

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4年度
成果報告書

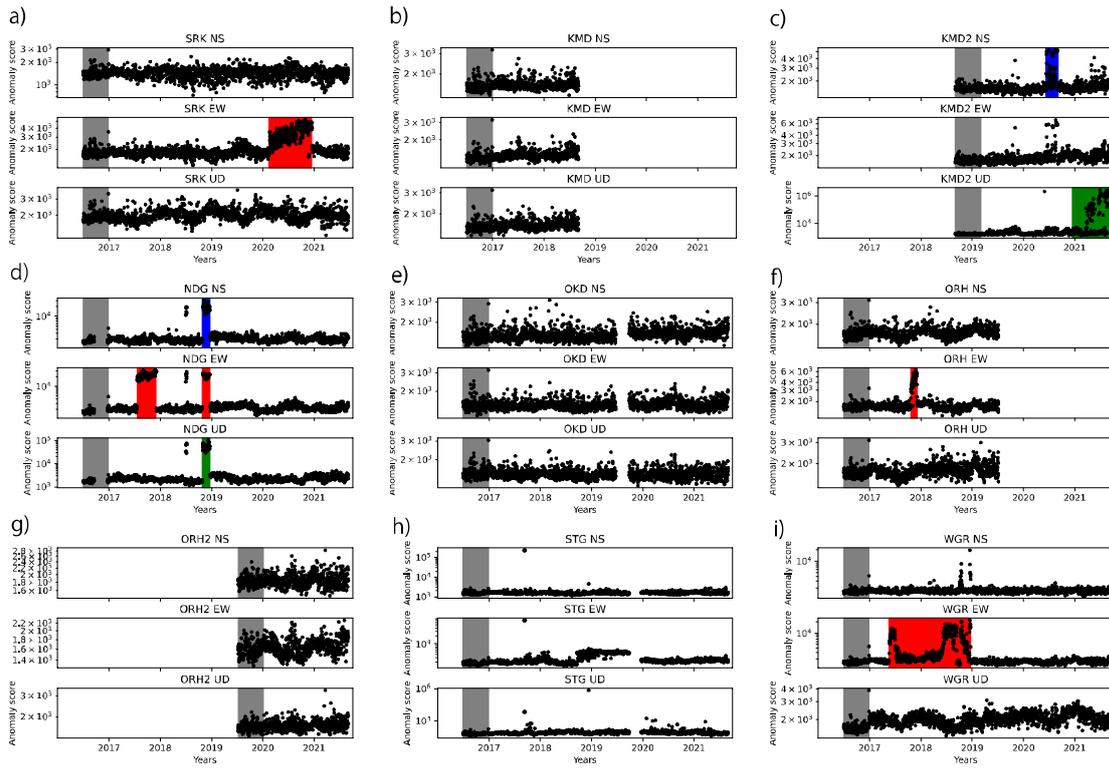
令和5年5月

文部科学省 研究開発局

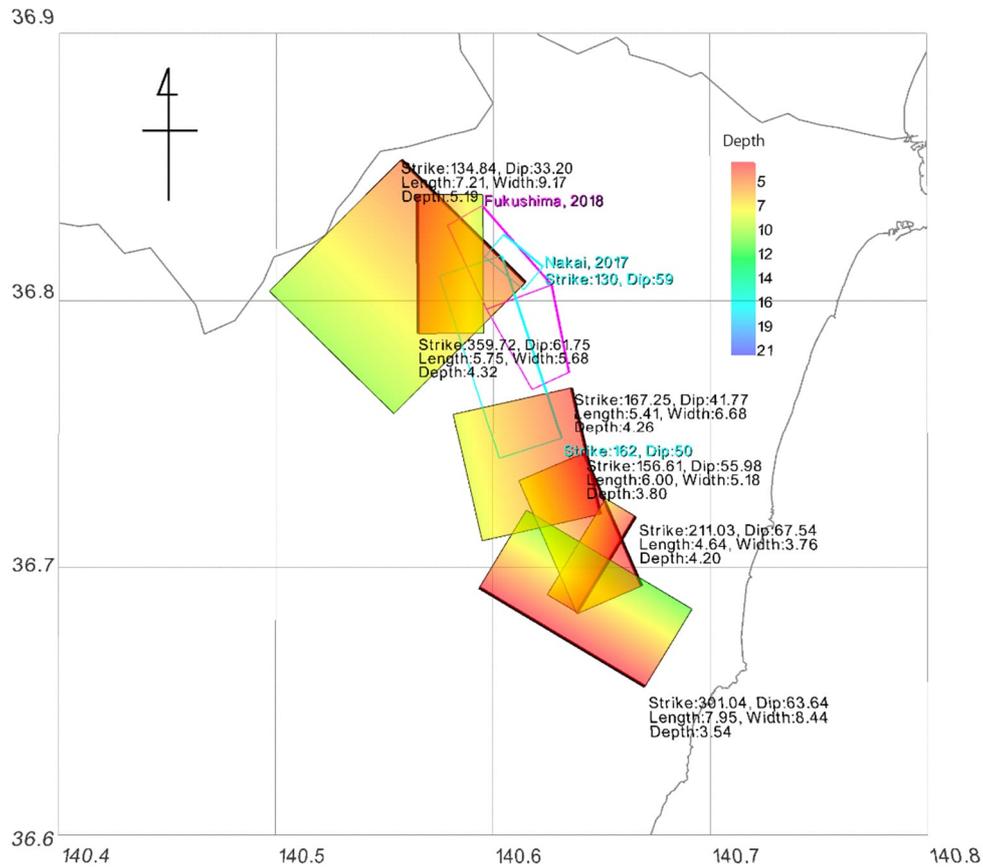
国立研究開発法人 産業技術総合研究所

本報告書は、文部科学省の令和4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4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。

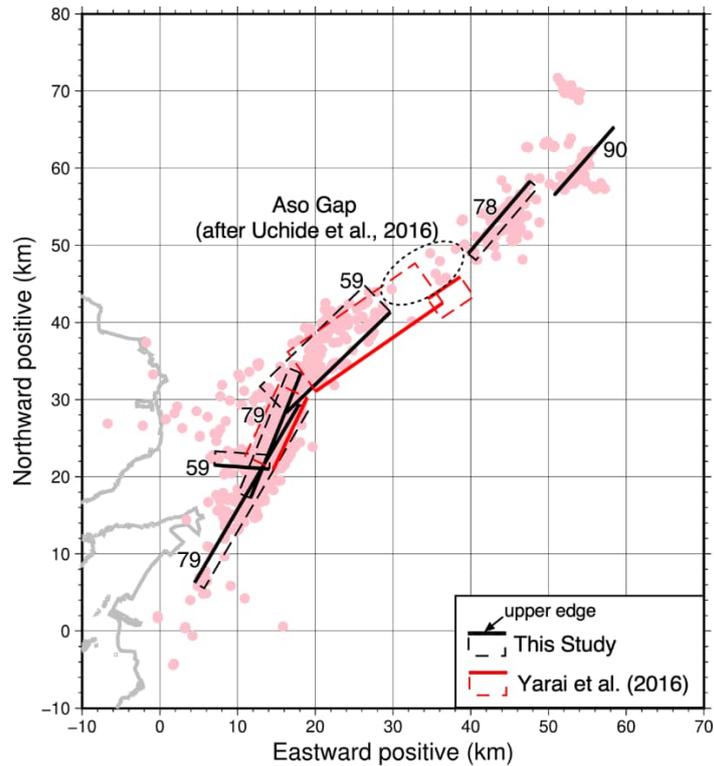
グラビア



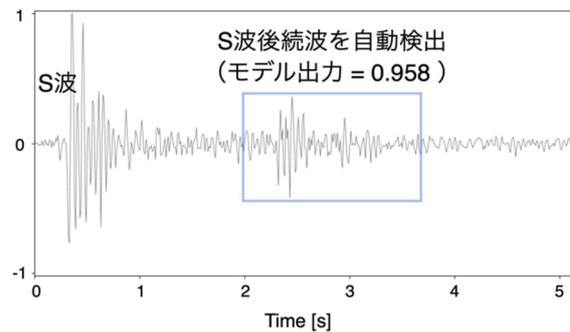
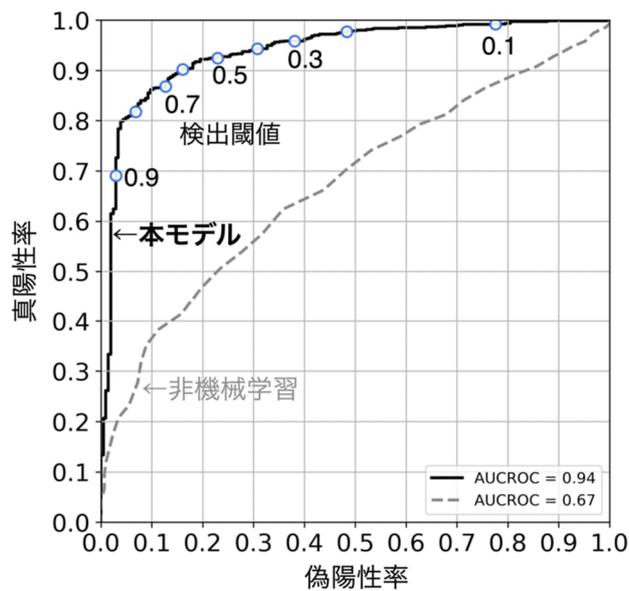
地震波形データ異常検知システムによる異常イベントの検出例（異常スコアの一日平均）。観測点ごとに、上から順に南北（NS）、東西（EW）、上下（UD）の各成分を示す。青、赤、緑は成分間の振幅比（EW/UD、NS/EW）に基づいて認定した異常期間を表す。灰色は学習に用いたイベントデータの期間を示す。提案手法は、特定の周波数の特徴に基づいて異常を検知する従来法(Zaccarelli et al., 2021)を上回る結果が得られることを確認した。



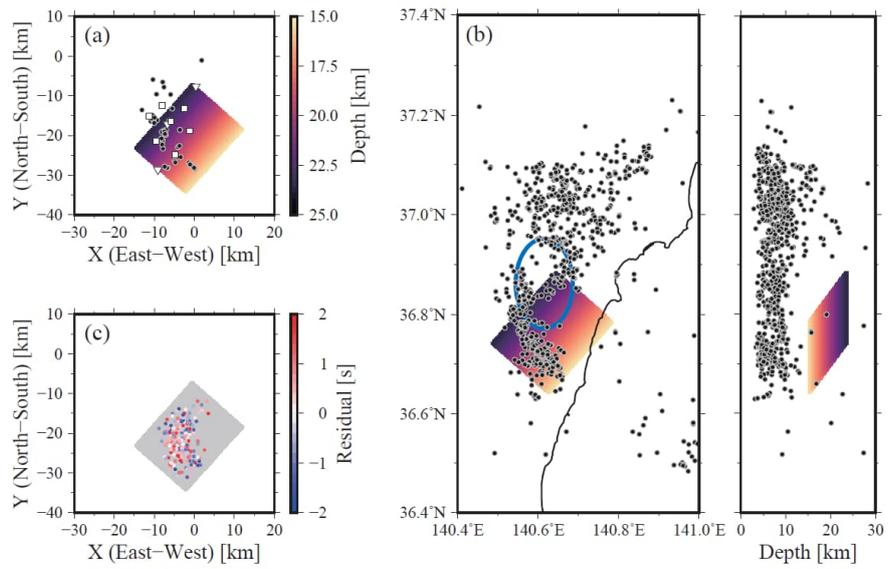
茨城県北部の地震の余震分布を用いて断層面を推定した結果。グラデーション矩形が検出された断層面を示す。深さにより配色した。矩形の太い実線が最も浅い辺を示す。矩形の側に「走向および傾斜角」「断層面の長さ」と幅」「断層面上辺の深度」を示す。InSAR 解析による 2011 年・2016 年茨城県北部の地震の断層モデル（紫色：Fukushima et al. (2018)；水色：仲井ほか (2017)）を比較のために示す。



本業務で開発した有限混合モデルにより推定された 2016 年熊本地震の断層分布。黒い四角形は本業務で得られた断層面を地表に投影したもの。断層の脇に付した数字はそれぞれの断層の傾斜角。赤い四角形は矢来ほか(2016)による断層モデルを地表に投影したもの。入力データとした震源データの震央を桃色の丸印で示す。入力データは、志藤ほか [2020] の震源カタログのうち、本震発生後 24 時間以内の余震。



S波後続波の自動分類モデルのテスト結果と未知データからの検出例。左図は学習済みモデルのテスト結果（実線）と機械学習に依らない方法による結果（破線）の受信者操作特性曲線とその AUCROC（値域[0, 1]で、1に近いほど良好な検出性能を示す）。右図は学習済みモデルによる未知データからの S波後続波の検出例。



反射波の到達時刻を用いて推定した地殻内反射面の分布。(a) 黒丸は推定に使用した地震の震央分布を、三角と四角は観測点位置を示す。(b) 黒丸は2003年4月から2021年1月までに発生したマグニチュード3.5-4.5の地震の震央位置を示す。青楕円は臼田・他(2021)が示した地殻内反射面の分布を表す。(c) 推定された地殻内反射面上に期待される反射点の分布。色は到達時刻残差に対応。

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事は、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、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	v
目次	vi
1. 研究課題の概要	1
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（過年度は、実施業務の要約）	2
(d) 令和4年度の業務の目的	3
(2) 令和4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	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4年度の業務の目的	9
(2) 令和4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3) 後続波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4年度の業務の目的	15
(2) 令和4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	21
(d) 成果の論文発表・口頭発表等	21
(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	22
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	23
(1) 業務の内容	23
(a) 業務の目的	23
(b) 研究者の所属、氏名、研究実施期間、研究費等	23
(c) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）	23
(d) 令和4年度の業務の目的	24
(2) 令和4年度の成果	25
(a) 業務の要約	25
(b) 業務の成果	25
(c) 結論ならびに今後の課題	29
(d) 成果の論文発表・口頭発表等	29
(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定	29
3. まとめ	30
4. 活動報告	31
5. むすび	32

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)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	R4.4.1 ～ R5.3.31	9,852,587 円	2,955,776 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	R4.4.1 ～ R5.3.31	12,193,149 円	3,657,944 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 研究チーム付	深山 覚	R4.4.1 ～ R5.3.31		
長岡技術科学大学 工学研究科 助教	黒田 大貴	R4.4.1 ～ R5.3.31	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：

地震波の自動検測手法により、P波・S波のほか、特徴的な後続波を検測する手法を開発する。

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4年度の業務の目的

変分オートエンコーダを用いた地震計の異常検知の性能向上と、他の地震波形処理タスクへの応用展開を目的とする。教師なし学習によって得られる地震波形の離散表現を用い、人手による特徴量設計ならびに従来の地震計異常検知手法による性能を凌駕する異常検知技術を実現する。また同様の方法論に関して、ノイズ除去や自動検測等の他の地震波形処理に対する適用可能性について検討する。

(2) 令和4年度の成果

(a) 業務の要約

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。

(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

地震発生時の地震波形データ（以下、「イベントデータ」）を用いた異常検知手法を開発した（Fukayama et al., 2023）。過去には、複数の成分（東西・南北・上下動）同士の比較に基づく手法（Pedersen et al., 2020）も提案されているが、本手法は単一成分のデータのみから異常を判定する。イベントデータは、震源の位置や震源過程の特徴にも影響を受ける。これらの影響を考慮するために、イベントデータの確率モデルを作り、それに基づいてイベントデータの異常検知を行う。確率モデルは、変分オートエンコーダモデルを正常データにより学習させることで最適化した。

様々な周波数帯域の情報を取り扱うために、本手法では、地震波形パワースペクトル密度（PSD）の対数をデータとして用いる。図 1 に、本手法で採用した変分オートエンコーダのニューラルネットワークモデルを示す。エンコーダは対数 PSD を入力とし、潜在変数 \mathbf{z} のガウス分布の平均 $\boldsymbol{\mu}_z$ と分散 $\boldsymbol{\sigma}_z^2$ の対数を出力する。デコーダは、潜在変数 \mathbf{z} を入力とし、多変数ガウス分布の平均 $\boldsymbol{\mu}$ と、分散 $\boldsymbol{\sigma}^2$ の対数を出力する。モデルの学習の際は、ガウス分布に従ってランダムに抽出した潜在変数 \mathbf{z} をデコーダに与える。評価の際は $\mathbf{z} = \boldsymbol{\mu}_z$ をデコーダに入力する。与えたデータの異常スコアは、負の evidence lower bound (ELBO) を評価して、

$$a(\mathbf{x}) = -\log p(\mathbf{x}|\mathbf{z} = \boldsymbol{\mu}_z) + D_{\text{KL}}(q(\mathbf{z}|\mathbf{x})|p(\mathbf{z}))$$

によって得る。 D_{KL} は Kullback-Leibler 情報量を示す。

本手法を観測データに適用した。使用したのは、産総研が茨城県北部（茨城県高萩市・常陸太田市）に展開する 7 観測点（うち 2 観測点はごく近傍に移設しており、のべ 9 観測点）からなる地震観測網で得られた、2016 年 7 月から 2021 年 8 月までに 20km 以浅で発生した地震 76,357 件のイベントデータである。サンプリング周波数は 1000 Hz で、長さは 300 秒間である。

図 2 に異常スコアの日ごとの平均を示す。振幅の平方和を南北・東西・上下の成分同士で比較に基づく（Pedersen et al., 2020）の手法によって異常とされた期間では、本手法による異常スコアも高い。これらは計器異常に対応すると考えられる。それ以外にも、異常スコアの季節変動も見られるが、これは計器特性の僅かな変化や、地下構造の僅かな変化に対応すると考えられる。本手法は、特定の周波数の特徴に基づいて異常を検知する従来法（Zaccarelli et al., 2021）を上回る結果が得られることを確認した。

2) 引用文献

Fukayama, S., Uchi de, T., Horikawa, H., Kuroda, H., Amezawa, Y., Shiina, T., et al.: Full-bandwidth approach to detecting anomalous amplitudes from single channel

seismic observation, *Seismological Research Letters*, pp: under review, 2023.

Pedersen, H. A., Leroy, N., Zigone, D., Vallée, M., Ringler, A. T., & Wilson, D. C.: Using component ratios to detect metadata and instrument problems of seismic stations: examples from 18 yr of GEOSCOPE data, *Seismological Research Letters*, 91, pp: 272-286, 2020. doi:10.1785/0220190180

Zaccarelli, R., Bindi, D., & Stollo, A.: Anomaly detection in seismic data-metadata using simple machine-learning models, *Seismological Research Letters*, 92, pp: 2627-2639, 2021. doi:10.1785/0220200339

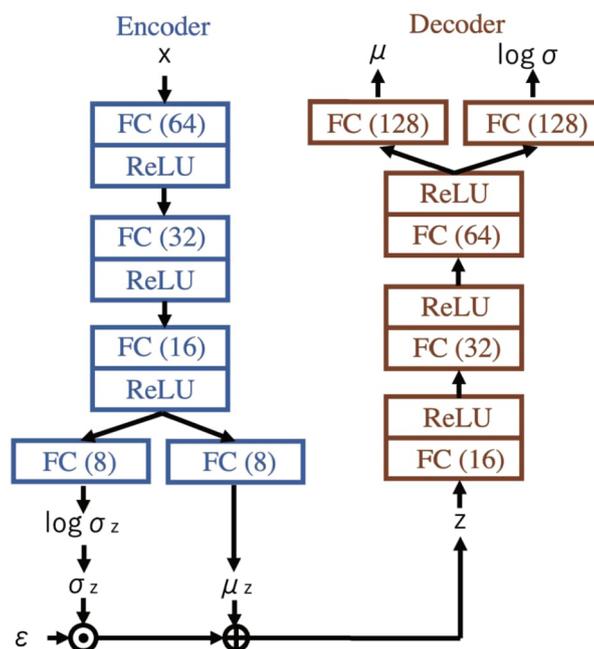


図 1 潜在変数のある確率モデルを表現する変分オートエンコーダ (Fukayama et al, 2023)。FC は全結合、ReLU は rectified linear unit activation を示す。カッコ内の数値は各層のユニット数を示す。

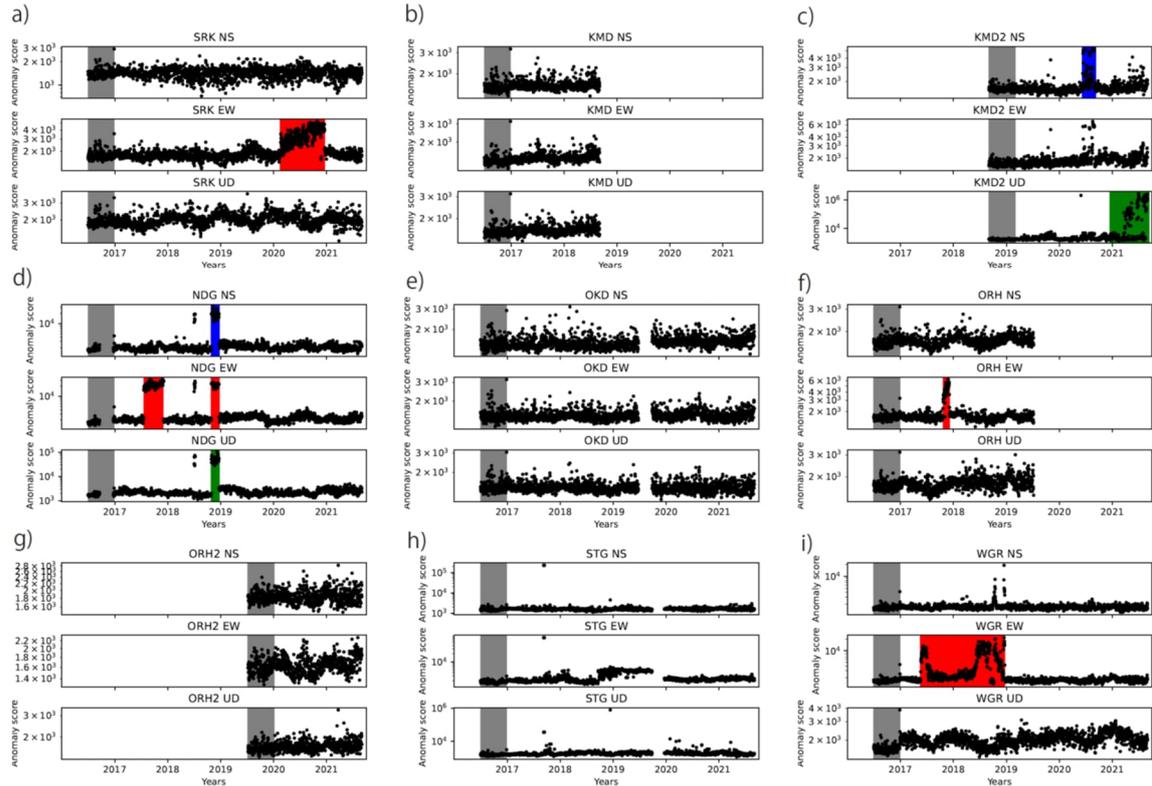


図 2 異常スコアの日平均 (Fukayama et al., 2023)。観測点ごとに、上から順に南北 (NS)、東西 (EW)、上下 (UD) の各成分を示す。青、赤、緑は成分間の振幅比 (EW/UD、NS/EW) に基づいて認定した異常期間を表す。灰色は学習に用いたイベントデータの期間を示す。

(c) 結論ならびに今後の課題

広い周波数帯域に着目した信号処理と機械学習により、地震計の不具合に起因する異常データの検知手法を開発した。茨城県北部の地震観測データに適用した結果、従来法を上回る地震計の不具合検知性能を確認できた。今後は、地震波形データによる地震計の異常検知の有用性を検証し、さらに、ノイズ除去・検出等の地震波形処理の自動化に向けて手法を発展させる。

(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
スペクトル特徴量の確率モデルによる地震計振幅の異常検知 (口頭発表)	深山覚、内出崇彦、堀川晴央、椎名高裕、黒田大	日本地球惑星科学連合大会2022年大会	令和 4 年 5 月 22 日	国内

	貴、緒方淳			
機械学習を活用した微小地震データ処理による地下断層の物理特性の解明（口頭発表；招待講演）	内出崇彦	2022年度統計関連学会連合大会	令和4年9月7日	国内
機械学習を活用した微小地震データの大量処理による地震発生場の物理的状態の推定（口頭発表；招待講演）	内出崇彦	産業技術総合研究所人工知能研究センター第61回AIセミナー	令和4年12月22日	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. 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 上級主任研究員	内出 崇彦	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31		
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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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 産総研特別研究員	佐藤 圭浩	R4.4.1 ～ R5.3.31		

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：

本事業で開発してきた断層面推定手法を震源や発震機構解が多数求まっている地域における実例に適用し、手法の改良につながる課題を洗い出す。

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4年度の業務の目的

高密度な震源カタログや震源メカニズム解カタログなどを利用し、震源分布の配置構造に注目して断層を推定する手法を開発する。そのような手法の一つとして、3次元震源位置情報データに対する変換処理（前処理）、教師なし機械学習によるクラスタリングアルゴリズムの適用など、断層面推定の実現に向けた要素技術の検討を行う。もう一つとして、有限混合モデルによる断層面推定方法を開発する。いずれも一連のシステム実装を行い、実データを用いた実験・検証を行う。

(2) 令和4年度の成果

(a) 業務の要約

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を提案した。数十万件の膨大な震源データを用いる場合は、オンラインクラスタリング手法を組み合わせることで計算コストを削減した。また、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。

(b) 業務の成果

震源分布により、地下における断層の形状を推定することは広く行われているが、断面図などによる可視に基づいて主観的に行われることが通例である。本研究では、それを客観的に自動的に行う手法を幅広く検討する目的から、「2段階クラスタリング」と「有限混合モデル」という2つの手法を並行して開発した。

1) 2段階クラスタリングによる断層面推定法の開発

震源の3次元位置情報に、震源分布を基に算出した法線ベクトル(3次元情報)を付与した6次元情報を用いて教師なし機械学習によるクラスタリングを行うことで、局所的な断層構造を検出する手法を提案する。具体的には、1段階目として法線ベクトルの3次元情報を用いた震源のクラスタリングを行う。2段階目では、分割されたクラスタごとに震源の3次元位置情報に基づくクラスタリングを行う。これにより、断層面の大局的な面構造を保持したまま断層面を細分化することができ、断層面の局所構造の把握に貢献する。本研究では、事前にクラスタ数を設定することなく、ボトムアップにクラスタリングを行う階層型クラスタリングアプローチを採用した。1段階目のクラスタリングでは、法線ベクトルのコサイン類似度を用いて、一定のクラスタ間距離を設定可能な Agglomerative clustering、2段階目のクラスタリングでは、震源分布における局所的な密度の違いに対応可能な HDBSCAN (McInnes et al., 2017) をそれぞれ適用した。

本提案手法を、hypoDD法 (Wal dhauser and Ellsworth, 2000) によって再決定された茨城県北部の震源分布(71336個)に適用する。検出した断層面を、断層面から0.5 km以内で発生した微小地震の震源メカニズム解 (Uchi de et al., 2022) (38164点)の節面のうち一つとなす角が5度以内である断層面を抽出した。

提案手法によって検出された6枚の断層面を図3に示す。断層面の多くは概ね南北走向であるが、北緯36.8度以北では北西-南東走向に変わっている。2011年・2016年茨城県北部の地震では主に西落ちの断層が破壊したと考えられるが (Fukushima et al., 2018; 仲井・他, 2017; 田中・岩切, 2017)、本研究では東落ちの断層面も検出した。北緯36.8度付近では断層面が検出されていないが、これは2011年・2016年茨城県北部の本震に破壊域に対応し、余震活動が極めて低調であったためであると考えられる。このような地震活動が低調な地域における断層面の検出は今後の課題である。

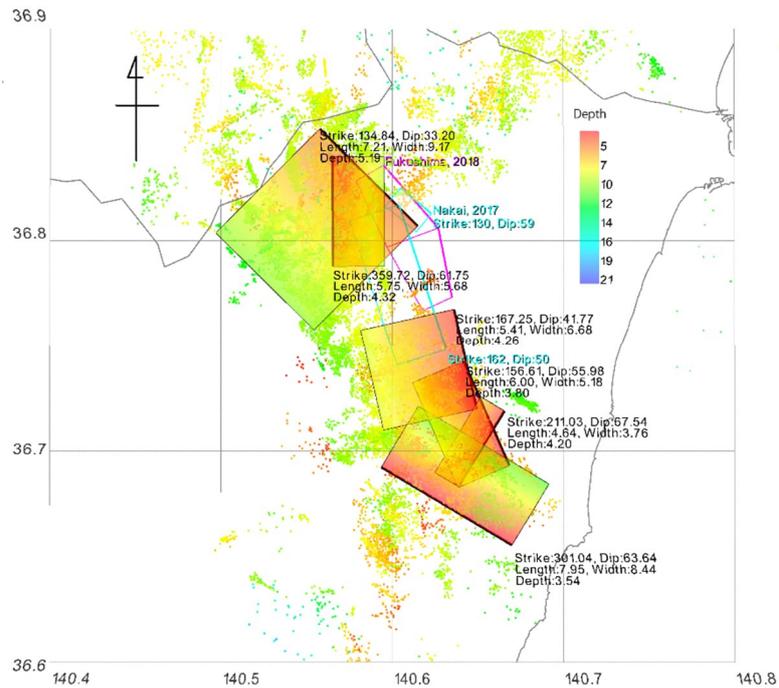


図 3 2 段階クラスタリングによって検出された断層面（矩形）。色は深さを示す。断層面に添えた黒文字は、走向および傾斜、長さ、幅、断層面の深さを示す。InSAR 解析による 2011 年・2016 年茨城県北部の地震の断層モデル（Fukushima et al., 2018 ; 仲井・他, 2017）は、紫色および水色の矩形によってそれぞれ示す。

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

震源位置や震源メカニズム解を用いて、有限混合モデルに基づくクラスタリングにより、断層面の抽出を行う。本研究の特徴は、震源メカニズム解を尤度計算に取り込んだこと、断層に直交する方向の震源分布にべき分布を用いたこと、background distribution を混合要素の一つとして取り込んだことが挙げられる。断層面の枚数も客観的に決定した。

本業務で使用した実データは、志藤・他（2020）による 2016 年熊本地震の地震カタログである。この中から、本震発生後 24 時間以内に起こった地震 847 個を用いた。このうち、発震機構解が求まっているのは 614 で、用いる震源データの 72.5%にあたる。

図 4 に断層面の分布を推定した結果を示す。図中の黒枠が本業務において推定された 6 枚の断層面を示す。余震分布の大まかな傾向である北東 - 南西方向に断層面が並んでいる。Uchide et al. (2016) において Aso gap と呼ばれる余震の空白域よりも北東側では、2 枚の断層にわかれている。矢来・他（2016）のモデルでは、Aso gap 付近にも断層が伸びており、本震時にすべりがあつたことが示唆される。また、強震波形を解析した Uchide et al. (2016) の結果においてもこの領域には大きなすべりが推定されている。余震が少ないところは、本震時に大きなすべりがあつても本震の震源断層の一部と認定されにくいことが明らかとなり、今後の改善が必要な点である。

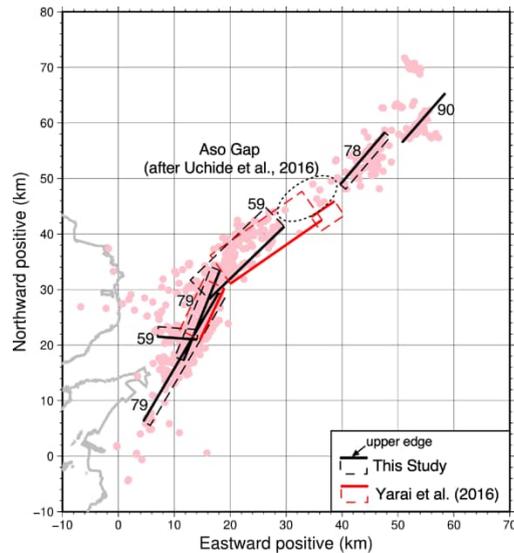


図 4 有限混合モデルで検出された断層分布。黒い四角は本業務で得られた断層面を地表に投影したもの。断層の脇に付した数字はそれぞれの断層の傾斜角を示す。赤い四角は矢来・他（2016）による断層モデルを地表に投影したもの。入力データとして用いた震源データの震央を桃色の丸印で示す。

3) 引用文献

Fukushima, Y., Toda, S., Miura, S., Ishimura, D., Fukuda, J., Demachi, T., & Tachibana, K.: Extremely early recurrence of intraplate fault rupture following the Tohoku-Oki earthquake, *Nature Geoscience*, 11, pp: 777-781, 2018. doi: 10.1038/s41561-018-0201-x

仲井博之, 三浦優司, 山下達也, 攪上泰亮, 宮原伐折羅, 島崎久実, 菅富美男, 小林知勝, 中埜貴元, 宇根寛, 吉田一希, 飯村元紀: GEONET 及び SAR 干渉解析による茨城県北部の地震に伴う地殻変動と地表変形, *国土地理院時報*, 129, 159-167, 2017.

志藤あずさ, 光岡郁穂, 松本聡, 松島健, 相澤広記, 清水洋, 内田和也, 神菌めぐみ, 手操佳子, 中元真美, 他: 2016年熊本地震合同地震観測データ—地震学的解析の基礎的資料として—, 73, 149-157, *地震第2輯*, 2020. doi: 10.4294/zisin.2019-11

田中美穂, 岩切一宏: 2つの茨城県北部の地震 (M_{JMA}6.1, M_{JMA}6.3) の震源過程と破壊域の比較, 81, 7, 2017.

Uchide, T., Horikawa, H., Nakai, M., Matsushita, R., Shigematsu, N., Ando, R., & Imanishi, K.: The 2016 Kumamoto-Oita earthquake sequence: aftershock seismicity gap and dynamic triggering in volcanic areas, *Earth Planets and Space*, 68, pp: 180, 2016. doi: 10.1186/s40623-016-0556-4

矢来博司, 小林知勝, 森下遊, 藤原智, 檜山洋平, 川元智司, 上芝晴香, 三浦優司, 宮原伐折羅. 熊本地震に伴う地殻変動から推定された震源断層モデル, *国土地理院時報*, 128, 169-176, 2016.

(c) 結論ならびに今後の課題

2段階クラスタリング及び有限混合モデルによる断層面推定手法をそれぞれ開発し、実

際のデータを用いてその有用性と限界を確認した。今後は、新たなデータに対して両手法を適用して、断層面抽出を試みるとともに、震源分布を用いて断層の大局的構造から詳細までマルチスケールで同定すること、余震分布のように震源分布が部分的に疎な場合でも客観的な断層構造を検出可能な手法を開発する。

(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 : 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
3次元震源分布の局所的形状を考慮した2段階クラスタリングによる断層面推定（ポスター発表）	佐藤圭浩、堀川晴央、内出崇彦、深山覚、緒方淳	日本地震学会2022年度秋季大会	令和4年10月26日	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. 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 上級主任研究員	内出 崇彦	R4.4.1 ～ R5.3.31	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 研究員	椎名 高裕	R4.4.1 ～ R5.3.31		
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	R4.4.1 ～ R5.3.31		

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：

茨城県北部などの特定の地域における後続波の生成源を明らかにする手法の開発を続

ける。

4) 令和6年度：

自動検出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4年度の業務の目的

後続波による地下断層面の推定に向けて、後続波の自動検出に取り組む。後続波の中でも観測報告例が比較的多いS波後続波を対象として、実際の観測データにより教師データを作成し、教師あり深層学習による後続波の自動検出可能性を検討する。また、後続波を検出できた後を見据えて、それを用いた反射面の推定にも取り組む。茨城県北部で発生した小・中規模の地震を対象に後続波を収集し、後続波の手動検出精度を検討する。また、収集した後続波を用いて、その生成に関連する地下構造を検討する。

(2) 令和4年度の成果

(a) 業務の要約

教師あり深層学習による後続波の自動検出可能性を検討するために、後続波の中でも観測報告例が比較的多いS波後続波を対象として、教師データの作成および自動検出モデルの構築を行った。産業技術総合研究所が茨城県北部に展開する臨時地震観測点と周辺の定常地震観測点を対象に、反射波と解釈される後続波の同定とその到達時刻の手動検出を進めた。また、この検出情報をもとに反射波の検出精度を検討した。地殻内反射面を推定するため、マルコフ連鎖モンテカルロ法に基づく解析手法を開発し、検出した反射波の到達時刻へ適用することで、茨城県北部下に分布する地殻内反射面の分布の推定を行った。地殻内反射面の分布から反射波の生成に関わる地下構造について検討した。

(b) 業務の成果

1) 後続波自動検出手法の開発

まず、非常にノイズレベルの低い高品質な観測波形記録が多数得られている Hi-net 阿仁観測点における観測波形記録（5,000 記録）を、S波後続波を伴うものと伴わないものに目視で分類してS波後続波の教師データを作成した。

次に、1次元畳み込みニューラルネットワークに基づく深層学習モデル（図 5）を設計し、モデルの学習およびテストを行なった。モデルの入力は、速度波形記録の南北成分と東西成分から Transverse 成分を合成し、6-24 Hz の帯域通過フィルタをかけ、S波検出値の 0.3 秒前から 5.12 秒間で切り出した波形とした。

図 6 に本研究で構築したS波後続波の自動検出モデルのテスト結果の受信者操作特性曲線（ROC : Receiver Operating Characteristic curve）を示す。深層学習モデルの結果と比較するために、機械学習に依らない方法でもS波後続波の検出を行った。テストデータのSコード部分のエンベロープについて理論エンベロープ（Sato, 1977）の残差を求め、その最大振幅（S波後続波の振幅に相当）が、エンベロープ振幅の中央絶対偏差の実数倍（閾値）を超えた場合にS波後続波が検出されたとみなすという方法で閾値を変えつつ実行した。AUCROCを比較することで、構築した深層学習モデルの方がS波後続波を良好に検出できていることを確認した。

未知データに対するモデルの検出性能を確認するために、学習に用いた Hi-net 阿仁観測点とその周辺の定常観測点で得られた観測波形記録で学習に用いていない記録からS波後続波を自動検出した。学習に用いた Hi-net 阿仁観測点における森吉山地域の群発地震の観測波形記録のうち、学習に用いていない4,520波形からS波後続波を自動検出した。モデルの出力に対する検出の閾値を0.5以上とした結果、3,583波形についてS波後続波が新たに検出された。目視で検出したものと合わせると、森吉山地域の群発地震についてHi-net 阿仁における観測波形記録の9,520記録中7,518記録でS波後続波が検出されたことになる。S波後続波の検出結果を震央（図 7 (a)）および、Hi-net 阿仁観測点からの距離に対して地震発生時刻順（図 7 (b)）にプロットした。これらから、群発地震クラスタの北東側で発生した地震について、Hi-net 阿仁観測点ではS波後続波が非検出となる傾向があることが判明した。一方、全解析期間を通してS波後続波は概ね安定して検出されており、数ヶ月や数年にわたって検出されないといった時間的特徴は見られないことも明らか

かになった。以上のように、S波後続波の自動検出を実現したことで、これまで以上にS波後続波について網羅的な解析をすることが可能になった。

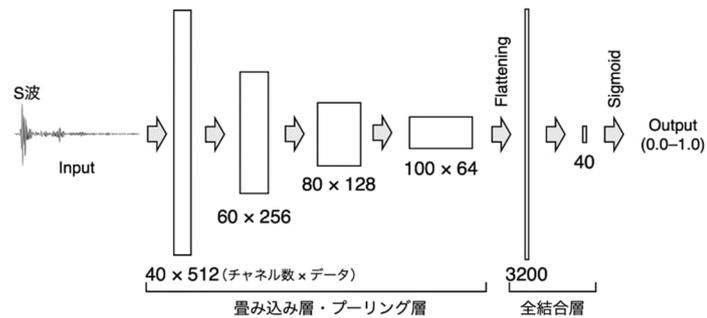


図 5 S波後続波の自動分類モデルの概略図

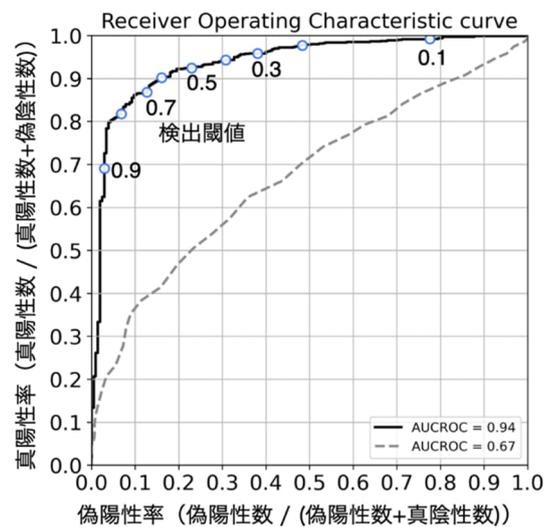


図 6 テスト結果の受信者操作特性曲線 (ROC)。黒色の実線は構築した深層学習モデルのテスト結果の ROC 曲線を示す。青枠の丸は、0.1 から 0.9 の検出閾値における真陽性率と偽陽性率の値にそれぞれ対応している。灰色の破線は機械学習に依らない方法でテストデータを分類した結果の ROC 曲線を示す。AUCROC は Area Under the Curve of ROC を示す。

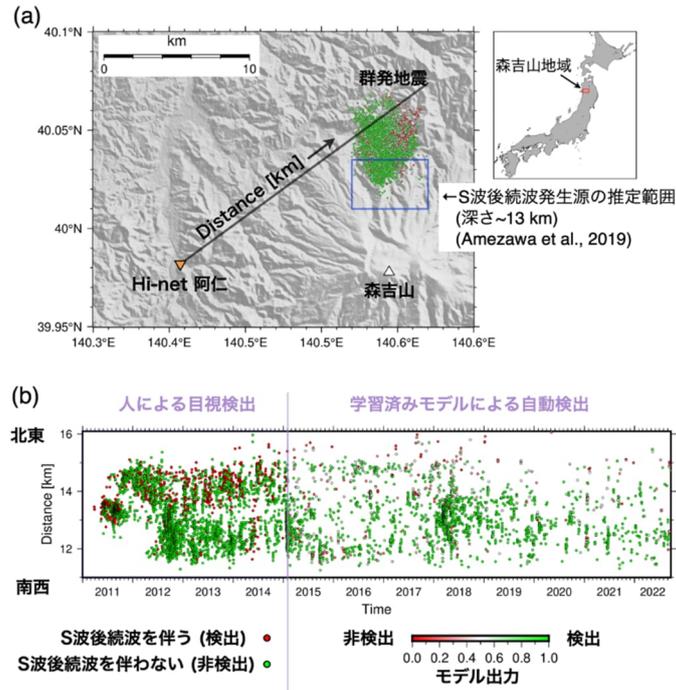


図 7 Hi-net 阿仁観測点における S 波後続波の網羅的検出結果。(a)色付きの丸は S 波後続波の検出を行った地震の震央に、目視分類の結果およびモデルの出力をプロットしたものを示す。紫色の矩形は、S 波後続波発生源の推定範囲 (Amezawa et al., 2019) を示す。オレンジ色の逆三角形は Hi-net 阿仁を示す。灰色の実線は震央を投影し Hi-net 阿仁からの距離 ((b)の縦軸) を計算するための測線を示す。白色の三角形は森吉山山頂を示す。(b)色付きの丸は S 波後続波の検出を行った地震の Hi-net 阿仁からの測線距離に対して、地震発生時刻順にプロットしたものを示す。色は目視分類の結果およびモデルの出力を示す。

2) 茨城県北部における反射面の探索

a) 反射波の手動検測

反射波の同定および到達時刻検測の精度を検証するため、2名の検測者 (TS および YA) がそれぞれ独立に反射波の同定と振幅増加区間の読み取りを行い、その結果を比較した。対象とした地震は、2016年6月から2021年12月までに茨城県北部及び福島県浜通りで発生した深さ 30 km 以浅かつマグニチュード 3.5-4.5 を記録した 72 地震である。

表 1 に反射波の同定数の比較結果を示す。TS あるいは YA のいずれかが反射波を同定した観測記録は 378 となり、うち 139 記録は 2 名の検測者が共に反射波が観測されていると判断した。図 8 では、これら 139 記録について、直達 S 波到達時刻からの遅延時間として振幅増加区間の開始・終了時刻を比較した。ほぼ同じ開始・終了時刻の読み取りが行われたグループ (Group A) は反射波に対応した振幅増加がはっきりと確認できる波形記録である。一方で、Group B では直達 S 波直後など、複数のタイミングで振幅増加が確認された。2 名の検測者がそれぞれ異なる振幅増加区間を反射波と同定したため、開始・終了時刻に系統的なずれが生じたと考えられる。これらの比較結果は、反射波が十分な振幅を持つ場合、検測者ごとの読み取りの時間差は小さく抑えられることを示す。一方で、反射波の到

達時刻の検測には、シグナル・ノイズ比の低下に加えて、誤同定（異なる波群を同一の後続波と判断）が読み取り精度を大きく低下させる要因となり得ることがわかった。

本研究では2名の検測者が独立して反射波の同定・検測作業を行った後、その結果を協議し、再び同定・検測作業を行うことで最終的な反射波カタログを作製した。結果として、茨城県北部では50地震に対して反射波が同定された。このうち、48地震で得られた272の反射波が地殻内反射面を由来とする反射波と考えられる。除外された2地震の反射波到達時刻は35 kmに仮定した、モホ面と考えられる反射面による反射波でよく説明できる。

b) 地殻内反射面の推定

前項で作成した反射波カタログを用いて、茨城県北部下の地殻内反射面の分布を推定した。地殻内反射面の推定には、マルコフ連鎖モンテカルロ法に基づく解析手法を新たに開発し、適用した。開発手法では、反射面の位置と長さ、幅、走向、傾斜を未知のモデルパラメータとして推定を行った。事後確率分布から算出される平均値と標準偏差は以下の通りである： $X = 4.9 \pm 1.0$ [km]、 $Y = -26.3 \pm 1.4$ [km]、 $Z = 15.3 \pm 0.6$ [km]、 $L = 10.6 \pm 0.8$ [km]、 $W = 18.6 \pm 1.7$ [km]、 $\theta = 41.7 \pm 4.7$ [°]、 $\delta = 26.3 \pm 2.0$ [°]。

各モデルパラメータの平均値を用いた地殻内反射面の分布を図示したものが図9である。地殻内反射面は茨城県北部下の深さ15-25 kmに分布し、北西方向に約26度の傾斜を持つ。この地殻内反射面の水平位置は臼田・他（2022）のイメージング結果に比べてやや南側に位置する。水平な反射面を仮定してイメージングを行った臼田・他（2022）に対して、提案手法では走向や傾斜を未知パラメータとして推定しており、そのような解析手法の違いが結果の違いに現れていると考えられる。

茨城県北部では、下部地殻から最上部マントル付近の地震波速度が遅く、電気比抵抗が小さいことが知られており、地殻流体の存在を反映すると考えられている（Umeda et al., 2015）。推定された地殻内反射面は低速度・低比抵抗領域のほぼ直上に分布している。すなわち、地殻内反射面は地殻流体の富む領域の上端に対応していると考えられる。

表 1 検測者の違いによる反射波の同定結果の比較。

(Total: 720)		Picked by YA	
		Identified	No
Picked by TS	Identified	139	156
	No	83	342

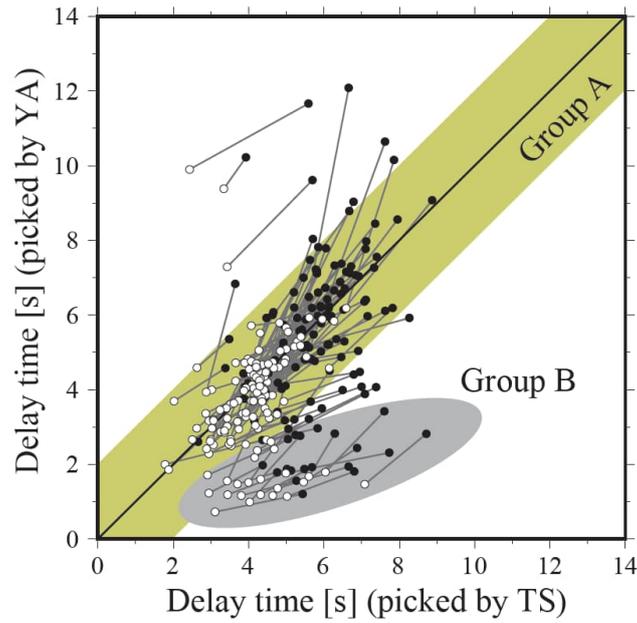


図 8 反射波に対応する振幅増加区間の読み取り結果の比較。横軸と縦軸で異なる検測者による読み取り時刻を表す。直達S波からの遅延時間として、白丸は振幅増加の開始時刻、黒丸は終了時刻を表す。

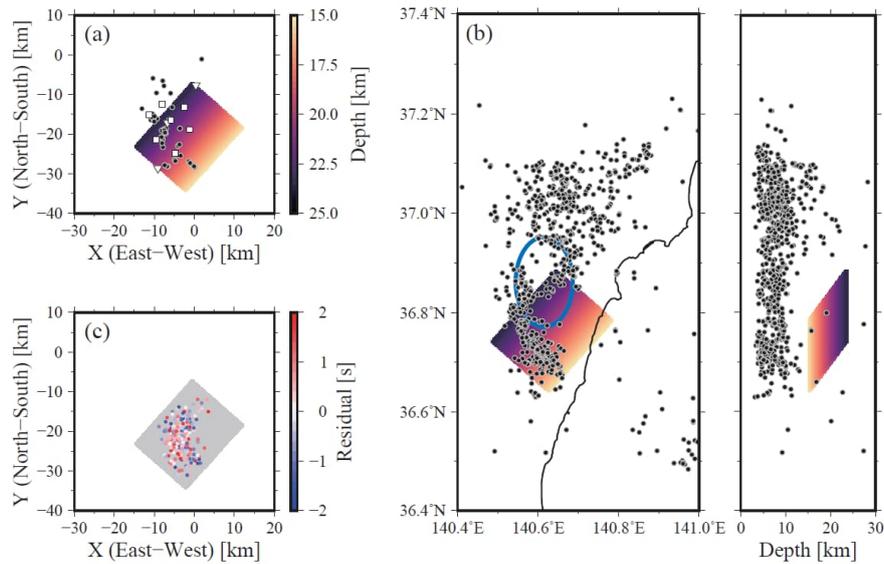


図 9 地殻内反射面の分布。(a)黒丸は解析に使用した地震の震央位置。三角と四角は観測点位置。(b)黒丸は2003年4月から2021年1月までに発生したマグニチュード3.5-4.5の地震の震央位置。青楕円は白田・他(2022)が示した地殻内反射面の分布を表す。(c)推定された地殻内反射面上に期待される反射点の分布。到達時刻残差に対応して色を付ける。

3) 引用文献

Amezawa, Y., Kosuga, M., & Maeda, T.: Temporal changes in the distinct scattered wave packets associated with earthquake swarm activity beneath the Moriyoishi-zan

volcano, northeastern Japan, Earth, Planets and Space, 71, 2019.
doi:10.1186/s40623-019-1115-6

Sato, H.: Energy propagation including scattering effects single isotropic scattering approximation, Journal of Physics of the Earth, 25, pp: 27-41, 1977.
doi:10.4294/jpe1952.25.27

Umeda, K., Asamori, K., Makuuchi, A., Kobori, K., & Hama, Y.: Triggering of earthquake swarms following the 2011 Tohoku megathrust earthquake, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120, pp: 2279-2291, 2015. doi:10.1002/2014JB011598

白田優太, 飯高隆, 蔵下英司, 五十嵐俊博, 小原一成, 加藤愛太郎, 酒井慎一, 中川茂樹, 武田哲也. 茨城県一いわき地域における稠密アレイで記録された地殻内S波反射波イメージング, 地震第2輯, 75, 125-143, 2022. doi:10.4294/zisin.2021-13

(c) 結論ならびに今後の課題

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手法を開発した。Hi-net 阿仁観測点のデータのみを使用した特定の事例で、S波後続波の検出性能を確認した。S波後続波を検出しやすい震源位置や時期に一定の傾向があることが確認できた。マルコフ連鎖モンテカルロ法によりS波後続波による反射面形状推定手法を開発し、茨城県北部で反射面の検出に成功した。今後は、後続波自動検出モデルを汎用化し、実際の観測波形データに適用するとともに、後続波到達時刻の検出モデルを開発していく。後続波検出・検出成果を活用して、茨城県北部地域以外においても反射面の検出を試みる。

(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
茨城県北部における後続波の観測と地殻内反射面の推定(ポスター発表)	椎名高裕、内出崇彦、堀川晴央、今西和俊	日本地球惑星科学連合大会2022年大会	令和4年6月2日	国内
後続波を用いた茨城県北部における地殻内反射面の推定(口頭発表)	椎名高裕、雨澤勇太、内出崇彦、堀川晴央、今西和俊	日本地震学会2022年度秋季大会	令和4年10月24日	国内
1次元畳み込みニューラルネットワークによるS波後続波の自動検出(ポスター発表)	雨澤勇太、内出崇彦、椎名高裕	日本地震学会2022年度秋季大会	令和4年10月26日	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 上級主任研究員	内出 崇彦	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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：

本事業で開発した計算機プログラムの公開を行う。

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4年度の業務の目的

地震波形データセットの作成に向けて、既存データセットを調査し、本事業で今後作成するデータセットが具えるべき性質について検討する。データセットに含める地震波形データの手動検測の結果を再検証し、データセットの信頼性を高める。

(2) 令和4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、既存データセットの調査を行った。本事業で作成するデータセットの信頼性向上のために、昨年度実施した手動検測の結果の検証を行った。一部のデータに対して再検測を実施した。

(b) 業務の成果

既存の地震波形データセットについて、P波到達時刻の妥当性とデータの内容を確認した。本研究独自の地震波形データセットの作成に向けては、令和3年度に実施した手動検測結果を精査し、必要に応じて再検測を実施した。また、サブテーマ1の成果によって異常な地震波形データであると判定されたものについては、本地震波形データセットから除外した。

1) 既存の地震波形データセットの確認

令和3年度に引き続き、既存の地震波形データセットについて、収録されている地震波形とP波到達時刻の検測値について確認を行った。今年度は、機械学習に関する地震波形処理のプラットフォームである SeisBench³²⁾に収録されている、ETHZ (Woollam et al., 2022; SED, 1983, 2005, 2008; CERN, 2016; AlpArray Seismic Network, 2014)、GEOFON (Woollam et al., 2022)、INSTANCE (Michellini et al., 2021)、Iquique (Woollam et al., 2019)、LenDB (Magrini et al., 2020)、NEIC (Yeck et al., 2020) を対象にした。INSTANCE、Iquique に含まれるデータのサンプリング周波数は毎秒100サンプル(100 sps)、LenDBは20sps、NEICは40spsである。ETHZとGEOFONでは、サンプリング周波数が異なるデータが混在している。これらのデータセットを機械学習に使用する場合は、適宜データを選択したり、再サンプリングをしたりする必要がある。

各データセットから100本の上下動地震波形をランダムに抜粋し、P波到達時刻が適切に読み取れているかどうかを概観した。図10に、例としてINSTANCEとIquiqueの波形を示す。これらの波形を概観すると、P波検測値の前に明らかにP波が到達している事例が散見される。それらを以下に列挙する。

- bucket573\$907, : 3, : 12000 (左上段)
- bucket1021\$390, : 3, : 12000 (左上段)
- bucket954\$105, : 3, : 12000 (左上段)
- bucket573\$296, : 3, : 12000 (左上段)
- bucket776\$132, : 3, : 12000 (左中段)
- bucket1097\$872, : 3, : 12000 (左中段)
- bucket829\$933, : 3, : 12000 (左下段)
- bucket490\$870, : 3, : 12000 (左下段)
- DG.IN12.2014-05-17T00:00:48.850000Z (右上段)
- DG.IN02.2014-05-08T07:28:42.660000Z (右上段)
- DG.IN07.2014-05-16T12:13:42.770000Z (右上段)
- CX.PB12.2014-05-17T20:37:33.300000Z (右上段)

- CX.PB01.2014-05-18T22:32:52.130000Z (右中段)
- CX.PB03.2014-04-03T23:13:21.430000Z (右中段)
- DG.IN17.2014-05-02T00:15:29.630000Z (右中段)
- CX.PB11.2014-05-18T22:32:52.130000Z (右中段)
- CX.PB01.2014-05-16T12:13:42.900000Z (右中段)
- DG.IN20.2014-05-14T08:58:01.030000Z (右下段)
- CX.PB03.2014-05-17T16:27:42.140000Z (右下段)
- DG.IN22.2014-04-28T07:05:01.500000Z (右下段)
- DG.IN17.2014-05-01T17:45:28.970000Z (右下段)
- CX.PB06.2014-05-09T21:09:56.900000Z (右下段)
- DG.IN08.2014-05-12T10:14:49.120000Z (右下段)
- DG.IN06.2014-04-24T14:14:17.330000Z (右下段)

これら以外にも、明白ではないものの、検測値に疑義がある例も少なくない。

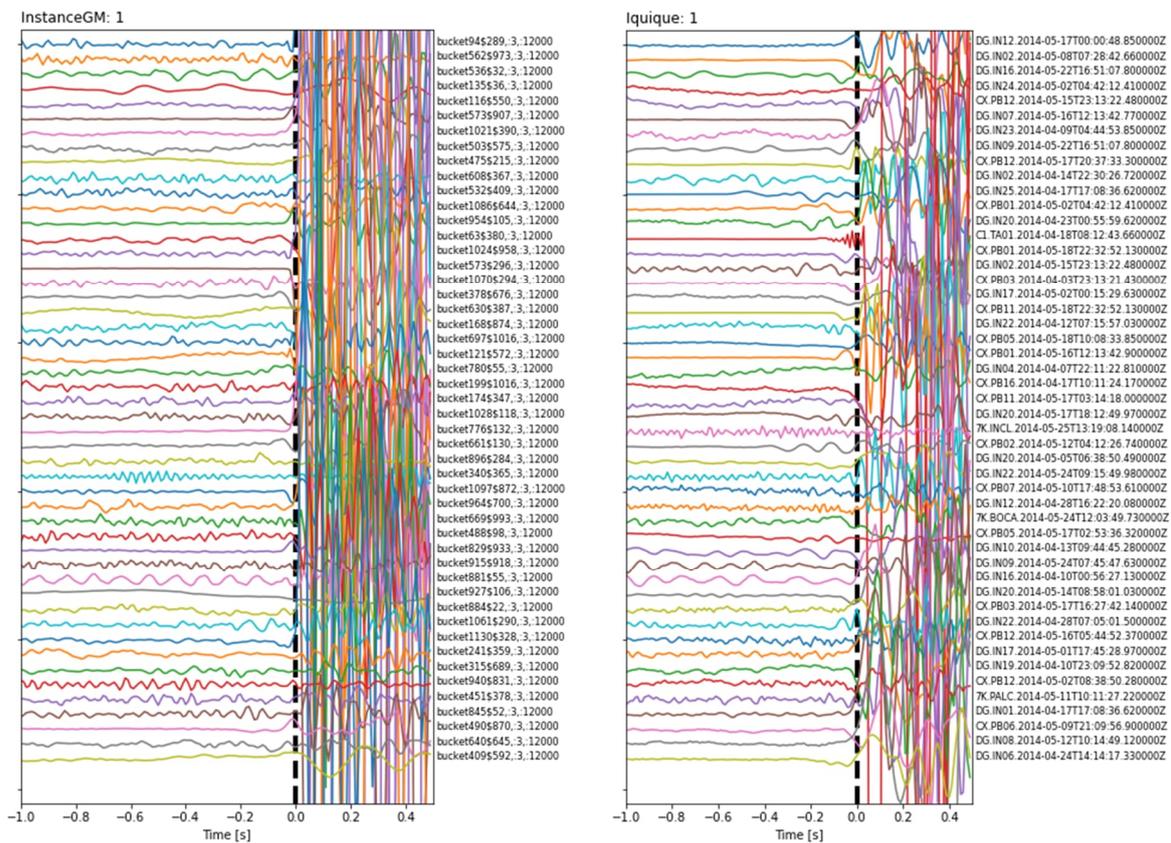


図 10 INSTANCE データセット (左) と Iquique データセット (右) からランダムに抜粋した 50 本の上下動地震波形。P 波到達時刻の検測値を基準に描画した。

2) 本研究独自の地震波形データセットの作成

a) 検測値の確認

令和 3 年度に実施した検測の結果を目視で検証した。令和 3 年度は、三重県松阪市飯高で 2011 年から 2016 年まで実施していた地震計アレイ観測 (Nakamoto et al., 2021)

(以下、「飯高アレイ」、山梨県東部で 2013 年から 2015 年まで実施していた地震観測 (内出・他, 2015 ; 今西・他, 2016) (以下、「山梨県東部臨時観測」、茨城県北部地域で 2016 年から実施している地震観測 (以下、「茨城県北部臨時観測」) で得られたデータから、マグニチュード分布や震源・観測点距離の分布ができるだけ均一になるように考慮して、12000 個の地震を抜き出し、各地震についてランダムに選んだ 3 つの観測点のデータについて、P 波・S 波到達時刻と P 波初動極性の手動検測を実施した。検測を実施した 36000 本の地震波形データについて、P 波・S 波到達時刻がいずれも読み取れたデータは 26414 本であった。なお、ここでは、1 つの観測点における 1 つの地震に対する上下動、東西動、南北動の 3 成分のデータをまとめて「1 本」と呼ぶこととする。

膨大な本数の地震波形データを目視するために、のように、簡易的に確認するための図を作成した。この図を用いて、適切な検測が実施されていることが明白である 20157 本の地震波形データを抜き出した。残りの 6257 本のデータは再検測に回した。

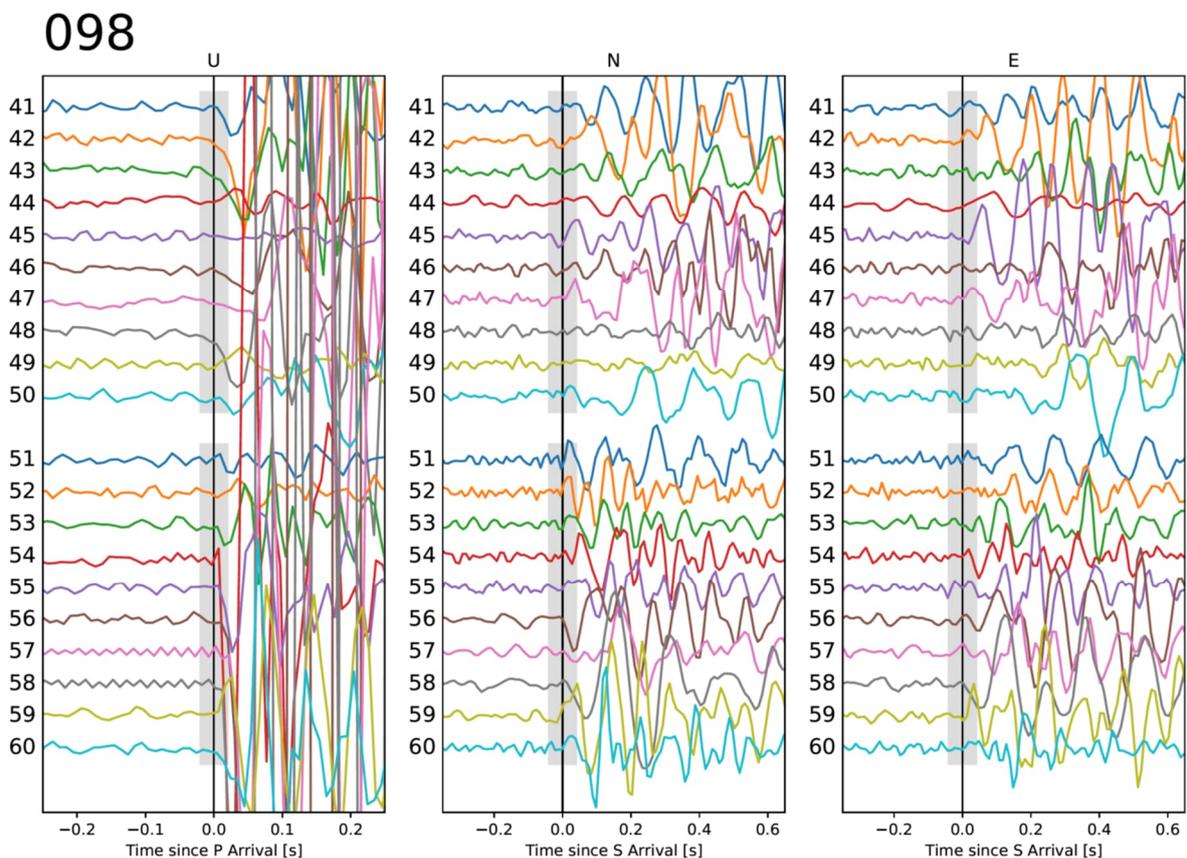


図 11 手動検測値を簡易的に確認するための図の例。左は P 波到達時刻を基準にして地震波形の上下動成分を並べたものである。中と右は S 波到達時刻を基準にして、それぞれ南北動成分と東西動成分を並べたものである。

b) 異常データの除去

茨城県北部臨時観測のデータについては、サブテーマ 1 の成果に基づいて、異常データを地震波形データセットに加える候補から除外した。その結果、検測が適切であった 20157 本のデータのうち 1662 本を除外して、18495 本をデータセットに収録することとなった。

また、再検測に回した 6257 本のデータからは 415 本を除外し、5842 本に対して再検測を行うこととした。

c) 再検測

再検測は、地震波形データ処理システム WIN を用いて、手動で行った。P 波・S 波の両者の再検測を行ったのは 2197 本、P 波のみの再検測を行ったのは 1179 本、S 波のみの再検測を行ったのは 2466 本であった。その結果、それぞれ 1490 本、773 本、2194 本の合計 4457 本のデータについて、P 波・S 波ともに検測することができた。除外したデータには、読み取りが困難であったもののほか、近接した時刻に複数の地震によると考えられる波形が含まれていたものもあった。

これにより、合計 24,614 本の波形データに P 波・S 波いずれも適切な検測値が付けられたことになる。

3) 引用文献

AlpArray Seismic Network: Eastern Alpine Seismic Investigation (EASI) - AlpArray Complimentary Experiment. 2014. doi:10.12686/ALPARRAY/XT_2014

CERN: CERN Seismic Network. 2016. doi:10.12686/SED/NETWORKS/C4

今西和俊, 内出崇彦, 松下レイケン: 臨時地震観測による山梨県北東部の微小地震の発震機構解と応力場, 活断層・古地震研究報告, No. 16, pp.53-77, 2016.

Magrini, F., Jozinović, D., Cammarano, F., Michelini, A., & Boschi, L.: Local earthquakes detection: A benchmark dataset of 3-component seismograms built on a global scale, Artificial Intelligence in Geosciences, 1, pp: 1-10, 2020. doi:10.1016/j.aiig.2020.04.001

Michelini, A., Cianetti, S., Gaviato, S., Giunchi, C., Jozinović, D., & Lauciani, V.: INSTANCE – the Italian seismic dataset for machine learning, Earth System Science Data, 13, pp: 5509-5544, 2021. doi:10.5194/essd-13-5509-2021

Nakamoto, K., Hiramatsu, Y., Uchide, T., & Imanishi, K.: Cascading rupture of patches of high seismic energy release controls the growth process of episodic tremor and slip events, Earth, Planets and Space, 73, pp: 59, 2021. doi:10.1186/s40623-021-01384-6

Swiss Seismological Service (SED) at ETH Zurich: National Seismic Networks of Switzerland. 1983. doi:10.12686/sed/networks/ch

Swiss Seismological Service (SED) at ETH Zurich: Temporary deployments in Switzerland associated with aftershocks and other seismic sequences. 2005. doi:10.12686/SED/NETWORKS/8D

Swiss Seismological Service (SED) at ETH Zurich: Seismology at School Program, ETH Zurich. 2008. doi:10.12686/SED/NETWORKS/S

内出崇彦, 今西和俊, 松下レイケン: 山梨県北東部における地殻応力場推定のための臨時地震観測, 活断層・古地震研究報告, No. 15, pp.211-233, 2015.

Woollam, J., Rietbrock, A., Bueno, A., & De Angelis, S.: Convolutional neural network

for seismic phase classification, performance demonstration over a local seismic network, *Seismological Research Letters*, 90, pp: 491-502, 2019. doi:10.1785/0220180312

Wooliam, J., Münchmeyer, J., Tilmann, F., Rietbrock, A., Lange, D., Bornstein, T., et al.: SeisBench—A Toolbox for Machine Learning in Seismology, *Seismological Research Letters*, 93, pp: 1695-1709, 2022. doi:10.1785/0220210324

Yeck, W. L., Patton, J. M., Ross, Z. E., Hayes, G. P., Guy, M. R., Ambruz, N. B., et al.: Leveraging Deep Learning in Global 24/7 Real-Time Earthquake Monitoring at the National Earthquake Information Center, *Seismological Research Letters*, 92, pp: 469-480, 2020. doi:10.1785/0220200178

(c) 結論ならびに今後の課題

地震波形データセットの作成に向けて、検測値の検証を進めた。

(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、データ品質管理の自動化を目指し、昨年度研究した変分オートエンコーダによる異常検知手法を発展させ、地震計記録3成分の不具合を独立に推定する手法を開発した。茨城県北部の臨時地震観測網（7観測点）の7万件余りの地震データにより性能を評価した。成果は査読付き雑誌に投稿した。

多数の地震と震源メカニズム解の空間分布を用いた断層構造推定手法として、段階的クラスタリングと有限混合モデルにそれぞれ基づく2つの手法を開発した。茨城県北部と熊本地域のデータをそれぞれ用いて、手法の妥当性を検証した。

茨城県北部におけるS波反射波の手動検測および精査を行い、検測結果をもとにマルコフ連鎖モンテカルロ法により反射面形状を推定した。また、畳み込みニューラルネットワークによるS波後続波の自動検出モデルを構築し、モデルの運用テストを行った。その結果、構築したモデルにより概ね良好にS波後続波の有無を判別できることを示した。

地震波形データに検測値を付けたデータセットの作成を昨年度に引き続き行った。産総研で実施した地震波形データ3万6千本に手動検測を行った昨年度の結果を再度、精査した。その結果、およそ2万本の検測値に問題ないことが確認された。6千本程度の手動再検測を行った。

本研究課題では、地震波形ビッグデータに端を発し、断層面を客観的に把握することを目指している。データの異常検知は一連の処理の初めに当たる部分である。震源分布と震源メカニズム解を用いた断層構造推定手法を2種類開発でき、地震が多く発生している地域における断層面分布の推定に向けた方向性が定まってきた。後続波を利用した断層面の推定については、S波後続波自動検知の基礎技術ができつつある。後続波が自動検知できた後の活用法として、反射面推定のための研究も進展した。反射面が必ずしも断層面ではないかもしれないが、地下構造の詳細な把握を進めるための研究と位置付けることができる。これらの研究については、いずれも基礎を固めつつある段階である。次年度以降、適用範囲を拡大する中で課題を発見し、それを解決することで手法を発展させていきたい。データセット作成については、進捗がやや遅れているが、次年度にはデータセットを出版できるよう準備を進めたい。

4. 活動報告

「STAR-E AIST ミーティング」を下記の8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、滋賀県（のちに新潟県）と分散しており、コロナウイルス感染症蔓延の影響も考慮して、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10回：2022年4月11日 10時～11時
- 第11回：2022年6月8日 10時～12時
- 第12回：2022年8月3日 14時～16時
- 第13回：2022年9月1日 10時～12時
- 第14回：2022年10月17日 14時～16時
- 第15回：2022年11月11日 10時～12時
- 第16回：2023年1月30日 13時～15時
- 第17回：2023年2月13日 13時～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。

2022年6月13日には、後続波を用いた地殻内反射面推定の研究を長年行われてきた西上欽也氏（京都大学名誉教授）による特別セミナーを開催し、その後、本事業参加者との議論を行った。特別セミナーはプロジェクトメンバー外にも公開し、19名が聴講した。

また、他の4つの研究課題と合同で、以下の10回のオンライン形式の勉強会を開催した。そのうち、第2回と第7回は本研究課題が主催したので、内容も記載する。

- 第1回：2022年4月18日 13:30～16:00
- 第2回：2022年5月17日 13:30～14:30
 - 内出 崇彦「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（研究課題紹介）」
 - 深山 覚「スペクトル特徴量の確率モデルによる地震計振幅の異常検知」
 - 椎名 高裕「茨城県北部における後続波の観測と地殻内反射面の推定」
- 第3回：2022年6月20日 13:30～15:00
- 第4回：2022年7月26日 13:30～15:00
- 第5回：2022年9月20日 13:30～15:00
- 第6回：2022年10月12日 15:00～17:00
- 第7回：2022年11月24日 10:30～12:00
 - 内出 崇彦「A Case of Application of Deep Learning to Seismology - Stress Map based on Focal Mechanism Solutions -」
- 第8回：2022年12月8日 10:30～12:00
- 第9回：2023年1月16日 10:30～12:00
- 第10回：2023年3月2日 10:30～12:00

STAR-E 第2回研究フォーラム（2023年1月24日開催）にも協力し、内出崇彦がパネルディスカッションに登壇した。

5. むすび

本事業も2年目を迎え、地震学と情報科学を専門とする研究者同士の協力関係や信頼関係も構築できてきた。ほぼ月1回のオンラインミーティングやSlackを通じた意見交換も活発に行われた。新たに加わった2名のポスドク（産総研特別研究員）もスムーズに合流でき、適切な研究課題を見つけて、取り組むことができた。本年度は学会発表を多く行い、本研究課題の成果や目標を発信することができた。他の研究課題と共同して勉強会を開催するなどを通して連携することができた。

今後は手法開発に加えて、実際のデータへの適用も進めていきたいと考えている。具体的な問題を解決するということに加えて、手法の課題が見つければ開発がさらに進むという循環を発生させるということが狙いである。これにより、「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）に資する研究に成長させていきたいと考えている。

なお、本研究課題においては、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使用した。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
スペクトル特徴量の確率モデルによる地震計振幅の異常検知(口頭発表)	深山覚、内出崇彦、堀川晴央、椎名高裕、黒田大貴、緒方淳	日本地球惑星科学連合大会2022年大会	令和4年5月22日	国内
茨城県北部における後続波の観測と地殻内反射面の推定(ポスター発表)	椎名高裕、内出崇彦、堀川晴央、今西和俊	日本地球惑星科学連合大会2022年大会	令和4年6月2日	国内
機械学習を活用した微小地震データ処理による地下断層の物理特性の解明(口頭発表；招待講演)	内出崇彦	2022年度統計関連学会連合大会	令和4年9月7日	国内
後続波を用いた茨城県北部における地殻内反射面の推定(口頭発表)	椎名高裕、雨澤勇太、内出崇彦、堀川晴央、今西和俊	日本地震学会2022年度秋季大会	令和4年10月24日	国内
1次元畳み込みニューラルネットワークによるS波後続波の自動検出(ポスター発表)	雨澤勇太、内出崇彦、椎名高裕	日本地震学会2022年度秋季大会	令和4年10月26日	国内
3次元震源分布の局所的形状を考慮した2段階クラスタリングによる断層面推定(ポスター発表)	佐藤圭浩、堀川晴央、内出崇彦、深山覚、緒方淳	日本地震学会2022年度秋季大会	令和4年10月26日	国内

機械学習を活用した微小地震データの大量処理による地震発生場の物理的状態の推定(口頭発表；招待講演)	内出崇彦	産業技術総合研究所人工知能研究センター第61回AIセミナー	令和4年12月22日	国内
---	------	-------------------------------	------------	----

2. 学会誌・雑誌等における論文掲載
なし