

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)

人工知能と自然知能の対話・協働による
地震研究の新展開

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
国立大学法人東京大学地震研究所

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、国立大学法人東京大学が実施した令和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）「人工知能と自然知能の対話・協働による地震研究の新展開」」の成果を取りまとめたものです。

グラビア

P 波の初動極性を正確に判定することは、地震の発震機構を推定し、断層の動きや地下の応力場を理解する上で重要です。特に小規模な地震では、P 波初動の押し引き情報が発震機構推定の重要な手がかりとなります。しかし、この推定は極性の誤判定に敏感であり、わずかな誤りでも大きく異なる解につながる可能性があります。

これまで P 波到達時刻や初動極性は、人間が地震波形を目視で確認して読み取ることが一般的でした。しかし、観測網の高密度化により解析すべきデータ量が増加しており、高精度かつ高速な自動判定技術の重要性が高まっています。

本研究では、P 波初動極性の高精度な判定と、その予測の信頼性評価を同時に行う深層学習モデル「PoViT-UQ」を開発しました。PoViT-UQ は Vision Transformer を基盤とし、波形中の局所的な特徴と時間的に離れた情報を同時に捉えることができます。これにより、微弱な P 波初動やノイズを含む複雑な波形に対しても安定した判定が可能となります。

PoViT-UQ は、鉛直成分の地震波形を入力として、P 波初動極性を「Up」「Down」「Noise」の 3 クラスに分類するとともに、P 波到達時刻も同時に推定します。さらに、Monte Carlo Dropout を用いて同じ波形に対する複数回の推論を行い、予測結果のばらつきから不確実性を評価します。これにより、信頼性の高い判定結果だけを選んで発震機構推定に利用することができます。

2016 年鳥取県中部地震の余震データに PoViT-UQ を適用した結果、不確実性の指標である IQR に基づいてデータを選別することで、人間の読み取り結果と整合的な発震機構解を得ることができました。これらの結果は、PoViT-UQ が P 波初動極性を高精度に判定するだけでなく、予測の不確実性を考慮して信頼できるデータを選択できるモデルであることを示しています。本手法は、小規模地震や活発な地震活動域における発震機構推定の自動化に貢献することが期待されます。

図 1 は、AI モデル PoViT-UQ による P 波判定の例を示しています。(a) は入力された地震波形と、AI が判定時に注目した領域を色で示したものです。赤い部分ほど、AI が重要と判断した領域を表しています。(b) は波形の一部を拡大したもので、人間が読み取った P 波到達時刻と、AI が推定した到達時刻を比較しています。(c) は AI が推定した P 波到達時刻の分布を示しており、どの時刻を P 波の到達と判断したかが分かります。(d) は

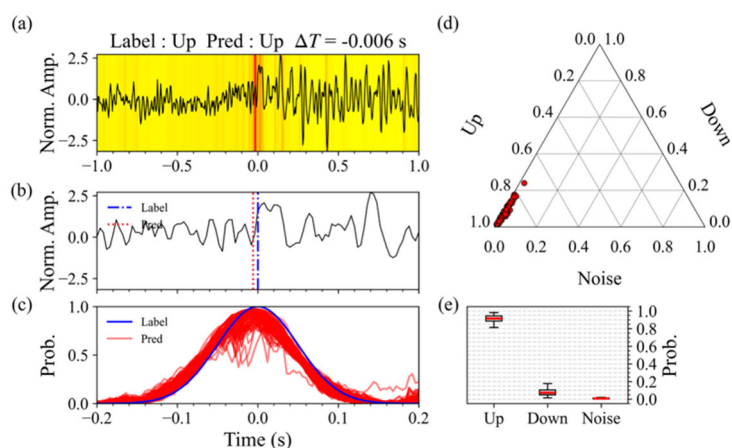


図 1. AI による地震の最初の揺れ (P 波) の判定例。

Distributed Acoustic Sensing (DAS) は、光ファイバーケーブルを地震計として利用できる、地震学における新しい技術です。DAS を用いることで、地震活動を高い空間分解能で記録できるだけでなく、既存の通信ケーブルをセンサーとして再利用することも可能です。DAS 技術の有用な応用例の一つが、海域における地震モニタリングです。特に、海底観測網に敷設されたケーブルは、DAS 観測に適しています。一方で、海域データの処理は陸域データに比べて複雑です。この複雑さは、海洋に起因するノイズや、ケーブルと海底との結合状態が必ずしも良好でないことに起因します。現在、このような DAS データを適切に処理する手法の開発が進められており、深層学習に基づく手法もいくつか提案され、良好な結果が報告されています。しかし、DAS データのみを用いて深層学習モデルを学習するための地震カタログは、いまだ十分に整備されていません。そこで本研究では、DAS データから地震カタログを作成し、将来的な深層学習モデルの開発に利用するための機械学習に基づく手法を提案します。本手法は SVR-DAS と呼ばれ、ノイズレベルの異なる DAS データに対して、地震の検出と P 波・S 波の同定を行うことができます。地震信号の検出には、テンプレートマッチングを用います。テンプレートマッチングは、テンプレートと呼ばれる基準イベントと類似したイベントを探索するために、地震学で広く用いられている手法です。P 波および S 波の同定では、よく知られた二つのアルゴリズムの結果を比較し、さらに Support Vector Regression (SVR) と呼ばれる機械学習手法を用いて、P 波・S 波の到達時刻モデルを構築します。

本研究では、東京大学地震研究所が運用する三陸海底観測所システムのケーブルで取得された DAS データを用いて、本手法を検証しました (図 2)。SVR-DAS によって得られた結果は、DAS データ処理のために提案されている他の手法の結果ともよく一致しました。本手法により、海底 DAS データを処理する深層学習モデルの学習および検証に利用可能な、高精度な地震カタログを構築できます。

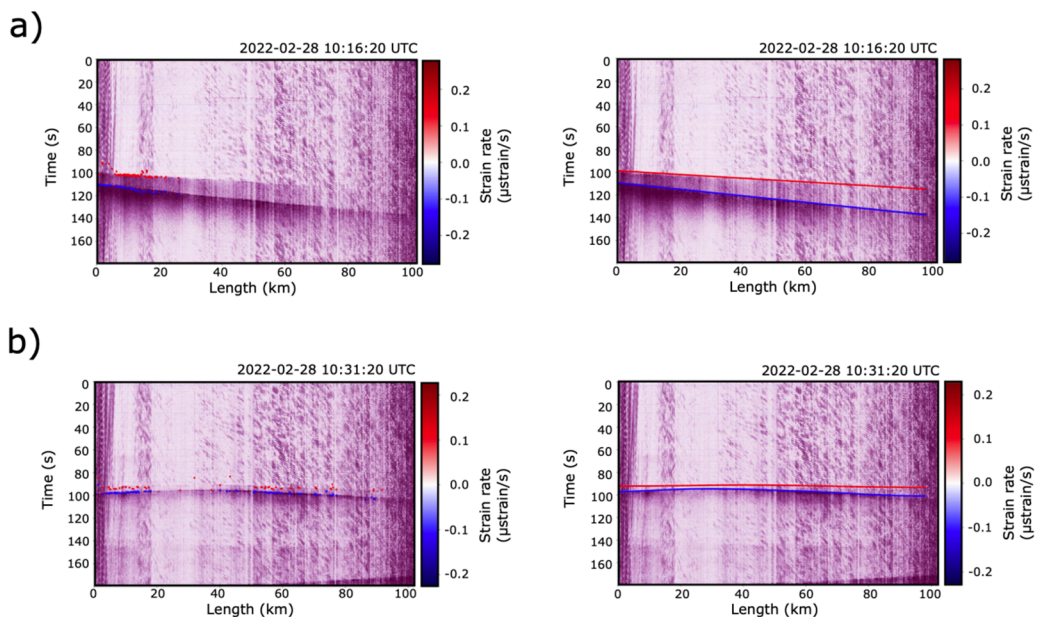


図 2. SVR-DAS によって同定された二つの地震イベントの例。a) および b) はそれぞれ異なる地震イベントを示す。左列は回帰に用いた初期点、右列は回帰後の結果。

はじめに

現在の第三次人工知能ブームは、人間社会および生活様式を一変しつつある。地震分野においても地震波検測と初動極性判定のための深層学習器の検出力は、時に経験豊かな地震学者の目を上回ることもある。しかしながら、地震研究において取り扱う地球内部起源の振動現象には、今世紀初頭に発見された低周波微動のように、通常の地震以外にも多種多様なものが混在しており、それらを分類しながら検出する人工知能技術は、まだ確立されたとは到底言えない。

一方、地震研究においては現象の検出だけではなく、検出された現象の情報に基づく地震活動の時空間分布や地球内部構造等のモデリングにより、地震の発生環境や発生メカニズムの解明を目指すことが地震防災・減災の観点からも重要である。この地震学におけるモデリングでは、自然知能と言うべき人間の頭脳によるところがまだ大きく、人工知能が自然知能を凌駕するまでにはまったく至っていない。これは、現在の深層学習は人間が理解可能となるように思考過程を示すことができず、得られたモデルの妥当性検証やそれに基づくモデルの更新が困難であることが大きな要因である。そのため、人工知能に基づくモデリング手法の開発だけでなく、自然知能に基づく従来のモデリング技術の高度化も重要であり、両者を常に比較・検討していくことが地震研究に新たな展開をもたらす。

本研究課題では、人工知能と自然知能の対話・協働をテーマに、深層学習と経験者の目による地震・微動検出手法の深化、および人工知能と自然知能による地震モデリング手法の共進化をねらい、地震研究の新展開と地震防災に貢献する。中核機関である東京大学は、主に地震・微動検出手法および地球内部構造モデリング技術などの開発研究を実施し、再委託先機関である大阪大学は、主に地震・微動活動の時空間モデリング手法の開発研究を実施する。また、講義やセミナーを通じた国民への「情報×地震」の啓発活動、ならびに本分野の将来を担う若手研究者の発掘と育成にも力を注ぐ。

目次

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	2
2.1 業務題目：プロジェクトの管理・運営	2
(1) 業務の内容	2
(2) 令和7年度の成果	4
2.2 業務題目：人工知能に基づく地震波形信号データ解析技術の 開発研究	9
(1) 業務の内容	9
(2) 令和7年度の成果	11
2.3 業務題目：人工知能に基づく地震波形画像データ解析技術の 開発研究	22
(1) 業務の内容	22
(2) 令和7年度の成果	23
2.4 業務題目：自然知能に基づく地震波形信号データ解析技術の 開発研究	27
(1) 業務の内容	27
(2) 令和7年度の成果	29
2.5 業務題目：自然知能に基づく地震波形画像データ解析技術の 開発研究	37
(1) 業務の内容	37
(2) 令和7年度の成果	38
3. まとめ	42
4. 活動報告	43
5. むすび	45

1. 研究課題の概要

現在の第三次人工知能ブームは、人間社会および生活様式を一変しつつある。地震分野においても地震波検測と初動極性判定のための深層学習器の検出力は、時に経験豊かな地震学者の目を上回ることもある。しかしながら、地震研究において取り扱う地球内部起源の振動現象には、今世紀初頭に発見された低周波微動のように、通常の地震以外にも多種多様なものが混在しており、それらを分類しながら検出する人工知能技術は、まだ確立されたとは到底言えない。

一方、地震研究においては現象の検出だけではなく、検出された現象の情報に基づく地震活動の時空間分布や地球内部構造等のモデリングにより、地震の発生環境や発生メカニズムの解明を目指すことが地震防災・減災の観点からも重要である。この地震学におけるモデリングでは、自然知能と言うべき人間の頭脳によるところがまだ大きく、人工知能が自然知能を凌駕するまでにはまったく至っていない。これは、現在の深層学習は人間が理解可能となるように思考過程を示すことができず、得られたモデルの妥当性検証やそれに基づくモデルの更新が困難であることが大きな要因である。そのため、人工知能に基づくモデリング手法の開発だけでなく、自然知能に基づく従来のモデリング技術の高度化も重要であり、両者を常に比較・検討していくことが地震研究に新たな展開をもたらす。

本研究課題では、人工知能と自然知能の対話・協働をテーマに、深層学習と経験者の目による地震・微動検出手法の深化、および人工知能と自然知能による地震モデリング手法の共進化をねらい、地震研究の新展開と地震防災に貢献する。中核機関である東京大学は、主に地震・微動検出手法および地球内部構造モデリング技術などの開発研究を実施し、再委託先機関である大阪大学は、主に地震・微動活動の時空間モデリング手法の開発研究を実施する。また、講義やセミナーを通じた国民への「情報×地震」の啓発活動、ならびに本分野の将来を担う若手研究者の発掘と育成にも力を注ぐ。

2. 研究成果の説明

2. 1 業務題目：プロジェクトの管理・運営

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

5か年にわたる本研究課題の大目標である地震研究に新展開をもたらすための人工知能の導入と自然知能の対話・協働を実現するため、本研究課題参画者が出席し、本研究課題の総合的な戦略目標について議論する定例会や、本研究課題外から有識者を招聘し、客観的かつ俯瞰的な視点から助言を仰ぐ運営委員会を定期的に開催する。また、本研究課題が対象とする地震波形信号データおよび地震波形画像データを整備し、それらの解析手法を開発するための研究環境の構築や、将来の「情報×地震」分野を担う若手研究者の発掘と育成ならびに本研究課題の趣旨や成果を広く国民に知らしめるための広報活動を行うとともに、STAR-E プロジェクトの他研究課題との連携を図る。

(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
国立大学法人東京大学 地震研究所・准教授	長尾 大道	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	7,435,134 円	2,230,540 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・名誉教授	小原 一成	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・教授	加藤 愛太郎	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・准教授	鶴岡 弘	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・准教授	中川 茂樹	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・助教	伊藤 伸一	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・特任助教	徳田 智磯	R7. 4. 1 ～ R8. 2. 28	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・特任研究員	Gerardo Manuel Mendo Pérez	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・特任研究員	加藤 慎也	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 大学院総合文化研究 科・教授	福島 孝治	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 大学院総合文化研究 科・准教授	今泉 允聡	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	0 円	0 円

国立大学法人大阪大学 大学院基礎工学研究 科・准教授	寺田 吉壱	R7.4.1 ～ R8.3.31	162,664 円	48,799 円
国立大学法人大阪大学 大学院基礎工学研究 科・招聘教員	森川 耕輔	R7.4.1 ～ R8.3.31	0 円	0 円
国立大学法人大阪大学 大学院基礎工学研究 科・教授	内田 雅之	R7.4.1 ～ R8.3.31	0 円	0 円

(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

定例会を月1回程度の頻度で開催し、本研究課題の5か年にわたる総合的な戦略目標ならびに令和3年度の研究計画を立案した。また、本研究課題における基礎データとなる地震波形信号データおよび地震波形画像データを整備し、またそれらに適用する人工知能技術を開発するために必要となる計算機環境を構築した。さらには、統計関連学会連合大会および日本地震学会秋季大会においてセッションを開催し、またホームページやリーフレット等の広報媒体の制作など、本研究課題の広報活動を実施した。

2) 令和4年度

令和3年度に定めた5か年の総合的な戦略目標に照らし合わせ、定例会において令和4年度の研究計画ならびに広報活動について具体的な方針を定めた。運営委員会を開催し、本研究課題外から招聘した専門家の助言を参考に、本研究課題を推進した。令和3年度に導入した計算機において、地震データや深層学習に基づくデータ解析アルゴリズムの開発に着手した。また、本研究課題に関する学会活動ならびにニュースレター発行等の広報活動を行うとともに、定期的な合同勉強会やSNSにおける意見交換等を通じてSTAR-Eプロジェクトの他研究課題との連携を深めた。

3) 令和5年度

定例会において令和5年度の研究計画ならびに広報活動について具体的な方針を定めた。運営委員会を開催し、本研究課題外から招聘した専門家の助言を参考に、本研究課題を推進した。また、本研究課題に関する学会活動ならびにニュースレター発行等の広報活動を行うとともに、高等教育機関等における講義を通じて、将来の「情報×地震」分野を担う若手研究者の発掘ならびに国民への啓発活動を行った。

4) 令和6年度

定例会において令和6年度の研究計画ならびに広報活動について具体的な方針を定めた。運営委員会を開催し、本研究課題外から招聘した専門家の助言を参考に、本研究課題を推進した。また、本研究課題に関する学会活動や広報活動と、教育機関における講義等を継続した。さらには、本研究課題で開発した地震データ解析手法を取りまとめ、それらが連動するシステムの構築に向けた準備を開始した。

5) 令和7年度

定例会において令和7年度の研究計画ならびに広報活動について具体的な方針を定めた。運営委員会を開催し、本研究課題外から招聘した専門家の助言を参考に、本研究課題を推進した。また、本研究課題に関する学会活動や広報活動と、教育機関における講

義等を継続するとともに、本研究課題に関する最終報告会を兼ねた国際ワークショップを開催した。さらには、本研究課題で開発した地震データ解析手法群が連動するシステムの構築を完成させ、その公開準備を行った。

(d) 令和7年度の業務の目的

令和3年度に定めた5か年の総合的な戦略目標に照らし合わせ、それを達成するために、定例会において令和7年度の研究計画ならびに広報活動について具体的な方針を定める。運営委員会を開催し、本研究課題外から招聘した専門家の助言を参考に、特に令和4年度に雇用した研究員3名が担当する研究テーマの出口を明確化し、本研究課題を推進する。令和3～4年度に導入したGPU計算機を活用しながら、深層学習等の最先端の情報科学技術に基づくデータ解析アルゴリズムを完成し、関係機関に提供する。また、本研究課題に関する学会活動ならびにニュースレター発行等の広報活動を行うとともに、STAR-Eプロジェクトの他研究課題とも1～2ヶ月に1回程度の定期的な合同勉強会やSTAR-Eプロジェクト研究員同士の勉強会、さらにはSNSにおける意見交換等を通じて、連携を深める。

(2) 令和7年度の成果

(a) 業務の要約

本研究課題の各サブテーマにおける研究の進捗状況を確認し、共同研究者間の相互理解を深めるため、10回の定例会を開催した。本研究課題の概要ならびに成果はホームページを通じて発信するとともに、広報媒体として制作したニュースレターの公開を開始した。さらには、全国紙において本研究課題が紹介され、大学学部生3名および高校生30名に対する「情報×地震」分野に関する講義を行うなど、アウトリーチ活動に力を注いだ。STAR-Eプロジェクトの全研究課題による計4回の合同勉強会に参加した。令和5年度より実施している「情報×地震」分野の発祥の地であるカリフォルニア工科大学（以下、Caltech）との国際連携を継続し、Caltechの教員1名と大学院生3名を東京大学地震研究所に招聘したほか、課題代表者と研究員2名がCaltechに訪問し、国際共同研究を実施した。本研究課題のプロジェクト会議および運営委員会を開催し、本研究課題の令和7年度の成果の総括ならびに今後の実施計画について具体的な議論を行った。

具体的な研究成果としては、各地震観測点の波形信号データへ地震波検出深層学習モデルの適用した結果を統合し、複数観測点からの地震波検出を可能にする統計アルゴリズムの開発や、煤書き地震計の地震波検出のための深層学習モデル開発に向けた波形画像データ生成などの人工知能に基づく手法の開発、および地震時空間モデリング手法や、大規模変分法地震波動場データ同化法の高度化など、自然知能に基づく手法の開発を実施した。

(b) 業務の成果

1) サブテーマ「本研究課題の推進に向けた戦略目標の計画立案」

本研究課題参画者と実務関係者が出席するプロジェクト会議を令和7年7月16日、

8月4日、令和8年1月16日に開催し、本研究課題に従事する研究員の研究の進捗状況を報告するとともに、5か年にわたる本研究課題の総合的な戦略目標に照らし合わせ、最終年度の研究の取りまとめを行った。また、本研究課題における成果を発表するために令和7年度に開催された日本地球惑星科学連合大会、統計関連学会連合大会、日本地震学会、および人工知能学会におけるセッション企画について検討を行った。さらには STAR-E プロジェクトの全研究課題の連携を図るためのコミュニケーションツールとして、令和4年度に設置したSlackワークスペースの有料契約を継続した。

2) サブテーマ「人工知能技術開発のための研究環境整備」

令和5年度に締結した東京大学地震研究所と Caltech との国際交流協定に基づき、令和7年5月に Caltech の Zachary E. Ross 博士と大学院生3名を東京大学地震研究所に招聘した。また、12月に、課題代表者、研究員2名、および大学院生1名が Caltech を訪問し、同博士との国際共同研究を実施した（写真1）。

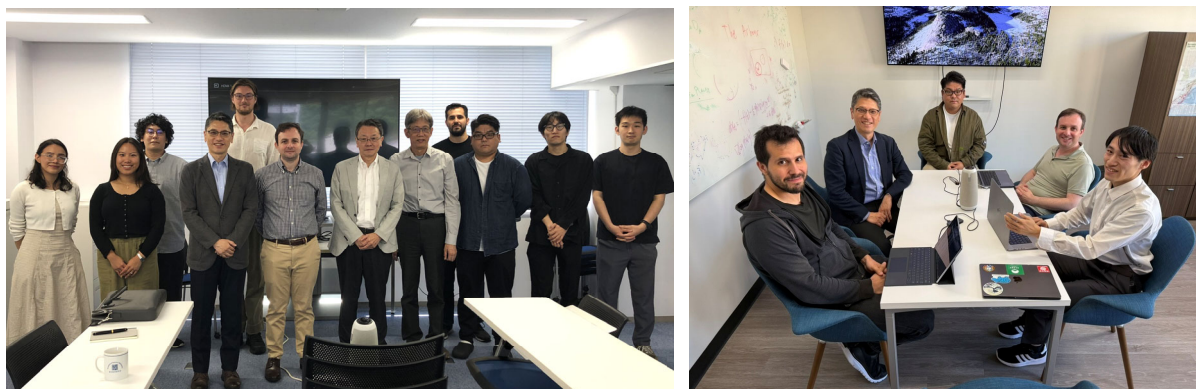


写真1. カリフォルニア工科大学との国際交流

3) サブテーマ「定例会および運営委員会の開催」

本研究課題を円滑に推進するため、進捗状況報告ならびに情報交換の場として月1回以上の定例会（令和7年4月8日、5月19日、5月20日、5月22日、7月15日、9月8日、9月12日、9月22日、10月20日、令和8年2月16日）を開催した。

4) サブテーマ「成果の活用促進」

本研究課題の成果を活用促進し、広く国民に知らしめるための広報媒体として、ニュースレター Vol.4 を日英二言語で制作した（写真2）。また、令和7年8月に東京大学地震研究所サマースクールを、令和8年3月に同スプリングスクールを開催し、計3名の大学学部生に対して「人工知能を活用した地震研究」と題する講義および演習を実施した。

さらには、3月26日に実施された「東大の研究室をのぞいてみよう！プログラム」の一環として、東京大学地震研究所を訪問した高校生30名に対し、「地震研究における人工知能技術の活用」と題する講義を行い、本研究課題の成果を含む「情報×地震」分野研究について紹介した（写真3）。



写真3. 「東大の研究室をのぞいてみよう！プログラム」における高校生への講義

(c) 結論ならびに今後の課題

令和7年度は主に(i)本研究課題の5か年全体の研究計画に照らし合わせた令和7年度の研究計画の策定、(ii)Caltechとの国際連携の継続および国際共同研究の開始、(iii)本研究課題を円滑に推進するための定例会ならびにプロジェクト会議および運営委員会の開催、(iv)本研究課題を国内外に周知するための広報媒体の制作ならびにアウトリーチ活動という4つのサブテーマを実施し、さらに最終年度として、本研究課題で開発したデータ解析手法の完成と関係機関への提供、本研究課題の研究成果を広く知らしめるための最終報告会を兼ねた国際ワークショップの開催およびニュースレターの発行を行った。

(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 : 計4件、うち海外2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
GeoSciAI2025: 地球惑星科学×AI コンペの実施報告	長尾 大道	第39回人工知能学会全国大会	令和7年5月29日	国内	
Towards Integration of Data Assimilation and State-of-the-Art Information Science Techniques for Seismology	Nagao, H., S. Ito, T. Tokuda, G. M. Mendo Pérez, S. Katoh, and	IAGA/IASPEI Joint Scientific Meeting 2025	令和7年9月4日	国外	○

	T. Kusui				
Collaboration Between Japan and Singapore in AI Seismology: Contribution from Japan Side	Hiromichi Nagao	IWIRISS2025	令和7年 11月27 日	国外	
最先端の情報科学に基づく固体地球観測データ解析技術・モデリング技術の開発研究	長尾 大道	災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画成果報告シンポジウム	令和8年 3月12日	国内	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載：計0件、うち海外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

(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：人工知能に基づく地震波形信号データ解析技術の開発研究

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

5か年にわたって本研究課題が取り組むテーマのうちの一つである、人工知能に基づく波形信号データからの地震・微動検測技術を開発する。地震・微動発生に関する地域性の違いを考慮すると、現存する地震データは学習データとして十分な量とは言えない。そこで、地震波形の巨視的構造は地域間で類似性があることを考慮し、複数観測点からの地震検測が可能な畳み込みニューラルネットワークを、転移学習によって様々な地域に適用可能となるよう、応用展開する。検測された地震については、経験豊かな地震学者の目による検証を行う。また、地震検測の場合と同様のアプローチにより、微動検測のための深層学習器の構築を試みる。

また、レプリカ交換モンテカルロ法に基づく地震波動場再構成法に深層学習器をプラグインし、多数の地震イベントを学習させることにより、様々な地域における1次元地下構造を推定する。その際、地下構造は第一近似的には鉛直方向のみに変化することを考慮し、転移学習によって効率的に深層学習器を構築する。また、より複雑な地下構造モデルに対する地震波伝播データ同化手法の将来的な導入について検討する。

(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
国立大学法人東京大学 地震研究所・准教授	長尾 大道	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	10,021,330 円	3,006,399 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・名誉教授	小原 一成	R6. 4. 1 ～ R7. 3. 31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・教授	加藤 愛太郎	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・准教授	鶴岡 弘	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・准教授	中川 茂樹	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・助教	伊藤 伸一	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・特任助教	徳田 智磯	R7. 4. 1 ～ R8. 2. 28	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・特任研究員	Gerardo Manuel Mendo Pérez	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・特任研究員	加藤 慎也	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	0 円	0 円

国立大学法人東京大学 大学院総合文化研究 科・教授	福島 孝治	R7.4.1 ～ R8.3.31	0円	0円
国立大学法人東京大学 大学院総合文化研究 科・准教授	今泉 允聡	R7.4.1 ～ R8.3.31	0円	0円
国立大学法人大阪大学 大学院基礎工学研究 科・招聘教員	森川 耕輔	R7.4.1 ～ R8.3.31	0円	0円

(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

複数観測点における地震波形信号データからの地震検測が可能な畳み込みニューラルネットワークへの転移学習の実装、ならびに微動検測のための深層学習器の開発について、文献調査をはじめとする検討を開始した。

また、レプリカ交換モンテカルロ法に基づく地震波動場再構成法の核心をなす水平成層構造に対する地震波伝播シミュレーションコードについて、高速化に向けたプログラム改良に着手した。

2) 令和4年度

地震波検測のための畳み込みニューラルネットワークの開発と実装を行った。さらには、微動検測への適用可能性について検討した。複数観測点からの地震検測が可能な畳み込みニューラルネットワークの地震波形データ処理システムへの実装を開始した。

また、レプリカ交換モンテカルロ法に基づく地震波動場再構成法の核心をなす水平成層構造に対する地震波伝播シミュレーションコードの高速化を完了させ、実際の地震波形信号データへ適用し、手法の改善を図った。

3) 令和5年度

地震検測のための畳み込みニューラルネットワークに適用可能な転移学習アルゴリズムを開発・実装した。微動検測のための深層学習器の開発に着手した。転移学習前のモデル学習データとして、米国カリフォルニア州の地震波形データを用い、日本の波形データに適用した場合も大きく検出力が下がることがないことを確認した。複数観測点からの地震検測が可能な畳み込みニューラルネットワークへの転移学習アルゴリズムの実装を完了し、地震波形信号データに適用した。その結果に基づき、転移学習アルゴリズムの改良を行った。

また、畳み込みニューラルネットワークにかわる新たな技術として Vision Transformer を用いた地震波走時読み取りモデルの開発を行った。Vision Transformer に含まれる Multi Head Self Attention によってモデルがデータのどこに注目しているかがわかる説明可能性が高いモデルが開発できた。

4) 令和6年度

令和5年度までに開発した地震・微動検測手法を、転移学習等により個々の観測点に適合したモデルにチューニングするとともに、複数観測点からなる観測網に対して効果的に適用できるよう、モデルの拡張を行った。複数観測点からの地震検測が可能

な畳み込みニューラルネットワーク、微動検測のための深層学習器、および高速化したレプリカ交換モンテカルロ法に基づく地震波動場再構成法を、それぞれ様々な地域における地震波形信号データに適用し、各地域に適合したモデルを構築した。

微動を表現するニューラルネットワークに基づく確率微分方程式をデータ駆動的に獲得するための方法論を構築した。

5) 令和7年度

各地域に適合した地震・微動検測のための深層学習モデルを構築し、性能評価を行なった。さらに、研究者自身がモデル構築できるように、関連するアルゴリズムをパイプライン化し、公開した。各地域に適合した地震・微動検測のための畳み込みニューラルネットワーク、微動検測のための深層学習器、および地震波動場再構成法のモデルの公開準備を開始した。

微動を表現するニューラルネットワークに基づく確率微分方程式をデータ駆動的に獲得する方法論を実データに適用し、その性能評価を行なった。

(d) 令和7年度の業務の目的

本研究課題の主要な研究テーマの一つである人工知能に基づく地震波形信号データからの地震・微動検出技術の確立を達成するため、地震波検測のための畳み込みニューラルネットワークの開発と実装を完成させるとともに、成果の国際誌への発表および開発したモデルの公開を行う。さらには、これの微動検測への適用可能性について検討する。複数観測点からの地震検測が可能な畳み込みニューラルネットワークの地震波形データ処理システムへの実装を継続する。

微動を表現するニューラルネットワークに基づく確率微分方程式をデータ駆動的に獲得する方法論を実データに適用し、その性能評価を行なう。

(2) 令和7年度の成果

(a) 業務の要約

複数観測点からなる観測網データに適用可能な新たな地震・微動検出モデルの性能評価を行った。長岡地震観測網に適用し、提案手法の汎用性を確認した。

S-net 海底ケーブル地震観測波形を対象として、深層学習によるP波・S波到達時刻の自動読み取りモデルの開発を行った。特に、入力チャンネルの順序や方位の違いに予測結果が強く依存しないSegPhaseモデルの開発を行った。

海底のDAS記録からP相とS相を検測する深層学習モデルを構築するため、テンプレートマッチングおよびサポートベクトル回帰モデルによる学習データと検証データ作成手法を構築した。

スロー地震波形を表現するニューラルネットワークベースの確率微分方程式を拡張した表現力の高いモデル(Neural SDE)を獲得する方法論を構築した。また、ガウス過程を用いて四国の各地震観測点のスロー地震波形をSDEによりモデリングし、その性質によってある程度の観測点のクラスタリングが可能であることを検証した。

(b) 業務の成果

1) サブテーマ「地震・微動検出技術の開発」

令和6年度に開発した、深層学習モデルを複数観測点からなる観測網に適用可能な汎用的検出モデルの性能を相探索による従来手法と比較した。その結果、相探索による従来手法よりも多くの地震を検出できることがわかった(図3)。さらに、提案手法の汎化性能を評価するために、地震予知総合研究振興会(ADEP)が管理・運営する長岡地震観測網(AN-net)に配置された40観測点から得られた波形データに対して適用した。その結果、AN-netに対しても適用可能であることを確認することができた。特に、長岡観測点カタログに記録されていない地震も検出できる可能性が示唆された(図4)。提案手法、およびこれまでに開発した地震検出手法を適用するPythonコードをGitHub上に公開するとともに、波形信号データへの適用結果を論文にまとめ専門誌に投稿し、現在、査読中である。

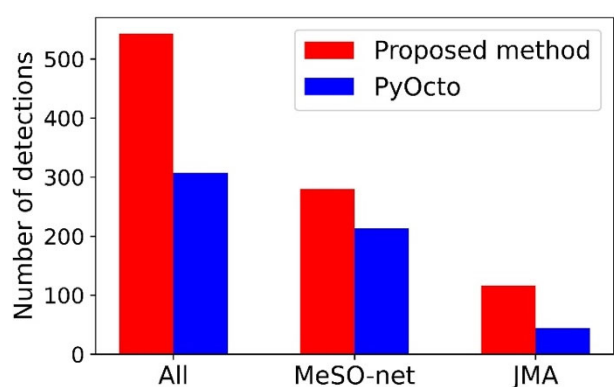


図3. 千葉県成田市付近に設置された首都圏地震観測網(MeSO-net)の11観測点の波形データ(2011年9月4日-11日)に基づく提案手法の性能評価。横軸の“All”は検出されたイベント、“MeSO-net”はそのうちMeSO-netカタログに記録された地震、“JMA”はMeSO-netカタログには記録されていないが、気象庁カタログに記録されている地震を表す。縦軸は地震検出数を示す。提案手法を赤、相探索(PhaseNet+PyOcto)による結果を青で表示した。

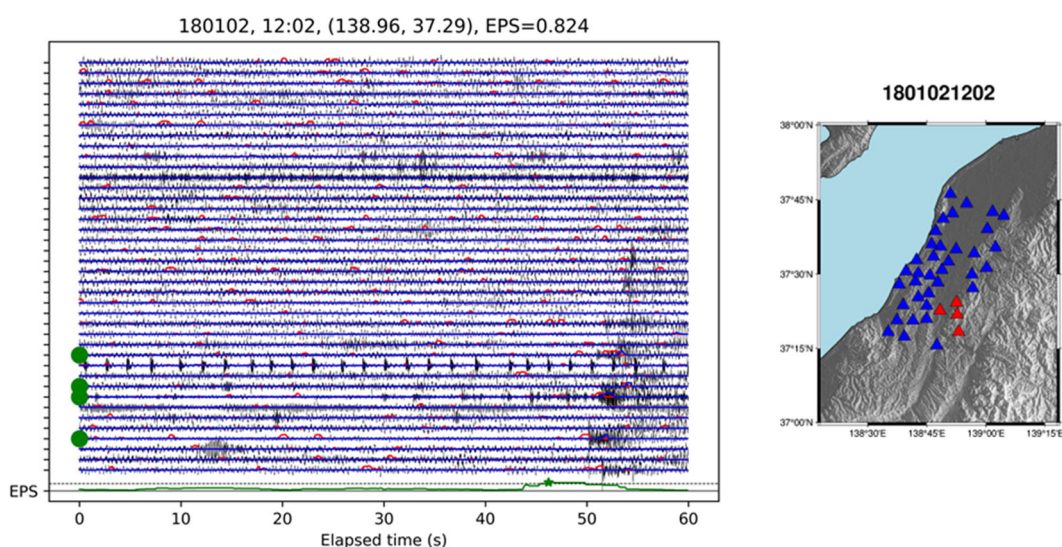


図4. AN-netカタログに記録された地震のうち、提案手法によって検出された地震の波形と観測点の例。左図: 2Hzハイパスフィルター処理後の上下方向の波形(黒線)。横軸は時間(秒)、縦軸は観測(北から南に並べた)を表す。赤線はGPDによるP波確率、青線はS波確率を表す。一方、下部の緑線は提案手法の地震検出のための特

微量である EPS 値、点線は閾値、緑の星印は表示した時間内（60 秒間）で EPS が最大となる時刻を表す。さらに、EPS 最大値の算出に用いた観測点を緑丸で表した。尚、グラフのタイトルには、対象時刻、カタログに記録された震央、および EPS 最大値を記した。右図：赤三角は EPS 最大値の算出に用いた観測点、青三角はその他の観測点を表す。

2) サブテーマ「Vision Transformer を用いた新たな走時読み取りモデルの開発」

Vision Transformer を用いた走時読み取りモデル SegPhase を S-net 海底ケーブル地震観測データへ適用し、P 波・S 波到達時刻の自動読み取りを実施した。S-net データは、海底ケーブル観測特有のノイズや観測点ごとのチャンネル方向の違いを含むため、通常の陸上観測データよりも自動処理が難しい。本業務では、入力成分の組み合わせや順序を変化させるデータ拡張を導入し、S-net データに対して頑健に動作する学習データセットを構築した。

学習済み SegPhase を 2025 年 12 月 8 日から 12 月 16 日に発生した青森県沖の地震活動に適用した結果、連続波形から多数の P 波・S 波到達時刻を自動的に検出することができた。さらに、得られた読み取り結果を確認すると変換波の影響を受けずに正確な走時を決定できていることが確認された(図 5)。これにより、Vision Transformer に基づく走時読み取りモデルが、S-net のような大規模海底観測網データにも有効であることを確認した。

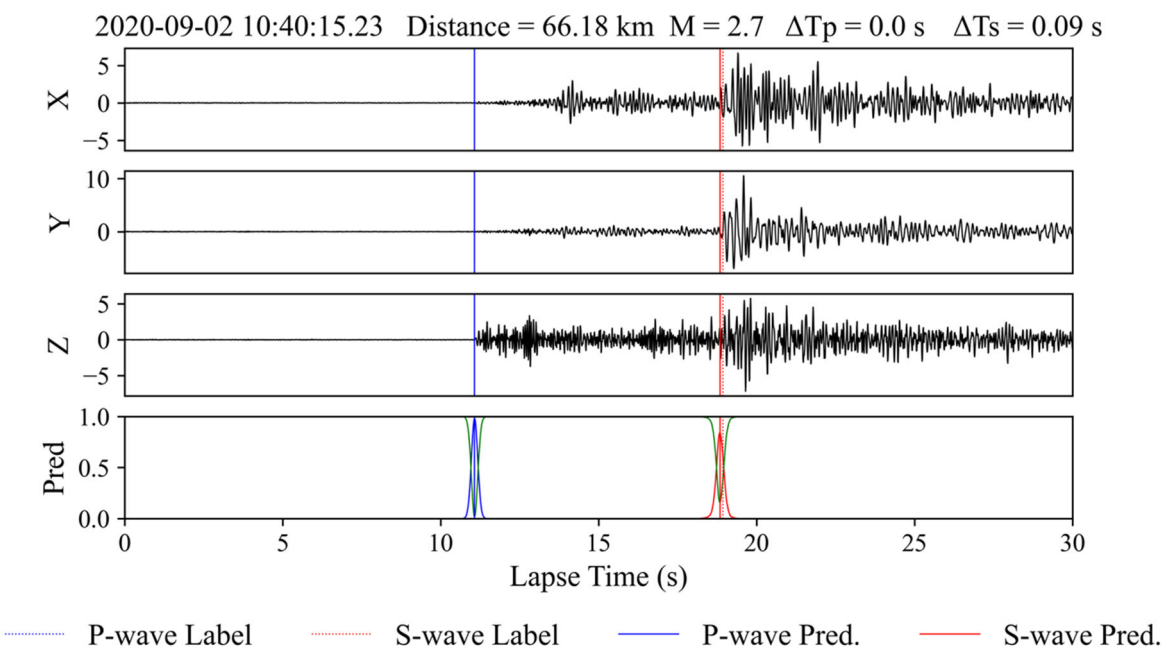


図 5. S-net 波形に対する SegPhase の P 波・S 波到達時刻読み取り例。上から X、Y、Z 成分の入力波形および SegPhase の出力確率を示す。青線は P 波到達時刻、赤線は S 波到達時刻を表し、破線はラベル、実線はモデルによる予測結果を示す。本例では、P 波および S 波の予測時刻がラベルとよく一致しており、S-net の XYZ 成分波形に対して SegPhase が到達時刻を適切に読み取れていることが確認できる。

3) サブテーマ「P 波初動極性分類と到達時刻推定を同時に行う深層学習モデルの開発」

本サブテーマでは、P 波初動極性分類と P 波到達時刻推定を同時に行う深層学習モデル PoViT-UQ を用いて、S-net データから得られた地震イベントの P 波初動極性を自動判定した。PoViT-UQ は、P 波初動極性を Up、Down、Noise に分類するとともに、P 波到達時刻を推定できるモデルであり、発震機構推定に必要な初動極性データを自動的に取得できる。

本業務では、PoViT-UQ により推定した P 波初動極性を用いて、発震機構解の推定を行った。その結果、HASH rank A および B に相当する発震機構解を得ることができ、青森県沖の地震活動に対する発震機構分布、P 軸・T 軸の方位分布(図 6)、時間変化および深さ方向の特徴を整理した。これにより、深層学習に基づく P 波初動極性分類が、海底観測データを用いた発震機構推定にも利用可能であることを示した。

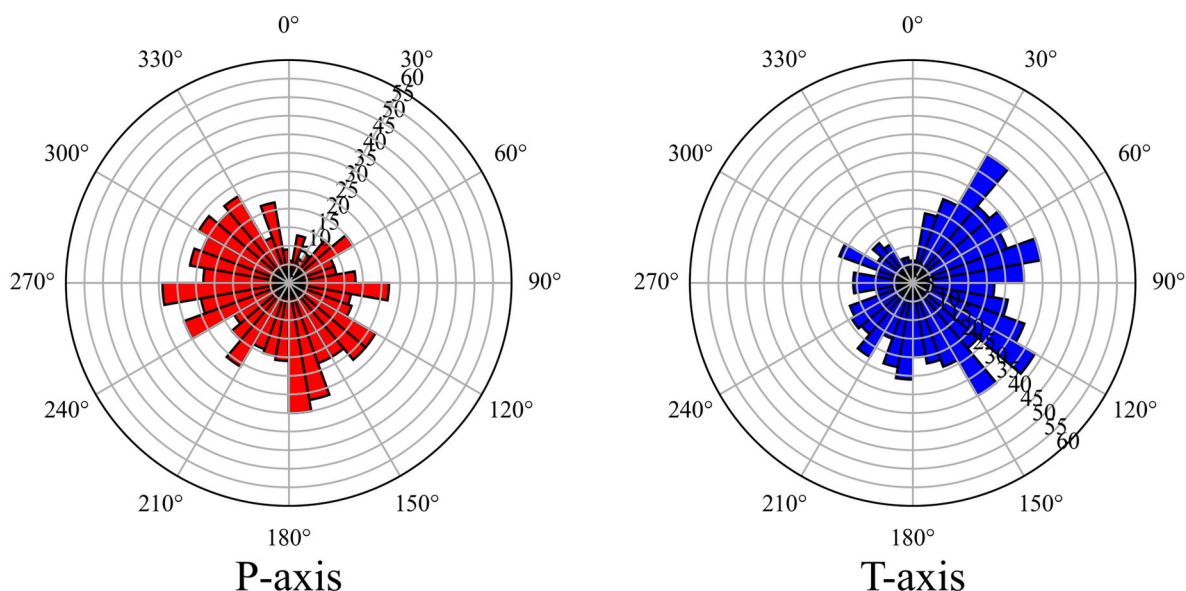


図 6. PoViT-UQ により推定した P 波初動極性に基づく発震機構解の P 軸・T 軸方位分布。左図は P 軸、右図は T 軸の方位分布を示す。PoViT-UQ により自動判定した P 波初動極性を用いて発震機構解を推定し、得られた各イベントの P 軸および T 軸の方位をローズヒストグラムとして整理した。P 軸および T 軸の集中方向から、青森県沖で発生した地震活動に伴う応力場の特徴を把握できる。

4) サブテーマ「DAS 記録の地震検測用データセットの構築」

本研究では、海底 Distributed Acoustic Sensing (DAS) データにおける地震の検出と地震相の識別という課題に取り組んでいる。これまでに提案されている多くの AI 手法は、陸上の地震観測網や DAS 記録を用いて学習・検証されてきた。しかし、深層学習モデルの学習に利用できる海底 DAS データに基づく地震カタログは、依然として十分には整備されていない。そこで令和 6 年度には、海底 DAS データから学習用および検証用の地震カタログを作成するための機械学習手法 SVR-DAS を公開した。この手法では、テンプレートマッチングを用いて地震信号を検出し、さらに STA/LTA、AR-AIC、および

Support Vector Regression (SVR) を組み合わせて、P 波および S 波を識別する。また、SVR-DAS を三陸海底観測所ケーブルで取得された DAS データに適用し、海底 DAS データに基づく地震カタログの構築に成功した (図 7)。

令和 7 年度には、海底 DAS データを処理するための深層学習モデルを開発した。このモデルは、自然言語処理で広く用いられている Transformer ベースのエンコーダである Bidirectional Encoder Representation from Transformers (BERT) アーキテクチャに基づく。モデルの学習は 2 段階で行われる。第 1 段階では、ラベルのないデータを用いて特定の課題を解かせることにより、モデルの事前学習を行う。この事前学習段階の目的は、モデルにデータの文脈情報を学習させることである。第 2 段階では、事前学習済みモデルを用いて、ファインチューニングにより下流タスクを解決する。この段階の利点は、ファインチューニングのために膨大な数のラベル付きデータを必要としない点である。さらに、この目的のために変更するのはモデルの最後の層のみである。まず、地震とノイズを同数含む DAS データの一部を用いて、モデルの事前学習を行った。事前学習タスクでは、データの 50% をランダムマスクで隠した状態から、元のスペクトログラムを再現するようにモデルを学習させた。モデルの性能を評価するために、各エポックにおいて元のスペクトログラムと再現されたスペクトログラムとの類似度を調べた (図 8)。初期的な結果から、このモデルはデータ構造を学習し、元のスペクトログラムを良好に再現できることが示された (図 9)。

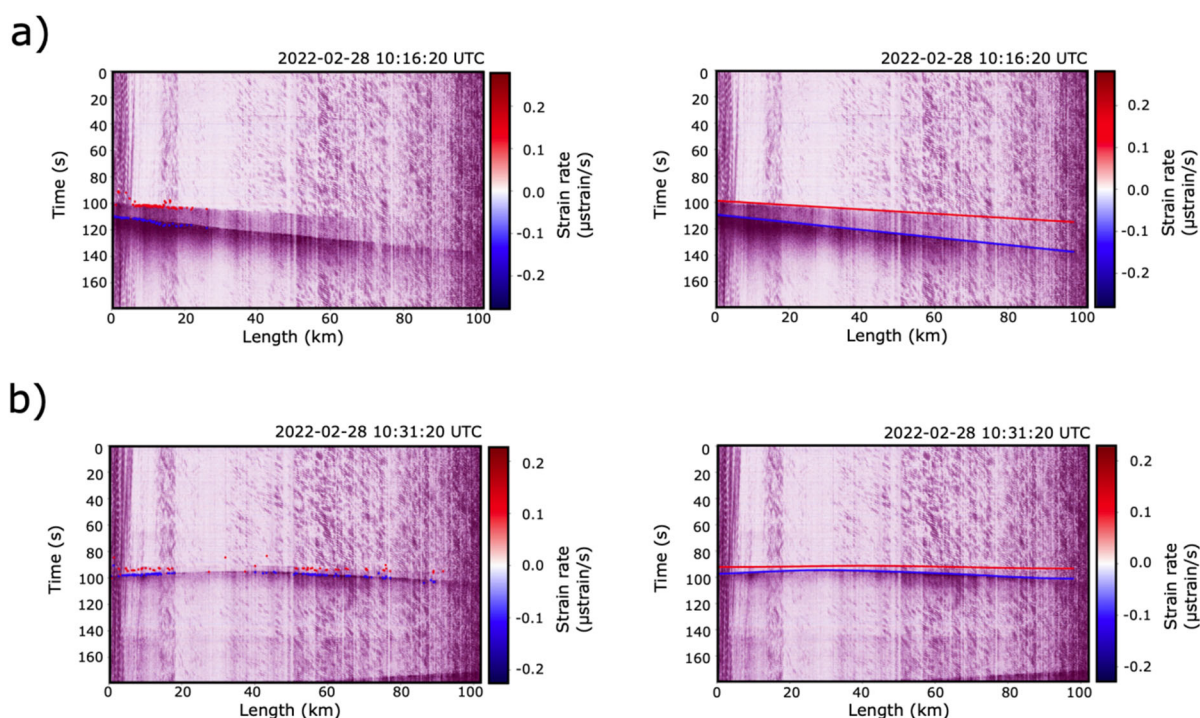


図 7. SVR-DAS によって得られた P 波 (赤点) および S 波 (青点) の到達時刻。

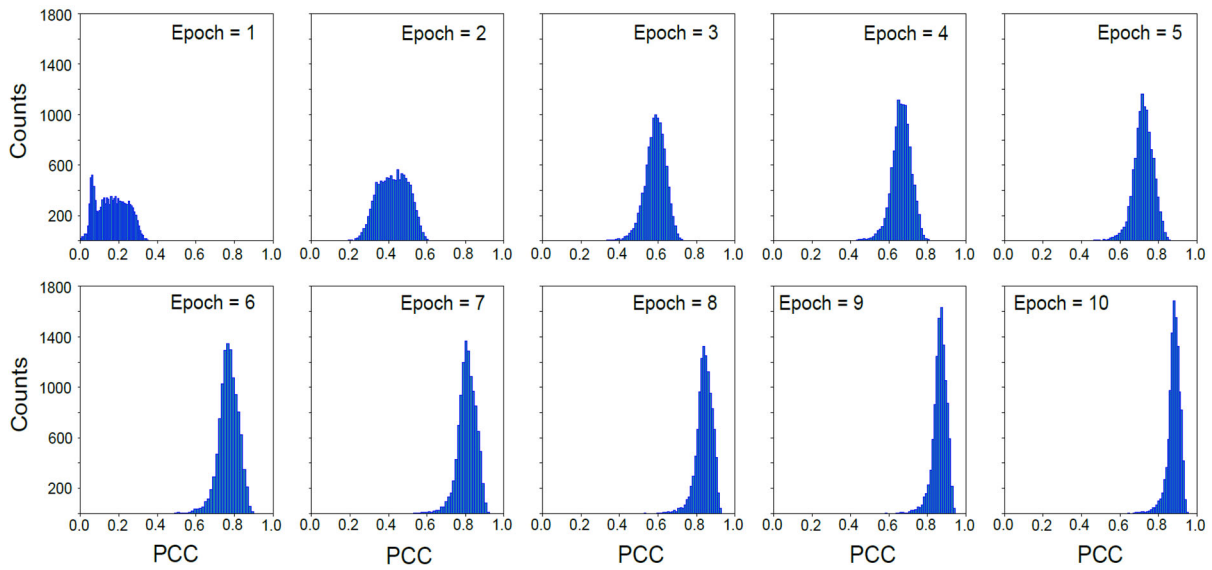


図 8. 各エポックにおける、元のスペクトログラムと推定されたスペクトログラムの間の Pearson 相関係数 (PCC) の分布。

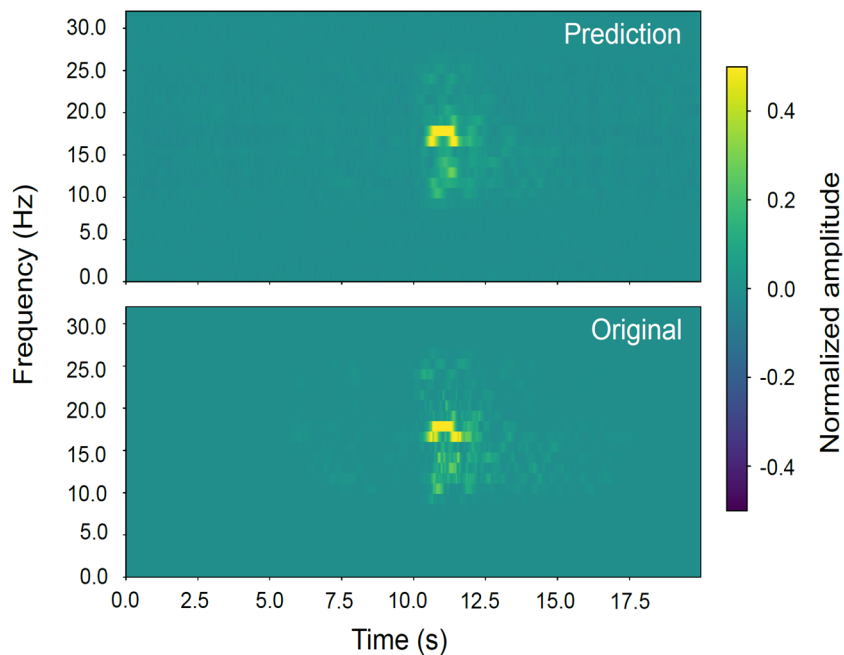


図 9. 事前学習した BERT モデルによって得られたスペクトログラムと元のスペクトログラムとの比較。

5) サブテーマ「微動波形を表現するニューラルネットワークベースの確率微分方程式獲得のための方法論の構築」

スロー地震の波形に関しては通常の地震とは異なり、確立された地震モデルが存在しない。一方で、そのエネルギーには時間と共に拡散的に変化する性質が確認されており、先行研究 (Ide, 2008) では、エネルギーの大きさに対応する断層の滑り域の大きさを SDE で変化するものとしてモデル化し、それに Aki & Richards (1980) のモデル

を適用すると、実際のスロー地震と周波数ごとのエネルギーなど、性質がよく合致するスロー地震波形のモデリングが可能であることが示されている。そこで、この先行研究は SDE による単純なモデルであるが、これをより柔軟なモデルで置き換えることで、新たなスロー地震の性質を解析することが可能ではないかと考え、二つの実験を行った。まず、図 10 (a) のような枠組みで Neural SDE による表現力の高いモデルを用いてスロー地震の波形データをモデル化することを試みた。結果として図 10 (b) のように SDE の表現としては Ide (2008) でも提案されている OU 過程に近いが、時間減衰の効果が拡散項に入るようなより表現力の高いモデルが学習された。次に、図 10 (c) に示すように Neural SDE よりはより表現力を用いたガウス過程を用いたノンパラメトリック回帰の手法により四国の異なる観測点でのスロー地震の波形を SDE によりモデル化するという研究を行った。この手法は表現力では Neural SDE には劣るが、不確実性が定量化でき、結果の信頼度を確かめながら実験が可能であるという強みがある。得られた SDE モデルは先行研究の Chen et al. (2023) で提案されていた四国の A, B, C, D で異なる特徴を持つことがその定性的な考察や、実際に各観測点の SDE の推定結果を元にしたクラスタリングにより確認された。

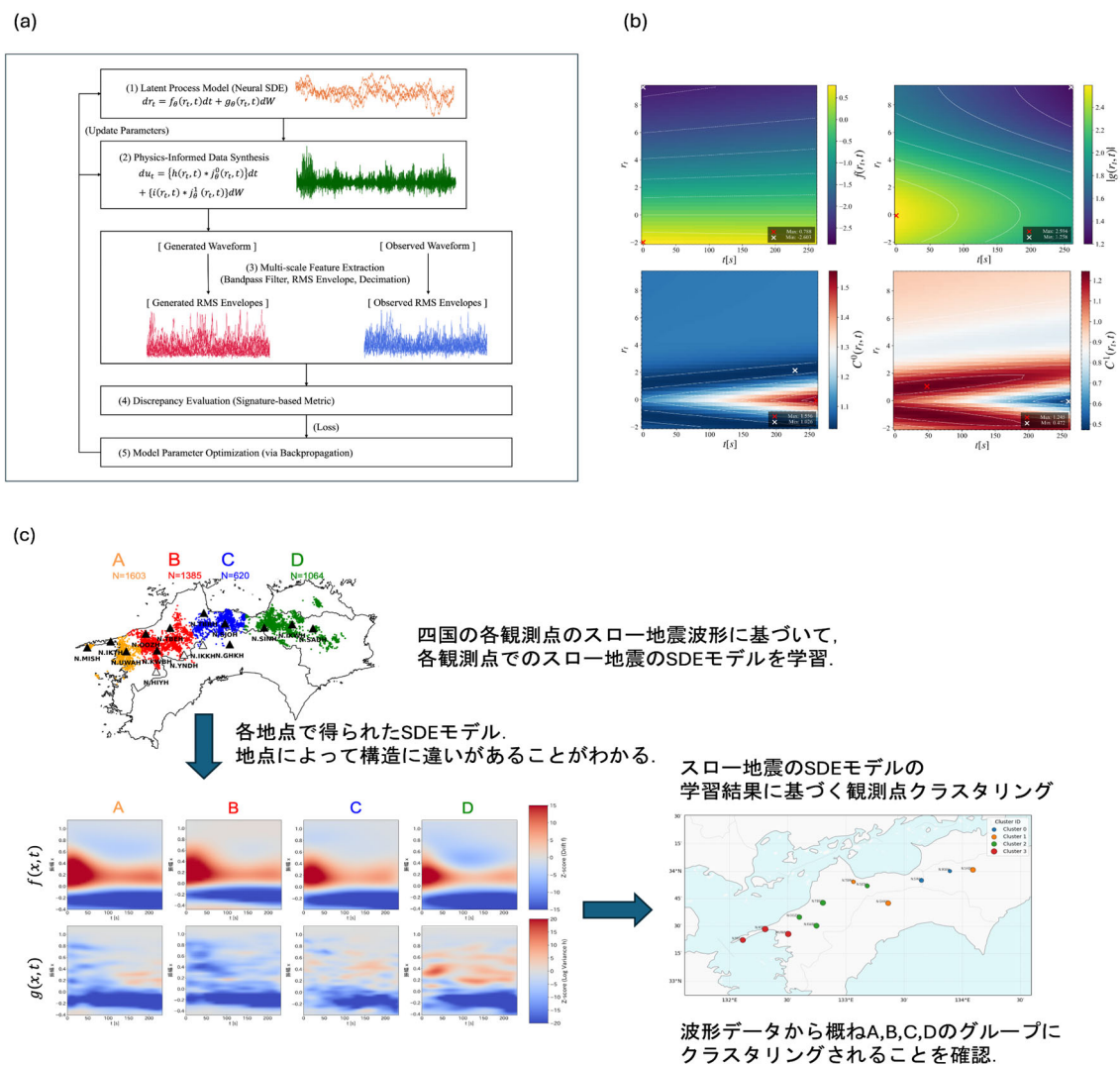


図 10. (a) Neural SDE のモデルを獲得する手法の枠組み。(b)獲得されたモデル。

(c) 四国の観測点をグループ分けし、それぞれのグループで SDE モデルを学習した。また、最初にグループ分けしていない状態からでも、スロー地震の波形データを元にクラスタリングをすると、概ね A~D のグループに分類されることを示した。

(c) 結論ならびに今後の課題

複数観測点を用いた新しい地震検出手法として、震源を仮定せずに、観測点ごとに検出結果（P 波、S 波確率）を組み合わせる統計的手法を開発した。提案手法を実データに適用したところ、昼間の生活ノイズに影響されることなく、効果的な地震検出ができることがわかった。

S-net 海底ケーブル地震観測波形を対象として、Vision Transformer を用いた P 波・S 波到達時刻読み取りモデルの開発を進めた。S-net 波形は XYZ 成分で記録され、設置方位や大地震後の方位変化により入力成分の向きが一定しないという課題がある。この問題に対し、入力チャンネルの順序に予測結果が依存しにくい SegPhase モデルを開発し、成分入れ替えを用いたデータ拡張により頑健性の向上を図った。開発したモデルにより、S-net 波形から P 波・S 波到達時刻を自動読み取りできることを確認し、令和 7 年度の主要目標はおおむね達成された。また、PoViT-UQ による P 波初動極性分類と HASH による発震機構推定も実施し、海域地震活動の解析基盤を整備した。今後は、長期間の S-net 連続波形への適用、誤検出・未検出事例の分析、不確実性に基づく品質管理手法の高度化を進める。さらに、開発した SegPhase および PoViT-UQ を他地域の観測データにも適用し、日本全域における高精度な地震カタログの作成を推進していく。

自然言語処理で広く用いられている BERT アーキテクチャに基づき、海底 DAS データのための地震波検測深層学習モデルを開発した。地震とノイズを含む DAS データの一部を用いて、モデルの事前学習を行った。性能評価テストにより、このモデルはデータ構造を学習し、元のスペクトログラムを良好に再現することを示した。

スロー地震の波形は、先行研究を拡張した柔軟な方法でモデリングすることで、時間減衰のような性質が主に確認できることがわかった。また、異なる周波数帯により、そのような減衰の仕方や異なる周波数帯で支配的なエネルギーなどをモデリングすることで異なる地点でのスロー地震の性質の違いなどが確認できることを確かめた。今後は、より具体的に解釈可能な微動の SDE モデルを作成したり、波形の生成にも焦点を当てて、現実のデータに近いスロー地震の波形データの生成モデルの提案を行いたい。

(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 17 件、うち海外 8 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
PoViT-UQ : P-wave Polarity and Arrival Time Determination using Vision	加藤 慎也, 長尾 大道, 飯尾 能久	日本地球惑星科学連合大会 (JpGU2025)	令和 7 年 5 月 26 日	国内	○

Transformer with Uncertainty Quantification					
Creation of training and validation datasets of Distributed Acoustic Sensing recordings from Sanriku seafloor observation system, Japan.	Gerardo Manuel Mendo Pérez, H. Nagao, S. Katoh, M. Shinohara	日本地球惑星科学連合大会 (JpGU2025)	令和7年5月26日	国内	○
深層学習によるスロー地震の確率微分方程式表現の獲得と現象理解の深化	楠井 俊朗, 長尾 大道, 伊藤 伸一, 加藤 慎也, 徳田 智磯	日本地球惑星科学連合大会 (JpGU2025)	令和7年5月26日	国内	○
A Deep Learning Approach to Identifying Neural SDE Models Using the Signature Kernel	Kusui, T., H. Nagao, S. Ito, S. Katoh and T. Tokuda	FUSION2025	令和7年7月11日	国外	○
Development of Arrival Time Picking Models for Japan's Seismic Network Using the Hierarchical Vision Transformer	Katoh, S., Y. Iio, H. Nagao, H. Katao, M. Sawada and K. Tomisaka	AOGS2025	令和7年7月28日	国外	○
Neural SDEを用いたスロー地震のデータ駆動型モデリング	楠井 俊朗, 長尾 大道, 伊藤 伸一, 徳田 智磯, 加藤 慎也	統計関連学会連合大会	令和7年9月8日	国内	○
データ駆動型ノンパラメトリック確率微分方程式モデリングによる低周波微動の特徴抽出	楠井 俊朗, 長尾 大道, 伊藤 伸一, 加藤 慎也, 徳田 智磯	日本地震学会2025年度秋季大会	令和7年10月20日	国内	○
Fourier Neural Operatorを用いた波形に基づく深部低周波地震の震源決定	加藤 慎也, Ross Zachary, 長尾 大道	日本地震学会2025年度秋季大会	令和7年10月20日	国内	○
Leveraging a BERT-based deep learning model for earthquake detection in seafloor Distributed Acoustic Sensing data	Gerardo Manuel Mendo, H. Nagao, S. Katoh and M. Shinohara	日本地震学会2025年度秋季大会	令和7年10月20日	国内	○
SegFarPhase : Development of	Shinya Katoh	IWIRISS2025	令和7年11月27日	国外	

Arrival Time Picking Models for Regional Seismic Wave			日		
Reconstruction of Back-Propagated Seismic Wavefield Using Fourier Neural Operator	Shinya Katoh	IWIRISS2025	令和7年 11月26日	国外	○
Development of an LLM-based model for earthquake detection in seafloor Distributed Acoustic Sensing measurements	Gerardo Manuel Mendo	IWIRISS2025	令和7年 11月26日	国外	○
深層学習が拓く地震カタログ化の新時代 – 観測波形からの自動検出と分類 –	加藤 慎也	人工知能学会 合同研究会 2025 (SIGAIs 2025)	令和7年 12月1日	国内	○
Development of an LLM-based model for earthquake detection in Distributed Acoustic Sensing measurements	Gerardo Manuel Mendo, H. Nagao, S. Katoh and M. Shinohara	AGU Annual Meeting 2025	令和7年 12月16日	国外	○
Waveform-Based Localization of Deep Low-Frequency Events Without Arrival-Time Picking Using Fourier Neural Operator	Katoh, S., Z. E. Ross, and H. Nagao	AGU Annual Meeting 2025	令和7年 12月18日	国外	○
Data-Driven Modeling of Low-Frequency Tremors with Stochastic Differential Equations: From Non-Parametric Estimation to Physics-Informed Learning	Kusui, T., H. Nagao, S. Ito, S. Katoh, T. Tokuda	AGU Annual Meeting 2025	令和7年 12月18日	国外	○
MambaとHopf-Lax公式に基づく数値計算ベースの解釈可能ニューラルオペレータ	楠井 俊朗, 長尾 大道	日本統計学会 春季集会	令和8年 3月7日	国内	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載：計3件、うち海外3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）	発表した時期	国内・外の別	主たる成
--------------	-------	----------------	--------	--------	------

		等名)			果
A deep learning approach to identifying neural SDE models using the signature kernel	Kusui, T., H. Nagao, S. Ito, S. Katoh, and T. Tokuda	2025 the 28th International Conference on Information Fusion	令和7年 7月11日	国外	○
SegPhase: Development of arrival time picking models for Japan's seismic network using the hierarchical vision transformer	Katoh, S., Y. Iio, H. Nagao, H. Katao, M. Sawada and K. Tomisaka	Earth Planets Space	令和7年 7月21日	国外	○
PoViT-UQ: P-wave Polarity and Arrival Time Determination using Vision Transformer with Uncertainty Quantification	Katoh, S., H. Nagao, and Y. Iio	Geophysical Journal International	令和7年 9月19日	国外	○

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

2. 3 業務題目：人工知能に基づく地震波形画像データ解析技術の開発研究

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

5か年にわたって本研究課題が取り組むテーマのうちの一つである、人工知能に基づく地震波形画像データからの地震・微動検出技術を開発する。地震波形信号データから生成した大量の地震波形画像データを深層学習器に学習させ、従来とは異なる観点から地震・微動カタログを構築することを目指す。また、現代の地震観測網構築以前の地震計によって、波形が紙に直接記録された古記録をスキャンして得られた地震波形画像データにも学習済み深層学習器を適用し、数十年スケールの地震や微動の活動を明らかにする。

(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
国立大学法人東京大学 地震研究所・准教授	長尾 大道	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	4,048,743 円	1,214,622 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・名誉教授	小原 一成	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・准教授	鶴岡 弘	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・助教	伊藤 伸一	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・特任研究員	加藤 慎也	R7. 4. 1 ～ R8. 3. 31	0 円	0 円

(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

地震波形信号データからの地震波形画像データの生成、ならびに地震波形古記録の整備を開始した。また、地震波形画像データから地震・微動を検出する深層学習器について、スペクトログラムから地球内部起源の振動現象を分類する深層学習器の開発などに関する既存研究を詳しく調査した。これまでに開発した深層学習器のプロトタイプを試験的に適用し、手法の改良に向けた検討を行った。

2) 令和4年度

地震波形信号データからの地震波形画像データの生成、ならびに地震波形古記録の整備を継続した。また、地震波形画像データから地震・微動を検出する深層学習器について、既存研究の調査を継続した。これまでに開発した深層学習器のプロトタイプを地震波形画像データに適用し、経験豊かな地震学者の自然知能に基づく検証を経て、手法の改良を行った。

3) 令和5年度

地震波形信号データからの地震波形画像データの生成、ならびに地震波形古記録の

整備を行った。また、地震波形画像データから地震・微動を検出する深層学習器を構築し、生成した地震波形画像データに適用することにより、その性能を評価するとともに、経験豊かな地震学者の自然知能に基づく検証を経て、手法の改良を行った。

4) 令和6年度

人工知能に基づく地震波形画像データからの地震・微動検出に基づく地震・微動カタログの構築に着手した。現代の地震観測網の地震波形信号データおよび古記録から生成された地震波形画像データから得られた数十年分の地震・微動カタログを構築し、既存の地震・微動カタログとの比較を通じて、手法の改良を行った。

5) 令和7年度

人工知能に基づく地震波形画像データからの地震・微動検出に基づく地震・微動カタログの構築を開始した。開発した深層学習器ならびに構築した地震・微動カタログを、国内外に向けて公開準備を開始した。

(d) 令和7年度の業務の目的

本研究課題の主要な研究テーマの一つである人工知能に基づく地震波形画像データからの地震・微動検出技術の確立を達成するため、地震波形信号データからの地震波形画像データの生成、ならびに地震波形古記録の整備を継続する。これまでに開発した深層学習器を地震波形画像データに適用し、過去数十年分の地震・微動カタログの構築を開始する。さらには自然知能による検証の結果に基づき、深層学習器を完成させる。

(2) 令和7年度の成果

(a) 業務の要約

令和6年度に開発した複数観測点の波形を2次元データとして入力し、通常地震・深部低周波地震・ノイズを識別する Vision Transformer ベースの深層学習モデル MultiDLFormer を改良し、さらに高精度な分類が可能な検出手法を構築した。連続波形データへの適用を行い、既存のカタログに一致するイベントの再現に加え、新たな検出候補の抽出にも成功した。その結果をまとめ、論文の投稿を行った。

また、吾妻山の煤書き記録を対象として、深層学習による火山性地震および火山性微動の自動検出・分類手法の開発を行った。

(b) 業務の成果

1) サブテーマ「深層学習を用いた複数トレースを入力とする深部低周波地震検知手法の開発」

令和6年度に開発した Vision Transformer ベースの深層学習モデル MultiDLFormer を改良し、複数観測点の地震波形を2次元データとして入力することで、通常地震、深部低周波地震、ノイズをより高精度に分類する検出手法を構築した。開発したモデルは、2011年から2019年に京都北部および鳥取西部で観測されたデータを用いて学習・評価を行い、テストデータに対して97.66%の高い分類精度を示した。さらに、モデルの実用性を検証するため、鳥取西部における1か月間の連続波形データに適用し

た結果、既存カタログに登録されたイベントのほぼすべてを再検出するとともに、カタログに含まれていない新たな検出候補も抽出することに成功した（図 1 1）。また、学習データに含まれていない大阪湾の深部低周波地震に対しても適用し、既存カタログの 90%以上を検出できることを確認した。これにより、MultiDLFormer が地域を越えて深部低周波地震の特徴を捉えられる高い汎化性能を有することが示された。これらの成果を取りまとめ、論文として投稿した。

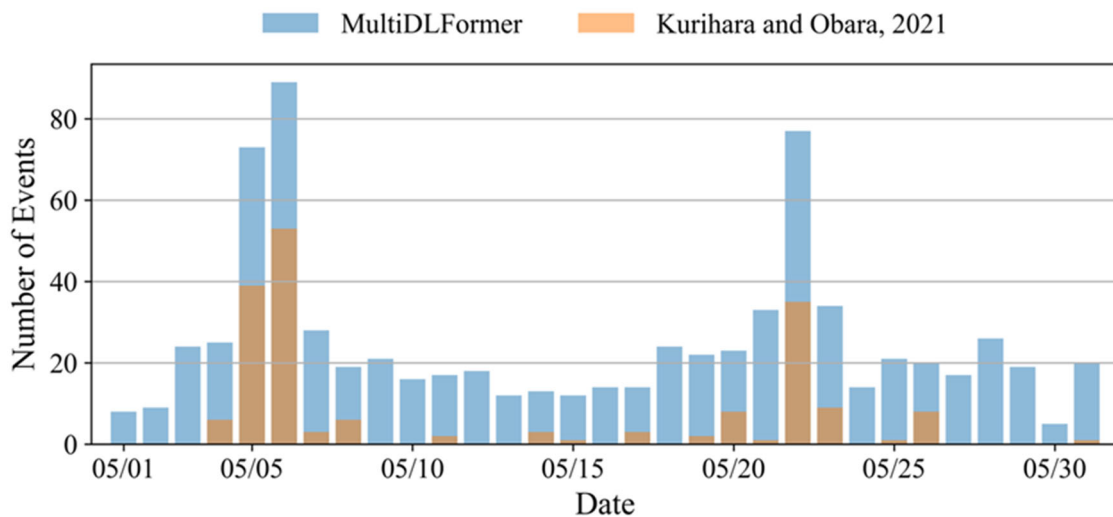


図 1 1. 2011 年 5 月における日別深部低周波地震 (DLF) 検出数のヒストグラム。青色の棒は提案手法 (MultiDLFormer) によって検出されたイベント数を示し、橙色の棒は Kurihara and Obara (2021) による matched filter 法で検出されたイベント数を示す。

2) サブテーマ「地震波形画像データの生成」

吾妻山の煤書き記録を対象として、深層学習による火山性地震および火山性微動の自動検出・分類手法を構築した。煤書き記録は教師データが限られ、画像サイズも大きいという課題があるため、現代のデジタル地震波形を煤書き記録風の画像に変換し、疑似煤書き記録として学習データを作成した。また、大容量画像を効率的に扱うため、記録画像を複数のタイルに分割して学習に用いた。開発したモデルには Detection Transformer を採用し、煤書き記録画像中に含まれる波形の位置検出と、地震、火山性微動、背景ノイズの分類を同時に行えるようにした(図 1 2)。評価の結果、地震波形については高い精度で検出・分類できることを確認し、近接したイベントを分離して検出できる事例も得られた。一方で、火山性微動については地震やノイズとの誤分類が一部に見られ、教師データの不足や波形形状の多様性が今後の課題として明らかになった。

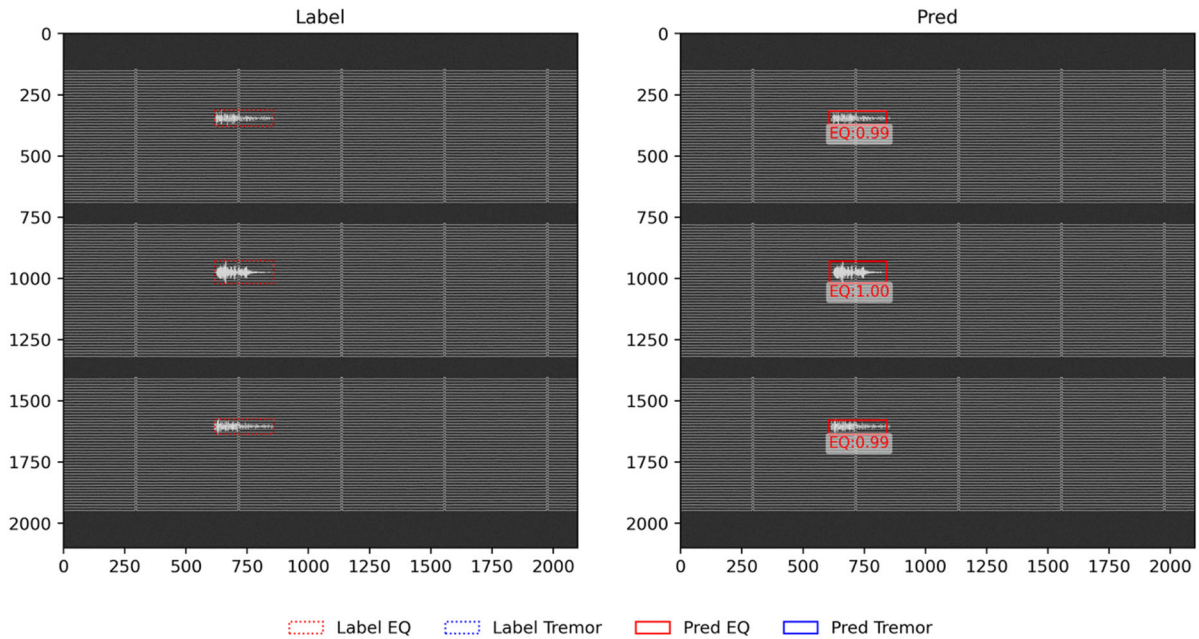


図 1 2. 煤書き記録風画像に対する地震波形検出例。左図は教師ラベル、右図は DETR モデルによる予測結果を示す。赤の破線枠はラベルとして与えられた地震波形（Label EQ）、赤の実線枠はモデルが検出した地震波形（Pred EQ）を表す。

(c) 結論ならびに今後の課題

複数観測点波形を入力とする深部低周波地震検知モデル MultiDLFormer を改良し、通常地震・深部低周波地震・ノイズを高精度に分類する手法を構築した。連続波形への適用で既存カタログの再検出に加えて新たな検出候補を抽出できた。さらに、吾妻山の煤書き記録を対象として、深層学習モデルを用いた火山性地震・火山性微動の自動検出・分類手法を構築した。現代のデジタル波形から疑似煤書き記録を作成することで教師データ不足の課題に対応し、煤書き記録画像中の地震波形を高精度に検出できることを確認した。これらの成果により、深部低周波地震カタログの高度化と、過去のアナログ地震記録を用いた長期的な火山性地震活動解析に向けた基礎技術を整備した。

今後は、MultiDLFormer をより多くの地域・期間の連続波形へ適用し、日本列島規模での高精度な深部低周波地震カタログの作成を進める。また、煤書き記録については、疑似データと実記録の差に起因するドメインギャップの低減、火山性微動の分類精度向上、近接イベントの分離性能の改善を進める。最終的には、深層学習を用いて通常観測データと歴史記録の双方を活用し、地震・火山活動の長期的変化を定量的に評価する手法へ発展させる。

(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 2 件、うち海外 1 件

発表した成果（発表題）	発表者氏名	発表した場所	発表した	国内・	主たる

目、口頭・ポスター発表の別)		(学会等名)	時期	外の別	成果
Fundamental Seismic Waveform Analysis Based on Deep Learning	Hiromichi Nagao	IWIRISS2025	令和7年11月25日	国外	○
深層学習に基づく歴史地震記象からの地震・微動の検出	長尾 大道	研究集会「古記録の保全と利活用」	令和8年2月18日	国内	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載：計0件、うち海外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

(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：自然知能に基づく地震波形信号データ解析技術の開発研究

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

5か年にわたって本研究課題が取り組むテーマのうちの一つである、ガウス過程回帰などの機械学習モデルに基づき、地震や微動の時間変化を高精度に予測可能な統計モデルを構築する。余震の検出確率は時間変化による変動が大きいため、サンプルサイズが大きくても推定が難しく、急激な変化も捉えられるガウス過程回帰は有効な解析手法である。特に、経験則が確立されていない微動の検出確率を推定・予測する方法論を構築し、その時間発展や空間相関といった地域性を加味した予測方法の基盤を構築する。

また、データ同化に基づく速度構造推定およびその不確実性評価の方法論を確立する。具体的には、近年提案された新しい4次元変分法を適用し、現代の地震波トモグラフィを刷新した詳細な速度構造推定・不確実性評価法の構築を行う。

さらには、高速な地震波動場再構成法および低周波地震のテンプレート生成アルゴリズムの開発を実施する。

加えて、南海地震などの長期的な地震発生確率の評価における、従来法の問題点を克服した方法を構築する。

(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
国立大学法人大阪大学 大学院基礎工学研究 科・准教授	寺田 吉彦	R7.4.1 ～ R8.3.31	2,057,811 円	617,343 円
国立大学法人大阪大学 大学院基礎工学研究 科・招聘教員	森川 耕輔	R7.4.1 ～ R8.3.31	0 円	0 円
国立大学法人大阪大学 大学院基礎工学研究 科・教授	内田 雅之	R7.4.1 ～ R8.3.31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・准教授	長尾 大道	R7.4.1 ～ R8.3.31	3,756,624 円	1,126,987 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・助教	伊藤 伸一	R7.4.1 ～ R8.3.31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・特任研究 員	Gerardo Manuel Mendo Pérez	R7.4.1 ～ R8.3.31	0 円	0 円

(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

ガウス過程回帰による通常の地震に対する統計モデル推定手法の高速化アルゴリズムの開発を行った。この手法により、これまで1日程度を要していた計算が1分程度で実行可能となった。

また、地震波動場データ同化の高度化のためのアルゴリズム開発について検討し、数値解析の理論に基づいて高速・高効率な地震波動場変分法データ同化アルゴリズムを構築した。

2) 令和4年度

令和3年度に提案したガウス過程回帰による通常地震に対する統計モデル推定手法の理論保証を与えた。大きな余震はその後の余震の検出確率を悪化させる“自己励起性”という現象を有する新たな余震検出確率のパラメトリックモデルを提案した。

また、令和3年度に開発した地震波動場変分法データ同化のさらなる高速化・高効率化を目指し、アンサンブルベースデータ同化といった乱択化アルゴリズム等との組み合わせにより、大規模な実問題への適用へ向けた計算量軽減法の構築を開始した。

3) 令和5年度

令和4年度に提案したガウス過程回帰による通常地震に対する統計モデル推定手法を実際のデータカタログに適用し、提案手法の有効性を示した。また、本震直後の余震分布を推定する際、大きな地震波形と重なる波形を効果的に検出するため、地震波の振幅データも組み込んだ新たな検出確率に対するモデルを提案した。さらに、最新の関数データ解析を用いた地震波動場の高速推定を行った。

また、令和4年度に構築した計算量軽減アルゴリズムの実装を開始し、大規模な数値実験や波形信号データへの適用実験を通じて有用性を検証した。さらには、低周波地震のテンプレート生成アルゴリズムの開発に着手した。

4) 令和6年度

令和5年度に提案した検出確率を考慮した通常地震の発生頻度に対する統計則を、ETASモデルにも適用できるように拡張した。ETASモデルを起点とし、微動の発生頻度に関する統計則の候補を探し、微動の検出確率を考慮して推定する手法を開発した。

また、令和5年度の結果を受け、アルゴリズムの改善と、実問題への適用へ向けて発生しうる実装上の問題およびその解決策を検討し、アルゴリズムの堅牢性を大幅に向上させた。

5) 令和7年度

通常地震に対する統計モデル推定手法を、時間方向だけでなく、空間情報も取り入れられるように拡張を検討した。開発した微動の統計則推定手法を多種多様な微動データに適用し、地震学の専門家と議論した。

さらに、南海トラフ地震などの長期的な地震発生確率の評価における、従来法の問題点を克服した提案手法の社会実装を目指した。

また、令和6年度で検討した事項を反映した実装を行い、地震波動場変分法データ同化を実用化した。

(d) 令和7年度の業務の目的

昨年度に開発した長期的な地震発生確率の評価手法を実際に地震活動の長期評価に用いるためには、不確実性やパラメータの情報を表現するために適切な事前分布を設計する必要がある。この点について詳細に検討し、地震調査委員会へ提案手法のプログラムコードの提供を行い、社会実装を目指す。また、これまでに構築した地震波動

場変分法データ同化のための乱択化アルゴリズムは速度構造の不確実性評価を劇的に高速化するが、データの量や質に依存してヒューリスティックに乱択法の選択をする必要があり、実用化のためにはこのユーザ依存性を排除する必要がある。その解決のため、当該年度では乱択法をデータの量や質に応じて客観的に選択する数学的選択基準の開発を目指す。

昨年開発した微動テンプレートカタログ作成手法に関して、2024 年度には四国地方の地震観測所からの連続データを用いて検証済みのカタログを取得した。2025 年度は、取得したカタログを用いて四国地方の連続地震データにテンプレートマッチングを適用し、微動活動を特定することを目指す。異なる観測所からの連続データを最大限に活用するためには、テンプレートの選択と検出のパラメータを慎重に選択する必要がある、この点についても検討する。

(2) 令和 7 年度の成果

(a) 業務の要約

ETAS 型余震検出確率モデルに基づく余震時間分布の推定法を、実際の複数の地震カタログに適用し、推定結果の安定性と実用性を検証した。さらに、尤度関数の計算を近似することで、観測イベント数に対して線形オーダーで計算可能な高速推定アルゴリズムを実装した。これにより、本震直後の限られた観測データからでも、数分以内に余震発生確率を更新・予測できる見通しを得た。また、研究成果の再現性確保と公開に向けて解析コードの精査を進めるとともに、論文として公表するための原稿執筆を開始した。

令和 6 年度に開発した長期的な地震発生確率の評価手法における不確実性やパラメータに関する事前情報を表現するための事前分布の設計を行い、社会実装を達成した。具体的には、不確実性を含む古文書などの情報を表現する隆起量に対する事前分布を専門家の意見を参考に設計した。さらに、一部のパラメータの事前分布を決定するために、周辺尤度最大化を取り入れた経験ベイズ法を採用した。これらを用いて南海トラフ地震の長期評価を行うためのプログラムコードを地震調査委員会へ提供した。そして、地震調査委員会「南海トラフの地震活動の長期評価（第二版一部改訂）」では、提案手法を用いて確率評価の更新が行われた。

直下型地震データのための大規模変分法地震波動場データ同化の高度化を目的として、運用を想定したアルゴリズムの開発を行なった。これまでいくつかの乱択前処理を採用した不確実性評価の高速化法を提案しているが、どの乱択前処理が問題に対して適切かという基準が存在しておらず、経験的な選択にとどまっていた。これを解決するため本年度は乱択前処理の数学的な選択基準を構築し、自動的に乱択前処理を選択する方法を提案した。これにより堅牢な大規模不確実性評価の高速化が実用化された。

微動テンプレート波形を自動的に検出する YOSO 手法を開発し、四国の Hi-net 観測点から得られたデータに適用した結果、信頼性の高い結果が得られた。

(b) 業務の成果

1) サブテーマ「地震時空間モデリング技術の開発」

本震直後は地震波の SN 比が著しく悪化するため、すべての余震を検出することは困難である。検出された余震データのみから余震活動を推定すると、未検出イベントの影響により、本震直後の余震発生率やマグニチュード分布に大きなバイアスが生じる。そこで本研究では、余震の検出確率を明示的にモデル化し、地震カタログに記録された余震データから未検出イベントの影響を補正することで、本震直後であっても今後発生する余震の時間分布およびマグニチュード別発生確率を推定する手法を開発した。

余震の検出確率は、本震後の経過時間だけでなく、大きな余震の発生によって時々刻々と変化する。そのため、検出確率を単純な時間関数として与えるだけでは、本震直後の複雑な観測状況を十分に表現できない。本研究では、過去に検出された余震系列の情報を用いて検出確率を更新する ETAS 型のモデルを導入し、検出確率そのものに自己励起性を持たせることで、余震活動に伴う検出能力の一時的な低下を表現できるモデルを構築した。ここで $\mu(t)$ は、本震から t 日経過した時点において、50%の確率で余震を検出するために必要なマグニチュードを表す。

さらに、ETAS モデルの尤度計算で用いられる近似計算の考え方を応用し、未知パラメータを高速に推定するアルゴリズムを開発した。この近似により、計算量を観測イベント数に対して線形オーダーに抑えることが可能となり、本震直後の限られたデータを用いた場合でも、数分以内に余震発生確率の予測を行える実用的な計算速度を達成した。提案手法を実際の地震カタログに適用した結果、複数の地震系列に対して安定したパラメータ推定値が得られ、モデルの汎用性が確認された。また、2004 年新潟県中越地震を対象として、本震発生後 3 時間および 24 時間のデータを用いた $\mu(t)$ の推定を行い、観測データの蓄積に応じて検出確率の時間変化を安定に推定できることを示した (図 13)。

これらの解析結果を整理し、提案手法の再現性を確保するために解析コードの精査を進めた。あわせて、開発した推定手法および実地震カタログへの適用結果を論文として公表するため、原稿執筆を開始した。

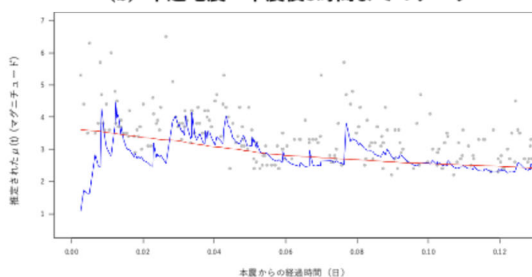
ETAS型検出確率モデルの実地震カタログへの適用

$\mu(t)$: 50%の確率で余震を検出するために必要なマグニチュード

(a) 複数地震カタログへの適用結果 (発生後24時間以内)

地震	m0	m1	α	γ	A	b値
2004年中越地震	1.034	1.332	0.591	1.339	1.427	0.577
2016年熊本地震 (前震)	0.265	1.880	0.868	1.334	0.899	0.429
2016年熊本地震 (本震)	0.841	1.374	0.376	1.520	1.348	0.787
2021年福島県沖地震	0.813	1.411	0.430	1.625	0.995	0.695
2022年福島県沖地震	0.486	1.341	0.223	1.825	1.075	0.669

(b) 中越地震：本震後3時間までのデータ



(c) 中越地震：本震後24時間までのデータ

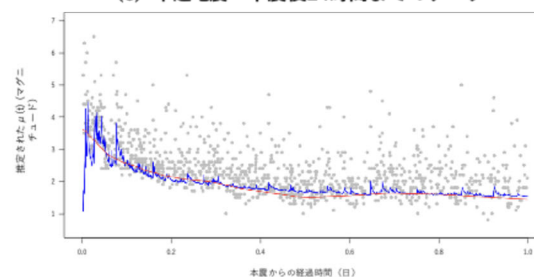


図 13. ETAS 型検出確率モデルの実地震カタログへの適用結果。(a) 発生後 24 時間以内のデータを用いて複数の地震カタログに提案手法を適用した際のパラメータ推定値。(b, c) 2004 年新潟県中越地震を対象として、本震発生後 3 時間および 24 時間までのデータから推定した $\mu(t)$ 。ここで $\mu(t)$ は、本震から t 日経過した時点において、50%の確率で余震を検出するために必要なマグニチュードを表す。短時間の観測データからでも本震直後の検出能力低下を反映した推定が可能であり、データの蓄積に伴って推定が安定化することが確認された。

令和 6 年度に開発した長期的な地震発生確率の評価手法は、滑り量依存 BPT モデル (Ogata, 2002; JGR) において、滑り量を局外母数として扱い、滑り量の不確実性を確率分布として表現することで、ベイズ推定の枠組みで自然に不確実性を考慮することができる。一方で、南海トラフ地震等では観測データが少なく安定した評価には、不確実性やパラメータに関する事前情報を表現するための適切な事前分布の設計が必要であった。そこで、専門家の意見を参考に、不確実性を含む古文書などの情報を表現する隆起量に対する事前分布を設計した。また、傾きに関するパラメータの事前分布を客観的に決定するために、周辺尤度最大化を取り入れた経験ベイズ法を採用した。さらに、これらの事前分布を用いて南海トラフ地震の長期評価を行うためのプログラムコードを地震調査委員会へ提供した。そして、令和 7 年 9 月 26 日に公表された文部科学省地震調査委員会「南海トラフの地震活動の長期評価 (第二版一部改訂)」では、提案手法を用いて南海トラフ地震について確率評価の更新が行われた (図 14)。

一部改訂のポイント：まとめ

主な変更点	現在：第二版（2013.5.24）	今回改訂：第二版一部改訂（2025.9.26）
室津港の隆起量データ	隆起量データの不確実性を考慮していない * 1：ケースについてはp.7参照	隆起量データの 不確実性を考慮 隆起量データの誤差を考慮した 確率分布で表現 宝永地震、安政地震、昭和南海地震について確率分布で表現
確率計算に用いたデータ、計算モデル、計算方法	データ ①地震発生履歴（ケースⅤ ^{*1} ）と室津港の隆起量 ②地震発生履歴のみ（ケースⅢ～Ⅴ） 計算モデル ①②ともBPTモデル(ブラウン緩和振動過程モデル) Brownian Passage Time 計算方法 ① μ ：時間予測モデルから計算（88.2年） α ：0.20と0.24の2種類 ②最尤推定により、各ケースの μ と α を計算	データ ①'地震発生履歴（ケースⅤ）と室津港の隆起量の確率分布 ②'地震発生履歴のみ（ケースⅢ） 計算モデル ①' SSD-BPTモデル(すべり量依存BPTモデル) Slip-Size Dependent ②' BPTモデル 計算方法 ①'②'ともベイズ推定 発生確率値の70%信用区間を計算 * 2：94.5%以上の場合は「90%程度以上」と表現している
30年発生確率値（2025年1月現在）	①時間予測モデル+BPT分布： Ⅲランク （80%程度 ^{*3} ） ②BPT分布：10%～30%（ケースⅢ～Ⅴ：2013年1月時点の確率値） * 3：2025年1月1日時点	①' すべり量依存BPTモデル：Ⅲランク （60%～90%程度以上 ^{*2*3} ） ②'BPTモデル： Ⅲランク （20%～50% ^{*3} ） ①'、②'については、今後1年ごとの地震発生確率値の更新対象となる

・ μ と α はBPTモデルで地震発生確率計算に必要なパラメータであり、 μ は平均発生間隔、 α は発生間隔のばらつき度合いを表す。
 ・30年以内の地震発生確率に基づきランク分けを行っており、海溝型地震の場合、**確率の値が26%以上の場合、最も高い「Ⅲランク」**としている。
（政策委員会総合部会，2018）

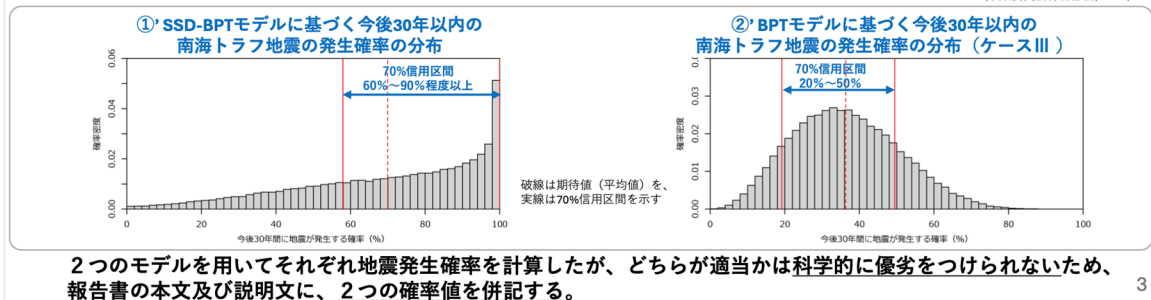


図1.4. 地震調査研究推進本部 事務局 南海トラフの地震活動の長期評価（第二版一部改訂）の概要資料の一部抜粋（3 ページ目）

2) サブテーマ「微動時空間モデリング技術の開発」

2. 2で開発した微動の時間波形を柔軟にモデリング可能な Neural SDE 表現を獲得する手法を実際の Hi-net データに適用し、推定された SDE の拡散項が時間と共に減衰する性質を示していることを確認した。また、ガウス過程を活用したモデリング手法にも取り組むことで、四国の各観測点でのスロー地震の SDE モデルから、先行研究と整合的な観測点ごとのクラスタリングを行うことができた。

3) サブテーマ「地震波動場データ同化手法の開発」

大規模変分法地震波動場データ同化の実データ運用のための高度化を目的として、これまでに提案した乱択化前処理を採用した変分法データ同化不確実性評価の高速化法に対して、データの質や量に依存して適切な乱択化法を選択する数学的基準を構築することで実用化に成功した。事後分布精度行列の対角成分近似のためにこれまでに採用していた2種類の乱択化法（GH89, BN22）はデータ量・モデル規模によって計算量とその近似精度にトレードオフがあることが昨年度までの研究で発見されていた。これを背景に、本年度は行列の対角の「強さ」を基準にした乱択化法の自動選択法を提案した（図1.5）。本提案手法（Diagonally-Dominance Diagnoser：DDD法）は行列成分を見ることなく行列の対角の強さを定量化し適切な乱択法の選択基準を提供する。これにより事前に経験的に乱択法を選定する必要がなくなり、堅牢かつ高速な変分法データ同化不確実性評価が行えるようになった。

乱択化に基づく不確実性評価の高速化スキーム

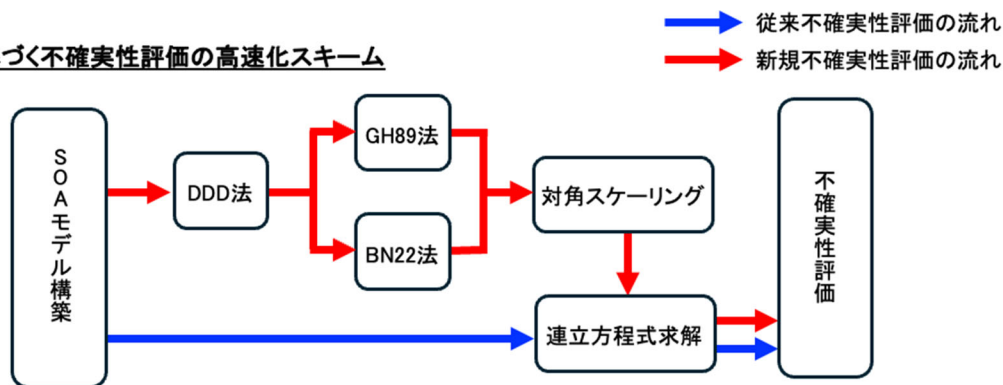


図15. 本提案乱択化選別基準 DDD 法に基づく不確実性評価計算の流れ。本手法によって乱択法の自動選択が可能となり、堅牢な不確実性評価の高速化が可能となった。

4) サブテーマ「RMS 計算と階層クラスタリングを利用した低周波地震テンプレートカタログ作成手法」

微動テンプレート波形を自動的に検出する手法を開発し (YOSO)、四国の Hi-net 観測点から得られたデータに適用した。令和5年度の報告書では、微動波形検出、および階層的クラスタリングによる微動分類に成功したことを報告した。微動検出では、1~10Hz のバンドパスフィルターをかけた後、波形の RMS エンベロープを推定し、検出ピークアルゴリズム (Duarte and Watanabe, 2021) を用いて信号を取り出す。次に、RMS 振幅の減衰を評価することで、各イベントの継続時間を推定する。その際、RMS 振幅の閾値、RMS ピーク間の分離度、および RMS 減衰の閾値の3つのハイパーパラメータを設定する。さらに、検出した微動間の振幅比、微動継続時間比、交差相関係数の3つの特徴量を用いて階層的クラスタリングを行い、微動を分類する。最後に、クラスタリングの結果を視覚化するために、Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP) 法を適用する。クラスタ分析の結果、微動継続時間による分類は他の2つの特徴量による分類よりも優れていることがわかった。この分析では振幅が $1 \mu\text{m/s}$ 以上、あるいはノイズレベルに近いクラスタを除外し、振幅が 10^{-7} - $10^{-6} \mu\text{m/s}$ のクラスタを分析対象とした。また、継続時間が300秒以上3秒未満の微動は除外した。微動波形を検証するために、規格化エネルギー、および各クラスターに含まれる微動の震央分布を推定した。検出した微動の規格化エネルギーは 10^{-9} - 10^{-8} の範囲にあり、これまで四国で観測された微動波形の平均値より少なくとも1桁大きいことがわかった。微動の震央は、均質媒体を用いたS波の理論到達時間の推定により四国中央部の観測点での微動検出結果を関連付け、震源振幅モデル (Battaglia and Aki, 2003; Maeda and Obara, 2009) を適用することにより同定した。ただし、この方法は震源深度の推定精度がよくないので、ここでは深度を35kmに固定した。提案手法の精度はあまり高くなかったが (20~40%の誤差)、震央分布はより精密な震源位置決定法 (Maeda and Obara, 2009; Mizuno and Ide, 2019; NIED, 2025) から得られた震源分布に非常に近いことがわかった。得られたテンプレートを15日間の連続データでテンプレートマッチングを用いて検証した。これらのテンプレートを用いて、四国のさまざまな地震観測点における微動活動を特定した。令和7年度にこの研究の結果は Seismological

Research Letters に掲載された。

(c) 結論ならびに今後の課題

従来の長期的な地震発生確率の評価方法は、時間予測モデルと BPT モデルという異なるモデルを不自然な形で組み合わせていた。さらに、不確実性を大きく孕んだ古文書のデータを確定値として扱うことによる過大・過小評価の危険があった。これら2つの問題点をベイズ統計の枠組みで自然に解消することができた。さらに、大きな成果として、手法の提案に留まらず社会実装も達成することができた。一方で、データの少なさによる不安定性やモデルの選択の困難性は依然として大きな問題である。そのため、昨年度に述べたような発生間隔のみのデータも取り入れた解析は依然として重要な過大である。また、南海トラフ地震への応用では、室津港の隆起量のみを用いたが、異なる地域の隆起量データも存在する。これらを統合して解析するための手法の開発も進めていきたい。

大規模変分法地震波動場データ同化の乱択化による不確実性評価の高速化のための乱択化法の数学的選択基準を構築することに成功した。本手法は事後分布精度行列の要素を一切見ることなしに行列の対角成分の性質を取得・評価し、乱択化法の自動選択基準を提供する。これまでの研究で直下型地震の長時間データへ適用した速度構造不確実性評価の高速化に乱択化法は有効なことが示されており、本提案手法によって人間のヒューリスティックを排除した堅牢な高速化を実現するものに昇華された点で有用である。本手法は完全に他モデルへ転用可能な数学的手法であり、今後は破壊現象や地下流体などの構造推定への適用を想定している。

クラスタ手法を用いた微動テンプレートの作成における提案方法は実データへの適用が容易で信頼性の高い結果が得られるが、いくつかの限界もある。主な限界点は、微動検出と分類結果がハイパーパラメータの値に非常に敏感であるということである。今後は、より正確な震源決定方法を取り入れるとともに、機械学習法を適用してハイパーパラメータ設定を行うことにより提案方法を改善していきたい。

(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 11 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
Slip-size-dependent Brownian passage time model with slip-size uncertainties	寺田 吉壱	日本地球惑星科学連合大会 (JpGU2025)	令和 7 年 5 月 26 日	国内	○
変分エネルギー型物理情報深層学習に基づく収縮破壊パターン計算	伊藤 伸一	日本地球惑星科学連合大会 (JpGU2025)	令和 7 年 5 月 29 日	国内	
Effect of surface	Shin-ichi	Physics of	令和 7 年	国内	

tension fluctuations on shrinkage-induced crack pattern formations	Ito	Open Systems: Resonance, Symmetry, and Topology (POS-RST)	8月6日		
収縮破壊の確率過程と物理情報深層学習による破片サイズ分布推定	伊藤 伸一	日本応用数理学会 2025 年度年会	令和 7 年 9 月 2 日	国内	
滑り量の不確実性を考慮した SSD-BPT モデルの推定について	寺田 吉壺, 長尾 大道, 平田 直	統計関連学会連合大会	令和 7 年 9 月 10 日	国内	○
収縮破壊の確率過程と物理情報深層学習による破片サイズ分布推定	伊藤 伸一	日本物理学会第 80 回年次大会	令和 7 年 9 月 18 日	国内	○
Slip-size-dependent Brownian passage time model with slip-size uncertainties	Yoshikazu Terada	IWIRISS2025	令和 7 年 11 月 25 日	国外	○
Learning Dynamical Scaling in Fracture and Fragmentation through Physics-Informed Neural Modeling	Shin-ichi Ito	IWIRISS2025	令和 7 年 11 月 26 日	国内	○
Forecasting Aftershocks Following a Large Mainshock Using an ETAS-Type Detection-Probability Model	Kosuke Morikawa	IWIRISS2025	令和 7 年 11 月 26 日	国外	○
Feature Extraction of Low-Frequency Tremors Using Nonparametric Stochastic Differential Equation Modeling	Toshiro Kusui	IWIRISS2025	令和 7 年 11 月 26 日	国外	○
物理情報サロゲートによる収縮破壊の破片サイズ分布のベイ	伊藤 伸一	日本物理学会 2026 年春季大会	令和 8 年 3 月 25 日	国内	

ズ推論					
-----	--	--	--	--	--

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載：計3件、うち海外3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
Adjoint-based marker-in-cell data assimilation for constraining thermal and flow processes from Lagrangian particle records	Nakao, A., T. Kuwatani, S. Ito, and H. Nagao	J. Geophys. Res. Machine Learning and Computation	令和7年 4月3日	国外	
Fragment size density estimator for shrinkage- induced fracture based on a physics-informed neural network	Shin-ichi Ito	Journal of the Physical Society of Japan	令和7年 9月11日	国外	
RMS and hierarchical agglomerative clustering to build template event catalogs of tectonic tremors	Gerardo Mendo- Pérez, H. Nagao, and Y. Terada	Seismol. Res. Lett.	令和7年 11月14 日	国外	○

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

2. 5 業務題目：自然知能に基づく地震波形画像データ解析技術の開発研究

(1) 業務の内容

(a) 業務の目的

2.2 および 2.3 の地震・微動検測手法によって検出された地球内部起源現象の候補を、地震波形からの目視によるイベント検出の経験が豊かな地震学の専門家の目によって検証する。究極的には、専門家の目に勝る検測手法の創出が目標である。

また、解析対象に合わせて用いるべき地震観測点を取捨選択するアルゴリズムを開発する。信号-雑音比が時空間変化する場合においても適用可能な手法へと高度化することにより、将来的な新規地震観測点設置に向けた提案を示すことが可能となる。これにより、深層学習の学習効率を最大化するような学習用画像波形データセット生成のための観測点選択にも応用できる。

(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
国立大学法人東京大学 地震研究所・准教授	長尾 大道	R7.4.1 ～ R8.3.31	5,999,894 円	1,799,968 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・名誉教授	小原 一成	R7.4.1 ～ R7.3.31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・准教授	鶴岡 弘	R8.4.1 ～ R7.3.31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・助教	伊藤 伸一	R7.4.1 ～ R8.3.31	0 円	0 円

(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

2.2 および 2.3 において実施した既存の深層学習器の適用により得られた地震・微動検測の結果を、経験豊かな地震研究者の目視によって検証し、手法の性能評価を行った。

また、2.2 で実施する地下構造モデリング技術を例に、観測点選択アルゴリズムの方向性について検討を行った。

2) 令和4年度

2.3 で開発した深層学習器によって地震波形画像データから検出した深部低周波微動の複数の候補を、経験豊かな地震学者の目視によって微動であるか否かを確認し、深層学習器の高度化を図った。

また、前年度に方向性を定めた観測点選択アルゴリズムを理論的に具現化し、2.2 および 2.3 における深層学習器への実装に向けた準備研究として、地震波動場再構成をテストベッドとしてその妥当性を検証した。

3) 令和5年度

地震・微動検測のための観測点選択アルゴリズムを開発した。実データに適用した

ところ、効果的な地震・微動検測が可能であることがわかった。

4) 令和6年度

前年度までに開発した観測点選択アルゴリズムを実装した2.2および2.3の深層学習器によって検出された地震・微動の候補を、経験豊かな地震学者の目視によって正しく検測できているか否かを確認し、深層学習器の高度化を図った。

5) 令和7年度

2.2および2.3で構築した地震・微動カタログを経験豊かな地震学者によって最終的な検証を行った後、カタログの公開準備を開始した。

(d) 令和7年度の業務の目的

2.3で開発した深層学習器によって地震波形画像データから検出した深部低周波微動の候補をデータベース化し、経験豊かな地震学者の目視によって微動であるか否かを確認可能な環境の構築を継続する。

開発した観測点選択アルゴリズムの実行プログラムを実務者が使いやすいようパッケージ化し、公開する。

(2) 令和7年度の成果

(a) 業務の要約

深層学習モデルに基づく地震計古記録からの地震関連イベント検出について、令和6年度に構築した、対象となるデータをこれまでのペン書き記録から煤書き記録に拡大した場合の方法論を実行した。

開発した観測点選択アルゴリズムを実行するPythonコードをGitHub上に公開した。

(b) 業務の成果

1) サブテーマ「目視による地震波形画像データの検証」

令和6年度にデジタル化した、昔の煤書き方式の地震計で得られた地震波形記録の波形画像データを自然知能によって検証し、深層学習モデルに必要な学習データのための人工波形画像データを生成した。また、気象庁から提供された吾妻山の煤書き記録をデジタル化して得られた波形画像データおよび地震カタログから、学習データとして用いる地震波形の切り出しを開始した。

2) サブテーマ「観測点選択アルゴリズムの開発」

観測点選択アルゴリズム（図16）の実行プログラムについて、2つのPythonコードを公開した。一つは提案アルゴリズムの基盤になっているマルチプル・クラスタリング手法についてのコードである。このコードは元々Matlabで書かれていたものをPythonに書き換えを行った。もう一つは、マルチプル・クラスタリング手法を応用して、観測点選択を行うサンプルコードである。多くの実務者に利用してもらうことを目的とし、両コードともGitHub上に公開した。

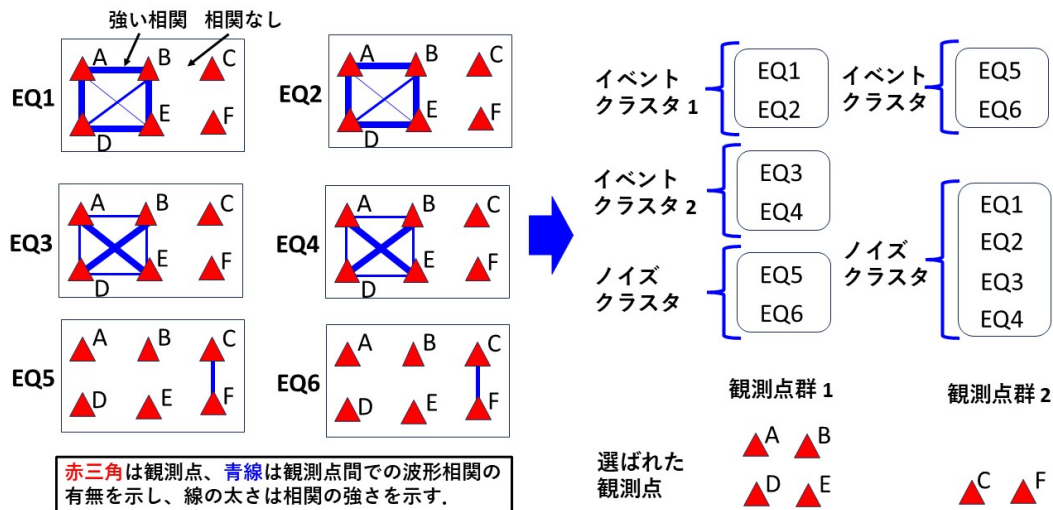


図 16. マルチプル・クラスタリング手法の模式図。観測点 A-F、地震イベント EQ1-6 について、波形相関のある観測点群（青線で結ばれた観測点）を同定し、対応する地震イベントとノイズの分類を行う。例えば、観測点群 1（観測点 A、B、D、E）において、EQ1、EQ2、EQ3、EQ4 は A、B、D、E 間で波形相関があるため地震イベントに分類する。さらに、相関のパターンによってイベントクラスタ 1（EQ1、EQ2）、及びイベントクラスタ 2（EQ3、EQ4）に細分類する。一方、EQ5、EQ6 は波形相関がないためノイズに分類する。同様にして、観測点群 2（観測点 C、F）では、EQ5、EQ6 をイベントクラスタに分類し、EQ1、EQ2、EQ3、EQ4 をノイズクラスタに分類する。

(c) 結論ならびに今後の課題

煤書き地震波形記録から地震関連イベントを検出する深層学習モデルの開発に向けて、学習データのための人工波形画像データを作成し、また実際の煤書き記録からの地震波形の切り出しを開始した。

東北地方の陸側で発生する低周波地震検出のための観測点選択を行った結果、11 の観測点群に分けられることがわかり、マルチプル・クラスタリング手法を適用すれば、イベント・クラスタリングによって、データから最適な観測点群の組み合わせを推定できることがわかった。

(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 : 計 5 件、うち海外計 2 件

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
深層学習モデルを基礎にした複数観測点地震検出手法の稠密地震観測網データへの応用	徳田 智磯, 関根 秀太郎, 阿部 信太郎, 平田 直, 長尾 大道	日本地球惑星科学連合大会 (JpGU2025)	令和 7 年 5 月 26 日	国内	○
深層学習モデルを基礎にした複数観測点	徳田 智磯, 長尾 大道	統計関連学会連合大会	令和 7 年 9 月 9 日	国内	○

地震検出手法の開発と応用					
深層学習モデルを基礎にした複数観測点地震検出手法の稠密地震観測網データへの応用	徳田 智磯, 関根 秀太郎, 阿部 信太郎, 平田 直, 長尾 大道	日本地震学会 2025 年度秋季 大会	令和 7 年 10 月 20 日	国内	○
Seismic detection based on unsupervised station-wise phase picks using DL and its application	Tokuda, T.	IWIRISS2025	令和 7 年 11 月 26 日	国外	○
Seismic detection based on unsupervised station-wise phase picks using deep learning and its application	Tokuda, T. and H. Nagao	AGU Annual Meeting 2025	令和 7 年 12 月 15 日	国外	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計 2 件、うち海外計 2 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
Visualizing Distributions of Covariance Matrices	Tokuda, T., Goodrich, B., Van Mechelen, I., Gelman, A. and Tuerlinckx, F.	Journal of Data Science, Statistics, and Visualisation	令和 7 年 6 月 10 日	国外	
Two-stage approach for earthquake detection using multiple clustering-based classification	Tokuda, T. and H. Nagao	Geophys. J. Int.	令和 7 年 10 月 17 日	国外	○

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

3. まとめ

令和7年度は、2.2で述べた波形信号データのための深層学習モデルの開発と実データへの応用を継続した。具体的には、複数観測点で得られた地震波検測の結果を統合して地震・ノイズ判定を行う統計学的手法、P波・S波を検測する深層学習モデル SegPhase、P波初動の極性分類ならびにその不確実性評価を行う深層学習モデル PoViT-UQ、DASデータのための地震波検測深層学習モデル構築に必要となる学習データ生成法 SVR-DAS、低周波微動を記述する確率微分方程式構築法について、それぞれ手法としての高度化を行いつつ、実データへの応用展開を実施した。また、2.3で述べた複数観測点の波形画像データから地震波検測を行う深層学習モデル MultiDLFormer、および昔の煤書き地震波形記録から地震と低周波微動の検出と分類を行う深層学習モデルの開発、2.4で述べた地震時空間モデリング技術、地震波動場データ同化手法、低周波微動テンプレートカタログ生成手法、長期的地震発生確率評価手法の高度化、2.5で述べたマルチプル・クラスタリング手法に基づく観測点選択アルゴリズムの高度化、および煤書き記録からの地震・微動検出深層学習モデル構築に必要となる学習データ生成など、非常に多岐にわたる研究テーマを実施した。

これらの研究テーマの約半数は令和7年度中に国際誌に掲載され、また他の研究テーマについてもその多くが国際誌に投稿中となっているほか、開発したコードを GitHub 等にて公開しており、本研究課題で得られた成果の発信を着実に進めている。さらには、Caltech 等との「情報×地震」分野における国際連携も強化し続けており、わが国が同分野を牽引していくための礎を築くことができた。

4. 活動報告

- SYNTHA-Seis 関連会議
 - ✓ SYNTHA-Seis 定例会、令和7年4月8日、5月19日、5月20日、5月22日、7月15日、9月8日、9月12日、9月22日、10月20日、令和8年2月16日
 - ✓ SYNTHA-Seis 運営委員会、令和7年4月8日、令和8年3月17日
- STAR-E プロジェクト関連会議
 - ✓ STAR-E 勉強会、令和7年4月24日～25日、7月22日、令和8年2月13日、3月16日、ハイブリッド
 - ✓ STAR-E プロジェクト 第5回研究フォーラム、令和8年3月3日、ハイブリッド
- 学会セッション
 - ✓ 日本地球惑星科学連合大会 ユニオンセッション「AI 地球惑星科学」、セッション「最先端ベイズ統計学が拓く地震ビッグデータ解析」、令和7年5月26日、令和7年5月27日、千葉
 - ✓ 第38回人工知能学会全国大会 オーガナイズドセッション「地震研究と人工知能」、令和7年5月28日、大阪
 - ✓ 日本応用数理学会 セッション「SciML の理論と応用」、令和7年9月2日、東京
 - ✓ 統計関連学会連合大会 企画セッション「最先端情報科学・統計学が牽引する地震研究の最前線」、令和7年9月10日、大阪
 - ✓ 日本地震学会 2025年度秋季大会 特別セッション「情報科学との融合による地震研究の加速」、令和7年10月6日、福岡
 - ✓ 情報科学と地震学の融合研究に関する国際ワークショップ(IWIRISS 2025)、令和7年11月25日～27日、東京
- メディア掲載
 - ✓ 日本経済新聞、令和7年11月8日
 - ✓ 毎日新聞、令和7年12月21日
- 受賞
 - ✓ 楠井俊朗、応用統計学会 2025年度優秀発表賞、令和7年5月17日
- アウトリーチ活動
 - ✓ 日本地球惑星科学連合大会、スーパーレッスン「深層学習による地震波形データ解析」、令和7年5月25日、参加者40名
 - ✓ SYNTHA-Seis ニュースレター Vol.4、令和8年2月28日（日本語版）、令和8年3月27日（英語版）
 - ✓ 地震研サマースクール、地震研スプリングスクール、令和7年8月27～30日、

令和8年2月24日、3月4日、3月30日

- ✓ 「東大の研究室をのぞいてみよう！プログラム」、令和8年3月26日、高校生30名への講義

5. むすび

令和3年度の研究開始時の計画を改めて振り返ってみると、当初のねらいであった波形信号データ／波形画像データ解析のための深層学習モデルや、地震関連モデリングのための統計学的手法を、人工知能と自然知能の対話・協働を通じて開発することができ、本研究課題は概ね順調に研究が進展し、かつ十分に満足できる研究成果を得たものと考えられる。これは本研究課題に携わった多くの研究者の各人の尽力と協調の賜物であることはもちろん、STAR-E プロジェクトの他研究課題、気象庁などの現業機関、および Caltech などの海外機関の関係者との議論や連携が大いに役立った。特に、令和7年11月に東京大学地震研究所で開催した「情報科学と地震学の融合研究に関する国際ワークショップ」(IWIRISS 2025)には、STAR-E プロジェクトをはじめとして国内外から多数の「情報×地震」分野の関係者が集い、本研究課題の総まとめに相応しい国際会議となった。IWIRISS 2025 の詳細な報告については、本研究課題が発行したニュースレターVol. 4 に掲載されている。

開発した手法の公開を進めることができた一方で、現業機関への提供については継続議論中となっており、STAR-E プロジェクトの後継として令和8年度から発進することとなった STAR-E NEXT プロジェクトにおいて手法の汎用化を進めながら実現したい。また、「情報×地震」分野の恒久的な発展のためにも、同分野における国際連携のさらなる強化および本研究課題に従事した研究員のキャリアパス形成が、今後の重要な課題である。

様式第 2 1

学 会 等 発 表 実 績

委託業務題目「人工知能と自然知能の対話・協働による地震研究の新展開」

機関名：国立大学法人東京大学地震研究所

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
PoViT-UQ : P-wave Polarity and Arrival Time Determination using Vision Transformer with Uncertainty Quantification	加藤 慎也, 長尾 大道, 飯尾 能久	日本地球惑星科学連 合大会 (JpGU2025)	令和 7 年 5 月 26 日	国内
深層学習モデルを基礎にした複数観測点地震検出手法の稠密地震観測網データへの応用	徳田 智磯, 関根 秀太郎, 阿部 信太郎, 平田 直, 長尾 大道	日本地球惑星科学連 合大会 (JpGU2025)	令和 7 年 5 月 26 日	国内
Creation of training and validation datasets of Distributed Acoustic Sensing recordings from Sanriku seafloor observation system, Japan.	Gerardo Manuel Mendo Pérez, H. Nagao, S. Katoh, M. Shinohara	日本地球惑星科学連 合大会 (JpGU2025)	令和 7 年 5 月 26 日	国内
深層学習によるスロー地震の確率微分方程式表現の獲得と現象理解の深化	楠井 俊朗, 長尾 大道, 伊藤 伸一, 加藤 慎也, 徳田 智磯	日本地球惑星科学連 合大会 (JpGU2025)	令和 7 年 5 月 26 日	国内
Slip-size-dependent Brownian passage time model with slip-size uncertainties	寺田 吉壱	日本地球惑星科学連 合大会 (JpGU2025)	令和 7 年 5 月 26 日	国内
変分エネルギー型物理情報深層学習に基づく収縮破壊パターン計算	伊藤 伸一	日本地球惑星科学連 合大会 (JpGU2025)	令和 7 年 5 月 29 日	国内
GeoSciAI2025: 地球惑星科学×AI コンペの実施報告	長尾 大道	第 39 回人工知能学 会全国大会	令和 7 年 5 月 29 日	国内
A Deep Learning	Kusui, T.,	FUSION2025	令和 7 年 7	国外

Approach to Identifying Neural SDE Models Using the Signature Kernel	H. Nagao, S. Ito, S. Katoh and T. Tokuda		月 11 日	
Development of Arrival Time Picking Models for Japan's Seismic Network Using the Hierarchical Vision Transformer	Katoh, S., Y. Iio, H. Nagao, H. Katao, M. Sawada and K. Tomisaka	AOGS2025	令和 7 年 7 月 28 日	国外
Effect of Surface Tension Fluctuations on Shrinkage-Induced Crack Pattern Formations	Shin-ichi Ito	Physics of Open Systems: Resonance, Symmetry, and Topology (POS-RST)	令和 7 年 8 月 6 日	国外
収縮破壊の確率過程と物理情報深層学習による破片サイズ分布推定	伊藤 伸一	日本応用数理学会 2025 年度年会	令和 7 年 9 月 2 日	国内
Towards Integration of Data Assimilation and State-of-the-Art Information Science Techniques for Seismology	Nagao, H., S. Ito, T. Tokuda, G. M. Mendo Pérez, S. Katoh, and T. Kusui	IAGA/IASPEI Joint Scientific Meeting 2025	令和 7 年 9 月 4 日	国外
Neural SDE を用いたスロー地震のデータ駆動型モデリング	楠井 俊朗, 長尾 大道, 伊藤 伸一, 徳田 智磯, 加藤 慎也	統計関連学会連合大会	令和 7 年 9 月 8 日	国内
深層学習モデルを基礎にした複数観測点地震検出手法の開発と応用	徳田 智磯, 長尾 大道	統計関連学会連合大会	令和 7 年 9 月 9 日	国内
滑り量の不確実性を考慮した SSD-BPT モデルの推定について	寺田 吉壱, 長尾 大道, 平田 直	統計関連学会連合大会	令和 7 年 9 月 10 日	国内
収縮破壊の確率過程と物理情報深層学習による破片サイズ分布推定	伊藤 伸一	日本物理学会第 80 回年次大会	令和 7 年 9 月 18 日	国内
深層学習モデルを基礎にした複数観測点地震検出手法の稠密地震観測網データへの応用	徳田 智磯, 関根 秀太郎, 阿部 信太郎, 平田 直, 長尾 大道	日本地震学会 2025 年度秋季大会	令和 7 年 10 月 20 日	国内
データ駆動型ノンパラ	楠井 俊朗,	日本地震学会 2025	令和 7 年 10	国内

メトリック確率微分方程式モデリングによる低周波微動の特徴抽出	長尾 大道, 伊藤 伸一, 加藤 慎也, 徳田 智磯	年度秋季大会	月 20 日	
Fourier Neural Operator を用いた波形に基づく深部低周波地震の震源決定	加藤 慎也, Ross Zachary, 長尾 大道	日本地震学会 2025 年度秋季大会	令和 7 年 10 月 20 日	国内
Leveraging a BERT-based deep learning model for earthquake detection in seafloor Distributed Acoustic Sensing data	Gerardo Manuel Mendo, H. Nagao, S. Katoh and M. Shinohara	日本地震学会 2025 年度秋季大会	令和 7 年 10 月 20 日	国内
Fundamental Seismic Waveform Analysis Based on Deep Learning	Hiromichi Nagao	IWIRISS2025	令和 7 年 11 月 25 日	国外
Slip-size-dependent Brownian passage time model with slip-size uncertainties	Yoshikazu Terada	IWIRISS2025	令和 7 年 11 月 25 日	国外
Learning Dynamical Scaling in Fracture and Fragmentation through Physics-Informed Neural Modeling	Shin-ichi Ito	IWIRISS2025	令和 7 年 11 月 26 日	国外
Forecasting Aftershocks Following a Large Mainshock Using an ETAS-Type Detection-Probability Model	Kosuke Morikawa	IWIRISS2025	令和 7 年 11 月 26 日	国外
Reconstruction of Back-Propagated Seismic Wavefield Using Fourier Neural Operator	Shinya Katoh	IWIRISS2025	令和 7 年 11 月 26 日	国外
Seismic detection based on unsupervised station-wise phase picks using DL and its application	Tomoki Tokuda	IWIRISS2025	令和 7 年 11 月 26 日	国外
Development of an	Gerardo	IWIRISS2025	令和 7 年 11	国外

LLM-based model for earthquake detection in seafloor Distributed Acoustic Sensing measurements	Manuel Mendo		月 26 日	
Feature Extraction of Low-Frequency Tremors Using Nonparametric Stochastic Differential Equation Modeling	Toshiro Kusui	IWIRISS2025	令和 7 年 11 月 26 日	国外
Collaboration Between Japan and Singapore in AI Seismology: Contribution from Japan Side	Hiromichi Nagao	IWIRISS2025	令和 7 年 11 月 27 日	国外
SegFarPhase : Development of Arrival Time Picking Models for Regional Seismic Wave	Shinya Katoh	IWIRISS2025	令和 7 年 11 月 27 日	国外
深層学習が拓く地震カタログ化の新時代 – 観測波形からの自動検出と分類–	加藤 慎也	人工知能学会合同研究会 2025 (SIGAIs 2025)	令和 7 年 12 月 1 日	国内
Seismic detection based on unsupervised station-wise phase picks using deep learning and its application	Tokuda, T. and H. Nagao	AGU Annual Meeting 2025	令和 7 年 12 月 15 日	国外
Development of an LLM-based model for earthquake detection in Distributed Acoustic Sensing measurements	Gerardo Manuel Mendo, H. Nagao, S. Katoh and M. Shinohara	AGU Annual Meeting 2025	令和 7 年 12 月 16 日	国外
Waveform-Based Localization of Deep Low-Frequency Events Without Arrival-Time Picking Using Fourier Neural	Katoh, S., Z. E. Ross, and H. Nagao	AGU Annual Meeting 2025	令和 7 年 12 月 18 日	国外

Operator				
Data-Driven Modeling of Low-Frequency Tremors with Stochastic Differential Equations: From Non-Parametric Estimation to Physics-Informed Learning	Kusui, T., H. Nagao, S. Ito, S. Katoh, T. Tokuda	AGU Annual Meeting 2025	令和7年12月18日	国外
深層学習に基づく歴史地震記象からの地震・微動の検出	長尾 大道	研究集会「古記録の保全と利活用」	令和7年12月18日	国内
最先端の情報科学に基づく固体地球観測データ解析技術・モデリング技術の開発研究	長尾 大道	災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画成果報告シンポジウム	令和8年3月12日	国内
Mamba と Hopf-Lax 公式に基づく数値計算ベースの解釈可能ニューラルオペレータ	楠井 俊朗, 長尾 大道	日本統計学会春季集会	令和8年3月7日	国内
物理情報サロゲートによる収縮破壊の破片サイズ分布のベイズ推論	伊藤 伸一	日本物理学会 2026 年春季大会	令和8年3月25日	国内

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
Adjoint-based marker-in-cell data assimilation for constraining thermal and flow processes from Lagrangian particle records	Nakao, A., T. Kuwatani, S. Ito, and H. Nagao	J. Geophys. Res. Machine Learning and Computation	令和7年4月3日	国外
Visualizing Distributions of Covariance Matrices	Tokuda, T., Goodrich, B., Van Mechelen, I., Gelman, A. and Tuerlinckx, F.	Journal of Data Science, Statistics, and Visualisation	令和7年6月10日	国外
A deep learning approach to identifying neural SDE models using	Kusui, T., H. Nagao, S. Ito, S. Katoh, and	2025 the 28th International Conference on Information	令和7年7月11日	国外

the signature kernel	T. Tokuda	Fusion		
SegPhase: Development of arrival time picking models for Japan's seismic network using the hierarchical vision transformer	Katoh, S., Y. Iio, H. Nagao, H. Katao, M. Sawada and K. Tomisaka	Earth Planets Space	令和7年7月21日	国外
Fragment size density estimator for shrinkage-induced fracture based on a physics-informed neural network	Shin-ichi Ito	Journal of the Physical Society of Japan	令和7年9月11日	国外
PoViT-UQ: P-wave Polarity and Arrival Time Determination using Vision Transformer with Uncertainty Quantification	Katoh, S., H. Nagao, and Y. Iio	Geophysical Journal International	令和7年9月19日	国外
Two-stage approach for earthquake detection using multiple clustering-based classification	Tokuda, T. and H. Nagao	Geophys. J. Int.	令和7年10月17日	国外
RMS and hierarchical agglomerative clustering to build template event catalogs of tectonic tremors	Gerardo Mendo-Pérez, H. Nagao, and Y. Terada	Seismol. Res. Lett.	令和7年11月14日	国外

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