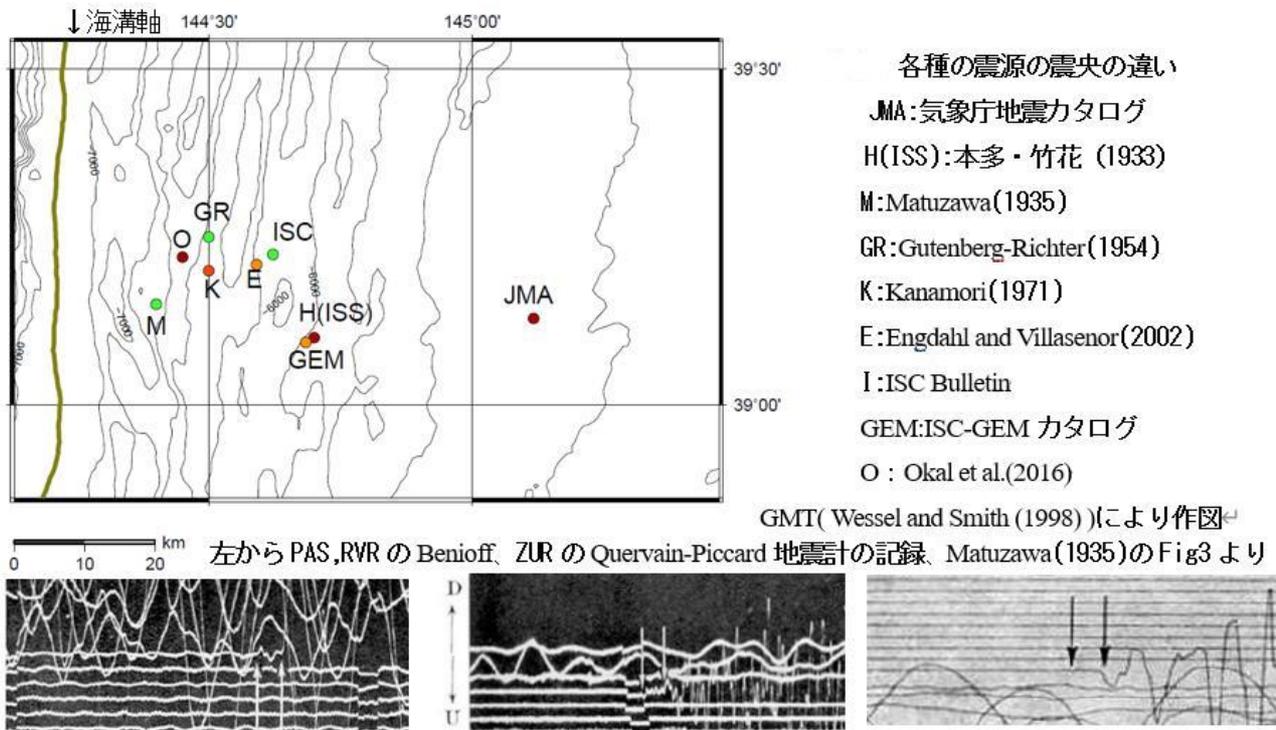
本震の初動は主として $\Delta$ が7000km以上の観測点で記録されているが、これだけを用いて震源を精度良く決めることは困難であるが、前震と本震の震源は同じと考え、その時間差4~5秒を補正して合わせて震源を決めると、誤差の範囲であるがJMA震源のやや北に決められた。従って前震、本震ともに東経145度付近に震源が位置することは確実である。このことは震央が羽鳥(1974)など従来推定されていた津波波源域の外側もしくは東側の縁に位置することになる。津波波源域の再検討もしくは津波発生メカニズムについての検討が今後期待される。

### 4. その他

今回の調査では次のようなことも明らかになった。

- 1) 昭和三陸地震の余震は本震から離れた海溝側に偏って発生している。このように海溝よりに偏った余震の分布は、同じouter riseで発生した2005年11月の宮城県沖地震 (Mj7.1)、2011年東北地方太平洋沖地震の最大余震 (Mj7.5) などでも認められる共通の特徴である。これらのouter riseの地震の震源域の中心は余震がほとんど起こらない強いAsperityの性質を持つことを示す。
- 2) 機械式地震計が主に用いられていた地震検知能力が低かった時代の、遠地地震の検測値には後続相が初動として報告されている事例が多数あるものと推定される。そのような遅延した検測値を震源決定に取り込む

と、見かけ上、陸よりにシフトした震源を決めることになり、注意が必要である。



## Forward modeling of tsunami for the 1933 Showa-Sanriku earthquake using normal faults based on marine surveys

\*Toshitaka Baba<sup>1</sup>, Naotaka Chikasada<sup>2</sup>, Yasuyuki Nakamura<sup>3</sup>, Go Fujie<sup>3</sup>, Koichiro Obana<sup>3</sup>, Seiichi Miura<sup>3</sup>, Shuichi Kodaira<sup>3</sup>

1. Tokushima University, 2. NIED, 3. JAMSTEC

津波の事前予測（想定）は、はじめに海域で発生する地震の断層を仮定する。この断層のモデル化においては、海底地形、地殻構造、微小地震分布などの海域調査の結果を総合的に判断して行われる。2011年東北地方太平洋沖地震に引き続いて発生する可能性のあるアウターライズ地震の特性を理解し、津波を予測するため、海域の地形調査、地殻構造調査、地震観測が精力的に実施された。その結果を踏まえて、前報（馬場ほか、2020, JpGU）では日本海溝沿いの東経143.0度から145度、北緯36.5度から40.5度の領域において33本のアウターライズ地震の断層モデルを提案した。この領域は、1933年に発生した昭和三陸地震の震源域を含んでおり、本研究で採用した断層のモデル化が妥当であれば、提案した33本の断層のうちのいずれかが、1933年昭和三陸地震の津波を再現するはずである。本研究ではこれを目的として、1933年昭和三陸地震の津波の再現計算を行った。

比較のために利用する1933年昭和三陸地震の津波データは、東北大学と原子力安全機構まとめた津波痕跡データベースのうち、信頼度が最も良いAの痕跡データを利用した。津波の計算においては、半無限均質弾性体の解析解を利用して、断層モデルから海底地殻変動を計算し、斜面の平行移動の効果とKajiuraのフィルタを加味したうえで、それをライズタイム30秒で海面に与えた。津波伝播は非線形長波式を差分法で解いた。計算に必要な地形データは日本周辺の公開データをコンパイルして一律2秒間隔で格子化されたGlobal Tsunami Terrain Modelを利用した。ただし、効率的に計算するため、地形ネスティングにより、震源域の海域の18秒格子から沿岸2秒格子まで、空間分解能を変化させた。6時間分の津波を計算し、痕跡データと最も近い計算グリッドで得られた最大津波高を、Aida (1978)の信頼度指標 ( $K$ ,  $\kappa$ ) を利用して評価した。なお、 $K$ は1に近いほど、 $\kappa$ は小さいほど精度がよい。

前報で提案した33本の断層モデルのうち、10番（断層長218km, Mw 8.3）の断層モデルが最もよく昭和三陸地震の痕跡データを再現した ( $K=0.92$ ,  $\kappa=1.47$ )。すでに既往研究で昭和三陸地震の断層モデルがいくつか提案されており、それらについても上記と同様の手法で計算し、痕跡データと比較した。Kanamori (1971)の断層モデルでは $K=1.16$ ,  $\kappa=1.53$ , 相田 (1977) のモデルでは $K=1.02$ ,  $\kappa=1.49$ , Abe (1978)の断層モデルでは $K=1.31$ ,  $\kappa=1.71$ , Uchida et al. (2016)の1枚断層モデルで $K=0.61$ ,  $\kappa=1.49$ , 2枚断層モデルで $K=0.71$ ,  $\kappa=1.55$ であったので、本研究で提案した10番の断層は既往研究と比べてそんな色ない再現性であった。

# Study on resonance characteristics along western coasts of Japan Sea and amplification of 1833 Shonai-Oki tsunami

\*Yusuke Yamanaka<sup>1</sup>, Kiku Shimazu<sup>2</sup>, Takenori Shimozono<sup>1</sup>, Yukimasa Higaki<sup>3</sup>

1. The University of Tokyo, 2. Central Nippon Expressway Company Limited, 3. East Japan Railway Company

これまでに日本海東縁部で発生した地震津波は、日本海西部沿岸域で大きく増幅して浸水被害を発生させたことがある。本研究では日本海で過去に発生した大規模地震津波の一つである1833年庄内沖(山形沖)地震津波を対象とし、日本海東縁部で発生した津波が日本海西部沿岸域において増幅するメカニズムを推定することを研究の目的とする。

まず、1833年津波の痕跡高とそれが観測された時間を既往研究の分析結果に基づき精査し、比較的信頼性の高い痕跡高を抽出した結果、鳥取県境港市においては0.5mの浸水が発生していたことがわかった。さらに、同浸水が発生したのは日没後であることが歴史史料から示唆されており、1833年津波の沿岸挙動の解明の一助となる離散的な時間情報が得られた。

次に、1833年地震の発震日時は12月7日14時頃であり、津波の位相特性を考慮すれば同日16時半頃までに第一波目の津波が境港市沿岸域に到達することが推察された。これを念頭に置きながら、1833年12月7日の境港市に対する太陽位置及び恒星時を略算して日没時刻を推定すると、同日同市における日没時刻は16時54分となった。これらのことから、歴史史料に記述されている境港市における浸水は、津波の後続波が増幅したことによって発生したことがわかった。

境港市沿岸域は美保湾内に位置し、また周辺海域には隠岐海峡が位置するため、湾スケールや海峡スケールの固有振動による津波増幅が1833年津波の氾濫に関与した可能性が考えられる。そこで、数値実験に基づき美保湾や隠岐海峡を含む日本海西部域の固有振動特性を推定することを念頭に置き、境港市境港に容量式波高計を設置して水深変化の時系列データを取得した。そのデータの周波数解析に基づきピーク周期を推定するとともに、数値実験に基づき同海域の波の周期応答特性を推定して前述のピーク周期と比較した。これらの分析結果に基づき、同海域の固有振動特性を実証的に推定した。

上述の分析結果を踏まえながら、1833年庄内沖地震の断層モデルに基づきそれによる津波の伝播及び増幅特性を推定した。まず境港市沿岸域における推定水位の最大値及び出現時刻が観測値と概ね整合していることを確認した。推定された波形では、津波の第一波目の水位上昇量よりも後続波の水位上昇量の方が有意に大きく、後続波が浸水被害を拡大させたことが確認された。さらに、周波数解析に基づき推定水位波形を詳細に分析した結果、湾スケールの固有振動が津波によって励起されていたこと、また複数の固有振動モードが湾内で重なり、津波の後続波を大きく増大させていたことがわかった。

# Nonlinear Inversion of Tsunami waveforms, Estimation of Slip Distribution by Grid Search Part 1

\*Masaaki MINAMI<sup>1</sup>

1. Meteorological Research Institute Japan Meteorological Agency

津波波形を用いたインバージョン計算においては、計算量の制約などから、多くの既往研究では線形の逆問題としてこれを解いている。しかしながら、津波数値計算においてはその非線形の効果は大きく、それが、津波波形を用いたインバージョン計算の精度を大きく削ぐ原因となっている。そこで、本研究では、津波の非線形性も評価することのできる手法として、同一のイベントに対し、様々なすべり量分布で非線形長波方程式での津波数値計算（順計算）を行い、その数値計算結果と観測値との比較から、最も観測値を説明する地震のすべり量分布を求め方法について検討した。つまり、グリッドサーチによる非線形津波インバージョンである。具体的には、今回は2010年チリ中部の地震(Mw8.8)について、Fujii et al.(2013)などの既往研究で用いられている小断層の配置、大きさを用い、そのすべり量だけを変え1万例以上のすべり量分布を作成、その鉛直変位を津波の初期値とし、JAGURS(Baba et al. 2015)を用い、非線形長波方程式で計算した。計算領域は太平洋全域を90秒メッシュとし $\Delta t$ は3secとした。比較のための観測値としてはNOAAのDART((Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis)の波形を、津波到達時刻から2~5時間程度用いた。比較の方法として観測値(15秒値)と計算値(15秒値)の、V.R.を計算し、V.R.が高いほど波形の一致率が高く良い解とした。これらの計算は1事例の計算に2時間/node程度かかった。計算に使用した気象研究所スーパーコンピュータは880node構成で、そのうち200nodeを使用した場合、1万事例を計算するためには、概ね100時間程度で計算が終了する。以上のような条件で1万事例の計算を行ったが、その事例の取り方が本研究の最も重要なポイントとなる。まず総当たりに計算することが考えられるが、今回の事例ですべり量のパターンを8通りとしても、その全パターンは $10^8$ であり、計算量が全く足りていない。つまりもっと早く解を収束させるためには何らかの統計学的、機械学習的処理が必要になる。ここでは様々な手法が考えられるが、本稿ではその第一段階として、まず人間の目で波形を確認し、波形の合致が高いと思われるすべり量分布を作成し計算する、試行錯誤的な手法で計算し、その結果600回程度で概ねある値に収束した。次に、試行錯誤的に求められた値、既往研究(Fujii et al.2013とYoshimoto et al. 2016)の津波インバージョン結果を初期値とし、それらに摂動を与え新たなすべり量分布を作成、それらの計算結果でV.R.を求め、初期値より良い解があれば、その解を次の初期値とし新たに計算する方法を用いた。加えて全くランダムにすべり量を与える方法でも1000事例計算を行った。以上の方法で1万事例以上を計算した結果、V.R.は既往研究等の初期値からある一定程度は上がるが、それほど顕著には上昇せず、頭打ちをした。さらに全ての計算結果のV.R.を検討したところ、すべり量の空間分布がより滑らかなものが、V.R.が高かった。また、梶浦フィルタ(Kajiura 1963)を用い、海面変動をより滑らかにした場合もV.R.が上がるのが分かった。地震波による震源過程解析においても、すべりの時空間分布がなめらかであるという拘束条件がかかっている(例えばFukahata et al. 2003)が、本計算結果からも、すべりの空間分布がよりなめらかであるほど津波波形のV.R.が高いことが示唆された。これまでは計算量の制約からこのような非線形の津波インバージョンは試みられていなかったが、今回の結果から、最新のスーパーコンピュータを用いることによって、計算量の観点からは非線形の津波インバージョンも可能であることを示すことが出来た。しかしながら、今回の結果が真のすべり量分布を示すものであるとは言えず、さらなる手法の改善や、レゾリューションの向上などが必要である。

# Physical mechanism of volcanic tsunami earthquakes repeating at Curtis Island, north of New Zealand

\*Osamu Sandanbata<sup>1,2</sup>, Shingo Watada<sup>2</sup>, Kenji Satake<sup>2</sup>, Hiroo Kanamori<sup>3</sup>, Luis Rivera<sup>4</sup>, Zhongwen Zhan<sup>3</sup>

1. Now at NIED (National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience), 2. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 3. California Institute of Technology, 4. Université de Strasbourg, CNRS, IPGS UMR 7516, F-67000 Strasbourg

## (1) はじめに

New Zealand北方沖に位置する直径1km未満の離島火山・Curtis島近くの海底において、地震マグニチュード5-6級の非ダブルカップル成分に富むCMT解を持つ火山性地震（以降、「Curtis地震」と呼ぶ）が、2009年・2017年に発生し、地震規模から経験的に推定されるよりも大きな津波を引き起こした（最大40 cmの津波が観測）。これらの地震は、日本南方沖の鳥島近海の海底カルデラ火山において約10年間隔で繰り返す「火山性津波地震」と類似した特徴を持つ（Sandanbata et al., 2020a-b, JpGU）。Gusman et al. (2020, GRL)は、二つのCurtis地震に対して、地下1.5 km程度の津波励起源と深さ約10 kmの地震波励起源の二つのソースから成る震源モデルを提案している。本研究では、2017年のCurtis地震の津波および長周期地震波の観測記録を統一的に再現する運動学的震源モデルを構築することで、効率的に津波を引き起こす特異な地震発生の物理メカニズムの解明を目指した。

## (2) 津波記録を用いた地震による初期海水面変動分布の推定

まず、New Zealandの北島および離島の潮位計に記録された津波観測波形を用いて、地震によって発生した初期海水面変動分布を推定した。初期海水面変動のおおよその位置を推定するため、震源周辺に約10 km間隔に配置した9つの鉛直軸対称の海水面隆起波源モデルから予測される津波波形をJAGURS (Baba et al. 2015, PAGEOPH) を用いてそれぞれ計算した。その結果、Curtis島のごく近傍に与えた波源モデルが、観測記録の到達時間および波形を最も良く表した。

次に、より詳細な初期海水面変動分布推定のため、Curtis島付近に多数の海面上の小波源を仮定して計算した津波グリーン関数を用いて、津波波形インバージョンを行った。その結果、直径5-6 km程度の楕円形領域に、最大振幅1 m超の海水面隆起が推定された。隆起域直下の海底地形には、カルデラ火山の地形的特徴が見られ、この地震が海底カルデラ火山における現象であることが示唆された。

## (3) 津波・長周期地震波記録に基づく運動学的震源モデルの構築

続いて、地震による津波・長周期地震波の波形記録を用いて、運動学的震源モデルを構築した。ここでは、地震の物理メカニズムを、「カルデラ下に水平方向に薄く広がるマグマだまりに蓄積した高圧マグマが生成する応力場によって、カルデラ壁の一部分に沿った環状断層が破壊」という仮説を立てた。この物理メカニズムを、環状断層でのDip方向すべりと、地下約3kmに位置する水平クラック断層の開口/閉塞から成る、複合的断層すべり現象としてモデル化した。このとき、環状断層のDip角を可変の断層パラメータとして、複数の断層モデルを仮定した。

仮定した複数の断層モデルに対して津波波形インバージョンを行い、それぞれの断層モデル上でのすべり分布を決定した。(2)の解析同様に潮位計記録を観測記録として用いた。また、断層構造を三角形メッシュで分割した多数の小断層すべりから予測される津波波形を計算し、津波グリーン関数として用いた。その結果、様々なDip角を持った複数の断層モデルで、環状断層における逆断層すべり(最大約4m)と、水平クラック断層の非対称的な開口(最大約4m)/閉塞(最大約2m)が推定され、観測記録を再現した。この結果は、物理メカニズムの仮説の妥当性を津波発生の観点から示した一方で、環状断層のDip角の特定は津波波形記録のみでは困難で

あった。

そこで、地震波励起の観点からの物理メカニズムの妥当性の評価と、環状断層のDip角制約のため、複数の断層モデルでのすべり分布に対して、点震源仮定のもとで長周期地震波をフォワード計算した。各すべり分布のCMT解を点震源モデルとして与え、一次元速度構造に基づく地震波グリーン関数を用いて震央距離8-29°に位置する観測点における長周期地震波（周期：57-143秒）をフォワード計算し、IRISで入手した同観測点での観測記録と比較した。その結果、環状断層のDip角によって計算波形の振幅が敏感に変化する傾向が見られ、Dip角が70°程度の断層モデルにおけるすべり分布が観測記録を十分に再現し、他の断層モデルに比べて明瞭に計算波形と観測波形の一致度が高くなった。このことから、物理メカニズムの仮説の妥当性が地震波励起の観点から確認されたとともに、環状断層のDip角が70°程度と制約された。

#### **(4) 議論・結論**

以上の結果から、2017年のCurtis地震の物理メカニズムとして、海底カルデラ火山地下直下に水平方向に薄く広がるマグマだまりに蓄積した高圧マグマによって環状断層破壊が発生する、"Trapdoor faulting（引き上げ戸状断層破壊）"を提案する。また2009年のCurtis地震についても、地震規模・津波波形・CMT解の類似性から、2017年地震との同様の現象が繰り返していることが示唆される。これらCurtis地震の物理メカニズムは、我々が先行研究において鳥島近海の火山性津波地震に対して提案したものと同等である（Sandarbata et al., 2020a-b, JpGU）。この二つの海底カルデラ火山での地震・津波現象にまたがる類似性は、"特異"な火山性津波地震が、海底カルデラ火山においてある条件下で発生しうる"普遍的"な現象であることを示唆している。

---

Room A | Regular session | S17. Tsunami

## [S17]PM-2

chairperson:Yutaka Hayashi(Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency)

Sat. Oct 31, 2020 2:30 PM - 3:15 PM ROOM A

---

### [S17-11] Reconstruction of the inundation height by spatial interpolation method in the Sendai plain after the 2011 Tohoku Tsunami

○Yuuki Eguchi<sup>1</sup>, Yoshinori Shigihara<sup>1</sup>, Tsuyoshi Tada<sup>1</sup> (1.National Defense Academy of Japan)

2:30 PM - 2:45 PM

### [S17-12] Numerical study on tsunamis propagating into river channel

○Kento Koseki<sup>1</sup>, Yusuke Yamanaka<sup>1</sup> (1.Department of Civil Engineering, The University of Tokyo)

2:45 PM - 3:00 PM

### [S17-13] Characteristics of tsunami flotsam behavior on vulnerable of embankment foundation by strong motion

○Kentaro Imai<sup>1</sup>, Ryoko Obayashi<sup>1</sup>, Kuniaki Emoto<sup>2</sup>, Hiroyuki Iwase<sup>3</sup>, Kentaro Nakai<sup>4</sup> (1.Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2.Wakayama Prefecture, 3.JIFIC, 4.Nagoya University)

3:00 PM - 3:15 PM

# Reconstruction of the inundation height by spatial interpolation method in the Sendai plain after the 2011 Tohoku Tsunami

\*Yuuki Eguchi<sup>1</sup>, Yoshinori Shigihara<sup>1</sup>, Tsuyoshi Tada<sup>1</sup>

1. National Defense Academy of Japan

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、北海道から関東に至るまで広大な範囲で津波の浸水被害を発生させた。東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ（以下、TTJS）は、多くの研究者の現地調査によって収集された津波の痕跡の情報を集約し、実際の浸水状況を把握するためのデータベースを構築した。

一方で、津波の浸水範囲が広く人手が不足したことや、田畑が広がっているなどそもそも痕跡になりえるものがない等、様々な理由により痕跡が密なエリアと疎なエリアが存在したり、信頼度を確保できなかったりする。そのため、津波の遡上計算における再現性の確認では、可能な限り万遍なく分布した痕跡高を使用することが望ましいが、実際には分布の密度や信頼度を考慮せずに使用せざるを得ない状況になっている。

本研究においては、津波による痕跡をもとに様々な内挿補間方法で作成された浸水高分布を作成し、数値シミュレーションによる遡上計算の結果と比較することで、津波の浸水高分布の再現に最適な内挿補間方法と痕跡の選択について提案を行う。仙台の沿岸部を対象とした本研究では、津波の浸水高分布の特徴を内挿補間によって再現できることが確認された。

内挿補間は、離散的に分布するデータから連続的な分布を作成し、空間全体の状態を把握するために使用され、扱う現象やその性質により、いくつかの方法が提案されている。本研究の痕跡を用いた浸水高分布の内挿補間による再現においては、ArcGISにおいて3D Analystツールで実装されている「Inverse Distance Weighted（以下、IDW）」、「Natural Neighbor（以下、NN）」、「クリギング」、「スプライン」、「トレンド」の5種類を使用した。このうち、IDWとクリギング、スプラインについては、内挿補間の際に用いる周囲の情報の点の数を設定できるが、用いる点の数を変化させることにより、空間分布に与える影響も確認した。

また、内挿補間に使用する痕跡については、TTJSによって収集された七北田川以南の仙台平野の痕跡を全て使用した場合、このうち多田ら（2018）によって信頼度が高いと分類された痕跡のみを道いる場合の2ケースと、これらのケースに浸水域のデータから遡上限界に点を追加した2ケースの、計4ケースで内挿補間を行い、浸水高分布を比較した。

内挿補間によって作成された空間分布は、非線形長波モデルで計算された津波遡上計算と比較して特徴の分析を行った。本研究では離散的な浸水高との比較において幾何平均 $K$ と幾何平均偏差 $\kappa$ が良好であった、藤井・佐竹モデルVer.8.0（2013）を断層モデルとして使用し、遡上計算を行った。マニングの粗度係数は、津波浸水前の土地利用に基づき、小谷（1998）の粗度係数を使用した。

各内挿補間の方法により作成された浸水高分布の概要は、以下のようになった。

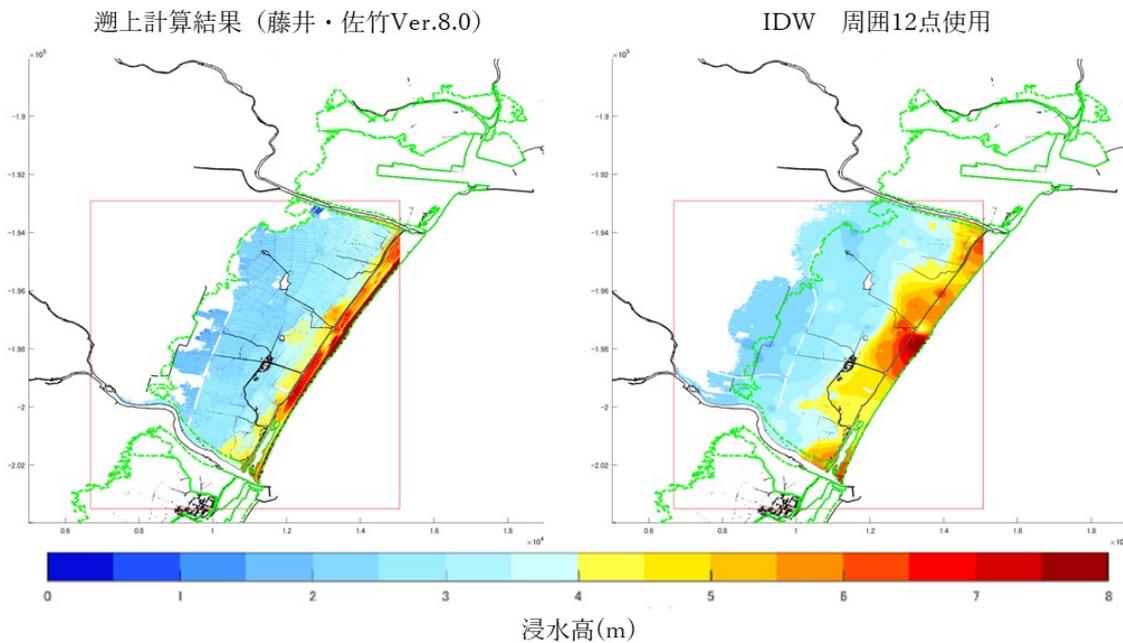
- ・IDW：痕跡が少ないエリアは沿岸部であっても浸水高が減少するが、内陸部に行くにつれ浸水高が確実に減少した。なお、補間に用いた点の数による変化はほとんど見られなかった（下図）。
- ・NN：浸水高が沿岸部から内陸部に向け減少していく傾向を再現した。ただし、痕跡の高さに比べて過大計算する傾向が見られた。
- ・クリギング：IDWの結果とほぼ同じであるが、使用する近傍の点を増やすほど沿岸部の浸水高が減少し、再現性が悪化した。
- ・スプライン：痕跡が少ない点をマイナスとするなど、局所的に高い浸水高の痕跡を含む今回の内挿補間には不適であった。

- ・トレンド：浸水域全体で関数に近似できるような傾向がなく、浸水高分布の再現はできなかった。

また、使用する痕跡については、多田らが行った分類を用い、遡上限界点を追加しない組み合わせが、浸水域を最もよく再現した。これは、特に遡上限界点付近の痕跡における遡上高が、その痕跡よりも海側の痕跡の浸水高よりも高い場合があり、内陸部の浸水高分布を押し上げるように寄与するためである。

浸水高の分布はIDW, NN, クリギングが、内陸部に行くにつれて減少しており、遡上計算に類似した結果となった（下図）。一方で、遡上計算では仙台東部道路の盛土が津波をとどめることになり、その東西において急激に浸水高が変化している。このように、浸水高が急激に変化するような状況を、今回の痕跡の分布では内挿補間によって再現することはできなかった。ただし、急激な浸水高の変化も、その周辺において痕跡が多数収集されていれば、再現できる可能性がある。

各内挿補間方法と遡上計算の結果における、浸水域全体の浸水高の頻度分布を比較すると、ピークの値やその周辺の分布から、IDWが最も遡上計算に近い結果となった。本研究において、クリギングでは痕跡が少ないエリアが遡上計算結果と外れやすく、NNでは全体的に浸水高を過大計算していた。



# Numerical study on tsunamis propagating into river channel

\*Kento Koseki<sup>1</sup>, Yusuke Yamanaka<sup>1</sup>

1. Department of Civil Engineering, The University of Tokyo

河口域に來襲した津波は、海域と河道の接続領域における複雑な流体運動を経ての河道に侵入し、その上流域で津波の氾濫被害を引き起こすことがある。しかしながら、定量的な観測データの不足から、その接続領域における津波の挙動については未だ限られた知見しか得られていない。本研究では、複数の数値モデルを用いて、海域と河道の接続領域における津波の流体特性の基礎的な分析を行うことを目的とする。

本研究では図に示す中心軸を基準とした軸対称の計算領域を設定し、沖側境界から最大水位と波長でパラメタライズしたガウス分布の津波を入射させることで、河道を模した狭窄水路に侵入する津波の挙動を分析する。数値モデルとして線形長波モデル、非線形長波モデル、非線形分散波モデルを用い、側方境界の線流量に対する境界条件としていずれの数値モデルに対してもSommerfeld放射条件を与えた。なお計算領域内における水深は一律であり、入射波は沖側境界において長波条件を満たしている。また水陸境界では鉛直壁を仮定しているため津波の水路外への氾濫は考慮していない。このような条件の下で、入射津波の波高や波長、水深や狭窄水路幅などの地形条件、格子解像度などの数値計算条件を変化させながら、狭窄水路に侵入する津波の挙動を分析した。

本研究で得られた津波の伝播過程及びその特性を以下に示す。なお、本研究ではガウス分布の標準偏差( $\sigma$ )を用いて、 $6\sigma$ を入射津波の波長 $L'$ と定義する。また、図において $h$ は初期水深、 $\eta$ は初期水位からの水位変動、 $\eta_{in,max}$ は入射波高、 $w$ は狭窄水路幅、 $v$ は流速を示す。本研究においては、初期水深( $h$ )、初期水深に対する入射波高( $\eta_{in,max}/h$ )、初期水深に対する波長( $L'/h$ )、狭窄水路幅( $w$ )をパラメータとして設定した。まず狭窄水路に向かって伝播する津波は、狭窄地点の鉛直壁前面において水位を増大させた。ここで、鉛直壁前面位置(中心軸上)で観測される最大水位と入射波高の比を波高比と定義すると、波高比は最大で2程度となった。また、狭窄水路幅や入射津波の波長と狭窄水路幅の比(相対水路幅)、波の非線形強度などが波高比を決定する要因となることがわかった。次に、鉛直壁全面で増大した水位は、狭窄水路周辺の水位よりも大きくなるために圧力勾配が生じ、それによって狭窄水路に津波が侵入した。狭窄地点と沖側境界地点において、狭窄水路に流入する流量の累積値(侵入方向線流量の時間積分)と入射地点におけるそれとの比を侵入率と定義すると、その値は最大で33%程度となった。狭窄水路幅は計算領域幅の1/6であるため、狭窄水路に侵入する以前に比べて単位幅あたりの流量の累積値は2倍程度に増加したことに相当する。さらに、波高比を決定するパラメータの中で、相対水路幅の侵入率に与える影響は小さく、また入射波が狭窄水路に侵入する過程で波面が先鋭化することでその分散性が大きくなったが、本研究で適用した条件ではその影響は無視できることがわかった。

最後に、上述の数値計算格子を4倍に高解像度化して同様の分析を行い、上述の結果と比較した。高解像度化することにより、狭窄水路幅と格子解像度の比が4~20から16~80に増加することで、狭窄地点周辺で生じる縮流の流速場の推定精度が全ケースにおいて大きく向上した。その結果として波高比は最大で14%程度、侵入率は最大で7%程度上述の実験よりも増大した。本実験及び上述の実験ともに、入射波の波長と格子解像度の比は数百以上を維持している。これらのことから、狭窄水路に侵入する以前の入射津波の伝播の推定においてはいずれの場合においても十分な精度で推定できていることが推察される。また、非線形強度が小さい入射波条件においてもその他の入射波条件と同様に縮流の推定精度が向上したことから、狭窄水路幅の解像度が縮流の推定に影響する主要因の一つであることがわかった。

以上の結果から、河口域に來襲した津波が河道内に侵入する過程及び侵入後の挙動を高精度に推定するためには、河道に侵入する過程で発生する縮流を高精度に推定する必要があることがわかった。その推定精度が不十分である場合には上述の波高比及び侵入率を過小に推定し、河道内の津波による水位上昇量及び流量を過小評価する可能性がある。

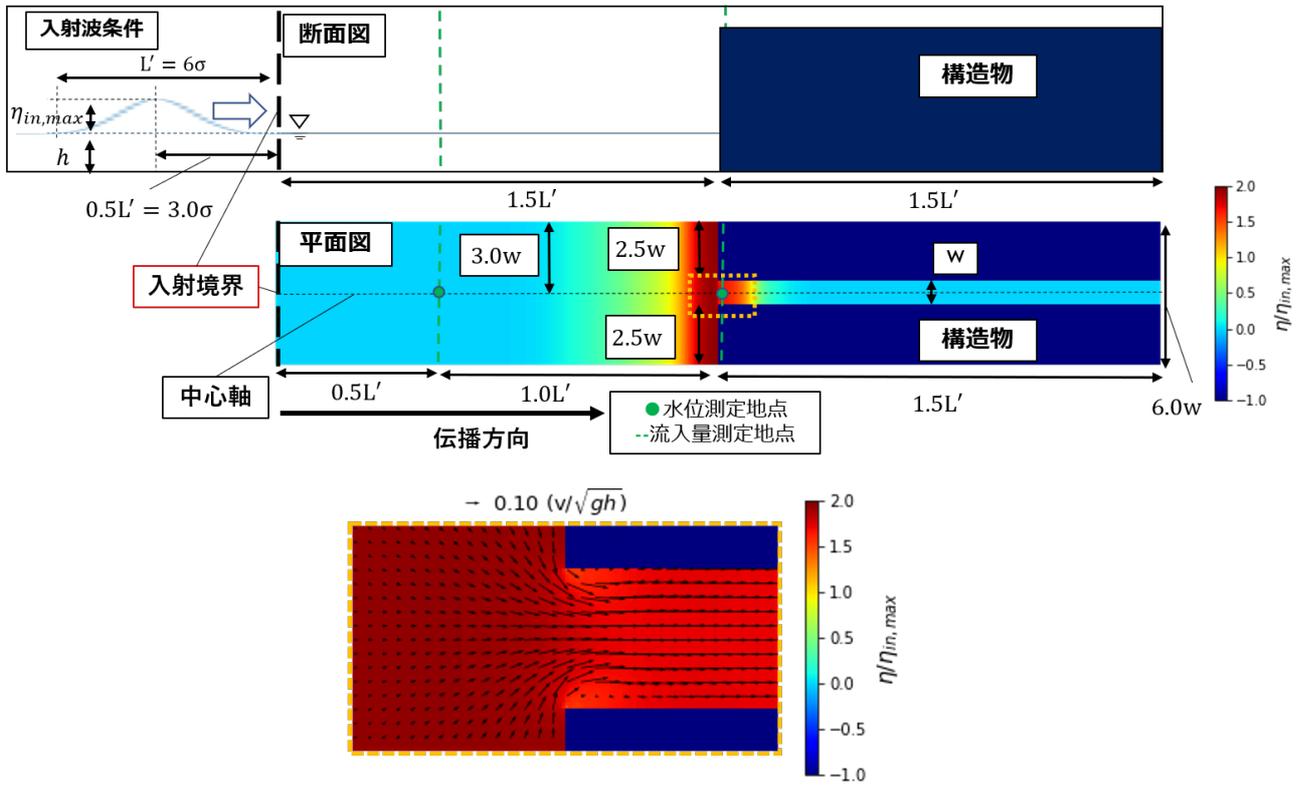


図. 数值実験の概要図 (上) 及び狭窄部の拡大図 (下)  
 ( $h = 10[cm]$ ,  $\eta_{in,max}/h = 0.1$ ,  $L'/h = 60$ ,  $w = 10[cm]$ のケース)

# Characteristics of tsunami flotsam behavior on vulnerable of embankment foundation by strong motion

\*Kentaro Imai<sup>1</sup>, Ryoko Obayashi<sup>1</sup>, Kuniaki Emoto<sup>2</sup>, Hiroyuki Iwase<sup>3</sup>, Kentaro Nakai<sup>4</sup>

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Wakayama Prefecture, 3. JIFIC, 4. Nagoya University

## 1. 研究目的

既報（例えば、今井・他、2018）において、矢作川河口域において高度な土地利用展開されてきた愛知県碧南市を対象として、南海トラフ巨大地震による地震動に対する堤体基礎の沈下量を水～土骨格連成有限変形解析（Noda et al., 2008）を津波氾濫解析に組み込んだ氾濫解析を実施し、堤体基礎の強震動脆弱性を考慮した氾濫解析の重要性を示した。解析対象とした蜷川下流部には河道内にプレジャーボートが停泊しており、より現実的な津波被害予測には津波漂流物の影響についても検討する必要がある。本研究では、建物を地形と底面摩擦として取り扱う合成地形モデル（今井・他、2013）を用い、プレジャーボートを対象とした津波漂流物の拡散解析を行い、河岸堤体基礎の強震動脆弱性、建物の影響による漂流物の拡散過程、その影響範囲と集積状況について検討を行う。

## 2. 研究内容

本研究の解析対象領域である愛知県碧南市において地震動応答解析を行い、堤体の沈下量を津波氾濫解析に反映させた。津波氾濫解析には、蜷川河岸の堤体高およびその周辺の地盤高はGEOASIAによる解析結果、詳細建物データ（碧南市）、5 mDEM（国土地理院）とGNSS測量に基づいて最小空間分解能3.3 mの合成地形モデルを利用し、堤体天端のパラペット被害の有無、河口から約2.5 km上流にある樋門の開閉についてを計算条件とした。波源は内閣府モデルの津波断層Case 9とし、朔望平均満潮位（T.P. +1.0 m）とした。対象とする漂流物は蜷川下流部に係留されているプレジャーボートとし、その配置や船体諸元について現地調査を行った。漂流物の拡散解析には後藤（1983）による漂流物拡散モデルを適用した。漂流物の水平方向の運動は慣性力、水流の圧力勾配、付加質量、流水抵抗と拡散により記述される、本解析では拡散を除く4種類の力の釣り合いを決定論的に扱い、拡散については決定論的に定まる漂流物の位置を踏まえて確率論的に取り扱った。漂流物の移動および停止について、漂流物（船舶）諸元で設定した喫水0.5 m（浸水深0.5 m）以上の場合で移動し、それ以下では停止条件とした。

## 3. 主な結論

蜷川流域の堤体基礎の被害状況に応じた浸水過程や浸水域の拡大に対応して、漂流物の拡散過程や集積状況も大きく変化することを明らかにした。とくに、樋門の開閉の影響は大きく漂流過程に影響することを示した。また、合成地形モデルによる建物構造物の水流遮蔽効果の影響により津波氾濫の流束が道路に沿うようになるため、漂流物もそれに従って漂流するようになる。合成地形モデルと漂流物拡散解析を組み合わせることで、より現実的な漂流予測が可能となる。中小河川や一部の港湾施設を擁する地域においては、これら構造物の耐震化の重要性を示していることはもちろんのこと、強震動による海岸・河岸構造物や堤体基礎部の脆弱性が津波ハザード評価に与える影響を無視できないことを示している。

謝辞：本研究は R2-6年度文部科学省「防災対策に資する南海トラフ地震調査研究プロジェクト」（研究代表者：海洋研究開発機構 小平秀一）の一環として行われました。