

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 6 年度
成果報告書

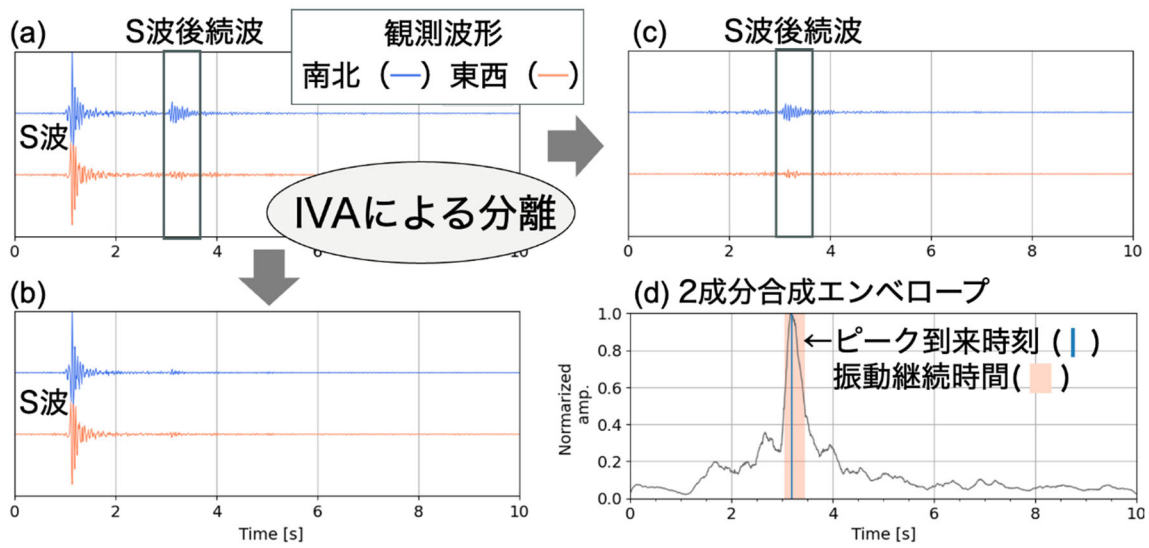
令和 7 年 5 月

文部科学省 研究開発局

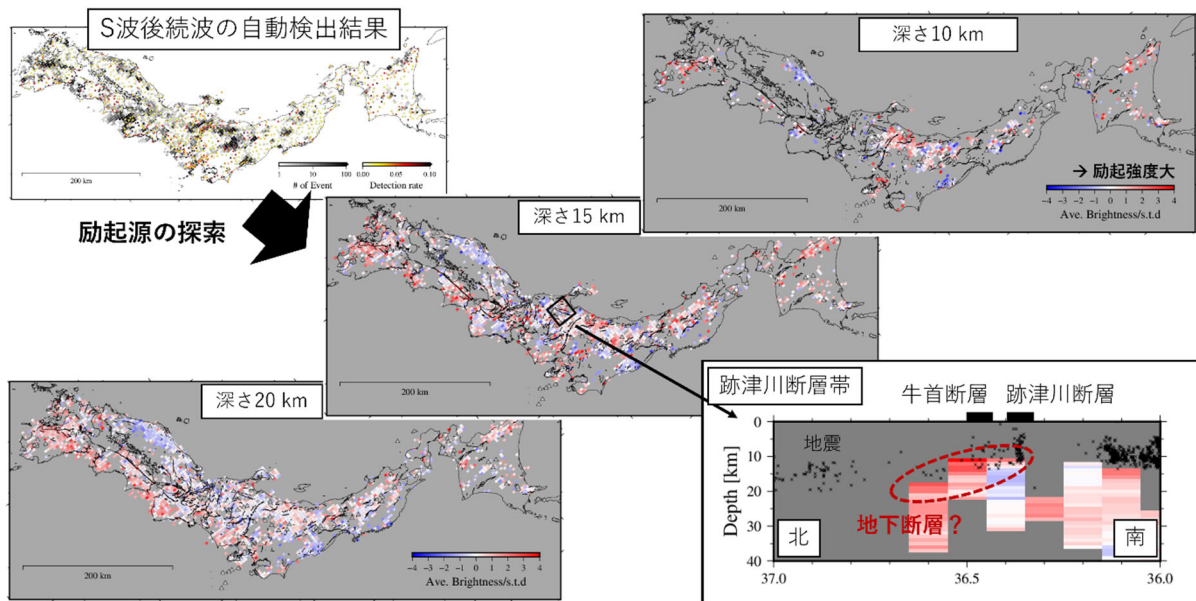
国立研究開発法人 産業技術総合研究所

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6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

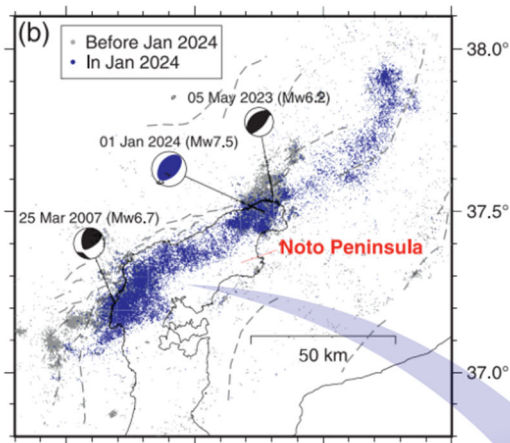


独立ベクトル分析 (Independent Vector Analysis: IVA) を用いた S 波後続波の分離および特徴抽出。(a) 観測波形 (南北成分・東西成分速度波形記録)。振幅は最大値で規格化してある。(b) 分離された S 波。(c) 分離された S 波後続波。(d) 分離された S 波後続波の 2 成分合成エンベロープ。青線はピーク到来時刻、赤色の範囲は振動継続時間 (ピーク振幅の半値幅) を示す。



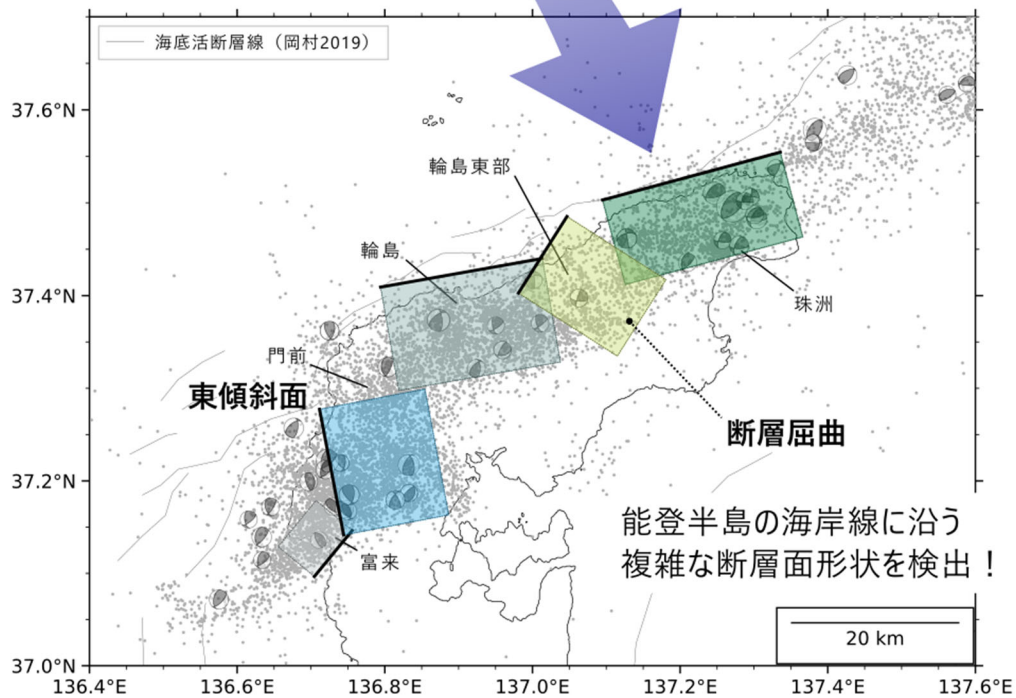
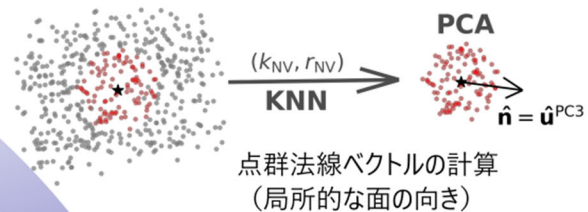
ニューラルネットワークモデルにより自動検出されたS波後続波の励起源分布の探索。

(左上) ニューラルネットワークモデルによるS波後続波の検出状況。グレースケールはS波後続波が観測された地殻内地震数。丸印は観測点の位置であり、色でS波後続波の検出率を示す。(中段) S波後続波励起源の相対的な励起強度分布。赤色は励起強度が相対的に強いことを示す。黒線は活断層の地表位置(中田・今泉, 2002), 三角は火山を示す。(右下) 跡津川断層帯周辺における励起強度分布。跡津川断層および牛首断層付近において地震(黒丸)の発生域下に励起強度の強い領域が認められた。これらは跡津川断層帯の深部断層に関連した不均質構造の存在を示唆すると考えられる。



令和6年能登半島地震の余震分布

点群法線ベクトルと震源位置による
「震源クラスタリング」で断層面を抽出



令和6年能登半島地震(Mw 7.5)の余震分布から面検出を行った結果(Sawaki et al., 2025)。震源分布が持つ局所的な面の向きを表現する点群法線ベクトルと震源位置の震源クラスタリングにより、矩形断層面を抽出した。下段の図に、抽出した断層面を地図投影した。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。灰色波線は海底活断層線(岡村, 2019)を示す。

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ということは、断面図や動画などによって可視化して、主観的に行われてきた。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、6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 A：震源分布・震源メカニズム解を用いた断層面形状決定手法の開発
- サブテーマ 2 B：実データを用いた断層面形状の決定
- サブテーマ 3 A：後続波の検出と検測
- サブテーマ 3 B：後続波を用いた反射面形状の決定
- 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	iv
目 次	v
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6年度の業務の目的	3
(2) 令和6年度の成果	3
(a) 業務の要約	3
(b) 業務の成果	4
(c) 結論ならびに今後の課題	7
(d) 成果の論文発表・口頭発表等	7
(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	8
2. 2. 業務題目：(サブテーマ2A) 震源分布・震源メカニズム解を用いた断層面形状決定手法の開発	9
(1) 業務の内容	9
(a) 業務の目的	9
(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等	9
(c) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	9
(d) 令和6年度の業務の目的	9
(2) 令和6年度の成果	10
(a) 業務の要約	10
(b) 業務の成果	10
(c) 結論ならびに今後の課題	12
(d) 成果の論文発表・口頭発表等	13
(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	13
2. 3. 業務題目：(サブテーマ2B) 実データを用いた断層面形状の決定	14
(1) 業務の内容	14
(a) 業務の目的	14
(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等	14
(c) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	14
(d) 令和6年度の業務の目的	15
(2) 令和6年度の成果	16
(a) 業務の要約	16

(b) 業務の成果.....	16
(c) 結論ならびに今後の課題.....	19
(d) 成果の論文発表・口頭発表等.....	20
(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定.....	21
2. 4. 業務題目：(サブテーマ3 A) 後続波の検出と検測.....	22
(1) 業務の内容.....	22
(a) 業務の目的.....	22
(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等.....	22
(c) 5 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）.....	22
(d) 令和6年度の業務の目的.....	22
(2) 令和6年度の成果.....	24
(a) 業務の要約.....	24
(b) 業務の成果.....	24
(c) 結論ならびに今後の課題.....	25
(d) 成果の論文発表・口頭発表等.....	25
(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定.....	26
2. 5. 業務題目：(サブテーマ3 B) 後続波を用いた反射面形状の決定.....	27
(1) 業務の内容.....	27
(a) 業務の目的.....	27
(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等.....	27
(c) 5 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）.....	27
(d) 令和6年度の業務の目的.....	28
(2) 令和6年度の成果.....	29
(a) 業務の要約.....	29
(b) 業務の成果.....	29
(c) 結論ならびに今後の課題.....	31
(d) 成果の論文発表・口頭発表等.....	31
(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定.....	32
2. 6. 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.....	33
(1) 業務の内容.....	33
(a) 業務の目的.....	33
(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等.....	33
(c) 5 か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）.....	33
(d) 令和6年度の業務の目的.....	34
(2) 令和6年度の成果.....	35
(a) 業務の要約.....	35
(b) 業務の成果.....	35
(c) 結論ならびに今後の課題.....	36
(d) 成果の論文発表・口頭発表等.....	36

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定.....	36
3. まとめ.....	38
4. 活動報告.....	39
5. むすび.....	40

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2B）や反射面・散乱体の推定（サブテーマ3B）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)自動検出（読み取り）に取り組む。検出については、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・観測チャンネル間・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)自動検出については、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、地震波形と手動検出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 上級主任研究員	内出 崇彦	R6. 4. 1 ～ R7. 3. 31	17,716,355 円	5,314,906 円
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	R6. 4. 1 ～ R7. 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	Mpuang, Admore	R6. 4. 1 ～ R7. 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	R6. 4. 1 ～ R6. 6. 30	2,481,006 円	744,302 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	深山 覚	R6. 4. 1 ～ R7. 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	R6. 4. 1 ～ R7. 3. 31		
長岡技術科学大学 工学研究科 助教	黒田 大貴	R6. 4. 1 ～ R7. 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フォーマを用いた自動検出を行い、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出手法に関して、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、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：

地震波形中の後続波を分離できる信号処理手法を考案し、断層等の地中の速度不均質構造を解析するのに有用な後続波を含む地震波形を、地震波形データセットから自動で検出する方法の有用性を検証した。また自己教師あり学習に基づく基盤モデル構築技術を用いて、地震波形の大規模事前学習モデルの構築と、その利活用方法について検討した。

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出ができるようにする。

(d) 令和 6 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出手法の開発を令和 5 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 6 年度の成果

(a) 業務の要約

地震波形に対して独立ベクトル分析（Independent Vector Analysis: IVA）を用いて教師なしで後続波を分離する手法を提案した。IVA は独立成分分析の拡張であり、信号源の統計的独立性に基づき特定方位から到来する信号を抑圧または強調することで信号源を分離する。本成果では、IVA が震源とは異なる方位から後続波が到来する場合に適用できる

ことを発見し、同一サイトから得られる複数方位の地震波形から後続波の波形を分離できることを実証した。サブテーマ 3 A と協力し、本手法を用いた後続波検測手法を国際ワークショップで発表した。他にも、音・画像・自然言語などのメディア処理における最近の進展の原動力である自己教師あり学習を用いて、地震波形に対する基盤モデルの試作を行った。

(b) 業務の成果

1) 独立ベクトル分析による地震波形分離手法の実装

地震波形に対して独立ベクトル分析 (IVA) を用いて教師なしで後続波を分離する手法を提案した。IVA は、独立成分分析の拡張として音響信号処理分野で発展してきた手法であり、観測センサ数が信号源数以上である優決定条件でのブラインド音源分離（音源や混合源に対する事前情報なしに混合音から各音源信号へと分離するタスク）の代表的手法である。IVA は、独立成分分析と同様に信号源の統計的独立性を手がかりとして、線形な未知の混合系に対する分離系、具体的には周波数毎の分離フィルタを推定する。推定された分離フィルタを入力観測信号のスペクトログラムに適用することで、各信号源のスペクトログラムを得る。

本成果では、地震波形からの後続波の分離問題に対しても、IVA を用いたアプローチが有効であることを示した。後続波の励起源を震源とは異なる信号源とみなせば、この信号源と震源から地殻を伝搬して到来した混合音から、それぞれの信号源の到達位置での信号を得る問題と見做せる。この問題は、同一サイトから得られた複数の軸の地震波形から後続波を分離する問題と同型であるため、後続波の分離問題に IVA を適用できる。IVA を実装するには、信号源の統計的性質を定める確率分布を定める必要がある。この分布として周波数間で高次相関を持つものを選ぶことで、周波数間を独立に考える独立成分分析よりも周波数間での分離結果の不整合を低減できる。本実装では、ブラインド音源分離でよく用いられる球対称 Laplace 分布を用いた (Kim et al., 2006)。ここでの球対称性は、周波数成分が無相関かつ同一の分散を持つことを意味する。この分布を用いる場合、IVA の最適化に、各反復での対数尤度の単調非減少性が保証された高効率な反復アルゴリズムが利用できる (Ono, 2010)。

IVA の模式図と分離結果例を図 1 に示す。SN 比や地震が複数回含まれる波形に関しても、一定程度の性能で分離できることを確認した。この結果を基に、サブテーマ 3 A と協力し、本手法を用いた後続波検測手法を国際ワークショップで発表した。

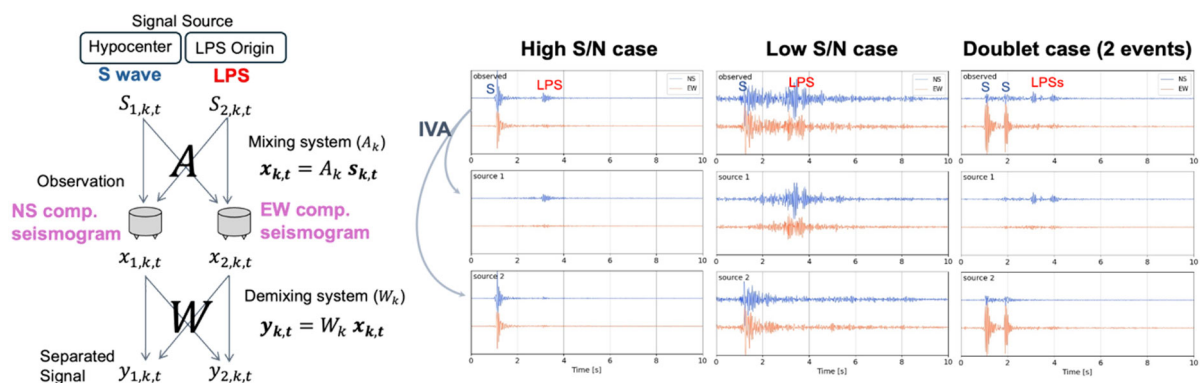


図 1 IVA の模式図と分離結果例．高い SN 比や低い SN 比の場合，さらには多重に地震が観測された場合でも，一定程度の分離性能で後続波（LPS）を分離できることを確認した．

2) 自己教師あり学習モデルの試作

音・画像・自然言語などのメディア処理における最近の進展の原動力である自己教師あり学習（SSL）を用いて、地震波形に対する基盤モデルの試作を行った。具体的には、自己教師あり学習手法の 1 つである data2vec 2.0 を地震波形に適用した。各サイト、各方位の地震波形を 1 チャンネルの入力信号として扱い、自己教師あり学習を行った。得られた特徴量に関して定性的な観察を行ったところ、S 波の部分ではそれ以外の部分に比べ異なる特徴量系列が現れており、ある程度地震波形の特徴を捉えていることを確認した。また、浅い層からある程度深い層に移るに従ってパターンが強調される傾向があるものの、一定程度深い層からは特徴量が非常に疎になる傾向が見られており、学習時のハイパーパラメータ設定に調整の余地がある可能性がある。

試作した SSL モデルを用いて、波形分類タスクを試行した。今回は、近地地震波形（L）、遠地地震波形（T）、ノイズ波形（N）の 3 分類（以下、「LTN 分類」と呼ぶ）をタスクとした。使用した地震観測点は、和歌山県北部の群発地震（e.g., Nakajima, 2023）発生域周辺の防災科学技術研究所 Hi-net 観測点、気象庁観測点、東京大学地震研究所観測点、そして産業技術総合研究所観測点であり、全て 100 Hz サンプルングである。近地地震は、和歌山県北部の群発地震を対象とし、2014 年から 2023 年にかけて気象庁一元化震源に記録された M1.5 以上の地震とした（図 2 左）。遠地地震は、2014 年から 2023 年にかけて米国地質調査所地震カタログに記録された、M6 以上かつ震央距離 20° から 160° の範囲の地震とした。P 波理論走時周辺の時間窓から計算した SN 比が 3 以上の波形を用いた。ノイズ波形は、2014 年から 2023 年の期間から無作為で時間窓を切り出し、STA/LTA が 3 を超えない波形を採用した。それぞれのクラスから無作為で 2,400 波形を抽出し、計 7,200 波形をデータセットとして用いた。各波形はフィルタリングを行うことなく、30 秒の時間窓として切り出し、3 成分・3000 点のデータに成形し、SSL モデルに入力した。各層の特徴量は、出力の両端を除去した上で時間方向に平均プーリングにより得た。第 6 層目までの特徴量を一次元ベクトルに成形した。

データセットを訓練データとテストデータに分割し、サポートベクターマシンによって特徴ベクトルとクラスラベルを学習させた。半数の 3,600 を訓練データに用いた場合、LTN

分類の F1 値が約 99.5%と非常に良いスコアを残した（図 2 中）。そこで、訓練データ数を減らした場合も試行した（図 2 右）。訓練データ数が 1,440（全体の 20%）の場合でも F1 値は 99%を超えていた。訓練データ数が 720（全体の 10%）以下では F1 値が 99%を下回ったものの、訓練データ数が 72（全体の 1%）までは F1 値が 90%以上を保っていた。訓練データ数を 36（全体の 0.5%）とすると F1 値が 79.2%と低下したものの、このように極端に少ない訓練データ数でも高い性能を示すことが分かった。

この結果は、少ないデータ数に対して高い性能を誇る自己教師あり学習の利点を明確に示した。今回試作した SSL モデルを発展させることで、LTN 分類以外にも、特異なイベントの抽出や、地震計機器異常の検出などにも応用させることができる可能性がある。

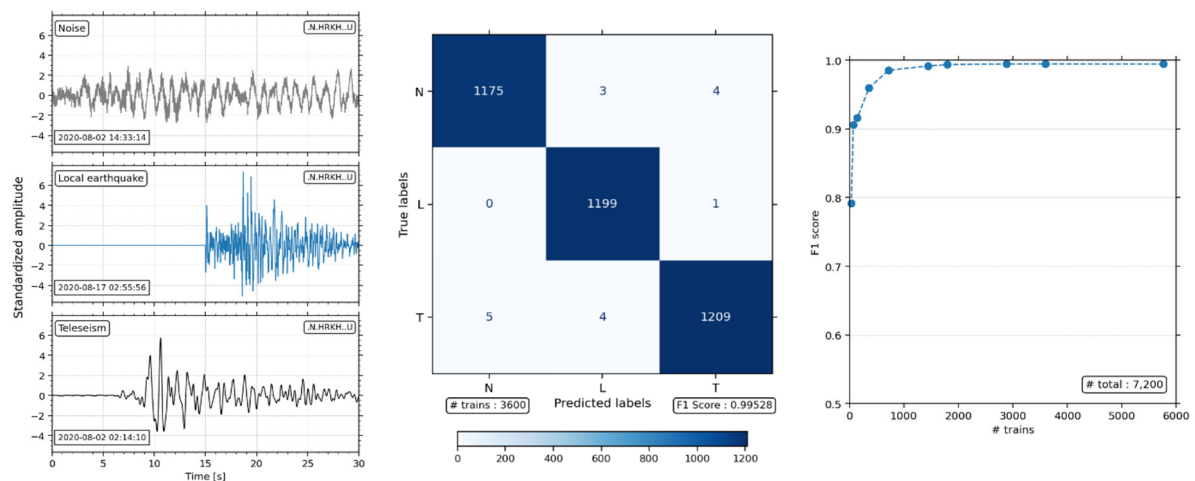


図 2 SSL モデルを用いた地震波形分類タスク（LTN 分類）。（左）Hi-net 広川観測点で観測されたノイズ（N、灰）、近地地震（L、青）、遠地地震（T、黒）の上下動成分速度波形例。振幅は標準化されている。（中）サポートベクターマシンによる LTN 分類における混同行列の例。全データ数 7,200 の内、半数の 3,600 を訓練データに用いた場合。（右）訓練データ数を少なくした際の F1 値の変化。

3) ノイズ除去モデルの試用

既存のノイズ除去処理が地震波形解析にどの程度有効であるかを調べるために、既存の深層学習ベースのノイズ除去モデル（Feng et al., 2024）を茨城県北部地域で観測された地震波形に試験的に適用した。特に、地震波の微弱な変換位相の同定に注目して、ノイズ除去モデルの有効性を評価した。その結果、ノイズ除去後の波形では変換位相の視認性が大幅に改善され、より明瞭なデータを得ることができた。これにより、棚倉構造線付近をはじめとする地下構造の解釈に役立つ情報が増え、ノイズ除去モデルの地震波解析における有用性が実証された（図 3）。今後、日本各地の地下構造解析においても、ノイズ除去モデルを積極的に活用することで、解析精度を高められる可能性が示された。

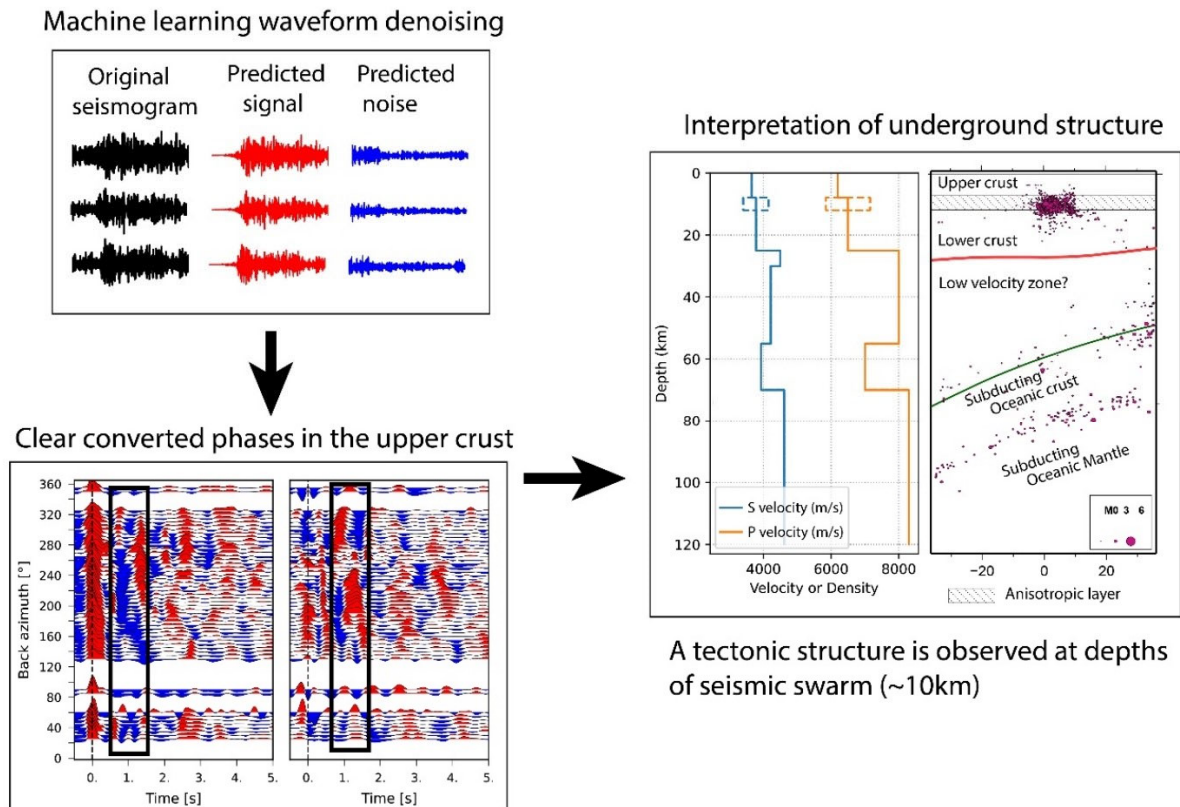


図 3 (左上) 機械学習ベースの波形ノイズ除去の結果。(左下) ノイズを除去した地震波形を用いたレーバ関数解析の結果。上部地殻における強い変換波（黒長方形）が検出できた。(右) 観測された変換波フェーズに基づく地下構造の解釈図。地震活動との関連も見られる。

(c) 結論ならびに今後の課題

IVA を用いた提案手法により、学習データを用いずとも観測波形のみから後続波を分離できることを確認した。また、提案手法による分離結果を用いることで、サブテーマ 3A の目標の 1 つである後続波の自動検出の実現に大きく近づいた。他にも、地震波形に対する自己教師ありモデルの作成方法を検討し、実際にモデルを試作し、近地地震・遠地地震・ノイズの分類を高性能に実行できることを示した。特に訓練データ数を極端に少なくしたケースでも高い F1 値を示したことは、自己教師あり学習の利点が明確に示された。今後は、地震学において重要な他の波形成分を分離できるかについて検討する。音響信号処理分野で培われた音源分離手法を中心に、後続波やそれ以外の波形成分に対する分離や分析が可能かについて検討する。また、自己教師あり学習モデルがどのような特徴を捉えているか他のサブテーマの研究者と協力し分析する。

(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 3 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
Automatic extraction and peak arrival estimation of later phase in S coda（ポスター）	雨澤勇太、中村友彦、深山覚、椎名高裕、内出崇彦	International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2024	2024年9月18日	国内	
Relation between deep crustal fluids, crustal seismicity and structure in North Ibaraki revealed by receiver functions?（ポスター）	Admore P. Mpuang、椎名高裕、佐脇泰典、内出崇彦	日本地震学会2024年秋季大会	2024年10月21日	国内	○
A Mid-crustal Anisotropic Layer in Northern Ibaraki, NE Japan: A Possible Control of Fluid Flow and Upper-crustal Seismicity?（ポスター）	Admore P. Mpuang、椎名高裕、佐脇泰典、内出崇彦	American Geophysical Union AGU24 Annual Meeting	2024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. 2. 業務題目：(サブテーマ2 A) 震源分布・震源メカニズム解を用いた断層面形状決定手法の開発

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

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ことから、震源分布のクラスタリングを行う。震源メカニズム解との整合性を考慮して、実際の断層と思われる面状構造を取り出す。

(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
東京都市大学 デザイン・データ科学部 講師	佐藤 圭浩	R6. 4. 1 ～ R7. 3. 31	841,046 円	252,313 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：

断層面推定手法の精度検証のために、点群データによる人工データによる性能評価を行い、発震機構解との連携や実データの適用における指針を見出した。

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6年度の業務の目的

2段階クラスタリングによる断層面推定法を発展させ、震源メカニズム等で推定されている節面情報を活用した断層面推定法を提案するほか、細分化された局所的な断層面の推定結果を大きな断層の構造へとまとめる手法を開発し、断層面推定法の高度化を行う。

(2) 令和 6 年度の成果

(a) 業務の要約

令和 5 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開発を進めた。さらに、その手法の性能評価を実施した。2 段階クラスタリング手法の断層面の検出手法としての精度は、ノイズに対するロバスト性や局所構造に強く断層面検出が可能なことが確認できた。しかし、実験結果を分析するためには、大きな断層面が分割されて検出される場合も確認された。提案手法の強みと弱みを明らかにし、実データへの適用における指針や今後の改良点を見出すことができた。

(b) 業務の成果

令和 5 年度に引き続き、2 段階クラスタリング手法の性能向上のため、様々な特性を持つ人工的に生成された震源分布を用いた実験を実施した。提案手法の性能評価比較のため、従来のクラスタリング手法である Density-Based Clustering Based on Hierarchical Density Estimates (HDBSCAN) (Campello et al., 2013) も同データによる断層面検出を実施した。人工データは、全 5 種類のデータが作成され、以下に各人工データの実験目的と期待される検証内容をまとめる。

人工データ 1：提案手法は 2 段階クラスタリングと局所的な特徴を用いて断層面を検出するため、各断層面を不必要に細分化することなく、局所的な特徴を適切にクラスタリングできることを検証する。人工データ 1 は、様々な走向・傾斜・長さ・幅の断層面上に震源分布が存在する単独断層面の状態を再現した。人工データ 1 の震源分布配置を図 4 に示す。面積当たりの震源密度を 3 point/km² とした。このデータを各手法にて分析したところ、2 段階クラスタリングと HDBSCAN では、同様の走向・傾斜及び位置、大きさの断層面が検出された。各検出パラメータの比較を図 5 として示す。

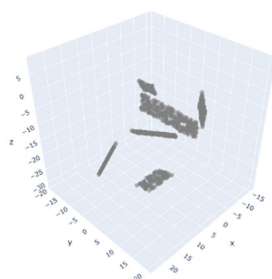


図 4 人工データ 1 の震源分布配置例

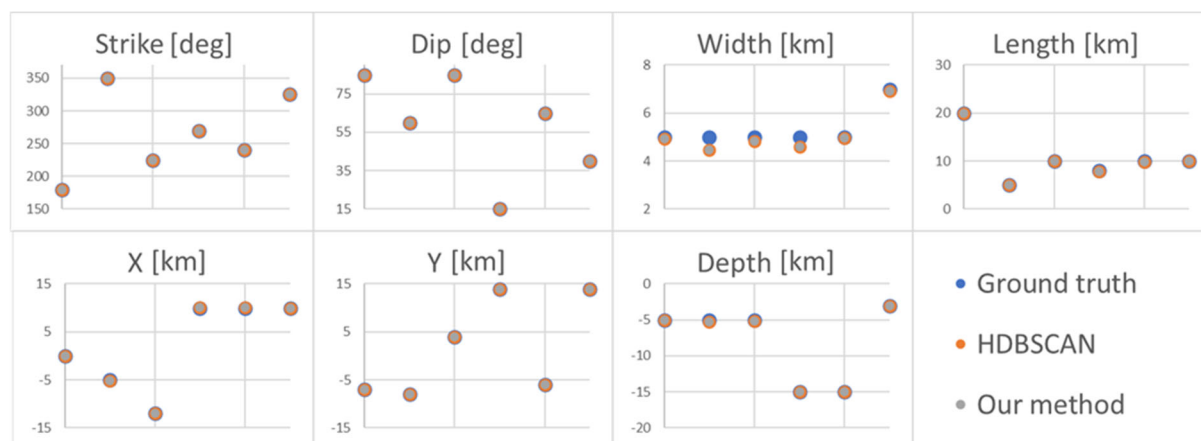


図 5 人工データ 1 による提案手法及び従来手法の各検出パラメータの比較

Ground truth は、人工データ生成時の断層面パラメータ

人工データ 2：提案手法では、1 段階目のクラスタリングで、局所構造を分割し断層面を検出するため、震源分布の距離関数だけでは解決できない、密に配置された直交する共役断層面を、1 つの大きな断層面と誤認することなく、個々の面として分離し正確なサイズを推定できるかを検証した。人工データ 2 は、複数の断層面が直交及び角度をもって連結するような共役断層面の状態を再現した。人工データ 2 の震源分布配置を図 6 に示す。分析の結果、従来手法で正しく検出できなかった断層面を直交する断層面に分離して検出することができており、人工データ生成時のパラメータに対して、誤差がほぼないことが確認された。各検出パラメータの比較を図 7 として示す。

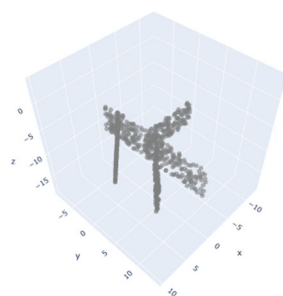


図 6 人工データ 2 の震源分布配置例

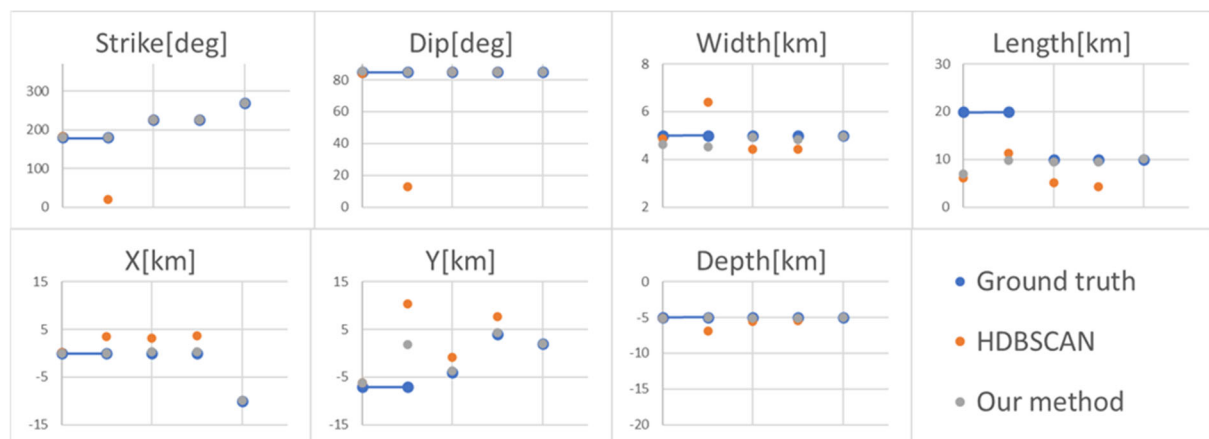


図 7 人工データ 2 による提案手法及び従来手法の各検出パラメータの比較

Ground truth は、人工データ生成時の断層面パラメータ。青い線で繋がっているパラメータは生成時の断層面が同一であることを示す。

人工データ 3：実際の震源分布は平面構造だけではなく、緩やかに湾曲した断層面の場合がある。そのため、わずかな角度変化を持つ湾曲した断層面に対して、その形状を捉え、連続した面として認識できるかを検証した。人工データ 3 は、微小な角度変化の付いた曲面断層面の状態を再現した。人工データ 3 の震源分布配置を図 8 に示す。提案手法では、クラスタリングされた震源分布に対して、尤もらしい平面の大きさ、角度を決定する。故

に曲面の表現方法は想定されておらず、検出の結果、湾曲した断層面が分割された結果となった。そのため、人工データの基準断層面の長さが分割され結果が出力され、提案手法の検出パラメータの長さが小さい値を取った。このような同一断層面を表現しているが複数の断層面に分割された場合の評価方法が必要である。各検出パラメータの比較を図 9 として示す。

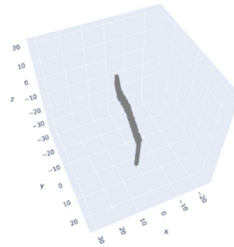


図 8 人工データ 3 の震源分布配置例

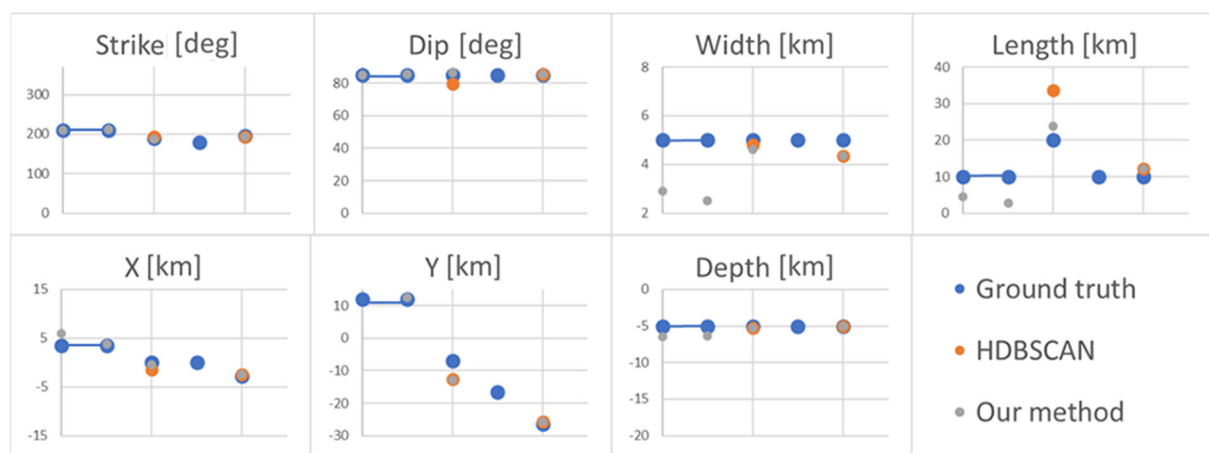


図 9 人工データ 3 による提案手法及び従来手法の各検出パラメータの比較

Ground truth は、人工データ生成時の断層面パラメータ。青い線で繋がっているパラメータは生成時の断層面が同一であることを示す。

人工データ 4, 5: クラスタリング後の平面検出精度の評価のため、走向角度を 5° 刻み、傾斜角度を 15° 刻みで変化させた 130 の断層面を各断層面が干渉しない配置ように作成し、断層面の向きに対する断層パラメータの安定性を評価した。また、断層面に対して垂直に震源分布位置にノイズを与えて影響評価も実施した。その結果、クラスタリングされた震源分布の広がりがある程度以上あれば、ノイズの影響はほぼなく、それぞれの断層面のパラメータを誤差なく検出されたことが確認された。

(c) 結論ならびに今後の課題

2 段階クラスタリング手法の断層面の検出手法としての精度は、ノイズに対するロバスト性や局所構造に強く断層面検出が可能なが確認できた。しかし、実験結果を分析するためには、大きな断層面が分割されて検出される場合など、単純なパラメータ比較だけでは評価できないことが確認された。今後、得られた断層面の 3 次元空間における位置や

形状を可視化し、震源分布や地表活断層との対照できるようにして、得られた断層面モデルの妥当性の検討を支援するソフトウェアを開発する。

(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. 3. 業務題目：(サブテーマ2B) 実データ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。サブテーマ2Aで開発した手法により、断層面形状を決定する。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 上級主任研究員	内出 崇彦	R6. 4. 1 ～ R7. 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	R6. 4. 1 ～ R7. 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	R6. 4. 1 ～ R7. 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	R6. 4. 1 ～ R6. 6. 30	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：

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：

点群法線ベクトルと震源位置の同時クラスタリングによる断層面推定法を令和 6 年能登半島地震や神奈川県西部の地震の余震などに適用し、断層面の推定を行った。地震活動の空白域を補間しつつ非平面断層を考慮できる断層面推定手法の開発に取り組み、2016 年熊本地震の余震データを解析した。

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 6 年度の業務の目的

混合分布モデルを用いた断層面推定法を発展させ、データから妥当と考えられる断層の枚数を統計的に検討する手法を開発する。震源分布が近接して平行な場合、交差する場合、面構造が不明瞭な場合など、より多様な震源分布に対する客観的な検出のアルゴリズムを構築する。能登半島地震をはじめとした実データへの適用を進める。

(2) 令和 6 年度の成果

(a) 業務の要約

サブテーマ 2 A で進めてきた点群法線ベクトルと震源位置のクラスタリング手法をベースに、それらの同時クラスタリングによる断層面形状推定法を構築した。2024 年に国内で発生した地震に対して本手法を適用した。令和 6 年能登半島地震 (Mw 7.5) では、海岸地形に沿う平面断層を抽出し、重力異常や地質、本震すべりなどと対応する断層屈曲が見られた。2024 年 8 月 9 日の神奈川県西部の地震 (Mw 5.0) では、南傾斜の急傾斜の断層面を抽出し、プレート境界や活断層ではなく、スラブ内で発生した高角逆断層であることを突き止めた。さらに、地震活動の空白域の補間と断層の非平面性を考慮することを目的に、新たな断層面推定手法の開発に取り組み、2016 年熊本地震の余震データを解析した。

(b) 業務の成果

1) 点群法線ベクトルと震源位置の同時クラスタリングによる断層面推定法の開発と実データへの適用

令和 4 年度から開発してきた、点群法線ベクトルと震源位置のクラスタリングにより断層面形状を推定する手法について、両特徴量の同時クラスタリングを行う方法を構築し(サブテーマ 4・ソフトウェア)、実データへの適用を行った。震源位置の標準化を行うことで両特徴量の次元を合わせ、HDBSCAN 一回で矩形断層面を作成できるようになった。これにより、クラスタリングに必要なパラメータ数を減らすことに成功した。

本手法をまず、2024 年元日に発生した令和 6 年能登半島地震 (Mw 7.5) の余震分布に適用した。2005 年 1 月から 2024 年 1 月までの気象庁一元化震源 (M1 以上) を、固定の三次元速度構造 (Nakajima, 2022) 下で Double-difference tomography (tomoDD) 法 (Zhang & Thurber, 2003, 2006) によって再決定した。2024 年 1 月に発生した 14,395 イベントをクラスタリングの入力データとした。抽出した矩形断層面は、半島の北岸から西岸に沿うような分布となった (図 10 左)。北岸は東～北東走向の面で、本震や余震のメカニズム解と凡そ調和的である。一方輪島東部では、断層面が反時計回りに屈曲していた。深さ断面からも、この屈曲方向 (E-e 側線) により震源分布が並んでいる。重力異常や地質構造から、この屈曲面の直下では、漸新世の火成岩が分布し、周囲の中新世の堆積岩とは異なるテクトニクス環境であるという対応関係が分かった。こういった断層屈曲は、本震すべりやその伝播に影響を与えた可能性がある。また西岸では、東傾斜の断層面が見られた。応力場 (Uchide et al., 2022) から計算したすべり方向は逆断層を示し、F-net MT 解や CMT 解 (Yamaya et al., 2025) でも南北走向の逆断層節面が多く検出されていることから、東傾斜面における逆断層すべりが本震または余震で発生していた可能性が高い。加えて、抽出した断層面を地表まで単純延長し、海底活断層トレース (岡村, 2019) との空間関係を調べたところ、断層延長が海底活断層トレースより海側に位置することが分かった (図 10 右)。また、日本海地震・津波調査プロジェクトの震源断層モデル (文部科学省, 2014) や地震調査委員会の断層モデル (地震調査委員会, 2024) に比べて、全体的に傾斜角が緩やかである。つまり、地下断層面の単純延長は地表・海底断層とは一致せず、浅い領域でせり上がるような断層構造を示唆している。

また、2024 年 8 月 9 日に発生した神奈川県西部の地震 (Mw 5.0) に対しても断層面推定を行った。2004 年 1 月から 2024 年 10 月までの気象庁一元化震源 (M 0.5 以上) に対して、PhaseNet (Zhu & Beroza, 2019; Naoi et al., 2024) による相検出、走時と波形相関による震源再決定を行った。2024 年 8 月 9 日以降に発生した 364 イベントをクラスタリングの入力データとした。主な断層構造として、南傾斜の高角断層面が 2 枚平行に並んでいた (図 11)。深さ断面を取ると、本震メカニズム解の高角側節面が抽出した断層面と調和的であった。プレート境界面 (Hirose et al., 2008) より 2 km 以上深いことを考えると、この地震はプレート境界や活断層ではなく、フィリピン海スラブ内の高角逆断層地震であることが分かった。この地域は 1923 年大正関東地震の震源 (Kanamori & Miyamura 1970) 付近であり、プレート境界の固着もやや強い領域 (Saito & Noda, 2023) であるため、スラブ内地震がプレート境界面などに与える影響を評価していく必要がある。

これ以外にも、2024 年 11 月に始まった陸奥湾の地震活動についても、機械学習ベースの震源再決定と断層面形状推定を行った。これらを通して、点群法線ベクトルと震源位置の同時クラスタリング法の有効性が確かめられた。一方で、KNN-PCA ベースの点群法線ベクトルの推定においては、震源分布のバラつきによって不安定化するケースも確認されている。推定精度を向上させるような改良を加え、より局所構造を正確に表現させたクラスタリングを目指していく必要がある。

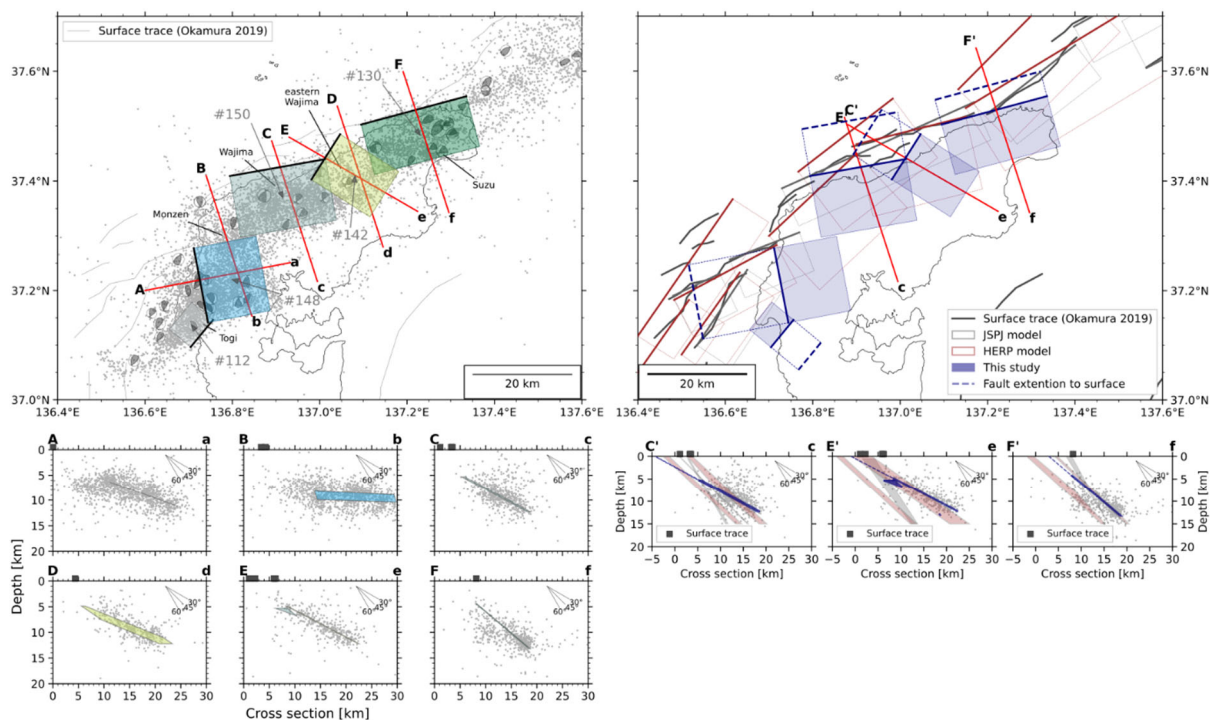


図 10 令和 6 年能登半島地震 (Mw 7.5) の余震分布から面検出を行った結果 (Sawaki et al., (2025) を加筆改変)。(左上) 抽出した断層面の地図投影。矩形は、走向に平行な方向と傾斜方向によって成す平面上で、震源クラスタを内包する面に対応する。太線は面上端、波線は面領域をそれぞれ示す。灰色線は海底活断層トレース (岡村, 2019) を示す。(左下) 抽出した断層面と余震分布の深さ断面図。(右) 海底活断層トレース (岡村, 2019) および

日本海地震・津波調査プロジェクト (JSPJ) の震源断層モデル (文部科学省, 2014、灰色)、地震調査委員会 (HERP) の断層モデル (地震調査委員会, 2024、茶色) との比較。青色で塗られた矩形は本研究成果による断層面で、破線は地表または海底までの断層単純延長を示す。

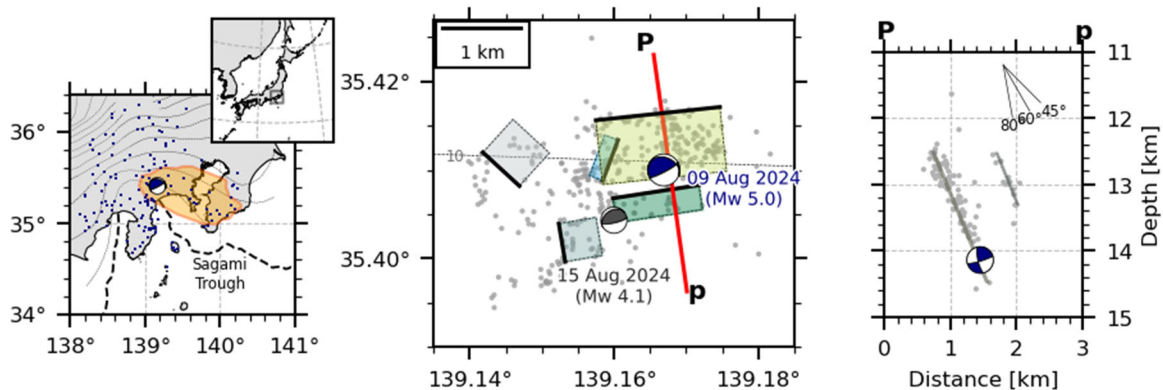


図 11 2024 年 8 月 9 日に発生した神奈川県西部の地震 (Mw 5.0) の余震分布から面検出を行った結果 (Sawaki et al., under review)。(左) 対象地域とメカニズム解。オレンジの領域は 1923 年大正関東地震のすべり域 (Wald & Somerville, 1995)。(中) 抽出した断層面の地図投影。矩形は、走向に平行な方向と傾斜方向によって成す平面上で、震源クラスタを内包する面に対応する。太線は面上端、破線は面領域をそれぞれ示す。紺色および灰色のメカニズム解はそれぞれ本震と最大余震の F-net 解を示す。(右) 抽出した断層面と余震分布の P-p 測線における深さ断面図。

2) 曲面断層を推定する手法の開発

一昨年度の業務において、地震活動の空白域ではあるべき断層面が抜けてしまうという課題が見出された。余震活動を対象とした場合、本震時に大きなすべりが生じたところで余震活動が低調であることは経験的に知られている (例えば、Mendoza & Hartzell, 1988) ので、地震活動の空白域を補いつつ震源断層モデルを設定できるようにすることは本業務で解決すべき課題の一つである。また、昨年度までは平面断層を仮定したため、本業務の解析で得られた断層モデルと、Statewide California Earthquake Center が提唱している曲面で表現された断層モデルとの乖離が散見された。これらの課題を克服するため、今年度は、地震活動の空白域を埋めつつ曲面断層を表現する手法の開発を進めた。

点群データ解析に関する研究 (Carr et al., 2001; Carr et al., 2003) を参考に手法開発を進め、2016 年熊本地震の震源カタログ (志藤・他, 2020) に適用した。ただし、熊本地震の余震活動は時間とともに拡大するため、本震発生後 24 時間内の余震に限った上でクラスタリングにより本震破壊時に活動した断層と関係すると思われる余震だけを抽出して解析対象とした。

得られた結果を等深線 (図 12 (a)) にて示す。本震時にすべりが生じたとされる北東側の断層と南西側の断層が会合するあたりで断層が北西側に張り出すようになっている。余震がほとんどない領域 (東方向に 30~40 km、北方向に 40~50 km のあたり) では、空白

域の両側から内挿する形で北西側に傾き下がる断層が得られた。

用いた震源データと得られた断層面を図 12 (b)に比較して示す。ここでは、2 km ごとの幅で断層面と震源分布を切り出して比較し、本解析の特徴を示す一部の深さのスライスを例として示した。断層は余震分布と概ね一致し、上述の北西方向への断層面の張り出しは余震分布に沿った結果であることが確認できる。

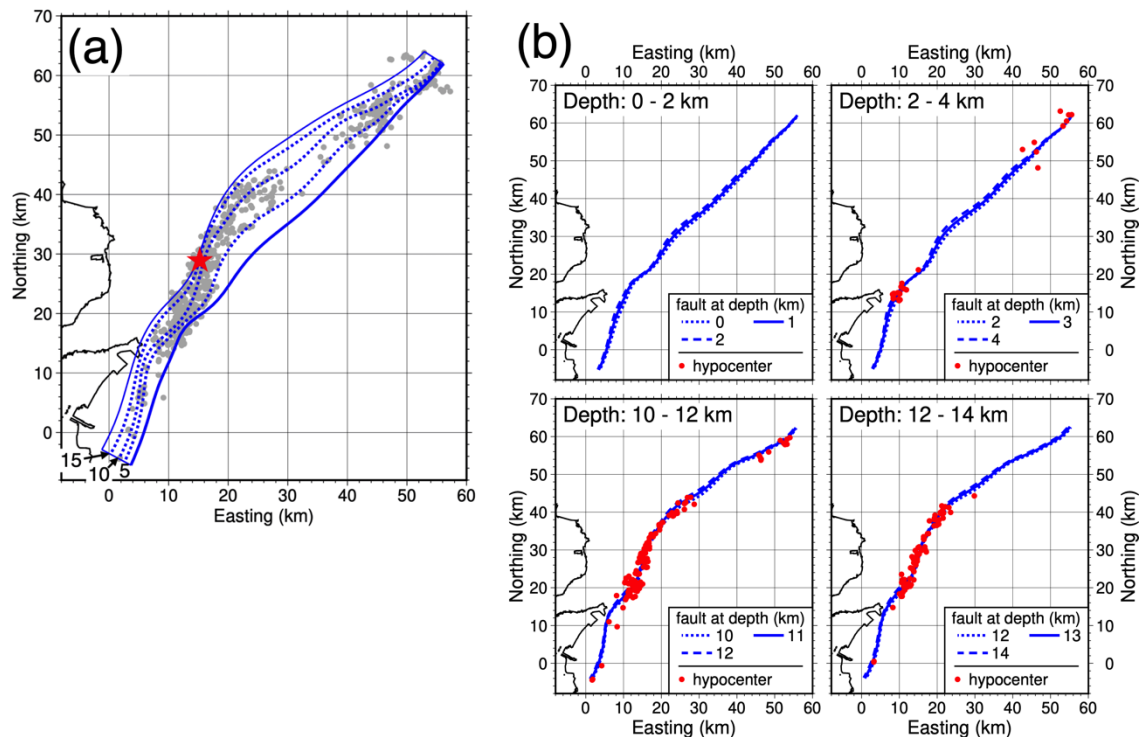


図 12 (a) 本業務で得られた断層面（青線で表現）。太い青線が深さ 0 km の位置の断層で、以下、5 km ごとの等深線を破線で示す。一番北西側に位置する実線で示した曲線が断層の最深部（19 km）の等深線。赤い星印は 2016 年熊本地震の本震の震央で、灰色の丸印はデータとして用いた余震。(b) 得られた断層（青線）と余震分布（赤丸）の比較。深さ方向に 2 km の幅で切り出し、切り出した断層の上端の深さにあたる位置を点線で、真ん中の深さを実線で、下端の深さを破線で示す。

(c) 結論ならびに今後の課題

点群法線ベクトルと震源位置の同時クラスタリングによる断層面形状推定法を構築した。本手法を令和 6 年能登半島地震(Mw 7.5)や 2024 年 8 月 9 日に発生した神奈川県西部の地震(Mw 5.0)などに対して適用した。今後は、点群法線ベクトルの推定精度を向上させ、より局所構造を正確に表現させたクラスタリングを目指す。大地震が発生していない時期にあたる地震活動は活動度自体がそもそも低いこともあって、空間的な空白が見られることが少なくなく、今年度開発した手法のように空白を埋めながら面構造を推定する手法は有用と考えられる。次年度は、今年度開発した手法に適宜改良を加えながら、地震活動が低調ないくつかの内陸断層帯を対象に実データを解析する。

(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5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
カリフォルニア州及びオクラホマ州におけるマルチスケール断層面推定（口頭）	佐脇泰典、David Shelly、内出崇彦、寒河江皓大、椎名高裕、佐藤圭浩、堀川晴央	日本地球惑星科学連合2024年大会	2024年5月27日	国内	○
震源クラスタリングによる令和6年能登半島地震の断層面形状推定（ポスター）	佐脇泰典、内出崇彦、椎名高裕、寒河江皓大、堀川晴央、今西和俊	日本地球惑星科学連合2024年大会	2024年5月28日	国内	○
震源分布と発震機構解から有限混合モデルにより推定された2024年能登半島地震（ $M_w=7.5$ ）の断層配置（ポスター）	堀川晴央、椎名高裕、佐脇泰典、内出崇彦	日本地球惑星科学連合2024年大会	2024年5月28日	国内	○
震源クラスタリングによる令和6年能登半島地震の断層面抽出（口頭）	佐脇泰典、椎名高裕、寒河江皓大、堀川晴央、宮川歩夢、今西和俊、内出崇彦	日本地震学会2024年秋季大会	2024年10月22日	国内	○
Fault Geometries of the 2024 Mw 7.5 Noto Peninsula Earthquake from Hypocenter-Based Hierarchical	佐脇泰典、椎名高裕、寒河江皓大、堀川晴央、宮川歩	米国地球物理学連合2024年大会	2024年12月13日	国外	○

Clustering（口頭）	夢、今西和 俊、内出崇 彦				
----------------	---------------------	--	--	--	--

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
Fault Geometries of the 2024 Mw 7.5 Noto Peninsula Earthquake from Hypocenter-Based Hierarchical Clustering of Point-Cloud Normal Vectors	佐脇泰典、 椎名高裕、 寒河江皓 大、堀川晴 央、宮川歩 夢、今西和 俊、内出崇 彦	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	2025 年 4 月 2 日 （2025 年 3 月 20 日 受理）	国外	○

(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3 A) 後続波の検出と検測

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

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。

(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
東京科学大学 理学院 助教	雨澤 勇太	R6. 4. 1 ～ R7. 3. 31	849, 198 円	254, 759 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：

独立ベクトル分析を用いたS波後続波の分離手法を開発し、S波後続波の最大振幅到達時刻を自動検出する手法を構築した。前年度までに開発・改良を行ったS波後続波自動検出モデルを約150万件の微小地震に適用し、複数地点で検出性能を定量評価した。

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6年度の業務の目的

後続波を自動検出する手法を改良する。後続波の到達時刻を自動検出する手法を開発し、

本課題で網羅的に検出した S 波後続波に対して適用する。

(2) 令和 6 年度の成果

(a) 業務の要約

サブテーマ 1 と協力して S 波後続波の特徴抽出を行うため、ブラインド信号分離技術のひとつである独立ベクトル分析（IVA: Independent Vector Analysis）を用いた S 波後続波の分離手法を開発した。また、令和 4 年度に開発した S 波後続波の自動検出モデルの挙動をより詳しく把握するために約 150 万件の微小地震から S 波後続波を検出し、複数地点において 200 地震を無作為に選び検出性能を定量評価しつつ、モデル汎用化のためのデータセット作成を進めた。

(b) 業務の成果

1) IVA を使った後続波の分離手法の開発

S 波後続波の特徴（ピーク到来時刻や振動継続時間など）を抽出するため、サブテーマ 1 と協力してブラインド信号分離技術の独立ベクトル分析（IVA: Independent Vector Analysis）を用いた S 波後続波の分離手法を開発した。ブラインド信号分離は信号源の統計的独立性と混合系の時普遍性を仮定し、観測された複数の混合信号から、混合前の信号を分離するための分離系を推定する手法である。IVA では信号源ごとに全周波数をまとめたベクトルに対する信号源の確率モデルを定義して信号分離を行う。なお、信号源数は観測信号数以下である必要がある。今回は S 波後続波が検出された観測波形記録からの S 波後続波の分離を目的とし、波到達直前から 10 秒間の水平動 2 成分速度波形記録（図 13(a)）へ IVA を適用した。ノイズ強度や S 波後続波の到来時刻がさまざまな場合のデータに IVA を適用し、S 波後続波が分離できることを確認した（図 13(b, c)）。また、S 波後続波のみに着目した解析が可能になったことで、S 波後続波のピーク到来時刻や振動継続時間を安定して推定することが可能になった（図 13(d)）。

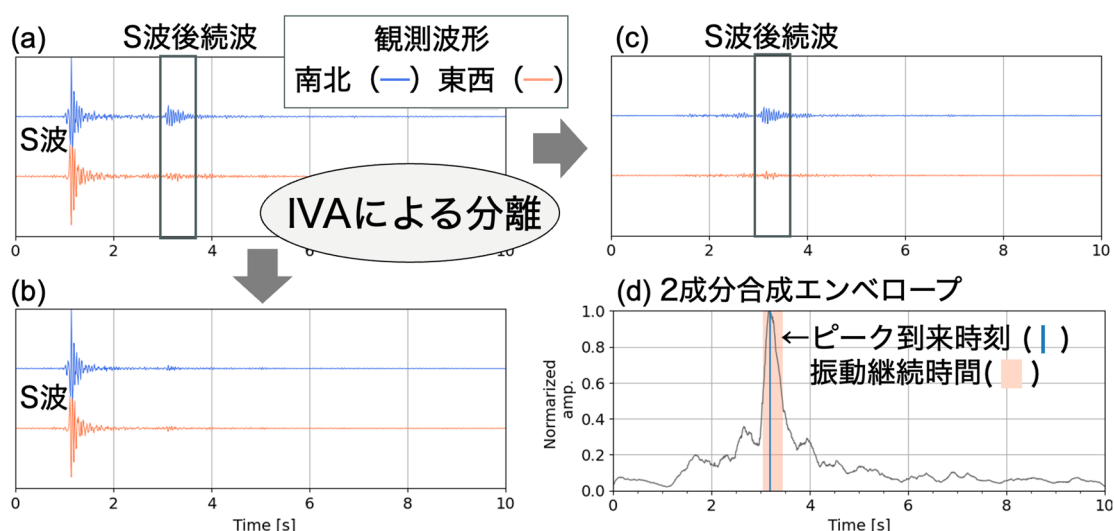


図 13 観測波形からの S 波後続波の分離および特徴抽出の例。(a) 観測波形（南北成分・東西成分速度波形記録）。振幅は最大値で規格化してある。(b) 分離された S 波。(c) 分離された S 波後続波。(d) 分離された S 波後続波の 2 成分合成エンベロープ。青線はピーク到来時刻、赤色の範囲は振動継続時間（ピーク振幅の半値幅）を示す。

2) 後続波自動検出手法の開発

令和4年度に開発したS波後続波の自動検出モデルの挙動をより詳しく把握するために約150万個の微小地震（マグニチュード0以上2以下）の観測波形記録からS波後続波を検出した（図14）。また、複数地点において200地震を無作為に選んだ上でモデルの検出性能を目視検出結果に基づくROC曲線の下側面積であるAUC（0以上1以下であり1に近いほど検出性能が良い）で定量評価した。その結果、AUCが0.9を超える地域があることが判明した（図14(b)）。このことは、モデルが学習したS波後続波（Hi-net 阿仁観測点）と同様の特徴を持つS波後続波が観測される地域が存在することを示唆する。一方、AUCが0.7程度にとどまっている地域も確認した（図14(c)）。モデルの汎用化のためには、教師データを拡充した再学習を行う必要があり、そのためのデータセットの作成に着手した。

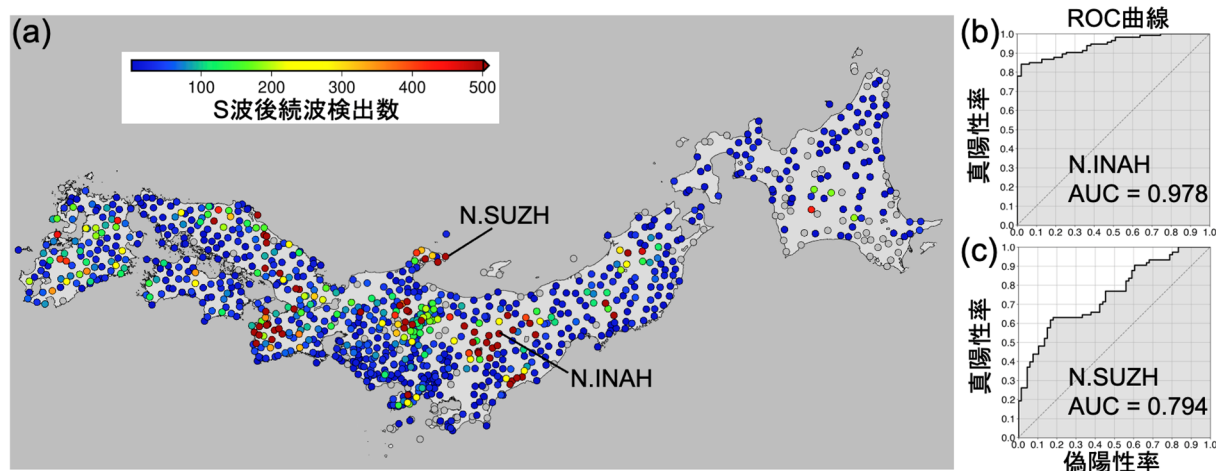


図14 日本列島内陸域における微小地震波形からのS波後続波の検出結果。(a) 色付きの丸は解析に使用した地震観測点を示し、色はS波後続波の検出数を表す。(b) Hi-net 伊南観測点での検出性能テスト結果。(c) Hi-net 珠洲観測点での検出性能テスト結果。

(c) 結論ならびに今後の課題

独立ベクトル分析（IVA: Independent Vector Analysis）を用いたS波後続波の分離手法を開発し、S波とS波後続波を含む観測波形記録からS波後続波のみを分離しピーク到達時刻等の特徴を抽出可能であることを確認した。また、S波後続波の検出をより規模が小さい地震まで含めて実施し、複数地点において検出性能を定量評価しつつ、モデル汎用化のためのデータセット作成を進めた。今後の課題は、IVAで分離したS波後続波からの特徴抽出と、拡充した教師データの再学習によるS波後続波自動検出モデルの汎用化である。

(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
後続波と機械学習を活用した地震発生領域における不均質構造探査（口頭（招待講演））	雨澤勇太	日本地球惑星科学連合2024年大会	2024年5月26日	国内	○
地震波形ビッグデータ中の地震後続波-日本列島内陸域におけるS波後続波の網羅的検出-（口頭（招待講演））	雨澤勇太	2024年度統計関連学会連合大会	2024年9月4日	国内	○
Automatic extraction and peak arrival estimation of later phase in S coda（ポスター）	雨澤勇太、中村友彦、深山覚、椎名高裕、内出崇彦	International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2024	2024年9月18日	国内	○
Comprehensive Detection of Later Phase in S coda in Inland Japan with Deep Learning（ポスター）	雨澤勇太、椎名高裕、緒方淳、深山覚、黒田大貴、内出崇彦	American Geophysical Union Fall Meeting 2024	2024年12月9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. 5. 業務題目：(サブテーマ3B) 後続波を用いた反射面形状の決定

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

サブテーマ3Aで検出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。後続波を生み出す原因となる断層、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 上級主任研究員	内出 崇彦	R6. 4. 1 ～ R7. 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	R6. 4. 1 ～ R7. 3. 31		

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：

ニューラルネットワークモデルによりS波後続波が検出された地震波形記録を用いて、日本列島内陸部全域におけるS波後続波起源の探索を行った。簡易的なイメージング解析ではあるものの、複数の活断層帯周辺においてS波後続波を励起した不均質構造の存在を示唆する描像が得られた。

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

せた断層検出手法を検討する。

(d) 令和 6 年度の業務の目的

活断層周辺における後続波検出性能のより詳細な検討を行う。活断層周辺において、後続波の同定やその励起源の検討を試みる。

(2) 令和 6 年度の成果

(a) 業務の要約

S 波後続波が検出された地震波形記録を用いた S 波後続波励起源分布の探索を通して、S 波後続波を検出するニューラルネットワークモデルの実用上の性能を検討した。加えて、日本列島内陸部において S 波後続波を励起する不均質構造を網羅的に探索した。また、茨城県北部で観測された S 波後続波と地殻内部の不均質構造に関する研究を査読付き論文として出版した。

(b) 業務の成果

S 波後続波を検出するニューラルネットワークモデルの実用に向けた性能の確認と後続波を用いた地下断層面の探索を実施する地域の選定を目的に、日本列島内陸部において S 波後続波励起源分布の網羅的な探索を行った。本研究ではまず、令和 5 年度に実施した S 波後続波を検出するニューラルネットワークモデルによる S 波後続波検出において S 波後続波が検出された地震波形記録（閾値 0.65）（図 15）に対して水平二成分合成エンベロープを合成し、単散乱モデル（例えば、Sato, 1977）に基づいたコーダ波形振幅のフィッティングを行った。次に、観測振幅と理論振幅から残差波形（コーダ波残差波形）を計算した。その後、地震波形記録に紐づいた震源と観測点位置を用いて、水平に分布する後続波励起源を経由する S 波後続波の到達遅延時間を計算し、その遅延時間に従ってコーダ波残差波形の振幅をスタックすることで空間に焼き直すことで S 波後続波の相対的な励起強度（Brightness）として後続波の励起に関わる不均質構造の分布をイメージングした。なお、S 波の伝播速度は 3.5km/s とし、励起源を配置する間隔は緯度方向、経度方向には 0.1 度、深さ方向には 1 km とした。

本研究でイメージングした S 波後続波励起源分布の概観を図 16 に示す。本研究で行った解析では震源位置よりも深部に後続波励起源が存在することを暗に仮定する。このため、Brightness が計算できた領域は深さ 10km 以深が主となる。Brightness の空間変化は深さ 10~20km で大きく、深さ 25km 以深では比較的小さい。特に、深さ 10~15km 付近では活断層帯や火山の周辺で Brightness が高くなる傾向が認められ、これらの領域下で S 波後続波を効率的に励起する不均質構造が存在することが示唆される。また、深さ 20km 付近では高 Brightness 域が西南日本の太平洋沿岸域に分布しており、沈み込むフィリピン海プレート上部境界に関連した S 波後続波励起源の分布に対応すると考えられる。

活断層帯周辺に着目すると、糸魚川ー静岡構造線断層帯や中央構造線断層帯、跡津川断層帯など、いくつかの地域下で深さ 10~20km 付近の Brightness が高くなることを確認した。すなわち、本事業で構築したニューラルネットワークモデルが活断層周辺の S 波後続波を検出していることを示す。図 17 は跡津川断層帯のイメージング結果である。跡津川断層帯では、地表の活断層（跡津川断層、牛首断層）下で地震の発生が観測されている。これらの地震活動域直下の深さ 10~20km 程度で Brightness の増加が認められ、特に牛首断層下で顕著である。山崎断層帯でも同様の特徴が確認され、特に断層帯主部付近で S 波後続波の励起源の存在が示唆される。

また、昨年度までに実施した、茨城県北部で観測された S 波後続波と地殻内部の不均質

構造に関する研究を査読付き論文として Tectonophysics 誌から出版した。

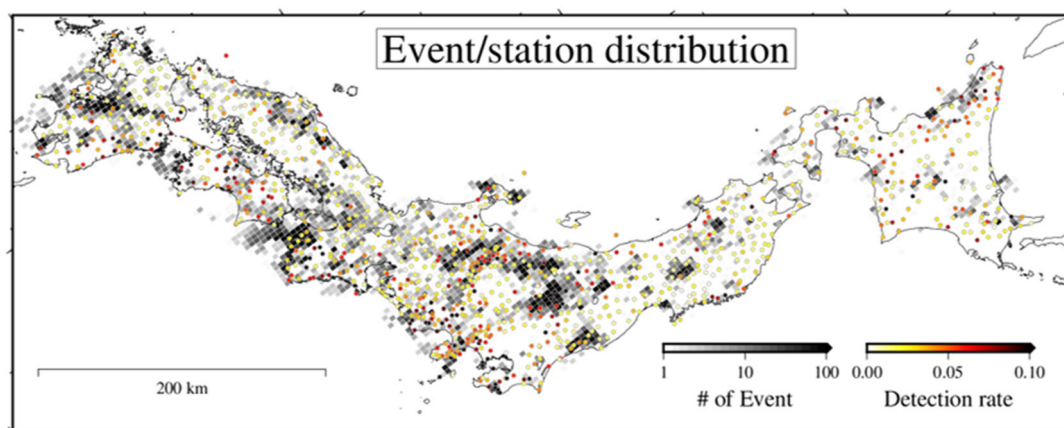


図 15 S 波後続波を検出するニューラルネットワークモデルによる S 波後続波の自動検出状況。グレースケールは S 波後続波が検出された地殻内地震数を表す。丸印は観測点の位置を示し、色は S 波後続波が検出された割合である。

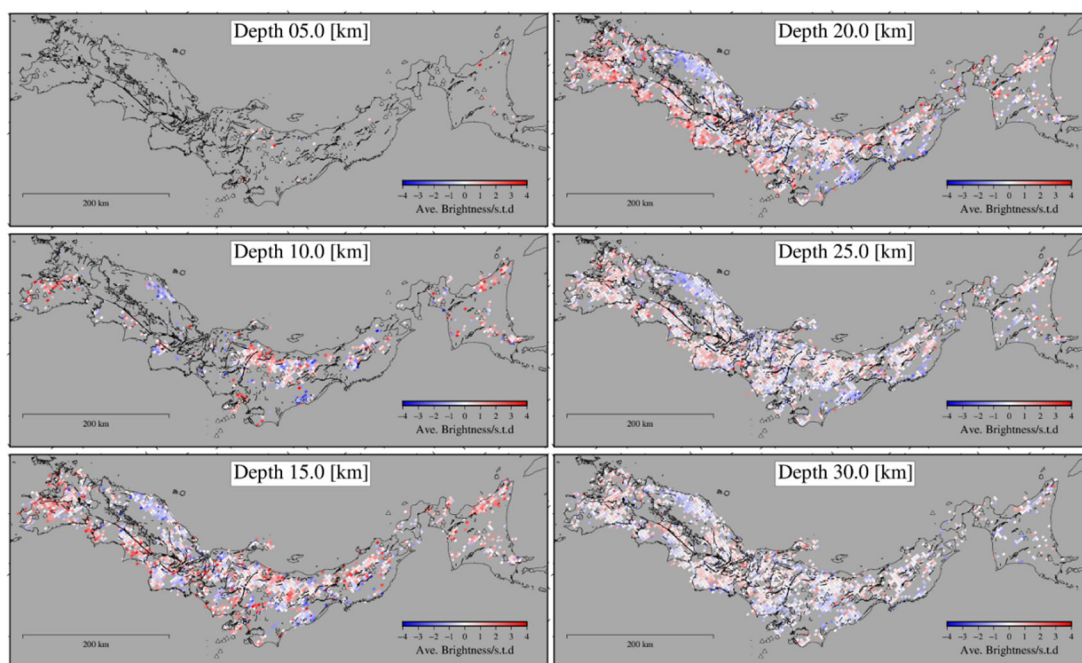


図 16 S 波後続波励起源の探索結果。カラスケールは緯度・経度 0.1 度毎に配置したグリッドで計算された S 波後続波励起源の相対的な励起強度 (Brightness) を、各深さの標準偏差で規格化した値を表す。赤色は励起強度が相対的に強い領域を意味する。黒線は活断層の位置 (中田・今泉, 2002) を、三角は火山の位置を示す。

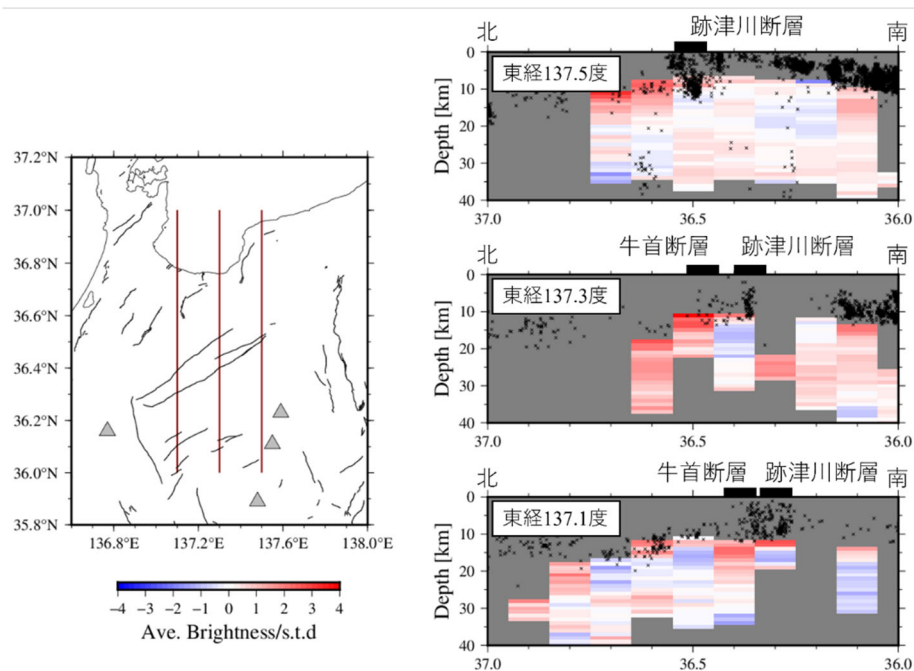


図 17 跡津川断層帯周辺における S 波後続波励起源の相対的な励起強度 (Brightness) マップ。赤色の Brightness は励起強度が相対的に強い領域を示す。(鉛直断面) バツ印は断面から経度方向に ± 0.1 度以内で発生した地震の震源位置を示す。黒線は活断層の位置 (中田・今泉, 2002) を、三角は火山の位置を示す。

(c) 結論ならびに今後の課題

S 波後続波を検出するニューラルネットワークモデルに基づいた S 波後続波のデータセットを用いて、日本列島内陸部における S 波後続波励起源の探索を実施した。探索結果の検討を行い、S 波後続波励起源の存在が期待される活断層帯を選定することができた。後続波励起源の探索では水平な励起源分布を仮定しているため、選定した地域を中心に、今後は S 波後続波励起源の 3 次元的な幾何形状や分布の探索を行う必要がある。

(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 1 件、うち海外計 0 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
S 波後続波の網羅的検出に基づく日本列島内陸部における地殻内反射面の探索 (ポスター)	椎名高裕、雨澤勇太、緒方淳、深山覚、黒田大貴、内出崇彦	日本地震学会 2024 年度秋季大会	2024 年 10 月 21 日	国内	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計 1 件、うち国外計 1 件

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
Deep crustal fluids and their relation to cutoff depths of crustal earthquakes in the north Ibaraki area of northeastern Japan inferred from reflected S-waves	椎名高裕、雨澤勇太、堀川晴央、今西和俊、内出崇彦	Tectonophysics	2024 年 7 月 6 日	国外	○

(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. 6. 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、国立研究開発法人産業技術総合研究所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に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 上級主任研究員	内出 崇彦	R6. 4. 1 ～ R7. 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 産総研特別研究員	佐脇 泰典	R6. 4. 1 ～ R7. 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	R6. 4. 1 ～ R6. 6. 30	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	深山 覚	R6. 4. 1 ～ R7. 3. 31		

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：

地震波形データセットを精査し、異常なデータを除去して、地震波形データセットを再構築した。サブテーマ2Bで開発した点群法線ベクトルと震源位置の同時クラスタリングによる断層面推定法を実装したソフトウェア「FaultNVC」を公開した。

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6年度の業務の目的

信頼性を高め、利用しやすいフォーマットで整備した地震波形データセットを完成させて公開する。本研究課題で開発したソフトウェアをオンラインでその全体を公開する。

(2) 令和 6 年度の成果

(a) 業務の要約

令和 5 年度までに作成してきた、地震波形データと P 波・S 波到達時刻などを含むメタデータがセットになった地震波形データセットについて精査を進めた結果、明らかに異常なデータが含まれている場合があることがわかったことから、これらのデータを目視で除去した。また、サブテーマ 2 B で開発した点群法線ベクトルと震源位置の同時クラスタリングによる断層面推定法を実装したソフトウェア「FaultNVC」を公開した。

(b) 業務の成果

1) 地震波形データセット

令和 5 年度までに、地震波形データと P 波・S 波到達時刻などを含むメタデータがセットになった地震波形データセットを作成してきた。このデータセットを改めて精査したところ、地震計の異常によると思われる振幅異常やオフセット（揺れの中心がずれること）が見られる場合（図 18）があることがわかった。このようなデータを使って機械学習を実施すると支障を来すことが見込まれることから、この問題に対処した。16,060 本の地震波形データに対し、地震波形の振幅異常やオフセットについて、目視で確認した。その結果、3,603 本のデータに異常が見られた。異常の見られなかった 12,457 本の地震波形データを使ってデータセットを再構築した。

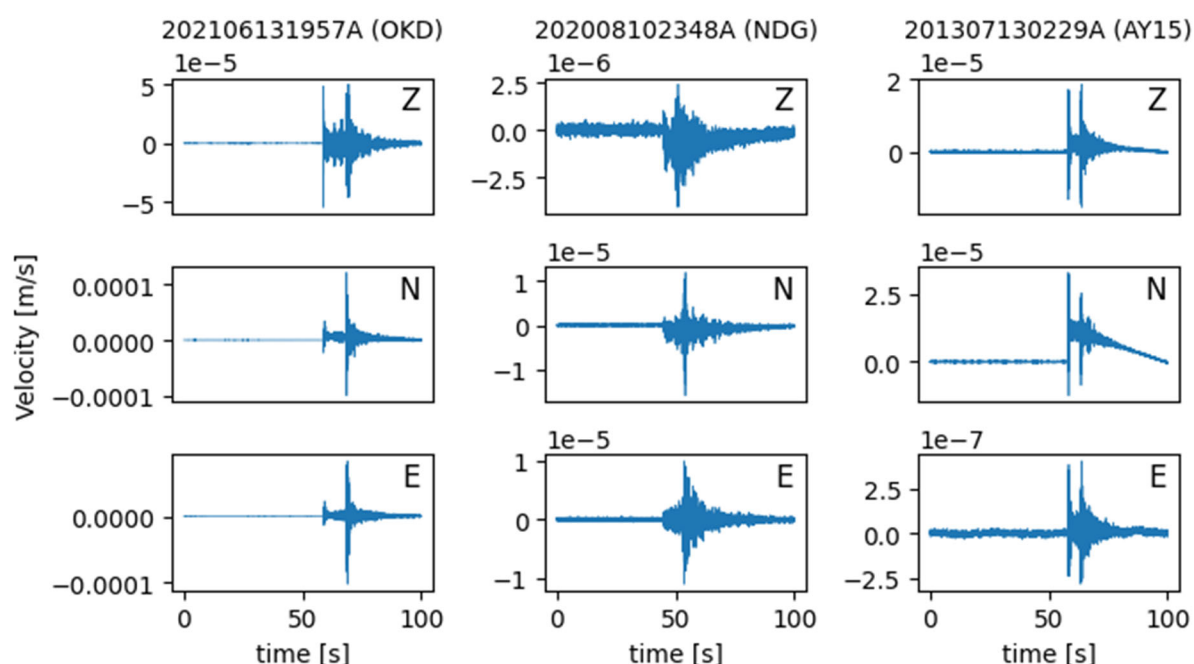


図 18 異常なデータの例。上段、中段、下段はそれぞれ上下動、南北動、東西動を示す。各列は異なる地震の異なる観測点のものを示す。左列では、南北動の波形が異常に傾いている。中列では、上下動と南北動が地震前後で震動の中心がずれている。右列では、上下動と南北動が地震後に異常に傾いている。東西動のみ振幅が 100 分の 1 ほどになっている点も異常である。

2) 本事業で開発した計算機プログラムの公開

サブテーマ2Bで開発した点群法線ベクトルと震源位置の同時クラスタリングによる断層面推定法を実装したソフトウェア「FaultNVC」を、産総研地質調査総合センター研究資料集より公開した。

(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、令和3年度から準備を進めてきたが、異常なデータが16,060本中3,603本も含まれていることが目視で確認できた。これらのデータを除去し、残りの12,457本で地震波形データセットを再構築した。今後は、このデータセットを使って既存の地震波形検出モデルの学習を行い、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。また、点群法線ベクトルと震源位置の同時クラスタリングによる断層面推定法を実装したソフトウェア「FaultNVC」を公開することができた。このソフトウェアを広く利用してもらうことで、さらに改善点を洗い出して、手法の改善につなげていく。

(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 : 計1件、うち国外計0件

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
点群法線ベクトルを用いた震源クラスタリングによる地震断層面抽出法（FaultNVC）	佐脇泰典、 佐藤圭浩、 内出崇彦	地質調査総合センター研究資料集	2025年1月6日	国内	○

(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 : 計1件

名称	機能
FaultNVC	震源分布から、断層面の形状を代表していると思われる面的な震源分布を抽出する。

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、点群法線ベクトルと震源位置の同時クラスタリングによる断層面推定法の開発と令和6年能登半島地震の余震への適用による断層面抽出である。概ね能登半島の北岸と西岸を囲むような断層面が得られた中、北岸では走向の異なる面が見られた。地質構造との対応も見られるこの面を、断面図などにより目視で発見することは困難である。本事業で開発してきた手法によりはじめて見つけることができた断層構造であると考えられる。このような断層構造が震源過程にどのような影響を与え、それが強震動にどう響くかという点は、科学的にも防災の観点からも重要である。

次年度が本事業の最終年度であることを念頭に、新たな手法の開発を続けながらも、地下断層の検出と形状解明を進め、我が国の地震防災に資する研究につなげていきたいと考えている。また、米国との国際共同研究により、地下断層構造の解明に向けた研究に着手する予定である。多様な事例に本研究の成果を適用することで、手法の有用性を示しつつ、課題を洗い出して、さらに良い手法へと発展させていきたい。

4. 活動報告

「STAR-E AIST ミーティング」を下記の7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28回：2024年4月12日11時～12時
- 第29回：2024年5月22日10時30分～12時
- 第30回：2024年7月3日10時～12時
- 第31回：2024年7月17日10時～12時
- 第32回：2024年11月6日10時10分～11時30分
- 第33回：2025年1月20日10時～12時
- 第34回：2025年2月5日10時～12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。

他の4つの研究課題と合同で、以下4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3回は本研究課題が主催したので、内容も記載する。

- 第1回：2024年5月14日14時～17時
- 第2回：2024年6月24日14時～17時
- 第3回：2024年11月6日14時～17時（於：産総研 臨海副都心センター）
 - 内出 崇彦「ご挨拶&STAR-E AIST のご紹介」
 - 椎名 高裕「S波後続波を用いた地殻内反射面の探索」
 - 佐脇 泰典「震源分布クラスタリングによる断層面抽出」
- 第4回：2024年12月27日10時～11時20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

4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連携がさらに密になった。独立ベクトル分析（IVA）による後続波の分離、地震波形向け自己教師あり学習（SSL）モデルの試作といったものがその象徴的な成果と言える。このような連携は次年度も継続、拡大していきたい。

今年度末で1名のポスドク（産総研特別研究員）が退職し、大学教員の職を得ることとなった。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で、地震学のコミュニティにも良い影響を期待したい。

本事業開始当初は、震源分布を用いた断層面の自動推定について研究しているグループはほぼなかったが、ここに来て、国内外で同様の研究を進めているグループが見られるようになった。他のグループの手法の比較などを通して、切磋琢磨して、より良い手法に発展させていきたい。

次年度は最終年度であることから、当初計画していたゴールへ着地していくことにも留意したい。地下断層の検出と形状決定、地震波形データを処理する機械学習モデルの構築などを通して、本事業参加者一同、「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て、地震防災への貢献を目指していく。

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 2 1

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
カリフォルニア州及びオクラホマ州におけるマルチスケール断層面推定（口頭）	佐脇泰典、David Shelly、内出崇彦、寒河江皓大、椎名高裕、佐藤圭浩、堀川晴央	日本地球惑星科学連合2024年大会	2024年5月27日	国内
後続波と機械学習を活用した地震発生領域における不均質構造探査（口頭（招待講演））	雨澤勇太	日本地球惑星科学連合2024年大会	2024年5月26日	国内
震源クラスタリングによる令和6年能登半島地震の断層面形状推定（ポスター）	佐脇泰典、内出崇彦、椎名高裕、寒河江皓大、堀川晴央、今西和俊	日本地球惑星科学連合2024年大会	2024年5月28日	国内
震源分布と発震機構解から有限混合モデルにより推定された2024年能登半島地震（Mw=7.5）の断層配置（ポスター）	堀川晴央、椎名高裕、佐脇泰典、内出崇彦	日本地球惑星科学連合2024年大会	2024年5月28日	国内
地震波形ビッグデータ中の地震後続波-日本列	雨澤勇太	2024年度統計関連学会連合大会	2024年9月4日	国内

島内陸域におけるS波後続波の網羅的検出-（口頭（招待講演））				
Automatic extraction and peak arrival estimation of later phase in S coda（ポスター）	雨澤勇太、中村友彦、深山覚、椎名高裕、内出崇彦	International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2024	2024年9月18日	国内
S波後続波の網羅的検出に基づく日本列島内陸部における地殻内反射面の探索（ポスター）	椎名高裕、雨澤勇太、緒方淳、深山覚、黒田大貴、内出崇彦	日本地震学会2024年度秋季大会	2024年10月21日	国内
Relation between deep crustal fluids, crustal seismicity and structure in North Ibaraki revealed by receiver functions?（ポスター）	Admore P. Mpuang、椎名高裕、佐脇泰典、内出崇彦	日本地震学会2024年秋季大会	2024年10月21日	国内
震源クラスタリングによる令和6年能登半島地震の断層面抽出（口頭）	佐脇泰典、椎名高裕、寒河江皓大、堀川晴央、宮川歩夢、今西和俊、内出崇彦	日本地震学会2024年秋季大会	2024年10月22日	国内
Comprehensive Detection of Later Phase in S coda in Inland Japan with Deep Learning（ポスター）	雨澤勇太、椎名高裕、緒方淳、深山覚、黒田大貴、内出崇彦	American Geophysical Union Fall Meeting 2024	2024年12月9日	国外
Fault Geometries of the 2024 Mw 7.5 Noto Peninsula Earthquake from Hypocenter-Based	佐脇泰典、椎名高裕、寒河江皓大、堀川晴	米国地球物理学連合2024年大会	2024年12月13日	国外

Hierarchical Clustering (口頭)	央、宮川歩夢、今西和俊、内出崇彦			
A Mid-crustal Anisotropic Layer in Northern Ibaraki, NE Japan: A Possible Control of Fluid Flow and Upper-crustal Seismicity? (ポスター)	Admore P. Mpuang、椎名高裕、佐脇泰典、内出崇彦	American Geophysical Union AGU24 Annual Meeting	2024年12月13日	国外

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別
Deep crustal fluids and their relation to cutoff depths of crustal earthquakes in the north Ibaraki area of northeastern Japan inferred from reflected S-waves	椎名高裕、雨澤勇太、堀川晴央、今西和俊、内出崇彦	Tectonophysics	2024年7月6日	国外
点群法線ベクトルを用いた震源クラスタリングによる地震断層面抽出法 (FaultNVC)	佐脇泰典、佐藤圭浩、内出崇彦	地質調査総合センター研究資料集	2025年1月6日	国内
Fault Geometries of the 2024 Mw 7.5 Noto Peninsula Earthquake from Hypocenter-Based Hierarchical Clustering of Point-Cloud Normal Vectors	佐脇泰典、椎名高裕、寒河江皓大、堀川晴央、宮川歩夢、今西和俊、内出崇彦	Journal of Geophysical Research: Solid Earth	2025年4月2日（2025年3月20日受理）	国外

（注）発表者氏名は、連名による発表の場合には、筆頭者を先頭にして全員を記載すること