

令和 3 年 6 月 7 日現在

機関番号：82109

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K13001

研究課題名（和文）超高密度観測網に基づく地震動即時予測に向けて：機械学習による地震波の自動識別

研究課題名（英文）Toward earthquake early warning based on a very dense seismic network: Automatic classification of seismic waves with a machine learning technique

研究代表者

小寺 祐貴 (Kodera, Yuki)

気象庁気象研究所・地震津波研究部・研究官

研究者番号：80780741

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：地震動即時予測の迅速性・信頼性を向上させるためには、ノイズが混入する恐れのある地震計などのデータも積極的に取り入れることで、活用可能な観測点数を増やしていくことが重要である。本研究では、様々な観測環境にある地震計を地震動即時予測に取り込むための第一歩として、各地震計の連続波形記録から地震やノイズを教師なし学習で自動的に分類する手法の開発に取り組み、地震計の品質管理の自動化などにつなげる。周波数特性の類似性と時間的な近接性という特徴をうまく利用することで、連続波形記録上の地震や特徴的ノイズは教師なし学習で分類可能であることを示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、周波数特性の類似性と時間的な近接性という特徴をうまく利用することで、連続波形記録上の地震や特徴的ノイズは教師なし学習で分類可能であることを示すことができた。開発した手法は、地震動即時予測で用いる地震計の品質管理の自動化につながるものであり、地震動即時予測の迅速化・信頼性向上に寄与するだろう。また、本研究で得られた知見は、品質管理の自動化のみならず、様々な物理現象の自動検出にも適用可能なものであり、地震学における新たな機械学習の応用可能性を提示できた。

研究成果の概要（英文）：For the improvement of the prediction timeliness and robustness of earthquake early warning, it is important to use as many observation stations as possible, by incorporating various seismometers including ones under noisy environments. This study develops an unsupervised machine learning algorithm to classify earthquakes and noises recorded in continuous waveforms, which would lead to an automatic data quality check applicable to various seismometers. We showed that earthquakes and characteristic noises recorded in continuous waveforms can be classified with an unsupervised machine learning technique focusing on the similarity in the frequency domain and the adjacency in the time domain.

研究分野：地震学

キーワード：地震防災 地震動即時予測 緊急地震速報 機械学習 自動処理

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

地震動即時予測システムの更なる迅速性・信頼性の向上を目指し、様々な取り組みがなされている。例えば、2011年東北地方太平洋沖地震の発生をきっかけとして、巨大地震時の過小予測が大きな課題のひとつとして浮かび上がったが、これを解決する方法として、震源を求めずに波動場から波動場を直接予測する手法が提案された[1]。また、この方法論を実用化させるため、非常に少ない計算コストで波動場を直接予測できる手法(PLUM法)が開発された[2](PLUM法は2018年3月に気象庁の緊急地震速報システムへ導入され、警報発表の見逃し事例を減らすなどの成果を上げている[3])。このように、近年は新たな予測手法の開発が、予測精度の向上において著しい成果を上げている。

一方で、実運用中のシステムでは、予測手法そのものの良し悪しに加えて、観測データの取り込みに制約があることが、パフォーマンス向上を妨げる要因のひとつになっている。例えば、気象庁の緊急地震速報システムは、誤報や過大予測を防止するため、ノイズの混入が非常に少ない観測点で運用されている。しかしながら、地震動予測の迅速性は地震観測網の密度に強く依存している。平成28年熊本地震においては、気象庁の多機能型地震計に加えて震度計の観測網も活用すれば、警報発表タイミングは2~5秒程度早まることが示されている[4]。このように、地震動即時予測の迅速性・信頼性を向上させるためには、高度な予測手法の開発のみならず、ノイズが混入する恐れのある地震計などのデータも積極的に取り入れることで、活用可能な観測点数を増やしていくことが重要であるが、十分な取り組みはなされていない状況である。

2. 研究の目的

本研究では、様々な観測環境にある地震計を地震動即時予測に取り込むための第一歩として、各地震計の連続波形記録から地震やノイズを機械学習で自動的に分類する手法の開発に取り組む。連続波形記録の自動分類が可能となれば、地震計の事前の品質管理(地震動即時予測に取り入れられるか否かの判定)や、高度な地震・ノイズ識別ロジックの実装、などが容易にできるようになるだろう。

3. 研究の方法

研究開始当初は、以下の2点に取り組む計画であった。

(1) 地震やノイズの識別に有効な特徴量の調査

気象庁、防災科学技術研究所、東京大学地震研究所が管理する地震計の観測記録(気象庁震度観測点、KiK-net、MeSO-netの観測データなど)を用いて様々な特徴量を計算し、どの特徴量が地震やノイズの識別に役立つのかを調査する。また、地震やノイズ波形のモデルを教師あり学習で構築するため、訓練データとなるラベル付きデータベースを用意する。

(2) 機械学習による自動分類手法の開発

隠れマルコフモデルなどの教師あり学習を用いて、(1)で作成した訓練データから地震やノイズ波形のモデルを構築し、それらを用いて連続波形記録の自動分類を実施する。多数のノイズが混入している波形や様々な地震が観測されている波形などの自動分類を試み、様々な観測環境にある地震計に提案手法が適用可能であることを確かめる。

上記のように、研究開始当初はラベル付きのデータベースを用意して教師あり学習によって自動識別を行う手法の開発を計画していた。しかしながら、連続波形記録上のノイズは地震計毎に非常に異なるものであり、事前に漏れなくデータベース化することは困難であると判断するに至った。そのため研究期間の途中から、教師あり学習を用いるのではなく、特段の加工を行っていない連続波形記録を入力として教師なし学習によって自動分類を行うアプローチへと方針転換した。教師なし学習は事前にラベル付きデータベースを用意する必要が無いため、手法を将来的に実用化する上でも、教師なし学習を選択するメリットは大きいと判断した。

4. 研究成果

(1) 地震やノイズの識別に有効な特徴量の調査

前述の通り、研究途中から、連続波形記録に特段の加工を行わずに教師なし学習で波形を自動分類するという方針に転換したため、識別に有用な特徴量の調査(特に、ノイズに対する調査)は最後まで完了させなかった。しかしながら、この調査の副産物として、ある特徴量を計算すれば、断層破壊の成長を示唆するP波を検出できることが明らかになった。ここではその研究成果について報告する。

M7を超える地震が発生した際は、断層破壊は徐々に成長するため、しばしば最大震度も揺れ始めからある程度の時間が経過してから現れる。ある地震が発生した際、断層破壊がさらに成長しているかどうかをリアルタイムで把握できれば、最大震度のより迅速な予測につながる事が期待される。我々は、P-filter[5]という、パーティクルモーションから計算されるP波指標値を連続的に計算し続けることで、遅れて破壊した強震動生成域からもたらされるP波をリア

リアルタイムで検出可能であることを示した(図1)。また、この情報を用いれば、強震動生成域による震度のピーク値を前もって予測できることも明らかにした。これらの結果は、巨大地震に対する地震動即時予測のパフォーマンスを向上させるうえで、提案手法が有力な方法になり得ることを示している。

本研究の成果は国際誌 Geophysical Research Letters に掲載された[6]。断層破壊の成長をリアルタイムで検出して地震動即時予測に取り入れる試みは前例がなく、本研究によって地震動即時予測を高度化する新しい方向性を示すことができた。

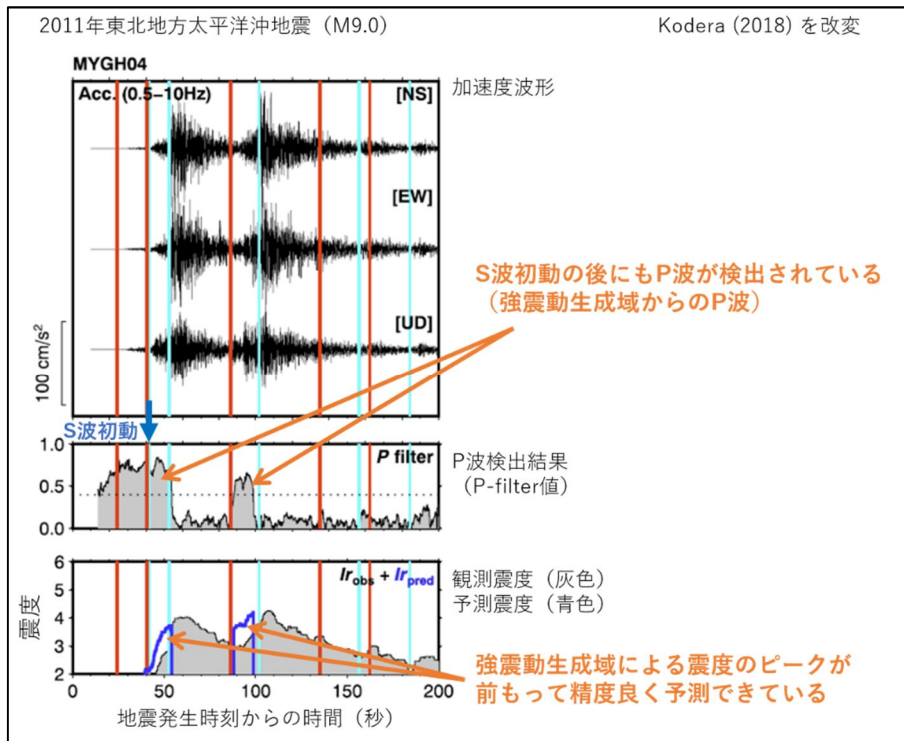


図1：宮城県のKiK-net観測点で記録された東北地方太平洋沖地震の加速度波形に対し、強震動生成域から放出されたP波の検出および強震動生成域による震度のピークの予測を試みた例。

(2) 機械学習による自動分類手法の開発

様々な観測環境に設置された地震計に適用可能となるよう、「地震」や「ノイズ」といったラベル付けがされたデータベースが事前に存在することを前提とせず、教師なし学習によって連続波形記録を自動分類する手法を開発した。

提案手法は、周波数特性および時間的近接性を特徴量として、クラスタリングを2段階に分けて行う。分類結果の解釈が容易となるよう、また、比較的少ないデータでも手法が適用可能(観測点毎の学習も容易に可能)となるよう、deep learningは用いないホワイトボックス手法で分類手法を構築することとした。提案手法の流れを図2に示す。

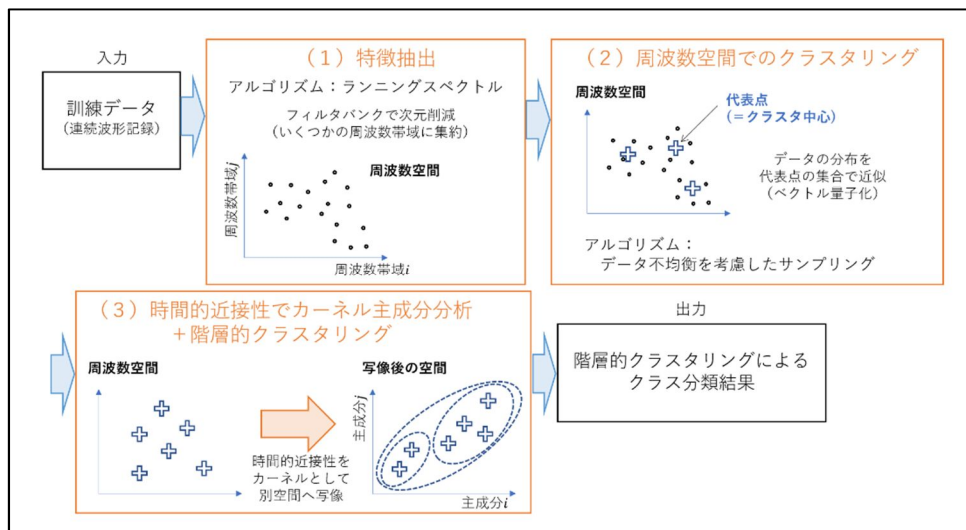


図2：本研究で提案した教師なし学習による連続波形記録の自動分類手法。

提案手法を地下鉄近傍に設置されている MeS0-net 観測点の連続波形記録に対して適用した。階層的クラスタリングにより得られたデンドログラムと、ある時間帯におけるクラス分類結果を図3に示す。デンドログラムを最大高さの1/2でカットした場合、定常的に混入しているノイズは高レベルと低レベルの2クラスに分けられていた。また、地震の波形はそれらのノイズと異なるクラスに分類された。カットする高さを下げ、最大高さの1/3でカットしたところ、高レベルのノイズは2つのクラスに分離され、そのうちの1つは鉄道ノイズに対応するクラスであった。デンドログラムをどの高さで切るのが適切かという課題は残るものの、周波数特性と時間的近接性に着目した教師なし学習により、地震や特徴的なノイズを自動的に分類できる可能性を示すことができた。

さらに、提案手法を2004年紀伊半島南東沖地震(M7.4)の臨時海底地震計の連続波形記録にも適用した(図4)。同記録には、活発な余震活動の地震波形が多数存在するほか、低周波微動の波形も記録されている。提案手法によって低周波微動を自動的に検出できるかを検証したところ、振幅が大きい低周波微動についてはバックグラウンドノイズと識別することができていた。一方で、余震のコーダ部分と低周波微動とを混同するケースも見られ、完全な分類のためには更なる手法の改善が必要であることも分かった。この結果は、技術的課題は存在するものの、教師なし学習により低周波微動をも検出できる可能性を示唆しており、教師なし学習の適用範囲の広さを示している。

本研究で得られた成果は、国際学会(American geophysical union)等で発表された。近年では地震動即時予測に機械学習を応用する研究が活発に行われているが、地震計の品質管理を目的として機械学習を適用した事例はまだ少ない。また、教師なし学習によって地震や低周波微動といった様々な物理現象を検出するアプローチも珍しいものである。本研究の遂行を通じて、地震学における新たな機械学習の応用可能性を示すことができた。

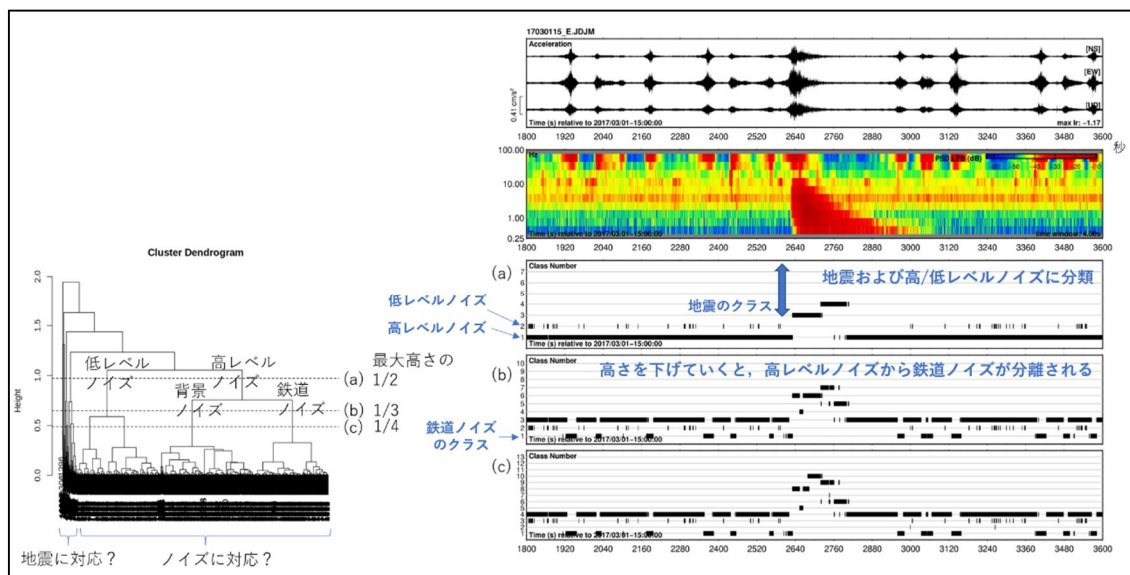


図3：提案手法を MeS0-net 観測点に適用した事例。(左)階層的クラスタリングのデンドログラム。(右)デンドログラムを最大高さの1/2, 1/3, 1/4で切断したときのクラス分類結果。

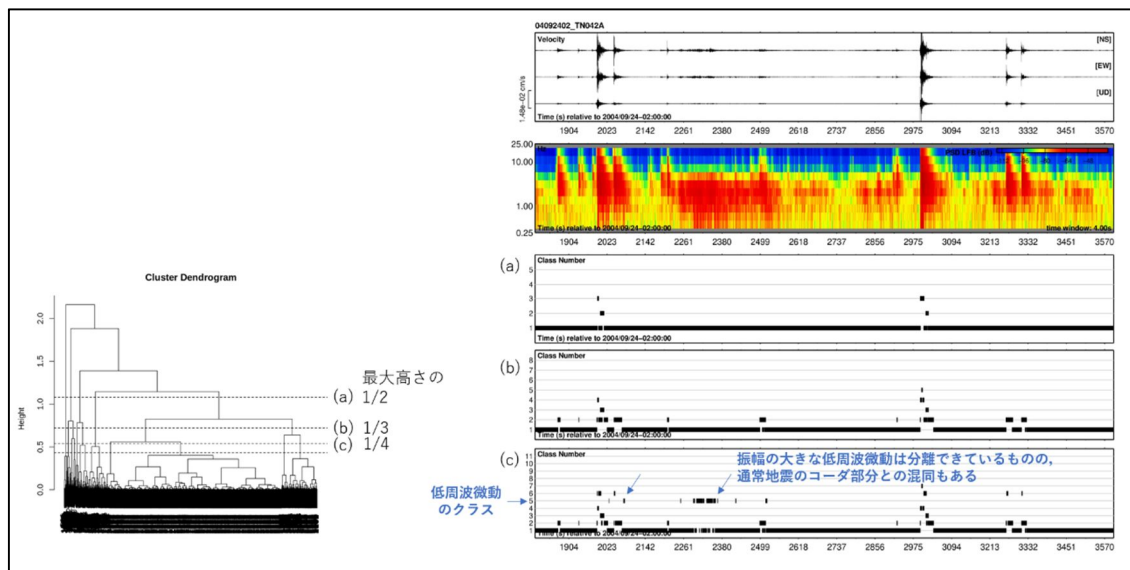


図4：提案手法を2004年紀伊半島南東沖地震(M7.4)の臨時海底地震計に適用した事例。

参考文献：

- [1] Hoshiya, M., & Aoki, S. (2015). Numerical shake prediction for earthquake early warning: Data assimilation, real-time shake mapping, and simulation of wave propagation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(3), 1324-1338. <https://doi.org/10.1785/0120140280>
- [2] Kodera, Y., Yamada, Y., Hirano, K., Tamaribuchi, K., Adachi, S., Hayashimoto, N., et al. (2018). The propagation of local undamped motion (PLUM) method: A simple and robust seismic wavefield estimation approach for earthquake early warning. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 108(2), 983-1003. <https://doi.org/10.1785/0120170085>
- [3] Kodera, Y., Hayashimoto, N., Moriwaki, K., Noguchi, K., Saito, J., Akutagawa, J., et al. (2020). First-year performance of a nationwide earthquake early warning system using a wavefield-based ground-motion prediction algorithm in Japan. *Seismological Research Letters*, 91(2A), 826-834. <https://doi.org/10.1785/0220190263>
- [4] Kodera, Y., Saitou, J., Hayashimoto, N., Adachi, S., Morimoto, M., Nishimae, Y., & Hoshiya, M. (2016). Earthquake early warning for the 2016 Kumamoto earthquake: Performance evaluation of the current system and the next-generation methods of the Japan Meteorological Agency. *Earth, Planets and Space*, 68(1), 202. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0567-1>
- [5] Ross, Z. E., & Ben-Zion, Y. (2014). Automatic picking of direct P, S seismic phases and fault zone head waves. *Geophysical Journal International*, 199(1), 368-381. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu267>
- [6] Kodera, Y. (2018). Real-time detection of rupture development: Earthquake early warning using P waves from growing ruptures. *Geophysical Research Letters*, 45, 156-165. <https://doi.org/10.1002/2017GL076118>

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kodera Yuki	4. 巻 124
2. 論文標題 An Earthquake Early Warning Method Based on Huygens Principle: Robust Ground Motion Prediction Using Various Localized Distance Attenuation Models	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 12981 ~ 12996
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2019JB017862	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kodera Yuki, Hayashimoto Naoki, Moriwaki Ken, Noguchi Keishi, Saito Jun, Akutagawa Jun, Adachi Shimpei, Morimoto Masahiko, Okamoto Kuninori, Honda Seiichiro, Hoshiba Mitsuyuki	4. 巻 91
2. 論文標題 First-Year Performance of a Nationwide Earthquake Early Warning System Using a Wavefield-Based Ground-Motion Prediction Algorithm in Japan	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Seismological Research Letters	6. 最初と最後の頁 826 ~ 834
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1785/0220190263	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kodera Yuki	4. 巻 45
2. 論文標題 Real-Time Detection of Rupture Development: Earthquake Early Warning Using P Waves From Growing Ruptures	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 156 ~ 165
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/2017GL076118	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kodera Yuki, Yamada Yasuyuki, Hirano Kazuyuki, Tamaribuchi Koji, Adachi Shimpei, Hayashimoto Naoki, Morimoto Masahiko, Nakamura Masaki, Hoshiba Mitsuyuki	4. 巻 108
2. 論文標題 The Propagation of Local Undamped Motion (PLUM) Method: A Simple and Robust Seismic Wavefield Estimation Approach for Earthquake Early Warning	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Bulletin of the Seismological Society of America	6. 最初と最後の頁 983 ~ 1003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1785/0120170085	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 11件）

1. 発表者名 小寺祐貴, 酒井慎一
2. 発表標題 連続波形記録の教師なし自動分類: 不均衡データに対応するための異常検知処理の導入
3. 学会等名 日本地震学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kodera, Y. and S. Sakai
2. 発表標題 An unsupervised automatic classification for continuous seismic records: introducing an anomaly detection algorithm to solve the imbalanced data problem
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小寺祐貴, 酒井慎一
2. 発表標題 教師なし学習による連続波形記録の自動分類: 階層的クラスタリングの導入
3. 学会等名 東京大学地震研究所共同利用研究集会「固体地球科学における即時予測・即時解析のフロンティア: 基礎的研究から利活用まで」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kodera, Y., N. Hayashimoto, and K. Moriwaki
2. 発表標題 The First-Year Operation of the Plum Algorithm in the Earthquake Early Warning System of the Japan Meteorological Agency
3. 学会等名 2019 Seismological Society of America Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kodera, Y., S. Sakai, and T. Nishimiya
2. 発表標題 An unsupervised automatic classification algorithm for continuous seismic records using a nonparametric Bayesian approach
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kodera, Y.
2. 発表標題 Earthquake Early Warning Using Late-Onset P-Waves from Growing Ruptures
3. 学会等名 2018 Seismology Society of America Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小寺祐貴, 酒井慎一
2. 発表標題 高密度観測網を用いたPLUM法の検討: MeSO-net観測点への適用
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小寺祐貴
2. 発表標題 局所的な距離減衰のリアルタイム推定による地震動即時予測
3. 学会等名 日本地震学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小寺祐貴, 酒井慎一
2. 発表標題 教師なし学習による連続波形記録上の地震およびノイズ信号の自動分類
3. 学会等名 日本地震学会2018年度秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kodera, Y.
2. 発表標題 Earthquake early warning based on wavefield estimation approaches incorporating P-waves and ground motion prediction equations: toward the improvement of the PLUM method
3. 学会等名 12th joint meeting of UJNR on earthquake research (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小寺祐貴
2. 発表標題 地震動即時予測のPLUM法の改善に向けて: 局所的な距離減衰を導入した波動場推定手法
3. 学会等名 第15回地震工学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kodera, Y, and S. Sakai
2. 発表標題 An unsupervised learning method for the automatic classification of earthquake and noise signals recorded in continuous waveforms
3. 学会等名 2018 AGU fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小寺祐貴
2. 発表標題 地震動即時予測への速度計の活用可能性の検証：強震観測時のHi-net波形の解析
3. 学会等名 東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震動のリアルタイム解析：防災・減災に向けた即時的な活用を目指して」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kodera, Y.
2. 発表標題 Real-time P-phase discriminator for earthquake early warning based on wavefield-estimation methods
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2017年大会（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kodera, Y.
2. 発表標題 Propagation of local undamped motion (PLUM) method and its improvement using P-phase discrimination for more rapid earthquake early warning based on wavefield-estimation approaches
3. 学会等名 IAG-IASPEI Joint Scientific Assembly 2017（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kodera, Y.
2. 発表標題 Ten years of earthquake early warning operation in the Japan Meteorological Agency
3. 学会等名 The Sep. 12 Earthquake: One Year Later Workshop（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kodera, Y.
2. 発表標題 The Propagation of Local Undamped Motion (PLUM) method: a simple and robust earthquake early warning algorithm without source parameter estimation
3. 学会等名 Seminar at USGS Pasadena (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小寺祐貴
2. 発表標題 S波の後に現れるP波を用いた緊急地震速報
3. 学会等名 日本地震学会2017年度秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小寺祐貴
2. 発表標題 S波の後に現れるP波を用いた緊急地震速報
3. 学会等名 日本地震工学会・大会-2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kodera, Y.
2. 発表標題 Earthquake early warning using P-waves that appear after initial S-waves
3. 学会等名 2017 AGU fall meeting (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 小寺祐貴
2. 発表標題 P波を用いたPLUM法
3. 学会等名 東京大学地震研究所共同利用研究集会「地震のリアルタイムモニタリングと情報の利活用」
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	酒井 慎一 (Sakai Shin-ichi) (00251455)		
研究協力者	干場 充之 (Hoshiba Mitsuyuki) (60510196)		
研究協力者	工藤 祥太 (Kudo Shota)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------