

jh220029

三次元強震動シミュレーションとリアルタイムデータ同化の融合

中島研吾（東京大学）

本研究では、JDXnet（Japan Data eXchange network）によって得られる地震観測データを利用したリアルタイムデータ同化と高精度な三次元強震動シミュレーションの融合による計算手法、データ同化・機械学習による三次元地下構造モデルの改良手法、及び関連するソフトウェア群の研究開発を実施する。東大センターの Oakbridge-CX（OBCX）、Wisteria/BDEC-01 を使用した検証を実施する他、開発したソフトウェア群を HPCI 計算資源群等に展開し、「シミュレーション（Simulation）・データ（Data）・学習（Learning）（S+D+L）」融合の促進に貢献した。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

東京大学 情報基盤センター
名古屋大学 情報基盤センター

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野
超大規模データ処理系応用分野
超大容量ネットワーク技術分野
超大規模情報システム関連研究分野

(4) 参加研究者の役割分担

- 中島研吾（東大情基セ）（代表）①②③
- 古村孝志（東大地震研）（副代表）①②
- 鶴岡弘（東大地震研）①②
- 長尾大道・伊藤伸一・市村強・藤田航平（東大地震研）、河合直聡・下川辺隆史・芝隼人（東大情基セ）②
- 塙敏博・住元真司（東大情基セ）、松葉浩也（日立製作所）③
- 依田凌（東大情報理工）②
- 八代尚（国立環境研）・荒川隆（CliMTech／東大情基セ）①②③
- 大島聡史（名大⇒九大）③
- 坂口吉生・笠井良浩・池田輝彦（富士通）①③

注：①リアルタイムデータ同化+シミュレーション、②データ同化・機械学習、③関連 SW

2. 研究の目的と意義

本研究では、JDXnet（Japan Data eXchange network）によって得られる地震観測データを利用したリアルタイムデータ同化と高精度な三次元強震動シミュレーションの融合による計算手法、データ同化・機械学習による三次元地下構造モデルの改良手法、及び関連するソフトウェア群の研究開発を実施し、「シミュレーション（Simulation）・データ（Data）・学習（Learning）（S+D+L）」融合の促進に資する。

東大センターでは、国内外各機関との緊密な協力のもと、スパコン上で「S+D+L」融合を推進するための革新的ソフトウェア基盤「h3-Open-BDEC」の開発を進めている。本研究は、長周期地震動の即時予測・警報の実現による安全な防炎行動、減災の実現に貢献するものであり、社会的波及効果も大きい。本研究の成果は、様々なアプリケーションに適用が可能であり、これらの手法を h3-Open-BDEC に実装し、様々なスパコンにデプロイすることによって、「S+D+L」融合の推進に貢献するものと期待される。

3. 当拠点の公募型研究として実施した意義

本研究で利用した OBCX、Wisteria/BDEC-01 は、高い計算能力のみならず、外部ネットワーク経由に直接接続し、JDXnet による観測データの直接取得が可能であるとともに、データ解析、機械学習にも適したハードウェア、ソフトウェアを有

し、「S+D+L」融合のためのプラットフォームとして最適である。近年は、名古屋大、大阪大、九州大等にもヘテロジニアスなノード構成に基づき、「S+D+L」融合を指向したシステムが多数導入されており、本研究の成果をこれらのシステムに展開することによって、JHPCN 各センターにおける「S+D+L」融合促進にも貢献した。2022 年度は名古屋大学「不老」システムへの展開を実施した。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

「リアルタイムデータ同化+三次元強震動シミュレーション」について、2021 年度は図 1 に示すような「フィルタリング⇒データ同化+シミュレーション⇒可視化」を Wisteria/BDEC-01 上で実施するために、h3-Open-SYS/WaitIO, h3-Open-UTIL/MP を開発し、Wisteria/BDEC-01 上で Odyssey と Aquarius を連携して使用するためのソフトウェアとして整備し（図 2）、動作確認を実施した。

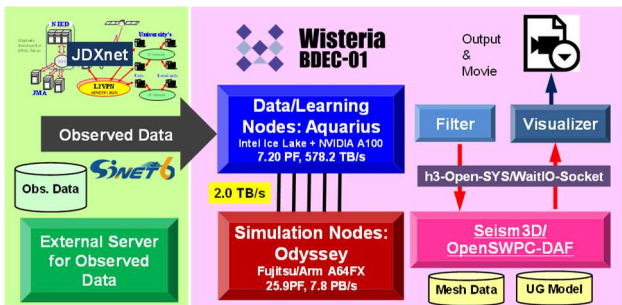


図 1 リアルタイムデータ同化+三次元強震動シミュレーション」融合フレームワーク

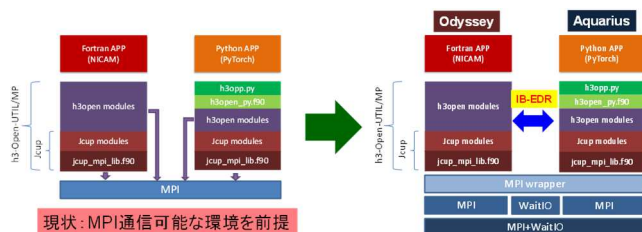


図 2 h3-Open-UTIL/MP, h3-Open-SYS/WaitIO-Socket と MPI を併用した異機種間結合プログラムの構成

それに先立ち、OBCX 上でプロトタイプを開発し、2007 年新潟県中越沖地震の再現シミュレーションを、最大 1,280 ノードを使用して実施した。計

算結果は古村等の先行研究 [Furumura T. et al. GRL, 2018] の結果を忠実に再現している。1,280 ノード使用時に 200 秒分の計算を概ね 20 秒程度で完了し、リアルタイム予報へ向けての目安である「実現象の 10 分の 1」をほぼ達成できた。ただ、本推定はやや楽観的な推定であるため、2022 年度に引き続き Wisteria/BDEC-01 (Odyssey) で検討を実施することとしている。

「データ同化・機械学習」のうち、「(a) 大規模機械学習」については、数百メートルスケールのローカルな地盤構造推定を対象に最適化アルゴリズムを開発・適用し、Simulated Annealing 法と比較して計算時間の短縮を実現するとともに、大規模問題向けのアルゴリズム安定化、最適化にも着手している。「(b) REMC 法」については、波動シミュレーションの結果から得られる速度応答スペクトルによって建造物の揺れの簡易評価を実施した結果、周期 1-10 秒の幅広い周期帯において現実に近い応答が得られることが既に示されており、2021 年度は、一次元理論地震動コード (Fortran77 によるレガシーコード) の並列化を実施した。「(c) 2nd-order Adjoint 法」については、二次元 100 メッシュ程度の小規模モデルに対してではあるものの、基本的なアルゴリズムの開発、検証は完了している。

5. 今年度の研究成果の詳細

以下に、リアルタイムデータ同化+シミュレーション (①), データ同化・機械学習 (②③④), 関連ソフトウェア (⑤⑥) について成果の概要を紹介する。スーパーコンピュータシステムとしては、Wisteria/BDEC-01 (Odyssey, Aquarius), Oakbridge-CX (東大情報基盤センター) の他、「不老 (Flow)」(名古屋大学情報基盤センター) を使用した。

① リアルタイムデータ同化+シミュレーション

2021 年度に Wisteria/BDEC-01 上に構築したシステムを元に、シミュレーション部分の最適化を Odyssey 上で実施した。プロセス配置・I/O の改善、計算・通信オーバーラップ等により、1,920 ノード

を使用した場合に 240 秒相当のシミュレーションを 22.0 秒で実施することができ、目標であった、「実時間の 10 分 1 の時間でシミュレーションを完了する」という当初の目的を達成することができた (図 1)。

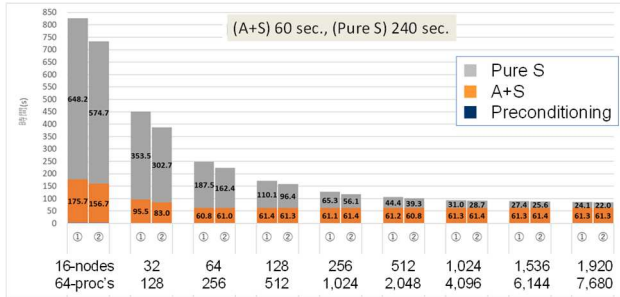


図 1 リアルタイムデータ同化+シミュレーション最適化 (Odyssey : 最大 1,920 ノード, 7,680 プロセス)

② データ同化・機械学習 (1) : レプリカ交換モンテカルロ法による地下構造推定

首都圏広域の地下構造を、一次元理論地震動およびレプリカ交換モンテカルロ (REMC)法を用いて推定する方法について検討している。一次元理論地震動モデルでは、地中方向の一次元を対象とした理論地震動を地下構造および震源に関するパラメータを元に算出している。このパラメータを、理論地震動の計算結果と実際の観測データとを比較しながら REMC で同定することで、地下構造を推定する。REMC でデータ同化を行う地下構造は、地中方向の一次元のみであるため、首都圏広域を推定するために、地表を二次元分割し、各領域でデータ同化を実施する。提供頂いたプログラマでは、REMC1 回の実行に 1 週間程度必要であり、首都圏広域の地下構造推定のためには並列化を含めた高速化が必須である。上述のような計算内容から、並列化、高速化を実施する対象は i : 一次元理論地震動計算, ii : REMC 法, iii : 地表二次元分割による広域計算の 3 階層に分けられる。本研究ではそれぞれを i : OpenMP, ii : MPI, iii : Xcrypt で並列化することとしている。iii は本年度研究開始時点では MPI で実施予定であったが、ii の REMC 法の計算時間が長い上、条件によって必要な計算時間が異なることを鑑み、embarrassingly parallelization

が適していると考え、Xcrypt による並列化を実施した。Xcrypt はジョブスケジューラーを使用したタスク並列化を提供する Perl ベースのツールであり、ジョブの実行状況を考慮して順次ジョブを投入する機能を有する。

一次元理論地震動の OpenMP 並列化に関しては完了しており、図 1 に示すように、スレッド数に対してある程度の並列性能が得られている。ただし、表面波を計算する過程でフロー依存性を伴うために、Wisteria/BDEC-01 Odyssey では 12 スレッドあたりで性能が頭打ちとなっている。よって、実際の実行では、一次元理論地震動の計算 1 つ辺りのスレッド数は 12 とし、ノード辺りは 4 プロセスで REMC を実行する。

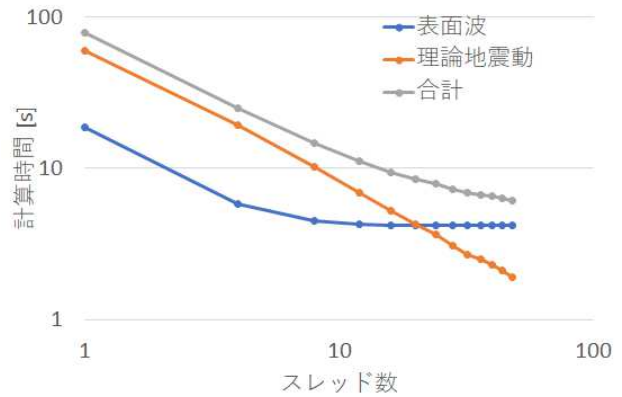


図 2 一次元理論地震動計算の並列性能 (Wisteria/BDEC-01 Odyssey1 ノードで評価)

REMC の MPI 並列化に関しても完了しており、評価を実施している。現在は、適当な地下構造モデルを作成し、データ同化を実施しているが、一次元理論地震動の計算において、いくつかのパラメータの感度が低く、期待した結果に収束しない現象に遭遇しており、対応中である。

地表方向の二次元分割による Xcrypt 並列化に関しては実装が完了している。地表面の二次元分割では、どのようにメッシュを作成するか課題となる。ここでは、全観測点を含む領域を設定し、その領域を再帰的に 4 等分に分割、これを領域内の観測点数が 2 つ以下になるまで続けている。図 2 に上記の方法で作成したメッシュを示す。

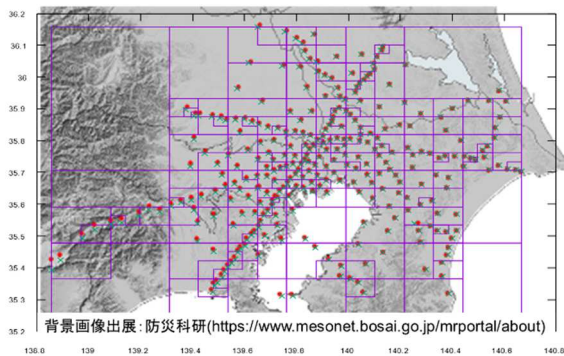


図 3 地下構造推定で使用する二次元メッシュ

③ データ同化・機械学習(2): 2nd-order adjoint 法を採用した 4 次元変分法の高速化

4 次元変分法は大規模な数値モデルのデータ同化に広く利用されている。加えて、2nd-order adjoint 法を導入することで、不確実性の評価も同時に可能となっている。ただし、大規模な数値モデルを対象としていることから、Forward 計算の並列化だけでなく、Forward 計算の並列化手法に合わせたデータ同化部分の並列化も必要不可欠である。本年度は Forward 計算(有限体積法による地震動計算)の時空間並列化(PinT)を実施した。地震動の計算では、シミュレーションの実時間が長く、タイムステップ数が多くなるため、時間方向に並列化する PinT が適している。PinT は Multigrid 法の考えを元に時間方向の並列化を実現している。具体的には、簡易的に計算した初期値を元に時間方向の計算を並列に行い、算出された結果の不整合を、よりタイムステップ幅の大きい条件で計算した結果で修正する。採用した PinT は Cascadic Multigrid Parareal Method であり、現在は Wisteria BDEC-01 の評価および最適化を実施している。

④ データ同化・機械学習(3): 大規模機械学習

本研究項目においては、常時微動や小規模地震など平時に得られるデータを使用して、「S+D+L」融合のうち特に大規模機械学習アプローチにより、地下構造を推定する手法を開発することを目指している。ここでは、地下構造を成層構造と仮定し、層境界面の三次元形状を求める問題を対象とし、大局的な最適解を求めるために、ヒューリスティ

ックなアプローチにて最適化する手法を開発する。この際、機械学習により構築したサロゲートモデルを高コストな高詳細数値シミュレーションの代替として用いることで高速に最適解を探索するが、サロゲートモデルの構築には学習データとして多数の詳細数値シミュレーションを実行する必要がある。本研究グループにおいてはこれまで高速数値シミュレーション手法を開発してきたが、これを多数回実行できるようプログラム群をパッケージ化することまではできておらず、地盤構造の最適化問題を解く際の課題となっていた。そこで本年度においては、有限要素法による地盤震動解析プログラムの入出力を整理しサンプリングを自動実行できるパッケージを開発した。また、地震動波形を比較し地盤構造の合致度を評価するために必要となる波形データ処理部にも計算コストがかかっていたため、このデータ処理を高速化する手法を開発した。論文 [6] は計算科学系の国際学会である ICCS 2022 (The International Conference on Computational Science) で発表された 175 件の論文中、例年約 10 件が選ばれる selected paper の一つに選ばれるなど高い評価を得た。年度後半においては [1] の手法を最新の計算機環境である Hopper GPU において高速実行できるように拡張し Journal of Computational Science にて発表した [3]。

⑤ ソフトウェア開発(1): h3-Open-SYS/WaitIO

h3-Open-SYS/WaitIO は複数の並列プログラム間で通信を行うためのライブラリである。各並列プログラムは典型的には MPI プログラムであるが、MPI 以外の形の並列プログラムからも利用できるよう汎用的に設計されている。API は MPI 類似でありアプリケーション変換も容易である。

2022 年度は、Socket を利用した h3-Open-SYS/WaitIO-Socket (以下、WaitIO-Socket) 上でのアプリケーションとして h3-Open-UTIL/MP (以下、UTIL/MP を利用した機械学習 (ML) との融合、Wisteria/BDEC-01 上での異種システム間ジョブ実行システムの開発、ならびに、幅広い異種システム間結合をサポートするため、共用ファイルシス

テム上での通信を実現する h3-Open-SYS/WaitIO-File (以下, WaitIO-File), Socket と File を組み合わせた h3-Open-SYS/WaitIO-Hybrid (以下, WaitIO-Hybrid) を開発した。

WaitIO-Socket と次に述べる h3-Open-UTIL/MP を用いて Wisteria/BDEC-01 上で気象シミュレーションと機械学習を融合したアプリケーションでの評価において Odyssey 上のみで気象シミュレーションと機械学習を実行した結果よりも Odyssey 上で気象シミュレーション, GP-GPU を搭載した Aquarius 上で機械学習を実行する異種システム連携の方が 35%高速であることが分かった。(図 4)

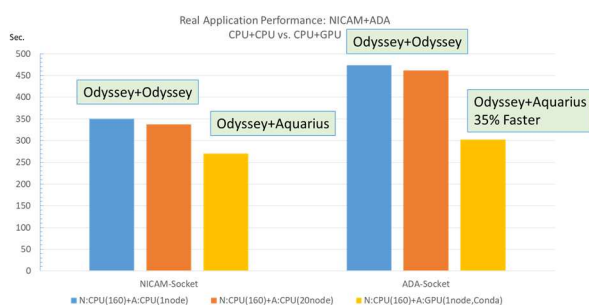


図 4 Wisteria/BDEC-01 での異種実行環境によるシミュレーションと機械学習の連成計算の効果

本成果を示した論文は国際学会「The 23rd International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT '22; 第 23 回並列・分散コンピューティングとその応用・技術)」において, Software Systems and Technologies Track の最優秀論文賞 (the best paper award) を受賞した [4]。Wisteria/BDEC-01 という 2 種の異種システムでシミュレーションと機械学習を異種融合したアプリケーションを実現しその効果を示したことが評価された。

異種システム間ジョブ実行システム: WaitIO はプログラム起動時に複数の MPI アプリケーションをまとめる WaitIO Master Host (連成する WaitIO アプリケーションの中で環境変数 WAITIO_PBID=0 のアプリケーション) との通信が必要である。しかし, Wisteria/BDEC-01 上でのバッチジョブ実行環境ではジョブ実行時に初めて WaitIO Master Host

が決まる。また, Odyssey と Aquarius はそれぞれの別のジョブスケジューラで運用されているため, 2 つのジョブスケジューラ間で同時に実行する必要がある。現在利用しているジョブスケジューラ (TCS) は機能を持たないため, 異種システム間ジョブ実行システムを開発した。(

図) このシステムはジョブ実行時にジョブ名とリソース名から連成計算ジョブと認識し, 2 つのシステムの空き状況を見て同時にジョブを実行する連成ジョブ実行サービスと同じくジョブ情報からジョブ実行時に WaitIO Master Host を交換する WaitIO Hostname Server から構成される。本実行システムは 2022 年 6 月より Wisteria/BDEC-01 システムで試験運用開始され, 11 月より一般サービスを開始している。

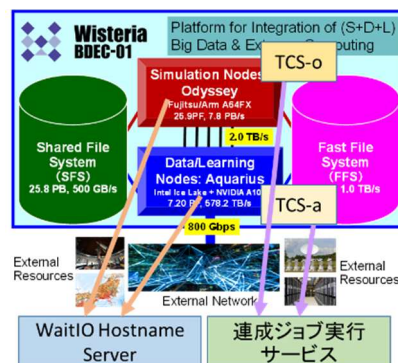


図 5 異種システム間ジョブ実行システムの構成

システムワイドな異種連成計算実行環境を国内外の計算機センターでより広く利用するために, TCP/IP だけでなく共有ファイルシステムを用いた (h3-Open-SYS/) WaitIO-File, 更に WaitIO-Socket と WaitIO-File を組み合わせた WaitIO-Hybrid を開発した。実現した WaitIO-File, WaitIO-Hybrid の通信性能は Odyssey の WaitIO-Socket の通信性能より高速であることが分かった。また, WaitIO-Socket と WaitIO-File を組み合わせた WaitIO-Hybrid の結果は通信遅延が大きな WaitIO-File の情報交換遅延

を WaitIO-Socket により削減し通信性能が向上した。(図 6)。

WaitIO-File は計算ノード間の Socket 通信を許可していない名古屋大学情報基盤センターの「不老」システムで共用ファイルシステムを用いて実行できることを確認した。

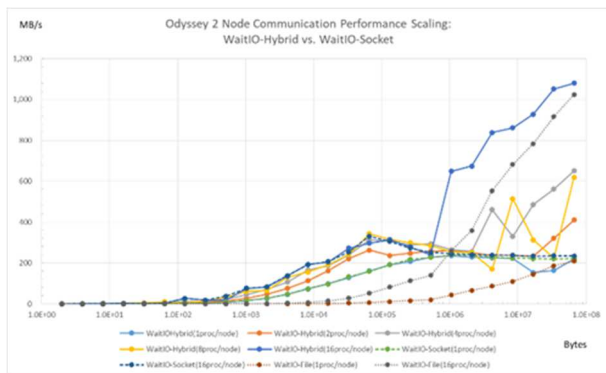


図 6 Wisteria/BDEC-01 上での WaitIO-Socket, WaitIO-File, WaitIO-Hybrid のマルチストリーム PingPong 通信性能

対的に小さい場合は Socket の方が高性能であるが File の方がデータ量の増加に対する時間増加量が小さくデータ量が増えると File の方が優位な性能を示す。Wisteria/BDEC-01 と FLOW の比較では FLOW の方がほぼ 2 倍の時間を要している。これは両者のハードウェア性能比にほぼ等しい値であり、WaitIO のソフトウェアが性能を阻害していないことを示唆している。

表 1 テスト計算の通信データ量

Case	# of grid	total size	size/process
C0	81920	26214400	163840
C1	163840	52428800	327680
C2	327680	1.05E+08	655360
C3	655360	2.1E+08	1310720
C4	1310720	4.19E+08	2621440

⑥ ソフトウェア開発 (2) : h3-Open-UTIL/MP

h3-Open-SYS/WaitIO は複数の並列プログラム間で汎用カプラ h3-Open-UTIL/MP の開発において 2022 年度は h3-Open-SYS/WaitIO と協調した異機種間連成の性能評価を実施するとともに、ジョブ実行環境の整備を行った。はじめに異機種間連成の性能評価について説明する。異機種間連成のテストではテスト用の Toy Model を用いカプラ内部でのデータ交換時間を測定した。用いたモデルはモデル A がシミュレーションノードで動作する疑似シミュレーションモデル、モデル B が GPU ノードで動作する疑似機械学習プログラムである。モデル A のプロセス数とノード数を 160 プロセス 40 ノード、モデル B のプロセス数とノード数を 20 プロセス 1 ノードに固定し、通信データ量を表 1 に示す 5 ケースに変化させた。テストに用いたハードウェアは東京大学の Wisteria/BDEC-01 と名古屋大学の不老 (FLOW) である。Wisteria/BDEC-01 ではソケット通信とファイル経由の 2 通りのデータ交換方法を、不老ではファイル経由のデータ交換方法での時間を測定した。測定結果を図 7 に示す。Socket と File を比べると、交換データ量が相

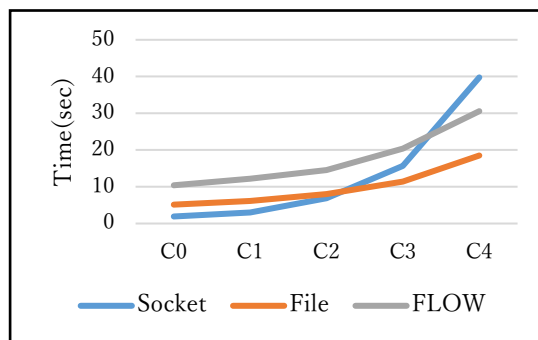


図 7 テスト計算測定結果

ついてジョブ実行環境について説明する。WaitIO を用いた異機種間連成では機種毎にジョブを投入し WaitIO が通信を確立する。その際、先に投入したジョブで割り当てられた通信環境を後で投入するジョブスクリプト内で明示的に指定する必要があった。この設定を自動的に行うためのソフトウェア waitio-serv が開発されたため、ジョブ実行環境でも waitio-serv を利用するようにした。これによりジョブ投入時に後続のジョブスクリプトを毎回修正する必要がなくなった。

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

2022 年度は当初目標をほぼ達成でき、順調に進捗している。本研究の成果は国内外の学会でも高く評価されており、最優秀論文等の表彰を受けている [4,6]。

本研究で提唱している、「シミュレーション (Simulation)・データ (Data)・学習 (Learning) (S+D+L)」融合に国内外の注目を集めており、招待講演 [8, 15, 18, 19, 24] の他、SC22 の BoF においても取り上げられた [37]。

h3-Open-SYS/WaitIO, h3-Open-UTIL/MP 等のソフトウェア公開には至っていないが、Wisteria/BDEC-01 に実装済みであり、ユーザーが利用できるになっている。また、2022 年 10 月には東京大学情報基盤センターで講習会を実施した [33]。2023 年度は、ドイツ、フランス等の研究機関との国際研究協力を開始し、様々なアプリケーションへの適用を図るとともにソフトウェアの開発を実施していく予定である。

5. であげた研究成果のうち、データ同化・機械学習の「②一次元理論地震動および REMC による地下構造推定」については、環境整備にやや手間取ったため、当初の予定より遅れている。本項目について、2023 年度に実際の観測モデルを用いたデータ同化を実施する予定である。特定のパラメータの感度が低く、パラメータの同定がうまくできない問題に関しては、薄い地層場合や、深くにある地層のパラメータに関して起こる問題であることを確認している。これを解決するために、現在の REMC 法では地震動の振幅の差を使用してデータ同化を行っているが、来年度には正規化した周波数特性を使用するよう改良予定である。これにより、感度の小さいパラメータを考慮しやすくなり、パラメータ同定の精度が上がると期待される。また、現在は 1 メッシュのデータ同化に 128 ノードで 8 時間程度かかっており、首都圏広域の地下構造推定に長い時間を要するため、1 メッシュのデータ同化に必要な時間が 1 時間以下となるよう最適化およびパラメータの調整を実施する予定である。

7. 研究業績

(1) 学術論文 (査読あり)

- [1] R. Kaneko, H. Nagao, S. Ito, H. Tsuruoka, K. Obara, 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, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, Vol. 128, Issue 2, doi:10.1029/2022JB024842, 2023
- [2] S. Ito, M. Kano, H. Nagao, Adjoint-based uncertainty quantification for inhomogeneous friction on a slow-slipping fault, *Geophys. J. Int.*, Vol. 232(1), pp. 671-683, 2023
- [3] Kohei Fujita, Takuma Yamaguchi, Yuma Kikuchi, Tsuyoshi Ichimura, Muneo Hori, Lalith Maddegadara, Calculation of cross-correlation function accelerated by TensorFloat-32 Tensor Core operations on NVIDIA's Ampere and Hopper GPUs, *Journal of Computational Science*, Volume 68, 2023, 101986, ISSN 1877-7503, <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2023.101986>

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

- [4] S. Sumimoto, T. Arakawa, Y. Sakaguchi, H. Matsuba, H. Yashiro, T. Hanawa, K. Nakajima, A System-Wide Communication to Couple Multiple MPI Programs for Heterogeneous Computing, PDCAT202 (**The Best Paper Award, Software Systems and Technologies Track**)
- [5] S. Sumimoto, T. Arakawa, Y. Sakaguchi, H. Matsuba, H. Yashiro, T. Hanawa, K. Nakajima, A System-Wide Communication to Couple Multiple MPI Programs for Heterogeneous Computing, Research Poster, EuroMPI/USA 2022, 2022
- [6] Y. Kikuchi, K. Fujita, T. Ichimura, M. Hori, L. Maddegadara. 2022. Calculation of Cross-correlation Function Accelerated by Tensor Cores with TensorFloat-32 Precision on Ampere GPU, Proceedings of ICCS 2022, 2022 (**Selected Best Papers**)
- [7] R. Yoda, M. Bolten, K. Nakajima, A. Fujii, Acceleration of Optimized Coarse-Grid Operators by Spatial Redistribution for Multigrid Reduction in Time, Proceedings of ICCS 2022, 2022

(3) 国際会議発表 (査読なし)

- [8] Nakajima, K., h3-Open-BDEC: Innovative Software Infrastructure for Scientific Computing in the Exascale Era by Integrations of (Simulation+Data+Learning), ATAT in HPSC 2023, National Central University, Taoyuan, Taiwan, March 24-25, 2023 (**Invited Talk**)

- [9] Takashi Arakawa, Shinji Sumimoto, Hisashi Yashiro, Kengo Nakajima, Development of a Heterogeneous Coupling Library h3-Open-UTIL/MP, HPC challenges for new extreme scale applications, Paris, March, 2023
- [10] Shinji Sumimoto, Takashi Arakawa, Yoshio Sakaguchi, Hiroya Matsuba, Hisashi Yashiro, Toshihiro Hanawa, Kengo Nakajima, Heterogeneous system for exascale using h3-Open-SYS/WaitIO, HPC challenges for new extreme scale applications, Paris, March, 2023
- [11] Kengo Nakajima, Innovative Supercomputing by Integration of Simulation/Data/Learning, Paris, March, 2023
- [12] Kengo Nakajima, h3-Open-BDEC: Innovative Software Infrastructure for Scientific Computing in the Exascale Era by Integrations of (Simulation + Data + Learning), MS25: Progress and Challenges in Extreme Scale Computing and Big Data, 2023 SIAM Conference on Computational Science & Engineering (CSE2023), Amsterdam, Netherlands, Feb.26-Mar.3, 2023
- [13] Nakajima, K., Integration of 3D Earthquake Simulation & Real-time Data Assimilation, EU-ASEAN High-Performance Computing (HPC) School 2022, Bangkok, Thailand, December 5-10, 2022
- [14] Nagao, H, R. Kaneko, S. Ito, H. Tsuruoka, and K. Obara, 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, American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting, Chicago, USA, December 17, 2022
- [15] K. Nakajima, T. Iwashita, H. Yashiro, H. Nagao, T. Shimokawabe, H. Matsuba, T. Ogita, T. Katagiri, h3-Open-BDEC: Innovative Software Infrastructure for Scientific Computing in the Exascale Era by Integrations of (Simulation + Data + Learning), The 31st International Toki Conference on Plasma and Fusion Research (ITC31), 2022 (**Invited Talk**)
- [16] H. Nagao, Towards integration of data assimilation and deep learning beneficial to seismology, SIAM International Conference on Data Mining (SDM22), 2022 (**Invited Talk**)
- [17] Takashi Arakawa, Shinji Sumimoto, Hisashi Yashiro, Kengo Nakajima, Challenges of Heterogeneous Coupling, WCCM-APCOM 2022, Yokohama, 2022
- [18] Kengo Nakajima, h3-Open-BDEC: Innovative Software Infrastructure for Scientific Computing in the Exascale Era by Integrations of (Simulation + Data + Learning), WCCM-APCOM 2022, Yokohama, 2022 (**Keynote Talk**)
- [19] K. Nakajima, Innovative Scientific Computing by Integration of (Simulation + Data + Learning) in Information Technology Center, The University of Tokyo, NHR PerfLab Seminar, 2022 (**Invited Talk**)
- (4) 国内会議発表 (査読なし)
- [20] 住元真司, 埴敏博, 中島研吾, MPI-Adapter2: 異なる MPI ライブラリ間でのアプリケーション実行を実現する ABI 変換ライブラリ, 情報処理学会研究報告 2022-HPC-188 (27), 2023
- [21] 中島研吾, 「計算・データ・学習」融合を推進する革新的基盤ソフトウェア「h3-Open-BDEC」, 第 14 回 自動チューニング技術の現状と応用に関するシンポジウム (ATTA2022), 2022 年 12 月 23 日
- [22] 住元真司, 荒川隆, 坂口吉生, 松葉浩也, 八代尚, 埴敏博, 中島研吾, WaitIO-Hybrid: 共有ファイルシステムと Socket を併用可能なシステム間通信ライブラリ, 情報処理学会研究報告 2022-HPC-187 (6), 2022
- [23] 長尾大道, 地震学と情報地質学の接点, 日本情報地質学会シンポジウム 2022, オンライン, 2022 年 12 月 2 日 (**Invited Talk**)
- [24] 中島研吾, 住元真司, 八代尚, 荒川隆, 松葉浩也, h3-Open-BDEC: 「計算・データ・学習」融合による革新的スーパーコンピューティング, RIMS 共同研究: 数値解析が拓く次世代情報社会～エッジから富岳まで～, 2022 (**Invited Talk**)
- [25] 河合直聡, 中島研吾, 前処理付きクリロフ部分空間法への低/任意精度の適用」RIMS 共同研究 (公開型) 数値解析が拓く次世代情報社会～エッジから富岳まで～, 2022 年 (**Invited Talk**)
- [26] 長尾大道, 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, 2022 年度 統計関連学会連合大会, 成蹊大学 (東京都武蔵野市, ハイブリッド形式), 2022 年 9 月 7 日 (**Invited Talk**)
- [27] 住元真司, 荒川隆, 坂口吉生, 松葉浩也, 八代尚, 埴敏博, 中島研吾, Wisteria/BDEC-01 における異種システム間連成計算実行環境, 情報処理学会研究報告 2022-HPC-185 (21), 2022
- [28] Y.C. Chen, K. Nakajima, A Parallel-in-Time Method for Compressible Fluid Explicit Simulation, IPSJ SIG Technical Report, 2022-HPC-185-27, 2022

- [29] 長尾大道, データ同化の基礎と応用, 第 66 回システム制御情報学会, 京都リサーチパーク (京都市), 2022 年 5 月 20 日 (**Invited Talk**)
- [30] 長尾大道, 伊藤伸一, 金子亮介, データサイエンスによる地震研究の深化, 2022 年度 人工知能学会全国大会, 2022
- [31] Takashi Arakawa, Hisashi Yashiro, Kengo Nakajima, Development of a coupler h3-Open-UTIL/MP and application, Japan Geoscience Union Meeting 2022, Makuhari, May 23, 2022
- [32] 金子亮介, 長尾大道, 伊藤伸一, 鶴岡弘, 小原一成, 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, 日本地球惑星科学連合 2022 年大会, 幕張メッセ (千葉県千葉市,ハイブリッド形式), 2022 年 5 月 22 日
- [33] 東京大学情報基盤センター, 第 191 回お試しアカウント付き並列プログラミング講習会「異種システム間連成アプリケーション開発を学ぶ: WaitIO/MP 講習会」, 2022 年 10 月
- (6) その他 (特許, プレスリリース, 著書等)
- [34] 人工知能 (AI) で探る地震 - 「匠の技」超え進む地震研究 -, 産経新聞, 2023 年 3 月 5 日
- [35] 住元特任教授らの論文が PDCAT2022 Best Paper Award を受賞, 2022/11/28: <https://www.itc.u-tokyo.ac.jp/blog/2022/11/28/post-3872/>
- [36] 地震現象の解明・防災に挑む, 読売新聞, 2022 年 9 月 1 日
- [37] E. Suarez, P. Deniel, K. Nakajima, A. Dubey, S. Derradji, N. Wright, Disaggregated Heterogeneous Architectures, SC22 BoF, 2022

(5) 公開したライブラリなど