

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3年度

成果報告書

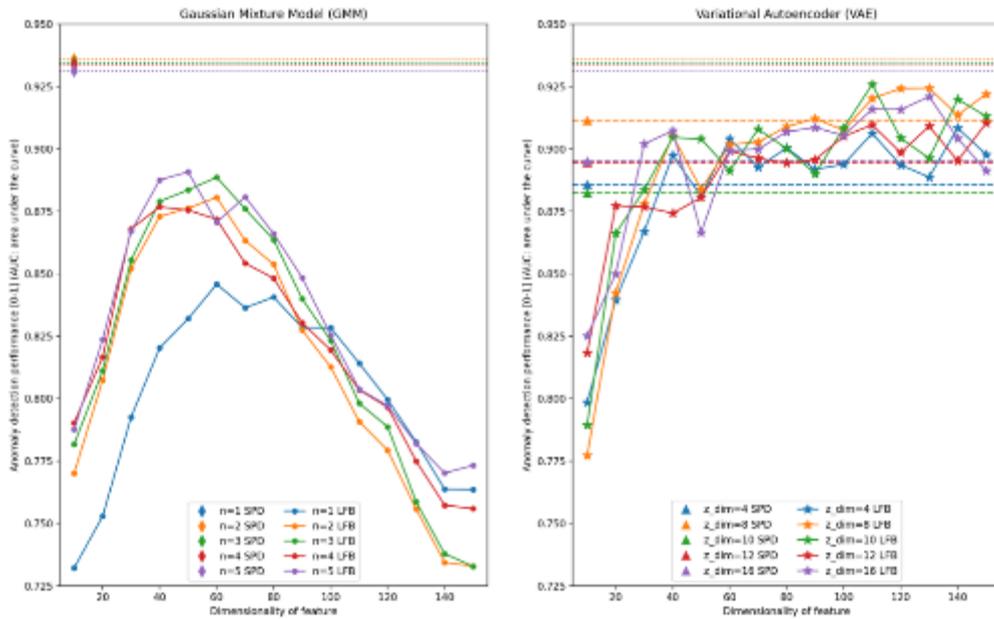
令和4年5月

文部科学省 研究開発局

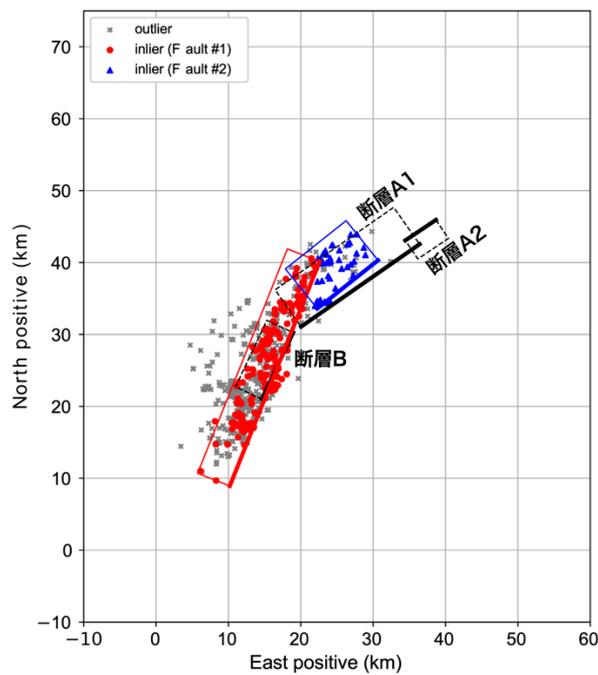
国立研究開発法人 産業技術総合研究所

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3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

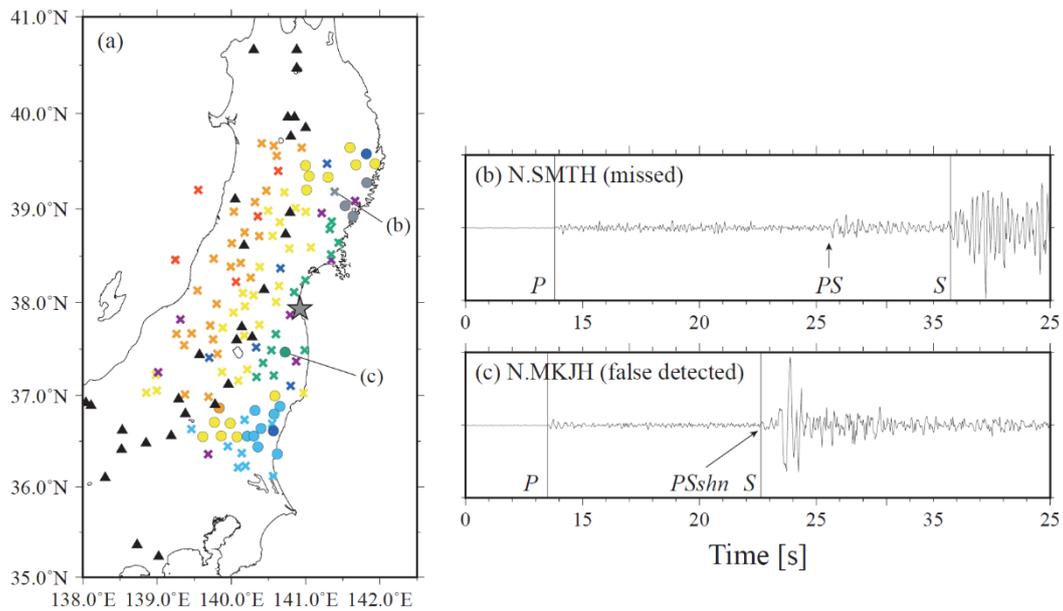


振幅異常検知の性能比較結果。縦軸は受信者操作特性による AUC (値域:  $[0, 1]$ )、横軸は特徴量の次元数であり AUC は 1 に近いほど良好な性能である。凡例中の SPD はスペクトル特徴量、LFB はログフィルタバンク出力を表し、左図中の  $n$  は GMM 混合数、右図中の  $z\_dim$  は VAE の潜在変数の次元数を表す。

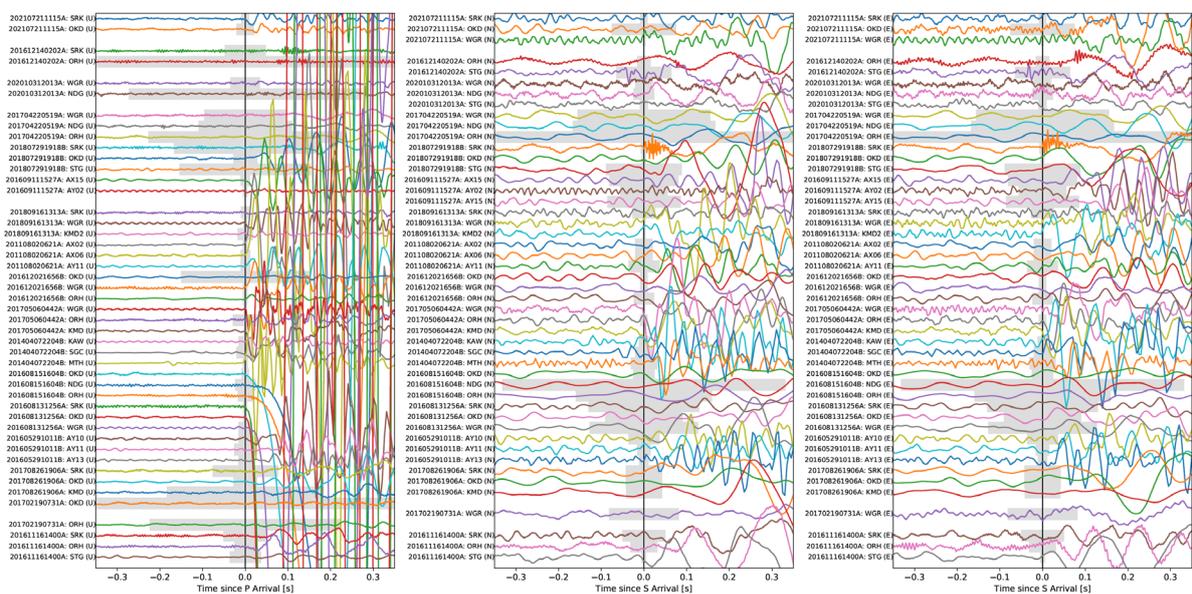


断層面の推定結果。赤と青の長方形は推定された断層面を地表に投影したもの。太い線が最も浅い辺。赤の○は赤の断層を構成する震源で、青の△は青の断層を構成する震源。

灰色の×はいずれの断層にも属しないとされた震源（外れ値）。黒線は矢来ほかによる測地学的観測に基づく「矩形断層モデル」を地表に投影したものである。太い実線が最も浅い辺。



t-SNE 法で分類された観測点クラスタの空間分布。(a) 丸は PS 変換波が観測された観測点、クロスはそれ以外の観測点を示し、色は図 11 に対応する。星は対象としたスラブ内地震（深さ 80 km）の震央位置、三角は火山を示す。(b-c) 東西成分の観測波形例（最大振幅で規格化、1-16 Hz のバンドパスフィルタ）。縦線は P 波と S 波の到達時刻。PS：新たに読み取った PS 変換波の到達時刻、PSshn：既存研究<sup>15)</sup>で PS 変換波の到達として解釈した時刻。



本事業による手動検測の結果。左から順に上下動、南北動、東西動の速度波形を示す。上下動はP波到達時刻、南北動及び東西動はS波到達時刻を基準に、その前後0.35秒を図示している。P波到達時刻の読み取りができなかった場合、上下動は表示していない。同様に、S波が到達時刻の読み取りができなかった場合、南北動及び東西動は表示していない。灰色の帯は読み取り誤差の目安を示す。

## 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、本研究課題は本年度（令和3年度）新たに開始した。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	iv
目次	v
1. 研究課題の概要	1
1. 1 研究概要の説明	1
2. 研究成果の説明	4
(1) 業務の内容	5
(2) 令和3年度の成果	9
3. まとめ	41
4. 活動報告	42
5. むすび	43

## 1. 研究課題の概要

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。

### 1. 1 研究概要の説明

#### (1) 研究者別の概要

所属機関・部局・職名	氏名	分担した研究項目及び研究成果の概要	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・地質調査総合センター活断層・火山研究部門・主任研究員	内出崇彦	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 地震波形データセットの作成に向けた地震波形データの整理、手動検測とその結果の確認を行った。	令和3年7月8日～令和4年3月31日	8,482,456円	2,524,736円
同・主任研究員	堀川晴央	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 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。	令和3年7月8日～令和4年3月31日		
同・研究員	椎名高裕	サブテーマ3 後続波を用いた断層面形状の決定 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。教師なし学習技術による、後続波を含む地震波	令和3年7月8日～令和4年3月31日		

		形の特徴分類可能性を検討した。  サブテーマ1 インテリジェントな地震波形処理 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。			
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・研究チーム長同・主任研究員	緒方淳	サブテーマ1 インテリジェントな地震波形処理 異常検知手法開発に関する助言を行った。	令和3年7月8日～令和4年3月31日	1,913,096円	573,929円
	深山覚	サブテーマ1 インテリジェントな地震波形処理 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。	令和3年7月8日～令和4年3月31日		
立命館大学・情報理工学部・助教	黒田大貴	サブテーマ1 インテリジェントな地震波形処理 異常検知手法開発に関する助言を行った。	令和3年7月8日～令和4年3月31日	0円	0円

## (2) 研究実施日程

研究実施内容	実 施 日 程												
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	
サブテーマ1：インテリジェントな地震波形処理（深山覚・緒方淳・黒田大貴・椎名高裕）				—————▶									

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 (堀川晴央)				→								→
サブテーマ3：後続波を用いた断層面形状の決定 (椎名高裕)				→								→
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 (内出崇彦)				→								→

(注) 研究代表者、研究分担者等別に作成すること

## 2. 研究成果の説明

### 業務題目

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

### 目次

#### (1) 業務の内容

- (a) 業務題目
- (b) 担当者
- (c) 業務の目的
- (d) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）
- (e) 令和3年度業務目的

#### (2) 令和3年度の成果

- (a) 業務の要約
  - サブテーマ1「インテリジェントな地震波形処理」
- (b-1) 業務の実施方法
- (c-1) 業務の成果
  - 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」
- (b-2) 業務の実施方法
- (c-2) 業務の成果
  - サブテーマ3「後続波を用いた断層面形状の決定」
- (b-3) 業務の実施方法
- (c-3) 業務の成果
  - 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」
- (b-4) 業務の実施方法
- (c-4) 業務の成果
- (d) 結論ならびに今後の課題
- (e) 引用文献
- (f) 成果の論文発表・口頭発表等
- (g) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

## (1) 業務の内容

### (a) 業務題目

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

### (b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立研究開発法人 産業技術総合研究所	主任研究員	内出崇彦
国立研究開発法人 産業技術総合研究所	研究チーム長	緒方淳
国立研究開発法人 産業技術総合研究所	主任研究員	堀川晴央
国立研究開発法人 産業技術総合研究所	主任研究員	深山覚
国立研究開発法人 産業技術総合研究所	研究員	椎名高裕
立命館大学	助教	黒田大貴

### (c) 業務の目的

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。そこで、本研究では、地震波形の自動検測を基礎にして、2つの方法で地下の断層を探索することを目指す。一つは、多数の微小地震の震源位置と震源メカニズム解（個別の地震の断層面とすべりの向きに対応）に基づいて地下の断層の位置と形状を推定するという方法である。もう一つは、後続波（反射や散乱によって直達P波・S波とは異なる経路をたどって遅く到達する地震波）を用いて反射面・散乱体を同定し、構造境界、とりわけ断層が存在する可能性を追究するという方法である。これによって、強震動予測においては、より現実的な震源断層モデルを設定することを支援することを目指す。この目的を達成するために、以下の4つのサブテーマを設定して、研究を遂行する。

#### ○サブテーマ1：インテリジェントな地震波形処理

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）、(2)観測波形のノイズ除去、(3)自動検測（読み取り）に取り組む。検測については、直達P波・S波に加えて後続波（直達波とは異なる経路を伝播する波）を読み取る。本研究ではこれら3つをまとめて、「想定される地震波形と実際の観測波形の違いを検出する問題」として取り扱う。地震計記録を観測点ごとに個別に扱うのではなく、多数観測点からなる地震計ネットワーク記録として活用し、地震学の知見と地震波形の時間・観測チャンネル間・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)自動検測については、リカレントニューラルネットワーク(RNN)等の時系列処理モデルを構築して、地震波形と手動検測値から学習する方法も検討する。本研究で開発した手法は国内外の研究グループによって開発された手法と性能を比較する。

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

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

○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

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。

(d) 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：

サブテーマ1においては、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。

サブテーマ2においては、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。

サブテーマ3においては、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。

サブテーマ4においては、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：

サブテーマ1においては、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P波・S波・後続波の自動検測等の地震波形処理手法の構築を行う。

サブテーマ2においては、地震活動のパターン認識などの技術による断層面推定手法の改良に取り組み、震源や発震機構解が多数求まっている実データに適用して複数の断層面を推定する。

サブテーマ3においては、後続波の観測が確認された茨城県北部において小・中規模の地震を対象に更なる観測事例の収集を行い、その生成に関連する地下構造を検討する。

サブテーマ4においては、地震波形データセット（P波・S波到達時刻、P波初動極性の検測値等のメタデータ付きの地震波形データ）の内容を確認して、単一ないし少数のファイルに取りまとめた上で、オンラインで公開する。

3) 令和5年度：

サブテーマ1においては、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。

サブテーマ2においては、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。

サブテーマ3においては、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。

サブテーマ4においては、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：

サブテーマ1においては、地震波形データのノイズ除去手法の開発に取り組む。

サブテーマ2においては、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。

サブテーマ3においては、自動検測で検出された後続波の地域ごとの傾向をまとめ、顕著な後続波が出る地域を特定する。

サブテーマ4においては、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：

サブテーマ1においては、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。

サブテーマ2においては、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。

サブテーマ3においては、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。

サブテーマ4においては、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。

(e) 令和3年度業務目的

①サブテーマ1：インテリジェントな地震波形処理

近接する観測点波形を入力として所望の観測点の地震波形を自動生成する技術を研究する。その際、音声の声質変換等で用いられるエンコーダ・デコーダモデル等を活用する。また、地震計や収録装置の機械的なトラブル等に由来する比較的簡単な異常の検知に取り組む。さらに、リカレントニューラルネットワーク（RNN）等の最新の時系列処理モデルを適用したP波・S波到達時刻の自動検出手法を開発する。

②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

気象庁一元化処理震源カタログや日本全国内陸震源メカニズム解カタログ（Uchide, 2020）などを用いて、断層を推定する手法を開発する。内出・今西（日本地震学会秋季大会, 2017）で、震源位置と震源メカニズム解（個々の地震の断層面とすべりの向きに対応）から Hough 変換の応用によって断層面を検出する手法を開発しているため、これを基礎にして手法の検討を行う。比較的単純な震源分布を示す例（例えば、2014年長野県北部の地震）に適用しながら、手法の細部を詰める。

③サブテーマ3：後続波を用いた断層面形状の決定

日本における後続波の観測記録を収集し、よく観測される観測点や地震の分布など、後続波観測の空間的な観測状況を整理する。その上で、ニューラルネットワークなどの機械学習技術を用いて、その空間的特徴を分析する。

④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

産業技術総合研究所の定常及び臨時地震観測点において記録した地震波形データに、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て、機械学習等に使用できる地震波形データセットを作成する。本研究にて手動で検測した結果を使用するほか、可能であれば、気象庁一元化処理検測値（手動検測のみ）も使用する。本研究のサブテーマ1で使用して、不具合がないかどうか確認する。

## (2) 令和3年度の成果

### (a) 業務の要約

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。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。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。地震波形データセットの作成に向けて、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。

### ○サブテーマ1「インテリジェントな地震波形処理」

#### (b-1) 業務の実施方法

##### 1) 地震計の振幅の異常検知

地震波形の振幅が想定される振幅と大きく異なること(10倍以上や0.1倍以下)を、本業務では地震計の振幅異常と呼ぶ。振幅異常は地震計が全く地表の動きを記録しない場合の他に、差分信号を計算するための2信号系列の片方が観測できない場合等、様々な理由で発生する<sup>1)</sup>。振幅異常は数週間から数ヶ月の間の観測データの振幅を見ることで把握できる。しかし単一観測点の単一イベントの波形の振幅のみでは判断しにくい。単一観測点の単一イベントの波形から振幅異常の可能性を見積もることができれば、不具合のある地震計の早期発見に役立つ。

本業務では、近接する観測点波形の特徴量を入力として所望の観測点の地震波形の特徴量を推定するエンコーダ・デコーダモデルを実装したほか、確率モデルに基づく地震計の振幅の異常を推定する手法を開発し、様々な特徴量の条件のもとで異常検知性能を比較した。

##### 2) P波・S波到達時刻の自動検測

ニューラルネットワークを用いた自動検測手法であるEQTransformer<sup>2)</sup>を用いて様々な地震波形からP波・S波到達時刻を推定し、手法の性能調査を行った。太平洋プレート上部境界におけるPS変換波や、海洋性地殻におけるガイド波を含む地震波形を用いて、主に後続波を含む地震波形のP波・S波到達時刻の推定がどの程度頑健に行えるかを確認した。

#### (c-1) 業務の成果

##### 1) 地震計の振幅の異常検知

確率モデルの一種である混合ガウス分布モデル(GMM)と変分オートエンコーダ(VAE)を用いて異常検知手法を構築し、その性能を比較検証した。振幅異常は振幅スペクトルの形状を変化させるため、スペクトル形状の確率モデルによって振幅異常を検知できると期

待される。そこで振幅スペクトルの形状の指標である 10 次元のスペクトル特徴量を用いて確率モデルを構築した。このスペクトル特徴量よりも人手の介入の少ない特徴量であるスペクトルのログフィルタバンク出力 (10-150 次元) と比較して、本業務で新しく提案するスペクトル特徴量の有用性を検証した。

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網の 2016 年 7 月 1 日から 2021 年 8 月 31 日までの茨城県北部を震源とする小規模な地震の観測データ 76357 点を使用して異常検知の実験を行った。各点は 1000Hz サンプリングの南北 (NS)・東西 (EW)・上下 (UD) 3 軸 300 秒間の速度波形であり、NS 軸/UD 軸および EW 軸/UD 軸の平均値を差し引いた後の最大振幅の比を目視で確認し、観測開始後 1500 日-1800 日のイベントを記録した 12550 点を振幅異常であるデータとした (図 1)。

検証の結果、本業務で新しく提案したスペクトル特徴量が振幅異常の検知に有用なことがわかった。検証結果を図 2 に示す。確率モデルに混合ガウス分布モデルを用いた場合、スペクトル特徴量による性能が、混合数 (n) の違いに関わらずログフィルタバンク出力の性能より優れていた。ログフィルタバンク出力を用いると、次元数 40-60 次元で性能が極大となり、以後次元数増大に伴って性能が低下した。変分オートエンコーダによる確率モデルを用いた場合には、ログフィルタバンク出力による性能が特徴量の次元数増大に伴って性能が向上し、次元数が 90 次元を超えた時点で、変分オートエンコーダとスペクトル特徴量より優れた性能もしくは同等な性能であった。混合ガウス分布モデルとスペクトル特徴量を用いた場合に最も高い性能 (AUC=0.93, F1 値=0.905) を達成した。また今後より高次元の特徴量を用いる場合には、特徴量の次元増大に伴う性能低下を回避できる変分オートエンコーダを用いると良いことが示唆された。

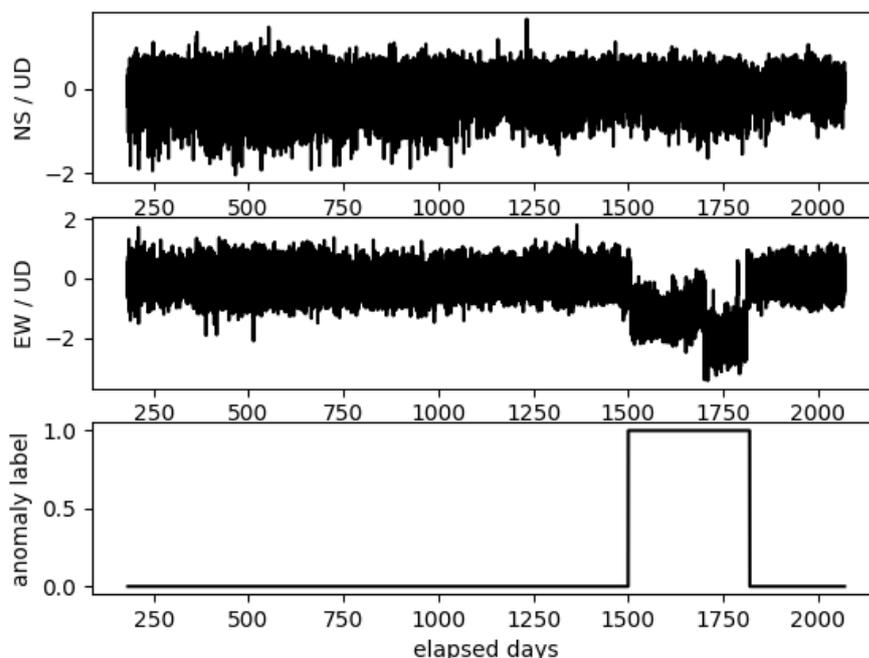


図 1 茨城県北部臨時地震観測網の猿喰観測点において発生した地震に関する水平動と上下動の最大振幅の比。上段は南北動と上下動の最大振幅の比を示す。中段は東西動と上下動の最大振幅の比を示す。下段は最大振幅比に異常が見られる場合を 1、見られない場合

を 0 としてつけた異常ラベルを示す。

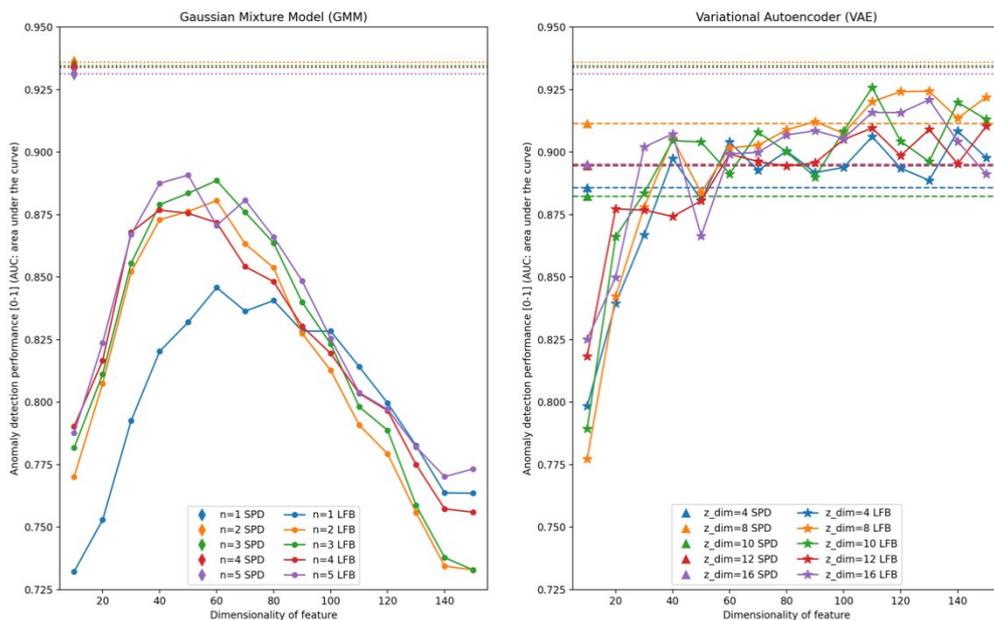


図 2 振幅異常検知の性能比較結果。縦軸は受信者操作特性による AUC (値域: [0, 1])、横軸は特徴量の次元数であり AUC は 1 に近いほど良好な性能である。凡例中の SPD はスペクトル特徴量、LFB はログフィルタバンク出力を表し、左図中の  $n$  は GMM 混合数、右図中の  $z\_dim$  は VAE の潜在変数の次元数を表す。

## 2) P 波・S 波の到達時刻の自動検測

後続波が既存の自動検測手法による検測結果に影響を与えるかどうかを検証するため、後続波がある場合とない場合における検測結果を比較した。ここでは、既に数多くの自動検測手法が提案されているが<sup>3)</sup>、手始めとして、広く用いられつつある EQTransformer の学習済みモデル<sup>2)</sup>を利用した。後続波を含まない波形では、EQTransformer が P 波と S 波の到達時刻を妥当に推定することを地震波形の目視によって確認した。一例を図 3 に示す。後続波を含む場合は、P 波と S 波の到達時刻を適切に読み取る一方で、後続波は P 波とも S 波とも判定しないという結果が得られた (図 4)。既存の学習済みモデルでは、学習データにある直達 P 波・S 波と、学習データにない後続波とは区別されているものと考えられる。後続波を読み取るための手法は別途、開発する必要がある。

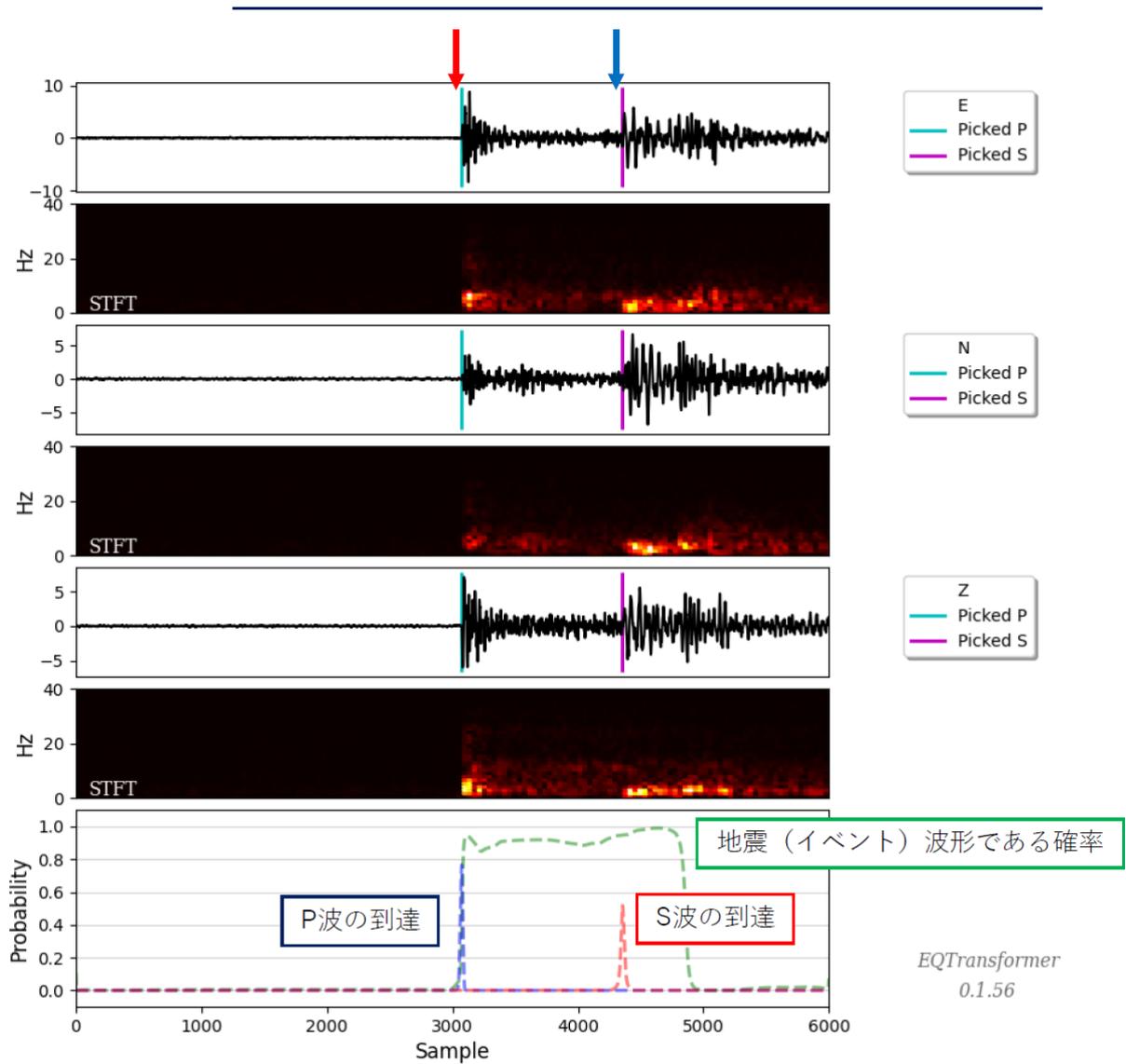


図3 2007年7月2日9時48分(日本時間)に仙台湾の深さ79kmで発生したM2.7の地震の防災科学技術研究所(防災科研)Hi-net小国観測点(N.ONIH)における観測波形に対してEQTransformerを適用した結果。上段から、東西動の速度波形、東西動のスペクトログラム、南北動の速度波形、南北動のスペクトログラム、上下動の速度波形、上下動のスペクトログラム、EQTransformerの出力をそれぞれ示す。最上段にある赤矢印、青矢印は目視で確認したP波とS波の到達時刻をそれぞれ示す。

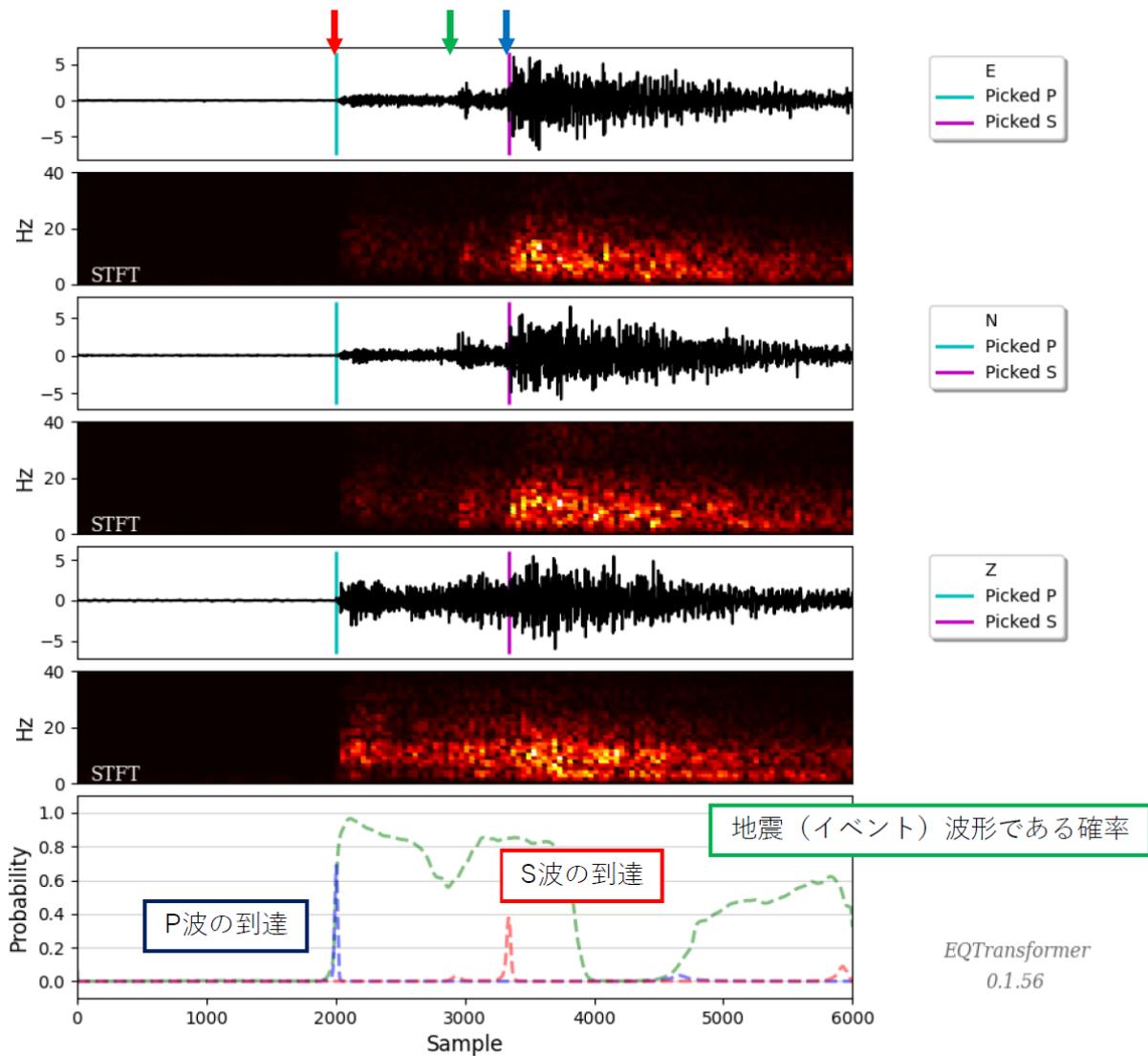


図4 2009年12月15日18時25分(日本時間)に十勝沖の深さ72kmで発生したM3.0の地震の防災科研Hi-net大樹観測点(N.TKIH)における観測波形に対してEQTransformerを適用した結果。最上段にある赤矢印、緑矢印、青矢印は目視で確認したP波、PS変換波、S波の到達時刻をそれぞれ示す。

○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」  
(b-2) 業務の実施方法

今年度は、先行研究の文献調査を行い、文献調査の結果をもとに手法開発に着手した。初年度であることから、手法開発はプロトタイプ的なものと位置づけ、実データ(具体的には2016年熊本地震の地震カタログ)に適用しながら開発を進めた。

(c-2) 業務の成果

1) 文献調査のまとめ

震源分布から断層面の形状を推定する問題は、点群(point cloud)データをいくつかのグループにわけるsubspace clusteringの問題と見なせる。この問題は、物体認識や

surface reconstruction を扱う computer vision に関する分野のほか様々な学術分野で盛んに研究されており、多くの手法が提唱されている<sup>4)</sup>。

その一つが主成分分析 (PCA) にもとづくもので、断層面の推定にも用いられてきた<sup>5), 6)</sup>。但し、PCA が適用できるのは認識すべき物体 (我々の問題では断層面) が 1 つの場合に限られ、認識すべき物体が複数の場合、事前にデータを分割する必要がある。

一方、Random Sampling Consensus (RANSAC)<sup>7)</sup>を震源データに適用し、多数のリニアメントを抽出した研究もある<sup>8), 9)</sup>。いずれも、PCA での解析と同様に震源を複数の地震群に分割した上で、各群に対して RANSAC を適用してリニアメントを抽出した。

余震活動では、本震の震源断層と関係すると考えられる on-fault の余震活動のほか、本震の震源断層とは離れたところで起こる off-fault の余震活動が認められる。そして、余震分布から震源断層を推定する場合、off-fault の地震は外れ値に相当すると考えられる。また、複数の断層を推定する場合、ある着目している断層とは異なる断層に属する震源は、着目している断層を推定する際には外れ値に相当する。したがって、複数の断層を推定する際にはデータに含まれる外れ値の割合が多くなる。以上から、複数の断層面を決定する際には、外れ値への対応が重要と考えられる。

外れ値への対応という視点で検討すると、PCA は外れ値に対して頑健とは言えないことも指摘されている<sup>4)</sup>。一方、RANSAC は外れ値に対して頑健であるとされている<sup>7)</sup>。この点を踏まえ、今年度は RANSAC を用いて手法の開発を進めることとした。

## 2) 解析手法の開発

### a) データ

本業務で使用した実データは 2016 年熊本地震の地震カタログ<sup>10)</sup>である。このカタログには、最初の大きな前震が発生した 2016 年 4 月 14 日から 2017 年 12 月 31 日までに発生した 16,853 個の地震が収録されている。このうち、6,853 個の地震の発震機構が決められている。

図 5 に余震分布を示す。左側の本震発生後 24 時間以内のものと比べ、右に示した本震発生後の全ての余震 (2017 年 12 月末日までに発生した余震) 分布を比べると、余震活動が活発な地域が、主として南西方向と北西方向に広がっていることがわかる。こうした拡大傾向は、中ほどに示した本震発生後 72 時間以内の余震分布にも既に認められ、本震発生後の比較的早い時期から余震域が拡大しつつあったと考えられる。そこで、問題を簡単にするため、本震発生後 24 時間以内に起こった地震 (総数 847 個) を対象とした。

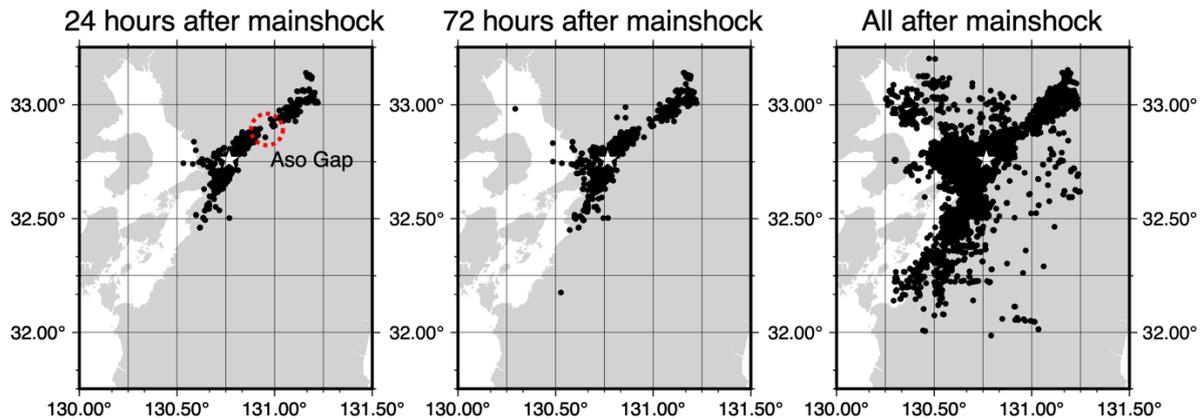


図5 2016年熊本地震の余震分布。星印は本震の震央。データは志藤ほか<sup>10)</sup>による。(左)本震発生後24時間以内、(中)本震発生後72時間以内、(右)本震発生後から2017年12月31日まで(本震発生後の全データ)。

本震の震源過程の解析<sup>11), 12)</sup>から、本震の破壊は近接する複数の断層面上で生じたと考えられ、そのうち主要なものは2枚と考えられる。また、余震分布の大きな特徴の1つは、図5でAso Gap<sup>11)</sup>と記された余震活動が低調な領域が認められることである。余震分布だけからは、本震で大きなすべりが生じた可能性と地震性の破壊が生じにくいという、全く正反対の2つの可能性は区別できない。

#### b) 手法

解析の流れを図6に示す。解析の主要部分にあたる断層面の推定ではRANSACを用いたのは前述のとおりである。

データの項で述べたとおり、2016年熊本地震の震源断層は斜交する2枚の断層からなると考えられる。これら2つの断層(の延長部)が交わる辺りでは、震源分布は面を形成するというよりは斜交した2枚の面状に分布する震源(およびoff-faultの震源)が重なった結果、平面的というよりは3次的に広がって分布しているように見える可能性がある。そして、こうした領域において平面を抽出するのは難しいと想定される。

同様の問題は、屋内の壁のように交わる平面を点群データから同定する問題などでも指摘されている。この問題を回避するため、平面的に分布していると判断されるところだけを抽出して面をまず推定し、その後、平面的とは見なせない領域がどの平面に属するかを検討する手法が提案されている<sup>13)</sup>。

本業務でも同様の解析方針をとることとし、平面的に分布しているかどうかが震源データを2つのカテゴリにわけた。平面的に分布しているかの検討に際しては、着目している震源とその近傍に分布する震源とを組み合わせたデータセットを作成し、各震源の位置を入力データとしてPCAを実施し、得られた固有値を使用した。

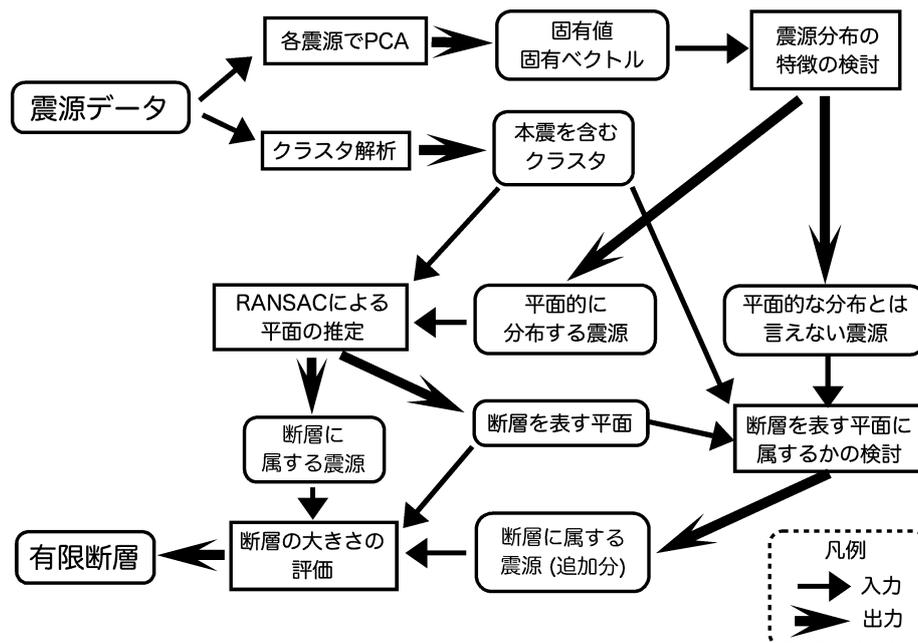


図6 本業務で実施した解析の流れ図。

前述のとおり、実際の余震活動では、震源断層近傍で発生している地震もあれば、震源断層と離れたところで起こっている領域で発生している地震もあると考えられる。そこで、クラスタ解析から本震の震源を含むクラスタを抽出し、そのクラスタのみを断層を推定するための入力データとした。

RANSACでは、入力データをもとにして検出すべき形状（例えば、直線、平面）の仮説を立てるステージと、立てた仮説をデータで検証するステージからなる試行をくり返し、データを最も説明できるものを探索している<sup>7)</sup>。仮説を立てるステージでは、事前に設定した枚数の平面を同時に作成した。1つの平面に対しては、平面を生成するために最低限必要な数である3点をランダムに抽出した。仮説を検証するステージでは、作成した複数の平面を同時に評価し、各平面の評価値の合計をその試行（平面の組み合わせ）の評価値とした。評価には2つの基準を採用した。1つは仮定した平面からの距離で、もう1つは仮定した平面の法線ベクトルの向きと各点での法線ベクトルとの向きの違いである。それぞれに対して閾値を設定し、距離および角度の違いがともに閾値より小さいものを平面に属する震源とした。

探索で得られた平面の広がり进行评估する準備として、平面の探索では用いなかった震源（本震と同じクラスタに属するが平面的に分布してはいないと判断された震源）が、探索で得られた平面に属すると見なせるかを評価した。その評価基準は、平面の探索で用いたものと同じである。

最後に、各平面に属する震源から平面（断層面）の大きさを求めた。断層面は長方形で近似できると仮定し、そのうちの一方の辺が地表面と平行であるとした。そして、各平面に属する震源を、得られた平面に対して垂直に射影し、射影された点を含む最小面積の長方形をもって断層面とした。

### c) 結果

PCA の結果をもとに震源分布の特徴を検討した結果を図 7 に示す。平面的に分布するとされた震源は 315 個で全体の 37%であった。断面図 (図 7b, c) から読み取れるように、解析した全域において平面的に分布するとされる震源とそうではない震源が混在する傾向が認められる。

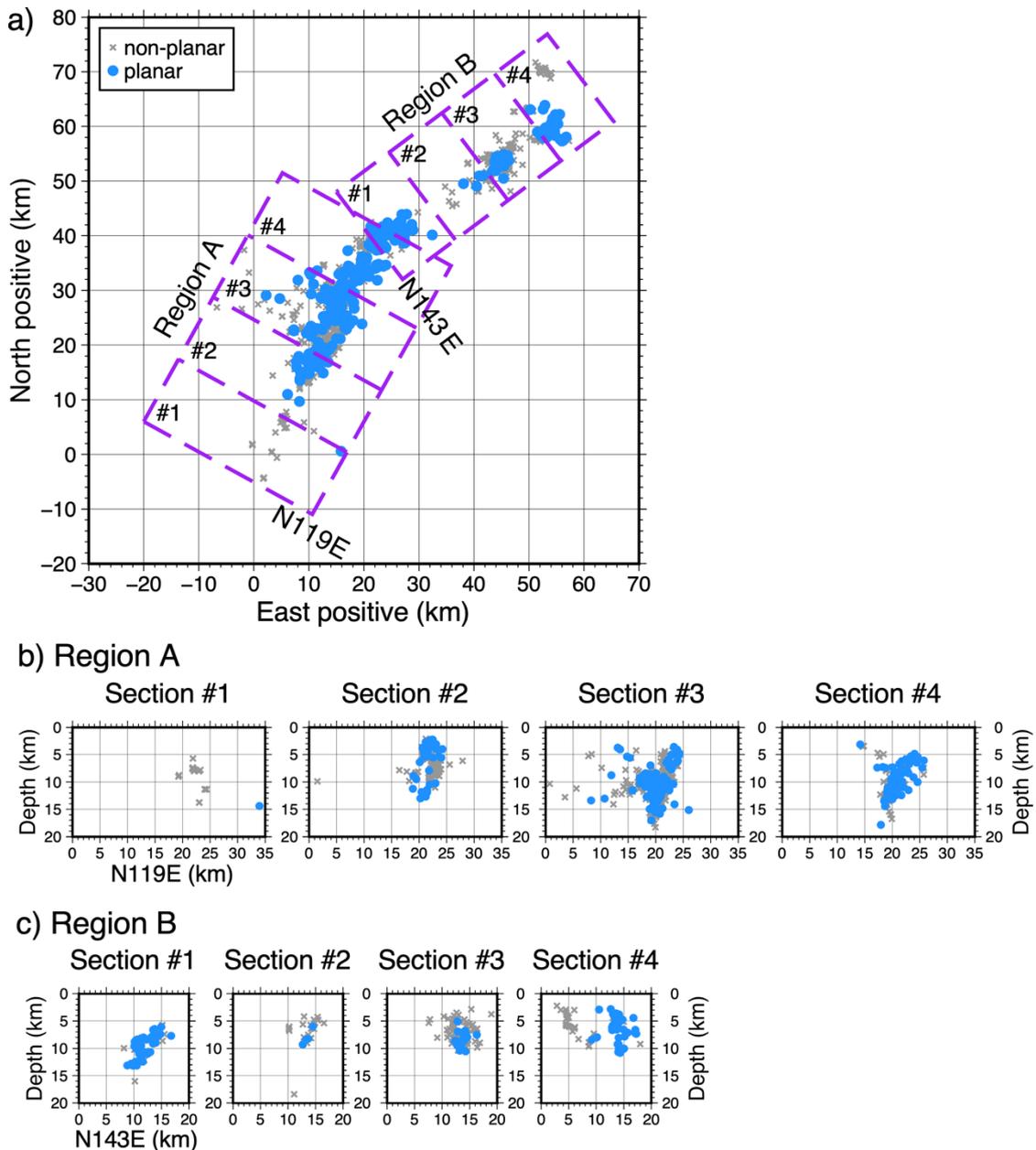


図 7 震源分布の特徴による分類。a) map view、b) Region A における断面、c) Region B における断面。

クラスタ解析の結果を図 8 に示す。Aso Gap のところでクラスタがわかれ、本震の震源は大きなクラスタ (図の Cluster #1) に属しており、このクラスタに属する震源は 610 個であった。このクラスタに含まれる震源のうち、平面的に分布しているとされる震源は 278 個で、このクラスタに占める割合は 46%である。

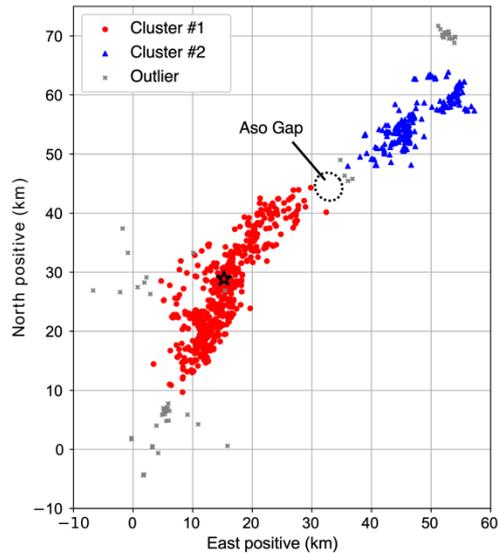


図 8 クラスタ解析の結果。クラスタ解析で得られたクラスタごとにシンボルの形状と色は異なる。灰色のクロスはクラスタを形成していないと判断された震源。黒の星印は本震の震源の位置を示し、本震の震源は Cluster #1 に属する。

推定された断層面を図 9 に示す。南東側の断層に属するとされた震源は 67 個、北東側の断層に属するとされたものは 38 個で、合計は 115 個である。検討の対象とした 610 個のうちの 20%弱が断層面に属するとされた。

図 9 では、比較の対象として、矢来ほか<sup>12)</sup>による「矩形断層モデル」の断層面を併せて示した。矢来ほか<sup>12)</sup>では、余震分布のほか、干渉 SAR や GNSS で得られた変位をもとに断層の位置や走向、傾斜角を推定しているため、余震分布のみで決めた本解析の結果とはある程度独立しており、本解析で得られた結果の検証に適していると判断した。

南側の断層に関しては、本解析で得られた断層の走向および傾斜角はそれぞれ 202 度、71 度で、矢来ほか<sup>12)</sup>の断層 B の走向 (205 度) や傾斜角 (72 度) とよく一致している。但し、本解析で得られた断層の方が北東側にも南西側にも伸びている。特に北東側は矢来ほか<sup>12)</sup>の断層 A1 の位置まで伸びている。

一方、北側の断層に関しては、本解析で得られた走向および傾斜角はそれぞれ 231 度、37 度であり、矢来ほか<sup>12)</sup>の断層 A1 の走向 (235 度) とよく一致しているが、傾斜角 (60 度) よりも 20 度以上低角に求まっている。

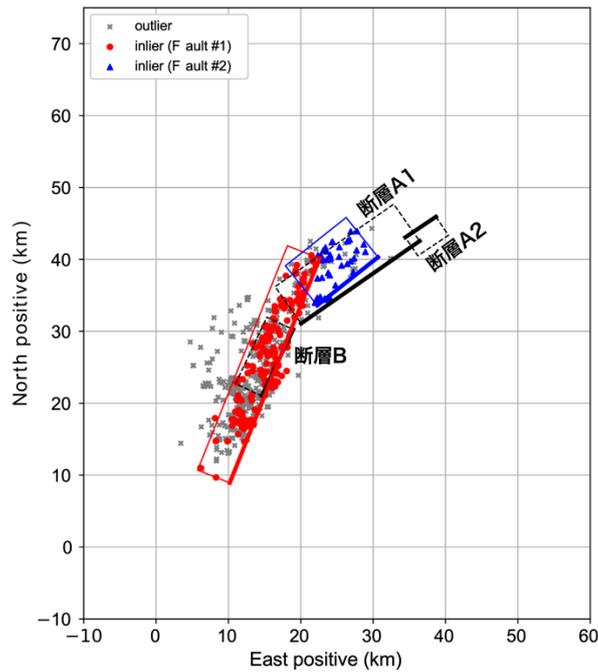


図 9 断層面の推定結果。赤と青の長方形は推定された断層面を地表に投影したもの。太い線が最も浅い辺。赤丸は赤の断層を構成する震源で、青三角形は青の断層を構成する震源。灰色のクロスはいずれの断層にも属しないとされた震源（外れ値）。黒線は矢来ほか<sup>12)</sup>中の「矩形断層モデル」を地表に投影したもので、矢来ほか<sup>12)</sup>で用いられている断層の名称も付した。太い実線が最も浅い辺。

断層の傾斜角の違いを検討するため、図 10 の破線で囲んだ部分の断面を作成した。断面は断層 A1 の走向と直交する方向にとり、断面図中の黒い太線が矢来ほか<sup>12)</sup>の断層 A1 を投影したものである。震源分布と断層の位置が乖離しており、矢来ほか<sup>12)</sup>の断層 A1 と同様の傾斜角を有する断層を、この震源データから設定するのはやや難しいことが見てとれる。この震源データを用いる限り、断層の傾斜が緩くなりがちになるのは避けられないと思われる。

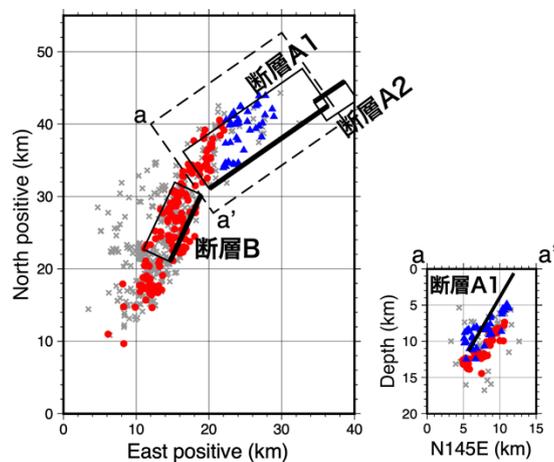


図 10 (左) 矢来ほか<sup>12)</sup>の「矩形断層モデル」(黒線)と震央分布を重ねたもの。本業務で断層面を推定するために用いた震源のみを示す。色およびシンボルの違いの意味は図 9

と同じ。破線で囲んだ箇所の断面を作成。図 9 よりも描画範囲が狭いことに注意。(右) 矢来ほか<sup>12)</sup>中の「矩形断層モデル」の断層 A1 の走向に直交する方向で作成した断面。断面中の黒い太線は矢来ほか<sup>12)</sup>の断層 A1 を投影したもの。

### ○サブテーマ 3 「後続波を用いた断層面形状の決定」

#### (b-3) 業務の実施方法

##### 1) 後続波の観測事例の収集

文献調査とそれに基づく地震波形の目視観察により日本各地における後続波の観測事例を収集し、その観測状況を整理した。

##### 2) 後続波観測の空間的特徴の分析

後続波を含む地震波形の空間的特徴を t-SNE 法<sup>14)</sup> (t 分布型確率的近傍埋め込み法) を用いて分析した。t-SNE 法は教師なしの次元削減手法の 1 つであり、高次元のデータ同士の特徴の類似度を可能な限り維持しつつ、低次元 (2 次元) へ写像することでその関係を可視化する。本年度は太平洋プレート上部境界での PS 変換波が報告されたスラブ内地震<sup>15)</sup>を対象とし、分析を行った。

##### 3) 茨城県北部における反射波の探索

茨城・福島県境付近では地殻内反射面の存在が指摘されている<sup>16), 17)</sup>。そこで、産業技術総合研究所で展開した臨時観測点とその周辺の定常観測点 (防災科研 Hi-net、高萩観測点 (N. THGH)、北茨城・北茨城 2 観測点 (N. KIBH/N. KI2H)、十王観測点 (N. JUOH)) の観測記録から地殻内反射面の詳細な分布の推定を目指した研究に着手した。本年度は反射波の目視による同定と到達時刻の読み取りを行った。

#### (c-3) 業務の成果

##### 1) 後続波の観測事例の収集

本年度収集した後続波の観測・研究事例のうち、代表的なものを表 1 に示す。地殻内反射面に関連した反射波は日本各地で報告があるものの、個々の研究事例における観測範囲は局所的である。一方で、島弧モホ面やスラブ上部境界での反射波・変換波や海洋性地殻内のトラップ波は比較的広域で観測される。ただし、トラップ波は地震の発生位置により後続波の波形が容易に確認できる観測点の分布が大きく異なることが確認された。

表 1 日本で観測される後続波の例。PS: PS 変換波、SP: SP 変換波、Pref: P 波反射波、Sref: S 波反射波、Ptrap: P 波トラップ波、Strap: S 波トラップ波、SPtrap: SP 変換トラップ波、Sscat: S 波散乱波。

文献	後続波	地域	関連する構造
Amezawa <sup>18)</sup>	Sscat	森吉山	地殻内散乱体
Matsumoto <sup>19)</sup>	Sref	日光白根山	地殻内反射面

飯高 <sup>+16)</sup>	<i>Sref</i>	茨城・福島県境付近	地殻内反射面
Doi and Nishigami <sup>20)</sup>	<i>Sref</i>	2000年鳥取県西部地震 震源域	地殻内反射面
Aoki <sup>+21)</sup>	<i>Sref</i>	近畿	地殻内反射面
堀 <sup>+22)</sup>	<i>Sref</i>	東北	地殻内反射面
	<i>Pref</i> 、		
Nakajima <sup>+23)</sup>	<i>Sref</i> 、 <i>PS</i> 、 <i>SP</i>	東北	島弧モホ面
Wang <sup>+24)</sup>	<i>Pref</i> 、 <i>Sref</i>	九州	島弧モホ面
Hasemi <sup>25)</sup>	<i>Sscat</i>	東北	地殻内反射面？
Obara and Sato <sup>26)</sup>	<i>Sref</i>	関東	太平洋プレート
Matsuzawa <sup>+27)</sup>	<i>PS</i>	東北	太平洋プレート
Matsuzawa <sup>+28)</sup>	<i>SP</i>	東北	太平洋プレート
Uchida <sup>+29)</sup>	<i>PS</i> 、 <i>SP</i>	関東	フィリピン海 プレート
	<i>Ptrap</i> 、		
Shiina <sup>+30)</sup>	<i>Strap</i>	日高山脈西部	海洋性地殻
	<i>Ptrap</i> 、		
Hori <sup>+31)</sup>	<i>Strap</i>	関東・東海	海洋性地殻
	<i>Ptrap</i> 、		
Fukao <sup>+32)</sup>	<i>Strap</i>	東海	海洋性地殻
	<i>SPtrap</i>		
Miyoshi <sup>+33)</sup>		近畿	海洋性地殻

## 2) 後続波観測の空間的特徴の分析

t-SNE 法により波形特徴を分類した結果を図 11 に示す。解析時間幅は P 波到達から S 波到達直前までとし、対数振幅で規格化した 3 成分のスペクトログラム (1-50 Hz) を入力データとした。

図 11 からは適用したスラブ内地震の波形記録がいくつかのクラスタに分類されることが示唆された。ただし、これらのクラスタは背弧域 (赤色、橙色)、火山フロント付近 (黄色)、前弧域 (それ以外) に分布する観測点に対応しており (図 12)、必ずしも PS 変換波の観測に着目しているわけではないようである。東北日本背弧域下における地震波高減衰域の存在<sup>34)</sup>から、今回のクラスタリング結果はそのような地球内部の不均質構造の特徴を反映していると解釈できる。

明瞭な分類とはならなかったものの、PS 変換波が観測された観測点は (t-SNE 法による写像された 2 次元空間上で) 近接して分布する傾向がみられる (図 11)。この分布に基づいて観測波形を精査したところ、既存の検出記録<sup>15)</sup>には記載のない PS 変換波の観測事例 (図 12b) や誤検出と考えられる事例 (図 12c) を確認した。後者の事例では S 波の立ち上がりを PS 変換波の到達と誤って同定していた可能性がある。より規模の大きなデー

タセットを用いた検証は必要であるものの、これらの結果は機械学習技術が後続波の探索やその種類の同定をサポートするツールとなり得ることを示す。

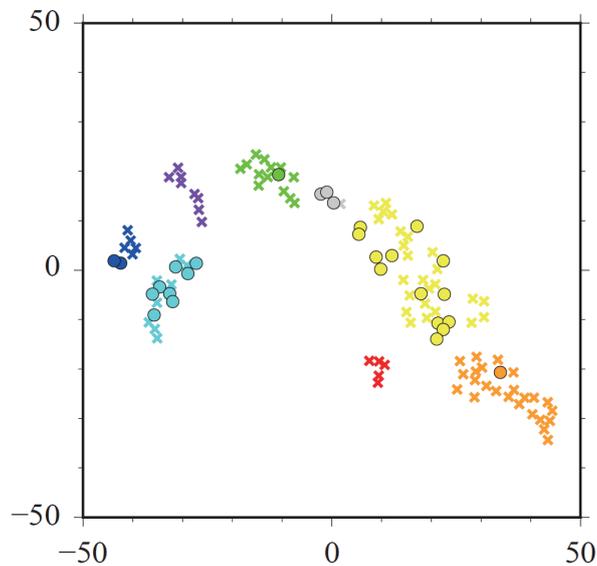


図 11 t-SNE 法でスラブ内地震の波形特徴を分類した結果。目視で判別したクラスタを異なる色で示す。丸は PS 変換波が観測された観測点<sup>15)</sup>、クロスはそれ以外の観測点に対応する。

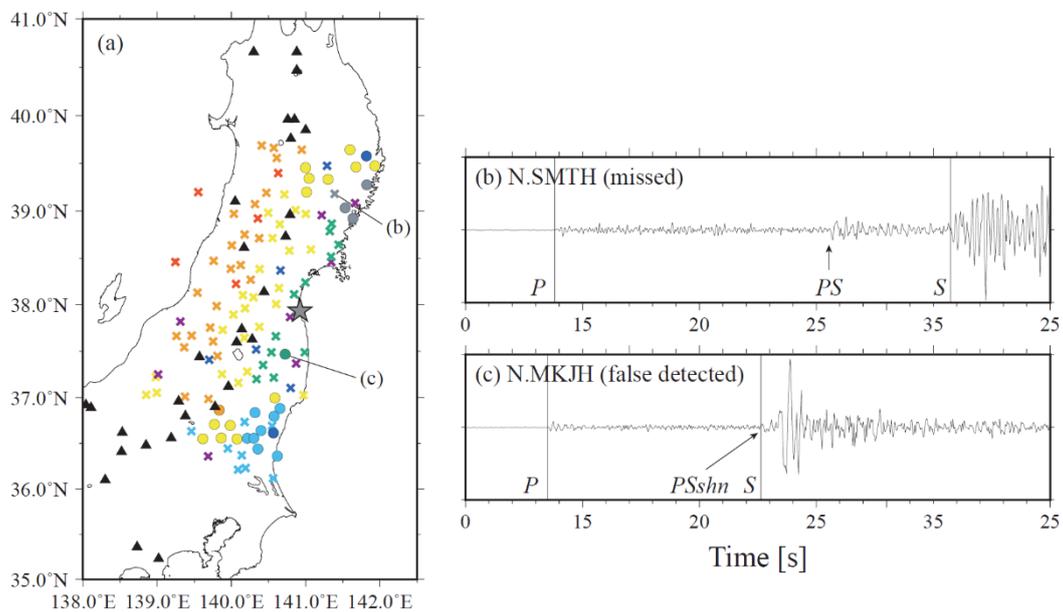


図 12 t-SNE 法で分類された観測点クラスタの空間分布。(a) 丸は PS 変換波が観測された観測点、クロスはそれ以外の観測点を示し、色は図 11 に対応する。星は対象としたスラブ内地震（深さ 80 km）の震央位置、三角は火山を示す。(b-c) 東西成分の観測波形例（最大振幅で規格化、1-16 Hz のバンドパスフィルタ）。縦線は P 波と S 波の到達時刻。PS：新たに読み取った PS 変換波の到達時刻、PSshn：既存研究<sup>15)</sup>で PS 変換波の到達として解釈した時刻。

### 3) 茨城県北部における反射波の探索

2016年6月から2021年1月までに茨城・福島県境付近で発生した地殻内地震（マグニチュード3.5～4.5）の観測波形を用いて、目視により反射波の有無を探索した。反射波の探索に用いた観測点は産業技術総合研究所が展開する臨時観測点7点と定常観測点3点（N.THGH、N.KIBH/N.KI2H、N.JUOH）<sup>35)</sup>である（図13）。

予備的な探索の結果として、同地域で発生した24個の地震についてS波反射波と推測される後続波を確認した。後続波を確認した地震の多くは観測網直下、すなわち茨城県北部で発生した地震であった（図13b）。また、同定した反射波についてその観測波形を調べ、S波到達からの遅延時間が3～6秒程度であることや水平動成分に卓越した粒子軌跡を持つなどの特徴（図14）を確認した。

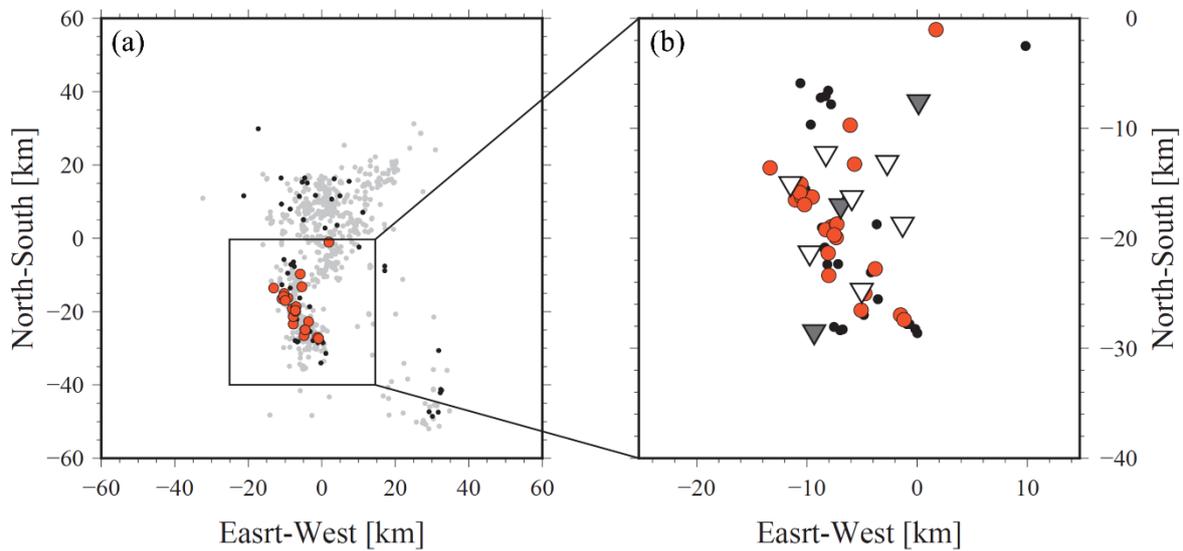


図13 茨城・福島県境付近における反射波の観測状況：(a) 解析領域全体と(b) 茨城県北部の拡大図。灰丸は2011年1月から2016年5月までに発生した地殻内地震、黒丸は2016年6月から2021年1月までに発生した地殻内地震を示す。赤丸は2016年6月以降に発生し、かつ反射波の観測が確認された地震。(b)内の白三角と灰三角はそれぞれ産業技術総合研究所で展開した臨時観測点と定常地震観測点（防災科研 Hi-net）の位置を示す。

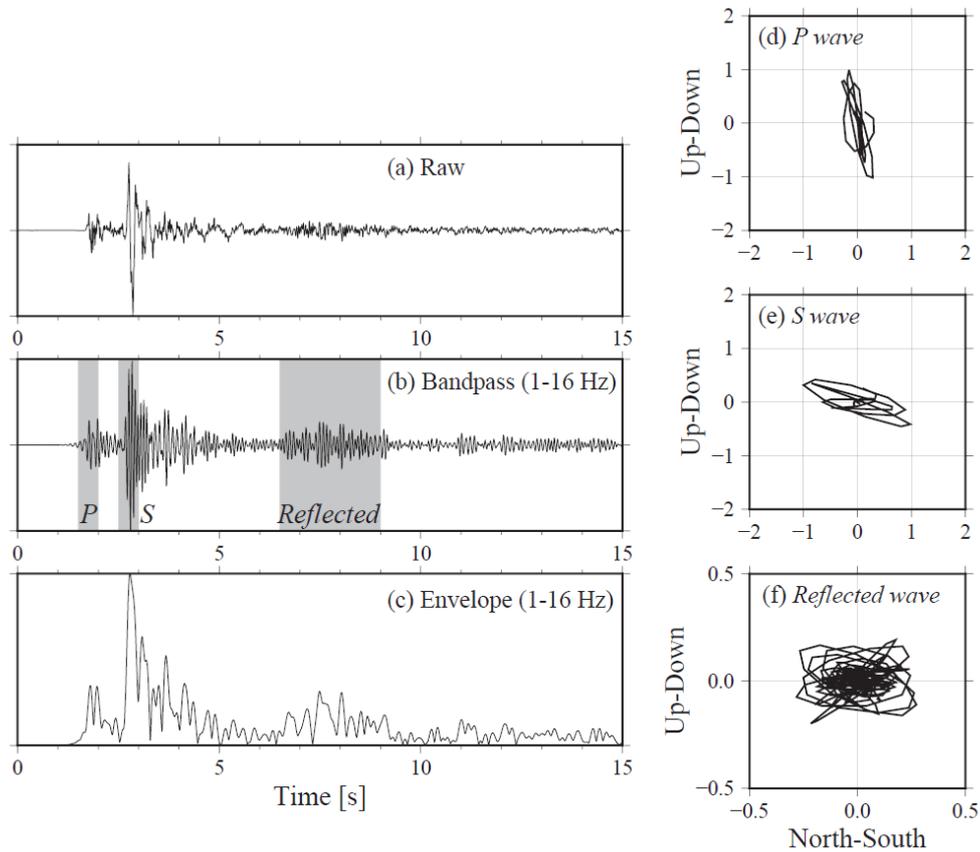


図 14 反射波の観測波形例。(a)南北動成分の生波形、(b)バンドパスフィルタ波形（1～16 Hz）、(c)エンベロープ。各波形は最大振幅で規格化。(d-f)規格化したバンドパスフィルタ波形の粒子軌跡（上下動成分と南北動成分）。時間窓は波形記録に灰色の範囲で、それぞれ P 波と S 波、反射波の到達時刻を含む。

#### ○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」

##### (b-4) 業務の実施方法

本業務では、機械学習などによる地震波検測手法の開発や性能比較に利用できるよう、地震波形データに P 波・S 波到達時刻や観測点位置情報などのメタデータを付けた地震波形データセットを作成することとしている。既に発表されている同種のデータセットは最近の論文<sup>3)</sup>で列挙されているが、そのうちのひとつとして、米国スタンフォード大学による STEAD<sup>36)</sup>がある。世界各地で観測されたおよそ 100 万本の地震波形データを含んだ大規模なデータセットである。ただし、日本のデータはここには含まれていない。そのデータの一部を目視で調べ、検測の品質を確認した。

本事業における地震波形データセット作成に向けて、まず、過去に産業技術総合研究所（以下、「産総研」）が地震観測で取得した地震波形データを整理した。次に、P 波及び S 波の到達時刻を読み取った。最後に、その結果を確認し、検測の質を保証するための手順について検討した。

##### (c-4) 業務の成果

###### 1) 既存の地震波形データセットの確認

米国スタンフォード大学が作成した地震波形データセット STEAD<sup>36)</sup>には約 100 万本という膨大な数の地震波形データが含まれているため、その全てを目視することは極めて困難である。そのため、ランダムで選び出した 200 本の地震波形を P 波到達時刻の検測値を基準にして並べることで、簡易的な確認を行った。図 15、図 16、図 17、図 18 に上下動の地震波形を 50 本ずつ示す。P 波到達時刻の検測は一般に、検測者によって多少異なることがあるが、それも一定の範囲内に収まる。すなわち、明らかに震源からの P 波が到達していない時間帯と、明らかに P 波が到達している時間帯があり、その間に P 波が到達したと考えられる時間帯がある。200 本の地震波形を見てみると、P 波到達時刻として適切な範囲に検測値が入っていることも多いが、明らかに不適切であると考えられるものもある。例えば、以下の地震波形データにおいては、P 波到達時刻の検測値よりも明らかに前に P 波が到達しているように見える。

- RLS.HL\_20120909065823\_EV (図 15 の中段)
- RC01.AK\_20120519140149\_EV (図 16 の中段)
- RATT.UW\_20140717135833\_EV (図 16 の下段)
- PSD.CI\_20171108051714\_EV (図 17 の上段)
- B047.PB\_20150129172701\_EV (図 17 の上段)
- D03D.TA\_20120811160955\_EV (図 17 の中段)
- MONP2.AZ\_20110510065952\_EV (図 18 の下段)

また、CWC.CI\_20131015070705\_EV (図 18 の下段) においては、P 波到達時刻検測値よりも後に P 波が到達しているように見える。ただし、こちらは、ノイズレベルのスケールまで縦軸を拡大してみないと、確かなことはわからない。そのほか、シグナル・ノイズ比が小さいためか、あるいは、震源と観測点が離れていて高周波数成分が減衰してしまったせい、P 波到達時刻前後における地震波形の違いが明瞭でなく、P 波到達時刻を読み取るのが容易でない地震波形データが多い。

STEAD は、自動検測のための機械学習などで使用できるデータセットの先駆的な例であり、その意義は高い。より信頼性の高い地震波形データセットを作るためには、P 波・S 波到達時刻を検測した後に、もう一度確認作業を入れる必要がある。シグナル・ノイズ比が小さいなど、そもそも検測が難しいデータがあることから、検測の品質を示す指標も必要になると考えられる。

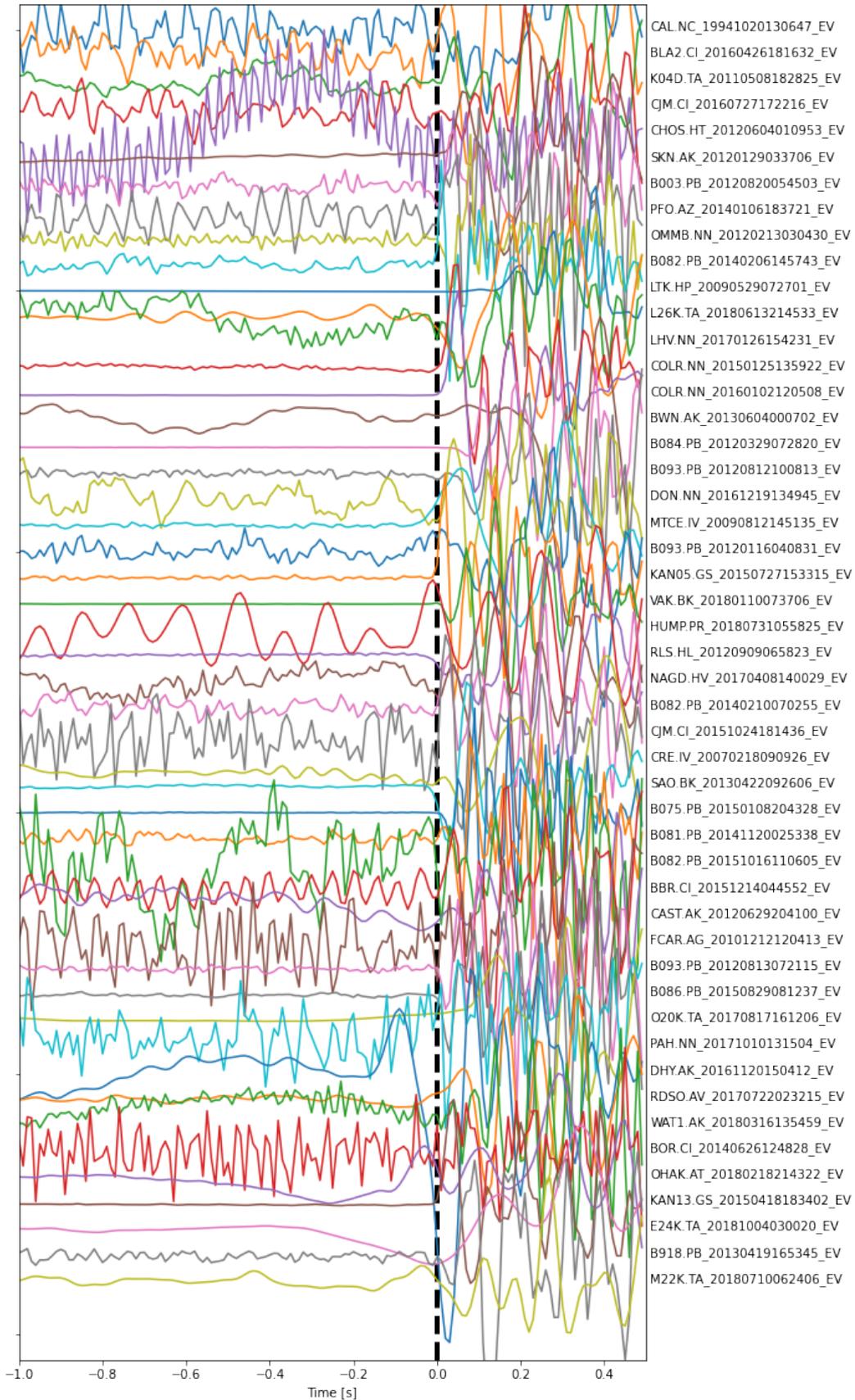


図 15 地震波形データセット STEAD からランダムに選び出した 50 本の上下動の地震波形。P 波到達時刻を縦の破線に合わせて並べた。

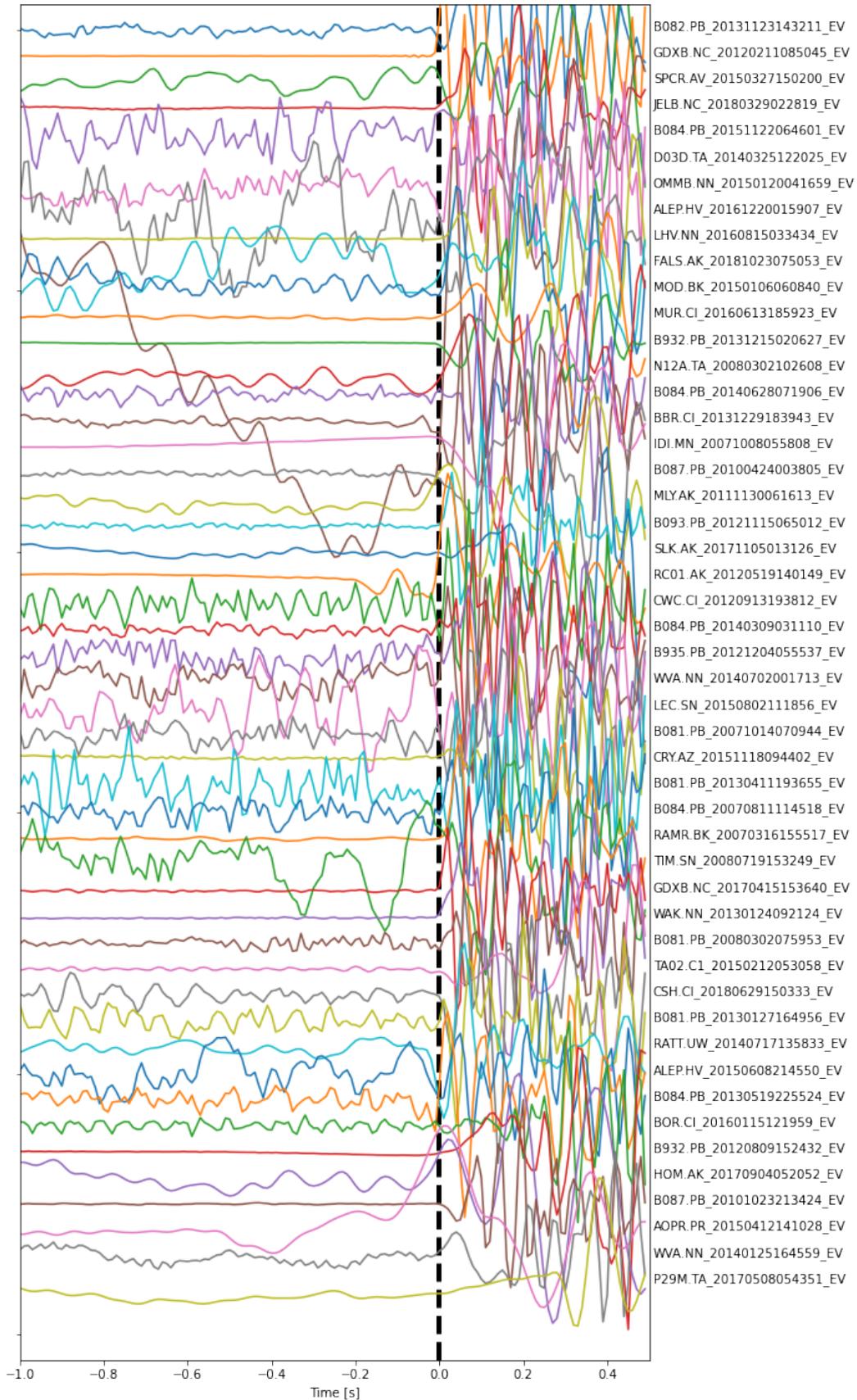


図 16 地震波形データセット STEAD からランダムに選び出した地震波形データ。図 15 とは別の 50 本の地震波形データ。

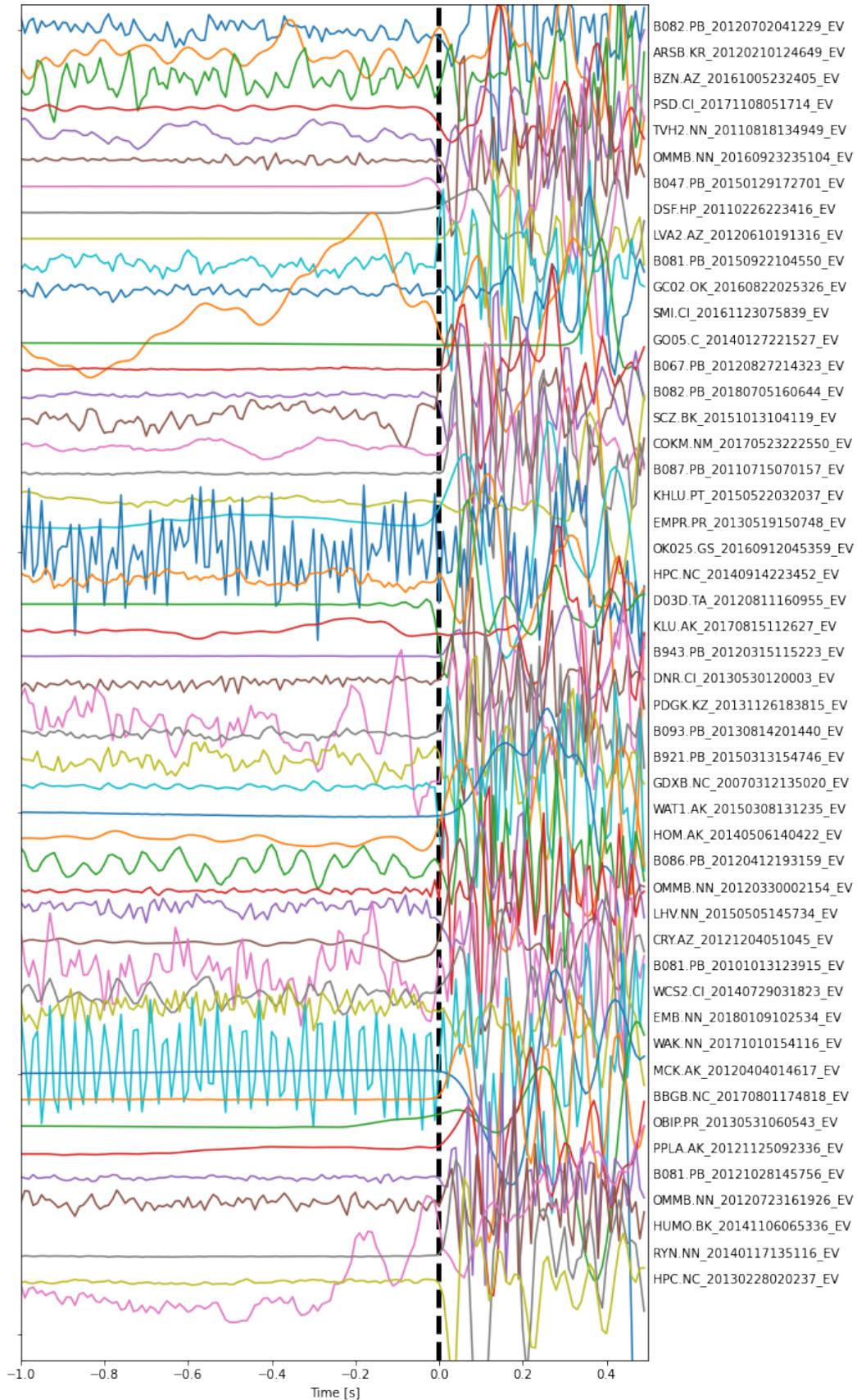


図 17 地震波形データセット STEAD からランダムに選び出した地震波形データ。図 15、図 16 とは別の 50 本の地震波形データ。

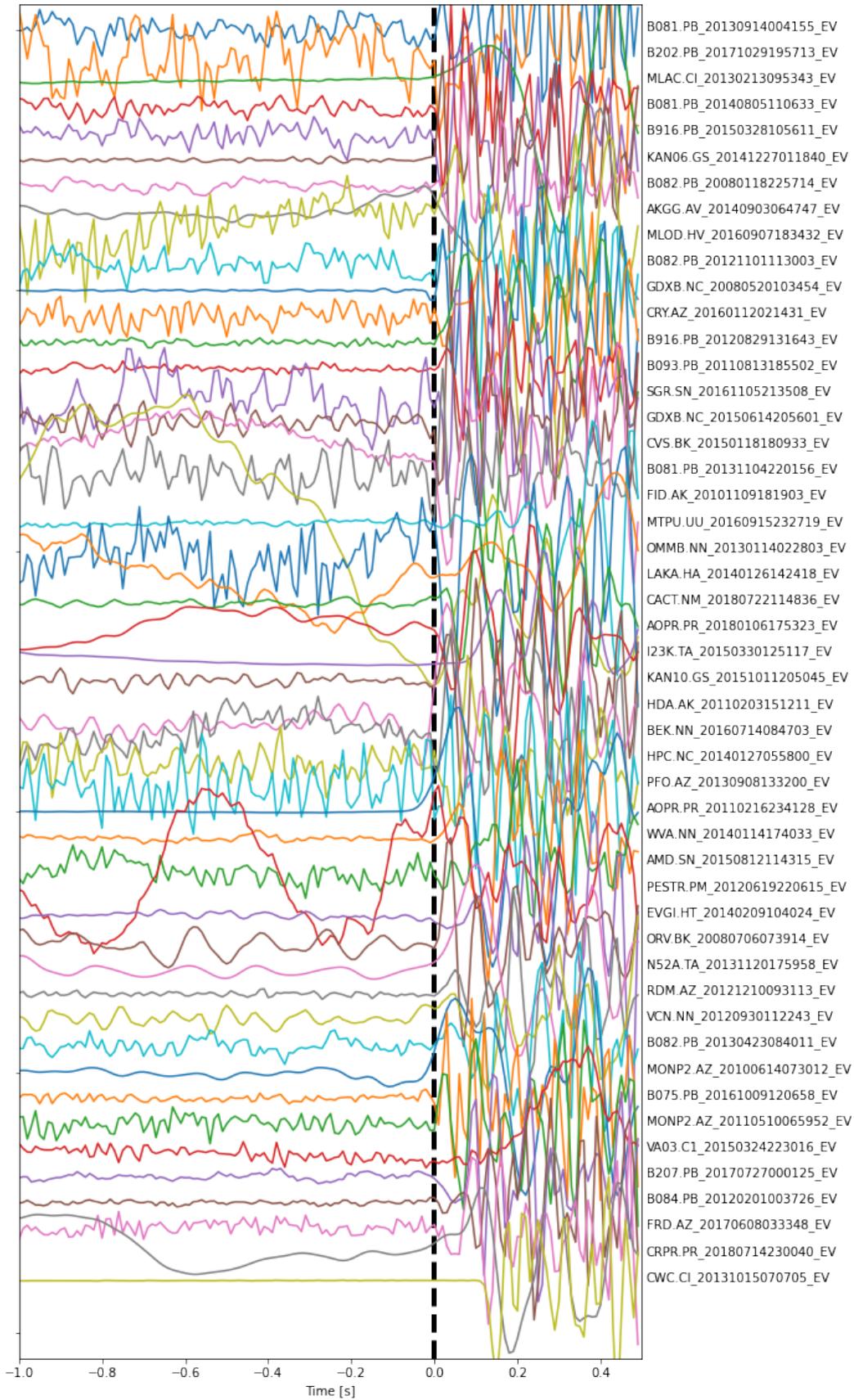


図 18 地震波形データセット STEAD からランダムに選び出した地震波形データ。図 15 ~ 図 17 とは別の 50 本の地震波形データ。

## 2) 本事業独自の地震波形データセットの作成

本事業独自の地震波形データセットを作るために、まずは産総研で過去に実施した地震観測で得られた地震波形データを整理した。使用したデータ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<sup>37)</sup>(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<sup>38), 39)</sup>(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」)で得られたものである。各臨時地震観測網の観測期間中に、同観測網の近傍にある定常地震観測点におけるP波及びS波到達時刻の気象庁一元化検測値が存在するような地震のデータを抜き出した。ここで、近傍にある定常観測点は、飯高アレイについては産総研飯高観測点(GS. ITA)、山梨県東部臨時観測についてはHi-net 塩山観測点(N. ENZH)、茨城県北部臨時観測についてはHi-net 高萩観測点(N. THGH)である。このようにして68664個の地震を抜き出した。これを以下、「全データ」と呼ぶ。

作業量の都合により、全データから、地震波形データセットに含める対象とする12000個の地震を抜き出した(図19)。その際、できるだけ偏りのないデータセットを作るため、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した。マグニチュードはグーテンベルク・リヒター則<sup>40), 41)</sup>により、観測限界が影響しない限り、累積頻度分布が指数分布に従う。そのため、単にランダムに地震を抜き出すと、小さい地震が圧倒的に多くなる。このような偏りを解消するために、地震発生数の少ないマグニチュード帯の地震を選びやすくなるような重み付けをしてランダム抽出を行った。具体的には、観測期間中に発生した地震をマグニチュード0.1刻みで分け、同じマグニチュード帯の地震の個数の逆数を重みとして与えた。得られた地震群のマグニチュード分布を図20に、深さ分布を図21にそれぞれ示す。

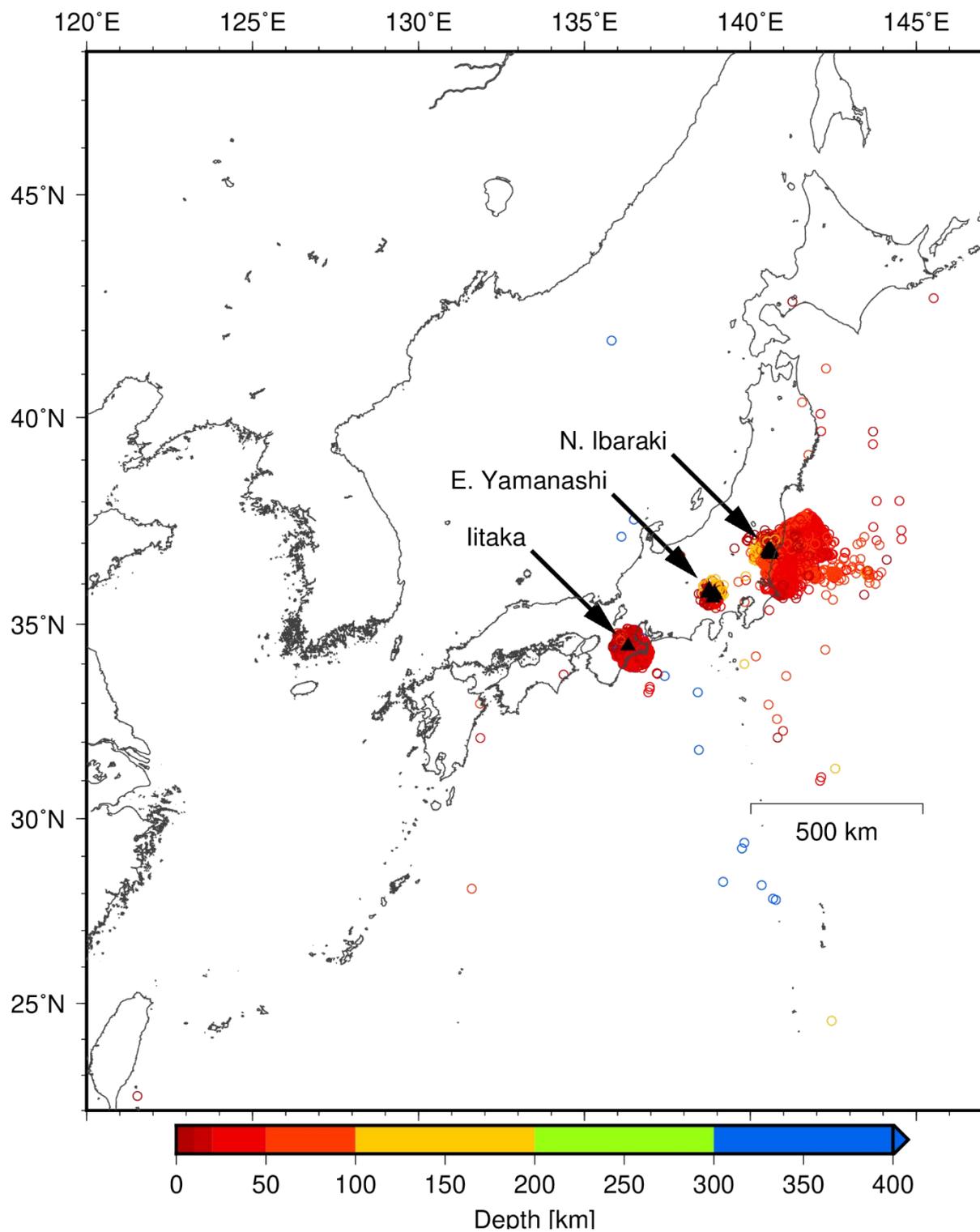


図 19 地震波形データセットの震源分布。三角印は飯高アレイ (Iitaka)、山梨県東部臨時観測 (E. Yamanashi)、茨城県北部 (N. Ibaraki) の観測点の位置を示す。

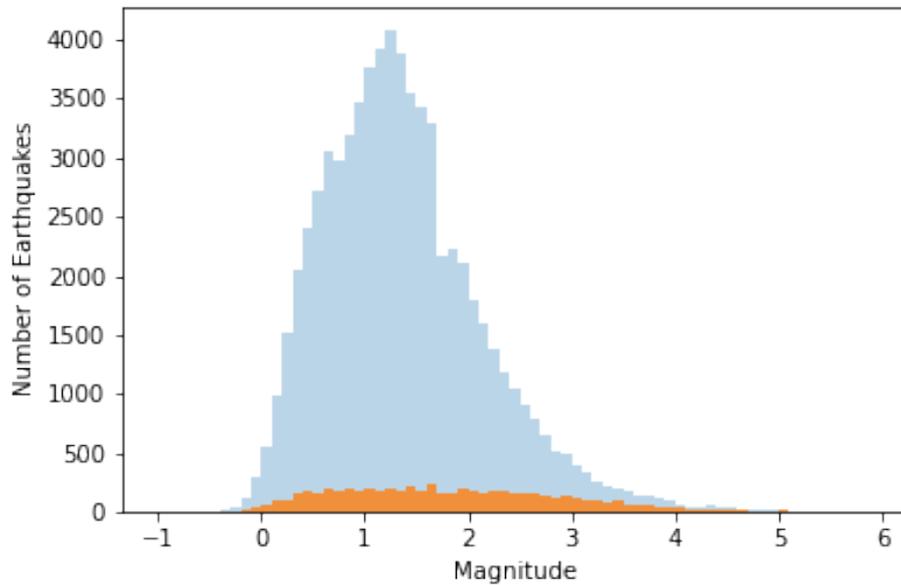


図 20 地震波形データセット（橙）と全地震データセット（水色）のマグニチュード分布。

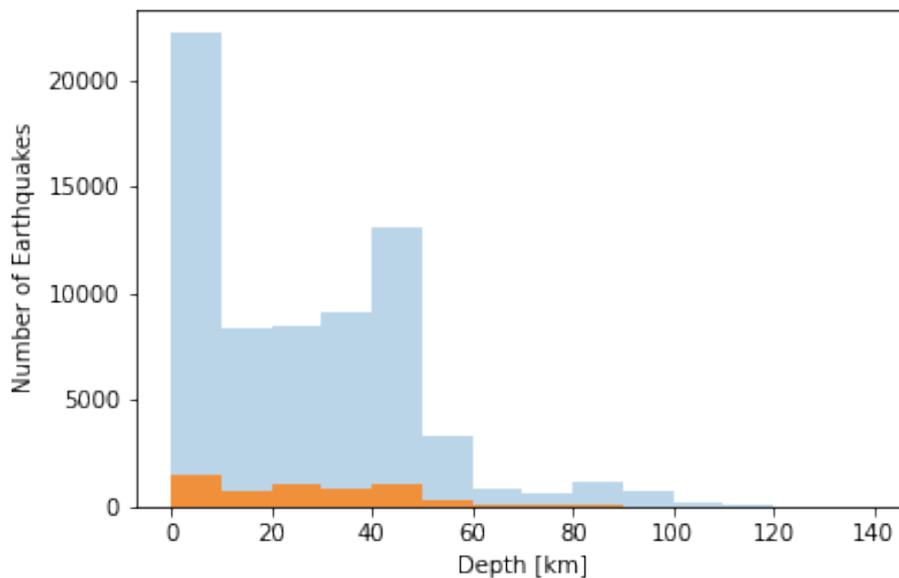


図 21 地震波形データセット（橙）と全地震データセット（水色）の震源深さ分布。

各地震について、臨時地震観測網からランダムに選んだ3つの観測点の地震波形データ（計36000本）を集めて、それらに対して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。到達時刻の読み取りに際しては、気象庁一元化処理による震源位置からの走時を計算して得られる理論的な到達時刻を参照し、近い時間帯に発生した地震などの影響を受けないようにした。バンドパスフィルタを通したデータを参考にしつつ、最終的には

生波形から目視でP波及びS波到達時刻を読み取った。

地震波到達時刻の読み取り誤差の目安は、以下のようにして求めた。P波については、手動検測によるP波到達時刻の1秒前から、P波到達時刻までの時間範囲（ノイズ区間）での、振幅の絶対値の最大値を求めた。次に、P波到達後、振幅の絶対値が、ノイズ区間の最大値の1.3倍以上となる時刻（P2）を求めた。誤差は、P2とP波到達時刻との差であるとした。S波については、手動読み取りによるS波到着時刻から、（S-P）時間の1/5前の時刻を設定した。そして、S波到着時刻までの区間での、南北動成分と東西動成分の絶対値の和の振幅の最大値を求めた。S波到着後、振幅が、この最大値を超える時刻（S2）を求めた。S波の読み取り誤差は、S波到着時刻と、S2との差であるとした。

読み取り結果の確認は、STEADのデータを確認したときと同様、多くの地震波形データを地震波到達時刻に合わせて並べて行った。その一部を図22、図23に示す。このような簡易的な確認方法でははっきりしないことも多いが、少なくとも、P波到達時刻については、STEADで見られたような、検測値が明らかに（0.05秒以上）P波の到達より遅いというようなものは見当たらなかった。S波については、Pコーダ波やS-P変換波など、S波の到達時に先んずる地震波があるため、図22、図23のような簡易的な確認では到達時刻を読み取ることが難しい場合がある。しかし、南北動と東西動の両者を総合的に見れば、到達時刻が明瞭な場合においてはきちんと読み取りができていくことがわかる。灰色帯で示した読み取り誤差の目安は、必ずしも誤差を適切に表現できていない可能性がある。地震波到達を読み取った時刻における速度値が0に近い場合を想定して誤差の目安を計算しているが、速度値がノイズレベルより明確に大きい場合は誤差の目安は小さく算出されることになる。誤差の目安については再考の余地がある。一部の読み取り結果については、個別の地震波形を詳しく確認した。図24、図25がその例である。概ね妥当な検測が行われていることが確認できているが、そもそもP波・S波到達時刻の読み取りが難しい地震波形データもあり、まだ確認作業が必要な状態である。

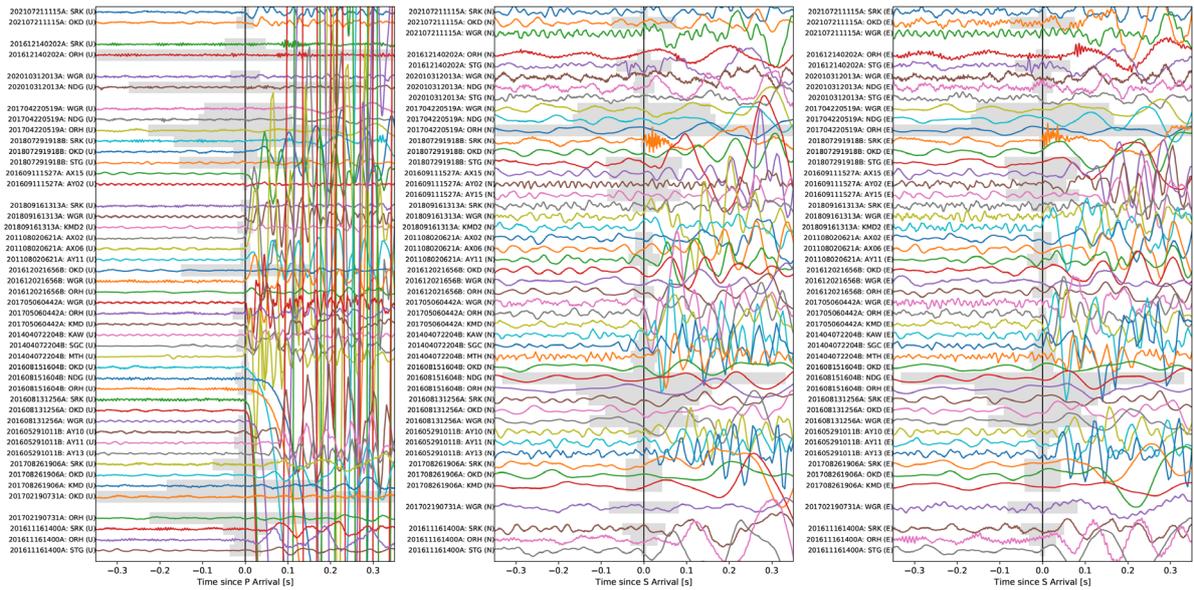


図 22 本事業による手動検測の結果。左から順に上下動、南北動、東西動の速度波形を示す。上下動はP波到達時刻、南北動及び東西動はS波到達時刻を基準に、その前後 0.35 秒を図示している。P波到達時刻の読み取りができなかった場合、上下動は表示していない。同様に、S波が到達時刻の読み取りができなかった場合、南北動及び東西動は表示していない。灰色の帯は読み取り誤差の目安を示す。

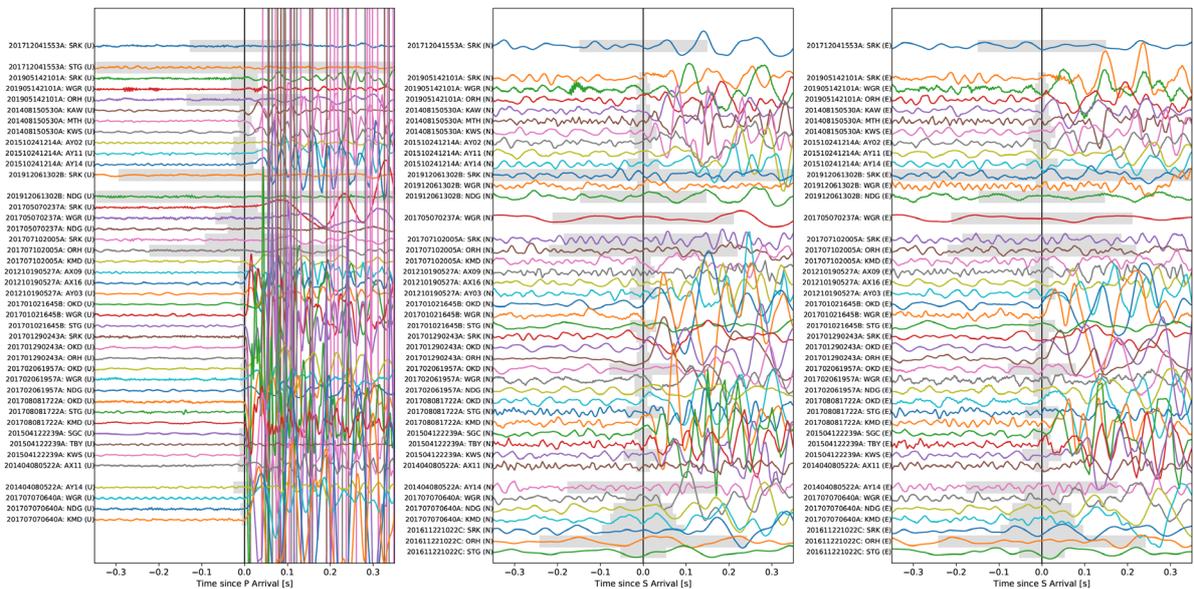


図 23 本事業による手動検測の結果。図 22 とは別のデータを示している。

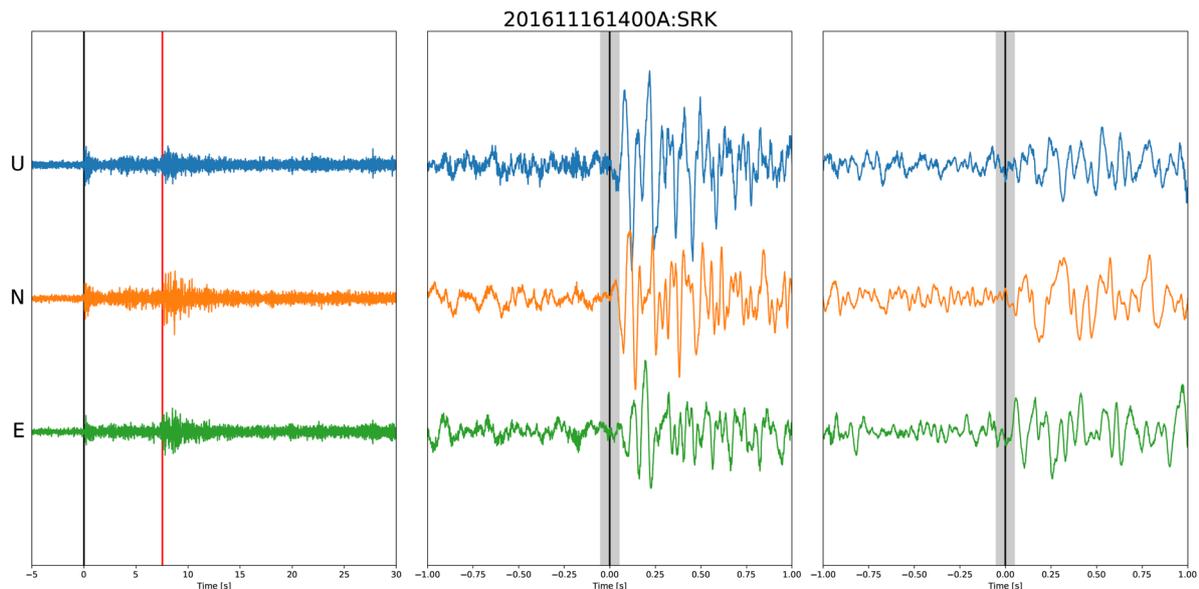


図 24 本事業による手動検測の結果。本事業による手動検測の結果の一例。上から順に、上下動、南北動、東西動を示している。左から順に、地震波形全体、P波到達時刻付近、S波到達時刻付近の地震波形を示す。

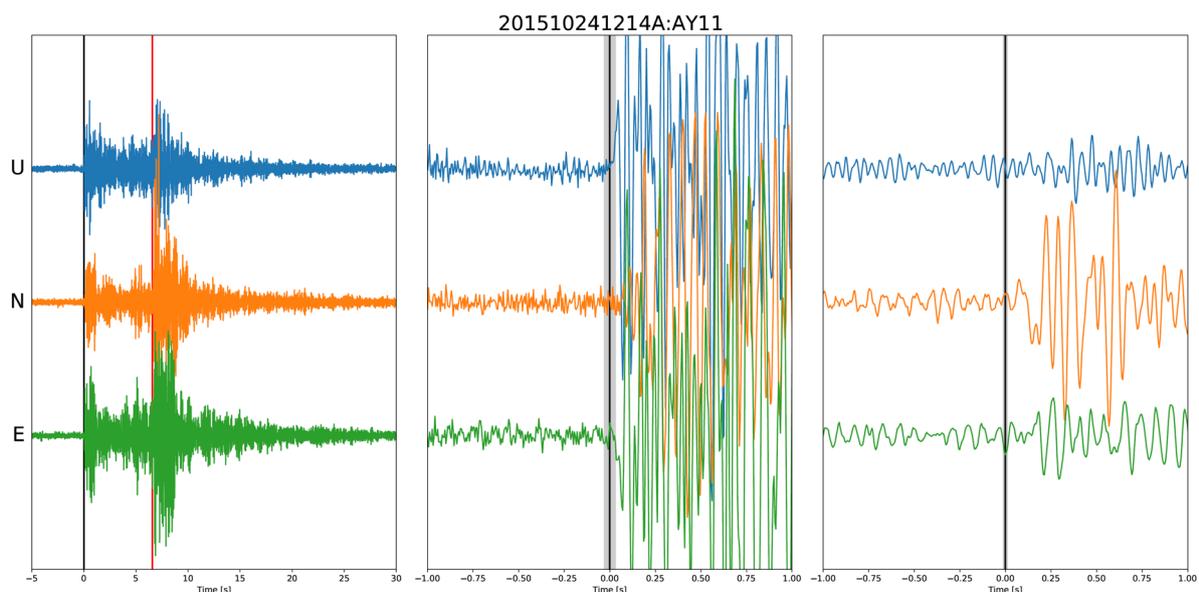


図 25 本事業による手動検測の結果の一例。図 24 と同様であるが、別の事例である。

#### (d) 結論ならびに今後の課題

近接する観測点波形の特徴量を入力として所望の観測点の地震波形の特徴量を推定するエンコーダ・デコーダモデルを実装し、地震計の振幅の異常を速度波形から推定する方法を異常検知性能指標 (AUC) 0.93 の性能で実現した。さらにニューラルネットワークを用いた P 波・S 波到達時刻の自動検測手法の一つである EQTransformer では後続波を読み取らないことを確認した。今後多数 (3 つ以上) の観測点の地震波形を用いた地震波形処理など、より高次元の入力・出力を行うニューラルネットワークを活用した異常検知・ノイズ除去・自動検測に取り組む。ニューラルネットワークを用いた P 波・S 波到達時刻の

自動検測は、本年度使用した EQTransformer 以外の手法が提案されているので、それらについても検証を進める。

今年度は、先行研究における点群データの解析手法を参照しながら断層面を推定する手法の開発を進め、断層面どうしが近接した状況でも断層面を推定できる可能性を、実データの解析から示した。今後は、発震機構解などの地震学的な情報を取り込んだ解析手法を開発することが課題である。

本年度は文献調査を中心に日本各地で観測された後続波の事例を収集するとともに、茨城県北部で発生した地殻内地震に対して反射波の探索に着手した。また、機械学習技術を用いた後続波の検出可能性を検討した。機械学習技術により分類されたスラブ内地震の波形特徴は後続波（PS 変換波）の観測の有無というよりは、より広域的な沈み込み帯の不均質構造を反映していると解釈される。一方で、PS 変換波が観測された波形同士をクラスタリングする傾向も見られた。今後はより大規模な観測データセットへの適用などにより、機械学習技術による検測可能性の更なる検討を行う必要がある。

米国スタンフォード大学が作成した先駆的な地震波形データセット STEAD の抜き取り調査を行ったところ、一部、明らかに P 波・S 波到達時刻からずれたところに検測値がついている場合があり、品質管理が容易ではないことがわかった。本事業独自の地震波形データセットを作るため、地震波形データを整理し、手動読み取りを実施した。簡易的な確認では、多くの地震波形データに対して良好な検測値が得られていることが多いことがわかった。36000 本という膨大な量の地震波形データ全てについて、詳しい確認を行うことはできないことから、簡易的な確認との使い分けが必要である。次年度以降、地震波形データセットの公開に向けて、読み取り値の確認と修正を進めていく。

#### (e) 引用文献

- 1) Ringler, A. T., Mason, D. B., Laske, G., Storm, T., and Templeton, M.: Why Do My Squiggles Look Funny? A Gallery of Compromised Seismic Signals, *Seismological Research Letters*, Vol. 92, No. 6, pp. 3873-3886, 2021.
- 2) Mousavi, S. M., Ellsworth, W. L., Zhu, W., Chuang, L. Y., and Beroza, G. C.: Earthquake transformer - an attentive deep-learning model for simultaneous earthquake detection and phase picking, *Nature Communications*, Vol. 11, No. 1, pp. 1-12, 2020.
- 3) Münchmeyer, J., Woollam, J., Rietbrock, A., Tilmann, F., Lange, D., Bornstein, T., Diehl, T., Giunchi, C., Haslinger, F., Jozinović, D., Michelini, A., Saul, J., and Soto, H.: Which picker fits my data? A quantitative evaluation of deep learning based seismic pickers, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 127, e2021JB023499, 2022.
- 4) Vidal, R.: Subspace Clustering. *IEEE Signal Processing Magazine*. Vol.28, pp.

- 52-68, 2011.
- 5) Ebblin, C. and Michelini, A.: A principal parameters analysis of aftershock sequences applied to the 1977 Friuli, Italy, sequence. *Annales Geophysicae Series B*, Vol.4, pp. 473-480, 1986.
  - 6) Shearer, P. M., Hardebeck, J. L., Astiz, L. and Richards-Dinger, K. B.: Analysis of similar event clusters in aftershocks of the 1994 Northridge, California, earthquake. *Journal of Geophysical Research*, Vol.108, doi:10.1029/2001JB000685, 2003.
  - 7) Fischler, M. A. and Bolles, R. C.: Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, Vol.24, pp. 381-395, 1981.
  - 8) Skoumal, R. J., Kaven, J. O. and Walter, J. I.: Characterizing seismogenic fault structures in Oklahoma using a relocated template-matched catalog. *Seismological Research Letters*, Vol.90, pp. 1535-1543. doi:10.1785/0220190045, 2019.
  - 9) Fialko, Y.: Estimation of absolute stress in the hypocentral region of the 2019 Ridgecrest, California, earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, Vol.126, doi:10.1029/2021jb022000, 2021.
  - 10) 志藤あずさほか 80 名 : 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 -, 地震第 2 輯, Vol.73, pp. 149-157, 2020.
  - 11) Uchide, T., Horikawa, H., Nakai, M., Matsushita, R., Shigematsu, N., Ando, R., and Imanishi, K.: The 2016 Kumamoto-Oita earthquake sequence: aftershock seismicity gap and dynamic triggering in volcanic areas. *Earth Planets and Space*, Vol.68. doi:10.1186/s40623-016-0556-4, 2016.
  - 12) 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 号, pp. 169-176, 2016.
  - 13) Li, L., Yang, F., Zhu, H. H., Li, D. L., Li, Y. and Tang, L.: An improved RANSAC for 3D point cloud plane segmentation based on normal distribution transformation cells. *Remote Sensing*, Vol.9, doi:10.3390/rs9050433, 2017.
  - 14) van der Maaten, L., and Geogrey, H.: Visualizing data using t-SNE, *Journal of Machine Learning Research*, Vol.9, pp.2579-2605, 2008.
  - 15) Shiina, T., Nakajima, J., and Matsuzawa, T.: Seismic evidence for high pore pressure in the oceanic crust: Implication for fluid-related embrittlement, *Geophysical Research Letters*, Vol. 40, pp.2006-2010, 2013.
  - 16) 飯高 隆, 酒井慎一, 五十嵐俊博, 小原一成, 加藤愛太郎, 武田哲也, 中川茂樹 : いわき地域における地殻内反射面と自品活動との関係, 日本地球惑星科学連合 2019 年大会, SSS12-05, 2019.
  - 17) 白田優太, 飯高 隆, 五十嵐俊博, 小原一成, 酒井慎一, 中川茂樹, 武田哲也 : 阿武隈山地南部における稠密アレイで記録された地殻内 S 波反射面のイメージング,

JpGU-AGU Joint Meeting 2020, SSS11-P07, 2020.

- 18) Amezawa, Y., Kosuga, M., and Maeda, T.: Temporal changes in the distinct scattered wave packets associated with earthquake swarm activity beneath the Moriyoshi-zan volcano, northeastern Japan, *Earth, Planets and Space*, Vol.71, 132, 2019.
- 19) Matsumoto, S., and Hasegawa, A.: Distinct S wave reflector in the midcrust beneath Nikko-Shirane volcano in the northeastern Japan arc, *Journal of Geophysical Research*, Vol.101, pp.3067-3083, 1996.
- 20) Doi, I., and Nishigami, K.: Three-dimensional distributions of S wave reflectors in the source region of the 2000 Western Tottori Earthquake, *Geophysical Research Letters*, Vol.34, pp.L20312, 2007.
- 21) Aoki, S., Iio, Y., Kato, H., Miura, T., Yoneda, I., and Sawada, M.: Three-dimensional distribution of S wave reflectors in the northern Kinki district, southwestern Japan, *Earth, Planets and Space*, Vol.68, pp.107, 2016.
- 22) 堀修一郎, 海野徳仁, 河野俊夫, 長谷川昭: 東北日本弧の地殻内 S 波反射面の分布: 地震 第 2 輯, Vol.56, pp.435-446, 2004.
- 23) Nakajima, J., Matsuzawa, T., and Hasegawa, A.: Moho depth variation in the central part of northeastern Japan estimated from reflected and converted waves, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol.130, pp.31-47, 2002.
- 24) Wang, H., Zhao, D., Huang, Z., Xu, M., Wang, L., Nishizono, Y., and Inakura, H.: Crustal tomography of the 2016 Kumamoto earthquake area in west Japan using P and PmP data, *Geophysical Journal International*, Vol.214, pp.1151-1163, 2018.
- 25) Hasemi, A., and Horiuchi, S.: Seismic reflector alignment along the volcanic front in northeastern Honshu Japan, *Journal of Geophysical Research*, Vol.105, pp.B07307, 2010.
- 26) Obara, K., and Sato, H.: Existence of an S wave reflector near the upper plate of the double seismic zone beneath the southern Kanto district, Japan, *Journal of Geophysical Research*, Vol.93, pp.15037-15045, 1988.
- 27) Matsuzawa, T., Umino, N., Hasegawa, A., and Takagi, A.: Upper mantle velocity structure estimated from Ps-converted wave beneath north-eastern Japan arc, *Geophysical Journal Astronomical Society*, Vol.86, pp.767-787, 1986.
- 28) Matsuzawa, T., Kono, T., Hasegawa, A., and Takagi, A.: Subducting plate boundary beneath the northeastern Japan arc estimated from SP converted waves, *Tectonophysics*, Vol.181, pp.123-133, 1990.
- 29) Uchida, N., Matsuzawa, T., Nakajima, J., and Hasegawa, A.: Subduction of a wedge-shaped Philippine Sea plate beneath Kanto, central Japan, estimated from converted waves and small repeating earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, Vol.115, pp.B07309, 2010.
- 30) Shiina, T., Nakajima J., Toyokuni, G., and Matsuzawa, T.: Guided wave

- observations and evidence for the low-velocity subducting crust beneath Hokkaido, northern Japan, *Earth, Planets and Space*, Vol.66, pp.69, 2014.
- 31) Hori, S., Inoue, H., Fukao, Y., and Ukawa, M.: Seismic detection of the untransformed ‘basaltic’ oceanic crust subducting into the mantle, *Geophysical Journal Astronomical Society*, Vol.83, pp.169-197, 1985.
- 32) Fukao, Y., Hori, S., and Ukawa, M.: A seismological constraint on the depth of basalt-eclogite transition in a subducting oceanic crust, *Nature*, Vol.303, pp.413-415, 1983.
- 33) Miyoshi, T., Saito, T., and Shiomi, K.: Waveguided effects within the Philippine Sea slab beneath southwest Japan inferred from guided SP converted wave, *Geophysical Journal of International*, Vol.189, pp.1042-1084, 2012.
- 34) Nakajima, J., Hada, S., Hayami, E., Uchida, N., Hasegawa, A., Yoshioka, S., Matsuzawa, T., and Umino, N.: Seismic attenuation beneath northeastern Japan: Constraints on mantle dynamics and arc magmatism, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol.118, pp.5838-5855, 2013.
- 35) National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience: NIED Hi-net, National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 2019.
- 36) Mousavi, S. M., Sheng, Y., Zhu, W., and Beroza, G. C.: STanford Earthquake Dataset (STEAD): A Global Data Set of Seismic Signals for AI. *IEEE Access*, Vol. 7, pp.179464-179476, 2019.
- 37) Nakamoto, K., Hiramatsu, Y., Uchide, T., and 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*, Vol. 73, 59, 2021.
- 38) 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.
- 39) 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.
- 40) 石本巳四雄, 飯田汲事: 微動計による地震観測 (一) 地震動の大きさ、空間的分布, 地震研究所彙報, Vol. 17, No. 2, pp.443-478, 1939.
- 41) Gutenberg, B., & Richter, C. F.: Frequency of earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 34 No. 4, pp.185-188, 1944.
- (f) 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
- (g) 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

インテリジェントな地震波形処理に向けて、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。地震活動に基づく断層面形状の決定に向けて、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。後続波を用いた断層面の決定に向けて、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。多様な後続波について、機械学習の教師データに足る量の読み取りを人手で実施することは極めて困難であると考えられることから、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。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。読み取り結果を確認し、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。

#### 4. 活動報告

「STAR-E AIST ミーティング」を下記の9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1回：2021年7月1日 10時～12時
- 第2回：2021年7月26日 13時～15時
- 第3回：2021年8月2日 13時～15時
- 第4回：2021年9月6日 13時～15時
- 第5回：2021年9月30日 9時～11時
- 第6回：2021年10月25日 13時～15時
- 第7回：2021年11月24日 10時～12時
- 第8回：2021年12月20日 9時～10時20分
- 第9回：2022年2月2日 10時～12時

## 5. むすび

本研究課題は新規に立ち上がったもので、手探り状態の中で事業を進めた。高度な情報科学を活用して、地震調査研究において重要な問題の解決に向かうためには、地震学と情報科学を専門とする研究者が、専門用語や考え方の習慣などの違いを乗り越えて協力する必要がある。本研究課題においては、ほぼ月1回のオンラインミーティングなどによってバーチャルな一つの研究室を実現し、活発な意見交換を行うことで、研究を良い方向に向かわせることができた。

新規研究課題であるため、研究を立ち上げては困難にぶつかるということの連続であった。学会発表や論文などの形になった研究成果発表はまだないが、次年度以降はまとまった研究成果を挙げ、「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、及び、2016年熊本地震合同地震観測グループ<sup>10)</sup>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。