

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7年度

成果報告書

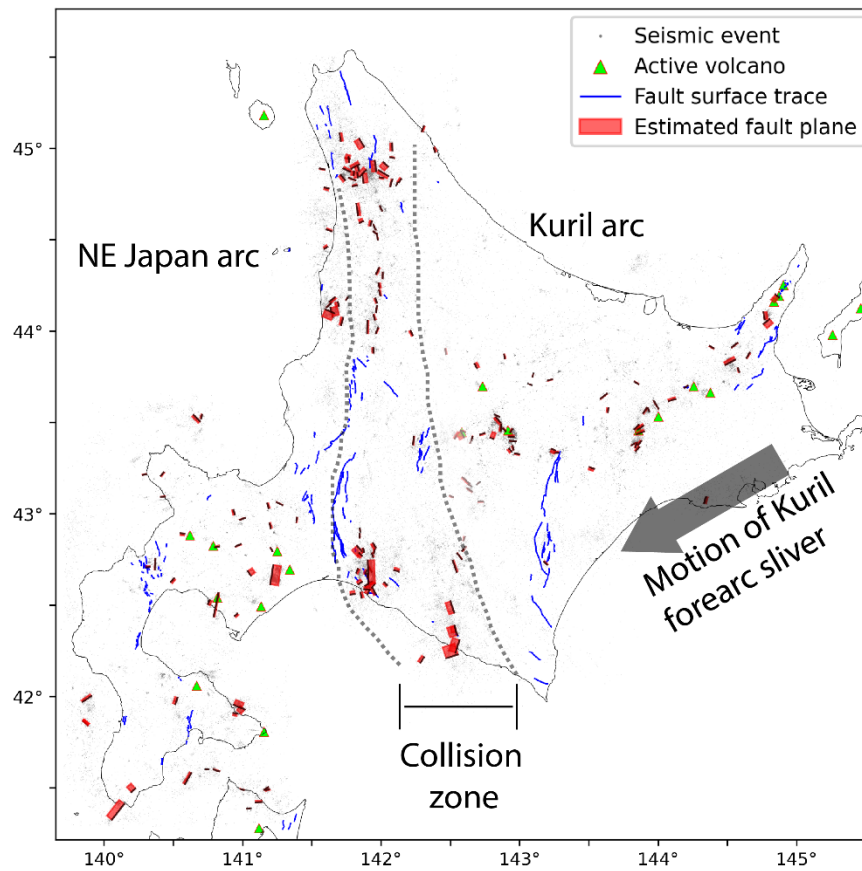
令和8年5月

文部科学省 研究開発局

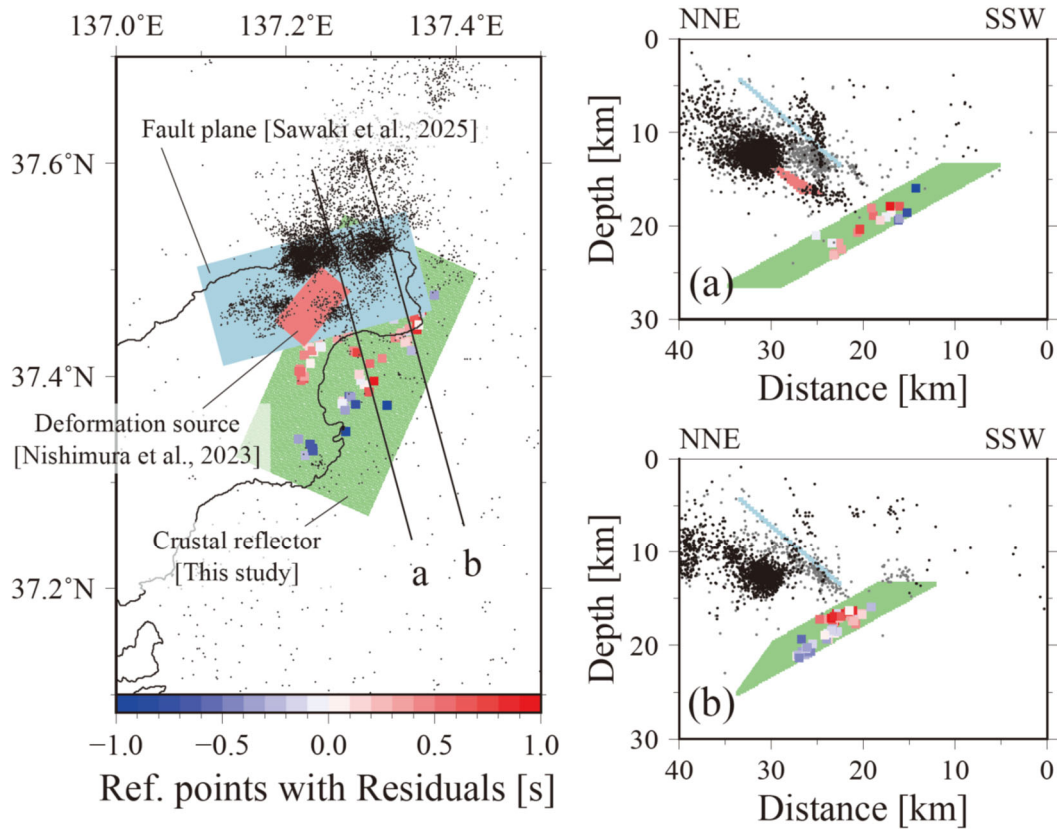
国立研究開発法人 産業技術総合研究所

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7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



北海道において抽出した断層面形状の地表投影と、既知の地表断層トレースを併記した地図を示す。点線は、東北日本弧と千島弧の衝突帯のおおよその位置を示す。東部北海道における千島前弧スリバーの運動は、灰色のブロック矢印で示す。



地殻内反射面と浅部地震活動域における断層面との比較。(左) 本解析で推定した地殻内反射面を緑矩形で、2024年能登半島地震の震源断層面(Sawaki et al., 2025a)および先行した群発地震活動に関連した断層面(地殻変動の励起源(Nishimura et al., 2023))をそれぞれ淡青矩形と淡赤矩形で示す。黒点は地震の分布。色付きの丸は推定された地殻内反射面に対して期待される反射面(後続波励起源)の位置を示す。(右) 北北西—南南東の鉛直断面図。測線から幅5 km以内の地殻内反射面、震源断層面、震源、反射点を示す。浅部地震活動域で検出された震源断層面直下に、これらとは異なる傾斜を持つ地殻内反射面が存在する可能性が示唆された。

## 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
- サブテーマ2B：実データを用いた断層面形状の決定
- サブテーマ2C：推定した断層面形状の可視化手法の開発
- 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）	2
(d) 令和7年度の業務の目的	3
(2) 令和7年度の成果	4
(a) 業務の要約	4
(b) 業務の成果	4
(c) 結論ならびに今後の課題	6
(d) 成果の論文発表・口頭発表等	6
(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	7
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	8
(1) 業務の内容	8
(a) 業務の目的	8
(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等	8
(c) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	8
(d) 令和7年度の業務の目的	8
(2) 令和7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	11
(d) 成果の論文発表・口頭発表等	12
(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	15
(1) 業務の内容	15
(a) 業務の目的	15
(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等	15
(c) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	15
(d) 令和7年度の業務の目的	16
(2) 令和7年度の成果	17
(a) 業務の要約	17

(b)	業務の成果	17
(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	19
(e)	特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	20
2. 4.	業務題目：(サブテーマ2C) 推定した断層面形状の可視化手法の開発	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7年度の業務の目的	22
(2)	令和7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	26
(d)	成果の論文発表・口頭発表等	27
(e)	特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	27
2. 5.	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	28
(1)	業務の内容	28
(a)	業務の目的	28
(b)	研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等	28
(c)	5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	28
(d)	令和7年度の業務の目的	29
(2)	令和7年度の成果	30
(a)	業務の要約	30
(b)	業務の成果	30
(c)	結論ならびに今後の課題	33
(d)	成果の論文発表・口頭発表等	33
(e)	特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	34
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	35
(1)	業務の内容	35
(a)	業務の目的	35
(b)	研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等	35
(c)	5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	35
(d)	令和7年度の業務の目的	36
(2)	令和7年度の成果	37
(a)	業務の要約	37
(b)	業務の成果	37
(c)	結論ならびに今後の課題	38
(d)	成果の論文発表・口頭発表等	38

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定.....	39
3. まとめ.....	40
4. 活動報告.....	41
5. むすび.....	42

## 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2 B）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）、(2)観測波形のノイズ除去、(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 研究グループ長	内出 崇彦	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	14, 140, 843 円	4, 242, 252 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	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	5, 518, 779 円	1, 655, 634 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	中村 友彦	R7. 4. 1 ～ R8. 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	伊藤 信貴	R7. 4. 1 ～ R8. 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：

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：

地震波形中の後続波を分離できる信号処理手法の改良のため、より表現力の高いモデルを用いた信号源分離手法を検討した。当該手法でも、令和6年度で検討した分離手法と同様に地震波形を分離できることを確認した。自動検測モデルに対する複数の海底地震計のデータセットを用いた転移学習をそれぞれ実施し、適用対象と同一地域のデータを用いたモデルが優位であることを確認した。

(d) 令和7年度の業務の目的

令和6年度で開発した信号処理手法を地震波形分離手法の開発を引き続き進める。特に、より表現力の高いモデルを用いた手法を検討し、令和6年度に導入した信号処理手法以外の音源分離手法が地震波形の分離に適用可能かを調査する。

## (2) 令和7年度の成果

### (a) 業務の要約

令和6年度に引き続き、サブテーマ3と協力し、独立ベクトル分析 (Independent Vector Analysis: IVA) を用いた後続波検測手法の改良を行なった。また、IVA と並んで代表的な多チャンネル音源分離手法である高速多チャンネル非負値行列因子分解 (fast multichannel nonnegative matrix factorization: FastMNMF) を用いて、教師なしで地震波形を分離する手法を検討した。本成果では、FastMNMF でも IVA と同様に地震波形が分離できることを確認し、IVA 以外の多チャンネル音源分離手法も地震波形処理に利用できる可能性を示した。

### (b) 業務の成果

#### 1) 多チャンネルブラインド音源分離手法を援用した地震波形分離手法の検討

地震波形に対して、FastMNMF (Ito et al., 2019) を用いて教師なしで地震波形を分離する手法を検討した。FastMNMF は、令和6年度に検討した IVA と同様に、音響信号処理分野で発展してきた音源分離手法の一つである。FastMNMF は、信号源間の統計的独立性を仮定した上で、各信号源のスペクトログラムを低ランクな非負値行列として表現し、観測点間の空間的な混合系を空間共分散行列として明示的にモデル化する。これにより、信号源毎のスペクトル構造と空間構造の両方の手がかりを利用できる。FastMNMF は IVA と比較して、スペクトル構造も空間構造もより柔軟に表現できることから、観測センサ数が信号源数より少ない場合や、様々な方位から信号が到来する場合など、複雑な混合系でも一定の分離性能が得られると期待できる。

IVA を適用した場合と同様に、同一観測点で得られた地震波形を多チャンネル観測信号とみなし、FastMNMF により分離を試みた。図1に分離波形例を示す。まず、IVA の場合と同様に、FastMNMF でも P 波、S 波とそれ以外の残差成分に分かれる傾向が観察された。定量的な比較には至っていないものの、IVA とは異なる多チャンネル音源分離手法でもある程度類似した分離波形が得られることが示された。また、IVA と比較して、FastMNMF で得られる分離波形は時間的に局在して分離波形が得られやすい傾向が観察された一方、地震波形による分離波形の差異も大きく、詳細な調査が必要であることが判明した。

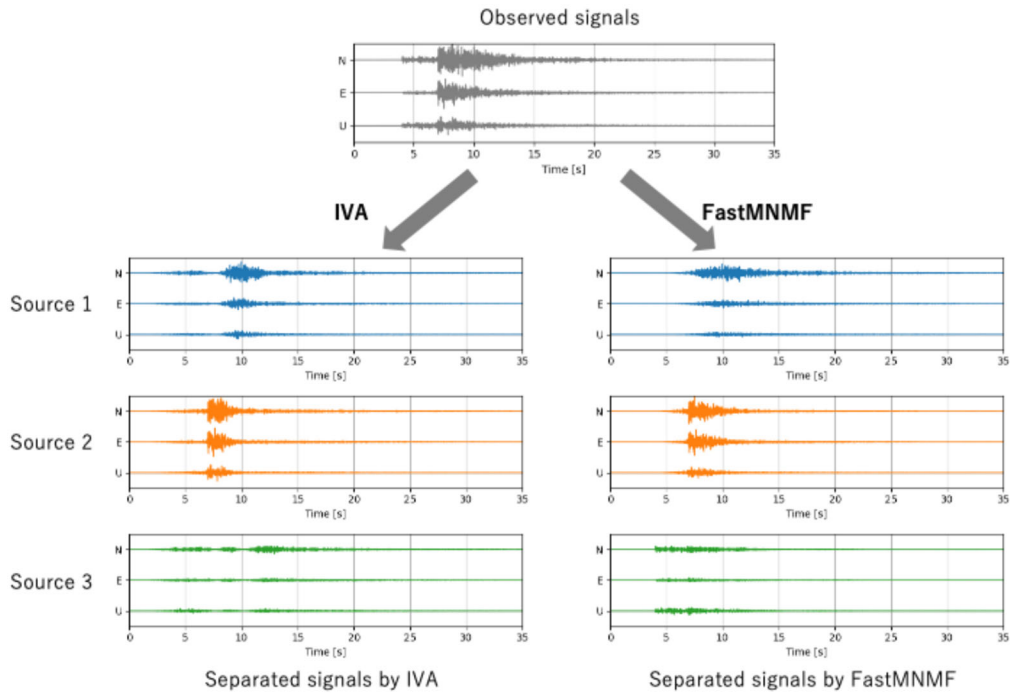


図1 3軸地震波形に対する IVA と FastMNMF での分離結果例。IVA と比較して、FastMNMF の方がより時間的に局在した分離波形が得られた。

## 2) 設置環境の異なる地震波形データセットを用いた地震波検出モデルの学習

多くの地震波検出モデルが陸上（坑井を含む）における地震観測データを使って学習されているが、海底地震計のデータを使って学習したモデルも存在する (Bornstein et al., 2023; Niksejel & Zhang, 2024)。日本では日本海溝海底地震津波観測網 (S-net) によるケーブル型海底地震計のデータが利用可能であることから、このデータを使った PhaseNet モデルの転移学習を試みた。

転移学習元としては、PhaseNet モデル (Zhu & Beroza, 2019) に日本の地震観測データを用いて学習させた Naoi et al. (2024) のモデルを用いた。これに対して、S-net のデータ、PickBlue (Bornstein et al., 2023) の学習に用いられた海底地震計のデータ、OBSTransformer (Niksejel & Zhang, 2024) の学習に用いられた海底地震計のデータをそれぞれ用いて転移学習を実施して、3つの自動検出モデルを得た。

図2と表1にS-netデータによるテスト結果を示す。P波ではNaoi et al. (2024)のモデルがわずかに高い Recall を示した一方、時刻残差の平均はS-netデータで転移学習したモデルの方が小さい。S波については、S-netデータで転移学習したモデルが最も良好な性能を示した。これに対し、他地域の海底地震計データで転移学習したモデルはいずれも性能が低かった。図表は省略するが、PickBlue および OBSTransformer のデータセットでテストすると、それぞれのデータで転移学習したモデルが高い性能を示した。以上より、設置環境や地域に応じたデータセットを用いた転移学習が重要であることが確認できた。

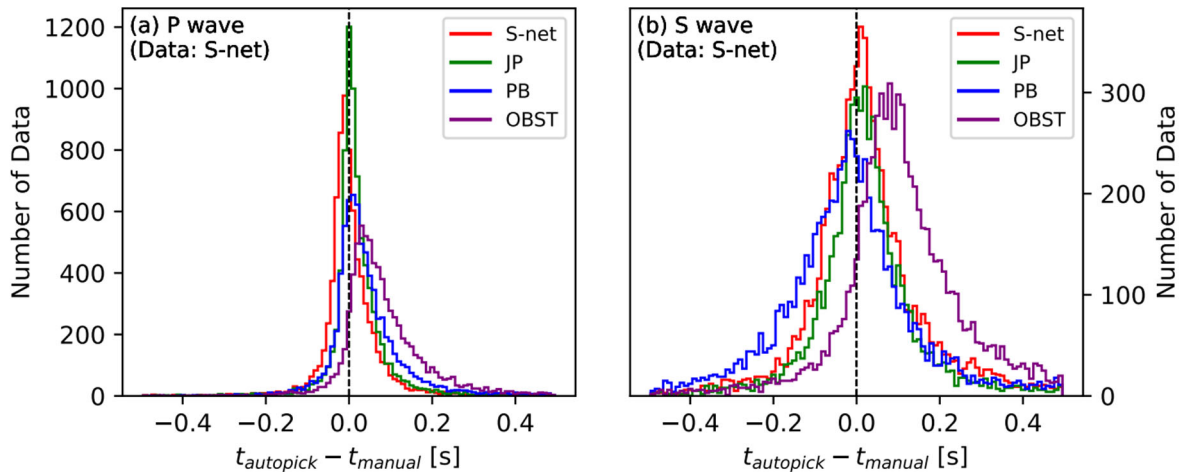


図 2 転移学習したモデルの検測結果とカタログ値との差。S-net、PB (PickBlue)、OBST (OBSTransformer) はそれぞれモデルの学習に用いたデータセットに対応する。JP は Naoi et al. (2024)によるモデル。

表 1 転移学習したモデルのテスト結果

	Recall (< 0.05 s)	平均	標準偏差
S-net	P: 97.2 %	P: 0.002 s	P: 0.071 s
	S: 89.4 %	S: 0.022 s	S: 0.134 s
JP	P: 98.3 %	P: 0.019 s	P: 0.070 s
	S: 69.6 %	S: 0.020 s	S: 0.122 s
PB	P: 95.7%	P: 0.040 s	P: 0.088 s
	S: 84.4 %	S: -0.021 s	S: 0.156 s
OBST	P: 96.0%	P: 0.081 s	P: 0.096 s
	S: 89.6 %	S: 0.106 s	S: 0.141 s

(c) 結論ならびに今後の課題

FastMNMF を用いた地震波形分離手法を検討し、様々な多チャンネル音源分離手法が地震波形の分離に利用できることが示唆された。FastMNMF を用いた手法が後続波検出手法で有効か、IVA と比較しどちらがどのような状況で有効かといった調査は今後の課題である。S-net データで転移学習した PhaseNet モデルは、S-net 観測データに対して高い検出精度と小さな時刻残差を達成した。しかし、異なる海底地震観測環境のデータでは性能が大幅に低下し、各モデルとも自身の学習データに近い条件でのみ高性能を発揮する傾向が明らかになった。多様なデータへの汎化性能向上が今後の課題である。

(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 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
Automatic Phase Picking Model for Ocean Bottom Seismic Data: PhaseNet Model Trained Using Japanese S-net Data (ポスター)	内出崇彦	Seismological Society of America Annual Meeting 2025 (米国地震学会2025年年次大会)	2025年4月	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
立命館大学 理工学部 助教	佐脇 泰典	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	1, 848, 955 円	554, 686 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。令和7年度：

震源クラスタリングに用いる点群法線ベクトルの推定手法の改良に取り組み、断層境界付近における断層面推定精度が従来法に比べて向上することを、合成データへの適用により確認した。また、複数の突発的な地震活動に震源クラスタリングを実施し、走向や傾斜の異なる複数の断層面を抽出することで、地下の断層構造の理解に資する成果を得た。

#### (d) 令和7年度の業務の目的

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発展させ、震源分布が交差する場合など、より多様な震源分布に対する客観的な面検出のアルゴリズムを構築する。特に、点群法線ベクトルの推定手法のまた、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。

## (2) 令和7年度の成果

### (a) 業務の要約

震源位置と点群法線ベクトルを用いた6次元クラスタリング法を基礎として、法線ベクトル推定手法の改良に取り組んだ。具体的には、相互近傍点探索により空間的に近接した点集合を構成し、それらに対応する法線ベクトルに対して凝集型クラスタリングを適用することで、複数の平面構造が混在する状況下でも、代表的な法線ベクトルを選択する手法とした。その結果、断層境界付近における断層面推定精度が従来法に比べて向上することを、合成データへの適用により確認した。並行して、震源クラスタリング法を神奈川県西部や陸奥湾、島根県東部などの突発的な地震活動に適用し、走向や傾斜の異なる複数の断層面を抽出することで、地下の断層構造の理解に資する成果を得た。

### (b) 業務の成果

令和6年度に引き続き、震源位置と点群法線ベクトルを用いた6次元クラスタリングによる断層面推定法 (Sawaki et al., 2025a) を発展させるための手法開発を実施した。特に、震源分布が交差する場合などにおける点群法線ベクトルの推定方法の改良を行った。Sawaki et al. (2025a) において、点群法線ベクトルは、震源データを点群とみなし、半径閾値 ( $\epsilon$ -NN) 以内の  $K$  近傍点に対して主成分分析を適用し、最小固有値を持つ固有ベクトルとして推定していた (以降、KNN-PCA)。しかし、複数の平面構造が交差する場合などでは、法線ベクトルの再現度の低いという問題があった。そのため、法線ベクトルの推定精度と頑健性を向上させるために、KNN-PCA を置換しうる二つの手法を提案し、それぞれの性能を評価した。

一つ目の手法は、PCA の代わりに RANSAC (Random Sample Consensus) を用いて、KNN サンプルから最も代表的な平面を抽出するというものである。KNN サンプルからランダムに重複無しで3点を抽出し、その3点を通る平面から各 KNN 点までの距離が閾値以下となるインライアの数 が最も大きい平面を反復的に探索するものである。一方で RANSAC は、インライアであればモデルへの適合度に関わらず一律に評価してしまうことから、距離残差を損失関数として用いる MSAC (M-estimator Sample Consensus) を適用した。つまり、平面  $m$  に対する損失関数  $\mathcal{L}[m]$  を、

$$\mathcal{L}[m] = \sum_{j=1}^K \min \left\{ (n_m \cdot p_j)^2, d_{thres}^2 \right\}$$

と定義することで、より最適な解を探索することにした。その平面の法線ベクトルをもって点群法線ベクトルとし、この手法を手法①と呼称する。

二つ目は、KNN と  $\epsilon$ -NN の中間的性質を持つ相互近傍 (MNN) 探索を行い、MNN の法線ベクトルのクラスタリングを行う手法である。MNN とは、ある2点のペアが互いに相手を KNN とする点の集合であり、 $\epsilon$ -NN で用いる距離閾値というパラメータを入れることなく空間的近接性を確保できる。MNN-PCA で全点の法線ベクトルを計算した後、対象とする点の MNN 点の法線ベクトルに対して絶対コサイン距離を距離指標とした凝集型クラスタリングを実施し、その最大クラスタの正規化平均ベクトルを点群法線ベクトルとした。この手法を手法②と呼称する。これにより、複数の平面的な分布を含む場合も、いずれかに近づくこと

が期待される。

日本海地震・津波調査プロジェクトによる能登半島周辺の断層モデルから、その周辺に等密度で震源を配置したものをテストデータとした。断層鉛直方向に標準偏差 1km の擾乱を与えた。点群法線ベクトルの真値は、各断層の法線ベクトルで定義した。各手法で法線ベクトルを推定したところ、いずれも各断層中心付近ではよく再現できている (図 3)。誤差として真値ベクトルとのなす角を調べたところ、KNN-PCA と手法①では特に断層境界付近で大きく、手法①は KNN-PCA から悪化しているようにも見える。一方、手法②ではこれらに比べて全体的に角度誤差が小さく、KNN-PCA より改善している。これは、MNN によって近傍点の近接性が担保されていることや、凝集型クラスタリングによっていずれかの平面に属する法線ベクトルが選択的に抽出されたことによると考えられる。ただし、領域東側の断層面が V 字谷のように重なっている部分では、手法②でもうまく再現できていない。こうした面の走向が急激に変化する領域では、MNN-PCA で各点の法線ベクトルを計算する際に大きくバイアスを受けている可能性が高く、その結果、局所的な形状が平均化・平滑化された形で推定されたと考えられる。

さらに、本手法を実際の地震データへ適用し、神奈川県西部の地震 (2024 年 8 月 9 日、Mw 5.0) や 2024 年 11 月に陸奥湾で発生した地震群に対して震源クラスタリングを実施した。その結果、震源メカニズム解に調和的な、走向や傾斜の異なる複数の断層面が抽出され、地震テクトニクスの理解に資する断層構造が明らかとなった。神奈川県西部の地震については、解析結果をまとめた論文が国際誌に掲載された (Sawaki et al., 2025b)。

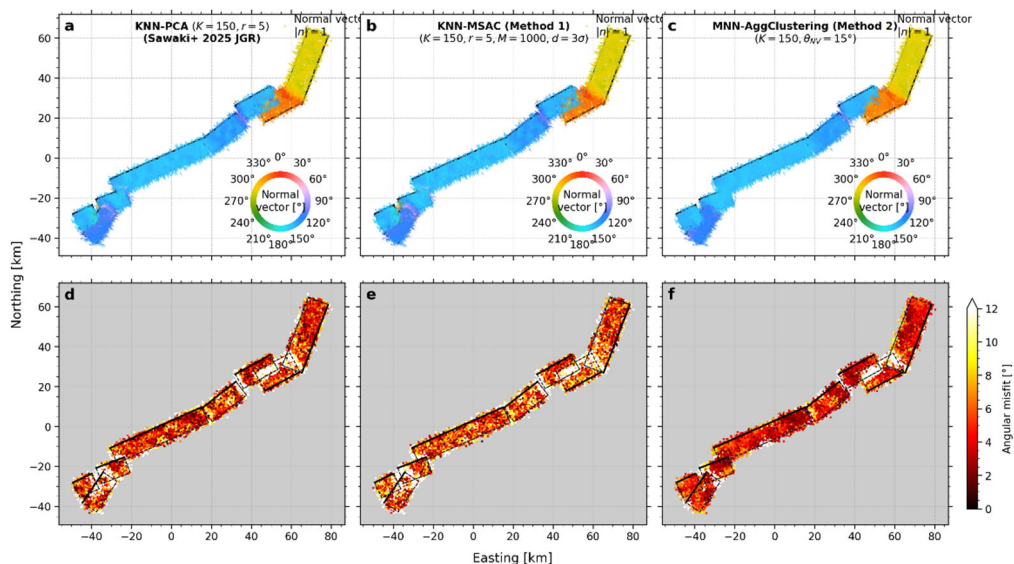


図 3 (a, b, c) 断層モデルから生成した震源分布を用いて推定した点群法線ベクトル。使用した手法は (a) KNN-PCA、(b) 手法①、(b) 手法②である。色は推定した法線ベクトルの方位を示す。(d, e, f) それぞれ (a) (b) (c) において推定した法線ベクトルと真値ベクトルのなす角 (角度誤差)。

(c) 結論ならびに今後の課題

震源位置と点群法線ベクトルを用いた6次元クラスタリングによる断層面推定手法について、法線ベクトル推定手法の改良を行った。相互近傍点探索と凝集型クラスタリングの組み合わせにより、複数の断層面から生成された震源分布に対して、断層境界付近における法線推定が改善された。一方で、断層面がV字谷状に重なり、走向が急激に変化する領域では、再現性が十分でない事例も確認された。これは、法線ベクトル推定段階において、局所的な幾何構造の影響が強く残存したことによるものと考えられる。また、神奈川県西部や陸奥湾、島根県東部の地震などの、突発的な事象に対しても震源クラスタリング法を適用してきた。今後は、震源クラスタリング法の改良を継続しつつ、個別・多様な事例に対して、手法適用を進めていく。

(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 : 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
Fault geometries of the 2024 Mw 7.5 Noto Peninsula earthquake from hypocenter clustering（口頭）	佐脇泰典、 椎名高裕、 寒河江皓大、 佐藤圭浩、 堀川晴央、 宮川歩夢、 今西和俊、 内出崇彦	Seismological Society of America Annual Meeting 2025（米国地震学会2025年年次大会）	2025年4月	国外	○
2024年8月9日に神奈川県西部で発生した地震（Mw 5.0）はプレート境界地震なのか？（口頭）	佐脇泰典、 椎名高裕、 内出崇彦	日本地球惑星科学連合2025年大会	2025年5月	国内	○
Mutsu Bay Seismic Cluster in November 2024（ポスター）	佐脇泰典、 寒河江皓大、 椎名高裕、 今西和俊、 内出崇彦	日本地球惑星科学連合2025年大会	2025年5月	国内	○
Fault Geometries of the 2024 Mw 7.5 Noto Peninsula Earthquake from Hypocenter-	佐脇泰典、 椎名高裕、 寒河江皓大、 佐藤圭	Asia Oceania Geoscience Society 22nd Annual Meeting	2025年7月	国外	○

Based Hierarchical Clustering of Point-Cloud Normal Vectors (口頭)	浩、堀川晴央、宮川歩夢、今西和俊、内出崇彦	(第22回アジア・オセアニア地球科学学会 (AOGS) 年次総会)			
震源クラスタリングにおける点群法線ベクトル推定手法の改良 (ポスター)	佐脇泰典、寒河江皓大、Admore Mpuang、堀川晴央、佐藤圭浩、椎名高裕、内出崇彦	日本地震学会2025年秋季大会	2025年10月	国内	○
Improvement on normal estimation and hypocenter clustering algorithm for unraveling intricate fault structures (ポスター)	佐脇泰典、寒河江皓大、Admore Mpuang、堀川晴央、佐藤圭浩、椎名高裕、内出崇彦	American Geophysical Union Annual Meeting 2025 (米国地球物理学連合2025年大会)	2025年12月	国外	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計1件、うち海外計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
Steep intraplate reverse faulting adjacent to the hypocenter of the 1923 Kanto earthquake: The Mw 5.0 western Kanagawa earthquake in eastern Japan on 9 August 2024	佐脇泰典、椎名高裕、内出崇彦	Earth, Planets and Space	2025年11月	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. 3. 業務題目：(サブテーマ2 B) 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2 A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 研究グループ長	内出 崇彦	R7. 4. 1 ～ R8. 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	R7. 4. 1 ～ R8. 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	Admore Mpuang	R7. 4. 1 ～ R8. 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：

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：

高精度な再決定震源が得られている2024年能登半島地震の海域部に焦点を当て、前年度に開発した手法により非平面断層群を推定した。前年度までに開発した地下断層形状推定手法により、北海道全域の地下断層形状を推定した。

(d) 令和7年度の業務の目的

高精度な再決定震源に非平面断層を抽出する手法を適用し、2024年能登半島地震の海域部の震源断層を非平面断層群として推定した。得られた結果から2024年能登半島地震の破壊過程を考察する。

## (2) 令和7年度の成果

### (a) 業務の要約

海域臨時観測点を含む観測データを用いた高精度な再決定震源データから2024年能登半島地震の海域部の非平面断層面群を推定した。断層群は北東-南西方向に分布し、南西側に南東傾斜の面E、北東側に北西傾斜の2枚の面、両群の間にはほぼ鉛直な面が推定された。本震の破壊過程の解析結果との比較から、走向方向に沿う傾斜角の変化が破壊停止に寄与し得ることが示唆された。また、深層学習で抽出した高密度震源分布に基づき、北海道内陸域の断層面形状を推定し、北海道全域規模の地下断層図を試作した。検出した地震の中には発破も含まれており、それらは除去した。本事業で令和6年度までに開発した手法により地下断層面を推定した。地表断層トレースには見られない地下断層構造も見られたが、地質構造などと整合しており、妥当な結果であると考えられる。

### (b) 業務の成果

#### 1) 曲面断層を推定する手法の開発

前年度は、radial basis functionを用いたimplicit modeling [Carr et al., 2001]を用いて震源データから非平面な構造を抽出する手法を開発し、2016年熊本地震の余震データを解析した。本年度は、手法に改良を加えつつ、2024年能登半島地震の震源断層の分布を推定した。

本業務では、海域臨時観測点を含む観測データを用いた高精度再決定震源(Shinohara et al., 2025) (期間は2024年1月24日~2月22日、1472イベント)を解析した。陸域観測点のみによる震源決定では震源深さが系統的に深く決まる傾向があり(例えば、Shiina et al., 2025)、観測点配置の観点から海域観測を含む後者の方が精度が高いと判断した。

解析の流れは、1) 断層構造と関連しない震源の除外、2) Gaussian Mixture Model (GMM)によるクラスタリング、3) クラスタ連結を検討しながら曲面断層の推定、の3段階である。曲面断層の推定には前年度の業務において作成したimplicit modelingによる手法を改良したものをを用いた。1) では、速度構造によるartifactと判断した深さ2.3 km以下の震源と、HDBSCANにより孤立した震源とされたものを除外した。2) では、外れ値成分を一様分布でモデル化したGMM (Melchior and Goulding, 2018)を用い、混合数2~14の範囲でモデルを選択した。

得られた曲面断層群を図4に示す。断層群は北東から南西に分布する。南西側では、能登半島東端からその先の海域にかけて南東傾斜の曲面(E)が広がる。北東側では北西傾斜の2枚の面(A, C)が認められ、AとCの境界付近から東に広がる面状分布Bも認められるが、緩傾斜である点を踏まえると、実際に面構造が存在するかは更なる検討を要する。このほか、曲面CとEの間にはほぼ鉛直な面状分布Dが推定された。

本業務で得られた結果をHonda et al. (2025)による断層面上の放射エネルギー分布と比較する。彼らの解析では、断層Cに対応する領域ではエネルギー放射がほとんど認められない。これは、この部分では破壊がほとんど進行していないと解釈できる。図にあるとおり、断層Cの浅部では傾斜が急であることから、傾斜角の変化が破壊停止に寄与した可能性があり、幾何的バリア (Aki, 1979) の実態の一つとして走向方向に沿った傾斜角の変

化があると考えられる。

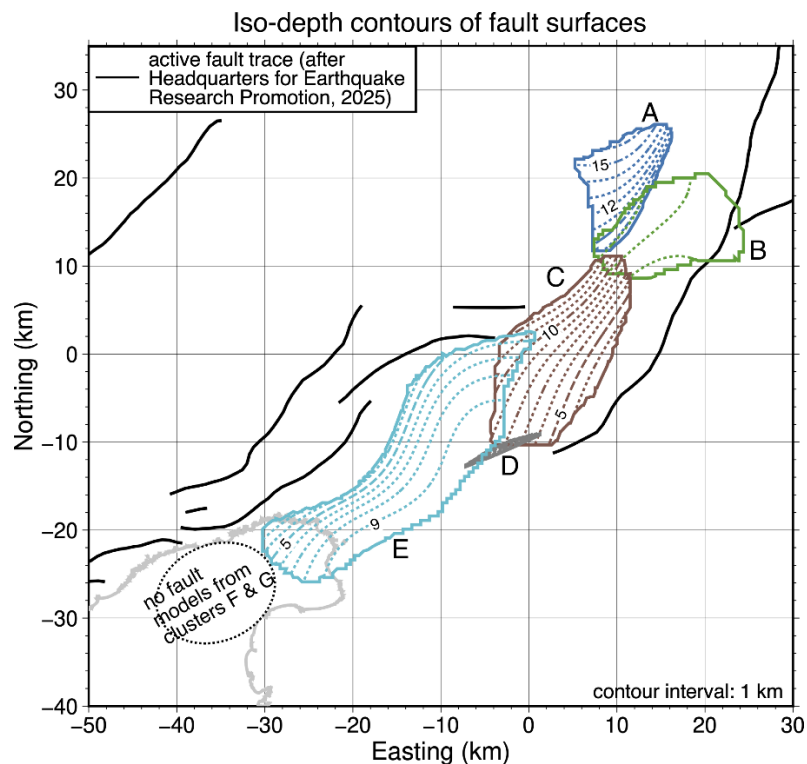


図 4：2024 年能登半島地震の余震データを解析して得られた非平面断層モデル。各断層面内の線は 1 km 間隔で引いた等深線。

## 2) 北海道地域の地下断層地図の試作

深層学習モデルにより検出された高密度震源分布を用い、北海道内陸域の断層面形状を推定し、北海道全域規模の地下断層図を作成した。まずは、日本のデータで学習させた自動検出モデル PhaseNet (Zhu & Beroza, 2019; Naoi et al., 2024) と検出結果を統合する PyOcto (Münchmeyer, 2024) を使用して、防災科研 Hi-net、北海道大学、気象庁の地震観測データから地震を抽出した。その際、札幌管区气象台から提供のあった発破カタログを利用して、発破と思われるイベントを除去した。本事業で開発した手法 (Sawaki et al., 2025a) により、震源分布に対して階層クラスタリングを適用し、各クラスターの法線ベクトル推定結果に基づいて断層面形状を推定した (図 5)。その結果、北海道中央部および東部において、既知の地表断層トレースを補完する連続的な断層構造が抽出され、地域テクトニクスと整合的であることが確認された。

北海道内陸域の地震活動の多くは、地表に明瞭な断層痕跡を示さない伏在断層で生じている可能性が高い。北海道中央部では千島弧と東北日本弧の衝突境界に沿って南北方向の線状構造が卓越し、北海道東部では千島前弧スリバーの走向・運動に類似した北東-南西走向の断層が優勢である。さらに、slip tendency による評価に基づけば、千島弧-東北日本弧境界に沿う断層は、現行の地域応力場 (Uchide et al., 2022) の下で相対的にすべりやすい可能性が高い。以上より、本事業で作成した北海道全域規模の断層図は、将来の地震ハザード評価に資する重要な基礎情報を提供するものである。

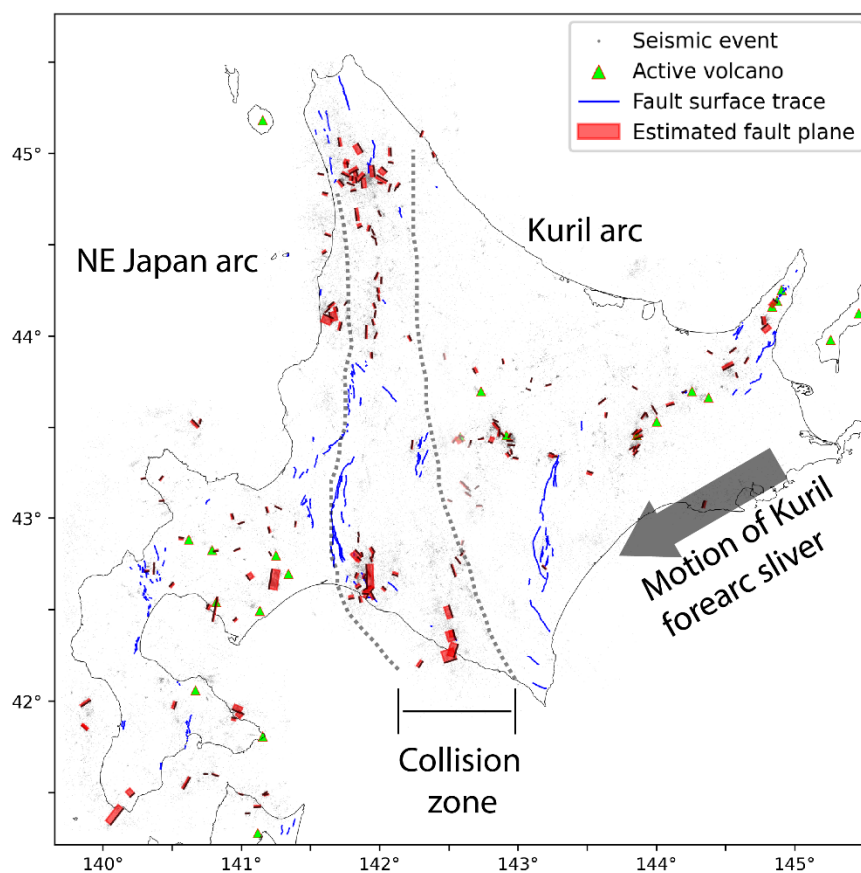


図5 北海道において抽出した断層面形状の地表投影（赤四角）と既知の地表断層トレース（青線）。点線は、東北日本弧と千島弧の衝突帯のおおよその位置を示す。灰色矢印は北海道東部における千島前弧スリバーの運動を示す。

#### (c) 結論ならびに今後の課題

震源データから非平面断層を抽出する手法を開発・改良し、地下の震源断層をより現実的にモデル化できるようになった。その結果、地質・地形学的に推定された断層との対比等により、震源断層の性状をより深く検討する道が開けた。また、断層の傾斜角の変化がバリアーモデルの実態の一つとなり得ることを示した。ただし、モデル作成には未だ手作業が多く、客観的指標に基づく半自動化に向けた手法の改善が必要である。

北海道内陸域の地下断層面形状を、深層学習により検出した高密度震源分布に基づいて推定した。北海道中央部・東部では地域テクトニクスと整合する連続的な断層構造が見られた。この地下断層図は、将来の地震ハザード評価に資するものであると考えられる。今後は、地表断層や地質構造との関係を検討するほか、同様の断層検出を他地域にも展開していく必要がある。

#### (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2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
implicit modelingを用いた余震分布からの非平面断層の同定（口頭）	堀川晴央、内出崇彦	日本地球惑星科学連合2025年大会	2025年5月	国内	○
Deep fault geometries in the Hidaka collision zone in southern Hokkaido revealed by hierarchical clustering of hypocenter distributions（ポスター）	Admore Mpuang、佐脇泰典、椎名高裕、内出崇彦	日本地球惑星科学連合2025年大会	2025年5月	国内	○
震源データから推定された2024年能登半島地震の海域部の非平面断層群（ポスター）	堀川晴央、内出崇彦	日本地震学会2025年秋季大会	2025年10月	国内	○
Mapping deep fault geometries by clustering of deep learning enhanced hypocenter distributions and their normal vectors in Hokkaido（ポスター）	Admore Mpuang、椎名高裕、佐脇泰典、田上綾香、内出崇彦	日本地震学会2025年秋季大会	2025年10月	国内	○

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2C) 推定した断層面形状の可視化手法の開発

### (1) 業務の内容

#### (a) 業務の目的

サブテーマ2Bで得られた断層面の3次元空間における位置や形状を可視化する。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。

#### (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	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	334,000 円	100,200 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：

令和6年度までに推定を進めた断層面に対して、推定に利用された震源分布を3次元空間における位置や形状を可視化し、その観察状況を定量的に取り込むことで、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した。

#### (d) 令和7年度の業務の目的

余震を含めた震源分布は地震を引き起こした断層面あるいは応力集中領域に沿って密集することから、震源分布より断層面を推定・抽出する手法が開発されてきている。中でも震源分布の密集度によって領域推定可能なクラスタリング手法が盛んに研究されている。

しかし、クラスタリング手法のパラメータ設定にクラスタリング結果が強く依存しており、推定される走向・傾斜・位置・大きさといった断層面パラメータが敏感に変化してしまうため、断層面推定パラメータによるクラスタリング手法の客観的な比較が困難である。そこで、本サブテーマ2Cでは、3次元的な震源分布や断層面を可視化しその可視化された形状を人間の高度な視覚認識能力を取り込み、基準となる震源分布あるいは面構造を抽出し客観的な評価尺度の構築を目的とする。

## (2) 令和7年度の成果

### (a) 業務の要約

震源分布から断層面構造を自動推定するクラスタリング手法の客観的な評価尺度を構築することを目的としている。従来、手法のパラメータ依存性が高く、特に断層の「位置」や「広がり」の比較・評価が困難であった。これに対し、本サブテーマでは熟練者の高度な視覚認識能力に着目し、視線トラッキング装置を用いた「人間による面構造の認識」を正解データとして活用する評価手法を構築した。検証の結果、視線の停留時間に応じた重み付け投票により、面構造への注目度を定量化できることを実証し、データ駆動型の断層評価基準の確立に向けた重要な進展を得た。

### (b) 業務の成果

大規模地震発生後の震源分布には、震源域では本震に続き多数の余震が発生するため、断層面構造や応力集中状態が反映される。近年、DBSCAN等のクラスタリング手法を用いて、震源データから断層面パラメータ（走向、傾斜、位置、広がり）を自動抽出する試みが進んでいる(e.g. Ouillon et al., 2008; Piegari et al., 2022)。しかし、これらの手法は探索半径等のパラメータ設定に極めて敏感であり、特に断層の「長さ」や「幅」は抽出される外縁部の震源分布に左右されるため、各クラスタリングによって抽出された断層面の比較が困難という課題がある。

本サブテーマでは、地震学の専門家が目視で行ってきた「面構造の判読」を定量化し、クラスタリング手法を評価するための「人間基準の正解データ」の構築を目指し、3次元震源分布を観察する視線情報を用いた評価システムを構築する。

人間の高度な視覚認識能力を数値化するため、以下のステップで検証実験を実施した。

ステップ1. 『視線トラッキングの導入』

ステップ2. 『重み付け投票アルゴリズムの実装』

ステップ1では、視線トラッキング装置を用い、3次元震源データを探索する被験者の視線をリアルタイムで計測し、視線に一致する震源を選択する。ステップ2では、視線によって選択された震源に対して、注視時間によって震源に対する確信度を加算する。この確信度は、観察者が3次元震源分布を観察した際に、平面を構成する震源とする確信度として利用される。この注視時間に関する確信度の設定は、ディスプレイ上の単なる視線の通過と、平面として確信を持った注視を区別するために実装され、注視継続時間に基づき指数関数的に重みを付ける投票空間によって実装する。これにより、「面構造を探索中の視線」と「面構造を認識した視線」を数理的に分離した。システムの全体的なフローを図6に示す。



図 6 システムフロー

上記のシステムを構築し、検証データを用いて、震源分布に含まれる面構造の抽出を実施した。検証データは、人工的に作成したデータと実データの震源分布を用いた。

### 検証データ 1：人工データ

検証データ 1 では、平面上にランダムで配置した模擬震源を面に直交するようにノイズを与えて完全な面ではない状態とした。また、空間全体にもノイズとして断層面を配置し、断層から外れた震源予測を模擬した。

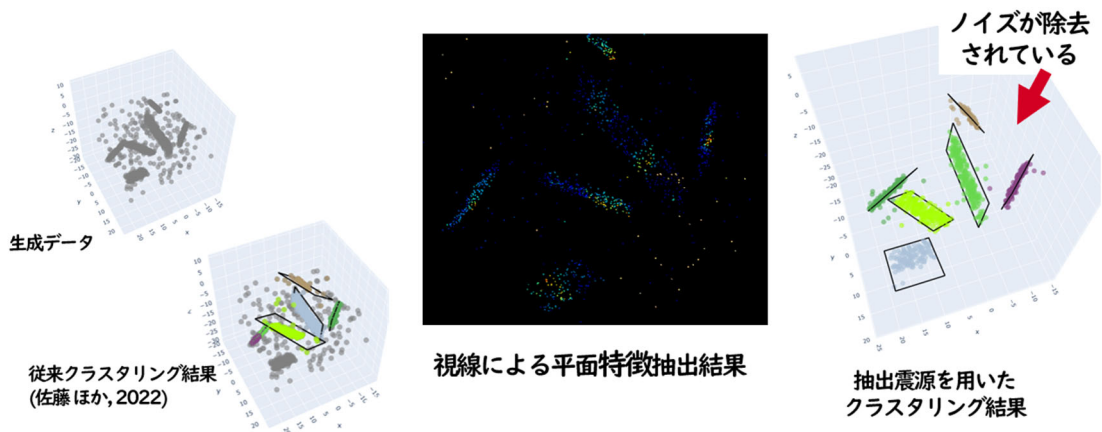


図 7 人工データの検証結果

その結果、余震分布等が多く存在しうる面構造付近を視覚的に観察することで、視覚情報によって抽出された震源分布からはノイズが除去され面構造のクラスタリング結果が向上した。

### 検証データ 2：実データ（茨城県北部の再決定震源分布）

本検証データ 2 で使用した震源分布は、hypoDD 法によって高精度に再決定された震源分布を用いた。実際の断層構造に対する視覚的反応を記録し、震源分布の抽出を実施した。

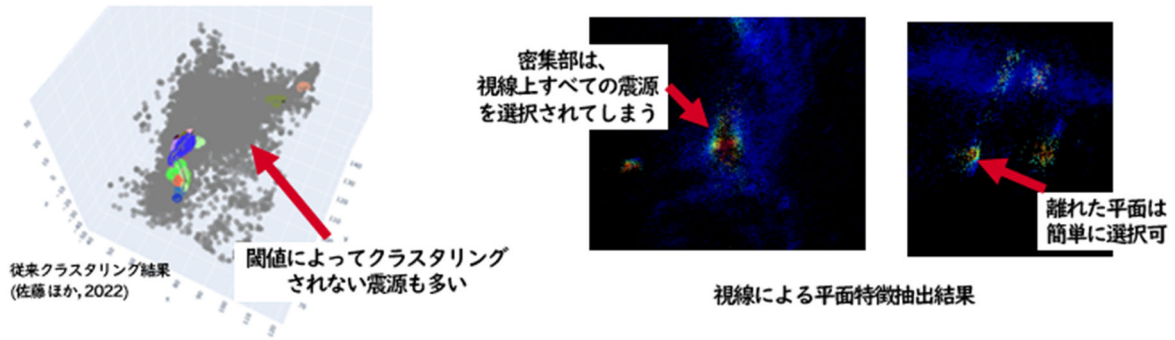


図8 茨城県北部の再決定震源分布を用いた検証結果

その結果、入力する震源分布の状況によって、震源分布が密集し視線上すべての震源を面構造として抽出してしまい、面構造と捉えることが困難であった。入力した震源分布の内、離れた場所に存在する平面上に分布する震源分布は視線情報によって抽出可能なことが確認された。

検証実験により、震源分布に対する注視情報の定量化が可能なが確認された。特に投票空間によって、数値の差を分析することで、人間が「面構造」として強く認識している震源群を客観的に抽出できることを確認した。さらに、視線情報を基にした震源抽出が可能ながことから、各クラスタリング手法が算出した断層パラメータが、人間の認識とどの程度乖離しているかを定量的に比較する基盤が得られることが確認された。従来、統計手法等の改良によって研究が進められてきたクラスタリング手法において、その抽出された断層面の比較には単純な比較では困難であったが、本成果により人間の視覚情報を基に面構造らしい震源を抽出することでクラスタリング手法とは異なる基準を制定が可能となった。

本成果は、抽出可能な視線情報は1人の被験者の結果だけではなく、複数人の抽出結果を蓄積することも可能であり、複数人の結果を基に尤もらしい断層面形状を客観的に抽出することも可能である。今後本手法による震源分布の抽出データベースを構築することで、AIやアルゴリズムによる自動推定結果に対し、地震学的な妥当性を保証するための「客観的な審判役」としての基準を提供するものであり、将来的な断層構造推定の精度向上に大きく寄与するものである。

### (c) 結論ならびに今後の課題

令和7年度の目標である「視覚認識能力を導入した定量的評価手法の構築」に対し、視線トラッキングと重み付け投票を用いた抽出手法を確立し、検証によって面構造の認識差を抽出できることを実証した。これにより、人間基準の正解データ構築が確認された。

今年度の検証では2次元ディスプレイによる3次元投影を実施した。そのため、視線方向の奥行き（前後）にある震源を区別できず、意図しない震源への重複投票が発生する課題が判明した。今後は、3次元表示（3Dディスプレイ、VR/XR）デバイスの活用や、利き目・視差情報を考慮したアルゴリズムへの改良を行い、より高精度な視覚的評価基準の構築を目指す。

(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
視線情報を活用した断層面推定における視覚的評価基準構築に向けた検討（ポスター）	佐藤圭浩、深山覚、内出崇彦	日本地震学会 2025年秋季大会	2025年10月	国内	○

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

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 研究グループ長	内出 崇彦	R7. 4. 1 ～ R8. 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 研究グループ付	椎名 高裕	R7. 4. 1 ～ R8. 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 研究員	雨澤 勇太	R7. 4. 1 ～ R8. 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：

実際の観測データを用いて後続波データセットを整備し、S 波後続波を自動検出するニューラルネットワークモデルの改良とその汎用性の確認を行った。能登半島において地殻内反射面の詳細形状を推定し、サブテーマ 2 A の手法で検出された断層面との空間的な関係を検討した。

(d) 令和 7 年度の業務の目的

昨年度までに行った日本列島内陸部全域における S 波後続波検出の結果に基づき、後続波データセットの整備を進め、その一部を使用して S 波後続波を自動検出するニューラルネットワークモデルの改良可能性を検討する。前年度の簡易的なイメージングにより地殻内反射面の存在が示唆された能登半島において、地殻内反射面の詳細な位置と形状を推定する。推定した地殻内反射面の構造的特徴に加え、同地域の震源分布から検出された震源断層面との空間的な関係を検討する。

## (2) 令和7年度の成果

### (a) 業務の要約

令和6年度までに行った日本列島内陸部全域における S 波後続波検出の結果に基づき、後続波データセットの整備を Hi-net および気象庁の観測点 50 地点について進めた。整備済みのデータセットの一部を使用して、S 波後続波を自動検出するニューラルネットワークモデルの改良可能性を検討し、1 観測点のデータのみで学習させた初期モデルに比べ、より汎用的なモデルが作成できることを確認した。また、令和6年度の簡易的なイメージング解析で地殻内反射面の存在が示唆された能登半島北東端周辺で収集した後続波の観測データに対して、マルコフ連鎖モンテカルロ法 (MCMC 法) により反射面推定手法を適用した結果、深さ約 15-25km に南西傾斜の地殻内反射面が推定された。この地殻内反射面は 2024 年能登半島地震の震源断層面や群発地震活動に関連した断層面の深部に位置する。一方で、異なる走向と傾斜を持つことから、浅部地震活動域に存在する断層面とは異なる構造を反映していると考えられる。

### (b) 業務の成果

#### 1) 後続波の自動検出手法の改良

令和6年度までに行った日本列島内陸部全域における S 波後続波検出の結果に基づき、後続波データセットの整備を Hi-net および気象庁の複数観測点について進めた。1 観測点あたり 200 地震について S 波後続波の有無を目視で確認し、ラベル付けを行った。また、そのための GUI アプリを開発した。

S 波後続波を自動検出するニューラルネットワークモデルの汎用性向上を目的として、後続波データベースから 1250 地震分のデータを用いて、令和4年度に作成したモデルのファインチューニングを試行した。令和4年度に作成したモデル (初期モデル) の畳み込み中間層に対して全層、第2層以降、第3層以降、第4層以降と学習済み重みの凍結解除層を変え、それぞれについてモデルをファインチューニングした。テストデータは2観測点から100地震分のデータを用いて作成し、これらの観測点のデータはファインチューニングでは使用しない。図9に初期モデルとファインチューニングを行ったモデルの (改良モデル) のテスト結果の ROC (Receiver Operating Characteristics) 曲線を示す。初期モデルでは AUC (Area Under the Curve) が 0.686 と低く、モデルがほとんど機能していない (図 9a)。一方、改良モデルでは AUC は 0.857~0.917 と大幅に向上した。また、凍結解除層が多いほど AUC は向上する傾向にあり、第1層以降を対象にファインチューニングを行ったモデルで AUC は最高 (0.917) となった (図 9b)。1 観測点のデータのみで学習した初期モデルは多様な波形形状・到来時刻をもつ S 波後続波に対して十分に機能しなかったが、多数の観測点のデータを用いてより多様な S 波後続波を追加学習したことで、改良モデルはより汎用的なモデルになったと考えられる。

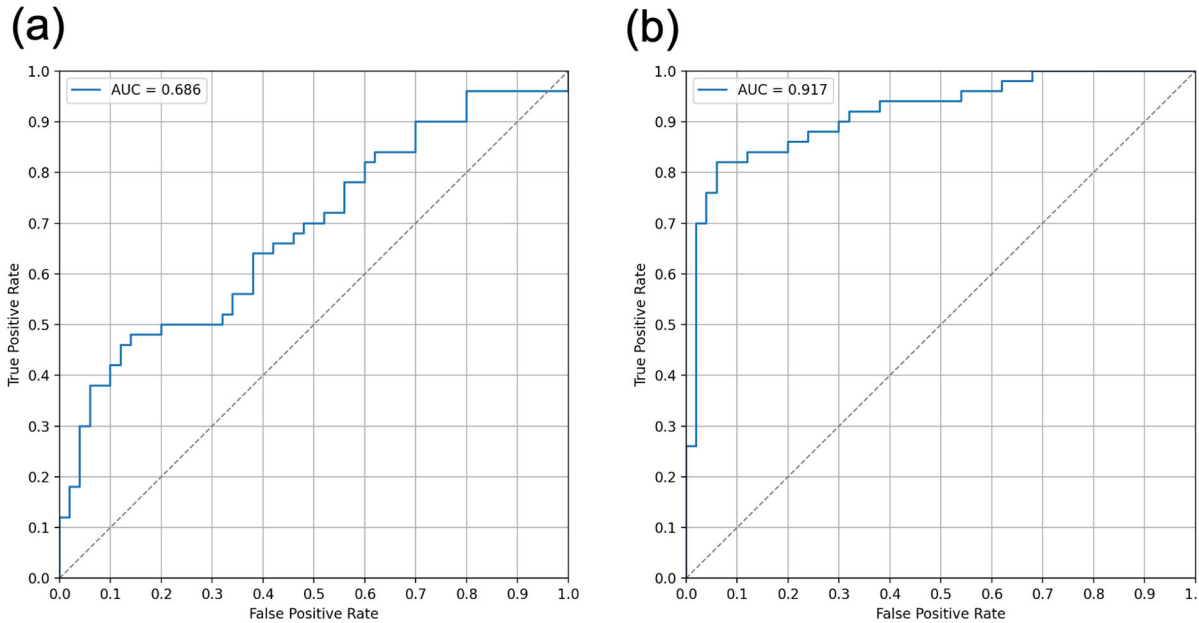


図 9 (a)初期モデルおよび(b)改良モデルのテスト結果。青色の線は ROC 曲線を示す。破線は AUC=0.5 の ROC 曲線を示す。

## 2) 能登半島の地下断層周辺における地殻内反射面の推定

1) で検出した後続波のうち、能登半島北東端の観測点で観測された後続波を用いて地殻内反射面の推定を試みた。具体的には、能登半島北東端部に位置し、目視確認により振幅が明瞭な後続波の観測およびその自動検出が確認された次の4つの観測点である(図10の濃赤): N. SUZH、N. UCUH、N. YGDH、SUZU。これらの観測点では、合計して181個の地震から、198の後続波が同定され、そのピーク振幅の到達時刻が検出された。なお、本解析で対象とする後続波の最大振幅の到達時刻は、モホ面を想定した深さ30kmの反射面による反射波の到達時刻よりも明らかに小さく、より浅部に後続波を励起する不均質構造の存在が示唆される。

本解析ではMCMC法を用いたShiina et al. (2024)の手法を用いて地殻内反射面の位置と形状を推定した。MCMC法を実施するために設定する各種のパラメータはShiina et al. (2024)を参考にして、試行錯誤的に決定した。また、反射面の面積が増大する方向の探索に罰則を与える先見情報を与えることで、面積が過大となることを抑制した。また、振幅が最大振幅の半分となる時間幅(半値幅)を算出し、その平均値(0.9s)を観測誤差とした。

推定された地殻内反射面は能登半島北東端部からその東海岸線沿いに位置し、上端の深さは13.48kmに分布する(図11)。この深さは2024年能登半島地震の震源断層面(Sawaki et al., 2024)やこの地震に先行した群発地震活動に関連すると考えられている断層面(Nishimura et al., 2023)より深い(図12)。特に、この地殻内反射面に対して期待される後続波の励起源はこれら2つの断層面の深部延長に位置する。一方で、浅部の断層面が南あるいは南東傾斜であるのに対して、地殻内反射面は北西傾斜を示す。このため、本解析で推定した地殻内反射面は浅部地震活動域に存在する断層面とは異なる構造を反映して

いると考えられる。

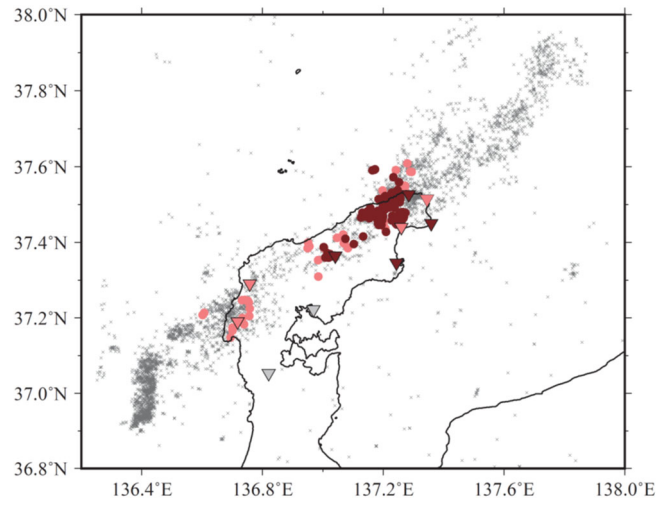


図 10 本解析で使用した後続波が観測された震源と観測点の分布。丸および点が震源、逆三角形が観測点を表す。シンボルの色は以下を表す：濃赤が本解析で使用した震源と観測点、淡赤が後続波は観測されたが不明瞭な震源と観測点、灰がそれ以外の震源と観測点。

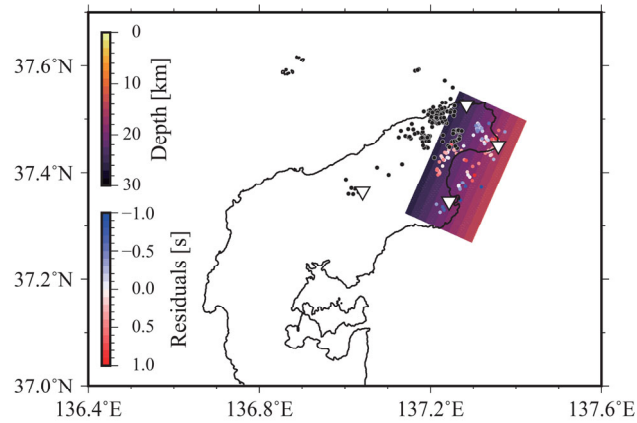


図 11 推定された地殻内反射面の分布。矩形が地殻内反射面に対応し、色はその深さを意味する。黒丸は震源位置である。丸（色付き）は推定された反射面に対して期待される反射点（後続波励起源）の分布を残差分布とともに示す。

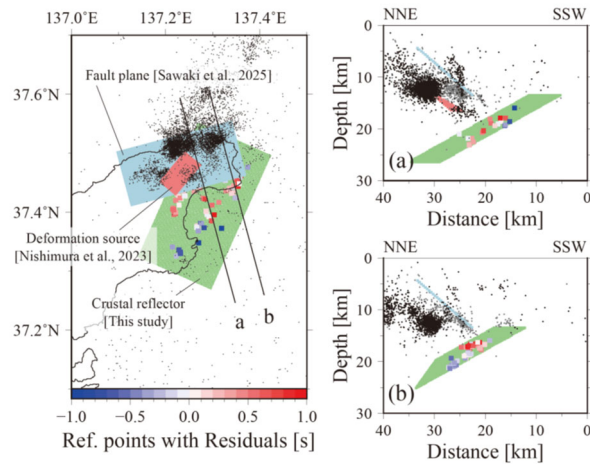


図 12 地殻内反射面と浅部地震活動域における断層面との比較。(左) 本解析で推定した地殻内反射面を緑矩形で、2024 年能登半島地震の震源断層面 (Sawaki et al., 2024) および先行した群発地震活動に関連した断層面 (地殻変動の励起源 (Nishimura et al., 2023)) をそれぞれ淡青矩形と淡赤矩形で示す。黒点は地震の分布。色付きの丸は推定された地殻内反射面に対して期待される反射面 (後続波励起源) の位置を示す。(右) 北北西—南南東の鉛直断面図。測線から幅 5 km 以内の地殻内反射面、震源断層面、震源、反射点を示す。

(c) 結論ならびに今後の課題

実際の観測データを用いて S 波後続波データベースを作成し、S 波後続波を自動検出するニューラルネットワークモデルをファインチューニングした。その結果、1 観測点のデータのみで学習させた初期モデルに比べ、より汎用的なモデルが作成できることを確認した。今後の課題は、S 波後続波データベースをさらに増強するとともに、より効果的に再学習可能なモデルアーキテクチャを探索しつつより高性能なモデルを作成することである。

能登半島北東端部において、収集した後続波の観測データから地殻内反射面の位置と形状の推定を行い、地殻内反射面が 2024 年能登半島地震の震源断層面などのほぼ直下に分布することを明らかにした。しかし、傾斜方向が明らかに異なり、浅部地震活動域に存在する断層面とは異なる構造を反映していると考えられる。今後は浅部および深部地殻構造の関連を明らかにするうえで、他地域への展開と膨大な観測データをより活用して反射面形状の精緻化が必要と考えられる。

(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 2 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
独立ベクトル分析による S 波後続波の自動	雨澤勇太、 中村友彦、	日本地震学会 2025 年度秋季大会	2025 年 10 月 20 日	国内	○

抽出（ポスター）	深山覚、椎名高裕、内出崇彦				
能登半島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、中村友彦、深山 覚、堀川晴央、佐脇泰典、内出崇彦	日本地震学会2025年度秋季大会	2025年10月20日	国内	○
Automatic detection and extraction of later phase in S coda using machine learning for crustal heterogeneity exploration（ポスター）	雨澤勇太、中村友彦、椎名高裕、深山覚、緒方淳、黒田大樹、内出崇彦	12th ACES（APEC Cooperation for Earthquake Science）International Workshop	2025年11月5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. 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、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 研究グループ長	内出 崇彦	R7. 4. 1 ～ R8. 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：

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：

機械学習による自動検測モデルの学習・性能評価に利用可能な、検測付き臨時地震観測

波形データセットを整備し、オンラインで公開した。また、国内で広く用いられる地震波形データ形式 (WIN/WIN32) を Python (ObsPy) で扱うための読み込みモジュール io\_win32 を開発・公開し、国内データの前処理・解析を効率化する基盤を整備した。

(d) 令和7年度の業務の目的

情報科学を活用した地震調査研究基盤の整備を目的として、機械学習による自動検出モデルの学習・性能評価に利用可能な検出付き地震波形データセットの整備と公開を進めるとともに、国内で広く用いられる地震波形データ形式 (WIN/WIN32) を解析環境 (Python/ObsPy) から容易に利用できるソフトウェア (io\_win32) を開発・公開し、データ利活用の効率化と再現性向上を図る。

## (2) 令和7年度の成果

### (a) 業務の要約

情報科学を活用した地震調査研究基盤を整備することを目的として、(1) 機械学習による自動検出モデルの学習・評価に資する臨時地震観測波形データセットを構築し、(2) 国内で広く利用される WIN/WIN32 形式の波形を Python の ObsPy で扱うための読み込みモジュール io\_win32 を開発・公開した。データセットは臨時観測記録から波形を選定し、P 波・S 波到達時刻と P 波初動極性を人手で検出のうえ品質管理を行い、利用しやすい形で整備した。io\_win32 は WIN/WIN32 ファイルを高速に読み込み、ObsPy の Stream として取り込めるようにした。以上により、国内データの前処理・解析の効率化と機械学習応用の促進が期待される。データセットとモジュールは地質調査総合センター研究資料集で公開した。

### (b) 業務の成果

#### 1) 地震波形データセット

過年度から継続して、機械学習による地震波自動検出モデルの学習および性能評価を目的として、産業技術総合研究所地質調査総合センターが過去に実施した臨時地震観測により得られた、三重県飯高地域、山梨県東部地域、茨城県北部地域の観測記録を整理してデータセットを作成した。

震源深さ、震央距離、マグニチュードといった地震特性が可能な限り均一な分布となるよう配慮し、地震波形データを選別した。また、1 地震あたり最大 3 観測点までに限定した。選定された波形に対しては、P 波・S 波到達時刻および P 波初動極性を人手で検出し、熟練者による確認を重ねることで、教師データとして十分な精度と信頼性を確保した。

品質管理として、到達時刻の判定が困難な波形、複数地震が混在する波形、機器不良等による異常波形を除外した。最終的に採用したデータは、各地震・観測点ごとに、3 成分波形を 100 Hz に再サンプリングし、P 波・S 波を含む 100 秒間の波形として切り出した。これを 1 セットと定義し、合計 10,049 セットからなるデータセットを構築した (図 13)。

データセットは、SeisBench の WaveformDataset 形式で利用可能な構成とし、波形データは HDF5 形式、メタデータは CSV 形式で整理した。メタデータには、震源・観測点情報、走時、到達時刻、初動極性、S/N 比など、機械学習や検証に有用な情報を網羅的に含めている。本データセットは、地質調査総合センター研究資料集でインターネット上にて公開した (内出ほか, 2026)。地震波自動検出や関連する機械学習研究の基盤データとして、幅広い活用が期待される。

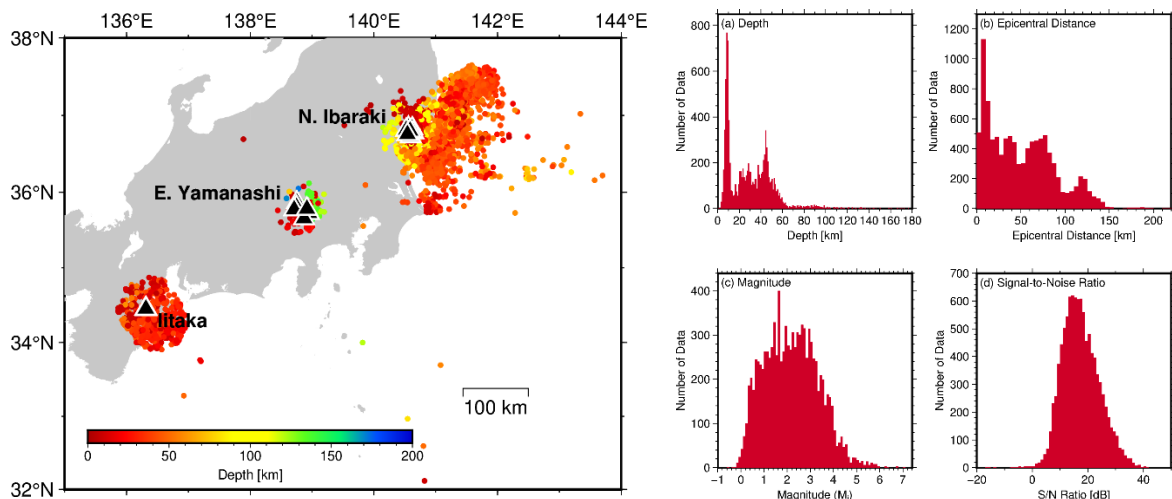


図 13 本データセットに収録した地震波形データの震源位置（丸印；色は深さを示す）と地震観測点の位置（▲印）（内出ほか，2026）。”Iitaka”，”E. Yamanashi”，”N. Ibaraki” はそれぞれ三重県飯高地域、山梨県東部地域、茨城県北部地域を示す。

## 2) 本事業で開発した計算機プログラムの公開

日本で広く用いられている地震波形データ形式（WIN、WIN32）を Python から扱うため、読み込みモジュール `io_win32` を開発・公開した。国内の地震波形データは WIN/WIN32 形式で提供されることが多い。Python による地震波形解析では `ObsPy` が事実上の標準である。`io_win32` は WIN および WIN32 ファイルを読み込み、`ObsPy` の Stream オブジェクトとして取り込むことで、既存の解析ワークフローにそのまま接続できる。

WIN 形式は東京大学地震研究所で開発され、その後、防災科学技術研究所により拡張されたものが WIN32 形式である。これらの形式は、国内の地震波形データ収録装置やデータ伝送で広く使用されているため、`io_win32` は国内データの前処理・解析の効率化に有用である。`io_win32` は地質調査総合センター研究資料集で公開した（内出，2026）。今後、Python による波形解析、とくに機械学習用途での活用が期待される。

### (c) 結論ならびに今後の課題

臨時地震観測記録を対象として、機械学習による自動検出モデルの学習・性能評価に利用可能な検出付き地震波形データセットを整備し、`SeisBench` の `WaveformDataset` 形式で利用できるよう形で公開した。あわせて、国内で広く用いられる WIN/WIN32 形式の地震波形を Python (`ObsPy`) で扱うための読み込みモジュール `io_win32` を開発・公開し、国内データを用いた解析・再利用を進めるための基盤を整備した。モジュールについては、本事業などの研究業務を通じた動作確認を重ねているが、利用しているパッケージの更新などに合わせてアップデートを行う必要がある。

### (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、うち国外計 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
機械学習のための臨時地震観測データセットの作成（ポスター）	内出崇彦、松下レイケン、椎名高裕、堀川晴央	日本地震学会2025年度秋季大会	2025年10月	国内	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計2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
WIN/WIN32フォーマット地震波形データ読み込み用Pythonモジュール: io_win32	内出崇彦	地質調査総合センター研究資料集	2026年3月	国内	○
機械学習モデルの学習のための臨時地震観測データセット	内出崇彦、松下レイケン、椎名高裕、堀川晴央	地質調査総合センター研究資料集	2026年3月	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
io_win32	WIN ファイル及び WIN32 ファイルを読み込んで、そのデータの入った ObsPy の Stream オブジェクトを返す Python パッケージ

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。

本年度は特に、令和6年度までに開発した手法を活用して実際に地下断層形状を明らかにし、その成果を地震ハザード評価に活用する道筋をつけるために、北海道地域全域の地下断層形状推定に取り組んだ。地域全体を対象にすることで新たな課題が掘り起こされることも期待していた。実際、深層学習モデルを活用した自動検測と検測結果統合によって得られた地震カタログには、自然地震ではなく発破によるイベントも入ってしまったことが明らかになった。また、地表断層との関連が明確ではない地下断層の存在も明らかになった。これらの地下断層の形状は、地質構造や重力異常と整合することから、一定の正当性があると考えられる。実際に地下断層を広範囲で直接的に観察することは困難であるが、このように多様な観点から検討することが必要である。また、ここでは単に「断層」と呼んでいるが、実際に一枚の断層だけを見つけ出しているのではなく、厚みを持った「断層帯」を検出していると考えられる。このような考え方についても、今後、観測データに基づいた検討が必要になる。

令和7年度で本事業は終了となった。今後も様々な形で研究を継続していくことになる。その一つが、令和7年9月に開始した産総研地質調査総合センターと米国地質調査所の共同研究である。今後は日米両国の地震ハザード評価に貢献することを狙って、地下断層形状のどのような特徴が重要になるかを念頭に置いて研究を進めていく予定である。

#### 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、滋賀県と分散しており、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35回：2025年5月19日14時～16時
- 第36回：2025年6月23日13時～15時
- 第37回：2025年7月14日13時～15時
- 第38回：2025年10月27日13時～14時30分
- 第39回：2025年11月10日14時～15時30分
- 第40回：2025年11月21日10時30分～12時
- 第41回：2026年1月9日13時30分～15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：2025年4月24日・25日
- 第2回：2025年7月22日13時30分～16時15分
- 第3回：2026年2月13日13時40分～16時25分（於：産総研 つくばセンター）
  - 内出 崇彦「開会挨拶・STAR-E AIST のご紹介」
  - Admore Mpuang "Hidden inland faults in the Hokkaido region mapped from deep-learning-based hypocenter distributions"
  - 堀川 晴央「implicit modeling を用いた余震分布からの非平面断層モデルの構築」
  - 伊藤 信貴「弱教師あり学習について」

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。また、STAR-E 研究フォーラムに協力し、内出崇彦が本事業の研究成果を発表した。

## 5. むすび

最終年度の迎えた本事業では、得られた成果の社会実装を見据えた研究展開を行った。解析しやすいデータを解析するのではなく、地域にある地震を丸ごと解析するというところで新たな困難に当たった。これからは更に、地域展開の結果を地震ハザード評価に活かしていくという段階を見据えることになるが、また新たな困難に直面することは想像に難くない。基礎研究から始まった本事業を応用研究、社会実装に向けて発展させる歩みを今後も続けていきたいと考えている。

5年度に亘る本事業で4名のポスドク（産総研特別研究員）を雇用した。3名は大学教員（うち1名はその後産総研常勤研究職員）、1名は大学のポスドクとして次の職を得ることとなり、機械学習を活用した地震研究の経験を積んだ人材を輩出することができた。本事業開始当初に目標としていた人材育成には概ね成功したと考えている。

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、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、能登半島東方沖における能登半島地震の余震カタログ（Shinohara et al., 2025）を用いた。また、札幌管区気象台には発破のイベントカタログをご提供いただいた。計算には産総研 ABCI 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
Automatic Phase Picking Model for Ocean Bottom Seismic Data: PhaseNet Model Trained Using Japanese S-net Data (ポスター)	内出崇彦	Seismological Society of America Annual Meeting 2025 (米国地震学会 2025 年年次大会)	2025 年 4 月	国外
Fault geometries of the 2024 Mw 7.5 Noto Peninsula earthquake from hypocenter clustering (口頭)	佐脇泰典、椎名高裕、寒河江皓大、佐藤圭浩、堀川晴央、宮川歩夢、今西和俊、内出崇彦	Seismological Society of America Annual Meeting 2025 (米国地震学会 2025 年年次大会)	2025 年 4 月	国外
2024 年 8 月 9 日に神奈川県西部で発生した地震 (Mw 5.0) はプレート境界地震なのか? (口頭)	佐脇泰典、椎名高裕、内出崇彦	日本地球惑星科学連合 2025 年大会	2025 年 5 月	国内
Mutsu Bay Seismic Cluster in November 2024 (ポスター)	佐脇泰典、寒河江皓大、椎名高裕、今西和俊、内出崇彦	日本地球惑星科学連合 2025 年大会	2025 年 5 月	国内
implicit modeling を用いた余震分布からの非平面断層の同定 (口頭)	堀川晴央、内出崇彦	日本地球惑星科学連合 2025 年大会	2025 年 5 月	国内

Deep fault geometries in the Hidaka collision zone in southern Hokkaido revealed by hierarchical clustering of hypocenter distributions (ポスター)	Admore Mpuang、佐脇泰典、椎名高裕、内出崇彦	日本地球惑星科学連合 2025 年大会	2025 年 5 月	国内
Fault Geometries of the 2024 Mw 7.5 Noto Peninsula Earthquake from Hypocenter-Based Hierarchical Clustering of Point-Cloud Normal Vectors (口頭)	佐脇泰典、椎名高裕、寒河江皓大、佐藤圭浩、堀川晴央、宮川歩夢、今西和俊、内出崇彦	Asia Oceania Geoscience Society 22nd Annual Meeting (第 22 回アジア・オセアニア地球科学学会(AOGS)年次総会)	2025 年 7 月	国外
震源クラスタリングにおける点群法線ベクトル推定手法の改良 (ポスター)	佐脇泰典、寒河江皓大、Admore Mpuang、堀川晴央、佐藤圭浩、椎名高裕、内出崇彦	日本地震学会 2025 年秋季大会	2025 年 10 月	国内
震源データから推定された 2024 年能登半島地震の海域部の非平面断層群 (ポスター)	堀川晴央、内出崇彦	日本地震学会 2025 年秋季大会	2025 年 10 月	国内
Mapping deep fault geometries by clustering of deep learning enhanced hypocenter distributions and their normal vectors in Hokkaido (ポスター)	Admore Mpuang、椎名高裕、佐脇泰典、田上綾香、内出崇彦	日本地震学会 2025 年秋季大会	2025 年 10 月	国内
視線情報を活用した断層面推定における視覚	佐藤圭浩、深山覚、内出	日本地震学会 2025 年秋季大会	2025 年 10 月	国内

的評価基準構築に向けた検討（ポスター）	崇彦			
独立ベクトル分析による S 波後続波の自動抽出（ポスター）	雨澤勇太、中村友彦、深山覚、椎名高裕、内出崇彦	日本地震学会 2025 年度秋季大会	2025 年 10 月	国内
能登半島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、中村友彦、深山覚、堀川晴央、佐脇泰典、内出崇彦	日本地震学会 2025 年度秋季大会	2025 年 10 月	国内
機械学習のための臨時地震観測データセットの作成（ポスター）	内出崇彦、松下レイケン、椎名高裕、堀川晴央	日本地震学会 2025 年度秋季大会	2025 年 10 月	国内
Automatic detection and extraction of later phase in S coda using machine learning for crustal heterogeneity exploration (ポスター)	雨澤勇太、中村友彦、椎名高裕、深山覚、緒方淳、黒田大樹、内出崇彦	12th ACES (APEC Cooperation for Earthquake Science) International Workshop	2025 年 11 月	国外
Improvement on normal estimation and hypocenter clustering algorithm for unraveling intricate fault structures (ポスター)	佐脇泰典、寒河江皓大、Admore Mpuang、堀川晴央、佐藤圭浩、椎名高裕、内出崇彦	American Geophysical Union Annual Meeting 2025 (米国地球物理学連合 2025 年大会)	2025 年 12 月	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
Steep intraplate reverse faulting adjacent to the hypocenter of the	佐脇泰典、椎名高裕、内出崇彦	Earth, Planets and Space	2025年11月	国外

1923 Kanto earthquake: The Mw 5.0 western Kanagawa earthquake in eastern Japan on 9 August 2024				
WIN/WIN32フォーマット地震波形データ読み込み用Pythonモジュール: io_win32	内出崇彦	地質調査総合センター研究資料集	2026年3月	国内
機械学習モデルの学習のための臨時地震観測データセット	内出崇彦、松下レイケン、椎名高裕、堀川晴央	地質調査総合センター研究資料集	2026年3月	国内

(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