様式 B-4

2025 年度 共同利用実施報告書（研究実績報告書）

（特定共同研究(B)）

１．課題番号　２０２５－B－０１

２．研究課題名（和文、英文の両方をご記載ください。）

和文：科学的機械学習（SciML）による固体地球科学の加速

英文：Accelerating Solid Earth Science through Scientific Machine Learning (SciML)

３．研究代表者 所属・氏名　　海洋研究開発機構　縣 亮一郎

（地震研究所 担当教員名）　伊藤 伸一

４．研究組織の詳細（研究代表者を含め、当課題に参加した全ての研究者を記載し、必要に応じ行を追加してください。）

氏名	所属・職名	担当
縣 亮一郎	海洋研究開発機構／副主任研究員	代表者
小屋口 剛博	東京大学地震研究所／名誉教授	参加者
長尾 大道	東京大学地震研究所／准教授	参加者
福田 淳一	東京大学地震研究所／准教授	参加者
染矢 真好	東京大学地震研究所／大学院生	参加者
楠井 俊朗	東京大学地震研究所／大学院生	参加者
加納 将行	京都大学防災研究所／准教授	参加者
石塚 師也	京都大学大学院工学研究科／講師	参加者
髙井 翔平	京都大学理学研究科／大学院生	参加者
石毛 翔	京都大学理学研究科／大学院生	参加者
堀 高峰	海洋研究開発機構／センター長	参加者
桑谷 立	海洋研究開発機構／上席研究員	参加者
杉浦 望実	海洋研究開発機構／主任研究員（シニア）	参加者
佐藤 大祐	海洋研究開発機構／研究員	参加者

平原 和朗	理化学研究所／嘱託職員	参加者
岡﨑 智久	理化学研究所／研究員	参加者
中尾 篤史	筑波大学システム情報系知能機能工学域／助教	参加者
出口 翔大	筑波大学システム情報系／日本学術振興会特別研究員 PD	参加者
樋口 知之	中央大学理工学部／教授	参加者
岩田 貴樹	県立広島大学大学教育実践センター／准教授	参加者
中野 慎也	統計数理研究所／教授	参加者
宮武 勇登	大阪大学・D3 センター／准教授	参加者
Jun Su	海洋研究開発機構／ポストドクトラル研究員	参加者

5．研究計画の概要（800 字以内でご記載ください。計画調書に記載した「研究計画」から変更がある場合、変更内容が分かるように記載してください。）

本課題は、科学的機械学習（SciML）の活用により固体地球科学研究を加速することを目的とする。機械学習を物理法則や数理モデルと統合することで、不均質性・不確実性を伴う物理計算や予測、不良設定問題に対する新たな解決策を探る。勉強会・研究集会の実施を通じ研究者ネットワークを形成する。このネットワークを基盤とし、参加者間での情報共有と議論を深め、共同研究へ発展させる。Physics-informed neural network（PINN）や作用素学習、生成モデルなどの先端手法を対象に、固体地球科学分野の具体的課題への適用可能性を検討し、理論・数値計算・データ同化など周辺分野の研究者も交えた交流の場を継続的に提供する。オンラインおよび対面・ハイブリッド形式のミーティングや研究集会を通じて知見を統合し、将来的な大型外部資金の獲得につながる研究基盤の強化を目指す。

6．研究成果の概要（図を含めて１～2 頁で記載してください。）

キーワード（3～5 語程度）：科学的機械学習、Physics-informed neural network（PINN）、作用素学習、固体地球科学

2025 年度は、キックオフミーティングを 1 回、勉強会を 1 回、PINN チュートリアルを 2 回（うち一回は研究集会後）、参加者を本研究課題の参画者に限定しないオープンな研究集会を 1 回実施した。これらについて、以下の(1)・(2)・(3)・(4)でまとめる。また、本研究課題参画者は、SciML の固体地球科学への応用に関する研究を進めた。情報科学と地震学の融合をテーマとした国際ワークショップ IWIRISS 2025（International Workshop on Interdisciplinary Research of Information Science and Seismology 2025）も共催した。

（1）キックオフミーティング

本課題は 2025 年度からの新課題であったため、2025 年 4 月にキックオフミーティングをオンラインで開催した。本会合では、研究代表者から本課題の提案経緯と趣旨について説明があり、機械学習と科学技術計算を相互補完的に用いる SciML を固体地球科学分野に根付かせることを目指す方針が示された。特に、PINN や作用素学習などの手法を例に、地震波動場の復元、津波予測、亀裂進展、火山体内部構造推定、地震波速度推定・震源位置推定など、幅広い課題への応用可能性が議論された。SciML の手法成熟度や研究者間の知見共有の不足といった課題を、分野横断的なコミュニティ形成によって克服することの重要性も確認された。また今年度の活動として、年度途中の勉強会、年度末の研究集会の開催案が提示され、参加メンバーの自己紹介と今後の連携に向けた情報共有が行われた。

（2）勉強会

2025 年 7 月に、SciML に関する勉強会を、東京大学地震研究所においてハイブリッド形式で開催した。本会合では、課題参加者が互いの研究内容や問題意識を把握し、今後の連携の基盤を形成することが重要であるとの考えから、プログラムを課題参加者による講演で構成した。講演では、PINN による地震時地殻変動解析、PINN を用いた非圧縮流の逆解析、Neural Operator による自動微分ベースの津波逆解析、Neural SDE を用いたスロー地震のデータ駆動型モデリングが取り上げられ、SciML の固体地球科学への応用について、手法上の利点、実装上の課題、今後の展開に関する議論が行われた。会合後には、来年度の課題登録等に関するビジネスミーティングも実施し、研究交流と課題運営の両面から今後の活動方針を共有した。

（3）PINN チュートリアル

本課題からの持ち込み企画として、2025 年 10 月 20 日に、日本地震学会 2025 年度秋季大会において、ランチョンセミナー「物理深層学習 PINN の基本プログラミング講習」を開催した。本セミナーでは、固体地球科学分野でも活用が進む Physics-Informed Neural Network（PINN）について、初学者がその基本的な仕組みを理解し、実際にコードを書いて試せるようになることを目的として、課題参加者である理化学研究所の岡﨑智久研究員がミニマルな基礎知識と実装方法を解説した。講習では、事前・事後学習にも利用できるようコードと解説資料を GitHub 上で公開し、参加者がプログラミング環境を準備しなくても気軽に参加できる形式とすることで、SciML の代表的手法である PINN の理解促進と、課題内外の研究者への普及を図った。同じ内容の講習を（4）の研究集会でも実施した（後述）。

（4）研究集会

2026 年 1 月に、2025 年度研究集会「固体地球科学における Scientific machine learning とその周辺」を、京都大学防災研究所およびオンラインのハイブリッド形式で、2 日間にわたり開催した。本研究集会は、本課題の活動の一環として、SciML に関する固体地球科学研究の情報共有と研究者交流を促進することを目的に企画されたものである。本研究課題参画者以外の参加者も含めオンサイト・オンライン合わせて 29 名の研究者が参加し、15 件の研究発表が行われた。プログラムでは、物理情報深層学習、代理モデル、作用素学習、データ同化、不確実性評価など、SciML およびその周辺分野に関する講演を通じて、地震波速度構造推定、地殻変動・地震動予測、津波予測、断層すべりや地球電磁気現象のモデリングなど、固体地球科学の幅広い課題への応用可能性について議論した（下部表参照）。

研究集会後には続けて、PINN チュートリアルを実施した。（3）と同内容であるが、ハンズオン形式によるさらに実践的な環境を提供することを目指した。20 名程度の参加があり、Physics-Informed Neural Network（PINN）の基本的な考え方や実装方法について、実際のコード例を交えながら理解を深める機会となった。加えて、Python や PyTorch 等を用いた普段の開発環境等に関する意見交換や相互支援も行われ、単なる講習にとどまらず、参加者間で実践的な知見を共有する場となった。これにより、SciML 手法を固体地球科学の各課題へ展開するための基礎的な技術習得と、今後の研究交流を促進する有意義な機会となった。

1 月 22 日（木）

開始	終了	氏名	所属	講演タイトル
13:15	13:20			趣旨説明
13:20	13:45	縣亮一郎	JAMSTEC	関数空間での事前分布に着目した物理情報深層学習に基づく偏微分方程式パラメータベイズ推定
13:45	14:10	染矢真好	東京大学 地震研究所	Neural Operator による津波シミュレーションの代理モデル：津波データ同化と逆解析への応用
14:10	14:35	榎本剛	京大防災研	勾配ブースティングによる大気海洋データの学習
14:35	15:00	Jun Su	JAMSTEC	拡散モデルを用いた地震調査データの補間およびノイズ除去
15:00	15:10			休憩
15:10	15:35	佐川遼	大阪大学　情報科学研究科	SAV アプローチに基づく修正散逸性を満たす準二次最適化手法と PINNs への適用
15:35	16:00	楠井俊朗	東京大学情報理工学系研究科	状態空間モデルを用いた Neural Operator
16:00	16:25	加藤慎也	東京大学地震研究所	TBA
16:25	16:50	グエントゥアンナム	九州大学工学府土木工学専攻	浅水長波方程式における不連続問題に対する重み付き方程式型 PINN の拡張
16:50	17:15	高井翔平	京都大学理学部	PINN を用いた粘弾性応答の順解析および逆解析
17:15	17:30			ディスカッション・ビジネスミーティング

1 月 23 日（金）

開始	終了	氏名	所属	講演タイトル
9:00	9:25	中尾篤史	筑波大学システム情報系知能機能工学域	PINN を用いたマントル対流遡及
9:25	9:50	加納将行	京都大学防災研究所	PINN を用いた摩擦不均質推定とスロースリップの時空間発展の予測
9:50	10:15	杉浦望実	海洋研究開発機構	シグネチャカーネルを用いた海面水温のクープマン解析
10:15	10:40	中野慎也	統計数理研究所	TBA
10:40	10:50			休憩
10:50	11:15	出口翔大	筑波大学システム情報系 三目研究室	TBA
11:15	11:40	石塚師也	京都大学	グラフニューラルオペレーターによる亀裂岩体中の流体移動特性のモデリング
11:40	12:20			ディスカッション
12:20	13:30			昼食
13:30	15:00			PINN チュートリアル（希望者のみ）

（研究集会が開催された場合は以下についても記載してください。）

７．研究集会名（集会名の英訳もご記載ください。）

和文：固体地球科学における Scientific machine learning とその周辺

英文：Scientific Machine Learning and Related Topics in Solid Earth Science

８．開催日：2026 年 1 月 22 日（木）・23 日（金）

９．開催場所：ハイブリッド開催（現地：京都大学防災研究所、オンライン：Zoom）

１０．研究集会参加者の詳細（研究代表者を含め、当課題に参加した全ての研究者を記載し、必要に応じ行を追加すること。）

参加者の詳細については、非公開とします。

１１．延べ参加人数、研究集会の概要（100 字程度、共同利用・共同研究拠点実施報告書に掲載します。）

延べ参加人数　　29 名

SciML に関する固体地球科学研究の情報共有と研究者交流を促進することを目的に企画されたものである。本研究課題参画者以外の参加者も含めオンサイト・オンライン合わせて 29 名の研究者が参加し、15 件の研究発表が行われた。

１２．研究実績

※所外の課題代表者は、所内担当教員に必ず実績について地震研業績 DB への登録依頼をしてください。

国際学会発表（招待講演）

（学会発表かつ招待講演の場合、講演者名、タイトル、学会名、開催地、発表年（西暦）、招待について記載してください。

記載例：K.Obara, Meaning and prospect for science of slow earthquakes, IAG-IASPEI, Kobe Japan, 2017 (invited))

Agata, R., Bayesian Three-Dimensional Seismic Traveltime Tomography Based on Physics-Informed Neural Network, IWIRISS 2025, Tokyo Japan, 2025 (invited)

Ito, S., Learning Dynamical Scaling in Fracture and Fragmentation through Physics-Informed Neural Modeling, IWIRISS 2025, Tokyo Japan, 2025 (invited)

Kano, M., Data Assimilation for Monitoring Fault Slip Behavior, IWIRISS 2025, Tokyo Japan, 2025 (invited)

Nagao, H., Collaboration Between Japan and Singapore in AI Seismology: Contribution from Japan Side, IWIRISS 2025, Tokyo Japan, 2025 (invited)

Miyatake, Y., Quantifying the Discretization Error in Solving Evolution Equations, IWIRISS 2025,

Tokyo Japan, 2025 (invited)

Okazaki, T., Physics-Informed Deep Learning for Earthquake Crustal Deformation, International Workshop on Interdisciplinary Research of Information Science and Seismology 2025 (IWIRISS 2025), Tokyo, Japan, 2025 (invited).

国際学会発表

（学会発表の場合、講演者名、タイトル、学会名、開催地、発表年（西暦）について記載してください。

記載例：K.Obara, Meaning and prospect for science of slow earthquakes, IAG-IASPEI, Kobe Japan, 2017 ）

Ito, S., Effect of surface tension fluctuations on shrinkage-induced crack pattern formations, Physics of Open Systems: Resonance, Symmetry, and Topology, Tokyo Japan, 2025

Nagao, H., S. Ito, T. Tokuda, G. Mendo Pérez, S. Katoh, and T. Kusui, Towards Integration of Data Assimilation and State-of-the-Art Information Science Techniques for Seismology, IAGA/IASPEI Joint Scientific Meeting 2025, Lisbon, Portugal, 2025.

論文

（下記表の項目について記載してください。）

#	論文情報（著者、論文タイトル、雑誌名、巻、頁、出版年、DOI）	査読の有／無	出版年月	著者に地震研所員を含む／含まない	謝辞の有／無
記載例	Kazushige Obara, Aitaro Kato, Connecting slow earthquakes to huge earthquakes. Science 353, 253-257 (2016). DOI:10.1126/science.aaf1512	有	2016.7	含む	無
1	Ito S., Fragment Size Density Estimator for Shrinkage-Induced Fracture Based on a Physics-Informed Neural Network, Journal of the Physical Society of Japan, 94, 104001 (2025). DOI:10.7566/JPSJ.94.104001	有	2025.9	含む	有
2	Nakao, A. (2026). Physics-informed machine learning framework to retroactively estimate mantle thermal convection from partial geophysical observations. ESS Open Archive. https://doi.org/10.22541/essoar.177248990.09713169/v1	無	2026.3	含まない	有
3	Nakao, A., Noto, D., Yanagisawa, T., Tasaka, Y., & Kuwatani, T. (2025). Reconstruction of thermally-driven flows using Lagrangian particle data assimilation. Scientific Reports, 15, 35838. https://doi.org/10.1038/s41598-025-19724-x	有	2025.10	含まない	有

4	Tokuda, T. and H. Nagao, Two-stage approach for earthquake detection using multiple clustering-based classification, Geophys. J. Int., 243(3), ggaf400, 2025. doi:10.1093/gji/ggaf400	有	2025.12	含む	有
5	Mendo-Pérez, G., H. Nagao, and Y. Terada, RMS and hierarchical agglomerative clustering to build template event catalogs of tectonic tremors, Seismol. Res. Lett., 14, 2025. doi: 10.1785/0220240392	有	2025.11	含む	有
6	Katoh, S., H. Nagao, Y. Iio, PoViT-UQ: P-wave polarity and arrival time determination using vision transformer with uncertainty quantification, Geophys. J. Int., 243(1), ggaf324, 2025. doi:10.1093/gji/ggaf324	有	2025.8	含む	有
7	Katoh, S., Y. Iio, H. Nagao, H. Katao, M., Sawada, K. Tomisaka, SegPhase: Development of arrival time picking models for Japan's seismic network using the hierarchical vision transformer, Earth Planets Space, 77, 118, 2025. doi:10.1186/s40623-025-02249-y	有	2025.11	含む	有
8	Kusui, T., H. Nagao, S. Ito, S. Katoh, and T. Tokuda, A deep learning approach to identifying neural SDE models using the signature kernel, 2025 the 28th International Conference on Information Fusion (FUSION), 1-8, 2025. doi:10.23919/FUSION65864.2025.11124012	有	2025.8	含む	有
9	Agata R., Baba S., Nakanishi A., Nakamura Y., HypoNet Nankai: Rapid Hypocenter Determination Tool for the Nankai Trough Subduction Zone Using Physics-Informed Neural Networks, Seismological Research Letters, 97, 524-536 (2026). DOI:10.1785/0220240377	有	2025.8	含まない	無
10	Nakao A., Kuwatani T., Ito S., Nagao H., Adjoint-Based Marker-In-Cell Data Assimilation for Constraining Thermal and Flow Processes From Lagrangian Particle Records, Journal of Geophysical Research: Machine Learning and Computation, 2(2) (2025). DOI:10.1029/2024jh000288	有	2025.4	含む	有
11	Hagiwara Y., Kuwatani T., Precision in Peak Parameter Estimation for the Pseudo-Voigt Profile: A Novel Optimization Approach for High-Precision Analysis via Mixing Parameter Control, ACS Measurement Science Au (2025). DOI:10.1021/acsmeasuresciau.5c00030	有	2025.6	含まない	無
12	Hagiwara Y., Kuwatani T., Precision in peak parameter	有	2025.5	含ま	無

	estimation for Gaussian and Lorentzian profiles: Guidelines for instrument optimization, Physical Review Research, 7(2) (2025). DOI:10.1103/physrevresearch.7.023163			ない	
13	余野 央行, 桑谷 立, 大河原 聖, 植木 俊明, 木川 栄一, マルチビーム音響点群データの自動ノイズ除去 : スパース符号化手法を用いた予備的検討, 情報地球学, 36(3), 65-70 (2025). DOI:10.6010/geoinformaticsx.36.3_65	有	2025.9	含まない	無
14	Hiramine R., Ishimura D., Nagai M., Miwa T., Nishikawa H., Kuwatani T., Sato T., Yoshida K., Pumice Drifting from Ioto Volcano in the Izu-Bonin Arc to the Nansei Islands, Japan, Island Arc, 34(1) (2025). DOI:10.1111/iar.70020	有	2025.6	含まない	無
15	Nishikawa H., Matsuoka D., Nishimori Y., Yamaguchi T., Ito M., Watanabe Y., Sugiyama D., Kuwatani T., Ishikawa Y., Estimation of the fish number in farming cage from the fish finder echo images via machine learning, Aquacultural Engineering, 109, 102505 (2025). DOI:10.1016/j.aquaeng.2024.102505	有	2025.6	含まない	無
16	Iwamori H., Ogawa Y., Okada T., Watanabe T., Nakamura H., Kuwatani T., Nagata K., Suzuki A., Ichiki M., Geofluid mapping reveals the connection between magmas, fluids, and earthquakes, Communications Earth & Environment, 6(1) (2025). DOI:10.1038/s43247-025-02351-9	有	2025.5	含む	無
17	Zhu D., Wang J., Kuwatani T., Tsuchiya N., Machine-learning applications for magmatic-hydrothermal systems: Quartz trace-element insights into ore deposits, Applied Geochemistry, 106431 (2025). DOI:10.1016/j.apgeochem.2025.106431	有	2025.5	含まない	無
18	Kuwatani T., Hino H., Nishikawa H., Akaho S., Data-driven proactive prediction of pumice drifting patterns using similarity search of the Kuroshio current axis, npj Natural Hazards, 2(1) (2025). DOI:10.1038/s44304-025-00088-1	有	2025.4	含まない	無
19	Kuwatani T., Akaho S., Nakamura K., Komai T., Geochemical-process extraction and interpretation using matrix factorization: a framework for verifying effectiveness through forward modeling and inversion analysis, Frontiers in Earth Science, 13 (2025). DOI:10.3389/feart.2025.1559321	有	2025.4	含まない	無

１３．外部資金の申請・採択状況（任意、本紙提出後に採択の際にはメールでお知らせください。）

日本学術振興会 科学研究費助成事業 挑戦的研究（開拓）
研究課題名: 未知の地震現象発見とその物理プロセス解明に資する革新的数理プロトコルの開拓
研究期間: 2025 年度～2028 年度
研究代表者: 長尾 大道

科学技術振興機構 日 ASEAN 科学技術・イノベーション協働連携事業（NEXUS） 日本－シンガポール国際共同研究「AI」
研究課題名: 地震に対する安全性と持続可能性のための AI 活用：AI 駆動の地震データ解析技術・地下状態可視化技術・地震ハザード監視技術の深化
研究期間: 2025 年度～2027 年度
研究代表者: 長尾 大道

文部科学省
研究課題名（プロジェクト名）: 情報科学を活用した地震活動・地震動評価技術の高度化プロジェクト（STAR-E NEXT プロジェクト）
研究期間: 2026 年度～2030 年度
研究代表者: 長尾 大道

日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究(B)
研究課題名: ファイバーセンシングによる伊豆諸島の海底火山活動監視ネットワーク
研究期間: 2025 年度～2027 年度
研究代表者: 小野 重明（分担者：桑谷 立）

日本学術振興会 科学研究費助成事業 挑戦的研究（萌芽）
研究課題名: 地球科学の逆問題解決に資する汎用・高速・解釈可能なハイパーパラメータ推定法の開発
研究期間: 2025 年度～2027 年度
研究代表者: 桑谷 立

日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究(B)（課題番号：25K01084）
研究課題名: Scientific Machine Learning で切り拓く地震研究の新展開
研究期間: 2025 年度～2027 年度
研究代表者: 加納 将行

日本学術振興会 科学研究費助成事業 基盤研究(C)（課題番号：25K00228）
研究課題名: 広域テクトニクスから読み解く地震発生と火山噴火の機構
研究期間: 2025 年度～2027 年度
研究代表者: 中尾 篤史