

情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト
(STAR-E プロジェクト)
「信号処理と機械学習を活用した
地震波形ビッグデータ解析による地下断層の探索」

令和 5 年度

成果報告書

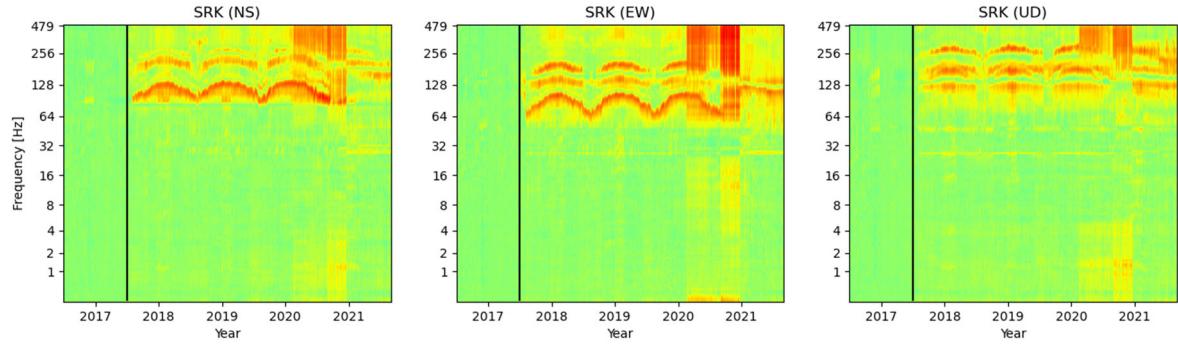
令和 6 年 5 月

文部科学省 研究開発局

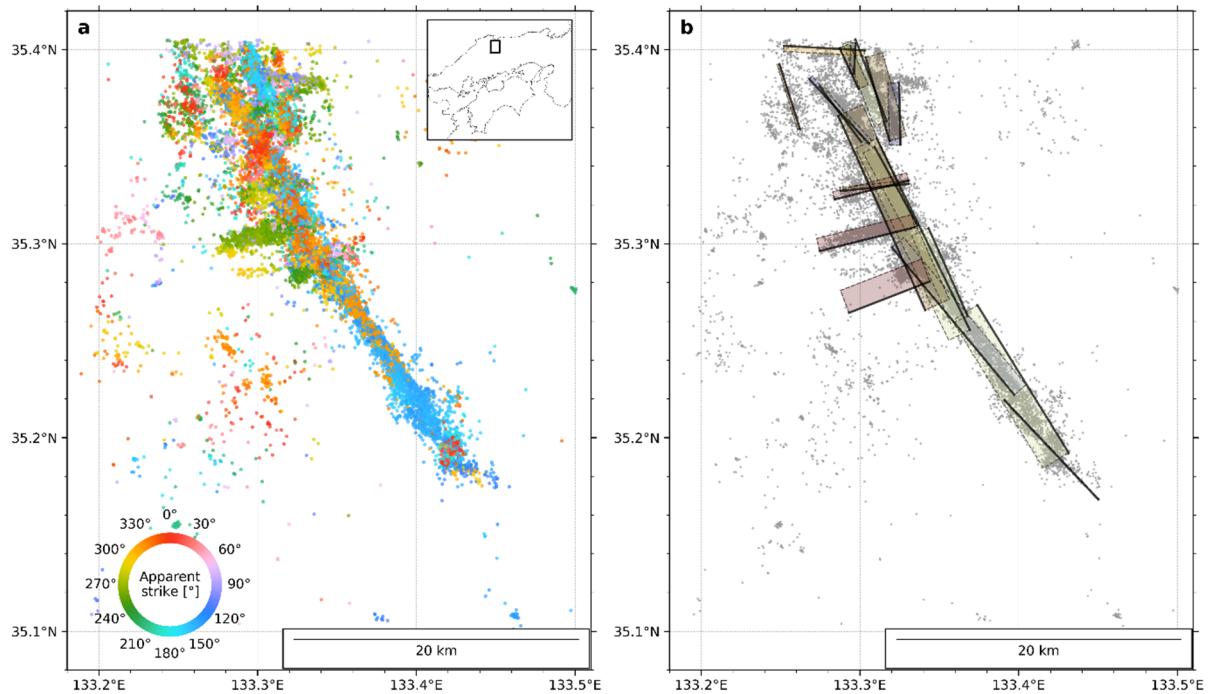
国立研究開発法人 産業技術総合研究所

本報告書は、文部科学省の令和5年度科学技術試験研究委託事業による委託業務として、国立研究開発法人産業技術総合研究所が実施した令和5年度「情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト（STAR-E プロジェクト）「信号処理と機械学習を活用した地震波形ビッグデータ解析による地下断層の探索」」の成果を取りまとめたものです。

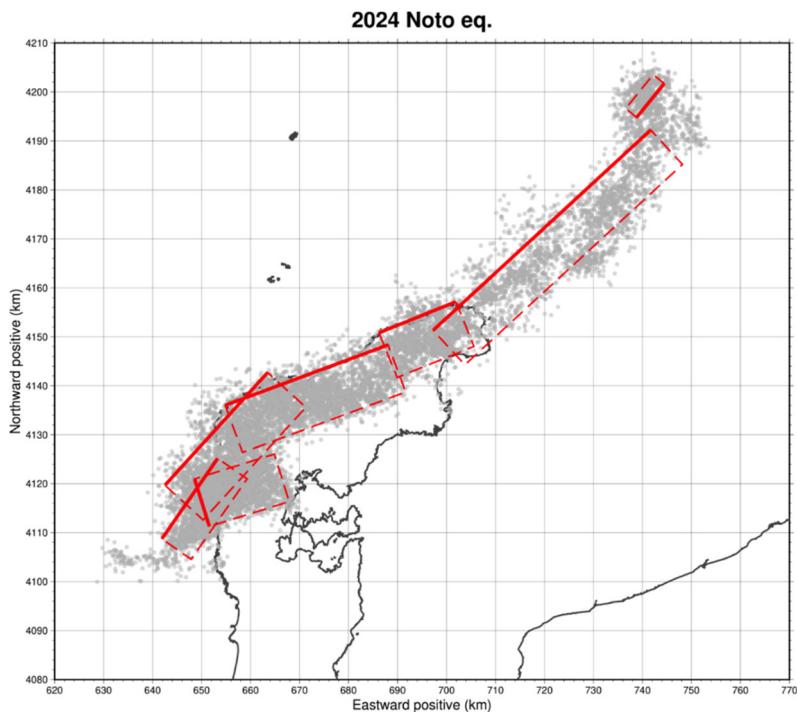
グラビア



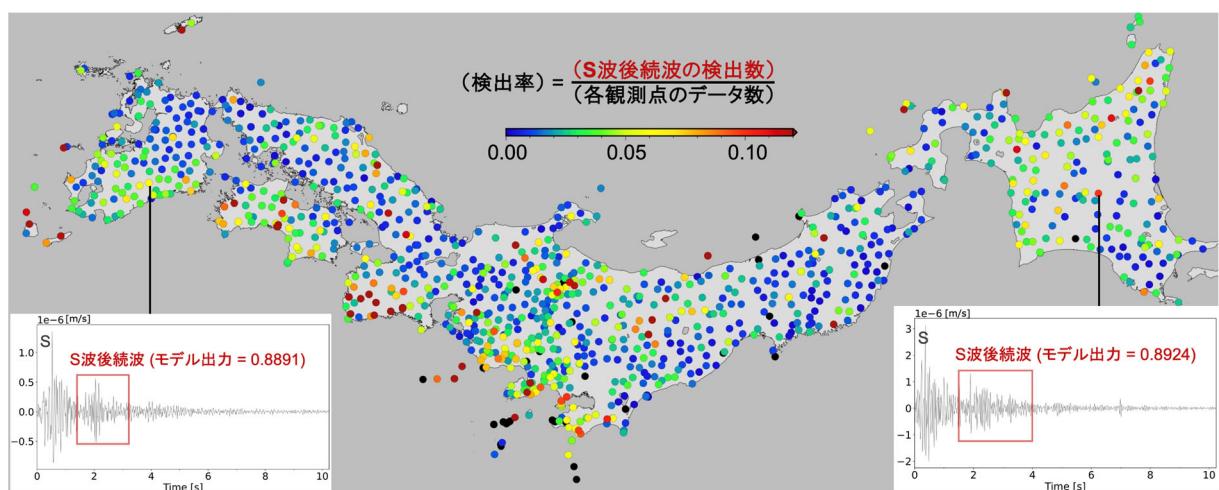
観測期間を通じた不具合度合いの周波数ごとの可視化結果（観測点：SRK）。季節変動をともなって広い周波数帯域に不具合の検知がされている。



2000年鳥取県西部地震における震源分布から、2段階クラスタリング法によって面検出を行った結果。（a）計算した点群法線ベクトルを仮想面とした時の、各イベントの見かけの面走向。（b）2段階クラスタリングによって検出された矩形断層面。矩形は、走向に平行な方向と傾斜方向によって成す平面上で、震源クラスターを内包する面に対応する。太線は面上端、波線は面領域をそれぞれ示す。なお、微小地震メカニズム解(Uchide et al., 2022)による面選別を行った結果である。



2024年能登半島地震の余震データを解析して得られた断層モデル。解析に用いた余震の震央を灰色の点で示す。赤線で示された矩形が推定された断層で、断層の走向に沿った辺のうち浅い方を太い実線で示す。海域にある断層は震源の決定精度がよくないために精度が低いと考えられるが、陸域では、能登半島の北から西にかけての海岸線に沿う形で逆J字型で断層が分布していると推定された。



日本列島内陸域におけるS波後続波の観測状況。色付きの丸は解析に使用した地震観測点を示し、色はS波後続波の検出率を表す。波形は北海道大雪山周辺および宮崎県東部において検出されたS波後続波の例（東西動成分速度波形、4-32 Hz）。

はじめに

我が国は、2011年東北地方太平洋沖地震などの海溝型地震に加えて、1995年兵庫県南部地震、2008年岩手・宮城内陸地震、2016年熊本地震などといった内陸地震にも見舞われており、いずれに対しても防災対策をより良いものとしていくことが求められている。『地震調査研究の推進について（第3期）』においては、「当面10年間に取り組むべき地震調査研究」の一つとして、「内陸で発生する地震の長期予測手法の高度化」が掲げられている。その課題の一つとして、「三次元震源断層モデルの構築や既知の活断層以外の震源断層の評価に向けた調査研究を推進する」ということが挙げられている。地下における断層の形状を調査することが、内陸においてどのような地震が発生するかという評価のために重要である。

そこで、地下における断層の形状を、微小地震の分布や地震波の後続波を使って明らかにすることを目指して、令和3年度より本研究課題を開始した。地震学と情報科学の研究者が協力して、地震波形の異常検知、ノイズ除去、検測、微小地震分布のパターン認識を自動的かつ客観的に行う手法を開発するものである。検測にはP波・S波のみならず、後続波も対象にする。微小地震の分布から断層の形状を推定することは、断面図や動画などによって可視化して、主観的に行わってきた。3次元分布を2次元の画面や紙面で行うことの限界であろうか、震源分布が複雑になると、人による認識が難しくなる。また、地震波形からより多くの微小地震を取り出すことができれば、震源分布もより充実したものになり、地下の断層がより明瞭になると考えられる。本研究課題では、これらの問題に取り組むと共に、地震波形のデータセットの作成や開発した計算機プログラムの公開を通して、広く地震研究調査に役立つように努めていく。

本研究課題は便宜上、4つのサブテーマを設定しているが、研究参加者全員が協力して全てのサブテーマの研究を進めている。各サブテーマは以下の通りである。

- サブテーマ1：インテリジェントな地震波形処理
- サブテーマ2：震源分布・震源メカニズム解の推定と、それを用いた断層面形状の決定
- サブテーマ3：後続波を用いた断層面形状の決定
- サブテーマ4：情報科学を活用した地震調査研究基盤の構築

これらのサブテーマの研究を進め、地下断層の形状を明らかにすることで、内陸地震の評価の高度化に貢献していきたいと考えている。

目 次

グラビア	i
はじめに	iii
目 次	iv
1. 研究課題の概要	1
2. 研究成果の説明	2
2. 1. 業務題目：(サブテーマ1) インテリジェントな地震波形処理	2
(1) 業務の内容	2
(a) 業務の目的	2
(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等	2
(c) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	3
(d) 令和5年度の業務の目的	3
(2) 令和5年度の成果	3
(a) 業務の要約	3
(b) 業務の成果	3
(c) 結論ならびに今後の課題	5
(d) 成果の論文発表・口頭発表等	5
(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	5
2. 2. 業務題目：(サブテーマ2) 震源分布・震源メカニズム解の推定と、それを用いた断層面形状の決定	6
(1) 業務の内容	6
(a) 業務の目的	6
(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等	6
(c) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	6
(d) 令和5年度の業務の目的	7
(2) 令和5年度の成果	8
(a) 業務の要約	8
(b) 業務の成果	8
(c) 結論ならびに今後の課題	10
(d) 成果の論文発表・口頭発表等	10
(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	11
2. 3. 業務題目：(サブテーマ3) 後続波を用いた断層面形状の決定	12
(1) 業務の内容	12
(a) 業務の目的	12
(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等	12
(c) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	12
(d) 令和5年度の業務の目的	13
(2) 令和5年度の成果	14
(a) 業務の要約	14

(b) 業務の成果	14
(c) 結論ならびに今後の課題	16
(d) 成果の論文発表・口頭発表等	16
(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	18
2. 4. 業務題目：(サブテーマ4) 情報科学を活用した地震調査研究基盤の構築 ..	19
(1) 業務の内容	19
(a) 業務の目的	19
(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等	19
(c) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	19
(d) 令和5年度の業務の目的	20
(2) 令和5年度の成果	21
(a) 業務の要約	21
(b) 業務の成果	21
(c) 結論ならびに今後の課題	22
(d) 成果の論文発表・口頭発表等	22
(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	23
3. まとめ	24
4. 活動報告	25
5. むすび	26

1. 研究課題の概要

強震動予測のための震源モデルの設定やテクトニクスの理解のためには、地下のどこにどのような断層が位置しているのかを知ることが重要である。震源断層モデルの設定は、地表の活断層とその浅部における傾斜を手掛かりにすることが多い。しかし、深部における断層形状の設定には、近年大地震が発生して大量の余震が発生した場合でなければ、手掛けかりが十分でないことが多い。

本研究課題では、地震波形データに基づいて地下断層を検出し、その形状を客観的に推定する研究を行う。地震波形データから地震学的研究に資する情報をより豊富に、より効率的に、より迅速に得るために、データの品質管理（異常検知）、ノイズ除去、自動検測を行う。自動検測では、直達P波・S波に加えて、後続波（反射や散乱によってほかの経路をたどって遅く到達する地震波）も読み取る。さらに、自動検測結果に基づいて、震源決定や震源メカニズム解を推定し、それに基づいて、地下断層の形状を客観的に推定する手法を開発する。後続波の成因となる反射面・散乱体の位置と形状を推定することで、地下断層、構造境界、地下流体などの存在について検討する。さらに、研究基盤を整備することを目的として、検測値のついた地震波形データセットを構築し、公開する。本研究課題で開発したプログラムは、地震研究者にも使いやすいように配慮し、普及しやすいものを作って公開する。

2. 研究成果の説明

2. 1. 業務題目：(サブテーマ1) インテリジェントな地震波形処理

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

地震波形から震源決定（サブテーマ2）や反射面・散乱体の推定（サブテーマ3）に必要な情報を得るために、(1)地震計の異常検知（品質管理、機器不良等の確認）、(2)観測波形のノイズ除去（地震による地震動以外の成分の除去）、(3)自動検測（読み取り）に取り組む。検測については、直達P波・S波に加えて後続波（直達波とは異なる経路を伝播する波）を読み取る。本研究ではこれら3つをまとめて、「想定される地震波形と実際の観測波形の違いを検出する問題」として取り扱う。地震計記録を観測点ごとに個別に扱うのではなく、多数観測点からなる地震計ネットワーク記録として活用し、地震学の知見と地震波形の時間・観測チャネル間・観測点間の相関関係についての機械学習に基づいて地震波形処理手法を設計する。このほか、(3)自動検測については、リカレントニューラルネットワーク(RNN)等の時系列処理モデルを構築して、地震波形と手動検測値から学習する方法も検討する。本研究で開発した手法は国内外の研究グループによって開発された手法と性能を比較する。

(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等

所属機関・部局・職名	氏名	研究実施期間	配分を受けた研究費	間接経費
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 研究グループ付	内出 崇彦	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31	17, 817, 567 円	5, 345, 270 円
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 人工知能研究センター 研究チーム長	緒方 淳	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31	4, 224, 276 円	1, 267, 283 円
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 人工知能研究センター 主任研究員	深山 覚	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31		
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 人工知能研究センター 主任研究員	中村 友彦	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31		
長岡技術科学大学 工学研究科 助教	黒田 大貴	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31	0 円	0 円

注) 配分を受けた研究費は、間接経費を含まない額。

(c) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 令和3年度：

スペクトル形状を表す特徴量の確率モデルを学習して地震波形データの異常検知をする方法を構築した。最新の機械学習手法の一つであるトランスマフォーマを用いた自動検測を行い、現状の課題を確認した。

2) 令和4年度：

震源情報や観測点情報を取り込んだ変分オートエンコーダにより、地震計の各成分の異常検知を行うモデルを構築した。

3) 令和5年度：

地震計記録3成分の不具合を独立に推定できる変分オートエンコーダによる検知手法について、査読付き雑誌に投稿した論文を査読結果に沿って改訂したほか、他機関が公開している地震波形データを用いた性能検証のためにデータ収集を行った。

4) 令和6年度：

地震波形データのノイズ除去手法の開発に取り組む。

5) 令和7年度：

地震波形データ処理手法を改良し、より多くより確かな自動検測ができるようにする。

(d) 令和5年度の業務の目的

変分オートエンコーダによる地震計の不具合検知手法の開発を令和4年度に引き続き進める。この手法を実装し、断層面の形状決定に用いる地震波形の事前選別作業の自動化に活用するとともに、地震学研究の現場における本手法の有用性検証を行う。

(2) 令和5年度の成果

(a) 業務の要約

地震計記録3成分の不具合を独立に推定できる変分オートエンコーダによる検知手法について、査読付き雑誌に投稿した論文を査読結果に沿って改訂したほか、他機関が公開している地震波形データを用いた性能検証のためにデータ収集を行った。

(b) 業務の成果

1) 変分オートエンコーダを用いた地震波形データ異常検出法の開発

変分オートエンコーダに基づく地震計の上下・東西・南北軸それぞれの不具合を推定する手法を、茨城県北部を震源とする約5年間のイベントにより性能評価した。ここで、地震計の不具合としては、地震計が傾いたり、地震計に水が入ったりするなどの原因で、地震計の応答が変わってしまうことを想定している。不具合検知を行った観測点および用いたイベントの震源位置を図1に示す。また本手法で検出する不具合の例として、同一のイベントの異なる観測点での波形を図2に示す。不具合のある観測点NDGの地震計(EW軸)では、不具合のない観測点ORHの地震計と比較して振幅の減衰の様子が異なっている。この時期には地震計が設置後に傾きが生じたことが確認されており、これが原因とみられる。

開発した変分オートエンコーダによる検知手法に関して、査読付き雑誌に投稿した論文を査読結果に沿って改訂したほか、性能評価を詳細に行い、広い周波数帯域を考慮した不具合検知の有効性を確認することができた。

査読では、変分オートエンコーダのような複雑な手法は必要なく Gaussian Mixture Model のようなシンプルな手法でできるのではないか、提案法は計算量が多いのではないか、人工的に生成された地震波形と比較する不具合検知手法に言及していないのはなぜか、再現実験が可能なように公開されている地震波形データで実験をすべきではないか、といったコメントが寄せられた。

これに対して、Gaussian Mixture Model のような手法では特徴量の設計や選択が性能を左右する一方、提案手法では特徴量設計・選択が必要なく高次元な入力データを扱えること、提案法は学習時には計算量が多いが不具合検知時には計算量は多くないことを示した。人工的に生成された地震波形と比較する不具合検知手法の引用追加、不具合検知実験を行うための公開データの調査と収集を行った。

異常検知の評価指標である AUC-ROC (0 以上 1 以下であり 1 に近いほど性能が良い) において平均 0.896 の性能で、地震計の不具合に起因すると考えられる地震データの異常を検出できることがわかった。AUC-ROC の値が 1 に近づくほど、False-positive の割合が少なく、かつ、True-positive の割合が高く、性能よく不具合を検知していることを意味する。新手法は広い周波数帯域を考慮して不具合を検知する手法であり、特定の周波数におけるスペクトルの値を用いる既存手法の性能 AUC-ROC 平均 0.851 を上回る性能であることがわかった。

観測期間を通じた不具合度合の周波数ごとの可視化結果を図 3 に示す。不具合があった期間（2020 年-2021 年頃）において高周波領域に正常時との違いが顕著に検知された一方で、推定期間を通じて季節変動と思われる正常時との違いが不具合として検知される課題も確認された。

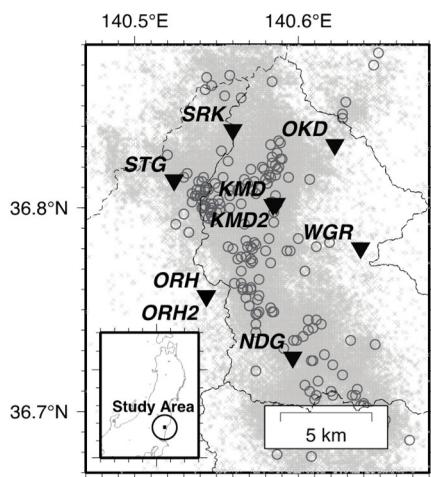


図 1 観測点および用いたイベントの震源位置

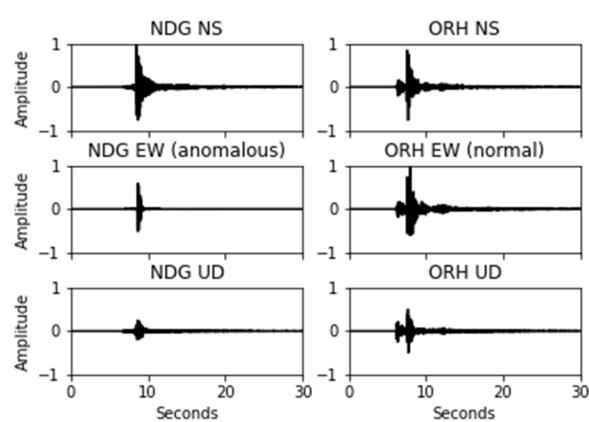


図 2 不具合あり（左）なし（右）観測データの例

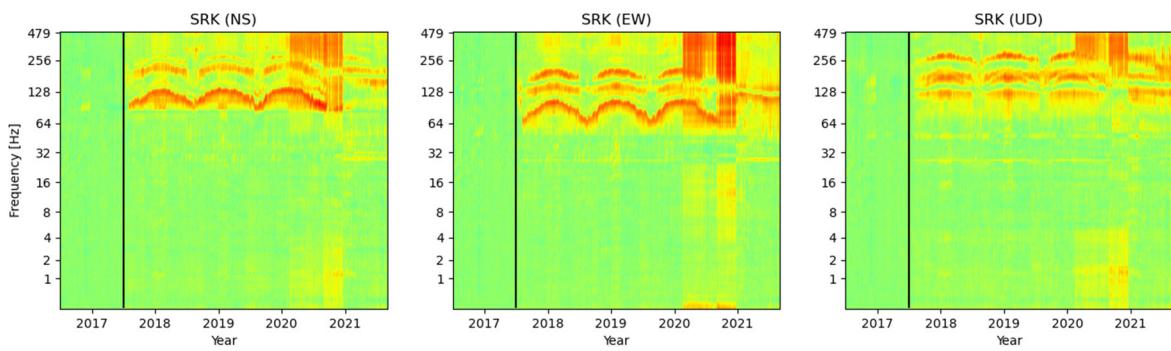


図3 観測期間を通じた不具合度合いの周波数ごとの可視化結果（観測点：SRK）
黒縦線が示す時点までのイベントを正常な区間として用いて不具合検出手法を構築した

(c) 結論ならびに今後の課題

R4年度まで検討していた既存手法との性能比較に加えて、同一次元数のデータのもとで性能を比較することで、提案法の有用性の主張が強められることがわかった。今後改訂した論文を投稿するほか、不具合検知手法の季節変動要素に対する頑健性を高める方法や、常時微動成分の抑圧・検測などの地震波形処理手法を、地震波形処理の自己教師あり学習モデルを応用するなどして開発する。

(d) 成果の論文発表・口頭発表等

- 1) 学会等における口頭・ポスター発表
なし

- 2) 学会誌・雑誌等における論文掲載
なし

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

- 1) 特許出願
なし

- 2) ソフトウェア開発
なし

- 3) 仕様・標準等の策定
なし

2. 2. 業務題目：(サブテーマ2) 震源分布・震源メカニズム解の推定と、それを用いた断層面形状の決定

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

サブテーマ1による地震波形の検測結果に基づいて、震源位置と震源メカニズム解を決定する。P波初動極性はUchide (2020)により自動的に読み取る。そして、多数の震源の位置と震源メカニズム解の分布により断層面形状を客観的に推定する手法を開発する。基本的には点群から面状構造を得るパターン認識の問題であるが、震源メカニズム解により局所的な面が示唆されているという特徴がある。まずは、古典的手法であるHough変換により面状構造を抜き出す。得られた地下の断層構造は地表断層と比べるほか、面構造自体の特徴から破壊様式や応力場が推定できるかどうか検討する。

(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等

所属機関・部局・職名	氏名	研究実施期間	配分を受けた研究費	間接経費
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 研究グループ付	内出 崇彦	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31	個別課題2. 1の額に含まれる	個別課題 2. 1の額 に含まれる
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 主任研究員	堀川 晴央	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31		
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 産総研特別研究員	佐脇 泰典	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31		
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 人工知能研究センター 研究チーム長	緒方 淳	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31	個別課題2. 1の額に含まれる	個別課題 2. 1の額 に含まれる
東京都市大学 デザイン・データ科学 部 講師	佐藤 圭浩	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31	0円	0円

注) 配分を受けた研究費は、間接経費を含まない額。

(c) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 令和 3 年度 :

点群データを解析する手法を参照しながら、震源分布より断層面を推定する手法の開発を進め、実データに適用した。その結果、断層面どうしが近接していると考えられる状況でも断層面を推定できる可能性を示した。

2) 令和 4 年度 :

震源分布・震源メカニズム解に対して段階的クラスタリングを行うことで局所的な断層構造を推定する手法と、有限混合モデルにより大局的な断層形状を推定する手法を開発した。

3) 令和 5 年度 :

令和 4 年度に引き続き震源分布と発震機構解に基づく地下断層面推定手法を開発し、さらに、実際の地震に適用して断層面形状を明らかにするとともに、手法開発の課題を洗い出した。

4) 令和 6 年度 :

地震個数が少ない場合にも適用できるような断層面推定手法の開発に取り組む。

5) 令和 7 年度 :

日本全国における地下の断層を検出し、地下断層地図を作成する。

(d) 令和 5 年度の業務の目的

震源分布が密である場合に断層面を推定する手法として、混合分布モデルを用いるものと 2 段階クラスタリングによるものの開発をそれぞれ進める。これらの手法を実際の地震活動に適用する。さらに、震源分布が概ね密で、一部分疎であるような場合にも客観的な断層構造を検出可能な手法を開発する。断層の局所構造から大局構造までを把握する手法を検討する。

(2) 令和5年度の成果

(a) 業務の要約

令和4年度に引き続き震源分布と発震機構解に基づく地下断層面推定手法を開発し、さらに、実際の地震に適用して断層面形状を明らかにするとともに、手法開発の課題を洗い出した。震源分布と点群法線ベクトルを用いた2段階クラスタリングによる手法では、計算コスト削減のためオンラインクラスタリングを導入した。有限混合モデルによる手法では、発震機構解のバラツキに関する統計分布をベースに評価関数を改良した。南カリフォルニア広域、2000年鳥取県西部地震余震域、1992年Landers地震余震域を対象に、開発した手法により、主断層のほか副次的な断層の形状も明らかにした。2024年能登半島地震の余震を解析し、能登半島の北岸から西岸にかけて断層が連なる分布を得た。

(b) 業務の成果

1) 2段階クラスタリングによる断層面推定法の開発

令和4年度に開発した、震源点群法線と震源位置の2段階震源クラスタリング法について、手法の改良と実データへの適用を進めた。

実データへの適用に伴い、大規模な震源カタログでは、令和4年度に開発したクラスタリング手法では、凝集型クラスタリングを適用していたため、大規模な震源カタログを対象とした場合、計算コスト（必要メモリ量、処理時間）が増大する問題があった。そこで本年度では、オンラインクラスタリングアルゴリズムであるBirch (Zhang et al., 1997) を導入することで、法線ベクトルを用いたクラスタ分割処理における効率化を行った。オンラインクラスタリングを導入した手法の検証として、断層面付近の震源分布が既知である断層面モデルとガウス分布に基づき抜粋して作成した震源カタログから各断層面を検出し、大規模なデータセットによる手法の検証を行った。結果、オンラインクラスタリングによる影響はなく、面推定を行えることが確認できた。しかし、広範囲の断層面推定を行う場合、周囲震源と深さ方向に対してスケールに大きく差が生まれるため、法線ベクトル算出パラメータにより正しく法線ベクトルを算出できない問題が生じた。

距離計算法に関する手法改良を実施した。従来手法では、法線ベクトルクラスタリングにおける距離計算で通常のコサイン距離を用いていたが、水平に近い法線の場合、逆方向を向いた法線を異なるクラスタに分類してしまう問題があった。そこで、法線ベクトルの内積に絶対値を取った「改良コサイン距離」を用いることで、逆方向の水平に近い法線を適切にクラスタリングできるようになった。また、検出面の検証における震源メカニズム解 (Uchide et al., 2022)との整合性基準を再検討した。

改良手法を、国内外で発生した内陸大地震の余震分布に適用した。まず2000年鳥取県西部地震については、気象庁一元化震源を hypoDD法 (Waldhauser and Ellsworth, 2000) で再決定し、入力データとした。計算した法線ベクトルを仮想面とした時の見かけの面走向は、全体的な傾向として北北西-南南東を向いていた(図4a)。また、領域中北部に東西走向の細かい構造が見られた。2段階クラスタリングおよび微小地震メカニズム解(Uchide et al., 2022)による面選別の結果、上記の法線ベクトル分布をよく反映した面構造が得られた(図4b)。特に、従来のDBSCANを用いた震源クラスタリングでは検出が困難な東西

走向の共役面を検出できた。領域南部では、Shibutani et al. (2005)で見られたような、やや南西落ちの面を検出した。また、領域北部に見られる複雑な震源分布からは、交差する複数枚の面を検出しており、これらは目視レベルで推定された断層面(Fukuyama et al., 2003)と比べて凡そ調和的な面構造である。

その他、2024年能登半島地震の余震分布や、2019年リッジクレスト地震、2020年マアカマ群発地震（カリフォルニア州）などにも本手法を適用した。これらの結果により、本手法を用いることで主要断層や共役断層系といったマルチスケールな断層形状を客観的に推定できることを確認した。

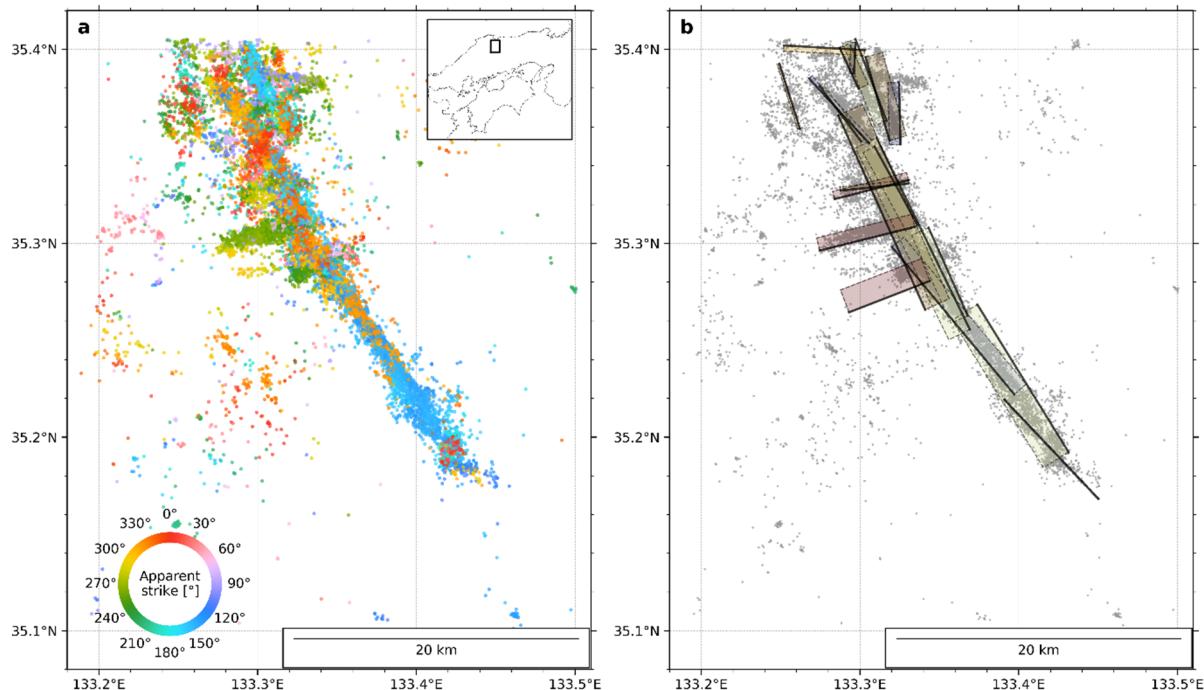


図4 2000年鳥取県西部地震における震源分布から面検出を行った結果。(a) 計算した点群法線ベクトルを仮想面とした時の、各イベントの見かけの面走向。(b) 2段階クラスタリングによって検出された矩形断層面。矩形は、走向に平行な方向と傾斜方向によって成る平面上で、震源クラスタを内包する面に対応する。太線は面上端、波線は面領域をそれぞれ示す。なお、微小地震メカニズム解 (Uchide et al., 2022) による面選別を行った結果である。

2) 有限混合モデルによる断層面推定法の開発解析手法の開発

今年度は、推定時に用いる評価関数のうち、発震機構解に関する部分を改良した。具体的には、2つの発震機構解のズレを統計的に記述するために Kagan (1992) が提唱した double couple rotational Cauchy 分布から出発し、想定した断層面の法線ベクトルと、発震機構解中の節面の法線ベクトルとのズレを記述する統計分布を数値的に導出した上で評価関数に組み込んだ。

解析手法の特性を調べるために、1992年 Landers 地震の余震データ (Shearer et al.,

2005; Cheng et al., 2023) を解析し、南カリフォルニア地震センターの Community Fault Model (CFM) (Plesch et al., 2006) version 6.1 と比較した。比較の結果、本研究では断層面を平面と仮定している関係で、地質構造を考慮した CFM のような曲がった断層面は認識できず、CFM では別の断層とされる断層であっても、余震分布が平面的に広がっている場合には、余震分布に沿って 1 つの断層として抽出する傾向があることがわかった。また、CFM で地震活動から認定された断層面が、本手法では抽出できていないことがわかった。原因としては、地震分布の密度差で、本手法では、地震の密度が大きいところを細かく断層を置くことで尤度を高くする傾向があるため、比較的密度が小さい箇所が無視された可能性が考えられる。なお、この傾向は、本解析のための初期モデルを作成する際に用いる混合ガウスモデルの結果で既に認められるので、密度差の影響を軽減する方策を施した上で初期モデルを作成すれば解消できる可能性がある。

2024 年能登半島地震の地震への対応として余震データから断層面を推定した。震源データは 3 次元速度構造を用いて再決定したもの（椎名ほか, 2024 : 地球惑星科学連合 2024 年大会にて発表予定）で、発震機構解は F-net のモーメントテンソル解（福山ほか, 1998）の best double couple である。断層面の数は複数のケースを比較検討し 7 枚とした。震源の決定精度がよく、したがって、得られた断層面の形状も信頼性が高いと考えられる能登半島下に分布するとされる断層面に着目すると、能登半島の北岸から西岸にかけて逆 J 字状に断層面が連なっており、海岸線が南北方向に変わる辺りで断層の走向も南北に近い方向に変わって分布し（グラビア参照）、傾斜角はいずれも 30 度前後である。

(c) 結論ならびに今後の課題

これまで開発してきた 2 つの手法により、国内外の内陸地震の余震に対して、断層面を推定することができた。これにより、2 つの手法の特徴も明らかになってきた。2 段階クラスタリングによる手法は小さい断層から大きい断層までマルチスケールな構造をとらえやすいのに対し、有限混合モデルによる手法では大きいスケールの断層面を取り出しやすい。今後は、それぞれの手法の課題を解決するだけでなく、特徴を踏まえた応用先を設定して、それに適した手法へと発展させていく必要がある。

(d) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表：計 4 件、うち海外計 1 件

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
震源分布を用いた 2 段階クラスタリングによる断層面推定法の検証（ポスター）	佐藤圭浩、堀川晴央、内出崇彦、深山 覚、	日本地球惑星科学連合 2023 年大会	2023 年 5 月 22 日	国内	○

	緒方 淳				
震源位置および発震 機構解データから断 層群を推定するため の有限混合モデル（ボ スター）	堀川晴央、 内出崇彦、 深山 覚、 佐藤圭浩、 黒田大貴、 椎名高裕、 雨澤勇太、 緒方 淳	日本地球惑星科学 連合2023年大会	2023年5 月22日	国内	○
地殻内断層面の客観 的検出に向けて：震源 分布二段階クラスタ リング法の適用（ボス ター）	佐脇泰典、 佐藤圭浩、 内出崇彦、 堀川晴央、 椎名高裕、 雨澤勇太	日本地震学会2023 年秋季大会	2023年11 月1日	国内	○
Hypocenter-based Visualization of Multiscale Earthquake Faults: Application to Crustal Earthquakes in Japan Islands (ボ スター)	佐脇泰典、 佐藤圭浩、 内出崇彦、 堀川晴央、 椎名高裕、 雨澤勇太	米国地球物理学連 合2023年秋季大会	2023年12 月13日	国外	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

2. 3. 業務題目：(サブテーマ3) 後続波を用いた断層面形状の決定

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

サブテーマ1で検測された後続波を用いて地震波反射面や散乱体を決定し、その空間分布の特徴を調査する。後続波の成因は様々であるため、観測点間あるいは地震間での比較と地震学的な知見に基づいて、同じ原因で生成された後続波群を抽出する必要がある。この支援のため、多様な後続波の検出の有無やその時空間変化の特徴を抽出する機械学習に基づく識別支援システムを開発する。後続波を効率的に識別することで、日本列島スケールで後続波の生成状況を概観する。さらに、後続波を生み出す原因となる地質構造境界や、マグマなどの地下流体の位置や形状を推定する。

(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等

所属機関・部局・職名	氏名	研究実施期間	配分を受けた研究費	間接経費
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 研究グループ付	内出 崇彦	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31	個別課題2. 1の額に含まれる	個別課題 2. 1の額 に含まれる
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 主任研究員	椎名 高裕	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31		
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 産総研特別研究員	雨澤 勇太	R5. 4. 1 ～ R5. 8. 31		
東京工業大学 理学院 助教	雨澤 勇太	R5. 9. 1 ～ R6. 3. 31	0円	0円

注) 配分を受けた研究費は、間接経費を含まない額。

(c) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 令和3年度：

文献調査を中心に、日本各地で観測される後続波の事例を収集・整理した。また、教師なし学習技術による、後続波を含む地震波形の特徴分類可能性を検討した。茨城・福島県境付近の観測点で反射波の探索を開始し、地殻内反射面の検出に向けた試みに着手した。

2) 令和4年度：

S波後続波を自動検出する畳み込みニューラルネットワークを構築し、実際のデータで学習させた。S波後続波から地下反射面の形状を同定する手法を開発した。

3) 令和 5 年度 :

令和 4 年度に開発した S 波後続波を検出するニューラルネットワークモデルを、学習データを取得した地域と異なる地域のデータに適用し、モデルの挙動を詳しく調べ、汎用化にあたっての課題を検討した。日本列島内陸域における S 波後続波の観測状況を概観した。

4) 令和 6 年度 :

自動検測で検出された後続波の地域ごとの傾向をまとめ、顕著な後続波が出る地域を特定する。

5) 令和 7 年度 :

日本全国において後続波を生成する反射体・散乱体のマッピングを行う。サブテーマ 2 の結果と比較し、地下の断層が共通して検出できているケースを探し、両手法を組み合わせた断層検出手法を検討する。

(d) 令和 5 年度の業務の目的

令和 4 年度に引き続き、茨城県北部において、より小さな規模の地震（マグニチュード 3.5 以下）の反射波の検出を行い、反射面の実態解明を進める。令和 4 年度に開発した、顕著な後続波を検出するニューラルネットワークモデルを、学習に用いた地震観測点のデータ以外にも使用して、後続波の検出を試みる。汎化性能を高めるようにモデルを改善する。モデルの学習手法を改良する。

(2) 令和5年度の成果

(a) 業務の要約

令和4年度に開発したS波後続波を検出するニューラルネットワークモデルを、学習データを取得した地域と異なる地域のデータに適用し、モデルの挙動を詳しく調べ、汎用化にあたっての課題を検討した。また、約20年分の観測波形記録からのS波後続波の網羅的検出を試み、日本列島内陸域におけるS波後続波の観測状況を概観した。これまでにS波後続波の報告例がある地域（日光白根山・紀伊半島等）においては、本モデルによる自動処理でもS波後続波が検出され、検出率が高い。過去にS波後続波の報告がなかった北海道大雪山周辺や宮崎県東部などでもS波後続波を新たに検出した。

また、茨城県北部で観測されたS波反射波を用いた地殻内反射面の実態や関連する不均質構造と地震活動の関係を検討した。

(b) 業務の成果

1) 後続波自動検知手法の開発

令和4年度に開発した、S波後続波を検出するニューラルネットワークモデル（以下、本モデル）の挙動を詳しく調べるために、学習に用いた地域と異なる地域の観測点における観測波形記録からのS波後続波の検出テストを複数地域について行い、ある程度S波後続波を検出可能であることを確認した。一方、学習に用いた観測点におけるS波後続波に対して、直達Sコーダ波の振幅が大きい場合とS波後続波の到来タイミングが著しく異なる場合にモデル出力が0.3以下と低めになることも確認した。これは、本モデルが1観測点のみで作成した教師データで学習したためであると考えられる。以上の検討から、モデルを汎用化させるためには、Sコーダ振幅や到達時刻が様々な場合のS波後続波を学習させる必要性が明らかになった。

日本列島スケールでS波後続波の観測状況を概観するために、日本列島内陸域の上部地殻内で2000年10月から2023年5月に発生した約45万個の地震（マグニチュード1以上4以下）の観測波形記録に対し、本モデルを運用してS波後続波の網羅的検出を行った。S波後続波の検出閾値は、モデル学習時のテスト結果を参考に0.65以上とした。図5に各地震観測点におけるS波後続波の検出率（任意の観測点におけるS波後続波の検出数をその観測点における全解析データ数で割った値）を示す。これまでにS波後続波の報告例がある地域（日光白根山・紀伊半島等）においては、本モデルによる自動処理でもS波後続波が検出され、検出率が高い。加えて、過去にS波後続波の報告がなかった北海道大雪山周辺や宮崎県東部などでもS波後続波を新たに検出した。

また、福岡県西部の警固断層周辺において本モデルがS波後続波を検出した（閾値0.65）102記録を目視で確認した。目視による検出結果を基準とすると、True Positiveが24記録、False Negativeが78記録、False Positiveが26記録であった。False Negativeの割合が高い。これは、福岡県西部地域が自動検出モデルの学習を行った地域とはS波後続波の特徴が異なるためであると考えられる。

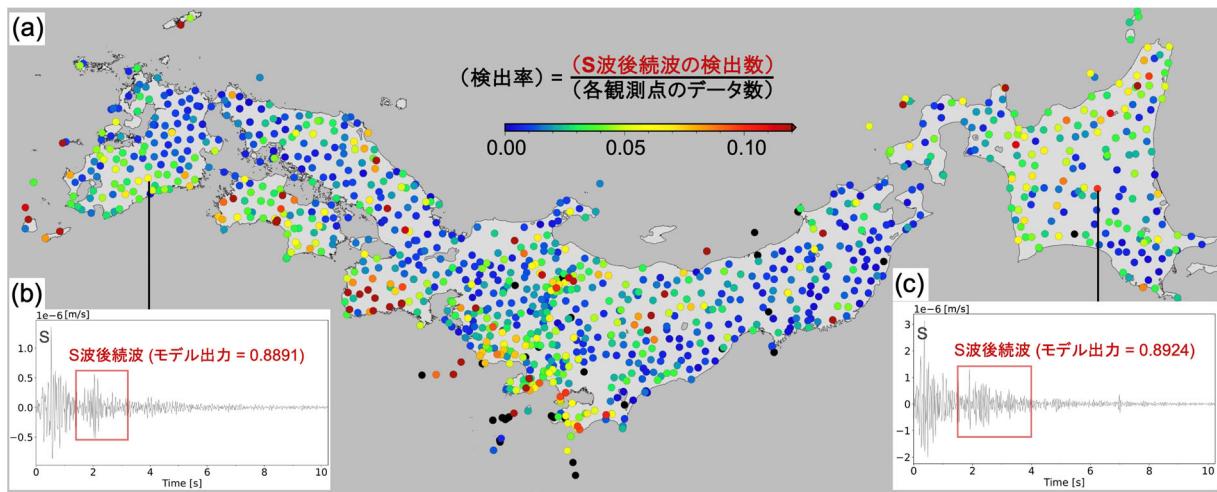


図 5 日本列島内陸域における S 波後続波の観測状況。(a) 色付きの丸は解析に使用した地震観測点を示し、色は S 波後続波の検出率を表す。(b) 宮崎県東部で検出された S 波後続波の例。東西動成分速度波形に 4-32 Hz の帯域通過フィルタを施してある。(c) 北海道大雪山周辺で検出された S 波後続波の例。東西動成分速度波形に 4-32 Hz の帯域通過フィルタを施してある。

2) 茨城県北部における反射面の探索とその実態の検討

令和 4 年度に開発した、マルコフ連鎖モンテカルロ法に基づく地殻内反射面の推定手法を用いて、茨城県北部に存在が予想される地殻内反射面の位置とその形状を精査した。具体的には、令和 4 年度で実施した解析と比べて、理論走時を計算する際に空間の離散間隔を半分程度とした。ただし、得られた地殻内反射面の特徴は令和 4 年度で報告したものとほぼ同じである。

茨城県北部から福島県浜通りにおいて発生したマグニチュード 2.5 以上的小地震に対して S 波反射波の観測状況を概観した。先に S 波反射波を同定した地震と震源が近い小地震について、S 波反射波の観測を確認するとともに、本研究で推定した地殻内反射面によりその到達時刻が概ね説明できることを確認した。

令和 4 年度の検討と同じく、推定された地殻内反射面は下部地殻付近に存在する地殻流体に富む領域の上端に対応すると解釈される。これは地殻内反射面が、茨城県北部の下部地殻から最上部マントル付近に検出された低地震波速度・高 V_p/V_s 域 (e.g., Tong et al., 2012; Matsubara et al., 2019) 及び低電気比抵抗領域 (Umeda et al., 2015) のほぼ直上に位置していることを根拠とする。加えて、令和 5 年度は地殻内反射面と地震活動の位置関係を詳しく検討した。その結果、地殻内地震活動域の下限が反射面の分布とよく一致し、北側（福島県浜通り側）で深くなる傾向が認められた（図 6 (a-b)）。これの関係は下部地殻付近に存在する地殻流体が熱水流体であると仮定することで説明できるかもしれない。つまり、茨城県北部ではより浅部まで分布する熱水流体の存在により脆性・塑性境界の深さが局所的に変化し、地震発生層の下限が浅くなっていると考えられる（図 6 (c)）。

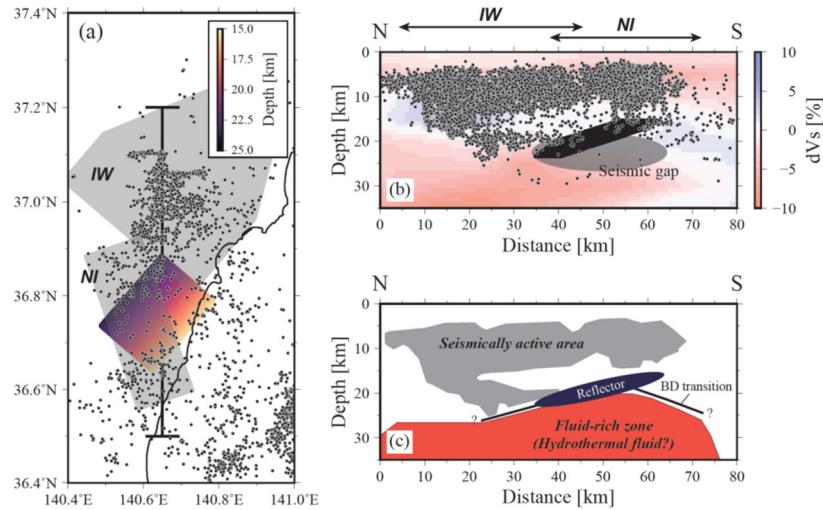


図 6 地殻内反射面と地震活動の分布。(a) 水平面断面図。色付きの矩形が地殻内反射面を表す。黒丸は深さ 15~25 km で発生した地震（マグニチュード 0 以上）を示す。(b) 鉛直断面図。側線は(a)内の黒線。側線から 5 km 以内の地殻内反射面と地震を黒帯と黒丸で示す。NI は北茨城地域、IW はいわき地域を表し、地震分布を基に区分した(a)の網掛けで示す領域に対応する。背景は S 波速度偏差構造 (Matsubara et al., 2019) である。(c) 地殻内反射面と地震活動、および地殻流体の分布に対する解釈図。

(c) 結論ならびに今後の課題

令和 4 年度に開発した、S 波後続波を検出するニューラルネットワークモデルを、学習に用いた地震観測点と異なる観測点のデータに使用して、未知データに対するモデルの挙動を把握した。日本列島内陸域における約 20 年分の観測波形記録に対し、本モデルを運用することで、日本列島スケールで S 波後続波の観測状況を概観した。これまでに S 波後続波の報告例がある地域のみならず、過去に S 波後続波の報告がなかった地域でも S 波後続波を検出することができた。今後は、S 波後続波の網羅的検出結果を活用して、S 波後続波の検出モデルの汎化と自動検測モデルの開発を進める。さらに、後続波生成源を特定するための解析手法の発展・最適化を行い、多くの地域に展開する。

(d) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表：計 6 件、うち海外計 3 件

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
深層学習モデルに基づく S 波後続波の網羅的検出—森吉山地域の群発地震への適用—	雨澤勇太、内出崇彦、椎名高裕、緒方淳、深山覚、	日本地球惑星科学連合 2023 年大会	2023 年 5 月 21 日	国内	○

	黒田大貴				
茨城県北部における地殻内反射面と地殻深部構造に対する解釈（ポスター）	椎名高裕、雨澤勇太、内出崇彦、堀川晴央、今西和俊	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023年5月24日	国内	○
S-wave reflector and crustal fluid deep beneath seismically active area in the north Ibaraki area, northeastern Japan (ポスター)	椎名高裕、雨澤勇太、内出崇彦、堀川晴央、今西和俊	2023 SCEC Annual Meeting	2023年9月11日	国外	○
深層学習を活用した日本列島内陸におけるS波後続波の網羅的検出	雨澤勇太、内出崇彦、椎名高裕、緒方淳、深山覚、黒田大貴	日本地震学会2023年秋季大会	2023年11月1日	国内	○
Crustal fluid deep beneath the seismically active area in the north Ibaraki area, inferred from observations of S-wave reflected waves (ポスター)	椎名高裕、雨澤勇太、内出崇彦、堀川晴央、今西和俊	American Geophysical Union Fall Meeting 2023	2023年12月11日	国外	○
Convolutional Neural Network-based Automatic Detection of Later Phase in S coda	雨澤 勇太、内出 崇彦、椎名 高裕、緒方 淳、深山 覚、黒田 大貴	American Geophysical Union Fall Meeting 2023	2023年12月14日	国外	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

2. 4. 業務題目：(サブテーマ4) 情報科学を活用した地震調査研究基盤の構築

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

情報科学を広く地震学に活用するためには、そのための研究基盤として、地震波形データセットの構築や利便性の高いプログラムの開発と公開が必要である。地震波形データセットは、産総研が西南日本に展開する地下水等総合観測の地震計のデータに、P波・S波到達時刻やP波初動極性の検測値や観測点位置等のメタデータを付ける形で構築する。出来上がったデータセットはサブテーマ1で使用するほか、国内外の研究者が利用できるようインターネット上で公開する。

(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等

所属機関・部局・職名	氏名	研究実施期間	配分を受けた研究費	間接経費
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門 研究グループ付	内出 崇彦	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31	個別課題2.1の額に含まれる	個別課題2.1の額に含まれる
国立研究開発法人 産業技術総合研究所 人工知能研究センター 研究チーム長	緒方 淳	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31	個別課題2.1の額に含まれる	個別課題2.1の額に含まれる

注) 配分を受けた研究費は、間接経費を含まない額。

(c) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 令和3年度：

地震波形データセットの作成に向けて、まず、既存の地震波形データセットにおけるP波到達時刻の読み取り値が地震波形とよく対応しているかどうか、抜き取り調査を行い、信頼性を評価した。次に、産業技術総合研究所で過去に観測した地震波形データを整理し、手動検測でP波・S波到達時刻を読み取った。読み取り結果を今後、信頼性の高いデータセットを作るために必要な作業の方針を整理した。

2) 令和4年度：

地震波形データにP波・S波検測値を付けたデータセットの作成に向けて、信頼性向上のために慎重な検証を重ね、一部のデータに対して再検測を実施した。

3) 令和5年度：

地震波形データにP波・S波検測値を付けたデータセットの作成に向けて、データフォーマットやデータ長などの使用を策定した。一つのデータに複数の地震が入っている事例を目視で発見し、データベースに加えるデータ候補から除外した。

4) 令和6年度：

引き続き、本事業で開発した計算機プログラムの公開を行う。

5) 令和7年度：

引き続き、本事業で開発した計算機プログラムの公開を行う。

(d) 令和5年度の業務の目的

令和3年度から作成している地震波形データセット（P波・S波到達時刻、P波初動極性の検測値等のメタデータ付きの地震波形データ）の信頼性を高めるために、1つのデータに2つの地震が入っているような事例を除外するなど、データの精査を進める。特定の地震検出・検測モデルを用いて、他のデータセットとの性能比較を行う。完成したデータセットをオンラインで公開する。また、本研究課題で開発したソフトウェアをオンラインで公開する。

(2) 令和5年度の成果

(a) 業務の要約

地震波形データに P 波・S 波検測値を付けたデータセットの作成に向けて、公開する際のデータフォーマットを検討し、SeisBench の WaveformDataset 形式を採用することとした。使いやすさを考慮して、データの長さを 100 秒とすることとした。異なるモデル間の比較に使うことを想定して、データはランダムにシフトさせ、学習用、検証用、テスト用のラベルも付すこととした。一つのデータに複数の地震が入っている事例を目視で発見し、データベースに加えるデータ候補から除外した。

(b) 業務の成果

1) 地震波形データセット

令和3年度・令和4年度に引き続き、地震波形データセットの作成に向けたデータの整理を継続した。

まず、データセットとして公開する場合の形式等について、検討した。利便性を考慮して、地震波形処理モデル用プラットフォーム SeisBench (Woollam et al., 2022) の WaveformDataset 形式として取りまとめることとした。ファイルとしては、波形データを格納した HDF5 ファイルと、震源や観測点などに関するメタデータを格納した CSV ファイルを同一のフォルダに入れたものになる。これらのファイルを、SeisBench を使って生成した。

データセットの内容についても検討した。データ長は、P 波と S 波が両方とも入るよう長く取りながらも、長過ぎて 2 つ以上の地震による地震波が入るというリスクも考慮して、100 秒間（毎秒 100 サンプルで前 10000 サンプル）とした。

また、地震波形データは時間軸上でランダムにシフトした。すなわち、発震時刻、P 波・S 波到達時刻のいずれについても、データ切り出し時刻からの相対時刻を固定しないこととした。ただし、データに P 波・S 波到達時刻のいずれもが入るようにした。なお、同じ地震に対する同じ観測点の異なる成分（上下・東西・南北）は同じ時刻で切り出している。これは、異なるモデル間のパフォーマンスを比較するためにこのデータを使用する場合に配慮したものである。通常、学習やテストの際にデータの時刻をランダムにずらしているが、これによってパフォーマンスの差が出ないとも限らない。このようなことが起こらないように、事前にデータセット側でランダムにデータをずらしているものである。同様の理由で、データセットにはあらかじめ学習用、検証用、テスト用のラベルも付すこととした。

データの精査も引き続き実施した。明らかに複数の地震による地震波が含まれているデータを目視で確認して、除外した。気象庁一元化処理震源カタログに基づいて地震波形を切り出し、令和3年度に手動読み取りを実施したところであるが、対象としていた地震以外の地震波形がデータに含まれる場合がある。そこで、まず、対象としていた地震よりも大きな振幅が出ているようなデータを自動処理により除外した。その処理の結果残った 17569 件の地震波形データについて目視で確認をして、このような事例を 1548 件発見した。その具体例を図 7 に示す。なお、極めて小さいイベントまで徹底して除外することは

不可能であると考え、想定している地震と同程度の振幅の地震が入っているもののみ除外することとした。今後、このようなデータはデータベースに含めないこととする。

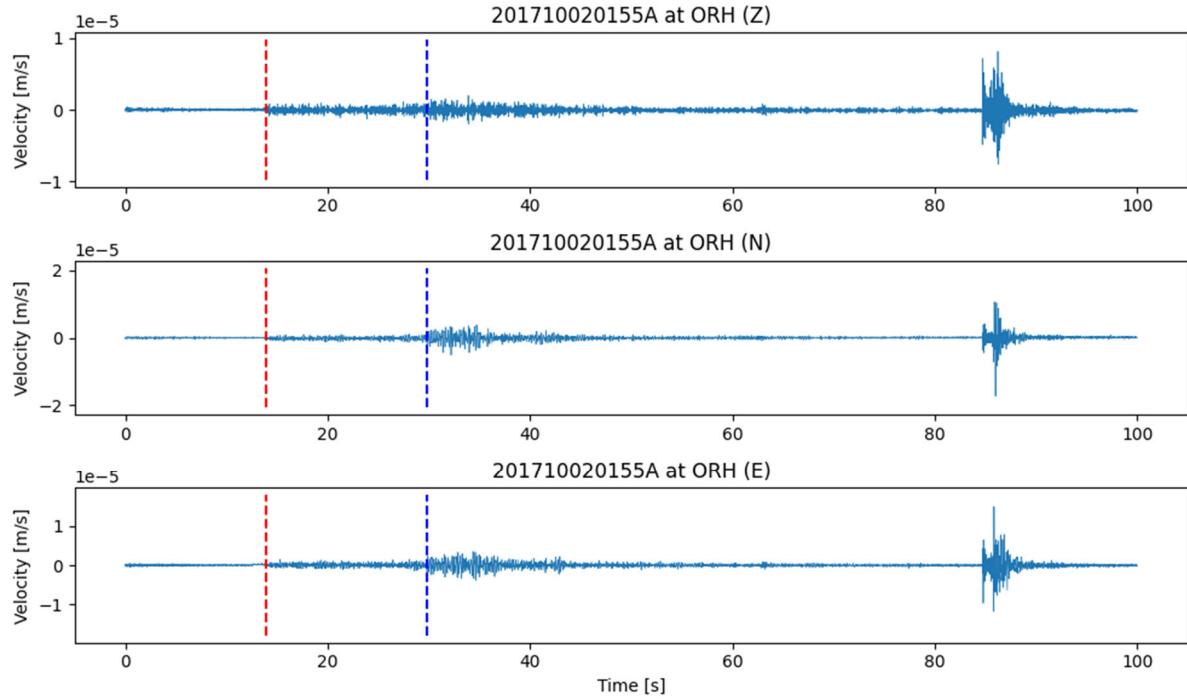


図 7 複数の地震が一つのデータに入っている事例。イベント番号 201710020155A の地震を折橋観測点 (ORH) で観測したデータ。赤点線と青点線はそれぞれ P 波と S 波の到達時刻を示す。85 秒頃に別の地震の波形が入っていることがわかる。

(c) 結論ならびに今後の課題

機械学習用地震波形データセットの公開に向けて、データフォーマットやデータ長など、具体的な仕様を策定することができた。令和 3 年度・令和 4 年度とデータを精査する中で、複数の地震による地震波形データが含まれる例を発見していたが、今年度は全数調査によりそのようなデータを列举し、より信頼性の高いデータセットの構築に向けた準備ができた。今後は、データセットの性能試験を行い、データセットの有用性を示しつつ公開するという段階に入っていく。

(d) 成果の論文発表・口頭発表等

- 1) 学会等における口頭・ポスター発表

なし

- 2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

3. まとめ

強震動予測のための震源モデルの設定やテクトニクスの理解のためには、地下断層の位置と形状を知ることが重要であることから、本研究では、地震波形の自動検測を基礎に、「多数の微小地震の位置と震源メカニズム解を用いたパターン認識」と「後続波による反射面・散乱体の同定」により地下断層の探索を目指している。それを支えるインテリジェントな地震波形処理技術の開発を、新たな情報技術を活用して実施している。さらに、地震波形データセットの作成、計算機プログラムの公開など、本研究課題に限らず、高度な情報科学を活用した地震研究を広く行うための研究基盤整備にも取り組んでいる。

本年度の主たる成果は、日本全国におけるS波後続波の網羅的検出の試みである。これまで、秋田県森吉山周辺地域のデータでのみ学習させてきたモデルを思い切って全国展開した。個別の地震波形を見ていくと、まだ十分なパフォーマンスであるとは言えないが、これまでにない試みに着手したものである。全体的に見れば、S波後続波が既に報告されている地域では本研究でもS波後続波が検出されている。また、北海道大雪山のようにS波後続波観測の報告がない地域でも新たにS波後続波が検出された。手法を改善する余地は大いにあるものの、現時点でもS波後続波検出モデルの効果が出ている。精度を高めることで、後続波生成源の同定につながるものと考えられる。

震源分布と発震機構解による地下断層の形状推定についても、手法の開発とともに、実例への適用が進んだ。特に、2024年1月1日に発生した2024年能登半島地震では、余震分布に適用して、能登半島の北岸と西岸に沿うような断层面を抽出することができた。これまで2つの手法を開発してきたが、これらの特徴も明らかになってきた。

インテリジェントな地震波形処理技術の開発や情報科学を活用した地震研究のための基盤整備も含めて、次年度も、地震データに基づく地下断層の探索に資する研究を進めしていく。

4. 活動報告

「STAR-E AIST ミーティング」を下記の 10 回実施した。研究参加者（協力機関含む）の勤務地が茨城県、東京都、神奈川県、新潟県と分散しており、全てのミーティングを Microsoft Teams を利用したオンライン会議として行った。いわばバーチャル研究室のミーティングとなっており、物理的距離を感じることなくひとまとまりのグループとして活動した。ミーティングでは、研究計画に関する意見交換、研究進捗報告などを行った。

- 第 18 回：2023 年 4 月 6 日 15 時～15 時 30 分
- 第 19 回：2023 年 5 月 18 日 10 時～12 時
- 第 20 回：2023 年 6 月 19 日 13 時～15 時
- 第 21 回：2023 年 7 月 24 日 10 時～12 時
- 第 22 回：2023 年 8 月 21 日 10 時～12 時
- 第 23 回：2023 年 9 月 22 日 10 時～12 時
- 第 24 回：2023 年 10 月 23 日 11 時～12 時
- 第 25 回：2023 年 12 月 6 日 13 時～15 時
- 第 26 回：2024 年 1 月 23 日 15 時 30 分～16 時 30 分
- 第 27 回：2024 年 2 月 26 日 10 時～11 時

このほか、Slack を利用して随時意見交換を行うことで、分野の異なる研究者同士が協力して研究を進めることができた。

また、他の 4 つの研究課題と合同で、以下 5 回の現地・オンラインのハイブリッド形式の勉強会を開催した。そのうち、第 4 回は本研究課題が主催したので、内容も記載する。

- 第 1 回：2023 年 4 月 10 日 15 時～17 時
- 第 2 回：2023 年 6 月 13 日 15 時～17 時
- 第 3 回：2023 年 8 月 8 日 14 時～16 時
- 第 4 回：2023 年 10 月 10 日 10 時～12 時
 - 佐藤圭浩「3 次元震源分布の局所構造を活用した段階的クラスタリングによる断層面推定」
 - 雨澤勇太「S 波後続波の自動検出深層学習モデルの構築と日本列島内陸における網羅的検出」
- 第 5 回：2024 年 2 月 7 日 13 時 30 分～15 時 30 分

STAR-E アイデアコンテストに協力し、内出崇彦が審査員として参加した。

5. むすび

3年目を迎えた本事業では、地震学と情報科学を専門とする研究者同士の協力が自然な形で進むようになり、研究成果も上がっててきた。昨年度在籍していた2名のポスドク（産総研特別研究員）は昨年度末と今年度半ばでそれぞれ退職し、いずれも大学教員の職を得て、本研究課題に協力している。機械学習を活用した地震研究について経験を積んだ若手研究者を教育現場に送り出すことができた。

代わって、今年度より1名のポスドクを雇用し、これまで開発した手法を実例に適用する研究が進んだ。現時点での性能を測るとともに課題を明らかにすることに注力した。最終的には実データに生かしてこそその手法開発であり、目標に対する現時点での位置を明らかにすることが今後の研究展開を考える上で重要である。不足しているところを補うように研究を進めることになる。それと同時に、本研究の着地点を見定めることも必要である。これまで開発してきた手法の長所を生かした地震学的な課題設定を行うことは次年度の課題になる。

次年度以降も引き続き、「内陸で発生する地震の長期予測手法の高度化」（『地震調査研究の推進について（第3期）』より）に資する研究成果を上げるように努める。

なお、本研究課題では、国立研究開発法人防災科学技術研究所が運営する高感度地震観測網（Hi-net）の観測波形データ、気象庁一元化処理震源カタログ、及び、2016年熊本地震合同地震観測グループ（志藤・他, 2020）による震源再決定結果、米国カリフォルニア地震センターで公開されている Community Fault Model version 6.1 (doi:10.5281/zenodo.8327463) と地震カタログを用いた。計算には産総研 ABCI と京都大学学術情報メディアセンターのスーパーコンピュータを利用した。記してここに感謝する。

様式第21

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目

「情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト（STAR-E プロジェクト）

「信号処理と機械学習を活用した地震波形ビッグデータ解析による地下断層の探索」

機関名 国立研究開発法人 産業技術総合研究所

1. 学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
深層学習モデルに基づくS波後続波の網羅的検出—森吉山地域の群発地震への適用—	雨澤勇太、内出崇彦、椎名高裕、緒方淳、深山覚、黒田大貴	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023年5月21日	国内
震源分布を用いた2段階クラスタリングによる断层面推定法の検証（ポスター）	佐藤圭浩、堀川晴央、内出崇彦、深山覚、緒方淳	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023年5月22日	国内
震源位置および発震機構解データから断層群を推定するための有限混合モデル（ポスター）	堀川晴央、内出崇彦、深山覚、佐藤圭浩、黒田大貴、椎名高裕、雨澤勇太、緒方淳	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023年5月22日	国内
茨城県北部における地殻内反射面と地殻深部構造に対する解釈（ポスター）	椎名高裕、雨澤勇太、内出崇彦、堀川晴央、今西和俊	日本地球惑星科学連合2023年大会	2023年5月24日	国内
S-wave reflector and crustal fluid deep beneath seismically active area in the north Ibaraki area, northeastern Japan（ポスター）	椎名高裕、雨澤勇太、内出崇彦、堀川晴央、今西和俊	2023 SCEC Annual Meeting	2023年9月11日	国外

地殻内断層面の客観的検出に向けて:震源分布二段階クラスタリング法の適用 (ポスター)	佐脇泰典、佐藤圭浩、内出崇彦、堀川晴央、椎名高裕、雨澤勇太	日本地震学会2023年秋季大会	2023年11月1日	国内
深層学習を活用した日本列島内陸におけるS波後続波の網羅的検出	雨澤勇太、内出崇彦、椎名高裕、緒方淳、深山覚、黒田大貴	日本地震学会2023年秋季大会	2023年11月1日	国内
Hypocenter-based Visualization of Multiscale Earthquake Faults: Application to Crustal Earthquakes in Japan Islands (ポスター)	佐脇泰典、佐藤圭浩、内出崇彦、堀川晴央、椎名高裕、雨澤勇太	米国地球物理学連合2023年秋季大会	2023年12月13日	国外
Crustal fluid deep beneath the seismically active area in the north Ibaraki area, northeastern Japan, inferred from observations of S-wave reflected waves (ポスター)	椎名高裕、雨澤勇太、内出崇彦、堀川晴央、今西和俊	American Geophysical Union Fall Meeting 2023	2023年12月11日	国外
Convolutional Neural Network-based Automatic Detection of Later Phase in S coda	雨澤 勇太、内出 崇彦、椎名 高裕、緒方 淳、深山 覚、黒田 大貴	American Geophysical Union Fall Meeting 2023	2023年12月14日	国外

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載
なし