

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5年度
成果報告書

令和6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5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

従来、地震検測は地動の揺れ幅の急激な時間変化を評価し、閾値を超えた場合に地震波と判定してきた（STA/LTA 法）。近年、AI 技術の発展に伴い、深層学習モデルに基づく地震検出 AI の開発・研究が精力的に行われている。これまで蓄積された地震波形データを AI に学習させ、従来手法では見落とされていた地震波の特徴を捉え、より精度よく地震を検出することが可能になった。

本研究ではこうした AI 技術のさらなる向上のため、新しい深層学習モデルを開発した。具体的には畳み込みニューラルネットワークと呼ばれる深層学習モデルを用いた Generalized Phase Detection (GPD) 法を発展させ、地震波形全体だけでなく、地震波形の局所的な情報も取り入れたモデルに改良した（図 1 左）。改良したモデルでは全体波形、及び局所波形、それぞれについて地震検出モデルを構築し、各モデルによる判別結果を統合したものを最終結果とした。このように波形の局所情報を明瞭な形でモデルに取り入れることにより、誤判定しがちな波形をより精度よく判定できるようになった（図 1 右）。本研究の成果として、検出精度の向上だけでなく、全体波形、及び局所波形それぞれについてモデル構築を行うという検出モデルの新たな枠組みを提案したことも重要である。こうした枠組みに基づき、さらに高い精度の検出手法の開発が期待される。

本研究は、国際誌 Geophysical Journal International 誌に掲載された。

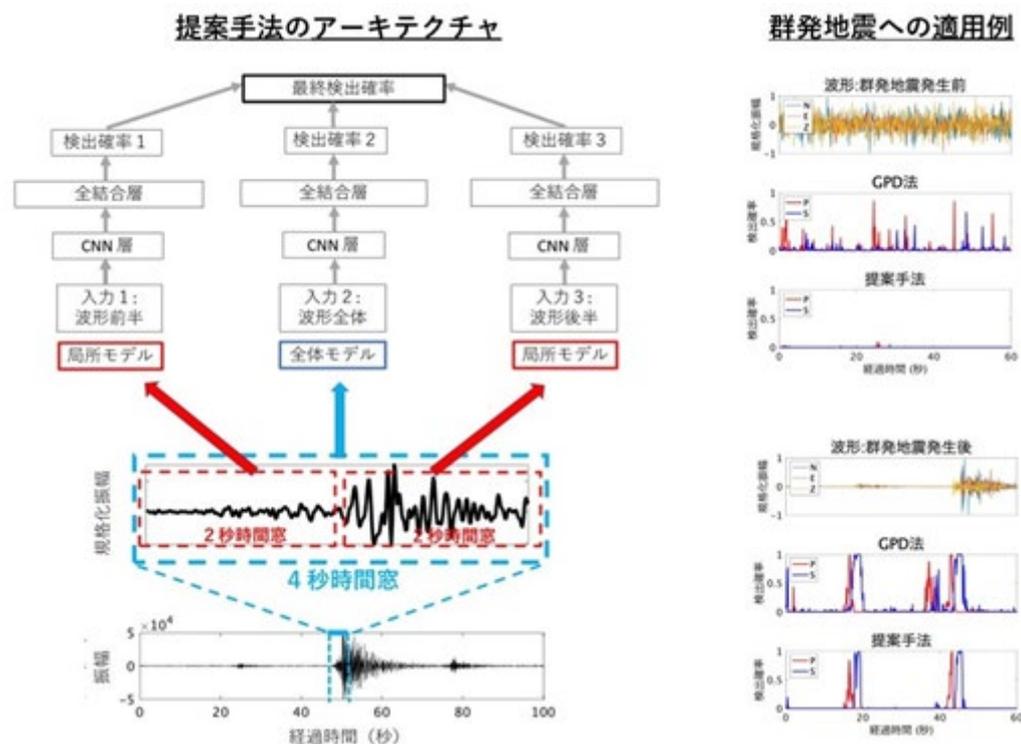


図 1 : (左) 本研究で開発した地震検測モデルのアーキテクチャ
(右) 群発地震への適用例

近年地震学において注目されている低周波地震は、地震を起こす断層がゆっくり滑ることと関連していると考えられ、特に、プレート境界上で発生する低周波地震は大地震を引き起こすひずみ蓄積との関係が指摘されている。しかし、観測される低周波地震の波形振幅は小さく、1つの観測点で検出することは難しい。従って、複数観測点の波形データを用いた検出が必要となるが、そのための観測点選択、及び検出手法は未だ確立されていない。

本研究では、機械学習法（教師なし学習法）を用いて、低周波地震とノイズを分類する観測点群、及びその分類モデルの構築を試みた。具体的には、東北地方で観測された低周波地震に対して10分間の波形データ（スペクトログラム）の観測点相関係数（観測点数88）を要素とする相関行列を算出し、混合ウィシャートモデルに基づくマルチプル・クラスタリング手法を適用した（図2上）。その結果、11の観測点群（図2下では8個のみ表示）が同定された。今後は、観測点選択とともに得られた低周波地震検出モデルを用いて、地震カタログに記録されていない低周波地震の検出を行っていきたい。

本研究は、学会誌「応用統計学」に掲載され、令和6年度応用統計学会優秀論文賞を受賞した。

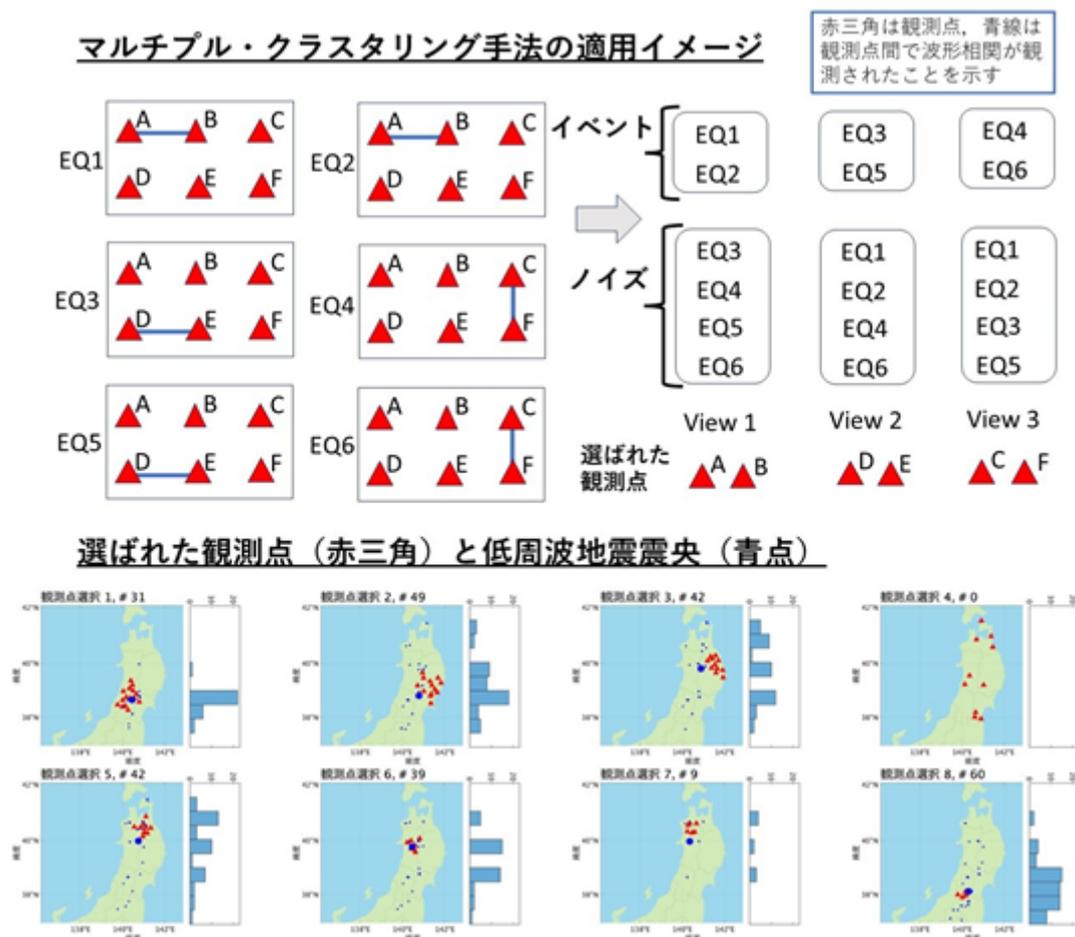


図2：（上）適用手法のイメージ図
（下）選ばれた観測点と低周波地震震央の関係

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5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	8
(1) 業務の内容	8
(2) 令和5年度の成果	10
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	15
(1) 業務の内容	15
(2) 令和5年度の成果	16
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	20
(1) 業務の内容	20
(2) 令和5年度の成果	22
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	30
(1) 業務の内容	30
(2) 令和5年度の成果	31
3. まとめ	34
4. 活動報告	36
5. むすび	38

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	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31	4,609,770 円	1,382,931 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・教授	小原 一成	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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	Mendo Pérez Gerardo Manuel	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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・講師	森川 耕輔	R5.4.1 ～ R6.3.31	712,660 円	213,798 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 吉彦	R5.4.1 ～ R6.3.31	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	R5.4.1 ～ R6.3.31	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、本研究課題を推進する。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。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する。

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、本研究課題を推進する。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開催する。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、その公開準備を行う。

(d) 令和5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年度末に雇用した研究員2名が担当する研究テーマの設定と具体化を図りながら本研究課題を推進する。令和3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の開発に着手する。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5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、9回の定例会を開催した。また、本研究課題に従事する研究員3名のうち、令和4年度末に雇用した2名の研究活動が本格化したことに伴い、本研究課題の中核的技術となる地震データ解析のための深層学習アルゴリズムの開発ならびに実観測データへの適用に必須となるGraphic Processing Unit (GPU)計算機のストレージ増強が必須となったため、これを調達した。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、全国向けの新聞2誌およびテレビ番組において本研究課題が紹介され、東京大学地震研究所一般公開における一般向け公開講義や、高校生50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5回の合同勉強会に参加し、特に第1回においてはホストとして話題提供を行った。本年度より国際連携を本格化し、研究代表者と研究員3名および技術補佐員(大学院生)1名が「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を訪問して意見交換を行なったほか、今後の人的交流を促進するため、同大学と東京大学地震研究所との間で国際交流協定を締結した。本研究課題のプロジェクト会議および運営委員会をハイブリッドにて開催し、本研究課題の令和5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、波形信号データからの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や階層的なVision Transformerモデル、波形画像データからの深部低周波地震検出のためのVision Transformerを活用した深層学習モデルなど、数多くの人工知能技術のほか、低周波地震プレートカタログ生成アルゴリズムの開発や地震時空間モデリング手法の高度化、さらには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」

本研究課題参画者が出席するプロジェクト会議を令和5年3月23日にハイブリッドにて開催し、5か年にわたる本研究課題の推進に向けた総合的な戦略目標に照らし合わせ、本研究課題に従事する研究員3名のうち、特に令和4年度末に採用した2名にどのような研究を実施してもらおうかについての議論を行った。また、本研究課題における成果を発表するために令和5年度に開催される日本地球惑星連合大会、統計関連学会連合大会、日本地震学会、アジア・オセアニア地球科学学会における特別セッションの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。なお、令和4年度初頭に採用した研究員1名の活躍が認められ、令和6年2月1日付で東京大学地震研究所特任助教に採用されたことを付記しておく。

2) サブテーマ「人工知能技術開発のための研究環境整備」

研究員の増員に伴い、本研究課題の中核的技術である地震データ解析のための深層学習アルゴリズム開発に必要な計算機環境を増強した。具体的には、令和4年度末に導入した Graphic Processing Unit (GPU) 計算機のストレージを増強した。

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回程度の定例会を開催した。具体的には、令和6年3月6日に開催した本研究課題全体の運営委員会をはじめ、研究進捗状況を確認するための定例会を9回（令和5年5月16日、7月26日、9月20日、10月16日、10月25日、11月22日、12月20日、令和6年1月15日、3月7日）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.2 を制作した（図3）。また、カリフォルニア工科大学との国際連携を開始し、東京大学地震研究所と同大学との間で今後の人的交流促進を目的とした国際交流協定を締結した（図4）。さらには、令和5年8月2日に実施された東京大学地震研究所一般公開において「人工知能による地震研究の新展開」と題する一般向け公開講義や、令和6年3月25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50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（図5）。



図 3 : SYNTHA-Seis ニュースレター Vol.1.2 (左:表紙、右:技術補佐員(大学院生)によるカリフォルニア工科大学訪問レポート)



図 4 : カリフォルニア工科大学訪問(カリフォルニア工科大学との研究ミーティングにおける研究発表)



図 5 : 「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 5 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 5 年度の研究計画の策定、(ii) 本研究課題で使用する GPU 計算機の増強、(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、およびカリフォルニア工科大学との国際連携という 4 つのサブテーマを実施し、いずれも当初の予定通りの成果を達成したと考えられる。今後は、GPU 計算機上でのデータ解析手法の開発を継続し、本研究課題の研究成果や動向を逐次発信していくためのホームページの頻繁な更新や、ニュースレターの発行を行う。

(d) 成果の論文発表・口頭発表等

- 1) 学会等における口頭・ポスター発表

なし

- 2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

- 1) 特許出願

なし

- 2) ソフトウェア開発

なし

- 3) 仕様・標準等の策定

なし

2. 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・微動検出技術を開発する。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出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。検出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、地震検出の場合と同様のアプローチにより、微動検出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	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31	7,759,661 円	2,327,898 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・教授	小原 一成	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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・講師	森川 耕輔	R5. 4. 1 ～ R6. 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、モデルの拡張を行う。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する。

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

う。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、公開する。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を公開する。

(d) 令和5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開始する。

(2) 令和5年度の成果

(a) 業務の要約

令和4年度に開発した畳み込みニューラルネットワークに基づく地震検出手法について、効果的な転移学習法を考案し、深層学習器プロトタイプを開発した。通常の転移学習は、学習済みモデルのパラメータチューニングによってターゲットとなるデータへの転移学習が行われるが、提案手法では学習済みモデルを直接ターゲットとなるデータに適用し、得られた検出結果を補正するというアプローチを採った(図6)。補正する手法として、ダイナミックな波形振幅変化を特徴量として抽出するマルチプル・クラスタリングに基づく分類手法を考案した(図7)。人工データ、ベンチマークデータ、及び首都圏地震観測網に適用した結果、誤検出を大きく減らすことが可能であることがわかった。

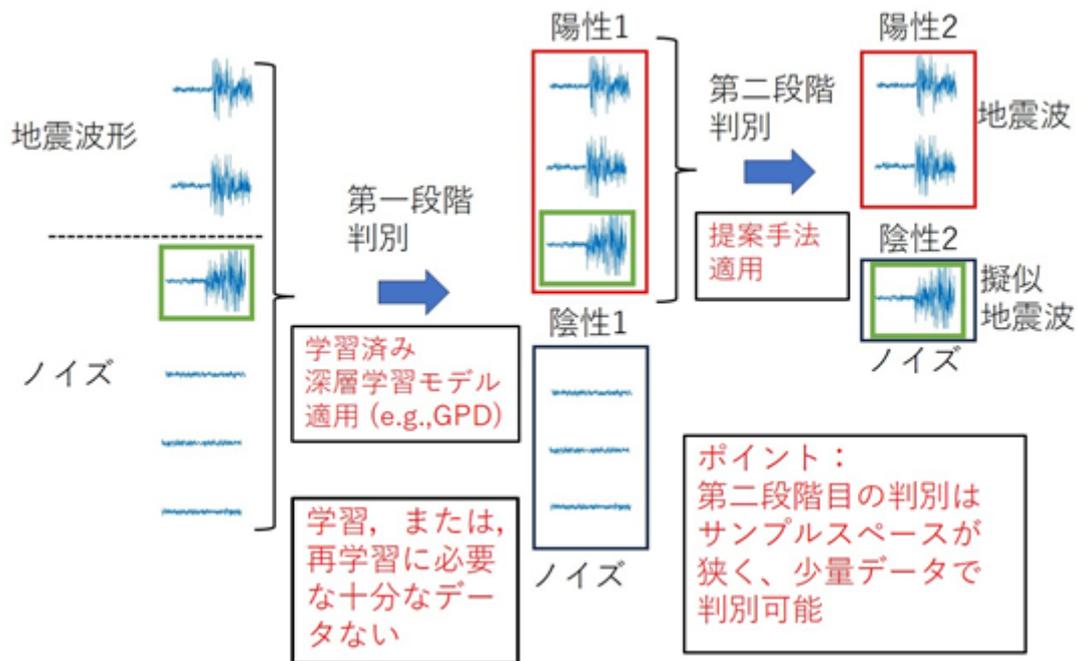


図6：転移学習に関する提案手法の模式図。第一段階では学習済み深層学習モデルを用いて地震・ノイズの判別を行う。さらに、陽性（地震波）と判定された波形に対して、第二段階でマルチプル・クラスタリングに基づく判別手法を用いて判定結果の修正を行

う。この図では、緑枠の波形は第一段階では誤検出されたものの、第二段階で正しくノイズ判定されていることを示す。

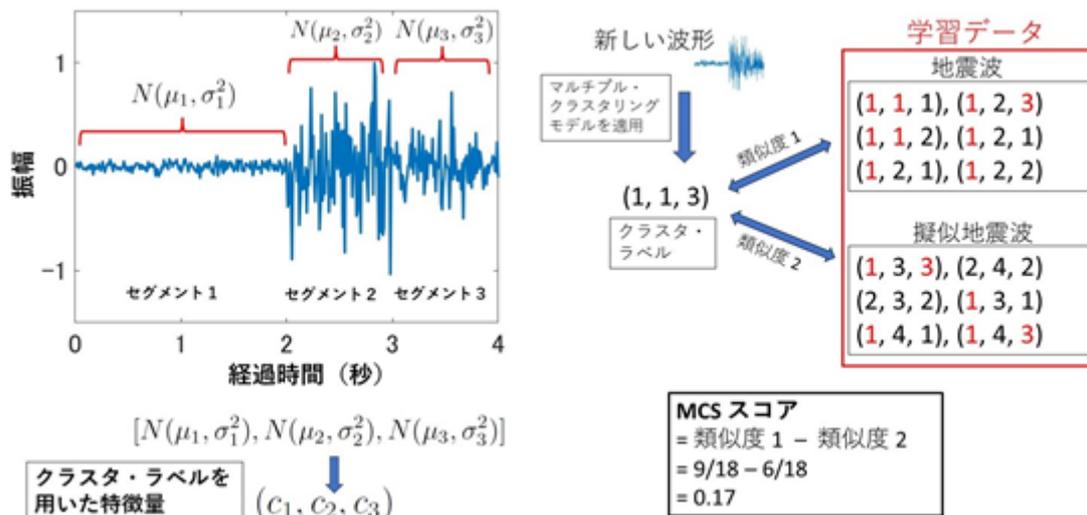


図7：第二段階判別手法に関する概略。（左）セグメントごとに波形振幅に正規分布をフィッティングさせ、波形をクラスタ・ラベルで特徴づける（マルチプル・クラスタリング）（右）新しい波形に対して、構築したマルチプル・クラスタリングモデルを適用してクラスタ・ラベルを算出し、学習データにおける地震波、擬似地震波に対する類似度の差から（MCSスコア）、地震波、擬似地震波の判別を行う。

従来の畳み込みニューラルネットワークに代わる新たな技術として、Vision Transformer を階層的に用いた地震波走時読み取りモデル(図8)を開発した。このモデルは、畳み込み層を用いた従来のモデルと比較して優れた性能を示した。さらに、開発したモデルに含まれる 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を可視化することができる(図9)。その結果、開発したモデルは同じ直達 P 波や S 波に注目していても Head によって注目する場所が異なることやシグナル部分だけではなくノイズやコーダ波部分にも注目していることが可視化できた。これにより開発したモデルは、走時読み取りの重要な P 波初動や S 波初動のみではなくノイズやコーダ部分にも注目することで、P 波初動や S 波初動の特徴をより効果的に識別できていることがわかった。

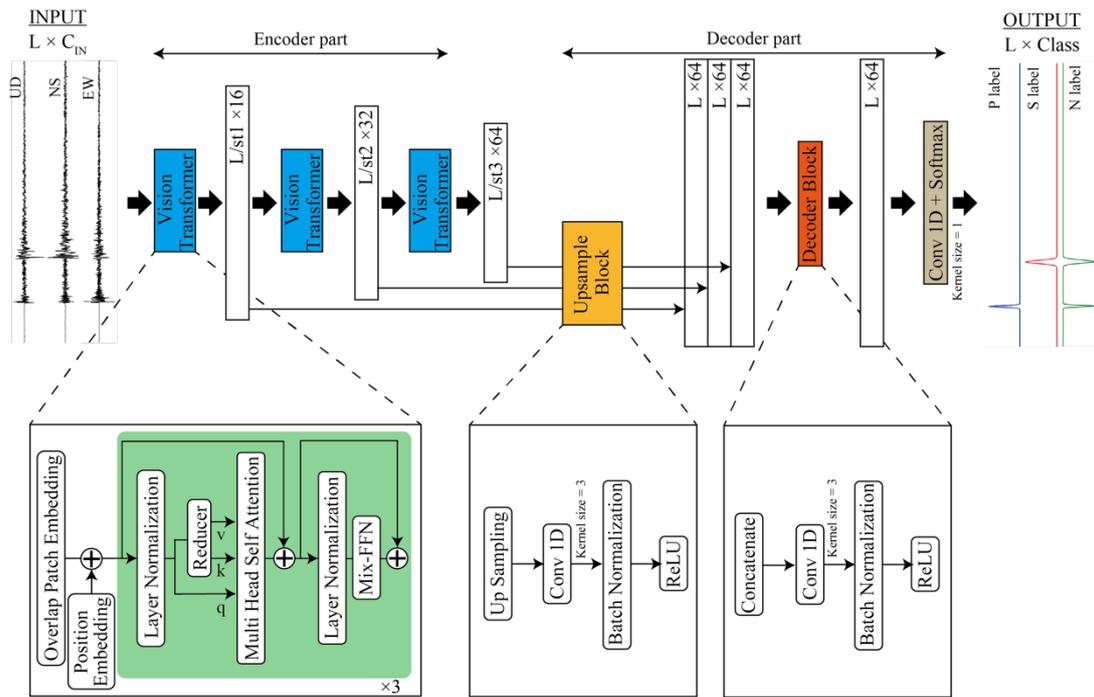


図 8 : 開発したモデルの全体図

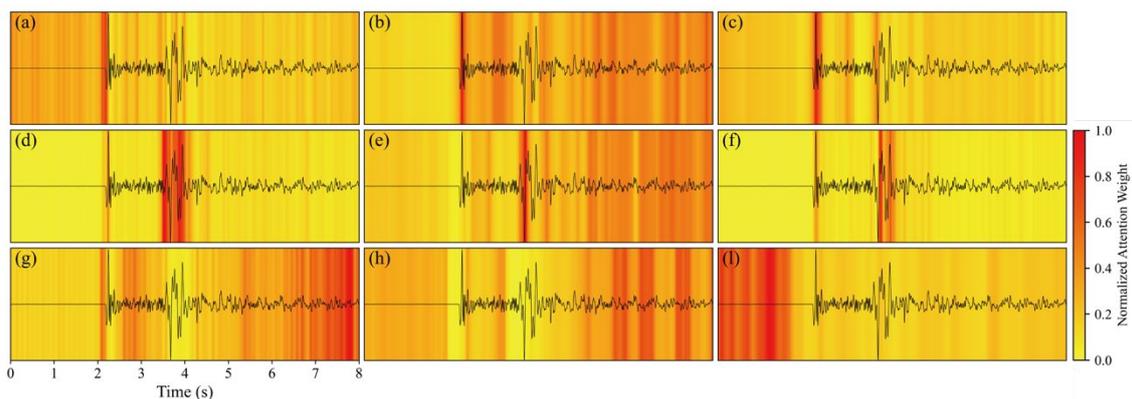


図 9 : モデルがどこを注目しているか。これは、地震波にモデルがどこに注目したかを示す結果であり、地震波は黒線で示されている。モデルが注目した場所は濃い赤色で表示されている。(a)、(b)、(c)はモデルが直達P波に注目していることを、(d)、(e)、(f)は直達S波に注目していることを、(g)、(h)、(i)は直達P波やS波以外の部分に注目していることを示す結果である。

(b) 業務の成果

1) サブテーマ「地震・微動検測技術の開発」

深層学習に基づく地震検測手法の効果的な転移学習法を開発した。提案手法を Python で実装するとともに、波形信号データへの適用結果を論文にまとめ、学会論文として投稿した。

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 を階層的に用いた新たな地震波走時読み取りモデルを開発した。

(c) 結論ならびに今後の課題

二段階の検出アプローチに基づく、効果的な深層学習モデルの転移学習法を開発した。提案手法はモデル構築に必要な波形データが少量の場合でも適用可能であり、実用上大きなメリットがある。今後は、複数観測点の波形データを用いた場合に提案手法を使って効果的に地震検出ができるように、検出閾値の自動設定手法を開発したい。

従来のモデルよりも高精度な Vision Transformer を用いた走時読み取りモデルの開発を行った。深層学習を用いた走時読み取りモデルには、入力に単独の地震波が含まれているようなデータであれば高精度で走時読み取りができるが、複数の地震波が含まれている場合では走時の検出能力が落ちるといった問題がある。今後は、この弱点を克服する手法の開発を行いたい。

(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6件、うち海外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
Seismic-phase detection using multiple deep learning models for global and local representations of waveforms（口頭発表）	Tokuda, T., and H. Nagao	28 th IUGG General Assembly	令和5年7月18日	国外	○
Seismic-phase detection using multiple deep learning models for global and local representations of waveforms（口頭発表）	Tokuda, T., and H. Nagao	20 th Annual Meeting AOGS	令和5年8月3日	国外	○
Two-stage approach for transfer learning of seismic-phase detection model to a small sample size data via multiple-clustering-based classification（ポスター発表）	Tokuda, T., and H. Nagao	AGU Fall Meeting 2023	令和5年12月13日	国外	○
地震波形の全体・局所領域に対する複数の深層学習モデルを統合した地震検出手法（ポスター発表）	徳田智磯, 長尾大道	日本地球惑星科学連合2023年大会	令和5年5月21日	国内	○
地震波形の全体・局所領域に対する複数の深層学	徳田智磯, 長尾大道	第37回人工知能学会全国大会	令和5年6月7日	国内	○

習モデルを統合した地震検出手法（口頭発表）					
少量データに適用可能な地震波検出モデルの転移学習：マルチプル・クラスタリングを用いた二段階アプローチ（口頭発表）	徳田智磯, 長尾大道	日本地震学会 2023 年度秋季 大会	令和 5 年 11 月 2 日	国内	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載：計 1 件、うち海外 1 件

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
Seismic-phase detection using multiple deep learning models for global and local representations of waveforms	Tokuda, T., Nagao, H.	Geophysical Journal International , Vol. 235, Issue 2, Pages 1163-1182	令和 5 年 7 月 8 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・微動検測技術を開発する。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	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31	5,831,123 円	1,749,337 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・教授	小原 一成	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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¹⁾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する。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、手法の改良を行う。

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完了する。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する。

(d) 令和5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。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する。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、その結果をデータベース化することにより、経験豊かな地震学者の自然知能に基づく検証を恒常的に実施可能な環境を構築する。さらには自然知能による検証の結果に基づき、深層学習器の改良を行う。

(2) 令和5年度の成果

(a) 業務の要約

深部低周波地震の検出を行うための深層学習モデルを開発した(図10)。深部低周波地震のような微弱な振幅のイベントを検出するためには、単一の観測点で得られた波形からよりも複数観測点で得られた波形から同時に特徴を抽出することが効率的であると考え、複数観測点で得られた地震波形を2次元データとしてモデルに入力している。モデル構造には、入力データの全体的な特徴を効果的に抽出することができる Vision Transformer を採用しており、これにより、複数の観測点から得られる波形情報を基に波動場を学習することが可能となる。このモデルは深部低周波地震を検出だけでなく、入力されたデータが通常地震波形、深部低周波地震の波形、またはノイズのいずれであるかを識別する。つまり、このモデルは、様々な地震データとノイズを区別する能力を持つ。その識別精度は約98%と高く、性能が良いモデルを開発することができた。

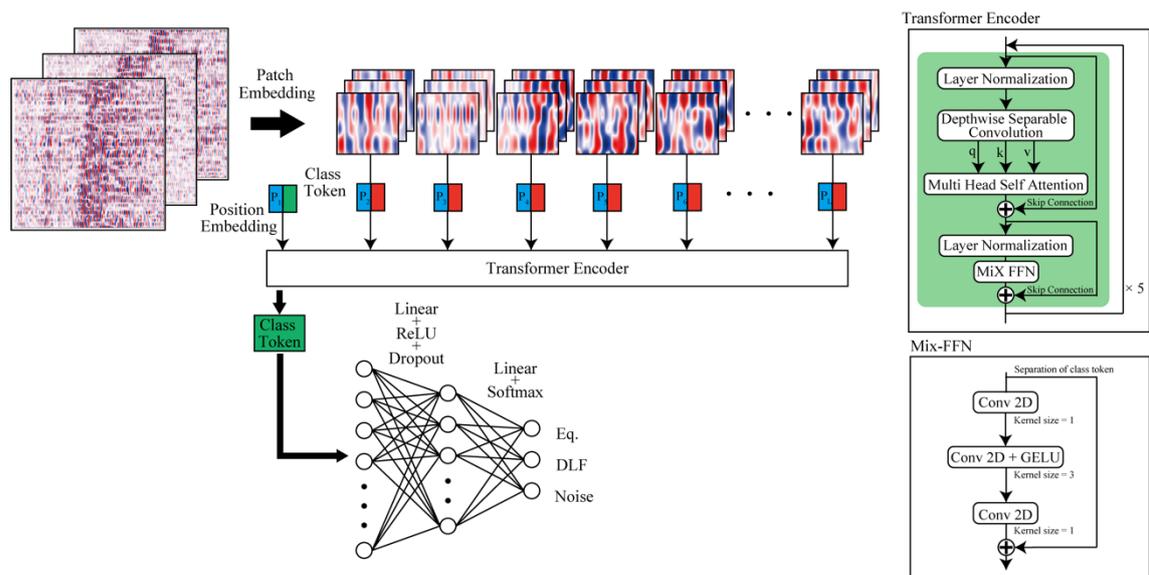


図 10：開発したモデルの全体図

(b) 業務の成果

1) サブテーマ「地震波形画像データの生成」

Hi-net の地震波形信号データならびに 50 年以上前に東京大学地震研究所 和歌山観測所の複数観測点における地震計によって得られた紙記録からの波形画像データ生成を継続した。

2) 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」

Vision Transformer を用いた波動場から深部低周波地震を検出する深層学習モデルを開発した。

(c) 結論ならびに今後の課題

複数観測点で観測された地震波形を用いた二次元データを入力とすることで波動場の特徴を識別し、通常地震波形、深部低周波地震の波形、またはノイズであるかを判断する深層学習モデルを開発した。今回開発したモデルは、入力できる観測点数が固定であるため、今後は入力できる観測点数を可変としたモデルを開発するほか、地震計古記録からの深部低周波微動検出への活用を行いたい。

(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 6 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
深層学習・人工知能の原理に迫る理論の試み	今泉 允聡	日本地震学会 2023 年度秋季	令和 5 年 11 月 2	国内	○

(招待講演、口頭発表)		大会	日		
深層学習を用いた極性判定では時系列データと画像データのどちらが適しているのか？(ポスター発表)	加藤慎也, 飯尾能久, 片尾 浩, 澤田 麻沙代, 富阪 和秀	日本地震学会 2023 年度秋季大会	令和 5 年 11 月 2 日	国内	○
Earthquake cataloging by deep learning using Japan's high-dense observation seismic network (ポスター発表)	加藤慎也	AGU Fall Meeting 2023	令和 5 年 12 月 13 日	国外	○
Detection of deep low-frequency tremors from continuous paper records at a station in southwest Japan about 50 years ago based on convolutional neural network (ポスター発表)	Kaneko, R., H. Nagao, S. Ito, H. Tsuruoka, and K. Obara	日本地球惑星科学連合 2023 年大会	令和 5 年 5 月 21 日	国内	○
残差学習に基づく地震波形紙記録からの低周波微動の検出 (口頭発表)	金子 亮介, 長尾 大道, 伊藤 伸一, 鶴岡 弘, 小原 一成	第 37 回 人工知能学会全国大会	令和 5 年 6 月 6 日	国内	○
Detection of deep low-frequency tremors from continuous paper records at a station in southwest Japan about 50 years ago based on convolutional neural network (口頭発表)	Kaneko, R., H. Nagao, S. Ito, H. Tsuruoka, and K. Obara	28 th IUGG General Assembly	令和 5 年 7 月 18 日	国外	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載：計 1 件、うち海外 1 件

掲載した論文（発表 題目）	発表者氏名	発表した場所 （学会誌・雑誌 等名）	発表した 時期	国内・ 外の別	主た る成 果
Adjoint-based data assimilation for reconstruction of thermal convection in a highly viscous fluid from surface velocity and temperature snapshots	Nakao, A., T. Kuwatani, S. Ito, and H. Nagao	Geophys. J. Int., Vol. 236, Issue 1, Pages 379-394	令和5年 10月20 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. 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。

(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・講師	森川 耕輔	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31	3,082,699 円	924,809 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31	8,770,626 円	2,631,188 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・助教	伊藤 伸一	R5. 4. 1 ～ R6. 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	Mendo Pérez Gerardo Manuel	R5. 4. 1 ～ R6. 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¹⁾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の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の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の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する。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する。

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専門家と検討する。

5) 令和7年度

通常の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する。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することで、微動の統計則を決定する。

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する。

(d) 令和5年度の業務の目的

本震直後の余震分布を推定する際、地震カタログだけでなく地震波というリッチな情報を取り込むことで、地震カタログでは捉えきれない余震の検出率の時間変化を高精度に捉えることができるモデルを構築する。

関数データ解析の考え方を取り入れることで、高速かつ精度の高い低周波地震波動場の推定法を開発する。

これまでに乱択アルゴリズムに基づく大規模地震波動場変分法データ同化法の数学基盤を構築してきたが、令和5年度は実問題への適用へ向けて発生しうる数学的困難を洗い出し解決策を検討する。特に波動方程式の数値安定化に伴うアジョイントモデル求解の計算量・メモリ量が爆発的に増大しうる問題についてアルゴリズム的な解決法を提案し、現実の問題に近い問題設定で検証する。

(2) 令和5年度の成果

(a) 業務の要約

地震カタログで検出された余震データと余震の波形データの情報を統合することで、本震直後における余震の未検出によるバイアスを補正可能な手法を構築した。地震波形データの情報を用いることで、大域的かつ局所的に余震の未検出によるバイアスを補正することが可能となった。

長周期地震動に対する地震波動場再構成問題に対して、基底関数展開に基づく高速な時空間データの平滑化法の開発を行った。提案手法では、直交化した基底関数と積分型 thin plate spline 罰則を用いることで、精度を落とすことなく既存手法よりも1000倍以上高速に地震波動場の再構成を行うことができる。

4次元変分法の大規模地震波データ同化の高効率化を目的として、波動方程式固有の数値構造に着目したアジョイント法の省メモリ化・高速化アルゴリズムを考案した。本アルゴリズムを現実の地下構造を考慮したモデルで検証し、既存の方法に比べて数十倍程度の高速化が観測された。

(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難しい。検出された余震データのみから余震分布を推定すると、欠損値の影響により推定される余震分布に大きなバイアスが生じる。そこで、余震検出確率をモデル化し導入することで、地震カタログで検出された余震データから正しい余震分布の推定を行い、本震直後であったとしても今後発生するであろう余震のマグニチュード別の確率予測が可能となる。

しかし、余震の検出確率は余震が発生するたび時事刻々と変化するため推定は難しく、しばしば事前に分布形を指定しないノンパラメトリックモデルが用いられる。ノンパラメトリックモデルは柔軟なモデリングが可能である一方、未知のハイパーパラメータをデータから推定する必要があり、その推定には計算時間を要する。また、余震の検出確率のモデリングをする際、通常その余震の発生した時刻およびマグニチュードの情報を用いてモデリングされるが、強く関係していると考えられるその時刻における地震波のノイズの大きさの情報は無視されている。そこで、地震カタログだけでなく地震波の情報も利用することで、パラメトリックモデルであるにもかかわらず高速かつ高精度に余震検出確率を推定する手法を構築した。地震波を直接用いることで、地震カタログでは得られない地震波のノイズレベルをモデルに組み込むことができ、精密な地震の検出確率を推定することが可能となる。図11は、2016年の熊本地震に対して提案手法を適用した結果である。緑線は推定された、前震発生後 t (日)経過した時点において確率50%で余震を検出するために必要なマグニチュード $\mu(t)$ である。余震の検出確率のモデルとしてはパラメトリックモデルを用いているため、数秒でパラメータ推定可能である。提案手法を用いることで、大域的かつ局所的な余震の検出確率の変動を短時間で推定可能となった。

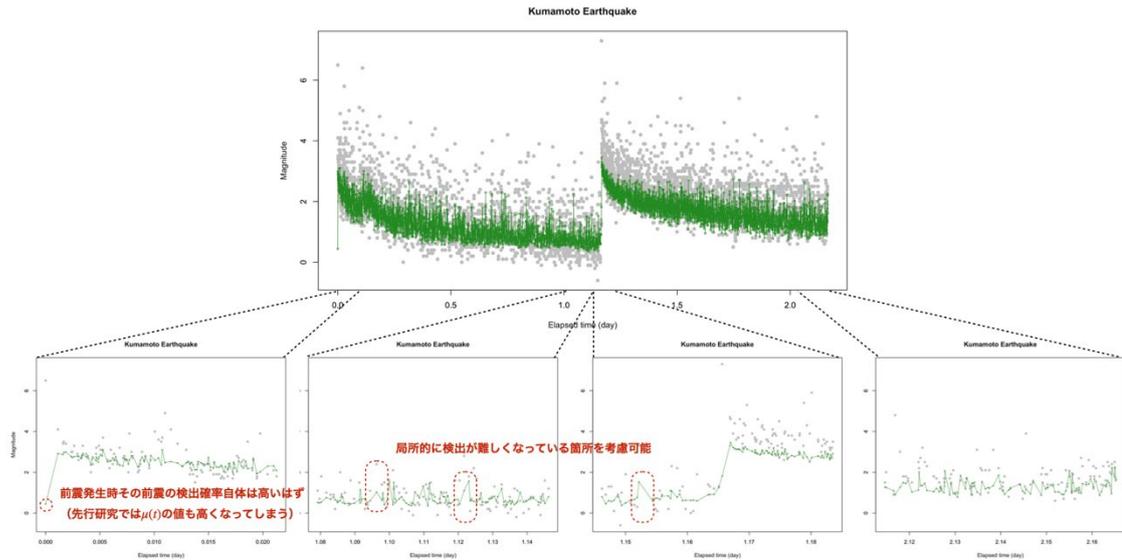


図 1 1 : 熊本地震発生直後における $\mu(t)$ の推定結果。

既存の時空間データの平滑化法には、計算コストが高いという問題があった。例えば、平滑化スプラインなど基底関数展開を用いた平滑化法では、予測精度は高いが、『時間方向の基底数 × 空間方向の基底数』の 3 乗の計算コストを要する。そのため、適切なチューニングパラメータの選択が難しい。本研究では、既存手法の計算コストの問題を解決したシンプルな方法を提案した。具体的には、各観測地点の時系列データを事前に直交化した基底関数により関数化し、適切な罰則項を考えることで、予測精度を落とさず計算コストを『空間方向の基底数』の 3 乗まで減らした平滑化法を提案した。また、提案手法では、交差検証法を高速に実行することが可能な公式を利用できるため、適切なチューニングパラメータの選択と波動場の再構成を即時的に実行することが可能となった。図 1 2 は、平成 26 年 9 月 16 日に茨城県南部で発生した地震に対して、MeSO-net データの低周波成分を用いて地震波動場の再構成を行なった結果である。四角は観測地点 (50 地点)、四角の色は実際の観測値を表現しており、観測データと矛盾なく波動場の再構成が実施できている。また、交差検証法による誤差評価においても、提案手法は物理モデルに基づく方法 (Kano, Nagao et al., 2017; JGR) やクリギング法よりも精度のよい推定ができています。さらに、1 つのコアしか用いない場合でも、チューニングも含めて 30 秒以下で実行できる。同じ計算機環境下では、基底関数展開に基づく既存手法を用いると 10 日程度の時間を要する。

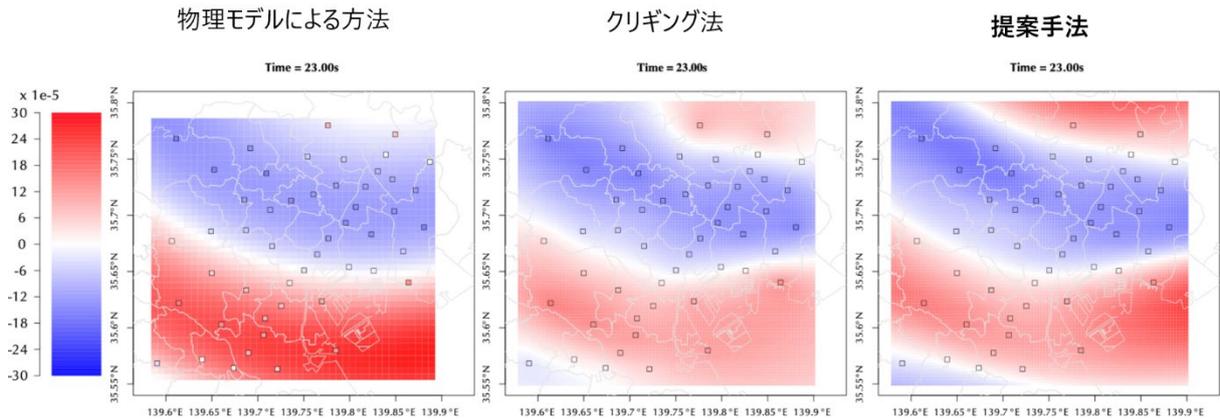


図 1 2 : ある時間の補完結果(Time=23s)。観測地点□の色は、実際の観測値を表している。

2) サブテーマ「微動時空間モデリング技術の開発」

現存する微動カタログ間における低周波微動と比較することで、微動カタログにおける低周波微動の発生頻度に違いがあることがわかった。特に、地震系紙記録から得られた低周波微動と現存する微動カタログに記載された低周波微動に大きな差があった。今後は、これらの差を定量化し、統計的に検定する方法を構築する。

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を省メモリかつ高速に実現するための、波動方程式の数理構造に着目したアジョイント法の求解法を提案した。変分法データ同化は地震波動場の時間発展を計算するフォワードモデルと対を成すアジョイントモデルと呼ばれる方程式群の数値積分結果を用いて事後分布を評価することで高速・高効率な場の推定および不確実性推定を可能にする統計解析手法である。変分法データ同化は波動方程式系を含む任意の自励系時間発展モデルへ適用することが可能であるが、波動方程式系は数値計算の不安定性の回避のために稠密な時空間格子の分解能が要求され、モデル計算 1 回あたりの計算量・メモリ使用量が非常に大きいため既存の変分法データ同化をそのまま利用することは難しいことが指摘されている。本サブテーマではこれまでに乱択法による変分法データ同化法自体の改良を提案しているが、さらに令和 5 年度は、波動方程式特有の数理構造を利用することで、フォワードモデルとアジョイントモデルの計算量および必要メモリ量を大幅に削減する手法を開発した。具体的には、対象の波動方程式に対応するアジョイントモデルが“局所的にほぼ”線形系であることに着目し、元来非線形系では計算量的に利用困難な陰的解法を線形系と同程度の計算量で計算可能なアルゴリズムを開発し適用することで前述の計算不安定性を回避する。これにより時間刻みの縛りから解放され時間刻みを大きくとれるようになったことで大幅な計算量およびメモリ量の削減を実現した。本提案手法を現実の地下構造を考慮し地下方向へ完全吸収境界条件を課した 1 次元モデルへ適用したところ (図 1 3)、既存の手法に比べ数十倍程度の高速化が観測された。

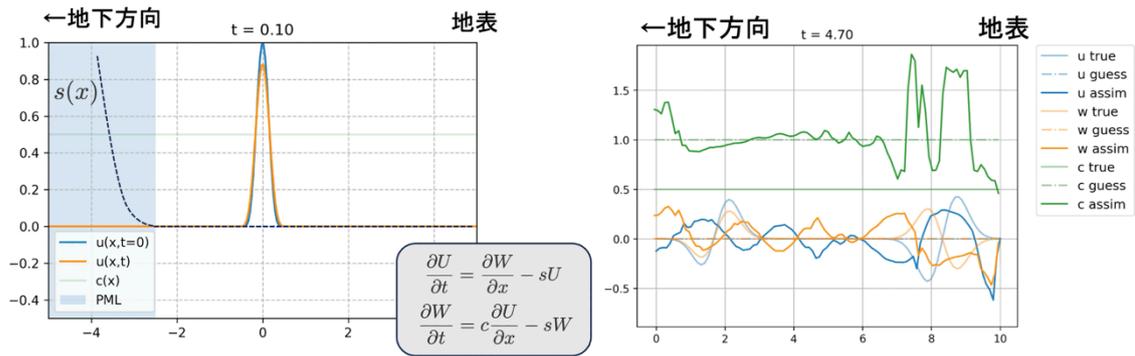


図 1 3 : 完全吸収境界条件を考慮した 1 次元地下構造モデルと本提案手法を適用して得た地下構造推定結果。

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」

効率的なスロー地震テンプレートカタログを作成する新しい手法を開発した。この手法 (You Only Search Once, YOSO) は垂直成分地震波形トレースの二乗平均平方根 (RMS) に基づいて低周波地震検出を行うとともに、その継続時間を同定することができる。この手法によって、様々な継続時間からなるスロー地震テンプレートカタログを作成することが可能となった。YOSO は以下の 3 つのステップからなる。まず、最初に、移動平均 RMS を用いて SN 比の高い信号 (低周波地震) を同定する。次に、移動平均 RMS から得られた減衰曲線の勾配を評価することにより、信号継続時間の最適解を同定する。最後に、同定したイベントに対して、振幅比率、継続時間比率、及び相互相関係数を用いて階層クラスタリングを行い、イベント分類を行う。YOSO のイベント抽出性能を評価するため、人工データ、及び実データへの適用を行った。まず、ブラウン運動モデル (Ide, 2008) を用いて人工波形データを生成し、イベント抽出を行った。その結果、継続時間が 10 秒から 90 秒で、相対的に大きな振幅をもつほとんどのイベントを抽出することができた。次に、Hi-Net 観測点 N. SINH (四国中部) で得られた垂直成分の連続波形に対してバンドパスフィルタをかけた後、YOSO を適用した。その結果、テクトニック微動に関連する継続時間 10 秒から 500 秒の波形を抽出することができた。さらに、得られたクラスタの分離度を評価したところ、イベントを識別するには振幅比率がもっと適していることがわかった。

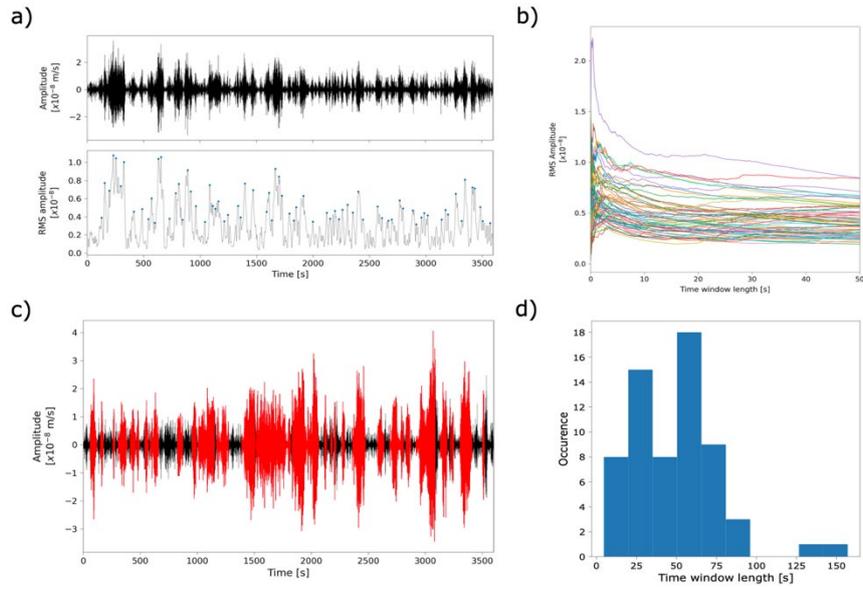


図 1 4 :

- a) 低速地震に対するブラウン・ウォーク・モデル(Ide, 2008)によって作成された合成地震波の図とそれから算出された RMS ピークの図。各青色ドットは検出に対応する。
- b) a で得られた検出値から計算された RMS 減衰曲線。
- c) b の曲線に従って RMS 振幅の減衰によって継続時間が推定される合成地震波から検索された検出値 (赤線)。
- d) 合成地震波から検索されたイベントのヒストグラム。

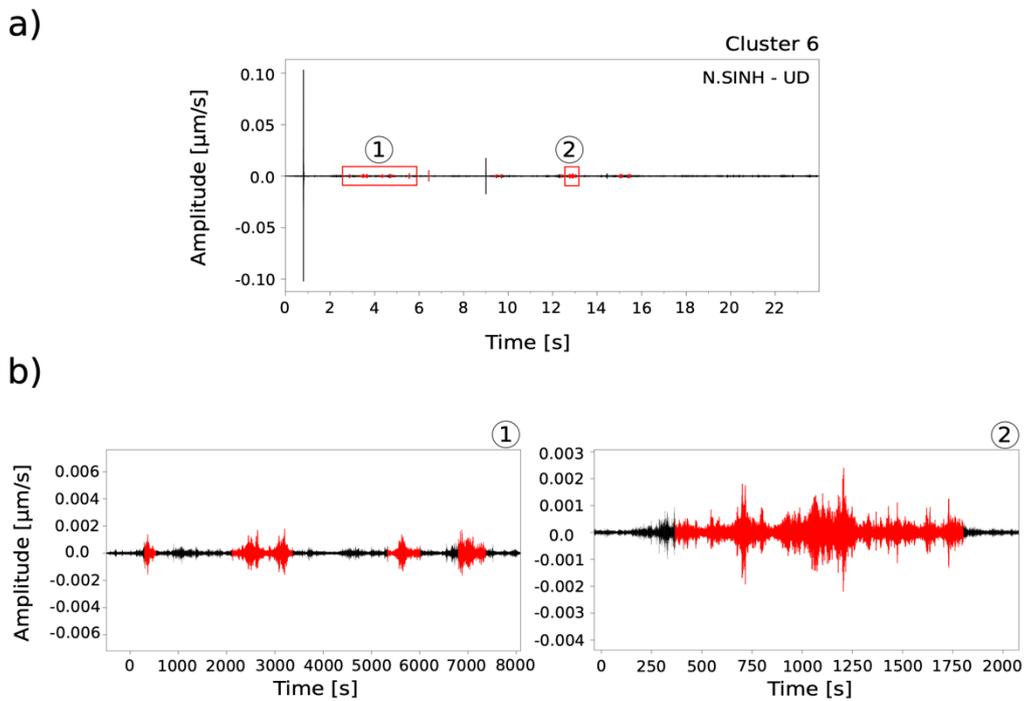


図 1 5 :

- a) Hi-Net 観測点 N. SINH で 2016-01-01 00:00:00 (JST) に記録された上下成分地震波トレースから得られたクラスタ No. 6 の検出例 (赤でハイライト)。

b) a の YOSO 手順による検出イベントの拡大図。右上の数字はトレース内の相対位置を示す。

(c) 結論ならびに今後の課題

長周期地震動の観測データへの適合度合いを考えると、交差検証法による誤差評価を行った結果、提案手法の精度が物理モデルに基づく方法 (Kano, Nagao et al., 2017; JGR) を大幅に上回っている。また、計算コストの観点からも、提案手法に明らかな優位性がある。一方で、高周波も含めた地震波動場の再構成の観点からは、観測データのノイズが大きすぎるため、ノンパラメトリックな提案手法では妥当な再構成を行うことができないという欠点がある。今後は、同一地域の他の地震データを用いて結果の妥当性を検証するとともに、物理モデルも考慮した方法などを検討することで、上述の欠点にも取り組んでいきたい。

波動方程式系特有の数理構造を利用することで、変分法地震波動場データ同化の省メモリ化・高速化アルゴリズムを構築し、地下構造を考慮したモデルへ適用を通じて有用性を確認した。現在は1次のアジョイント法を用いた構造推定に留まっているが、数理構造を利用した本手法は、これまでに提案された2次のアジョイント法を利用する乱択化不確実性評価アルゴリズムへも応用することができると考えており同様に高速化されることが期待される。今後直下型地震P波上下波形データ等への適用を通じ、1次元速度構造の高精度・高速評価を実施していく。

(d) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表 : 計9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
Analysis of the seismo-acoustic signals associated with the explosive activity of Popocatepetl volcano (口頭発表)	Mendo-Perez, G.	日本地球惑星科学連合 2023 年大会	令和 5 年 5 月 21 日	国内	○
Forecasting aftershocks immediately after the large main shock with epidemic-type aftershock detection function (口頭発表)	森川 耕輔, 長尾 大道, 平田 直	日本地球惑星科学連合 2023 年大会	令和 5 年 5 月 21 日	国内	○
Forecasting aftershocks	Morikawa, K., H.	Asia Oceania Geosciences	令和 5 年 8 月 3 日	国外	○

immediately after the large main shock with epidemic-type aftershock detection function (口頭発表)	Nagao, and N. Hirata	Society, The 20th Annual Meeting (AOGS 2023)			
自己励起性のある余震検出確率とその本震直後の b 値の時間変化推定への応用 (口頭発表)	森川 耕輔、長尾 大道、平田 直	日本地震学会 2023 年度秋季大会	令和 5 年 11 月 2 日	国内	○
時空間データに対する高速な平滑化法と地震波動場再構成への応用 (ポスター発表)	寺田 吉壺、松井 秀俊、長尾 大道	日本地震学会 2023 年度秋季大会	令和 5 年 11 月 2 日	国内	○
You Only Search Once: An alternative framework to detect slow earthquakes. (ポスター発表)	Mendo-Perez, G., HIROMICHI NAGAO	日本地震学会 2023 年度秋季大会	令和 5 年 11 月 2 日	国内	○
Semi-automated template matching-based procedure to detect slow earthquakes in western Nankai Trough, Japan (ポスター発表)	Mendo-Perez, G.	AGU Fall Meeting 2023	令和 5 年 12 月 13 日	国外	○
最適輸送理論に基づく地震波形データからのイベント検出とその分類 (ポスター発表)	柳田真輝, 徳田智磯, 加藤慎也, 長尾大道	第 18 回日本統計学会春季集会	令和 6 年 3 月 9 日	国内	○
地震波と地震カタログの統合による本震直後の早期余震活動推定 (ポスター発表)	高原健, 森川耕輔, 長尾大道, 平田直	第 18 回日本統計学会春季集会	令和 6 年 3 月 9 日	国内	○

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

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	R5. 4. 1 ～ R6. 3. 31	3, 575, 000 円	1, 072, 500 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・教授	小原 一成	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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	R5. 4. 1 ～ R6. 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る。

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、カタログを公開する。

(d) 令和5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を整備する。

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に実装する準備研究として、地震波動場再構成の問題に適用することにより、アルゴリズムの妥当性を検証する。

(2) 令和5年度の成果

(a) 業務の要約

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。開発したアルゴリズムは、地震波形スペクトログラムから得られた観測点間の相関行列に対して混合ウィンジャーモデルに基づくマルチプル・クラスタリング手法を適用することにより、観測点選択を行うものである。東北地方に設置された88か所のHi-net観測点から得られた垂直成分波形データに適用したところ、効果的な観測点選択が可能であることがわかった(図16)。さらに、テストデータとして3カ月の連続波形データに適用したところ、これまで地震カタログに記載されていない低周波イベントの候補を同定した。

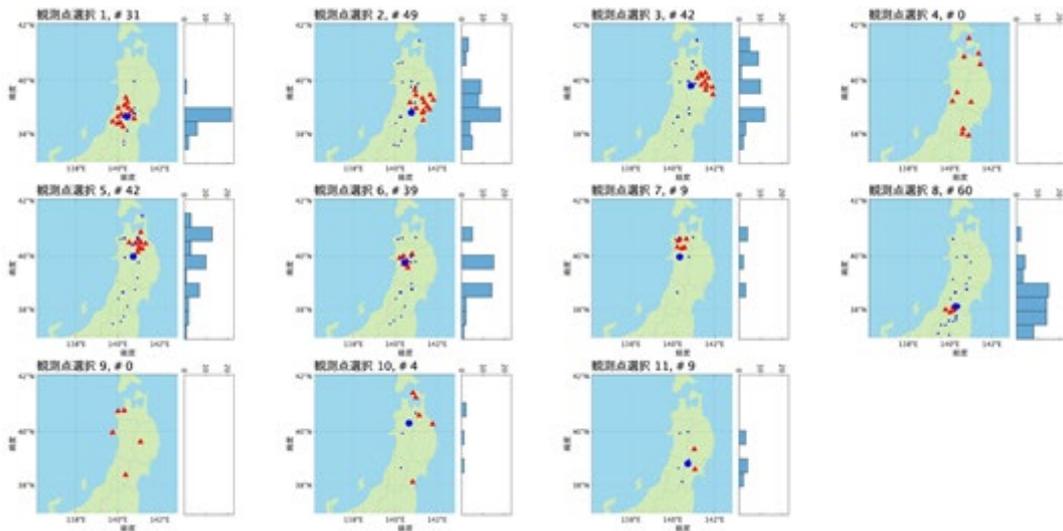


図16：11パターンでの選択された観測点群と低周波地震震央の位置。赤三角は観測点、青点は震央を示す。それぞれのパネルに付随するヒストグラムは震央の緯度分布を表

す。観測点位置と震央位置に対応関係があることがわかる。

(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」

深層学習モデルによって地震計古記録から検出された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検証可能な環境を整備した。

2) サブテーマ「観測点選択アルゴリズムの開発」

マルチプル・クラスタリング手法に基づく効果的な観測点選択アルゴリズムを開発し、Python で実装を行った。なお、本研究の内容は学会誌「応用統計学」の特集号「機械学習とその応用」に掲載され、応用統計学会の令和6年度優秀論文賞受賞が決定した。

(c) 結論ならびに今後の課題

本研究では、イベント・クラスタ解を最適化するアプローチによって、地震・微動検出のための観測点選択を行う手法を開発した。今後は、経験豊かな研究者の目によって地震・微動検出結果を検証し、データ前処理の最適化、波形3成分への拡張等により手法の改善を行っていきたい。

(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4件、うち海外計0件

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
混合ウィシャートモデルに基づくマルチプル・クラスタリングによる低周波地震検出のための観測点選択（口頭発表）	徳田智磯, 長尾大道	2023年度統計関連学会連合大会	令和5年9月6日	国内	○
プロセス駆動型地震波動場再構成に向けた物理モデルパラメータ推定のための観測点選択（口頭発表）	中井 公美, 永田 貴之, 山田 圭吾, 齋藤 勇士, 野々村 拓, 加納 将行, 伊藤 伸一, 長尾大道	日本地球惑星科学連合 2023年大会	令和5年5月21日	国内	○
人工知能による地震研究の新展開（招待講演、口頭発表）	長尾 大道	第37回人工知能学会全国大会	令和5年6月8日	国内	○
4次元変分法データ同化の理論深化と応用展開（招待講演、口頭発表）	長尾 大道	第50回ものづくり企業に役立つ応用数理手法の研究会	令和5年6月20日	国内	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計2件、うち海外計1件

掲載した論文（発表 題目）	発表者氏名	発表した場所 （学会誌・雑誌 等名）	発表した 時期	国内・ 外の別	主たる 成果
混合ウィシャートモデルに基づくマルチプル・クラスタリングによる低周波地震検出のための観測点選択	徳田智磯, 長尾大道	応用統計学, 特集号「機械学習とその応用」 （オーガナイザー:長尾大道）, Vol.52 No.2, Pages 99-112	令和6年 2月17日	国内	○
Observation Site Selection for Physical Model Parameter Estimation toward Process-Driven Seismic Wavefield Reconstruction	Nakai, K., T. Nagata, K. Yamada, Y. Saito, T. Nonomura, M. Kano, S. Ito, and H. Nagao	Geophys. J. Int., Vol. 234, Issue 3, Pages 1786- 1805	令和5年 4月18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5年度は、本研究課題に従事する研究員3名のうち、令和4年度末に雇用した2名の研究テーマを設定することからスタートした。本研究課題の目的に照らし合わせ、各研究員がどのような研究テーマを実施するかについて、プロジェクト会議において議論を行なった。令和6年度以降、目的達成に向けて本研究課題はますます加速することが期待される。また、令和5年度も定例会を毎月開催し、本研究課題の進捗状況の確認ならびにそれに基づく個別研究の方針の見直しを絶え間なく行った。また、本研究課題で使用する計算機環境の増強や、本研究課題を国内外に周知するための広報媒体としてニュースレター Vol.2 の制作と公開を行なった。さらには、前年度に引き続き、令和5年度も STAR-E プロジェクト勉強会を全研究課題合同で開催し、また人工知能学会全国大会に全研究課題代表者連名で関連セッションを継続提案するなど、研究課題間の連携を深めることにも努めた。令和5年度の特筆すべき活動として、本格的な国際連携を開始したことが挙げられる。研究代表者、研究員3名、技術補佐員（大学院生）1名が「情報×地震」において世界最先端の研究を実施しているカリフォルニア工科大学を訪問し、Generalized Phase Detection (GPD)法に代表される多数の地震AI技術を開発してきた Zachary E. Ross 博士のグループをはじめとする同大学のメンバーと交流を行なった。令和6年1月には、東京大学地震研究所と同大学との間で、今後の人的交流促進を目的とする国際交流協定を締結するに至った。令和6年4月には、Ross 博士のグループが東京大学地震研究所を訪問予定となっている。

各研究課題においてさまざまな研究成果が得られた。人工知能に基づく地震波形信号データ解析技術の研究項目では、令和4年度に開発した畳み込みニューラルネットワークに基づく地震検出手法について、少量の学習データに基づく効果的な転移学習法を考案した。また、Vision Transformer を階層的に用いた地震波走時読み取りモデルを開発した。次に、人工知能に基づく地震波形画像データ解析技術の研究項目では、深部低周波微動の検出を行うための Vision Transformer に基づく深層学習モデルの開発を行なった。そして、自然知能に基づく地震波形信号データ解析技術の研究項目では、本震直後における余震分布推定手法、および大規模変分法地震波動場データ同化法の高度化を継続実施したことに加え、新たに低周波地震のテンプレートカタログ生成手法および高速な地震波動場再構成法の開発を開始した。さらには、マルチプル・クラスタリング手法に基づく地震・微動検出のための観測点選択アルゴリズムを開発した。

特に、令和4年度初頭に採用した研究員と研究代表者が共同開発した観測点選択アルゴリズムについては、学会誌「応用統計学」に掲載された論文が令和6年度の応用統計学会優秀論文賞を受賞することが決定している。当該の研究員はその活躍が認められ、令和6年2月1日付で東京大学地震研究所特任助教に採用された。また令和4年度末に雇用した研究員が早くもトップジャーナルに論文を投稿するなど、いずれも予想通りもしくはそれを超える成果が得られており、令和5年度の研究計画は十分に完遂したものとする。

今後は、十分な経験と力量をもつ研究員が本格的に研究を推進し、また令和5年度にも強化を行なった GPU 計算機をフル活用することにより、波形信号データおよび波形画像データからの地震・微動検出アルゴリズムを中心に手法開発を加速させると同時に、実際の地震データへの適用ならびに人工知能と自然知能の対話・協働を通じた手法高度化を図

っていく。また、特に「情報×地震」分野において世界をリードしている米国との国際連携を促進することにより、わが国における同分野の隆盛を国際的にアピールしていく。さらには、本研究課題によって得られた研究成果や動向を SYNTHA-Seis ホームページやニュースレターを通じて国民に発信し、若い学生への講義などのアウトリーチ活動を継続することにより、将来の「情報×地震」分野の発展に貢献していく。

4. 活動報告

- SYNTHA-Seis 関連会議
 - ✓ SYNTHA-Seis 定例会、令和5年5月16日、7月26日、9月20日、10月16日、10月25日、11月22日、12月20日、令和6年1月15日、3月7日、ハイブリッド
 - ✓ SYNTHA-Seis プロジェクト会議、令和5年3月23日、ハイブリッド
 - ✓ SYNTHA-Seis 運営委員会、令和6年3月6日、ハイブリッド

- STAR-E プロジェクト関連会議
 - ✓ STAR-E 勉強会、令和5年4月10日、6月13日、8月8日、10月10日、令和6年2月7日、ハイブリッド
 - ✓ STAR-E プロジェクト 第三回研究フォーラム、令和5年12月22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「最先端ベイズ統計学が拓く地震ビッグデータ解析」、令和5年5月21日、ハイブリッド
 - ✓ 第37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5年6月6日、ハイブリッド
 - ✓ Asia Oceania Geoscience Society 「Data-Driven Modeling in Geosciences」、令和5年8月3日、シンガポール
 - ✓ 統計関連学会連合大会「地震ビッグデータ解析の最前線」、令和5年9月6日、京都
 - ✓ 日本地震学会秋季大会「ベイズ統計学による地震データ解析とモデリングの深化」、令和5年11月2日、横浜

- メディア掲載
 - ✓ 日本経済新聞サイエンス・フロンティア面、令和5年8月18日朝刊
 - ✓ NHK「漫画家イエナガの複雑社会を超定義」、令和5年9月1日
 - ✓ 毎日新聞「科学の森」、令和5年9月21日朝刊

- 受賞
 - ✓ 徳田 智磯・長尾 大道、応用統計学会優秀論文賞、令和6年5月9日
 - ✓ 小原 一成、恩賜賞・日本学士院賞、令和6年3月12日
 - ✓ 今泉 允聡、科学技術分野の文部科学大臣表彰 若手科学者賞、令和5年4月7日

- アウトリーチ活動
 - ✓ SYNTHA-Seis ニュースレター Vol.2、令和6年3月
 - ✓ 地震研サマースクール、地震研スプリングスクール、令和5年8月、令和6年3月

- ✓ 「東大の研究室をのぞいてみよう！プログラム」、令和6年3月25日、高校生50名への講義
- ✓ 東京大学地震研究所一般公開 公開講義、令和5年8月2日

5. むすび

本研究課題の開始から早くも3年が経過した。令和4年度初頭に採用した研究員1名、令和4年度末に採用した研究員2名と技術補佐員1名、および令和5年度より採用した学術専門職員1名による極めて充実した体制となり、令和5年度は各研究項目を加速的に推進することができた。全研究課題によるSTAR-E勉強会も継続実施され、STAR-Eプロジェクト内の交流が一段と進んだように思われる。また、令和5年度は「情報×地震」分野発祥の地であるカリフォルニア工科大学と国際交流協定を締結し、同分野における本格的な人的交流および国際連携を開始することができた。令和5年12月には本研究課題から5名が同大学を訪問したが、極めて優秀な教員・研究員・大学院生たちがコーヒーを飲みながら至る所で自由に議論する光景に、大きな感銘を受けた。特に、由緒ある同大学のBenioffルームにおいて、わが国における「情報×地震」分野に関する講演をさせて頂いたことは、大変な栄誉であった。国際交流協定に基づき、今後は本研究課題の研究員を同大学に順次留学させる予定となっており、「情報×地震」分野を中心に日米の国際連携をますます強化していきたい。

そのためにも、本研究課題において開発すべき人工知能技術を自然知能の協働に基づき確立し、それらを地震・微動自動検出から自動モデリングに至るまで連動実行するシステムに実装するという将来構想に向けて、着実に歩みを進める必要がある。前項までに述べたように、令和5年度は各研究項目において加速的に進捗したと考えている。今後は、特に令和4年度末に採用した研究員の論文出版を促進し、また国際共同研究を推進することにより、本研究課題の推進を加速させたい。

なお、本研究課題の遂行にあたっては、STAR-Eプロジェクトの他研究課題の課題代表者をはじめとする参画者の皆様、ならびに関係機関の皆様には多大なご協力を頂いた。また、国立研究開発法人防災科学技術研究所が維持・管理を行なっている首都圏地震観測網MeSO-net および高感度地震観測網Hi-netの地震波形データや、気象庁の地震カタログを使用させて頂いた。この場を借りて御礼申し上げる。

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
Detection of deep low-frequency tremors from continuous paper records at a station in southwest Japan about 50 years ago based on convolutional neural network（ポスター発表）	Kaneko, R., H. Nagao, S. Ito, H. Tsuruoka, and K. Obara	日本地球惑星科学連 合2023年大会	令和5年5月21 日	国内
Analysis of the seismo-acoustic signals associated with the explosive activity of Popocatepetl volcano（口頭発表）	Mendo-Perez, G.	日本地球惑星科学連 合2023年大会	令和5年5月21 日	国内
プロセス駆動型地震波動場再構成に向けた物理モデルパラメタ推定のための観測点選択（口頭発表）	中井 公美, 永田 貴之, 山田 圭吾, 齋藤 勇士, 野々村 拓, 加納 将行, 伊藤 伸一, 長尾 大道	日本地球惑星科学連 合2023年大会	令和5年5月21 日	国内
地震波形の全体・局所領域に対する複数の深層学習モデルを統合した地震検出手法（ポスター発表）	徳田 智磯, 長尾 大道	日本地球惑星科学連 合2023年大会	令和5年5月21 日	国内
Forecasting aftershocks immediately after the large main shock with epidemic-type aftershock detection function（口頭発表）	森川 耕輔, 長尾 大道, 平田 直	日本地球惑星科学連 合2023年大会	令和5年5月21 日	国内
地震波形の全体・局所領域に対する複数の深層学習モデルを統合した地震検出手法（口頭発表）	徳田 智磯, 長尾 大道	第37回 人工知能学会 全国大会	令和5年6月7 日	国内
残差学習に基づく地震波形紙記録からの低周波微動の検出（口頭発表）	金子 亮介, 長尾 大道, 伊藤 伸一, 鶴岡 弘, 小 原 一成	第37回 人工知能学会 全国大会	令和5年6月6 日	国内

人工知能による地震研究の新展開（招待講演、口頭発表）	長尾 大道	第37回 人工知能学会全国大会	令和5年6月8日	国内
4次元変分法データ同化の理論深化と応用展開（招待講演、口頭発表）	長尾 大道	第50回 ものづくり企業に役立つ応用数理手法の研究会	令和5年6月20日	国内
Seismic-phase detection using multiple deep learning models for global and local representations of waveforms The International Union of Geodesy and Geophysics（口頭発表）	Tokuda, T., and H. Nagao	28th IUGG General Assembly	令和5年7月18日	国外
Detection of deep low-frequency tremors from continuous paper records at a station in southwest Japan about 50 years ago based on convolutional neural network（口頭発表）	Kaneko, R., H. Nagao, S. Ito, H. Tsuruoka, and K. Obara	28th IUGG General Assembly	令和5年7月18日	国外
Forecasting aftershocks immediately after the large main shock with epidemic-type aftershock detection function（口頭発表）	Morikawa, K., H. Nagao, and N. Hirata	Asia Oceania Geosciences Society, The 20th Annual Meeting (AOGS 2023)	令和5年8月3日	国外
Seismic-phase detection using multiple deep learning models for global and local representations of waveforms（口頭発表）	Tokuda, T., and H. Nagao	Asia Oceania Geosciences Society, The 20th Annual Meeting (AOGS 2023)	令和5年8月3日	国外
混合ウィシャートモデルに基づくマルチプル・クラスタリングによる低周波地震検出のための観測点選択（口頭発表）	徳田 智磯, 長尾 大道	2023年度 統計関連学会連合大会	令和5年9月6日	国内
深層学習・人工知能の原理に迫る理論の試み（招待講演、口頭発表）	今泉 允聡	日本地震学会2023年度秋季大会	令和5年11月2日	国内
少量データに適用可能な地震波検出モデルの転移学習：マルチプル・クラスタリングを用いた二段階アプローチ（口頭発表）	徳田 智磯, 長尾 大道	日本地震学会2023年度秋季大会	令和5年11月2日	国内

自己励起性のある余震検出確率とその本震直後のb値の時間変化推定への応用（口頭発表）	森川 耕輔、 長尾 大道、 平田 直	日本地震学会2023年度秋季大会	令和5年11月2日	国内
時空間データに対する高速な平滑化法と地震波動場再構成への応用（ポスター発表）	寺田 吉壺、 松井 秀俊、 長尾 大道	日本地震学会2023年度秋季大会	令和5年11月2日	国内
You Only Search Once: An alternative framework to detect slow earthquakes.（ポスター発表）	Mendo-Perez, G., HIROMICHI NAGAO	日本地震学会2023年度秋季大会	令和5年11月2日	国内
深層学習を用いた極性判定では時系列データと画像データのどちらが適しているのか？（ポスター発表）	加藤慎也、飯尾 能久、片尾 浩、澤田 麻沙代、富阪 和秀	日本地震学会2023年度秋季大会	令和5年11月2日	国内
Two-stage approach for transfer learning of seismic-phase detection model to a small sample size data via multiple-clustering-based classification（ポスター発表）	Tokuda, T., and H. Nagao	AGU Fall Meeting 2023	令和5年12月13日	国外
Semi-automated template matching-based procedure to detect slow earthquakes in western Nankai Trough, Japan（ポスター発表）	Mendo-Perez, G.	AGU Fall Meeting 2023	令和5年12月13日	国外
Earthquake cataloging by deep learning using Japan's high-dense observation seismic network（ポスター発表）	加藤慎也	AGU Fall Meeting 2023	令和5年12月13日	国外
最適輸送理論に基づく地震波形データからのイベント検出とその分類（ポスター発表）	柳田真輝、徳田智磯、加藤慎也、長尾大道	第18回日本統計学会春季集会	令和6年3月9日	国内
地震波と地震カタログの統合による本震直後の早期余震活動推定（ポスター発表）	高原健、森川耕輔、長尾大道、平田直	第18回日本統計学会春季集会	令和6年3月9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
--------------	-------	------------------	--------	--------

Observation Site Selection for Physical Model Parameter Estimation toward Process-Driven Seismic Wavefield Reconstruction	Nakai, K., T. Nagata, K. Yamada, Y. Saito, T. Nonomura, M. Kano, S. Ito, and H. Nagao	Geophys. J. Int., Vol. 234, Issue 3, Pages 1786-1805	令和5年4月18日	国外
Seismic-phase detection using multiple deep learning models for global and local representations of waveforms	Tokuda, T and H. Nagao	Geophys. J. Int., Vol. 235, Issue 2, Pages 1163-1182	令和5年7月8日	国外
Adjoint-based data assimilation for reconstruction of thermal convection in a highly viscous fluid from surface velocity and temperature snapshots	Nakao, A., T. Kuwatani, S. Ito, and H. Nagao	Geophys. J. Int., Vol. 236, Issue 1, Pages 379-394	令和5年10月20日	国外
混合ウィシャートモデルに基づくマルチプル・クラスタリングによる低周波地震検出のための観測点選択	徳田智磯, 長尾大道	応用統計学, 特集号「機械学習とその応用」(オーガナイザー:長尾大道), Vol. 52 No. 2, Pages 99-112	令和6年2月17日	国内

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