

「計算・データ・学習」融合スーパーコンピュータシステム 「Wisteria/BDEC-01」の概要

中島研吾^{†1} 埴 敏博^{†1} 下川辺隆史^{†1} 伊田明弘^{†1} 芝 隼人^{†1} 三木洋平^{†1} 星野哲也^{†1}
有間英志^{†1} 河合直聡^{†1} 坂本龍一^{†1} 近藤正章^{†1} 岩下武史^{†2} 八代 尚^{†3} 長尾大道^{†4}
松葉浩也^{†1} 荻田武史^{†5} 片桐孝洋^{†6} 古村孝志^{†4} 鶴岡 弘^{†4} 市村 強^{†4} 藤田航平^{†4}

スーパーコンピューティングは従来の計算科学シミュレーション中心から、データ科学、機械学習との融合へと移行しつつある。東京大学情報基盤センターでは（計算+データ+学習）融合による Society 5.0 の実現を目指す取り組みを継続して実施してきた。本発表では、2021年5月14日に運用を開始する『「計算・データ・学習」融合スーパーコンピュータ（Wisteria/BDEC-01）』について、システムの概要、関連する研究開発を紹介する。

1. はじめに

東京大学情報基盤センター [1]（以下「当センター」）は1965年に東京大学大型計算機センターとして設立されて以来50年余り、全国共同利用施設、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点の中核拠点、革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ（HPCI）[2]の構成機関として、国内外の産学官の各機関で実施されているスーパーコンピュータを使用した大規模シミュレーションによる計算科学・計算工学の研究の発展に貢献してきた。

2020年4月現在、当センターでは4式（Reedbush-H, Reedbush-L, Oakforest-PACS, Oakbridge-CX）のシステム [1] を運用しており、総利用者数は学内外を合計して約2,600名、そのうち55%は学外利用者である。各システムは、高い計算性能、ユーザーフレンドリなプログラム開発環境、安定した運用が利用者が高く評価されている。HPCIによる「新型コロナウイルス感染症対応 HPCI 臨時公募課題」においても2020年度に実施した全14課題のうち6課題が当センターのシステムを使用して実施されている [1]。

計算科学が「第三の科学（The Third Pillar of Science）」と呼ばれるようになって久しいが、近年は様々なデータを活用することによって更に新しい科学を開拓する試みが始まっている。

当センターのシステムの利用分野では、図1に示すように①工学・ものづくり、②地球科学・宇宙科学、③材料科学、が長年にわたって利用時間の合計80%以上を占めてきたが [3]、当センター初のGPU搭載システムとして2017年4月に運用を開始したReedbush-H及びReedbush-Lは人工知能、医療画像処理を中心としたバイオインフォマティクス

クスなどより多様な分野で使用されている（図2）。

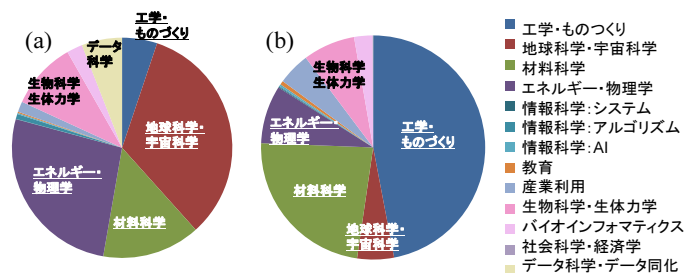


図1 実行ジョブノード時間の分野別比率（2020年度），
(a) Oakforest-PACS (OFP, Intel Xeon/Phi (KNL))，
(b) Oakbridge-CX (OBCX, Intel Xeon Platinum 8280 (Cascade Lake))

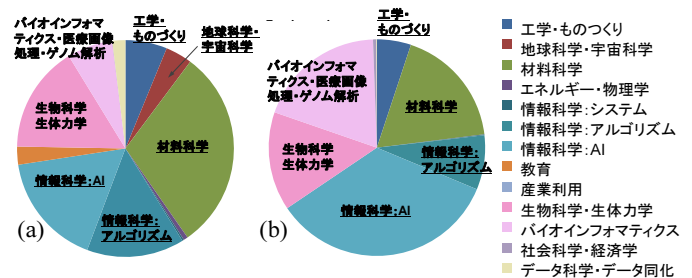


図2 実行ジョブノード時間の分野別比率（2020年度），
(a) Reedbush-H (Intel Xeon/BDW + NVIDIA Tesla P100 (ノード当たり2GPU))，
(b) Reedbush-L (Intel Xeon/BDW + NVIDIA Tesla P100 (ノード当たり4GPU))

2. Society 5.0 と「S+D+L」融合

2.1 Society 5.0

Society 5.0とは、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する、人間中心の社会（Society）である。狩猟社会（Society 1.0）、農耕社会（Society 2.0）、工業社会（Society 3.0）、情報社会（Society 4.0）に続く、新たな社会を指すもので、第5期科学技術基本計画において我が国が目指すべき未来社会の姿として初めて提唱された [4]。

Society 5.0の実現にはIoT (Internet of Things)、ロボット、AI (人工知能)、ビッグデータといった社会の在り方に影響を及ぼすデジタル革新・イノベーションが不可欠である。

^{†1} 東京大学情報基盤センター
Information Technology Center, The University of Tokyo
^{†2} 北海道大学情報基盤センター
Hokkaido University Information Initiative Center
^{†3} 国立環境研究所
National Institute for Environmental Studies
^{†4} 東京大学地震研究所
Earthquake Research Institute, The University of Tokyo
^{†5} 東京女子大学現代教養学部
School of Arts and Sciences, Tokyo Woman's Christian University
^{†6} 名古屋大学情報基盤センター
Information Technology Center, Nagoya University

スーパーコンピューティングは、従来の計算科学・計算工学シミュレーションに加えて、データ科学、機械学習等の知見を融合した新しい手法を適用することによって、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合したシステムを形成し、Society 5.0 が目指す人間中心の社会の実現に大きく貢献すると期待される。

海外に目を向けてもアメリカエネルギー省のエクサスケールシステム計画の一つである Aurora/A21 システムのホームページ [5 章] では「シミュレーション (Simulation) + データ (Data) + 学習 (Learning) (S+D+L)」の融合 (「S+D+L」融合) が謳われている。

2.2 BDEC 構想

当センターでは 2015 年頃からこのような状況を想定し、「S+D+L」融合を実現するプラットフォームとして『「計算・データ・学習」融合スーパーコンピュータシステム』（通称 BDEC (Big Data & Extreme Computing)) 構築を目指して、様々な研究開発を進めてきた [3]。現在当センターで運用中の Reedbush (データ解析・シミュレーション融合スーパーコンピュータ、2016 年 7 月運用開始)、Oakbridge-CX (大規模超並列スーパーコンピュータシステム、同 2019 年 7 月) はいずれも「BDEC」設計のためのプロトタイプ、実証システムとしても位置づけられている。

3. Wisteria/BDEC-01

2021 年 5 月 14 日に運用を開始する「Wisteria/BDEC-01」[6,7] は、BDEC システム構想に基づくシステムの第 1 号機であり、シミュレーションノード群 (Odyssey (オデッセイ)) とデータ・学習ノード群 (Aquarius (アクエリアス)) の 2 つの計算ノード群を有したシステムである (図 3)。総ピーク性能はそれぞれ 25.9 PFLOP (Odyssey), 7.2 PFLOPS (Aquarius), 合計 33.1 PFLOPS である。

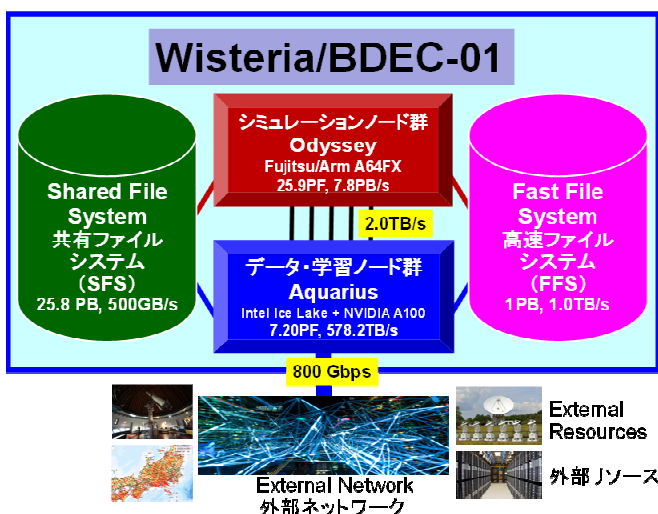


図 3 Wisteria/BDEC-01 の概要 [6,7]

シミュレーションノード群 (Odyssey) は「FUJITSU Supercomputer PRIMEHPC FX1000」20 ラックから構成され、

「A64FX」を 7,680 ノード (368,640 コア) 搭載する。「A64FX」は、Arm v8.2-A 命令セットアーキテクチャーをスーパーコンピュータ向けに拡張した「SVE (Scalable Vector Extension)」を、世界で初めて実装したプロセッサである。最先端の 7nm プロセスで製造され、48 個の演算コアと 2 個または 4 個のアシスタントコアを有し、倍精度浮動小数点演算で 3.3792 TFLOPS の理論ピーク性能を実現する。合計ピーク性能は 25.9 PFLOPS であり、各ノードは 32 GiB の HBM2 メモリを搭載し、シミュレーションノード群 (Odyssey) の総メモリ容量は 240 TiB、総メモリバンド幅は 7.8 PB/秒である。各ノードはバイセクションバンド幅が 13.0 TB/秒のノード間相互結合ネットワーク (Tofu インターコネクト D) で結合されている。

データ・学習ノード群 (Aquarius) 各ノードは汎用 CPU 2 基 (Intel Xeon Platinum 8360Y (Ice Lake), 36core, 2.4GHz), 演算加速装置 (GPU) 8 基 (NVIDIA A100 Tensor コア (SXM4, 40GB)) から構成されており、ノード間インターコネクトには NVIDIA Mellanox HDR InfiniBand ネットワークが採用されている。データ・学習ノード群 (Aquarius) の合計ピーク性能は 7.2 PFLOPS、総メモリ容量は 36.5 TiB、総メモリバンド幅は 578.2 TB/秒である。各ノードは、データ転送速度が 200 Gbps の帯域を有する InfiniBand HDR を 4 リンク用いて、フルバイセクションバンド幅を持つノード間相互結合ネットワークで結合されている。さらに、外部接続のために 25 Gbps Ethernet インタフェースも有している。

FEFS (Fujitsu Exabyte File System) による、共有ファイルシステム (容量: 25.8 PB, データ転送速度: 0.504 TB/秒) および SSD を搭載した高速ファイルシステム (容量: 1.0 PB, データ転送速度: 1.00 TB/秒) を有し、それぞれシミュレーションノード群 (Odyssey), データ・学習ノード群 (Aquarius) からアクセスし、大規模なデータを高速に処理することが可能である。

シミュレーションノード群 (Odyssey) とデータ・学習ノード群 (Aquarius) は、合計 160 本の InfiniBand EDR

(100Gbps) を用いて 2.0 TB/秒のネットワークバンド幅で結合されている。また、データ・学習ノード群 (Aquarius) は合計 800 Gbps のネットワーク転送速度で外部との通信が可能である。Aquarius の一部のノードは SINET 等の外部ネットワークを介して、サーバー、ストレージ、センサーネットワークを含む様々な外部リソースに直接アクセス可能であり、観測データをリアルタイムに取り込んで解析、シミュレーションに利用することも可能である。

ソフトウェアとしては、Fortran, C/C++コンパイラ, Python インタープリタ, MPI 通信ライブラリ等を使用できる。計算科学, データ科学, 機械学習, 人工知能等幅広い分野のライブラリ, ツール, アプリケーションを提供する。オープンソースアプリケーションとしては、OpenFOAM

(数値流体力学), MateriApps アプリケーション群 (物質科学), 東京大学生産技術研究所で開発された革新的シミュレーションソフトウェア群などを利用できる。

Wisteria/BDEC-01 は最先端の研究だけでなく, 計算科学・データ科学・機械学習や HPC 分野の人材育成にも共同利用される予定である。Wisteria/BDEC-01 の導入および運用により, 特に「計算・データ・学習」融合が推進され, サイバー空間 (仮想) とフィジカル空間 (現実) を高度に融合させた Society 5.0 の実現に大きく貢献することが期待される。

4. h3-Open-BDEC

4.1 Wisteria/BDEC-01 による「計算・データ・学習」融合

「計算+データ+学習 (S+D+L)」融合のためには, Wisteria/BDEC-01 のようなこれまでにない革新的なハードウェアが必要であるが, 様々なアプリケーション, ワークロードを Wisteria/BDEC-01 上で開発, 実行していくためのソフトウェア群も重要である。

当センターで開発した「ppOpen-HPC (自動チューニング機構を有するアプリケーション開発・実行環境)」[8],

「h3-Open-BDEC (「計算+データ+学習」融合のための革新的ソフトウェア基盤)」[9,10] を利用し, 高性能なアプリケーションを容易に開発することが可能である。

4.2 h3-Open-BDEC 概要

当センターでは, センター内外の計算科学, 計算機科学, 数値アルゴリズム, データ科学, 機械学習の専門家と協力して, エクサスケール時代のスパコンの能力を最大限活用し, 科学的発見を持続的に促進するために, (計算+データ+学習)融合による革新的シミュレーション手法を提案し, 最小限の計算量・消費電力で融合シミュレーションを実現する研究開発, ソフトウェア基盤実装を実施している [9,10]。本研究では, Wisteria/BDEC-01 を (計算+データ+学習) 融合のためのプラットフォームと位置付け, ①変動精度演算・精度保証・自動チューニング (Automatic Tuning, AT) による新計算原理に基づく革新的高性能・高信頼性・省電力数値解法, ②機械学習に基づく革新的手法である階層型データ駆動アプローチ (hDDA) の 2 項目を中心に研究開発を実施し, 革新的ソフトウェア基盤「h3-Open-BDEC」を開発する (図 4) [9,10]。h3-Open-BDEC を BDEC システム上で様々なアプリケーションに適用, 効果を検証し, (計算+データ+学習) 融合と変動精度演算により, 従来手法と同等の正確さを保ちつつ, 10 倍以上の飛躍的な計算量・消費電力削減の達成を目指している。h3-Open-BDEC をスーパーコンピュータ「富岳」, 次世代 HPCI 計算機資源等へ展開し, (計算+データ+学習) 融合手法の普及を図るものである。

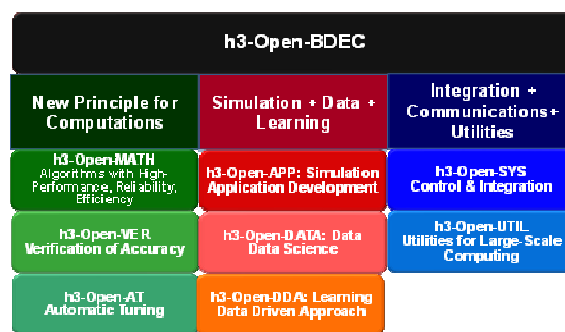


図 4 h3-Open-BDEC の概要 [9,10]

革新的ソフトウェア基盤「h3-Open-BDEC」(図 4) を構成する h3-Open-MATH (数値アルゴリズム), h3-Open-VER (精度保証), h3-Open-AT (自動チューニング), h3-Open-APP (アプリ開発), h3-Open-DATA (データ科学), h3-Open-DDA (データ駆動アプローチ), h3-Open-UTIL (並列ユーティリティ), h3-Open-SYS (統合・制御) は複数の構成要素を含み, 緊密に関連し, 以下の 3 層を構成している:

- ① 「変動精度演算に基づく新計算原理」層 (h3-Open-MATH, h3-Open-VER, h3-Open-AT)
- ② 「(計算+データ+学習) 融合」層 (h3-Open-APP, h3-Open-DATA, h3-Open-DDA)
- ③ 「統合・通信・ユーティリティ」層 (h3-Open-SYS, h3-Open-UTIL)

エクサスケールシステムにおける高性能数値アルゴリズム実現には, メモリ・ネットワークの階層の深化に対応した通信最適化 (Serial, Parallel), 省電力・省エネルギーに向けた検討が必要である。数値計算による近似解 (数値解) は様々な計算誤差を含み, 計算結果の信頼性の観点から, 数値解の正しさを数学的に保証する必要があるが, 低精度・混合/変動精度使用時, 悪条件問題には重要であるが, 実問題で現れる大規模疎行列・H 行列への応用例はほとんどない。本研究では, 「変動精度演算に基づく新計算原理」確立を目指して, 高性能アルゴリズム, 精度保証, 最適精度選択のための自動チューニング手法の研究開発を実施する。

シミュレーションに機械学習を適用して異なるパラメータでの解を予測するデータ駆動アプローチ (Data Driven Approach, DDA) では, 計算を繰り返して教師データを生成する必要がある。本研究で提案する階層型 DDA (hDDA) は, 特徴検知, MOR (Model Order Reduction), UQ (Uncertainty Quantification), スパースモデリング, 適応格子等の諸機能を駆使して, 計算量 (メッシュ数, 粒子数) を削減した簡易モデルを, 機械学習により自動生成し, 教師データ生成用モデルとして利用する。「統合・通信・ユーティリティ」層は Wisteria/BDEC-01 のようなヘテロジニアスなシステム上で, 「計算・データ・学習」融合を実現するための

環境を提供する。

h3-Open-BDEC はエクサスケール時代のスパコンで（計算+データ+学習）融合を実現する世界初の革新的ソフトウェア基盤であり、計算科学の専門家のみで（計算+データ+学習）融合を容易に実現できる。ソースコード、マニュアル類も含めて一般に公開し、様々な環境で利用できるよう、普及に努める。h3-Open-BDEC 利用による（計算+データ+学習）融合シミュレーションにより、従来手法と同等の正確さを保ちつつ、大幅な計算量・消費電力削減を目指す。

4.3 研究事例(1)低精度・混合精度演算(h3-Open-MATH, h3-Open-VER, h3-Open-AT, h3-Open-APP)

従来、科学技術計算には倍精度浮動小数点演算 (FP64) が広く使用されてきたが、近年、単精度 (FP32)、半精度 (FP16) 等による低精度演算を積極的に活用した研究が広く行われている。疎行列を対象とした前処理付き反復法の例では、比較的条件の良い問題では、倍精度を単精度に置き換えることによって、収束までの反復解法は 20%程度増加するものの、計算時間は半分程度になる事例が報告されている [11]。計算時間の減少率は、使用計算機、実装方法（疎行列格納法）、問題規模等によって様々であるが、一般に計算時間に比例して消費エネルギー (J 値) は減少する。

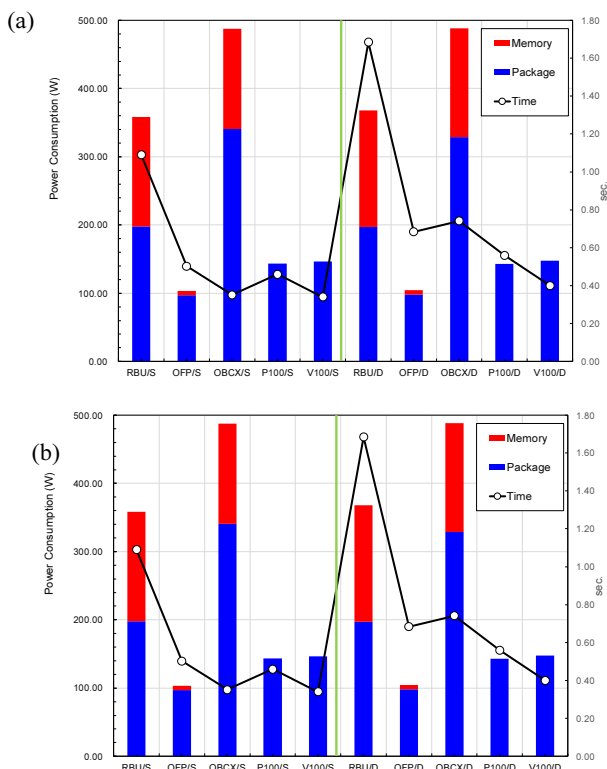


図5 ICCG法の計算時間と (a) 消費電力 (W), (b) 消費エネルギー (J), 各計算機環境の最適ケース [11]

図5は様々なCPU, GPU (Intel Xeon/Broadwell (Reedbush-U, RBU), Intel Xeon Phi (Oakforest-PACS, OFF),

NVIDIA Tesla P100 (Reedbush-L, P100)・V100 (V100)) の1ノードを使用してICCG法の計算時間, 消費電力(W), 消費エネルギー (J) を比較したものである [8]。消費エネルギーと計算時間はほぼ正比例していることがわかる。計算時間としては, OFP, OBCX, P100, V100 はほぼ拮抗しているが, OBCX, V100 がやや速い。OBCXは消費電力 (W), 消費エネルギー (J) が OFP, P100, V100 の3倍以上である。OFP, P100, V100 は消費エネルギー (J) はほぼ等しいが, P100, V100 についてはホストのCPUの消費電力, 消費エネルギー (アイドル時でも1ノード120W以上) は考慮されていない。P100⇒V100の計算速度向上はMediumで35-40%, Largeで45-60%である。全般的に消費電力 (W) はMedium⇒Largeで増加しており, 特にOFPでは2倍程度になっている。

4.4 研究事例(2)機械学習の定常・非定常流体解析への適用(h3-Open-DDA)

h3-Open-DDAを実現するため, 流体計算を直接予測する手法の開発を目的として, 定常流および非定常流体計算で得られる結果を機械学習を用いて予測する手法の開発を実施した。一般的な流体解析に利用される数値計算手法で得られた高精度な結果を, 機械学習のうち深層学習の畳み込みニューラルネットワークを用いて高速に予測する手法の研究開発を進めている。

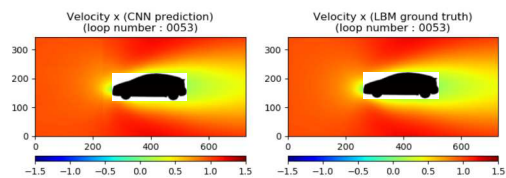
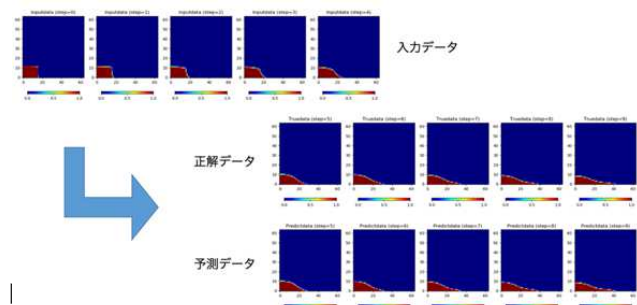


図6 機械学習による定常流シミュレーションの予測(左)と従来の流体シミュレーションによる計算結果(右)。カラーはx方向の流速を表す [12]

定常流の予測では, 計算領域の境界条件と物体を表す符号付き距離関数を用いることで, 3次元の計算領域全域の流速を予測することを実現した。学習データよりも広域な計算領域を予測するため, 広域な計算領域を領域分割法し, 分割された領域への深層学習の適用と分割された領域間での境界交換を併用した新しい予測手法を提案した [12]。数値計算手法としては大規模なスパコンで高速に計算が可能な格子ボルツマン法を用いている。図6に示すように, 複数の計算領域にまたがる車形状の周りの空気の流れのシミュレーション結果を精度良く深層学習で予測できている。

非定常流体計算の予測では, 円柱の周りを流れる流体のシミュレーションに対して, 複数の時間ステップの計算結果からそれに続くシミュレーション結果を深層学習で予測する手法を開発した [13]。学習のための教師データは工業

的に広く用いられる OpenFOAM を利用した。複数の時間ステップを一つの空間の次元として捉え、Encoder-decoder モデルの深層ニューラルネットワークを利用した。図 7 では、5 つの時間ステップの計算履歴から、その先の時間ステップのデータを予測している。予測には、シミュレーションの全ての時間ステップの結果を用いるのではなく、20 ステップに 1 つのステップを用いて、大幅な高速化を図っている。



の計算履歴からその先の 5 つの時間ステップの結果の予測と正解データ [13]

4.5 研究事例 (3) リアルタイムデータ同化と強震動シミュレーションの融合 (h3-Open-APP, h3-Open-DATA, h3-Open-SYS, h3-Open-UTIL)

計算科学シミュレーションは多くの場合、非線形な問題を扱うため、多数のパラメータスタディが必要である。Wisteria/BDEC-01 では、機械学習による最適パラメータ推定を、外部から取り込んだ実験・観測データによる同化と組み合わせて、正確な解をより短時間で求めることを目指している。

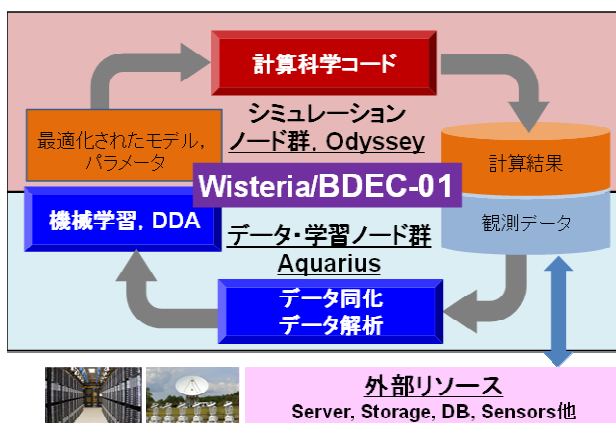


図 8 Wisteria/BDEC-01 利用による「計算・データ・学習」融合のイメージ [6,7]

図 8 は、BDEC 上における「計算+データ+学習 (S+D+L)」融合のイメージである。h3-Open-BDEC を使用することによって、シミュレーションノード群で計算科学シミュレーションコードを実行し、データ・学習ノード群では外部から取り込んだ観測データや、機械学習による推論等に基づきパラメータを最適化し、更に計算を実施する

というサイクルを容易に実現することができ、またパラメータ最適化によって計算時間を全体として短縮できることが期待される。

シミュレーションとデータ科学の融合としては気候・気象シミュレーションとデータ同化の事例が良く知られているが、当センターでは東京大学地震研究所と協力して、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を融合させた新しいシミュレーション手法の開発を実施している。古村等は、最適内挿法によるデータ同化と三次元強震動シミュレーションを組み合わせた Seism3D/OpenSWPC-DAF (Data-Assimilation-Based Forecast) の研究開発を実施しており、既に既存の地震観測データファイルを使用して「シミュレーション+データ同化」融合に成功している (図 9) [14]。

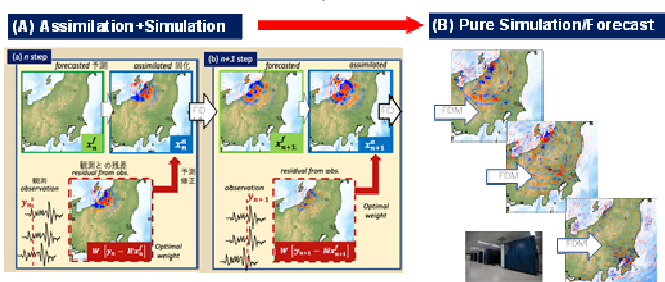


図 9 リアルタイムデータ同化と強震動シミュレーションの融合 [14]

当センターでは、2019 年度からリアルタイム観測データを使用して「シミュレーション+データ同化」融合を実施するためのフレームワークの研究開発を実施している。東大地震研、防災科技研、気象庁によって整備された JDXne (図 8) によって、全国 2,000 地点以上、100Hz で計測されている地震観測データをリアルタイムに取得できる。現在、Oakbridge-CX システム (OBCX) の外部接続ノードを使用して JDXnet から得られる観測データを直接利用可能となっている (図 10)。

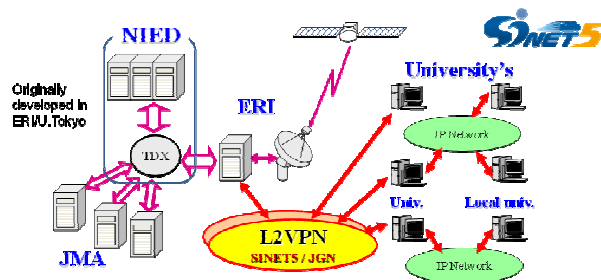


図 10 JDXnet による地震観測データ取得

h3-Open-SYS は Wisteria/BDEC-01 のようなヘテロジニアスなシステムにおいて、シミュレーションとデータ処理実行を統合するソフトウェア群である。h3-Open-SYS/WaitIO [10, 15] はその中核機能として、ファイルシステムを通じて複数の並列プログラムがデータの受け渡しを行うライ

ブラリである。多くのスパコンで提供されている共有ファイルシステムをプログラム間のデータ連携手段として使用することで高い汎用性を確保し、ファイルを通信用途として用いる際に一般的に問題となる同期の問題を WaitIO ライブラリで解決する。

h3-Open-SYS/WaitIO は、本研究で Oakbridge-CX を使用して実施したリアルタイムデータ同化と強震動シミュレーションの融合に適用されている (図 11) [15, 16]。2021 年度は、これらを Wisteria/BDEC-01 へ展開する。更に、h3-Open-BDEC の多機能カプラーである h3-Open-UTIL/MP を使用して、データ同化、機械学習による三次元地下構造モデル構築システムを開発し、より精度の高いシミュレーションを実施するための検討を実施する。

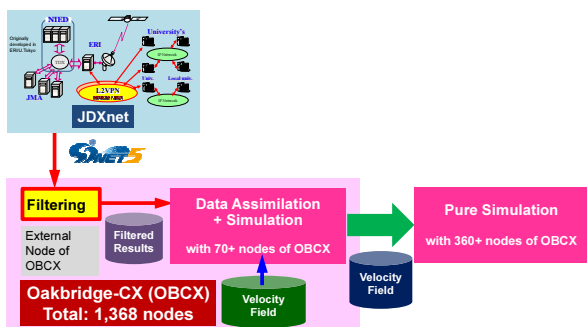


図 11 Oakbridge-CX 上で実施したリアルタイムデータ同化と強震動シミュレーションの融合

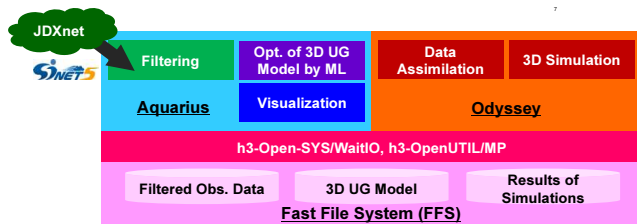


図 12 Wisteria/BDEC-01 上でリアルタイムデータ同化と強震動シミュレーションの融合、データ同化・機械学習による三次元地下構造モデル構築

5. まとめ

スーパーコンピューティングは従来の計算科学シミュレーション中心から、データ科学、機械学習との融合による新しいスタイルへと移行しつつある。本稿では、「計算+データ+学習」融合のためのプラットフォームとして、2021 年 5 月 14 に東京大学情報基盤センターにおいて運用を開始する「Wisteria/BDEC-01」の概要とともに、Society 5.0 の実現を目指して東大情報基盤センター及び共同研究グループによって実施されている h3-Open-BDEC などの取り組みについて紹介した。当日の発表では、Wisteria/BDEC-01 のベンチマーク測定結果等についても紹介する予定である。

Wisteria/BDEC-01 は、実験的運用と特別プログラムによる利用を経て、2021 年 8 月より正式運用を開始し、2021 年 10 月より HPCI, JHPCN を始めとする各種共同利用・共

同研究プログラムに供される予定である。計算科学・データ科学・機械学習および HPC 分野の人材育成にも利用され、講義・演習、並列プログラミング講習会の他、萌芽共同研究公募課題「AI for HPC: Society 5.0 実現へ向けた人工知能・データ科学による計算科学の高度化」[17]においても、中核的なシステムとして、特に若手を中心とした研究者の育成にも貢献する。

シミュレーションノード群 (Odyssey), データ・学習ノード群 (Aquarius) を使用し、計算科学、データ科学、人工知能・機械学習の幅広いアプリケーションをカバーすることによって、最先端の科学技術計算を支える重要なインフラとなる他、東京大学各部局 (生産技術研究所, 地震研究所, 大気海洋研究所, 物性研究所), 理化学研究所等との協力のもと、ものづくり, 地球科学分野 (固体地球, 大気・海洋), 物質科学などの分野における「計算・データ・学習」融合により、Society 5.0 実現に向けた重要なプラットフォームとなることが期待される。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金 (19H05662, 代表: 中島研吾) の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 東京大学情報基盤センター (スーパーコンピューティング研究部門・スーパーコンピューティングチーム): <https://www.cc.u-tokyo.ac.jp/>
- [2] 革新的ハイパフォーマンス・コンピューティング・インフラ (HPCI); <http://www.hpci-office.jp/>
- [3] 中島他, Society 5.0 を実現する BDEC システム, AXIES 2020
- [4] Society 5.0 (内閣府): https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/
- [5] Aurora/A21 System, Argonne National Laboratory: <https://www.anl.gov/topic/aurora>
- [6] Wisteria/BDEC-01: <https://www.cc.u-tokyo.ac.jp/supercomputer/wisteria/service/>
- [7] HPCwire (February 25, 2021), Japan to Debut Integrated Fujitsu HPC/AI Supercomputer This Spring (by Tiffany Trader), <https://www.hpcwire.com/2021/02/25/japan-to-debut-integrated-fujitsu-hpc-ai-supercomputer-this-spring/>
- [8] ppOpen-HPC: <https://github.com/Post-Peta-Crest/ppOpenHPC>
- [9] h3-Open-BDEC: <http://nkl.cc.u-tokyo.ac.jp/h3-Open-BDEC/>
- [10] Iwashita, T, Nakajima, K., Shimokawabe, T., Nagao, H., Ogita, T., Katagiri, T., Yashiro, H., Matsuba, H., h3-Open-BDEC: Innovative Software Platform for Scientific Computing in the Exascale Era by Integrations of (Simulation + Data + Learning), Project Poster, ISC-HPC 2020
- [11] 中島研吾, 坂本龍一, 星野哲也, 有間英志, 埴敏博, 近藤正章, 低精度演算とアプリケーション性能, 情報処理学会研究報告 (2020-HPC-174-5) (第 174 回 HPC 研究会)
- [12] 畑山そら, 下川辺隆史, 小野寺直幸, 深層学習と境界交換を用いた複数領域にまたがる定常流のシミュレーション結果の予測, 情報処理学会研究報告 (2020-HPC-175-13) 2020
- [13] 長谷川敦, 下川辺隆史, 深層学習による混相流の時間発展シミュレーション結果の予測手法の検討, 情報処理学会研究報告 (2020-HPC-177-4), 2020
- [14] Furumura, T., T. Maeda, and A. Oba, Early Forecast of Long - Period Ground Motions via Data Assimilation of Observed Ground

- Motions and Wave Propagation Simulations, *Geophys. Res. Lett.*,
<https://doi.org/10.1029/2018GL081163>, 2018
- [15] Nakajima, K., Matsuba, K., Hanawa, T., Furumura, T., Tsuruoka, H., Nagao, H., Integration of 3D Earthquake Simulation & Real-Time Data Assimilation on h3-Open-BDEC, MS290: Progress & Challenges in Extreme Scale Computing & Data SIAM Conference on Computational Science & Engineering (CSE21) (Online, March 4, 2021)
- [16] SIAM News (March 10, 2021), Supercomputer Simulations of Earthquakes in Real Time (by Jillian Kunze),
<https://sinews.siam.org/Details-Page/supercomputer-simulations-of-earthquakes-in-real-time>
- [17] 萌芽共同研究公募課題「AI for HPC : Society 5.0 実現へ向けた人工知能・データ科学による計算科学の高度化 (試行)」:
<https://www.cc.u-tokyo.ac.jp/guide/exploratory/AIforHPC/>