

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4年度  
成果報告書

令和5年5月  
文部科学省研究開発局  
国立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4年度「情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト（STAR-Eプロジェクト）「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

高感度地震観測網 Hi-net をはじめとする空間的に稠密な地震観測網の構築により、2002 年にスロー地震の一種である「低周波微動」が西南日本で発見された。微動は通常の地震よりもはるかに振幅が小さく、継続時間が数時間以上に及ぶこともあるのが特徴で、西南日本ではプレート境界型大地震よりもやや深いあるいはやや浅い領域で月に数回程度発生しており、これらの大地震とも関連していることが予想されている。これまでの微動の発生時刻や震源位置をリスト化した「微動カタログ」が公開されているが、地震観測網が充実した 2001 年以降のものしか存在していない。南海トラフのプレート境界型大地震がおよそ 100~200 年周期で発生していることを考えると、現代の地震観測網が構築される以前の微動カタログを作成することが極めて重要であることは明白である。

そこで本研究では、人工知能を利用して、約 50 年前に稼働していた東京大学地震研究所 和歌山観測所の大量の地震計古記録からの微動の検出を行った (図 1)。当時の地震計はドラムに巻かれた紙にペンで 1 日分の波形を直接描いており、近年、その画像化とデータベース化が進められている。残差学習構造を用いた畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を採用し、古記録を模した人工的な波形画像データおよび現代の Hi-net のデジタルデータから生成した 5 万枚以上の波形画像データを CNN に学習させた。

学習済みの CNN を和歌山観測所 熊野観測点 (三重県) で得られた 1966 年から 1977 年の古記録に適用したところ、これまでに知られていなかった当時の微動を多数発見することに成功した。一方で、ペンの太さの時間変化などが微動検出の障壁になる場合があることも判明した。今後は、最新鋭の GPU 計算機を利用し、さらに大量のデータを CNN に学習させることにより、本研究で開発した人工知能技術を強化していく予定である。

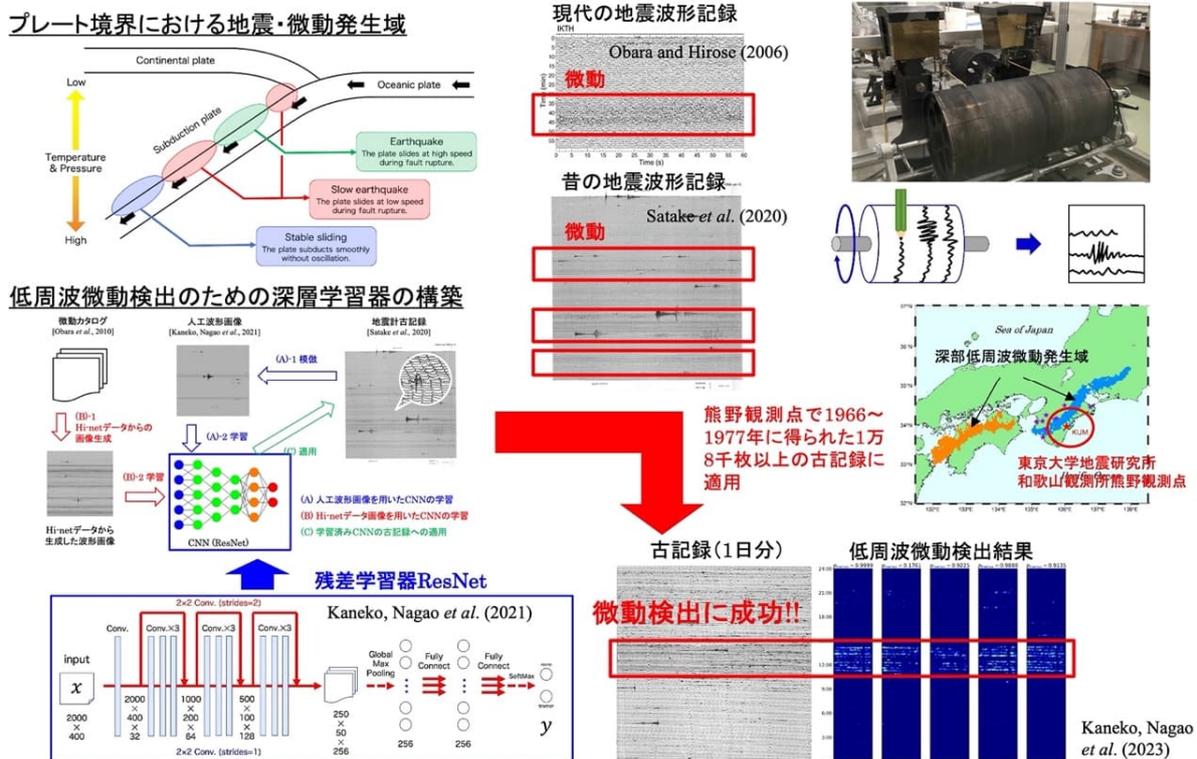
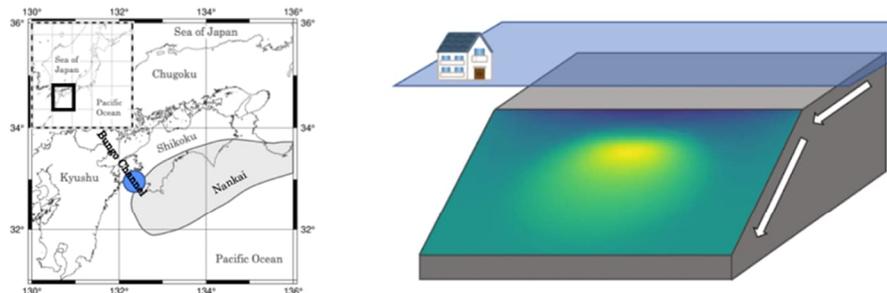


図 1 : 人工知能に基づく地震計古記録からの低周波微動検出の概略。

地震は断層がすべることで発生するが、その運動形態は断層面内に発生する摩擦力の空間分布に依存する。取得可能な限られた観測データを使って、「現実に観測されている運動が実現されるには摩擦力の空間分布はどうあるべきか」を推定し、さらに、その不確実性の空間分布を評価することで、「主要な運動に寄与している場所はどこか」を推定する必要がある。これらを達成するために地震のシミュレーションモデルとベイズ統計学を合わせたデータ同化などの手法が近年利用されつつあるが、地震のモデルは一般に規模が大きく、既存のデータ同化法では「次元の呪い」により計算が大規模化し推定が困難になるという問題があった。この計算量的な困難さは推定したい空間分布の解像度を制限してしまうので、本来あるべき空間分布の詳細な構造およびその不確実性の評価を達成するための新しい手法の開発が求められる。

本研究では、近年提案された数値解析の知見に基づいた新しいデータ同化手法を豊後水道沖のスロースリップ発生帯を模擬した地震モデルへ適用し、摩擦力空間分布の不確実性を高解像・高精度に評価する手法を開発した（図2）。これにより、解像度を制限することなく不確実性の詳細な構造を現実的な計算量で評価できるようになった。本研究成果は、地震運動の物理的理解への一助となるだけでなく、推定される詳細な不確実性の構造と運動の比較に基づいた効率的なデータ取得の指針へのフィードバックなど、実用的な問題への貢献も期待される。

### 豊後水道スロースリップ発生域を模擬した地震モデル



### 摩擦力パラメータ空間分布の不確実性

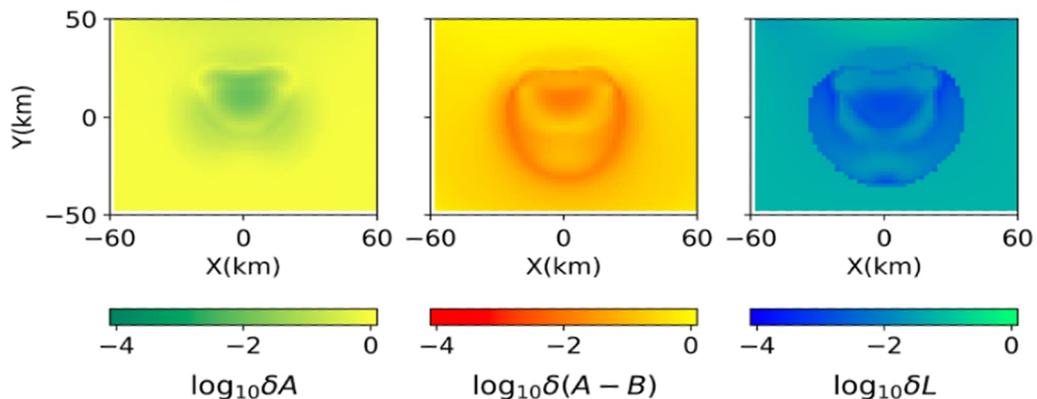


図2：(上)本研究で用いた豊後水道スロースリップ発生域を模擬した地震モデル。  
(下)本提案手法で推定された摩擦力パラメータ不確実性の空間分布。

## 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

<b>1. 研究課題の概要</b>	<b>1</b>
1.1 研究概要の説明	1
<b>2. 研究成果の説明</b>	<b>2</b>
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4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4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	14
(1) 業務の内容	14
(2) 令和4年度の成果	15
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	21
(1) 業務の内容	21
(2) 令和4年度の成果	23
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	28
(1) 業務の内容	28
(2) 令和4年度の成果	29
<b>3. まとめ</b>	<b>34</b>
<b>4. 活動報告</b>	<b>36</b>
<b>5. むすび</b>	<b>37</b>

## 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、本研究課題参加者が出席し、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を開催する。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	R4.4.1 ～ R5.3.31	2,897,960 円	869,388 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・教授	小原 一成	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・特任研究員	徳田 智磯	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R5.2.1 ～ R5.3.31	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	R5.3.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	1,473,398 円	442,019 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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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う。

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4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必要となる本研究課題に従事する複数名の研究員を令和4年度中に雇用し、また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、特に人工知能技術を開発すべき地震研究テーマの絞り込みと具体化を図りながら本研究課題を推進する。本研究課題で推進すべき研究テーマを決定次第、令和3年度に導入したGPU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4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、13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名を雇用した。それに伴い、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)計算機の増強が必須となったため、新たなGPU計算機の仕様を策定し、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とプロモーションビデオの公開を開始した。さらには、全国紙2誌に本研究課題に関する記事が掲載され、高校生20名に対して「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。令和4年度から開始となったSTAR-Eプロジェクトの全研究課題による計10回の合同勉強会に参加し、特に第1回と第6回においてはホストとして話題提供を行った。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4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。

研究成果として具体的には、カリフォルニア工科大学の研究グループが開発した深層学習器を拡張し、地震波形の局所情報を取り入れたモデルに深化させた。また、人工知能による波形画像データからの地震・微動検出技術として、50年以上前の機械式地震計によって得られた地震波形紙記録から、当時発生した低周波微動を網羅的に検出するための畳み込みニューラルネットワークを開発し、国際誌等にて発表した。また、令和3年度に提案したガウス過程回帰を用いた本震直後における余震分布推定手法の高速化に対する理論保証を与え、さらに“自己励起性”を持つ余震検出確率の新たなパラメトリックモデルを提案した。また、大規模変分法データ同化法に基づく不確実性評価アルゴリズムの乱択

化による高速化法を考案、簡単な速度構造推定問題へ適用し、既存アルゴリズムに対して精度を保ったまま 10 倍以上の高速化を実現した。

## (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、特に令和4年度中に採用した本研究課題に従事する研究員3名にどのような研究を実施してもら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の令和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設置した Slack ワークスペースの有料契約を締結し、本格的な稼働を開始した。

### 2) サブテーマ「人工知能技術開発のための研究環境整備」

研究員雇用の開始に伴い、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、NVIDIA 社 Ampere A100 40GB GPU を3台搭載した Graphic Processing Unit (GPU) 計算機を調達し、地震波形画像データから深部低周波微動を検出する深層学習プログラムの試行により、その性能評価を行った。

### 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5年3月23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13回（令和4年5月17日、7月27日、8月31日、9月28日、10月19日、11月16日、12月21日、12月23日、令和5年1月25日、2月2日、2月9日、2月22日、3月22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.1 を制作した（図3）。また、研究代表者の挨拶ならびに若手研究者たちによる座談会の模様をまとめたプロモーションビデオとしてまとめ、本研究課題のホームページ上で公開した（図4）。さらには、令和5年3月27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20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 (左 : 表紙、右 : 若手研究者座談会)



図 4 : プロモーションビデオ (左 : 研究代表者挨拶、右 : 若手研究者座談会)



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4年度は主に(i)本研究課題に従事する研究員3名の雇用、ならびに本研究課題の5か年全体の研究計画に照らし合わせた令和4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計算機上での実際のデータ解析手法の開発ならびに地震データへの適用や、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、2.5で述べるように、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、2.4で述べる、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	R4.4.1 ～ R5.3.31	13,056,737 円	3,917,021 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・教授	小原 一成	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	0 円	0 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・特任研究員	徳田 智磯	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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・実装するとともに、微動検測のための深層学習器の開発を行う。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、及び日本の地震波形データ等を用いる。さらに、実データに適用し、検出モデルの改良をおこなう。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への転移学習アルゴリズムの実装、ならびに微動検測のための深層学習器のプロトタイプの開発を完了し、地震波形信号データへの適用を開始する。その結果に基づき、深層学習器の改良を行う。

また、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への転移学習の実装を開始する。

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4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・微動検測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。

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、手法の改善を図る。

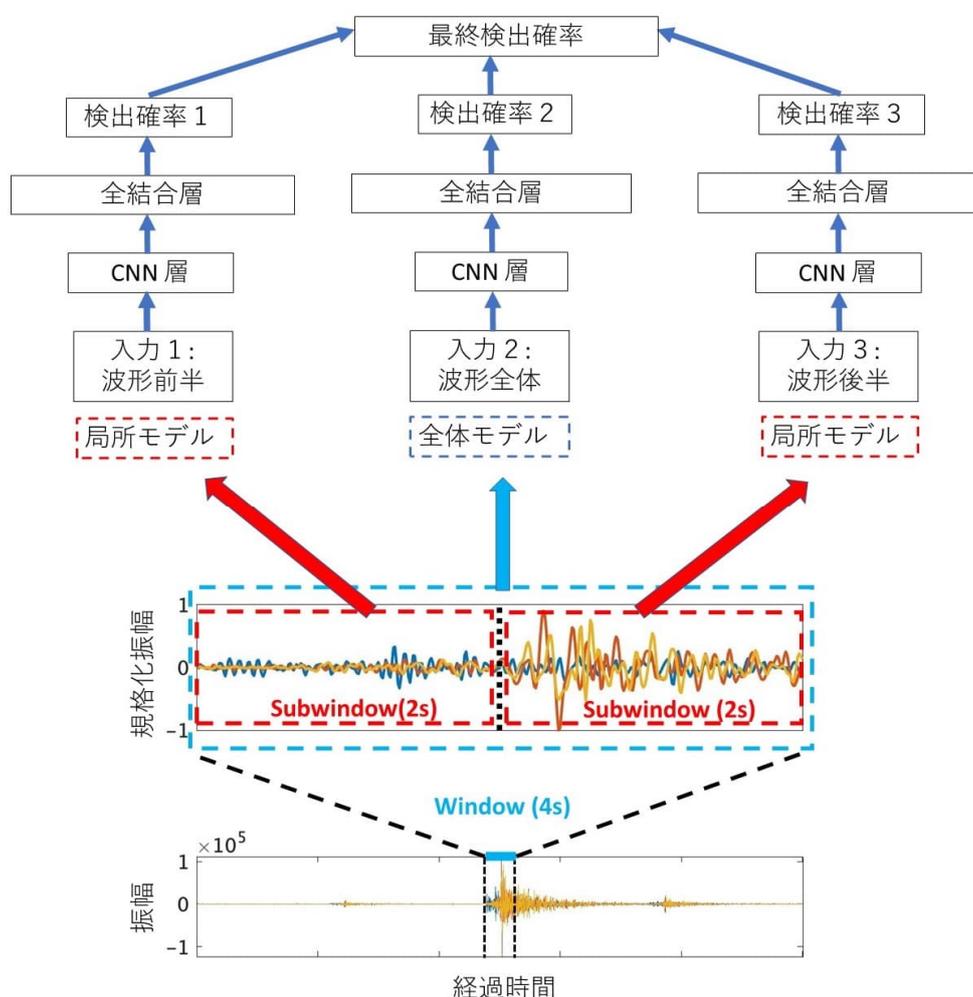


図6：提案モデルのアーキテクチャ。南北、東西、上下3成分4秒波形全体を用いた全体モデル、及び前半2秒、後半2秒波形を用いた局所モデルを構築し、各モデルの検出確率の積を最終検出確率とする。

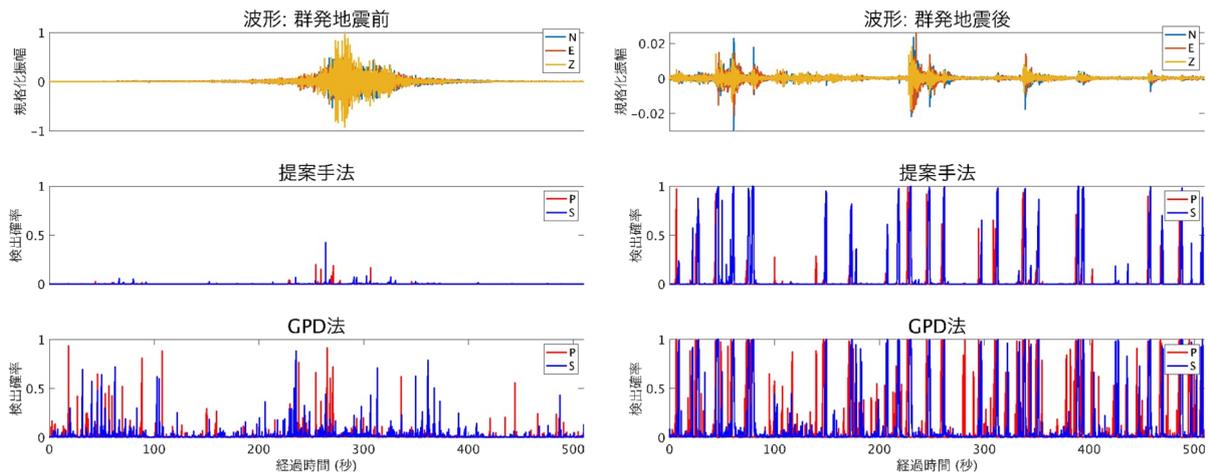


図7：提案手法とGPD法の地震検出結果例。群発地震（2016 Bombay Beach swarm）前後の波形データに適用した。左列は群発地震開始前、右列は開始後の波形と検出結果。波形は南北（N）、東西（E）、上下（Z）方向成分を重ね合わせ、検出確率を0.1秒ごとに表示した（赤：P-相、青：S-相）。

## (2) 令和4年度の成果

### (a) 業務の要約

米国・カリフォルニア工科大学の研究グループが開発した深層学習器 Generalized Phase Detection (GPD)法を拡張し、波形の局所情報を取り入れた新たな検出モデルを開発・実装した（図6）。米国・カリフォルニア州で計測された波形データを用いてモデルを構築し、カリフォルニアで発生した群発地震に適用した。その結果、GPDよりもロバストに地震を検出できることがわかった（図7）。次に、構築したモデルを用いて、首都圏地震観測網（MeS0-net）で得られたデータに対し転移学習の試行を行った。具体的には、誤検出された MeS0-net の波形信号データを用いて転移学習によるモデルの再学習をおこなったところ、誤検出が大きく低下することが確認された。さらに、微動検出の試行として、ブラウン運動モデルから生成した低周波地震波形を学習データに付加することにより、提案モデルが微動検出にも適応可能であることがわかった。また、複数観測点からの地震波検出が可能な畳み込みニューラルネットワークについて、既存の地震波形データ処理システムへの実装を開始した。

さらには、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への転移学習の適用による、様々な地域における地下構造推定のための深層学習器の構築について、そ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行った。特に原コードに含まれていた様々な制約を大幅に緩和するとともに、OpenMP の導入等による高速化に向けたプログラム改良を行った。

### (b) 業務の成果

#### 1) サブテーマ「地震・微動検出技術の開発」

深層学習に基づく地震波形信号データからの地震検出手法について、GPD法をベースとする新しい手法を開発し、Pythonで実装した。提案手法および波形信号データへの適用結果を論文にまとめて専門誌に投稿するとともに、論文原稿をプレプリントサーバを通じ

て公開した。

## 2) サブテーマ「地下構造モデリング技術の開発」

これまでに開発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の核心をなす地震波伝播シミュレーションコードは FORTRAN 77 で記述されており、かつ適用可能な観測点数に厳しい制約があった。そこで、観測点数の制約の大幅な緩和、ならびに他コードとの一貫性の担保と計算時間の大幅な短縮を目的に、コード全体の Fortran 90 への移植および OpenMP の導入を行った。

### (c) 結論ならびに今後の課題

深層学習に基づく波形信号データからの地震検出手法に関する新しい手法を開発した。深層学習法に基づいて検出モデルを構築するには大量の地震波形データを必要とするが、モデルの適用対象地域にこうした大容量データが利用可能であるとは限らない。こうした問題に対して、転移学習の試行をおこない、その有効性を確認することができた。令和5年度は、本提案手法に最適な転移学習法を考案し、個々の観測点に適用可能な検出モデル構築手法を開発するとともに、実データに適用し、その効果を評価したい。

また、レプリカ交換モンテカルロ法による地震波動場再構成法に基づく地下構造モデリング技術について、核心となるフォワードコードの高速化に成功した。令和5年度以降は、これまでに MeSO-net データに基づく学習を行ったモデルを首都圏以外の地域にも適用可能となるよう、転移学習の実装を行なっていく予定である。

### (d) 成果の論文発表・口頭発表等

#### 1) 学会等における口頭・ポスター発表 : 計4件、うち国外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
Classification of low-frequency earthquakes based on inter-time distribution and 2011 Great Tohoku Earthquake（口頭発表）	徳田智磯、島田悠彦	日本地球惑星科学連合大会	令和4年5月22日	国内	○
Multiple clustering based on nonparametric mixture models for Gaussian and Wishart distributions（口頭発表）	徳田智磯	統計関連学会連合大会	令和4年9月7日	国内	○
Robust seismic phase detection method modeling both global	Tokuda, T., Nagao, H.	American Geophysical Union Fall	令和4年12月16日	国外	○

and local representations of waveform (ポスター発表)		Meeting			
Multiple clustering based Wishart mixture models and its application to seismic data analysis (ポスター発表)	Tokuda, T., Nagao, H.	Computational and Methodological Statistics	令和4年12月18日	国外	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発

なし

3) 仕様・標準等の策定

なし

## 2. 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	R4.4.1 ～ R5.3.31	9,242,172 円	2,772,651 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・教授	小原 一成	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R5.3.1 ～ R5.3.31	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<sup>1)</sup>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完了させる。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

を完成させ、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、手法の改良を行う。

#### 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4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4年度の成果

### (a) 業務の要約

人工知能に基づく地震波形画像データからの地震・微動検出技術の開発に向けて、Hi-netの地震波形信号データ、および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紙に直接記録された地震波形からの波形画像データの生成を継続した。また、令和3年度に構築した波形画像データからの微動検出を目的とした残差学習構造を用いた畳み込みニューラルネットワーク(CNN)を、高感度地震観測網(Hi-net)の波形信号データを画像化した波形画像データによるファインチューニングによって強化し、和歌山観測所熊野観測点(三重県)において1966~1977年に得られた地震計紙記録の波形画像データに適用したところ、数多くの当時の微動を検出することに成功した。

### (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「地震・微動検出技術の開発」

令和3年度に、波形画像データからの微動検出を目的とする残差学習構造を用いた

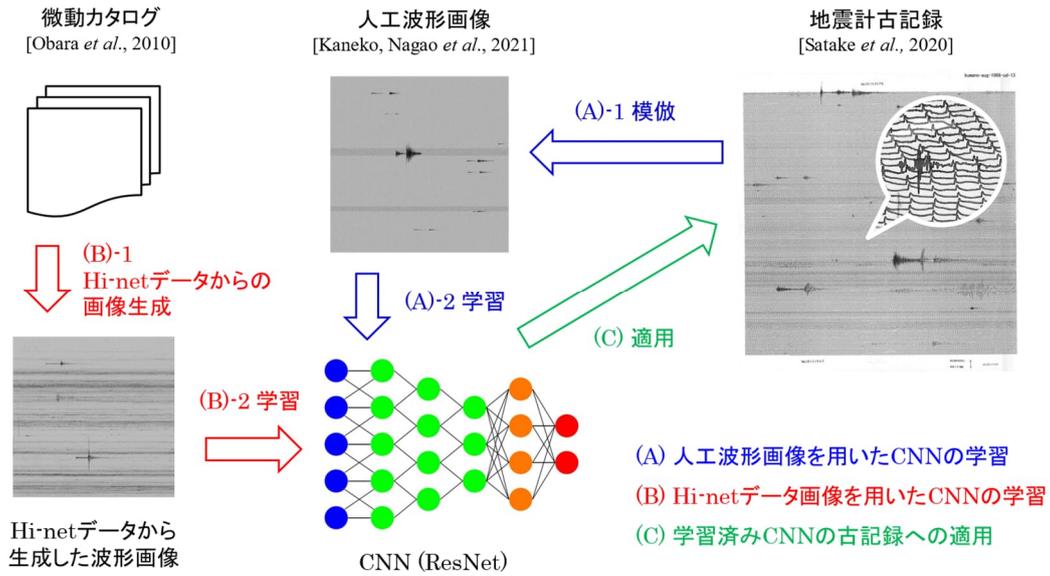


図 8 : 地震波形画像データからの微動検出のための深層学習器の構築

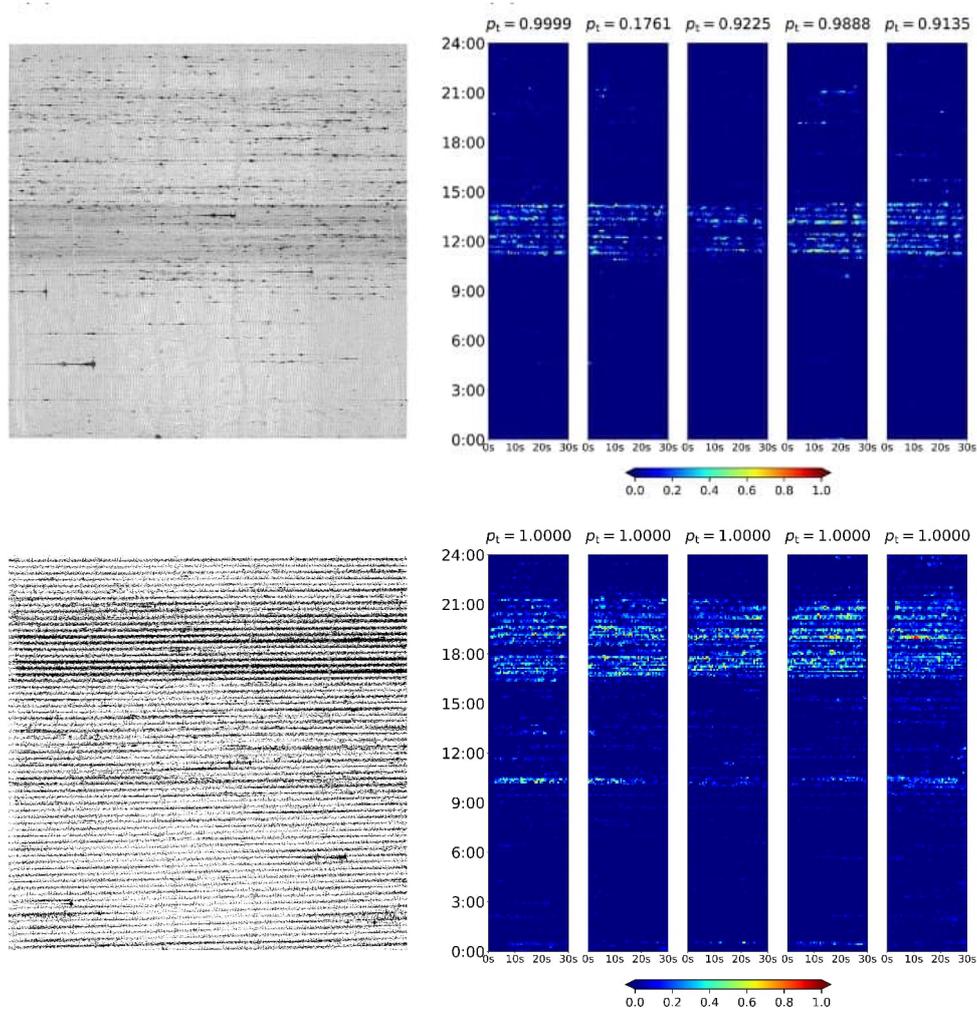


図 9 : 残差学習構造を用いた畳み込みニューラルネットワークにより東京大学地震研究所和歌山観測所 熊野観測点で得られた地震計紙記録からの微動検出成功例。

CNN を開発し、実際の地震計古記録を参考に生成した人工波形画像データを学習させた。令和4年度は、5万枚以上の Hi-net の波形信号データを画像化した波形画像データを用いて、正答率が98%以上に達するまで、このCNNのファインチューニングを行った（図8）。構築したCNNを熊野観測点において1966～1977年に得られた地震計紙記録の波形画像データに適用し、当時の微動を数多く検出することに成功した（図9）。

(c) 結論ならびに今後の課題

地震波形画像データからの地震・微動検出のための深層学習器の開発に向けて、現代の地震計によって得られた波形信号データおよび昔の地震計によって得られた紙記録からの波形画像データの生成を継続した。

また、波形画像データからの微動検出を目的とするCNNを強化することにより、約50年前の地震計紙記録から当時の微動を数多く検出することに成功した。同時に、微動検出の成否が紙記録に使用されたペンの太さに大きく依存することも判明した。本研究の実施にあたっては、前処理として紙記録をスキャンした波形画像データの色補正を実施しているものの、地震・微動発生時には波形同士が重なってしまうこともあり、色補正によってペンの太さの影響を改善することは困難であった。今後はより正確な微動検出が行えるよう、データ拡張によって学習用の波形画像データを大幅に追加し、最新鋭のGPU計算機によってCNNの強化を行なっていく予定である。

(d) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表 : 計16件、うち国外4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
Towards integration of data assimilation and deep learning beneficial to seismology（口頭発表）	Nagao, H.	SIAM International Conference on Data Mining	令和4年4月29日	国外	○
畳み込みニューラルネットワークによる地震波形古記録からの深部低周波微動の検出（口頭発表）	金子亮介、長尾大道、伊藤伸一、鶴岡弘、小原一成	日本地球惑星科学連合大会	令和4年5月22日	国内	○
データサイエンスによる地震研究の深化（口頭発表）	長尾大道、伊藤伸一、金子亮介	人工知能学会全国大会	令和4年6月14日	国内	○
Data science techniques to extract information	Nagao, H., S. Ito, and R. Kaneko	The 75th IIW Annual Assembly and	令和4年7月18日	国外	○

from image data (ポスター発表)		International Conference			
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 (口頭発表)	長尾大道	統計関連学会連合大会	令和4年9月7日	国内	○
Seasonal adjustment method with multi-seasonal components (ポスター発表)	長尾 大道, 羽場 智哉, 伊藤 伸一	統計関連学会連合大会	令和4年9月7日	国内	○
畳み込みニューラルネットワークに基づく西南日本で得られた地震波形紙記録からの深部低周波微動の検出 (口頭発表)	金子亮介、長尾大道、伊藤伸一、鶴岡弘、小原一成	日本地震学会秋季大会	令和4年10月25日	国内	○
地震学と情報地質学の接点 (口頭発表)	長尾 大道	日本情報地質学会シンポジウム	令和4年12月2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 for seismogram images (口頭発表)	Nagao, H., R. Kaneko, S. Ito, H. Tsuruoka, and K. Obara	American Geophysical Union Fall Meeting	令和4年12月17日	国外	○
データ同化と機械学習の接点 (口頭)	長尾 大道	電子情報通信学会	令和5年3月9日	国内	○
データ同化：理論深化と応用展開 (口頭発表)	長尾 大道	データ駆動科学と情報計測の新展開	令和5年3月29日	国内	○
SpM との融合に基づくデータ同化の深化と計測への展開 (口頭発表)	長尾 大道	データ駆動科学と情報計測の新展開	令和5年3月30日	国内	○
Convolutional neural network to detect deep low-frequency tremors	Kaneko, R.	Asia Oceania Geosciences Society, 18th Annual	令和3年8月3日	国外	○

from seismic waveform images (ポスター発表)		Meeting			
畳み込みニューラルネットワークを用いた地震波形画像からの深部低周波微動の検出 (口頭発表)	金子亮介、長尾大道、伊藤伸一、小原一成、鶴岡弘	2021年度統計関連学会連合大会	令和3年9月7日	国内	○
地震連続波形画像からの深部低周波微動検出に向けた畳み込みニューラルネットワークの構築 (口頭発表)	金子亮介、長尾大道、伊藤伸一、小原一成、鶴岡弘	日本地震学会2021年度秋季大会	令和3年10月14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 for seismogram images (口頭発表)	金子亮介、長尾大道、伊藤伸一、鶴岡弘、小原一成	日本統計学会春季集会	令和4年3月5日	国内	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計1件、うち国外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
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	Kaneko, R., H. Nagao, S. Ito, H. Tsuruoka, and K. Obara	Journal of Geophysical Research Solid Earth	令和5年2月	国外	○

(e) 特許出願、ソフトウェア開発、仕様・標準等の策定

1) 特許出願

なし

2) ソフトウェア開発 : 計 1 件

名称	機能
地震波形画像データ深層学習コード	深層学習に基づき、入力された地震波形画像データから深部低周波微動を検出する。

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。これにより、2.2の地震波動場再構成法に基づく地下構造モデリング技術の高度化にも寄与する。

#### (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	R4.4.1 ～ R5.3.31	2,429,558 円	728,867 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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	5,074,110 円	1,522,233 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・助教	伊藤 伸一	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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<sup>1)</sup>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す。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する。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う。

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する。

### 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4年度の業務の目的

令和3年度に開発した擬似尤度関数に基づいた、本震直後の余震分布高速計算アルゴリズムの理論的性質を保証する。また、ノンパラメトリックモデルを高速化させるだけでなく、自己励起性のある検出確率をモデルに組み込むことで、パラメトリックモデルでありながらノンパラメトリックモデルと同等の十分な表現力を備えたモデルの提案を行う。

これまで大規模変分法データ同化法の数学基盤を構築してきたが、4次元変分法に基づいて地震波動場データ同化を実現するには4次元変分法単体の適用では未だ計算量的困難さが伴う。そのため令和4年度は、4次元変分法単体性能を超えた新しいアルゴリズムの開発を目標として、乱択化アルゴリズムと組み合わせた新たな4次元変分法アルゴリズムを創発する。

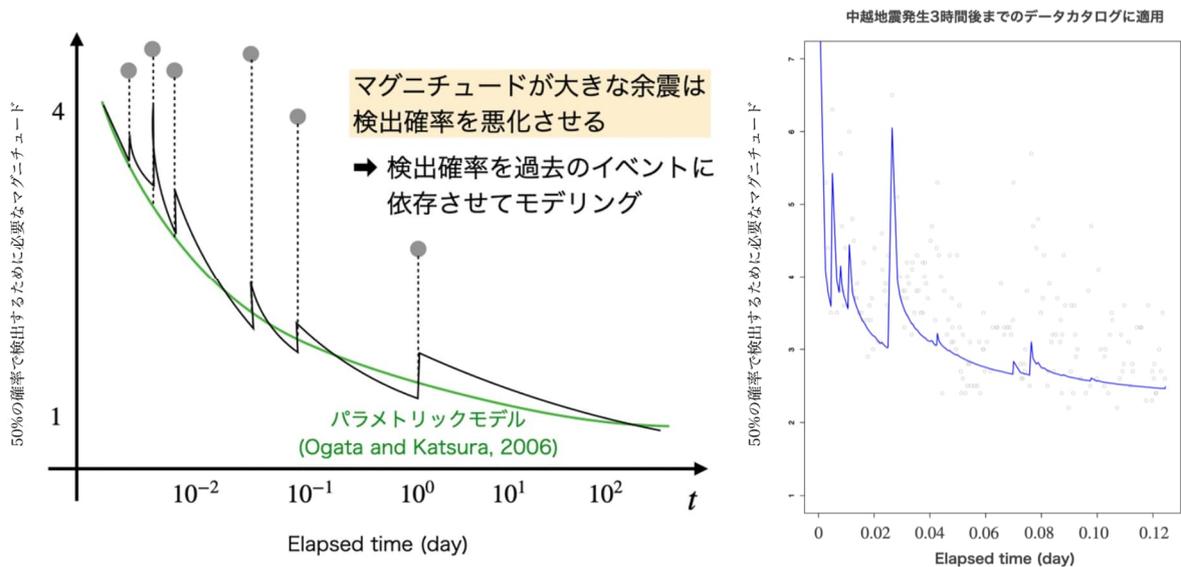


図 10 : (左)提案する自己励起性のある検出確率の概念図。(右)実際に 2004 年中越地震発生直後 3 時間以内の地震カタログに適用した場合の余震検出確率の推定結果。

## (2) 令和 4 年度の成果

### (a) 業務の要約

擬似尤度関数に関する漸近理論を用いることで、提案手法による推定量は一致性と漸近正規性を有していることがわかった。ただし、推定量の漸近分散は最尤推定量に比べると大きくなる。また、検出確率のモデリングに ETAS (Epidemic Type Aftershock Sequence) モデルのように過去の余震情報を用いることで、パラメトリックモデルでありながらノンパラメトリックモデルと同等の表現力を備えたモデルの提案を行った。

また、4次元変分法に基づく大規模地震波動場データ同化の高効率化を目的として、乱択アルゴリズムに基づく不確実性評価法の高効率化を提案した。本提案手法は既存の変分法データ同化のアルゴリズム構造や精度を不変にしたまま純粋な高速化を実現する。本提案手法を 1次元波動方程式の不均質速度構造不確実評価問題へ適用し既存方法と比較したところ 10 倍以上の高速化が実現された。

### (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」

令和 3 年度に開発した擬似尤度関数に基づいた、本震直後の余震分布高速計算アルゴリズムによる推定量が理論的に正しいものであることを示した。しかし、提案推定量の推定効率は最尤推定量よりも悪いことがわかった。これは尤度関数ではなく計算効率に特化した擬似尤度関数を用いるための代償と考えられる。また、図 10 左で表されるように、ベースとなるモデルをパラメトリックモデルで表し、検出確率を過去の情報を用いてモデリングすることで“自己励起性”のある表現力の高いモデルを提案した。実際に 2004 年中越地震に適用した結果を図 10 右で示している。想定通り、パラメトリックモデルを用いているにも関わらず過去の情報を用いることが可能であるため、複雑な検出確率が表現可能であることがわかる。本手法は既存手法とは異なる

### 乱択数を変えた際の計算時間の比較

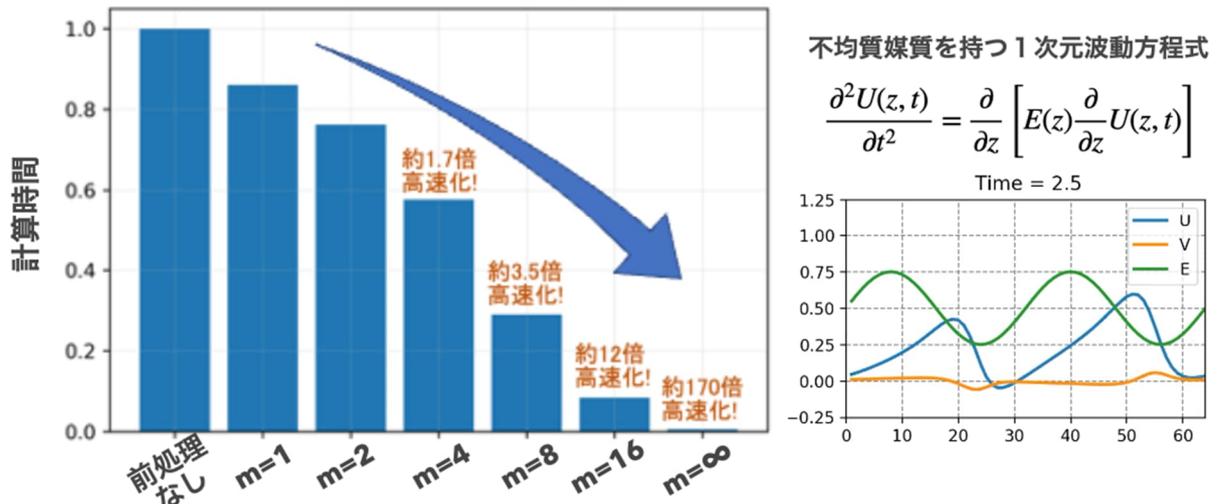


図 1 1 : 乱択化に基づく高速化手法の1次元波動方程式の不均質速度構造不確実評価問題適用結果。乱択数  $m$  の増加に伴い高速化されている。

りパラメトリックモデルであるため、パラメータの高速計算が可能であり、今後の空間データへの拡張も計算時間の観点からは問題なく行えることが想定される。

#### 2) 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ための乱択アルゴリズムに基づく不確実性評価法の高速化法を提案した。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。本手法は自励系時間発展モデルであれば適用することができ、地震波動場モデルにも適用が可能であるが、地震波動場モデルは数値計算不安定性回避のために稠密な時空間格子が要求され、モデル計算1回あたりの計算量が非常に大きいため、既存の変分法データ同化法の単純な適用は計算量的に難しいことが昨年度示唆された。その解決のため本年度は変分法データ同化に乱択化前処理を導入することで不確実性評価アルゴリズムを高速化する方法を考案した。本前処理手法は既存のアルゴリズム構造を壊すことなく全体の高速化を実現できる上、前処理自体の計算量は全体の計算量に比べて十分小さく抑えることができる手法となっている。本提案手法を1次元波動方程式の不均質速度構造不確実評価問題へ適用し、前処理なしの既存方法と比較したところ、10倍以上の高速化が可能であることが確認された(図11)。

#### (c) 結論ならびに今後の課題

これまでに提案した本震直後における余震分布推定アルゴリズムの高速化を行い、その理論的妥当性を証明した。また、当初の予定とは異なるが、令和7年度に行う予定である空間データへの拡張を見据え、パラメトリックモデルでありながら非常に柔軟なモデルを提案した。しかし、本手法は自己励起性があるため  $O(n^2)$  の計算量が必要となる。今後

は ETAS モデルで行われているものと同様のテクニックを用いることで計算量を  $O(n)$  まで減らせるかを検討する。さらに、中越地震以外のデータカタログにも本手法が有効に働くのかを確認する必要もある。

また、令和 4 年度の目標で掲げた乱択アルゴリズムを導入した不確実性評価法の高効率化・高速化法を提案し、不均質速度構造不確実評価問題の数値実験により提案手法の有用性を確認した。現在の乱択アルゴリズムは任意の問題への適用が可能な汎用アルゴリズムとなっているが、今後は、地震波動問題特有の物理的性質や数理構造などをアルゴリズムへ反映させ提案手法のさらなる改良・効率化を狙いつつ、実データを使った地震波動場データ同化問題への応用を進めていく。

(d) 成果の論文発表・口頭発表等

1) 学会等における口頭・ポスター発表 : 計 8 件、うち国外計 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
Semi parametric adaptive estimation in survey sampling（口頭発表）	Mori kawa, K. and Kim, J. K.	Workshop on Emerging Challenges for Statistics and Data Sciences（口頭発表）	令和 4 年 5 月 2 4 日	国外	○
シンプレクティックアジョイント法に基づくスロースリップ断層面の摩擦不均一性の不確実性評価（ポスター発表）	伊藤伸一、加納将行、長尾大道	日本地球惑星科学連合大会	令和 4 年 5 月 2 2 日	国内	○
Symplectic-adjoint-based uncertainty quantification method for large-scale data assimilation problems（ポスター発表）	伊藤伸一、松田孟留、宮武勇登	日本地球惑星科学連合大会	令和 4 年 6 月 3 日	国内	○
Fast and high-precision estimation for temporal variation of aftershocks immediately after a main shock with Gaussian process regression（ポスター発表）	Mori kawa, K., Naqao, H., Ito, S., Terada, Y., Sakai, S. and Hirata, N.	日本地球惑星科学連合大会	令和 4 年 6 月 3 日	国内	○

一発表)					
Symplectic-adjoint-based Uncertainty Quantification Method for Large-scale Data Assimilation Problems (口頭発表)	Ito, S., Matsuda, T., Miyatake, Y	Asia Oceania Geosciences Society Annual Meeting	令和4年8月2日	国外	○
Adjoint-Based Direct Data Assimilation for Optimizing Frictional Parameters and Predicting Postseismic Deformation (口頭発表)	Kano, M., S. Miyazaki, Y. Ishikawa, and K. Hirahara	SIAM Conference on Mathematics of Data Science (MDS22)	令和4年9月28日	国外	○
アジョイント法に基づく2003年十勝沖地震の余効すべりの現状把握と短期推移予測(口頭発表)	加納 将行	日本測地学会第138回講演会	令和4年10月6日	国内	○
シンプレクティックアジョイント法に基づくスロースリップ断層面の摩擦不均一性の不確実性評価(ポスター発表)	伊藤伸一、加納将行、長尾大道	日本地震学会秋季大会	令和4年10月26日	国内	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計4件、うち国外計4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
I1 Trend Filtering-Based Detection of Short-Term Slow Slip Events: Application to a GNSS Array in Southwest Japan	Yano, K., and M. Kano	Journal of Geophysical Research Solid Earth, Vol. 127, e2021JB023258, doi: 10.1029/2021JB023258	令和4年4月	国外	○

Adjoint-based uncertainty quantification for inhomogeneous friction on a slow-slipping fault	Ito, S., M. Kano, and H. Nagao	Geophysical Journal International	令和5年1月	国外	○
Adjusting for publication bias in meta-analysis via inverse probability weighting using clinical trial registries	Huang, A., K. Morikawa, T. Friede, and S. Hattori	Biometrics	令和5年1月	国外	○
An empirical likelihood approach to reduce selection bias in voluntary samples	Kim, J. K. and K. Morikawa	Calcutta Statistical Association Bulletin	in press	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、スパースモデリング技術を導入し、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	R4.4.1 ～ R5.3.31	40,370 円	12,111 円
国立大学法人東京大学 地震研究所・教授	小原 一成	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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	R4.4.1 ～ R5.3.31	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

2.3 の深層学習器を高度化し、古記録の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、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する。

また、前年度開発した観測点選択アルゴリズムを試験的に実装した2.2および2.3の深層学習器を人工データに対して多数回実行し、手法の頑健性を確認する。それに基づき、観測点選択に関する計算停止条件などの各種設定について検討する。

#### 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出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4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る。微動検出の成否について、波形画像データの特徴と比較しながら、自然知能によって原因を追求する。

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4年度の成果

### (a) 業務の要約

2.2で述べた、深層学習に基づく昔の地震計紙記録からの微動検出においては、自然知能による結果検証により、微動検出の成否が紙記録に使用されたペンの太さに依存することが判明した。

また、近い将来、必ず訪れることが確実な地震超ビッグデータ時代に向け、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観測点選択アルゴリズムを開発した。事例として首都圏における地震波動場再構成の問題に適用したところ、少数の観測点のデータから地震波動場を十分に再構成できることを確認した。

### (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」

2.2で述べた、昔の地震計紙記録の波形画像データから深層学習器によって検出した低周波微動の候補を経験豊かな地震研究者の目によって検証したところ、多数の微動検出に成功した(図12上)一方で、失敗例も少なからず存在する(図12下)ことが判明した。この原因を自然知能によって追求したところ、微動検出の成否は紙記録に使用されたペンの太さに依存することが考えられる。何らかの原因によってペンの太さが時間変化しており、Hi-netの波形信号データを画像化する際に用いたペンの太さが、紙記録のペンの太さが細い場合にマッチしていたものと推認された。紙記

録を個別に精査したところ、微動が7日間以上検出されたと判定された月において、波形画像データ中の黒画素が占める割合が検出日数に比例していることが分かり（図13）、上述の仮説が裏付けられた。

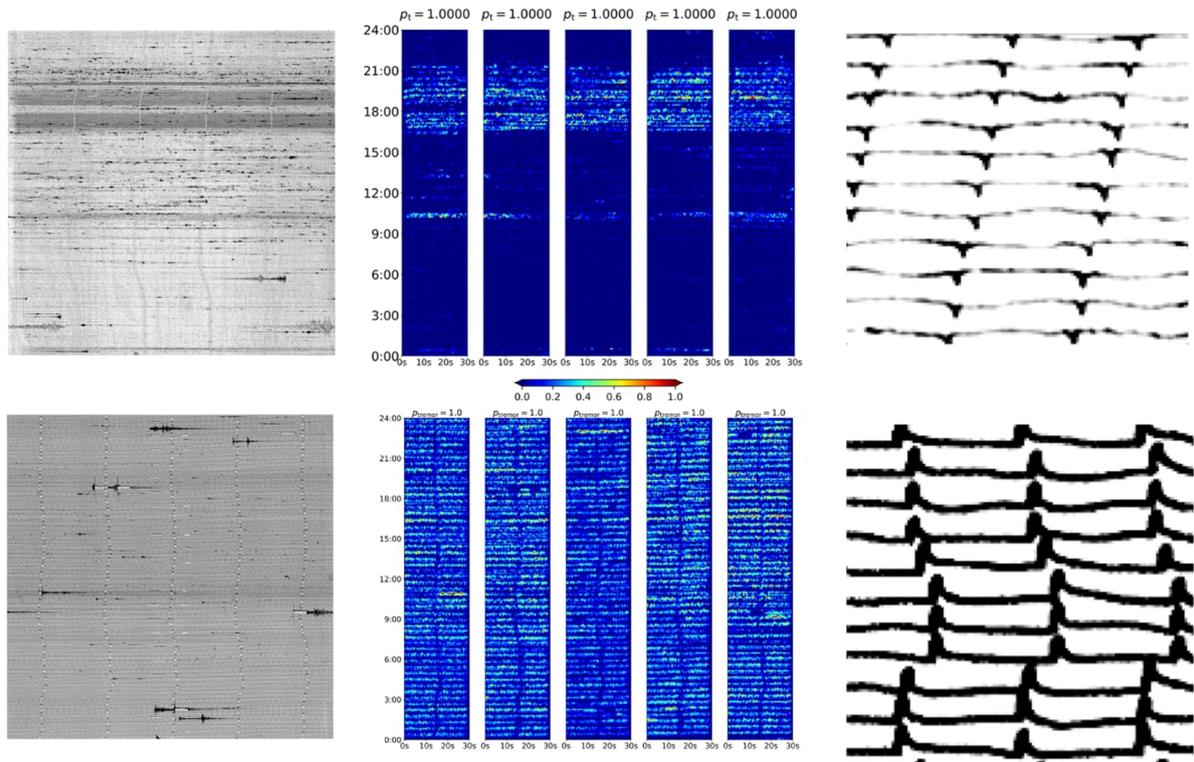


図12：(左)東京大学地震研究所 和歌山観測所 熊野観測点における地震計紙記録の波形画像データ、(中)畳み込みニューラルネットワークによる微動検出結果、(右)紙記録に用いられたペンの太さを示すための拡大図。上側は微動検出成功例、下側は検出失敗例。

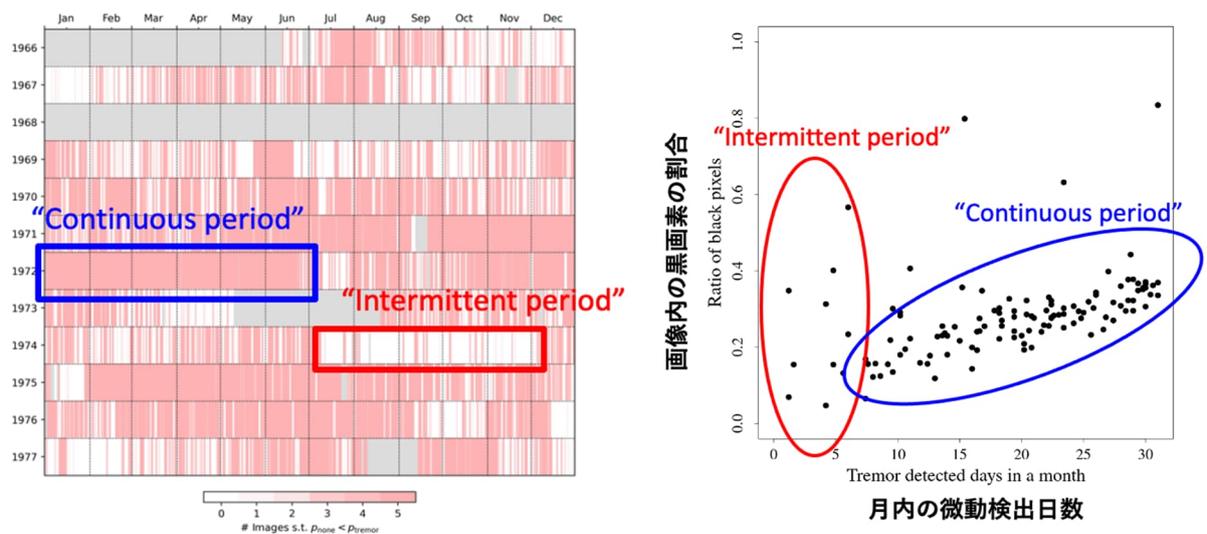


図13：(左)東京大学地震研究所 和歌山観測所 熊野観測点における地震計紙記録から微動が検出されたと判定された日を示すガントチャート、(右)月内の微動検出日数と波形画像データにおける黒画素の割合の関係。

## 2) サブテーマ「観測点選択アルゴリズムの開発」

スパースセンサー位置最適化アルゴリズムをベースに、地震観測点選択アルゴリズムの開発を行い、首都圏における地震波動場再構成をテストベッドとしてアルゴリズムの妥当性を検証した。水平成層をなす地下構造における地震波伝播シミュレーションコードを用いて人工の地震波動場を作成し、限られた地震観測点データからその波動場を再構成することが可能かどうかを確認する数値実験を実施した。その結果、かなり限られた地震観測点のデータのみから波動場を十分に再現できることが分かった(図14)。本アルゴリズムは、2.2における波形画像データ生成時の観測点選択の際に応用できる可能性がある。

### (c) 結論ならびに今後の課題

令和4年度は、深層学習に基づく地震計紙記録の波形画像データからの微動検出に焦点を当て、検出された微動候補の正誤、ならびに検出の成否の原因について、自然知能による検証を実施した。それにより、微動検出の成否の原因を突き止め、畳み込みニューラ

$$\begin{bmatrix} \delta x_1 \\ \delta x_2 \\ \vdots \\ \delta x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{\phi}_1 \frac{\partial x_1}{\partial \phi_1} & \tilde{\phi}_2 \frac{\partial x_1}{\partial \phi_2} & \dots & \tilde{\phi}_r \frac{\partial x_1}{\partial \phi_r} \\ \tilde{\phi}_1 \frac{\partial x_2}{\partial \phi_1} & \tilde{\phi}_2 \frac{\partial x_2}{\partial \phi_2} & \dots & \tilde{\phi}_r \frac{\partial x_2}{\partial \phi_r} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{\phi}_1 \frac{\partial x_n}{\partial \phi_1} & \tilde{\phi}_2 \frac{\partial x_n}{\partial \phi_2} & \dots & \tilde{\phi}_r \frac{\partial x_n}{\partial \phi_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\delta \phi_1}{\phi_1} \\ \frac{\delta \phi_2}{\phi_2} \\ \vdots \\ \frac{\delta \phi_r}{\phi_r} \end{bmatrix}$$

$n$ : 観測点候補の数  
 $r$ : 推定対象モデルパラメタの数  
 $x$ : 観測波形データ  
 $\phi$ : 推定対象モデルパラメタ  
 ・ 地下構造 (P,S波伝播速度や層厚)  
 ・ 震源情報 (震源位置)

### 正規化パラメタ感度行列

➡ 感度の高い観測点をベクトル型センサのための貪欲法により選択

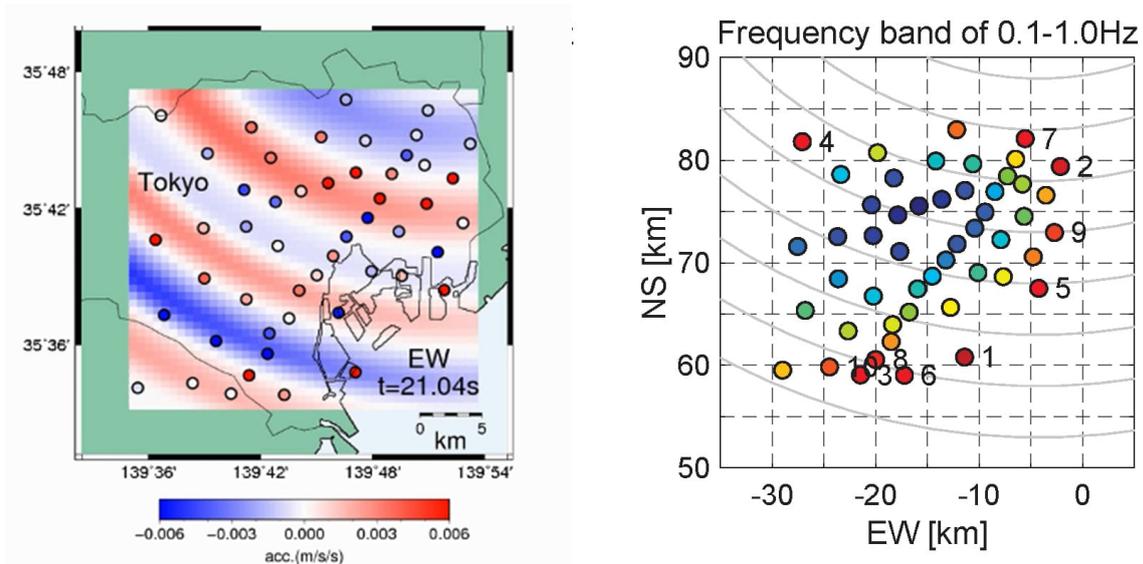


図14: (上)地震波動場再構成の場合の地震観測点選択アルゴリズム。(左下)2014年9月14日に茨城県南部で発生したM5.5の地震について、レプリカ交換モンテカルロ法により再構成された波動場。(右下)地震観測点選択アルゴリズムによって順位付けられた左下の地震波動場を再構成するために重要な地震観測点。

ルネットワークをさらに強化するための今後の指針を見出したことは、重要な成果である。今後は、本研究課題で導入した最新鋭のGPU計算機を活用することにより、微動検出の高精度化のみならず、通常の地震イベントの検出もねらいたい。

また、地震観測点選択アルゴリズムの開発を継続実施し、地震波動場再構成においてその有用性を示すことができた。今後は、深層学習の学習効率を最大化する画像波形データの生成に応用していくことを目指したい。

(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、うち国外計0件

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別	主たる成果
畳み込みニューラルネットワークによる地震波形古記録からの深部低周波微動の検出（口頭発表）	金子亮介、長尾大道、伊藤伸一、鶴岡弘、小原一成	日本地球惑星科学連合大会	令和4年5月22日	国内	
畳み込みニューラルネットワークに基づく西南日本で得られた地震波形紙記録からの深部低周波微動の検出（口頭発表）	金子亮介、長尾大道、伊藤伸一、鶴岡弘、小原一成	日本地震学会秋季大会	令和4年10月25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感度に基づく観測点選択手法の開発（ポスター発表）	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	日本地震学会秋季大会	令和4年10月25日	国内	○
データ駆動型低次元モデルを用いた圧縮センシングの地震波動場再構成への適用（口頭発表）	永田貴之、中井公美、山田圭吾、齋藤勇士、野々村拓、加納将行、伊藤伸一、長尾大道	日本地震学会秋季大会	令和4年10月25日	国内	○

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載 : 計3件、うち国外計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
Detection of deep low-frequency tremors from continuous paper	Kaneko, R., H. Nagao, S. Ito, H. Tsuruoka,	Journal of Geophysical Research Solid Earth	令和5年2月	国外	

records at a station in southwest Japan about 50 years ago based on convolutional neural network	and K. Obara				
Seismic wavefield reconstruction based on compressed sensing using data-driven reduced-order model	Nagata, T., K. Nakai, K. Yamada, Y. Saito, T. Nonomura, M. Kano, S. Ito, and H. Nagao	Geophysical Journal International	令和4年11月	国外	○
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	Geophysical Journal International	in press	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

本研究課題における令和4年度最大のトピックは、本研究課題に従事する研究員3名を雇用したことである。うち1名は海外の大学で博士号を取得した経験豊かな情報科学の日本人研究者、あと2名はメキシコ人と日本人の地震学の若手研究者であり、国際色豊かつ分野的にも非常にバランスの取れた研究体制となった。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5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4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ズレター Vol.1 およびプロモーションビデオの制作を行なった。さらには、令和4年度より 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セッションを提案するなど、研究課題間の連携を深めることにも努めた。

令和4年度の研究計画に基づき、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、カリフォルニア工科大学の研究グループが開発した Generalized Phase Detection 法を拡張した、新たな地震自動検出技術の開発に成功した。開発したモデルは地震波形の局所情報を取り入れることができ、実データに応用したところ、よりロバストな地震検出が可能であることがわかった。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、人工知能による波形画像データからの地震・微動検出技術の開発を行なった。その結果、50年以上前の機械式地震計によって得られた地震波形紙記録から、当時発生した低周波微動を網羅的に検出するための残差学習構造を用いた畳み込みニューラルネットワークの開発に成功した。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、令和3年度に提案したガウス過程回帰を用いた本震直後における余震分布推定手法について、擬似尤度関数の導入による余震時間分布推定手法の高速化に対する理論保証を与え、さらに“自己励起性”を持つ余震検出確率の新たなパラメトリックモデルを提案した。また、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の構築については、大規模変分法データ同化法に基づく不確実性評価アルゴリズムの乱択化による高速化法を考案した。この方法を簡単な速度構造推定問題へ適用したところ、既存アルゴリズムに対して精度を保ったまま10倍以上の高速化を実現した。特に人工知能に基づく波形画像解析については、得られた結果を自然知能に基づいて分析し、開発した畳み込みニューラルネットワークの今後の高度化に向けた指針を示すことにより、早くもトップジャーナルに論文が出版された。いずれの研究項目についても、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4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始動し、また令和3年度・4年度にそれぞれ導入した 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たい。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「情報

×地震」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4年5月17日、7月27日、8月31日、9月28日、10月19日、11月16日、12月21日、12月23日、令和5年1月25日、2月2日、2月9日、2月22日、3月22日、オンライン
  - ✓ 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5年3月23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4年4月18日、5月17日、6月20日、7月26日、9月20日、10月12日、11月24日、12月8日、令和5年1月16日、3月2日、オンライン
  - ✓ STAR-E プロジェクト 第二回研究フォーラム、令和5年1月24日、オンライン
- 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4年5月22日、ハイブリッド
  - ✓ Asia Oceania Geoscience Society 「Data-Driven Modeling in Geosciences」、令和4年8月2日、オンライン
  - ✓ 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4年9月7日、ハイブリッド
  - ✓ 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4年10月14日、札幌
- メディア掲載
  - ✓ 読売新聞「地震現象の解明・防災に挑む」、令和4年9月1日夕刊
  - ✓ 産経新聞「人工知能(AI)で探る地震 - 「匠の技」超え 進む地震研究」、令和5年3月5日朝刊
- 受賞
  - ✓ 小原 一成、紫綬褒章、令和4年11月3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.1、令和4年12月15日
  - ✓ SYNTHA-Seis プロモーションビデオ、令和4年12月15日
  - ✓ 「東大の研究室をのぞいてみよう！プログラム」、令和5年3月27日、高校生20名への講義

## 5. むすび

令和4年度から全研究課題の合同開催による STAR-E 勉強会が開始となったことにより、本研究課題内だけでなく、STAR-E プロジェクトに参画するすべての地震学と情報科学の研究者の交流が始まった。米国や中国を中心に「情報×地震」分野の論文が毎日のように出版され、国際競争が過熱する一方の中、STAR-E プロジェクト全体が連携することは、同分野においてわが国の存在感を示すために極めて重要な第一歩を踏み出したと言える。また、本研究課題で雇用した3名を含めて全研究課題で10名強の研究員が参画したことにより、いよいよ STAR-E プロジェクトがわが国および世界の「情報×地震」分野を牽引していく重責を担っていることを強く感じる。

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4年度は各研究項目において予定通りに進捗したと考えている。今後は令和4年度に雇用した研究員が実施する研究テーマを適切に設定し、各研究項目にバランス良く配置することにより、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ます。

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 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
SpMとの融合に基づくデータ同化の深化と計測への展開（口頭）	長尾 大道	データ駆動科学と情報計測の新展開	令和5年3月30日	国内
データ同化：理論深化と応用展開（口頭）	長尾 大道	データ駆動科学と情報計測の新展開	令和5年3月29日	国内
データ同化と機械学習の接点（口頭）	長尾 大道	電子情報通信学会	令和5年3月9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 for seismogram images（口頭）	Nagao, H., R. Kaneko, S. Ito, H. Tsuruoka, and K. Obara	American Geophysical Union Fall Meeting	令和4年12月17日	国外
Robust seismic phase detection method modeling both global and local representations of waveform（ポスター）	Tokuda, T. and H. Nagao	American Geophysical Union Fall Meeting	令和4年12月16日	国外
地震学と情報地質学の接点（口頭）	長尾 大道	日本情報地質学会シンポジウム	令和4年12月2日	国内
データ駆動型低次元モデルを用いた圧縮センシングの地震波動場再構成への適用（口頭）	永田 貴之, 中井 公美, 山田 圭吾, 齋藤 勇士, 野々村 拓, 加納 将行, 伊藤 伸一, 長尾 大道	日本地震学会秋季大会	令和4年10月25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感度に基づく観測点選択手法の開発（ポスター）	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	日本地震学会秋季大会	令和4年10月25日	国内
畳み込みニューラルネットワークに基づく西南日本で得られた地震波形紙記録か	金子 亮介, 長尾 大道, 伊藤 伸一,	日本地震学会秋季大会	令和4年10月25日	国内

らの深部低周波微動の検出 (口頭)	鶴岡 弘, 小 原 一成			
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 (口頭)	長尾 大道	統計関連学会連合大 会	令和4年9月7 日	国内
Seasonal adjustment method with multi- seasonal components (ポ スター)	長尾 大道, 羽場 智哉, 伊藤 伸一	統計関連学会連合大 会	令和4年9月7 日	国内
Data science techniques to extract information from image data (ポスタ ー)	Nagao, H., S. Ito, and R. Kaneko	The 75th IIW Annual Assembly and International Conference	令和4年7月18 日	国外
データサイエンスによる地 震研究の深化 (口頭)	長尾 大道, 伊藤 伸一, 金子 亮介	人工知能学会全国大 会	令和4年6月14 日	国内
畳み込みニューラルネット ワークによる地震波形古記 録からの深部低周波微動の 検出 (口頭)	金子 亮介, 長尾 大道, 伊藤 伸一, 鶴岡 弘, 小 原 一成	日本地球惑星科学連 合大会	令和4年5月22 日	国内
データ同化の基礎と応用 (口頭)	長尾 大道	システム制御情報学 会	令和4年5月20 日	国内
Towards integration of data assimilation and deep learning beneficial to seismology (口頭)	Nagao, H.	SIAM International Conference on Data Mining	令和4年4月29 日	国外
Adjoint-Based Direct Data Assimilation for Optimizing Frictional Parameters and Predicting Postseismic Deformation (口頭)	Kano, M., S. Miyazaki, Y. Ishikawa, and K. Hirahara	SIAM Conference on Mathematics of Data Science (MDS22)	令和4年9月28 日	国外
アジョイント法に基づく 2003年十勝沖地震の余効す べりの現状把握と短期推移 予測 (口頭)	加納 将行	日本測地学会第138回 講演会	令和4年10月6 日	国内
Multiple clustering based Wishart mixture models and its application to seismic data analysis (ポスタ ー)	Tokuda, T., Nagao, H.	Computational and Methodological Statistics	令和4年12月 18日	国外
Classification of low- frequency earthquakes based on inter-time distribution and 2011 Great Tohoku Earthquake (口頭)	徳田智磯, 島 田悠彦	日本地球惑星科学連 合大会	令和4年5月22 日	国内

Multiple clustering based on nonparametric mixture models for Gaussian and Wishart distributions (口頭)	徳田智磯	統計関連学会連合大会	令和4年9月7日	国内
Symplectic-adjoint-based Uncertainty Quantification Method for Large-scale Data Assimilation Problems (口頭)	Ito, S., T. Matsuda, and Y. Miyatake	The 19th Annual Meeting of the Asia Oceania Geosciences Society	令和4年8月2日	国外
シンプレクティックアジョイント法に基づくスロースリップ断層面の摩擦不均一性の不確実性評価 (ポスター)	伊藤伸一, 加納将行, 長尾大道	日本地震学会秋季大会	令和4年10月26日	国内
Symplectic-adjoint-based uncertainty quantification method for large-scale data assimilation problems (ポスター)	伊藤伸一, 松田孟留, 宮武勇登	日本地球惑星科学連合大会	令和4年6月3日	国内
シンプレクティックアジョイント法に基づくスロースリップ断層面上の摩擦空間不均一性の不確実性評価 (ポスター)	伊藤伸一, 加納将行, 長尾大道	日本地球惑星科学連合大会	令和4年5月22日	国内
Convolutional neural network to detect deep low-frequency tremors from seismic waveform images (口頭)	Nagao, H., R. Kaneko, S. Ito, H. Tsuruoka, and K. Obara	American Geophysical Union Fall Meeting	令和4年12月17日	国外
Convolutional neural network to detect deep low-frequency tremors from seismic waveform images (ポスター)	Kaneko, R.	Asia Oceania Geosciences Society, 18th Annual Meeting	令和3年8月3日	国外
畳み込みニューラルネットワークを用いた地震波形画像からの深部低周波微動の検出 (口頭)	金子亮介、長尾大道、伊藤伸一、小原一成、鶴岡弘	2021年度 統計関連学会連合大会	令和3年9月7日	国内
地震連続波形画像からの深部低周波微動検出に向けた畳み込みニューラルネットワークの構築 (口頭)	金子亮介、長尾大道、伊藤伸一、小原一成、鶴岡弘	日本地震学会2021年度秋季大会	令和3年10月14日	国内
Detection of deep low-frequency tremors from continuous paper records at a station in Southwest Japan about 50	金子亮介、長尾大道、伊藤伸一、鶴岡弘、小原一成	日本統計学会春季集会	令和4年3月5日	国内

years ago based on convolutional neural network for seismogram images (口頭)				
Semiparametric adaptive estimation in survey sampling (口頭)	Morikawa, K. and J. K. Kim	Workshop on Emerging Challenges for Statistics and Data Sciences (口頭発表)	令和4年5月24日	国外
Fast and high-precision estimation for temporal variation of aftershocks immediately after a main shock with Gaussian process regression (ポスター)	Morikawa, K., H. Nagao, S. Ito, Y. Terada, S. Sakai, and N. Hirata	日本地球惑星科学連合大会	令和4年6月3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
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	Kaneko, R., H. Nagao, S. Ito, H. Tsuruoka, and K. Obara	Journal of Geophysical Research Solid Earth, Vol. 128, Issue 2, e2022JB024842, doi:10.1029/2022JB024842	令和5年2月	国外
Seismic wavefield reconstruction based on compressed sensing using data-driven reduced-order model	Nagata, T., K. Nakai, K. Yamada, Y. Saito, T. Nonomura, M. Kano, S. Ito, and H. Nagao	Geophysical Journal International, Vol. 233, Issue 1, pp. 33–50, doi:10.1093/gji/ggac443	令和4年11月	国外
Adjoint-based uncertainty quantification for inhomogeneous friction on a slow-slipping fault	Ito, S., M. Kano, and H. Nagao	Geophysical Journal International, Vol. 232, Issue 1, pp. 671–683, doi:10.1093/gji/ggac354	令和5年1月	国外
I1 Trend Filtering-Based Detection of Short-Term Slow Slip Events: Application to a GNSS Array in Southwest Japan	Yano, K., and M. Kano	Journal of Geophysical Research Solid Earth, Vol. 127, e2021JB023258, doi:10.1029/2021JB023258	令和4年4月	国外
Observation site selection for physical	Nakai, K., T. Nagata,	Geophysical Journal International	in press	国外

model parameter estimation toward process-driven seismic wavefield reconstruction	K. Yamada, Y. Saito, T. Nonomura, M. Kano, S. Ito, and H. Nagao			
Adjusting for publication bias in meta-analysis via inverse probability weighting using clinical trial registries	Huang, A., K. Morikawa, T. Friede, and S. Hattori	Biometrics, doi:10.1111/biom.13822	令和5年1月	国外
An empirical likelihood approach to reduce selection bias in voluntary samples	Kim, J. K. and K. Morikawa	Calcutta Statistical Association Bulletin	in press	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。