

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3年度  
成果報告書

令和4年5月  
文部科学省研究開発局  
国立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3年度「情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト（STAR-Eプロジェクト）「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 が整備されたことをきっかけに、今世紀初頭に発見された深部低周波微動（微動）は、巨大地震の発生予測などに活用されることが期待されている。微動と時間スケールの長い地震活動との関連を理解するためには、Hi-net 運用開始以前の過去にまで遡り、その特性を明らかにすることが重要である。

本研究課題では、約 50 年前の地震計によって得られたアナログ地震波形データから微動検出を行う畳み込みニューラルネットワーク（CNN）の開発に着手した（図 1）。微動の発生日時が既知の Hi-net データを教師データとして用いることができるが、様々なノイズが妨げとなる可能性があるため、人工的に作成した地震波形画像データに基づき、CNN の有効性を検証する数値実験を行った。その結果、CNN が微動の有無のみならず、画像内のどの部分に微動が含まれるかまで正しく検出できることが確認された（図 2）。本結果を基に、今後は Hi-net の実データを用いてモデルの学習を行い、実際の古記録画像から高精度で微動を検出するアルゴリズムを構築する。

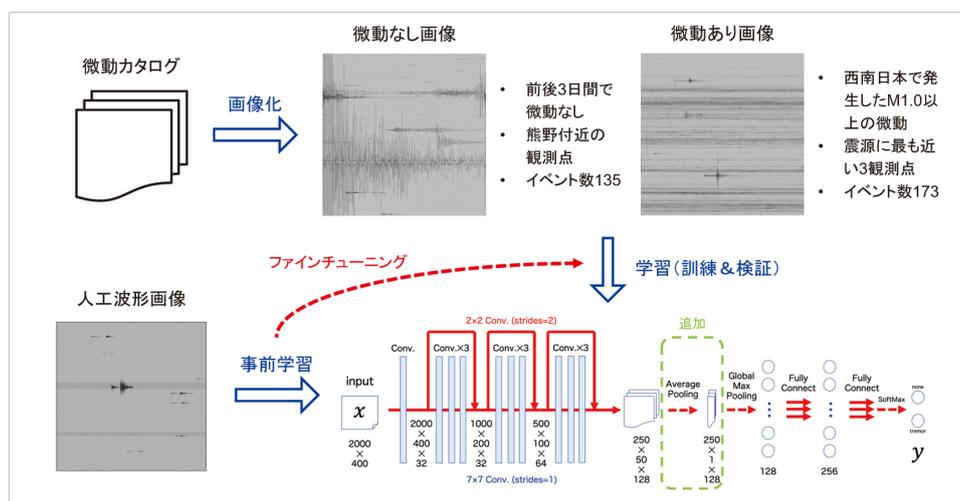


図 1：地震波形画像データからの微動検出のための深層学習器の構築

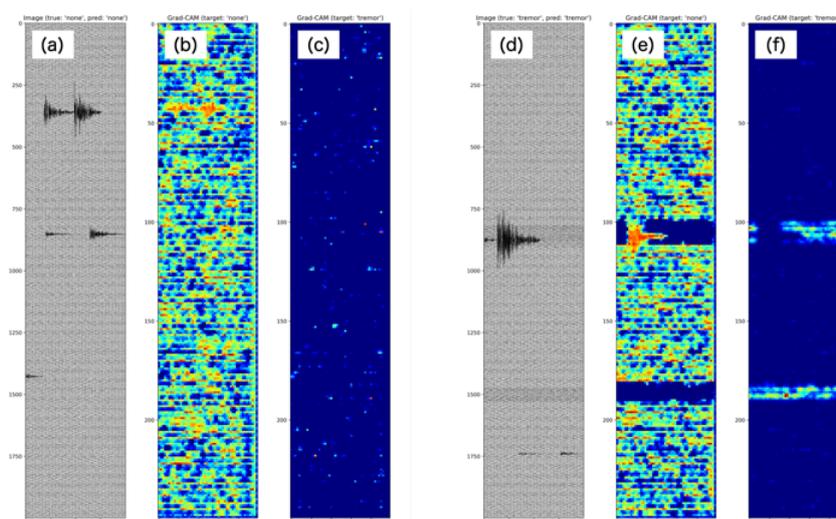


図 2：数値実験に基づく微動検出テストの結果

## 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

<b>1. 研究課題の概要</b>	<b>1</b>
1.1 研究概要の説明	1
(1) 研究者別の概要	1
(2) 研究実施日程	3
<b>2. 研究成果の説明</b>	<b>4</b>
2.1 プロジェクトの管理・運営	4
(1) 業務の内容	4
(2) 令和3年度の成果	6
2.2 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3年度の成果	10
2.3 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	12
(1) 業務の内容	12
(2) 令和3年度の成果	13
2.4 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	17
(1) 業務の内容	17
(2) 令和3年度の成果	18
2.5 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	22
(1) 業務の内容	22
(2) 令和3年度の成果	24
<b>3. まとめ</b>	<b>25</b>
<b>4. 活動報告</b>	<b>26</b>
<b>5. むすび</b>	<b>26</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いえない。

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。

### 1. 1 研究概要の説明

#### (1) 研究者別の概要

所属機関・部局・職名	氏名	分担した研究項目及び研究成果の概要	研究実施期間	配分を受けた研究費	間接経費
東京大学・地震研究所・准教授	長尾 大道	2.1 1) プロジェクト推進に向けた戦略目標の計画立案 5か年および令和3年度の研究計画を策定し、コミュニケーションツールを設置した。	令和3年7月～令和3年11月	0円	0円
東京大学・地震研究所・准教授	長尾 大道	2.1 2) 人工知能技術開発のための研究環境整備 本研究課題に必要なGPU計算機環境を整備した。	令和3年7月～令和4年3月	16,170,000円	4,851,000円
東京大学・地震研究所	長尾 大道	2.1 3) 定例会および運営委員会の開催	令和3年7月～令	0円	0円

所・准教授		定期的な定例会を開催し、本研究課題の円滑な推進に努めた。	和 4 年 3 月		
東京大学・地震研究所・准教授	長尾 大道	2.1 4) 成果の活用促進 本研究課題を国内外へ周知するため、ホームページとリーフレットを制作し、公開した。	令和 3 年 9 月～令和 4 年 3 月	1,123,100 円	336,930 円
東京大学・地震研究所・准教授	長尾 大道	2.2 1) 地震・微動検測技術の開発 既存コードの改良を行った。	令和 3 年 7 月～令和 4 年 3 月	1,172,100 円	351,630 円
東京大学・地震研究所・准教授	長尾 大道	2.2 2) 地下構造モデリング技術の開発 既存研究の文献調査および公開プログラムの試験的な実行を行った。	令和 3 年 7 月～令和 4 年 3 月	1,923,790 円	577,137 円
東京大学・地震研究所・准教授	長尾 大道	2.3 1) 地震波形画像データの生成 地震波形画像データの作成を開始した。	令和 3 年 7 月～令和 4 年 3 月	511,010 円	153,303 円
東京大学・地震研究所・准教授	長尾 大道	2.3 2) 地震・微動検測技術の開発 地震波形画像データから微動を検測する深層学習器を構築した。	令和 3 年 7 月～令和 4 年 3 月	0 円	0 円
東京大学・地震研究所・准教授	長尾 大道	2.4 3) 地震波動場データ同化手法の開発 数値解析理論に基づく地震波動場変分法データ同化アルゴリズムを構築した。	令和 3 年 7 月～令和 4 年 3 月	0 円	0 円
東京大学・地震研究所・准教授	長尾 大道	2.5 1) 目視による地震波形画像データの検証 深層学習器の微動判定の検証を行い、有用性を確認した。	令和 3 年 7 月～令和 4 年 3 月	0 円	0 円
東京大学・地震研究所・准教授	長尾 大道	2.5 2) 観測点選択アルゴリズムの開発 地震波動場再構成を例に、手法開発の方向性を定めた。	令和 3 年 7 月～令和 4 年 3 月	0 円	0 円
大阪大学・基礎工学研究科・講師	森川 耕輔	2.1 2) 人工知能技術開発のための研究環境整備 本研究課題に必要なデータ解析用計算機を整備した。	令和 3 年 7 月～令和 4 年 3 月	7,011,302 円	2,103,391 円

大阪大学・ 基礎工学研 究科・講師	森川 耕輔	2.4 1) 地震時空間モデリング技術の開発 ガウス過程回帰に基づく余震分布推定法における高速化アルゴリズムを開発した。	令和3年 7月～令 和4年3 月	340,698 円	102,209 円
大阪大学・ 基礎工学研 究科・講師	森川 耕輔	2.4 2) 微動時空間モデリング技術の開発 今後の解析に向けて、既存の微動カタログの整理を行った。	令和3年 7月～令 和4年3 月	248,000 円	74,400 円

## (2) 研究実施日程

研究実施内容	実 施 日 程											
	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
2.1 プロジェクトの管理・運営 1) プロジェクト推進に向けた戦略目標の計画立案 2) 人工知能技術開発のための研究環境整備 3) 定例会および運営委員会の開催 4) 成果の活用促進				←					→			
2.2 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) 地震・微動検測技術の開発 2) 地下構造モデリング技術の開発			←									→
2.3 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) 地震波形画像データの生成 2) 地震・微動検測技術の開発			←									→



育成ならびに本研究課題の趣旨や成果を広く国民に周知す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。

(d) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 令和3年度：

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る。運営委員会を年2回開催し、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。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、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る。

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。運営委員会を年2回開催し、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。運営委員会を年2回開催し、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。運営委員会を年2回開催し、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。

(e) 令和3年度業務目的

5か年にわたる本研究課題の総合的な戦略目標を立案し、それを達成するための令和3年度の実施項目を定める。具体的には、本研究課題に従事する研究員の採用方針の決定、本研究課題で使用する計算機環境の整備、本研究課題に関する学会活動と広報活動、ならびに STAR-E プロジェクトの他研究課題との連携促進を実施する。

## (2) 令和3年度の成果

### (a) 業務の要約

令和3年11月24日に本研究課題のキックオフ会議をオンラインにて開催し、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ついて議論するとともに、それを実現するための令和3年度の実施計画について具体的な方針を定めた。これとは別に、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、6回の定例会を開催した。また、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を国内外へ向けて発信するため、本研究課題の英語名称と略称を命名するとともに、日本語版と英語版のホームページを開設し、ホームページ上で広報媒体として制作した掲示用ポスターと配布用リーフレットの公開を開始した。また、政府地震調査委員会が発行する地震本部ニュースの令和3年度秋号に、本研究課題に関する解説記事を寄稿した。

### (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オンライン会議を複数回開催し、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ついて議論するとともに、それを実現するための令和3年度の実施計画を定めた。具体的には、令和4年度以降に本研究課題に従事する研究員の採用方針の決定、本研究課題における成果を発表するための令和4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、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 Slack ワークスペースの設置を行った。

#### 2) サブテーマ「人工知能技術開発のための研究環境整備」

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整備した。具体的には、NVIDIA 社 Ampere A100 40GB GPU を4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3年11月24日に開催した本研究課題全体のキックオフ会議をはじめ、研究進捗状況を確認するための定例会を6回（令和3年7月21日、10月20日、12月27日、令和4年1月11日、2月9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、本研究課題のホームページを設置し（図3）、掲示用ポスターと配布用リーフレットを制作した（図4）。それに伴い、本研究課題の英語名称を Synergy effect Through Human and Artificial Intelligence Towards New Era in Seismology（略称：SYNTHA-Seis）と決定した。

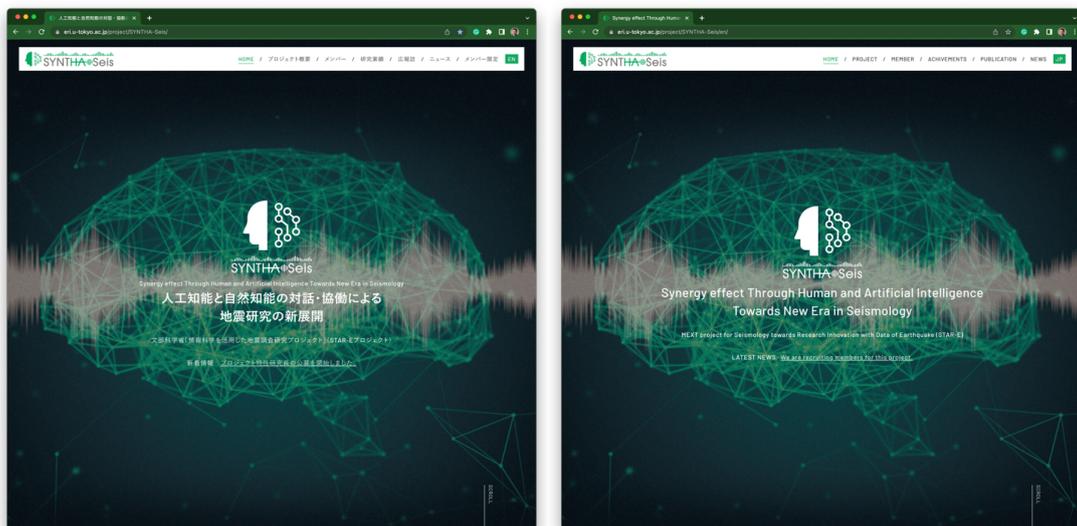


図3：SYNTHA-Seis ホームページ（左：日本語版、右：英語版）



図 4 : SYNTHA-Seis リーフレット (左 : 表面、右 : 裏面)

(c) 結論ならびに今後の課題

頻繁な定例会を通じて、令和 3 年度は主に (i) 本研究課題の 5 か年全体の研究計画ならびに令和 3 年度の研究計画の策定、(ii) 本研究課題で使用する GPU 計算機の導入、(iii) 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 STAR-E プロジェクト内での連携促進のためのコミュニケーションツールの設置という 3 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) 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 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

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人東京大学地震研究所	准教授	長尾 大道
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
国立大学法人東京大学地震研究所	教授	小原 一成
国立大学法人東京大学地震研究所	教授	加藤 愛太郎
国立大学法人東京大学地震研究所	准教授	鶴岡 弘
国立大学法人東京大学地震研究所	准教授	中川 茂樹
国立大学法人東京大学地震研究所	助教	伊藤 伸一
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
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

(c) 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<sup>1)</sup>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、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<sup>2,3)</sup>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。

(d) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 令和3年度：

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<sup>1)</sup>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<sup>2,3)</sup>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：

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<sup>1)</sup>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開発を開始する。

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<sup>2,3)</sup>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。

3) 令和5年度：

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<sup>1)</sup>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<sup>2,3)</sup>への転移学習の実装を開始する。

4) 令和6年度：

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<sup>1)</sup>、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<sup>2,3)</sup>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。

(e) 令和3年度業務目的

人工智能に基づく波形信号データからの地震・微動検測技術の開発への第一歩として、文献調査等を通じて、深層学習器の設計に関する検討を行う。

また、地下構造モデリング技術の開発へ向けて、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<sup>2,3)</sup>の核心をなす地震波伝播シミュレーションコードの高速化を図る。

## (2) 令和3年度の成果

### (a) 業務の要約

人工智能に基づく波形信号データからの地震・微動検測技術の開発に向けて、令和3年度は既存研究の文献調査を開始した。地震検測技術については、米国・カリフォルニア工科大学の研究グループが、カリフォルニアの地震データで学習させた先駆的な深層学習器 Generalized Phase Detection (GPD)法を公開している<sup>4)</sup>。本研究課題では、まずはGPD法を首都圏地震観測網 MeSO-net の3観測点における地震波形信号データへ試験的に適用したところ、正答率はP波はほぼ100%を達成し、S波は79%とそれほど高くないものの、一定の地震検測は可能であることを確認した。日本の地震波形信号データによる転移学習により、日本に適した深層学習器の構築可能性が示唆された。

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<sup>2,3)</sup>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には様々な制約が含まれていた。今後の応用展開において障壁となることが予想されるため、制約の大幅な緩和と高速化に向けたプログラム改良に着手した。

### (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波形信号データからの地震検測手法について、文献調査を行った。そのうち、公開されている深層学習器を首都圏地震観測網 MeSO-net のデータに適用したところ、正答率はやや低いものの、地震波検測に成功する事例があることを確認した。

#### 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<sup>2,3)</sup>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、ならびに計算時間の大幅な短縮を念頭に、コード全体の FORTRAN 90 への移植を開始した。

#### (c) 結論ならびに今後の課題

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、および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<sup>2,3)</sup>に基づく地下構造モデリング技術は、適用対象の地域ごとに深層学習器を構築する必要があると思われ、いずれも転移学習がキーテクノロジーとなる。令和3年度は、まずはそれぞれの技術の基盤部分のプログラムについて動作確認と改良を行い、今後の転移学習に向けた準備を行った。

令和4年度以降は、基盤部分を完成させ、転移学習アルゴリズムの実装と実際の地震波形信号データの学習を実行することにより、各地域に最適化した深層学習器の構築を目指す。

#### (d) 引用文献

- 1) Yano, K., Shiina, T., Kurata, S., Kato, A., Komaki, F., Sakai, S., and Hirata, N., Graph-Partitioning Based Convolutional Neural Network for Earthquake Detection Using a Seismic Array, *J. Geophys. Res. - Solid Earth*, Vol. 126, Issue 5, doi:10.1029/2020JB020269, 2021.
- 2) Kano, M., Nagao, H., Ishikawa, D., Ito, S., Sakai, S., Nakagawa, S., Hori, M., and Hirata, N., Seismic wavefield imaging based on the replica exchange Monte Carlo method, *Geophys. J. Int.*, Vol. 208, pp. 529-545, doi:10.1093/gji/ggw410, 2017.
- 3) Kano, M., Nagao, H., Nagata, K., Ito, S., Sakai, S., Nakagawa, S., Hori, M., and Hirata, N., Seismic wavefield imaging of long-period ground motion in the Tokyo Metropolitan area, Japan, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, Vol. 122, doi:10.1002/2017JB014276, 2017.
- 4) Ross, Z. E., Meier, M-A., Hauksson E., and Heaton, T. H., Generalized Seismic Phase Detection with Deep Learning, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, Vol. 108, pp. 2894-2901, doi:10.1785/0120180080, 2018.

#### (e) 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

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・
-------------	-------	--------	------	-----

目、口頭・ポスター発表の別		(学会等名)	時期	外の別
Optimization and uncertainty quantification based on the four-dimensional variational method (口頭発表)	Nagao, H.	International Workshop on the Integration of (Simulation + Data + Learning): Towards Society 5.0 by h3-Open-BDEC	令和3年 12月3日	国外

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載  
なし

(f) 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 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

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人東京大学地震研究所	准教授	長尾 大道
国立大学法人東京大学地震研究所	教授	小原 一成
国立大学法人東京大学地震研究所	准教授	鶴岡 弘
国立大学法人東京大学地震研究所	助教	伊藤 伸一

(c) 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。

(d) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 令和3年度：

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、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。

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。

(e) 令和3年度業務目的

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、高感度地震観測網 Hi-net の地震波形信号データならびに地震波形古記録からの地震波形画像データの生成を開始する。これまでに開発した深層学習器のプロトタイプの動作試験を実施し、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関する既存研究の調査を基に、深層学習器の改良に向けた検討を行う。

(2) 令和3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 熊野観測所（三重県）の地震計によって紙に直接記録された地震波形から、地震波形画像データの生成を開始した。地震・微動検出のための深層学習器の学習ならびにテストを高効率に実施するた

め、実際の地震波形画像データを模倣した人工画像データを生成するプログラムを開発した。畳み込みニューラルネットワーク (CNN) に人工画像データに基づく学習とテストを実施したところ、人工画像データに含まれている地震や微動を正しく検出することを確認した<sup>1)</sup>。

(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 熊野観測所（三重県）の地震計によって紙に直接記録された地震波形から、地震波形画像データの生成を開始した。

2) サブテーマ「地震・微動検出技術の開発」

実際の地震波形画像データを参考に生成した人工画像を、CNN の一種である残差学習器 (Residual Network; ResNet) に学習させた (図 5)。モデルの予測値を可視化するための Gradient-weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM) のヒートマップを作成したところ、CNN は人工画像中の微動の有無を正確に判定できることを確認した<sup>2)</sup> (図 6)。

(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、実際の地震波形信号データおよび古記録から地震波形画像データに加え、これらを模倣した人工画像データを生成した。人工画像データセットの 8 割のデータを ResNet に学習させ、残る 2 割のデータを用いて微動検出テストを実施したところ、ほぼ 100% の確率で微動を正しく検出することを確認した。今後は、地震波形画像データ生成を完了させ、実データ

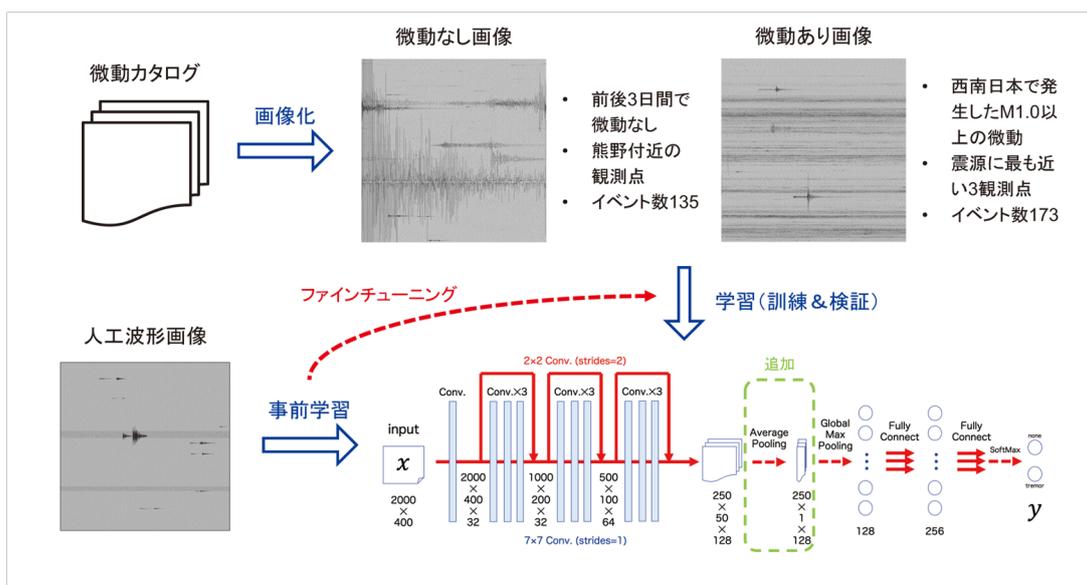


図 5 : 地震波形画像データからの微動検出のための深層学習器の構築

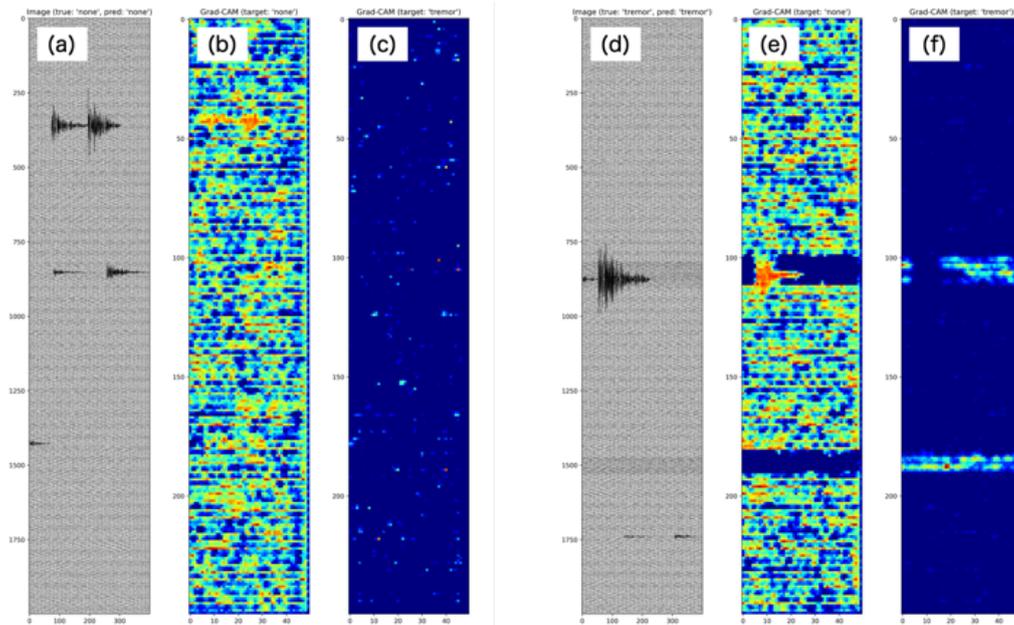


図6：数値実験に基づく微動検出テストの結果<sup>1)</sup> ((a) (d)入力画像、(b) (e)微動が含まれないと判定された領域、(c) (f)微動が含まれると判定された領域)

から生成した地震波形画像データを大量に学習させることによって ResNet を大幅に強化する。特に古記録からの地震・微動検出を進めることにより、既存のものとは異なる観点からの地震・微動カタログの構築を目指す。

#### (d) 引用文献

- 1) Nakano, M., Sugiyama, D., Hori, T., Kuwatani, T., & Tsuboi, S., Discrimination of seismic signals from earthquakes and tectonic tremor by applying a convolutional neural network to running spectral images. *Seismol. Res. Lett.*, Vol. 90, pp. 530-538. doi:10.1785/0220180279, 2019.
- 2) Kaneko, R., Nagao, H., Ito, S., Obara, K., and Tsuruoka, H.: Convolutional neural network to detect deep low-frequency tremors from seismic waveform images, *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 12705, pp. 31-43, doi:10.1007/978-3-030-75015-2\_4, 2021.

#### (e) 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

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
Convolutional neural network to detect deep low-frequency tremors from seismic waveform	Kaneko, R.	PAKDD2021 Workshop on Machine Learning for	令和3年5月1日	国外

images (口頭発表)		Measurement Informatics		
Convolutional neural network to detect deep low-frequency tremors from seismic waveform images (ポスター発表)	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
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 (ポスター発表)	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

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
Convolutional neural network to detect deep low-frequency tremors from seismic waveform images	Kaneko, R., Nagao, H., Ito, S., Obara, K., Tsuruoka, H.	Lecture Notes in Computer Science	令和3年5月3日	国外

(f) 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

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 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

#### (b) 担当者

所属機関	役職	氏名
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
国立大学法人大阪大学大学院基礎工学研究科	講師	寺田 吉壺
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
国立大学法人東京大学地震研究所	准教授	長尾 大道
国立大学法人東京大学地震研究所	助教	伊藤 伸一

#### (c) 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。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<sup>2,3)</sup>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 a)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。

#### (d) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

##### 1) 令和3年度

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<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地震に対する統計モデル推定手法の理論保証を与える。具体的には、推定されたパラメータの一致性や漸近正規性などの統計的性質を有することを示す。一般化ガンマ分布などの、通常地震のマグニチュードに関する統計則である Gutenberg-Richter 則を包含する、微動のマグニチュードに関する統計則の候補を見出す。

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する。

### 3) 令和5年度

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す。通常地震に対する欠測値を考慮した提案手法は Gutenberg-Richter 則に対してのみ適用可能であるため、候補とした微動のマグニチュードに関する統計則にも適用できるように拡張する。

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、大規模な数値実験を通じて有用性を検証する。

### 4) 令和6年度：

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。

## (e) 令和3年度業務目的

既存のガウス過程回帰モデルに基づく地震頻度分布推定手法は最適化に時間を要するため、従来のマルコフ連鎖モンテカルロ法に頼らない、本震直後の迅速な推定を可能とする高速計算アルゴリズムの開発を進める。

また、4次元変分法は大規模な地震波動場に対してデータ同化を行う上で有力な手法であるが、既存手法は精度・計算メモリ・計算量の面で問題があった。令和3年度は、信頼性のある地震波動場データ同化の実現のために精度・計算メモリ・計算量を大幅に改善する4次元変分法アルゴリズムを開発する。

## (2) 令和3年度の成果

### (a) 業務の要約

既存のガウス過程回帰モデルに基づく地震頻度分布推定手法は最適化に時間を要するため、従来のマルコフ連鎖モンテカルロ法に頼らない、本震直後の迅速な推定を可能とする高速計算アルゴリズムの開発を進める。これまでに、余震検出確率に対しガウス過程回帰を用いてモデル化することにより、従来の手法より表現力が高く近似計算を必要としない余震分布のノンパラメトリックベイズ推定手法を開発した<sup>1)</sup>。しかし、この手法はマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いており、パラメータの推定に多大な時間を要する。そのため、通常のカドラン関数ではなく疑似カドラン関数を構成し最大化することにより、これまで1日程度を要していた計算時間を、1分程度に大幅に短縮することに成功した。

また、地震波動場変分法データ同化ではアジョイントモデルと呼ばれる方程式群の数

値積分が必要となるが、これまで適切な数値積分法は知られておらず、選択した数値積分法によっては精度を悪化させ、計算メモリ・計算量を不要に増大させてしまう問題があった。この問題を解決するため、数値解析の理論に基づき、地震波動場に対する変分法データ同化における最適な数値積分の方法を提案した<sup>3)</sup>。これにより既存の変分法データ同化計算アルゴリズムに対して、数学的に最高精度かつ最高効率な地震波動場変分法データ同化計算が可能になった。

## (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」

提案モデルのパラメータ推定にはマルコフ連鎖モンテカルロ法を用いており、各ステップでデータ数の3乗オーダーの時間を要するため、即時推定をすることができない問題があった。そこで、複合尤度関数とよばれる擬似尤度関数を最大化することにより、マルコフ連鎖モンテカルロ法を必要とせず、さらにデータ数の2乗オーダーでパラメータ推定が可能な手法を開発した。これにより、例えば2004年中越地震のデータを推定するために要する時間を、1日程度から1分程度に大幅に短縮することが可能となった。

図7は、2016年熊本地震の前震と本震に対して提案手法を適用した結果である。赤線は推定されたその時刻において確率50%で余震を検出するために必要なマグニチュード、薄赤色の領域はその99.9%信用領域である。提案手法の赤線は、緑点線で表される先行研究のパラメトリックモデルに比して、より詳細な変動を捉えていることが分かる。しかし同時にこの結果は、熊本地震の余震のデータは非常に「きれい」であるため、パラメトリックなモデル（緑点線）でも十分説明可能であることを示唆している。

### 2) サブテーマ「微動時空間モデリング技術の開発」

本サブテーマは、上述の1) サブテーマ「地震時空間モデリング技術の開発」の成果を基盤とするため、令和3年度は次年度以降の解析に向けた微動カタログの整理を行った。

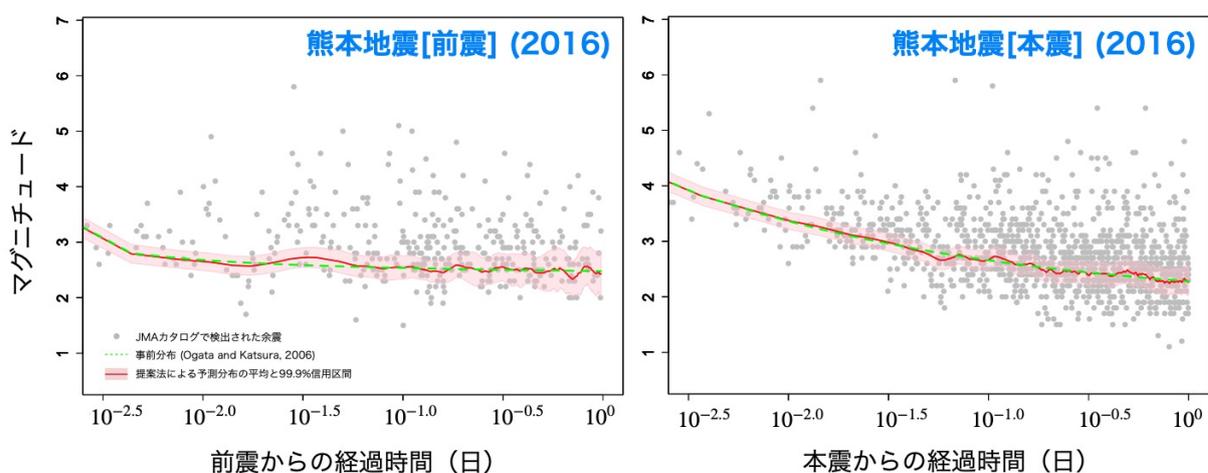


図7：予測された50%の余震を検出するために必要なマグニチュード

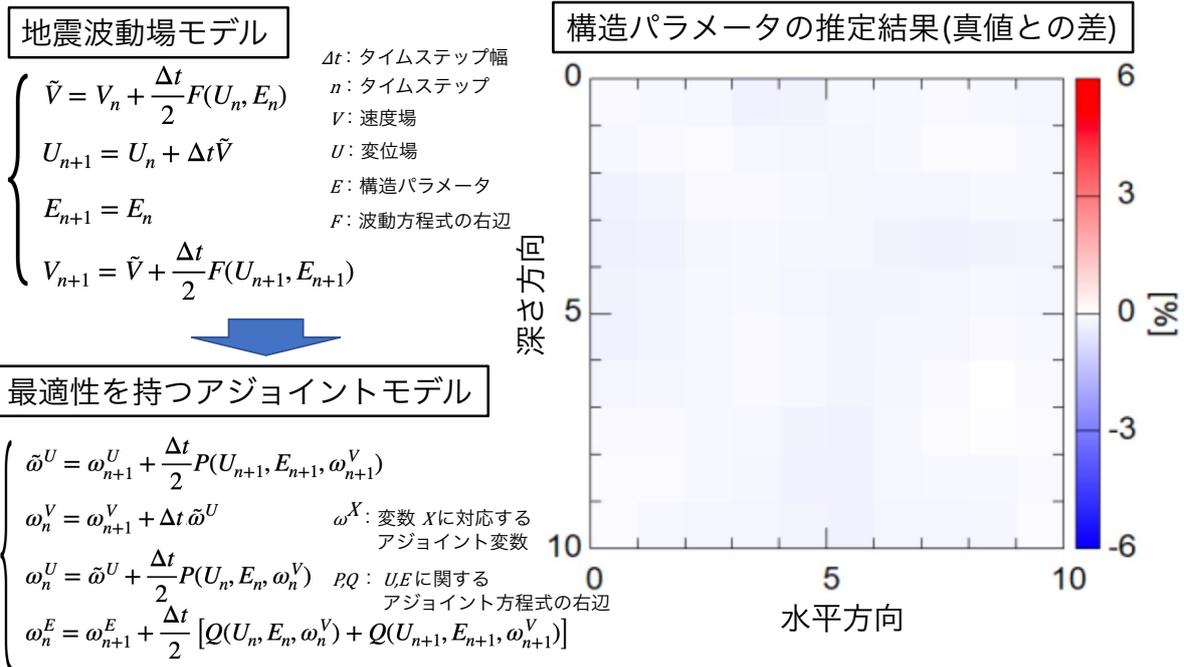


図 8 : 提案アルゴリズムと 2 次元地震波動場データ同化による構造パラメータ推定の結果

### 3) サブテーマ「地震波動場データ同化手法の開発」

数値解析の理論に基づく地震波動場変分法データ同化アルゴリズムを構築した（図 8）。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<sup>2)</sup>である。これまで、アジョイントモデルの数値積分法の設計に対して明確な選択基準が存在しておらず、専門家による数理的・物理的直観に基づいて数値積分法の選択が行われていた。そのため、選択した数値積分法によっては推定量の精度を悪化させ、計算メモリ・計算量を冗長に増大させてしまうことがあるという問題が知られていた。本テーマでは、近年提案された数値解析の理論<sup>3)</sup>に基づき、地震波動場に対する変分法データ同化における最適な数値積分の方法を提案した。提案された手法は精度・計算メモリ・計算量の最適性が保証され、既存の変分法データ同化計算アルゴリズムに比べて高精度かつ高効率な地震波動場データ同化計算が可能になった。令和 3 年度は、このアルゴリズムを用いた地震波動場データ同化を実装し、簡単な 2 次元地震波動場データ同化問題へ適用し検証した。

#### (c) 結論ならびに今後の課題

余震検出確率をより柔軟な形でモデリングし擬似尤度関数を用いて推定することで、即時推定可能な余震分布の高精度推定手法を開発した。今後は推定されたパラメータの一致性や漸近正規性といった理論保証を与える。また本結果を基盤とし、2) サブテーマ「微動時空間モデリング技術の開発」を始動する。

また、数値解析の理論に基づき、既存の地震波動場変分法データ同化アルゴリズムを超えて精度・計算メモリ・計算量の面で最高効率のアルゴリズムを構築した。本アルゴリ

ズムは数学的な最適性が保証されているため、さらなる高効率化を目指すためには4次元変分法データ同化単一の枠組みでは限界がある。その限界を超えることを目的とし、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などの他のアルゴリズムと組み合わせることにより、大規模な実問題への現実的な適用を視野に入れた計算量軽減法の構築を開始する。

(d) 引用文献

- 1) Morikawa, K., Nagao, H., Ito, S., Terada, Y., Sakai, S., and Hirata, N. Forecasting temporal variation of aftershocks immediately after a main shock using Gaussian process regression, *Geophys. J. Int.*, Vol. 226, Issue 2, pp. 1018-1035, doi:10.1093/gji/ggab124, 2021.
- 2) Ito, S., Nagao, H., Yamanaka, A., Tsukada, Y., Koyama, T., Kano, M., and Inoue, J.: Data assimilation for massive autonomous systems based on a second-order adjoint method, *Phys. Rev. E*, Vol. 94, 043307, doi:10.1103/PhysRevE.94.043307, 2016.
- 3) Ito, S., Matsuda, T., and Miyatake, Y.: Adjoint-based exact Hessian computation, *BIT Numerical Mathematics*, Vol. 61, pp. 503-522, 2021.

(e) 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

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
Adjoint-based Uncertainty Quantification of Frictional Inhomogeneity on Slow-Slipping Fault (ポスター発表)	Ito, S., Kano, M., Nagao, H	Asia Oceania Geosciences Society, 18th Annual Meeting	令和3年 8月3日	国外
Adjoint-based uncertainty quantification of frictional inhomogeneity on slow-slipping fault (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 2021 年大会	令和3年 6月3日	国内
Forecasting temporal variation of aftershocks immediately after a main shock using Gaussian process regression (ポスター発表)	Morikawa, K., Nagao, H., Ito, S., Terada, Y., Sakai, S. and Hirata, N.	日本地球惑星科学連合 2021 年大会	令和3年 6月3日	国内
Forecasting temporal variation of aftershocks immediately after a main shock using Gaussian	Morikawa, K., Nagao, H., Ito, S., Terada, Y.,	Asia Oceania Geosciences Society, 18th Annual	令和3年 8月3日	国外

process regression (口頭発表)	Sakai, S. and Hirata, N.	Meeting		
ガウス過程回帰を用いた本震直後における余震分布の推定 (口頭発表)	森川耕輔、長尾大道、伊藤伸一、寺田吉壱、酒井伸一、平田直	2021年度統計関連学会連合大会	令和3年9月7日	国内
ガウス過程回帰を用いた本震直後における余震分布の推定 (口頭発表)	森川耕輔、長尾大道、伊藤伸一、寺田吉壱、酒井伸一、平田直	日本地震学会2021年度秋季大会	令和3年10月14日	国内

2) 学会誌・雑誌等における論文掲載

なし

(f) 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 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

(b) 担当者

所属機関	役職	氏名
国立大学法人東京大学地震研究所	准教授	長尾 大道
国立大学法人東京大学地震研究所	教授	小原 一成
国立大学法人東京大学地震研究所	准教授	鶴岡 弘
国立大学法人東京大学地震研究所	助教	伊藤 伸一

(c) 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。

(d) 5か年の年次実施計画（過去年度は、実施業務の要約）

1) 令和3年度：

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試験的に実装する。

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。

(e) 令和3年度業務目的

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う。

また、高効率な地震・微動検測を実現するため、深層学習器に学習させるデータセット生成に利用する観測点を適切に選択する観測点選択アルゴリズムの方向性について検討する。

## (2) 令和3年度の成果

### (a) 業務の要約

地震データ解析に人工知能技術を導入するためには、その結果を経験豊かな地震研究者の目によって検証する「人工知能と自然知能の対話」が肝要である。令和3年度は、この対話の方法を確立するための準備研究を実施した。特に、地震波形画像データから深層学習器によって検出した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、正解率が極めて高いと考えられることを確認した。

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、令和3年度は、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の開発に着手した。地下構造モデリング技術を例に、簡単な数値実験に基づいて観測点選択アルゴリズムの方向性について探ったところ、限られた観測点のデータから地震波動場を十分に再構成できる場合があることを確認した。これ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も応用できると考えられる。

### (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」

2.3において、深層学習器<sup>1)</sup>に基づき、地震波形画像データから微動と判定された振動現象を多数抽出した。それを経験豊かな地震研究者の目視によって、真に微動と考えられるかどうかについて、検証を行った。その結果、微動判定の正解率が極めて高いと考えられることが分かった。

#### 2) サブテーマ「観測点選択アルゴリズムの開発」

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。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、どのような観測点選択を行えば波動場を再現することが可能かについて、見通しを立てることができた。

### (c) 結論ならびに今後の課題

令和3年度は、人工知能技術を地震波形信号データおよび地震波形画像データに適用して得られた結果を、自然知能によって検証する方法論の構成に関する準備研究を実施した。特に、地震波形画像データから深層学習器によって検出した微動の候補が、経験豊かな地震研究者の目によって微動であることが確認されたことは、重要な成果である。また、地下構造モデリングに関する数値実験により、観測点選択アルゴリズムに見通しを立てることができた。

今後は、地震研究における人工知能と自然知能の対話の方法論、ならびに観測点選択アルゴリズムを、実データに基づいて確立していくことが課題となる。

### (d) 引用文献

- 1) Kaneko, R., Nagao, H., Ito, S., Obara, K., and Tsuruoka, H.: Convolutional neural network to detect deep low-frequency tremors from seismic waveform images, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 12705, pp. 31-43, doi:10.1007/978-3-030-75015-2\_4, 2021.

(e) 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

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
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（ポスター発表）	金子亮介、長尾大道、伊藤伸一、鶴岡弘、小原一成	第16回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

なし

(f) 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

本研究課題の開始にあたり、令和3年度は頻繁な定例会を通じて本研究課題の5か年全体の研究計画ならびに令和3年度の研究計画の策定を行った。それに基づき、本研究課題で使用する計算機環境の整備、ならびに本研究課題を国内外に周知するための広報媒体の制作とSTAR-Eプロジェクト内の連携促進のためのコミュニケーションツールの設置を実施した。これにより、5か年にわたり本研究課題を円滑に推進するための研究環境や人的ネットワークの構築などの体制を整えることができた。

令和3年度の研究計画に基づき、各研究項目については、主に1)人工知能に基づく地震・微動検出技術の開発に向けた、地震波形信号データならびに地震波形古記録を含む地震波形画像データの整備と生成の開始、2)従来の深層学習器の試験的実行と、手法の改良に向けた検討、3)ガウス過程回帰による通常地震に関する統計モデル推定手法の高速化、4)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、5)人工知能と自然知能の対話・協働に向けた方法論の構築、という準備研究を実施した。いずれも予想の範囲内の結果が得られており、令和3年度の研究計画は十分に完遂したものとする。

本研究課題の5か年全体の研究計画に照らし合わせると、特に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ついては、地震波形古記録への適用も既に開始となっており、自然知能との対話を通じて深層学習器の修正に向けた議論も進められているなど、かなり先行して進捗している。また、地震の統計モデル推定手法の構築に関しても、推定に要する計算時間を桁で圧縮する計算手法を開発しており、既に様々な地震イベントへの適用も開始している。この2つの研究テーマについては、今後、当初の想定よりも研究が早く進捗することも十分に想定される状況である。他の研究テーマについても特に遅れはなく、当初の想定通りの進捗状況と言える。

今後は、様々な情報科学技術に基づく各手法を令和3年度に導入した計算機において実装し、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・協働を通じて、その高度化を図っていく。また、本研究課題によって得られた研究成果や動向を、SYNTHA-Seisのホームページやニュースレターにより発信していく。

#### 4. 活動報告

- SYNTHA-Seis キックオフ会議、令和3年11月24日、オンライン
- STAR-E キックオフ会議、令和3年12月13日、オンライン
- 定例会、令和3年7月21日、10月20日、12月27日、令和4年1月11日、2月9日、3月8日、オンライン
- 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）第一回研究フォーラム、令和4年2月18日、オンライン

#### 5. むすび

本研究課題には地震学と情報科学から15名の専門家が集結し、人工知能と自然知能の両面から地震研究を展開している。元来、深層学習は画像からの特徴抽出に長けていることから、令和3年度は、地震波形画像データから微動抽出を行う深層学習器の開発を先行して進めた。他の研究項目においても準備研究が進んでおり、いずれも十分な成果が挙げられている。なお、これらの研究を進めるにあたっては、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。

本研究課題の究極の将来構想は、開発した手法群を人工知能と自然知能の協働に基づき地震・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し、地震・微動活動の準リアルタイムでの常時監視を可能にすることにより、わが国の地震研究と地震防災に大きく貢献することである。これに向けて、令和4年度以降は、実データに基づく手法の高度化を行っていく。

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
Convolutional neural network to detect deep low-frequency tremors from seismic waveform images（口頭発表）	Kaneko, R.	PAKDD2021 Workshop on Machine Learning for Measurement Informatics	令和3年5月11日	国外
Adjoint-based uncertainty quantification of frictional inhomogeneity on slow-slipping fault（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2021年大会	令和3年6月3日	国内
Forecasting temporal variation of aftershocks immediately after a main shock using Gaussian process regression（口頭発表）	Morikawa, K., Nagao, H., Ito, S., Terada, Y., Sakai, S., and Hirata, N.	日本地球惑星科学連合2021年大会	令和3年6月3日	国内
Convolutional Neural Network to Detect Deep Low-Frequency Tremors from Seismic Waveform Images	金子亮介, 長尾大道, 伊藤伸一, 小原一成, 鶴岡弘	日本地球惑星科学連合2021年大会	令和3年6月3日	国内
On the Verifiable Identification Condition in NMAR Missing Data Analysis.（口頭発表）	Beppu, K. and Morikawa, K.	4th International Conference on Econometrics and Statistics	令和3年6月26日	国外
Minimum sharpness: Scale-invariant parameter-robustness of neural networks（ポスター発表）	Ibayashi, H., Hamaguchi, T., and Imaizumi, M.	ICML Workshop on Theoretic Foundation, Criticism, and Application Trend of Explainable AI	令和3年7月6日	国外
深層学習の理論（口頭発表）	今泉允聡	松尾研セミナー	令和3年7月8日	国内
Implicit Regularization and Over-parameterization（口頭発表）	Imaizumi, M.	知の物理学センター	令和3年7月13日	国外
On the Verifiable Identification Condition in NMAR Missing Data Analysis.（口頭発表）	Beppu, K. and Morikawa, K.	10th World Congress in Probability and Statistics.	令和3年7月20日	国外
Convolutional neural network to detect deep low-frequency tremors from seismic waveform images（ポスター発表）	Kaneko, R.	Asia Oceanina Geosciences Society 2021 18th Annual Meeting	令和3年8月3日	国外
Adjoint-based Uncertainty Quantification of Frictional Inhomogeneity on Slow-Slipping	Ito, S., Kano, M., and Nagao, H	Asia Oceanina Geosciences Society 2021 18th Annual Meeting	令和3年8月3日	国外

Fault (ポスター発表)				
Forecasting temporal variation of aftershocks immediately after a main shock using Gaussian process regression (口頭発表)	Morikawa, K., Nagao, H., Ito, S., Terada, Y., Sakai, S., and Hirata, N.	Asia Oceania Geosciences Society 2021 18th Annual Meeting	令和3年8月3日	国外
情報計測に基づく地震研究の深化	長尾大道	情報計測オンラインセミナー	令和3年8月7日	国内
確率微分方程式モデルの統計的推測の発展を目指して (口頭発表)	内田雅之	2021年度統計関連学会連合大会	令和3年9月6日	国内
深層学習の原理を明らかにする理論の試み (口頭発表)	今泉允聡	2021年度統計関連学会連合大会	令和3年9月6日	国内
最大射影型 Wasserstein 距離に対する推定と信頼区間の構成 (口頭発表)	岡野遼, 今泉允聡	2021年度統計関連学会連合大会	令和3年9月7日	国内
関数データの分類問題における完全分類条件と収束レート解析 (口頭発表)	若山智哉, 今泉允聡	2021年度統計関連学会連合大会	令和3年9月7日	国内
ガウス過程回帰を用いた本震直後における余震分布の推定 (口頭発表)	森川耕輔, 長尾大道, 伊藤伸一, 寺田吉彦, 酒井慎一, 平田直	2021年度統計関連学会連合大会	令和3年9月7日	国内
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
標本調査における包含確率の情報を用いたセミパラメトリック漸近有効推定量の提案 (口頭発表)	森川耕輔, Jae Kwang Kim	2021年度統計関連学会連合大会	令和3年9月9日	国内
On Gaussian Approximation on M-Estimator (口頭発表)	Imaizumi, M.	International Chinese Statistical Association	令和3年9月11日	国外
関数推定の理論に基づく深層学習の原理解析 (口頭発表)	今泉允聡	微分方程式とデータサイエンス研究会	令和3年9月13日	国内
クラスター展開モデルによる構造予測 (口頭発表)	福島孝治, 黒田文彬, 三宅隆	日本物理学会 2021年秋季大会	令和3年9月21日	国内
乾燥亀裂パターンの動的統計則に現れる相転移的性質	伊藤伸一, 中原明生, 湯川諭	日本物理学会 2021年秋季大会	令和3年9月22日	国内
重みパラメータを特異値分解で与えた深層ボルツマンマシンの相構造の解析 (口頭発表)	市川佑馬, 福島孝治	日本物理学会 2021年秋季大会	令和3年9月23日	国内
深層学習の原理を明らかにする理論の試み (口頭発表)	今泉允聡	中央大学理工学研究所特別講演会	令和3年10月11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4日	国内
シンプレクティックアジョイント法に基づく超高精度不確実性定量化法	伊藤伸一	日本地震学会 2021年度秋季大会	令和3年10月4日	国内

と地震学への応用				
ガウス過程回帰を用いた本震直後における余震分布の推定（口頭発表）	森川耕輔, 長尾大道, 伊藤伸一, 寺田吉彦, 酒井慎一, 平田直	日本地震学会 2021 年度秋季大会	令和 3 年 1 0 月 1 4 日	国内
機械学習の数理（口頭発表）	今泉允聡	数学カフェ	令和 3 年 1 0 月 2 1 日	国内
Deep Neural Networks Learn Non-Smooth Functions Effectively（口頭発表）	今泉允聡	細谷賞セミナー	令和 3 年 1 1 月 4 日	国内
Nonparametric Invertible Regression Between Closed Hypercubes（口頭発表）	奥野彰文, 今泉允聡	IBIS2021	令和 3 年 1 1 月 1 0 日	国内
Gradient Descent Algorithm with Path Kernel-based Machine（口頭発表）	西澤渉, 今泉允聡	IBIS2021	令和 3 年 1 1 月 1 0 日	国内
Optimization and uncertainty quantification based on the four-dimensional variational method（口頭発表）	Nagao, H.	International Workshop on the Integration of (Simulation + Data + Learning): Towards Society 5.0 by h3-Open-BDEC	令和 3 年 1 2 月 3 日	国外
深層学習の原理を明らかにする理論の試み（口頭発表）	今泉允聡	顕微鏡計測インフォマティクス部会	令和 3 年 1 2 月 1 0 日	国内
クラスタリングにおける汎用的な計算コスト削減法について（口頭発表）	寺田吉彦, 山本倫生	2021 年度日本分類学会シンポジウム	令和 3 年 1 2 月 1 1 日	国内
Karhunen-Loève 展開に基づく関数データのリサンプリング法について（ポスター発表）	佐々木将輝, 寺田吉彦	2021 年度日本分類学会シンポジウム	令和 3 年 1 2 月 1 2 日	国内
AI の原理を解き明かす新理論（口頭発表）	今泉允聡	JST 理事長記者会見	令和 3 年 1 2 月 1 5 日	国内
Nonparametric Invertible Regression Between Closed Hypercubes（口頭発表）	Imaizumi, M., and Okuno, A.	Computational and Methodological Statistics	令和 3 年 1 2 月 1 7 日	国外
高次元データ同化とその発展	伊藤伸一	高次元データ同化とその発展	令和 4 年 1 月 1 2 日	国内
日本の博士課程～十人十色の選択肢～（口頭発表）	手嶋毅志, 石田隆, 今泉允聡, 根上春, 横井祥	統計・機械学習若手シンポジウム	令和 4 年 2 月 1 0 日	国内
磁石材料探索に向けた計算科学的アプローチ（口頭発表）	福島孝治	第 236 回研究会／第 69 回化合物新磁性材料専門研究会「新しい磁性研究のための量子ビームと計算科学の連携利用」	令和 4 年 2 月 1 1 日	国内
Fast Approximation for large-scale clustering（口頭発表）	Terada, Y., and Yamamoto, M.	The 11th Conference of the IASC-ARS	令和 4 年 2 月 2 3 日	国外
畳み込みニューラルネットワーク	金子亮介, 長尾大	日本統計学会春季集会	令和 4 年 3 月 5 日	国内

による地震波形古記録からの深部低周波微動の検出（ポスター発表）	道, 伊藤伸一, 鶴岡弘, 小原一成			
階層的な正則化による圧縮センシングにおける相転移の解析（口頭発表）	長野泰志, 福島孝治	日本物理学会第77回年次大会	令和4年3月5日	国内
学習過程の深層ボルツマンマシンの統計力学的解析（口頭発表）	市川佑馬, 福島孝治	日本物理学会第77回年次大会	令和4年3月15日	国内
薄膜X線ラウエ振動の膜厚混合分布モデルによるベイズ推定（口頭発表）	崎下雄稀, 鍋島冬樹, 前田京剛, 福島孝治	日本物理学会第77回年次大会	令和4年3月15日	国内
Stability of Deep Network Estimator for Nonparametric Regression with Adversarial Training（口頭発表）	Imaizumi, M.	Workshop on Functional Inference and Machine Intelligence	令和4年3月29日	国外
Exponential escape efficiency of SGD from sharp minima in non-stationary regime（ポスター発表）	Ibayashi, H., and Imaizumi, M.	Workshop on Functional Inference and Machine Intelligence	令和4年3月30日	国外

## 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
Convolutional neural network to detect deep low-frequency tremors from seismic waveform images	Kaneko, R., Nagao, H., Ito, S., Obara, K., and Tsuruoka, H.	Lecture Notes in Computer Science	令和3年5月3日	国外
Dynamic visualization for L1 fusion convex clustering in near-linear time	Bingyuan Zhang, Jie Chen, and Terada, Y.	Proceedings of the Thirty-Seventh Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence	令和3年7月21日	国外
Estimation of Neuronal Dynamics of Izhikevich Neuron Models from Spike-Train Data with Particle Markov Chain Monte Carlo Method	Inoue, H., Hukushima, K., and Omori, T.	J. Phys. Soc. Jpn. 90, 104801 (2021)	令和3年9月10日	国内
Improved Generalization Bounds of Group Invariant / Equivariant Deep Networks via Quotient Feature Spaces	Sannai, A., Imaizumi, M., and Kawano, M.	PMLR: Uncertainty on Artificial Intelligence	令和3年10月1日	国外
Frechet Kernel for Trajectory Data Analysis	Takeuchi, K., Imaizumi, M., Kanda, S., Fujii, K., Ishihata, M., Maekawa, T., Yoda, K., and Tabei, Y.	ACM SIGSPATIAL	令和3年11月1日	国外
Data-driven sensitivity analysis in surface structure determination using total-reflection high-energy	Hoshi, T., Sakata, D., Oie, S., Mochizuki, I., Tanaka, S.,	Computer Physics Communications, 271, 108186, 2022	令和3年12月13日	国外

positron diffraction (TRHEPD)	Hyodo, T., and Hukushima, K.			
Learning Causal Relationships from Conditional Moment Restrictions by Importance Weighting	Kato, M., Imaizumi, M., McAlinn, K., Yasui, S., and Kakehi, H.	International Conference on Learning Representations	令和4年1月1日	国外
Estimating Distributions of Parameters in Nonlinear State Space Models with Replica Exchange Particle Marginal Metropolis-Hastings Method	Inoue, H., Hukushima, K., and Omori, T.	Entropy 24(1):115	令和4年1月12日	国外
Adaptive testing method for ergodic diffusion processes based on high frequency data	Kawai, T., and Uchida, M.	Journal of Statistical Planning and Inference	令和4年3月1日	国外
Hypothesis Test and Confidence Analysis with Wasserstein Distance on General Dimension	Imaizumi, M., Ota, H., and Hamaguchi, T.	Neural Computation	令和4年3月30日	国外
Advantage of Deep Neural Networks for Estimating Functions with Singularity on Hypersurface	Imaizumi, M., and Fukumizu, K.	Journal of Machine Learning Research	令和4年3月30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。