



気象モデルとAIのリアルタイムカップリング - モジュラースパコン上でのAI for Scienceの事例



荒川 隆^{1,2}, 住元真司¹, 八代尚³, 中島研吾^{1,4}

1) 東京大学情報基盤センター

2) 株式会社ClimTech

3) 国立環境研究所

4) 理研R-CCS

PCCワークショップ in 神戸 2026 「AIによるHPC」
2026年7月3日, 理化学研究所計算科学研究センター

- 現職
 - 東京大学情報基盤センター客員研究員
 - 株式会社CliMTech代表取締役社長
- 専門分野
 - HPC (High Performance Computing: 高性能計算) とくに結合 (連成) 計算
 - 気象気候モデルを主対象としたソフトウェアエンジニアリング
- 学歴・職歴
 - 1986 東北大学理学部天文および地球物理第二学科卒業 (地球物理学専修)
 - 1989 東北大学理学研究科地球物理学専攻 (修士 (理学), 気象学)
 - 2010 東北大学工学研究科技術社会システム専攻 (博士 (工学))
 - 1989-1998 一般財団法人日本気象協会 (JWA)
 - 1998-2022 一般財団法人高度情報科学研究機構 (RIST)
 - 2022- 東京大学情報基盤センター
 - 2022- 株式会社CliMTech

講演の内容

- モジュラースパコンでのAI for Science
 - 研究の背景
 - ハードウェア
 - ソフトウェア: h3-Open-BDEC, WaitIOとUTIL/MP
- 気象とAI
 - 気象シミュレーションとAI: 気象分野におけるAI利用の分類
 - NICAM雲物理プロセスへのAIの適用
- まとめ

講演の内容

- モジュラースパコンでのAI for Science
 - 研究の背景
 - ハードウェア
 - ソフトウェア: h3-Open-BDEC, WaitIOとUTIL/MP
- 気象とAI
 - 気象シミュレーションとAI: 気象分野におけるAI利用の分類
 - NICAM雲物理プロセスへのAIの適用
- まとめ

研究の背景：(計算・データ・学習)融合(S+D+L)

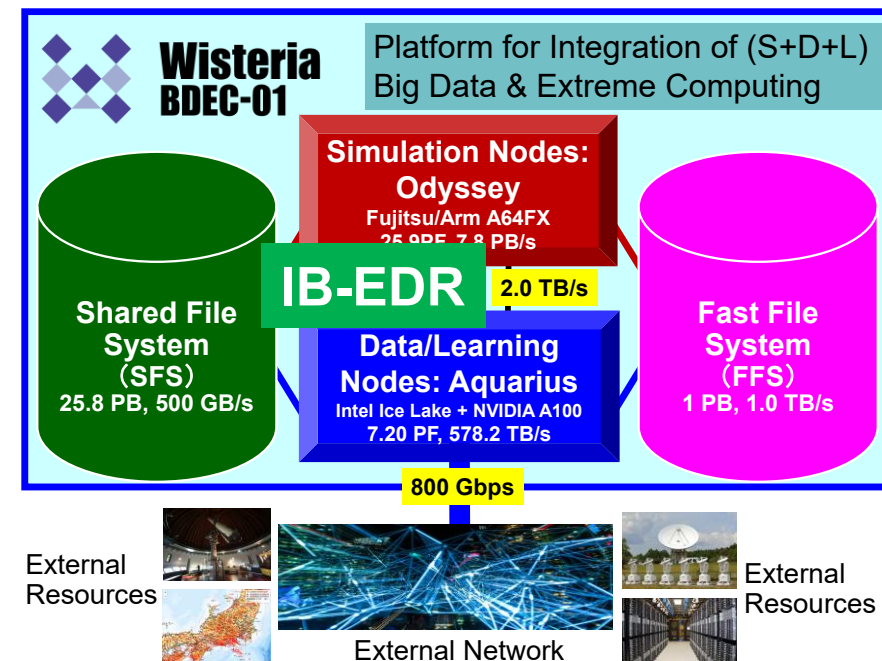
- スパコンのワークロードの多様化：S・D・L
 - 計算科学, 計算工学：Simulations(S)
 - 大規模データ解析：Data(D)
 - AI, 機械学習：Learning(L)
- 東大情報基盤センターでは, 2015年頃から「(S+D+L)融合」による新しい科学の開拓を実現する, ハードウェア, ソフトウェア, アプリケーション, アルゴリズムに関する研究開発を開始
 - BDEC計画(Big Data & Extreme Computing)
 - 「データ+学習」による, より高度な「シミュレーション」⇒AI for HPC
 - 地球科学関連では自然な発想(すでに実施されている)
- 2021年5月に運用を開始した「Wisteria/BDEC-01」は「BDEC計画」の1号機
 - 「計算・データ・学習(S+D+L)」融合を実現する, 世界でも初めてのプラットフォーム



ヘテロジニアス(モジュラー)なシステムを利用した 「計算・データ・学習」融合

- Wisteria/BDEC-01 (2021年5月～)
 - Odyssey: 計算ノード群 (A64FX) (7,680)
 - Aquarius: データ／学習ノード群 (NVIDIA A100) (360)
 - 計算資源の78%はOdyssey (CPU)
- Miyabi (2025年1月～) JCAHPC
 - Miyabi-G with NVIDIA GH200 (1,120)
 - Miyabi-C with Intel Xeon Max (190)
 - 計算機資源の98%はMiyabi-G (GPU)

どちらのシステムもモジュール間は高速ネットワークで接続されファイルを共有している。



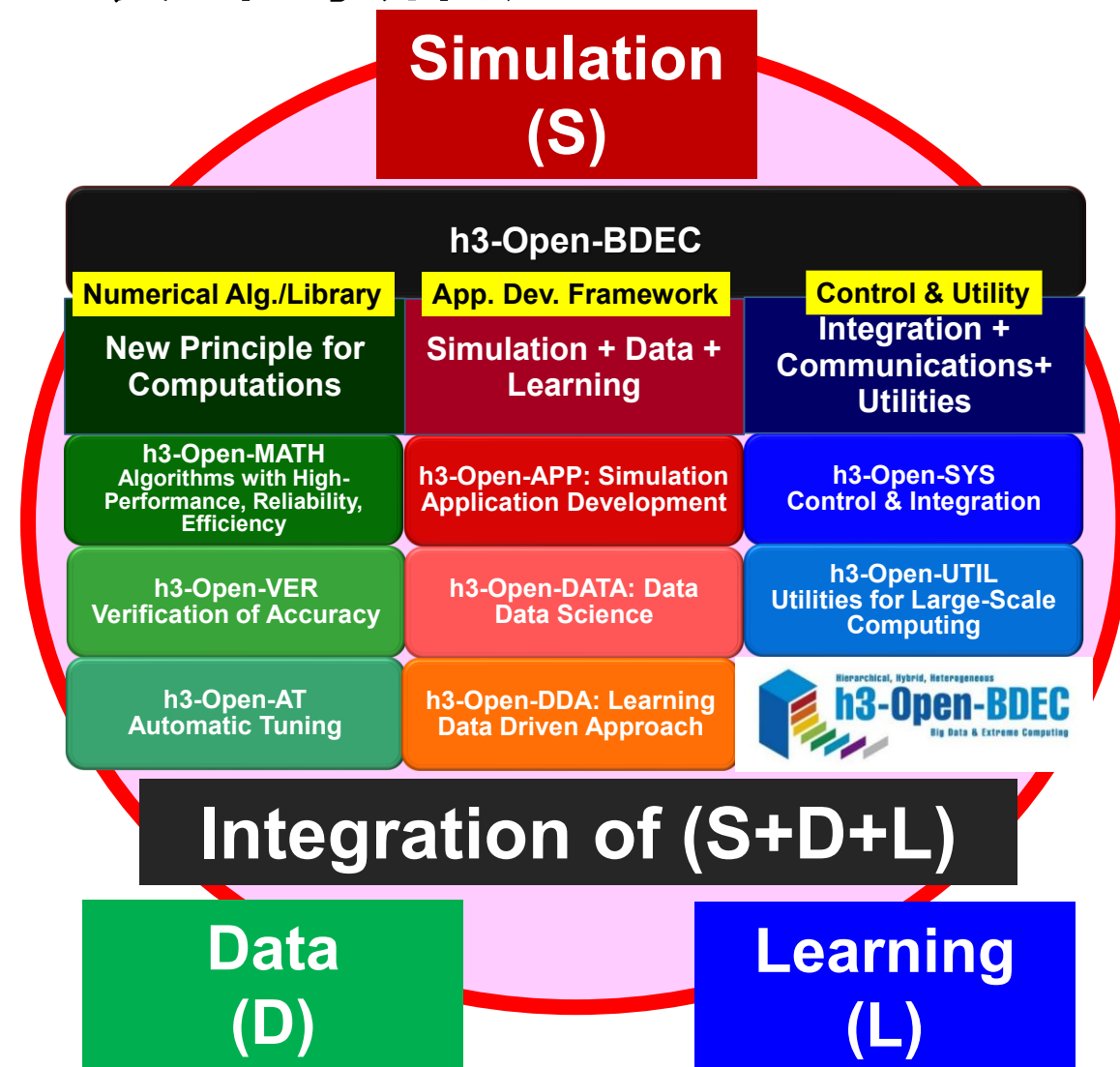
IB-NDR (400Gbps)		
IB-NDR200 (200)		IB-HDR (200)
Miyabi-G NVIDIA GH200 1,120 78.2 PF, 5.07 PB/sec	Miyabi-C Intel Xeon Max (HBM2e) 2 x 190 1.3 PF, 608 TB/sec	File System DDN EXA Scaler 11.3 PB, 1.0TB/sec All Flash Storage

h3-Open-BDEC

「計算＋データ＋学習」融合を実現する革新的ソフトウェア基盤
 科研費基盤研究(S)(2019年度～23年度, 代表: 中島研吾)

<https://h3-open-bdec.cc.u-tokyo.ac.jp/>

- ① 変動精度演算・精度保証・自動チューニングによる新計算原理に基づく革新的数値解法
- ② 階層型データ駆動アプローチ等に基づく革新的機械学習手法
- ③ ヘテロジニアス環境(e.g. Wisteria/BDEC-01)におけるソフトウェア, ユーティリティ群



h3-Open-SYS/WaiIO (WaitIO)



[住元他 2021]

- ヘテロジニアスシステムにおけるノード群間通信ライブラリ

- MPIライクなAPI

- 基本的な通信はisend/irecv
- Cインターフェース+α

- 複数の通信方法を提供

- Socket, File, etc
- 環境変数で簡単に切り替え

```
module load waitio
```

```
export WAITIO_PPID=1  
export WAITIO_NPB=2
```

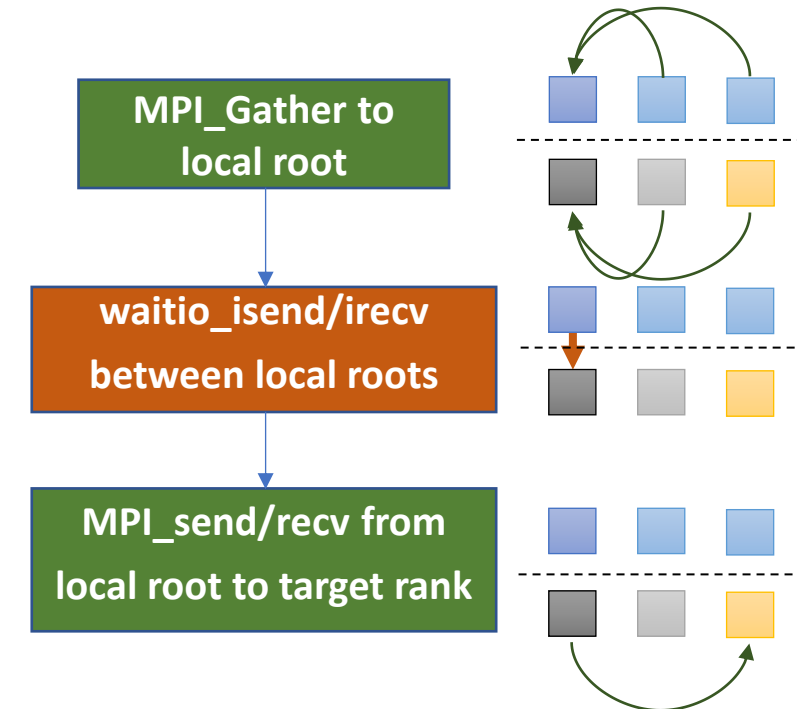
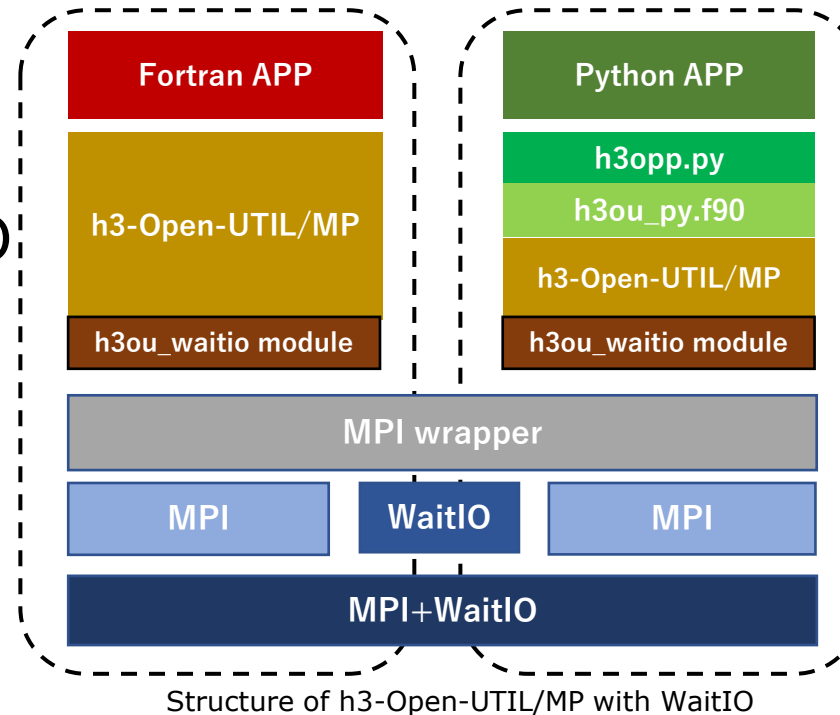
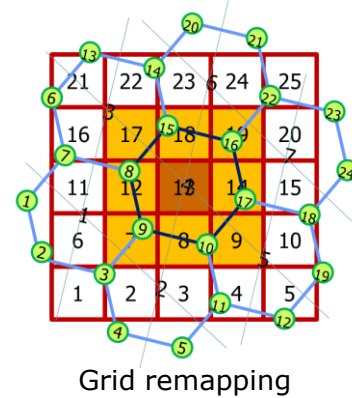
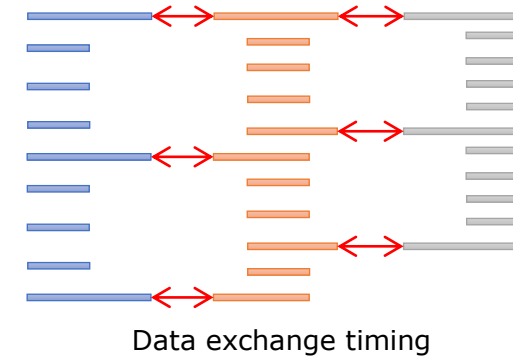
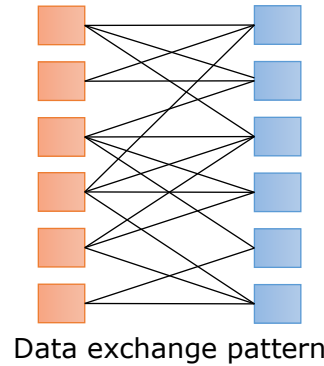
```
#export WAITIO_COMM_TYPE=verbs  
export WAITIO_COMM_TYPE=socket
```

WaitIO API	Description
waitio_isend	Non-Blocking Send
waitio_irecv	Non-Blocking Receive
waitio_wait	Termination of waitio_isend/irecv
waitio_init	Initialization of WaitIO
waitio_get_nprocs	Process # for each PB (Parallel Block)
waitio_create_group waitio_create_group_wr anks	Creating communication groups among PB's
waitio_group_rank	Rank ID in the Group
waitio_group_size	Size of Each Group
waitio_pb_size	Size of the Entire PB
waitio_pb_rank	Rank ID of the Entire PB

h3-Open-UTIL/MP (UTIL/MP)



- 汎用カップリングライブラリ
 - プロセス管理
 - データ交換
 - 格子のリマッピング
- WaitIOの適用
 - ブロック内: MPI
 - ブロック間: WaitIO
 - 大域通信: MPI + WaitIO



講演の内容

- モジュラースパコンでのAI for Science
 - 研究の背景
 - ハードウェア
 - ソフトウェア: h3-Open-BDEC, WaitIOとUTIL/MP
- 気象とAI
 - 気象シミュレーションとAI: 気象分野におけるAI利用の分類
 - NICAM雲物理プロセスへのAIの適用
- まとめ

気象シミュレーションとAI

松岡大祐: 気象学におけるシミュレーションとAI、人工知能学会誌、2023, vol 38(3), 345-350

- プロセス駆動アプローチにおけるAI活用事例
 - 観測データの品質管理
 - パラメタリゼーション(サロゲートモデル)
 - ダウンスケーリング(? ORBIT-2はデータ駆動)
 - アンサンブル予測など
- データ駆動型アプローチにおけるAI活用事例
 - サロゲートモデル(AI気象モデル)
- AI気象モデル
 - WeatherNext2 (Google)
 - Earth-2 (NVIDIA)
 - Aurora (Microsoft)

「知性」と「理性」

山本芳久:トマス・アキナス、2017、岩波新書

- 「知性(intellectus)」
 - 全体を把握する直感的な理性
- 「理性(ratio)」
 - 推論的・過程的・分析的な理性

「知性認識する(intelligere)とは、可知的な真理を端的に把握することである。それに対して、理性認識する(ratiocinari)とは、可知的な真理を認識するために、知性認識されたある一つのことから、もう一つのことへと進んでいくことである」

AIが、あるいはAI気象モデルが「知性」である、と主張しているわけではありません！

NICAMへのAIの適用

雲サロゲートの意義

- 雲(積雲対流)を現実的に表現する雲解像モデル→計算負荷が高い
- 低解像度モデル→雲の再現性が低い
- 高解像度雲物理プロセスをAIで代替し低解像度シミュレーションに適用

計算の内容

- 大気モデル:NICAM(正二十面体非静力学大気モデル), 220mまでの計算例あり
- AI(NICE, NICAM Cloud Emulator):PyTorch, 3層のMPL
- 雲物理プロセス(サブルーチン)の入力値(変数)から出力値(変数)を再現するように学習

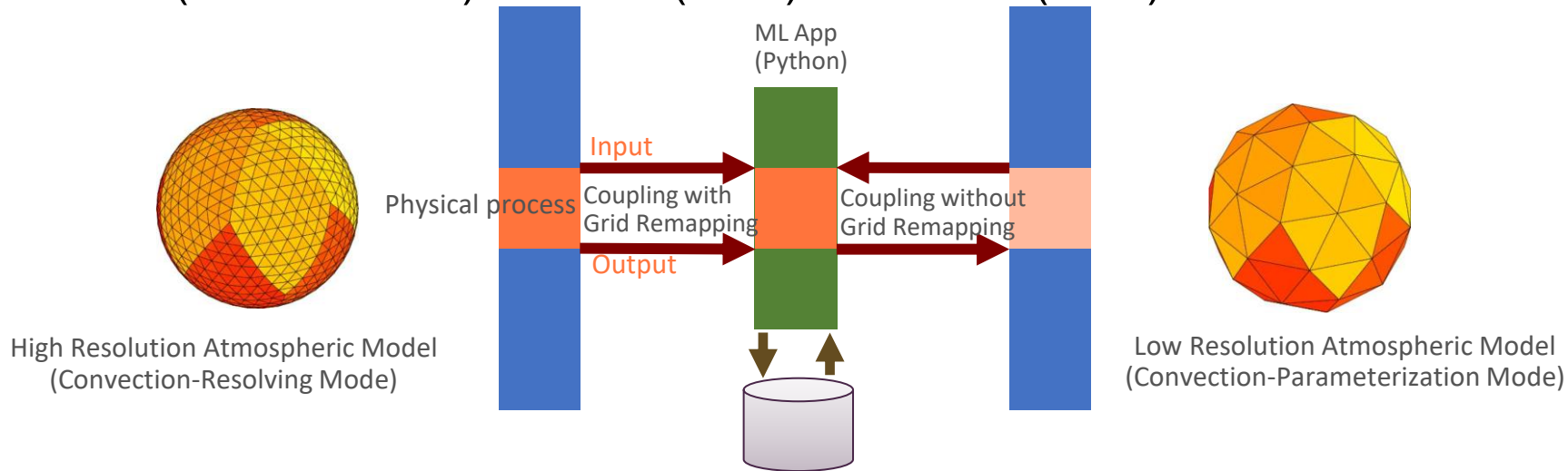
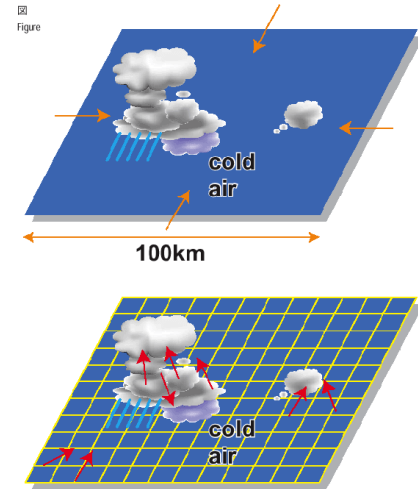
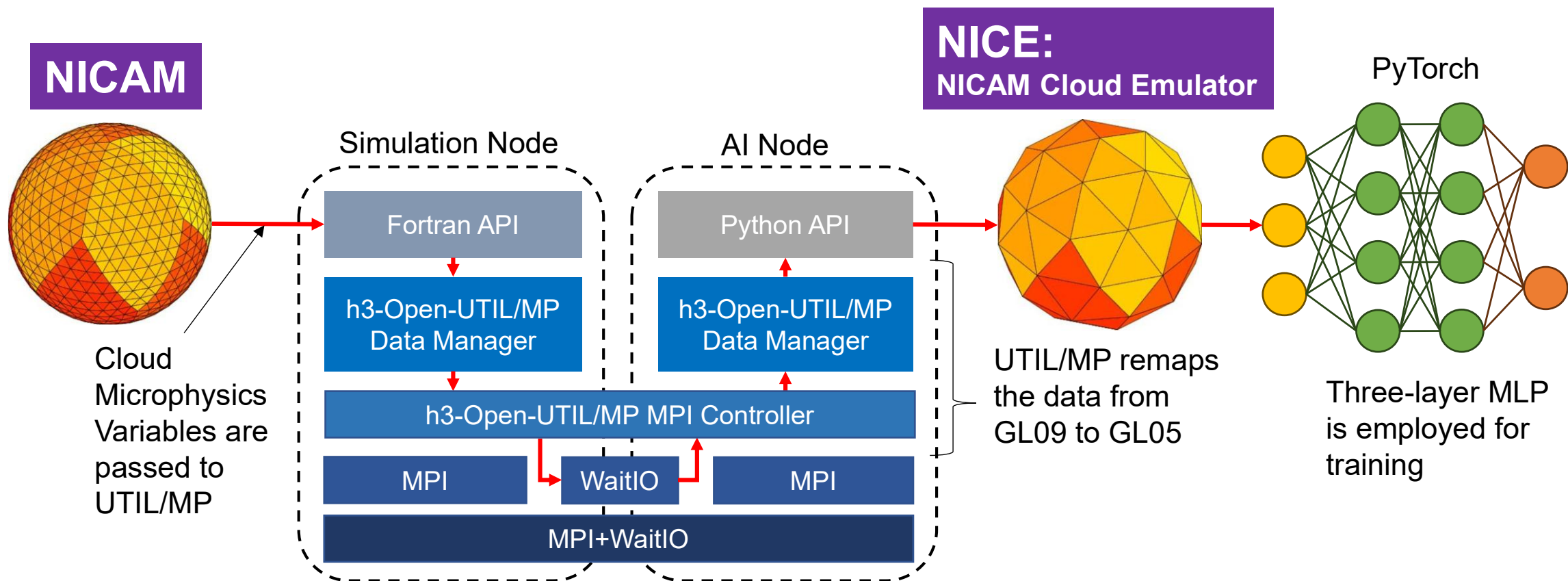
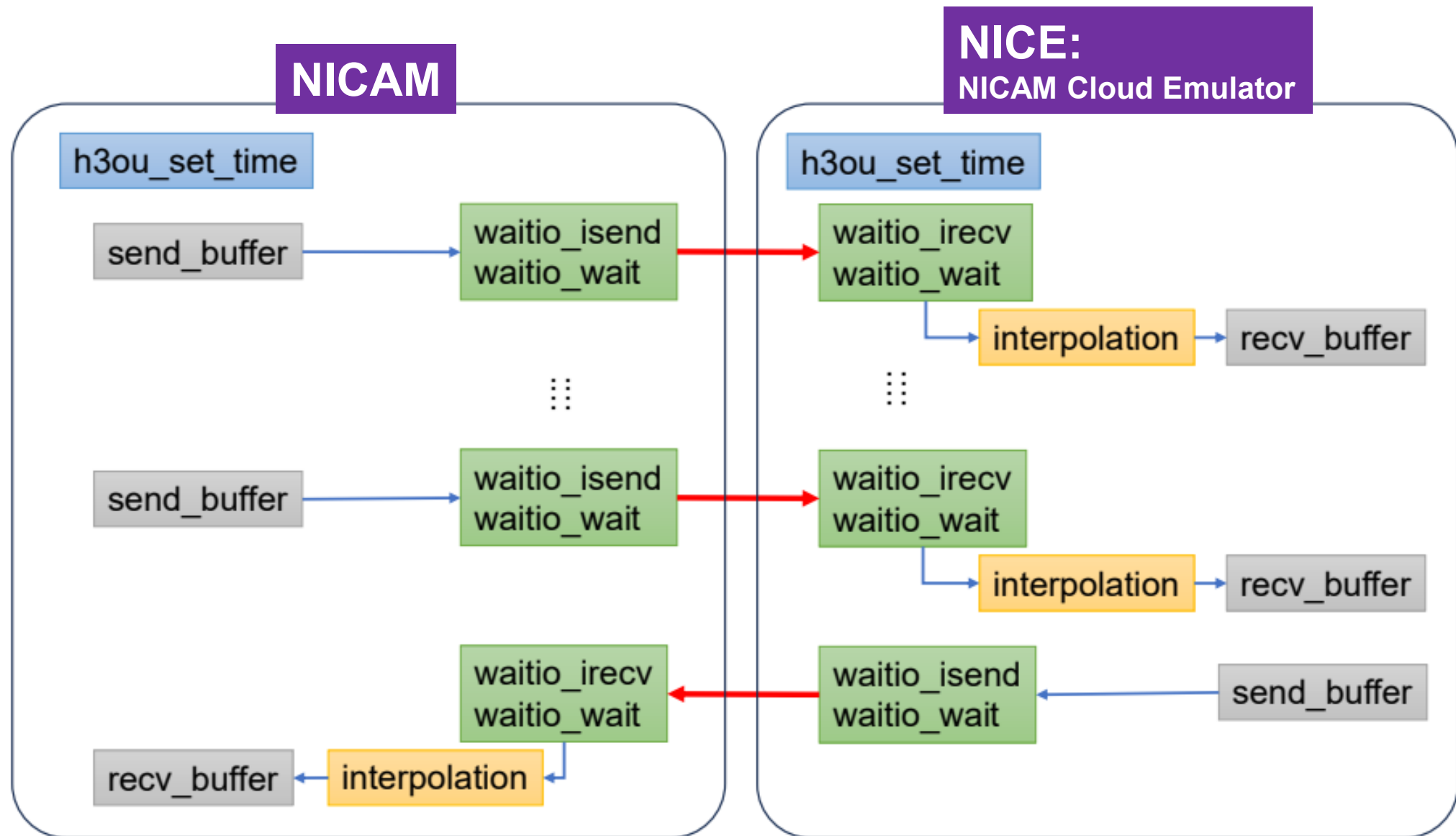


Diagram of applying ML to an atmospheric model

現状：高解像度モデルによるシミュレーションに基づく学習 (Training) に注目



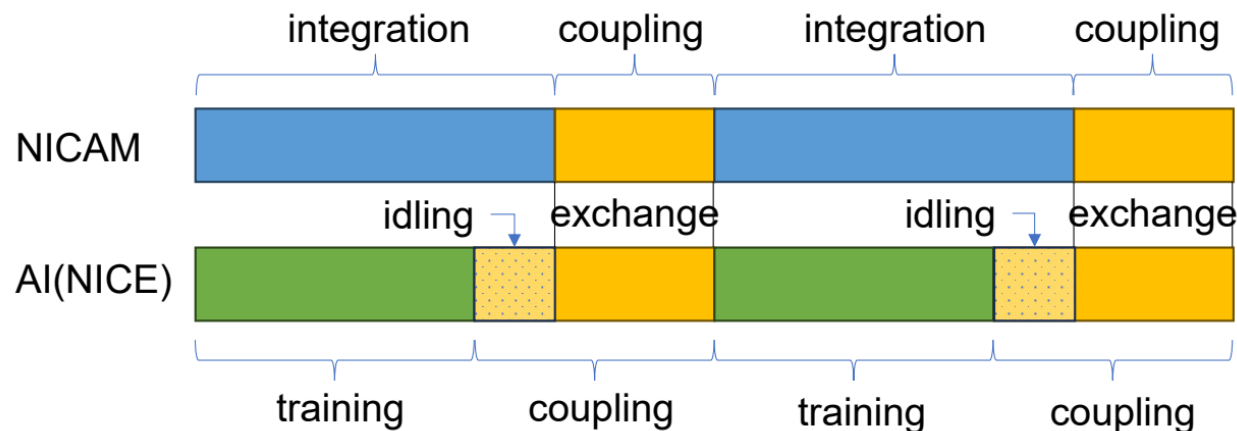
NICAM-NICE Interface using h3-Open-UTIL/MP



詳細シミュレーション(NICAM)とAI(NICE)を並行して実施可能:パイプライン処理

• 学習計算の方法

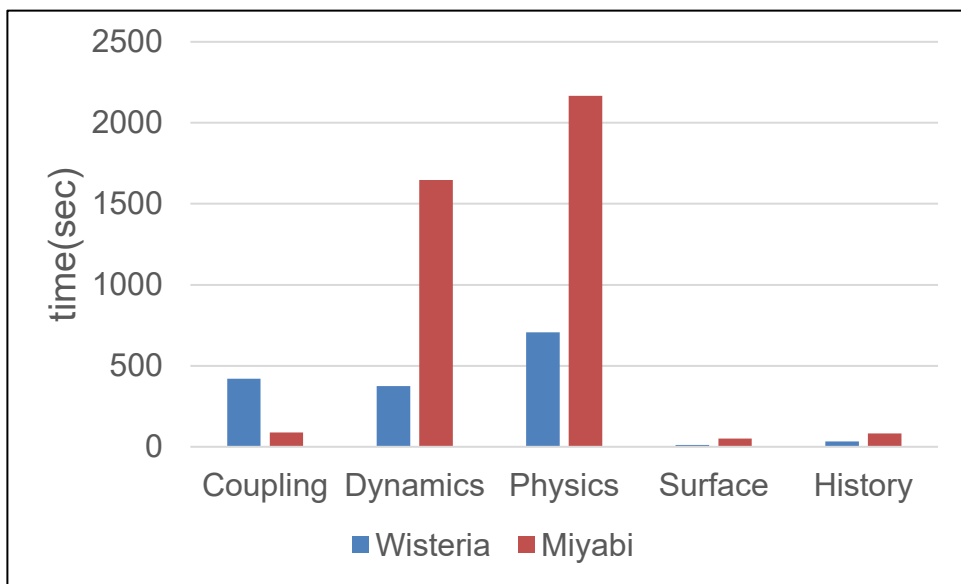
- NICAM鉛直78層の計算について層毎に学習
- カプラで高解像度データ(水平解像度14km)を低解像度(55km)に変換し低解像度データで学習
- AIライブラリはPyTorch、3層のMLP
- 学習パラメータ(ニューロン数、バッチサイズなど)はOptunaで層毎に事前に最適化
- 学習側の各プロセスは学習時間が平均化するように層を割り当て
- NICAMの変数(入力8変数、出力3変数、合計1.64GByte)を1時間毎にNICEに送信、NICE側で学習計算



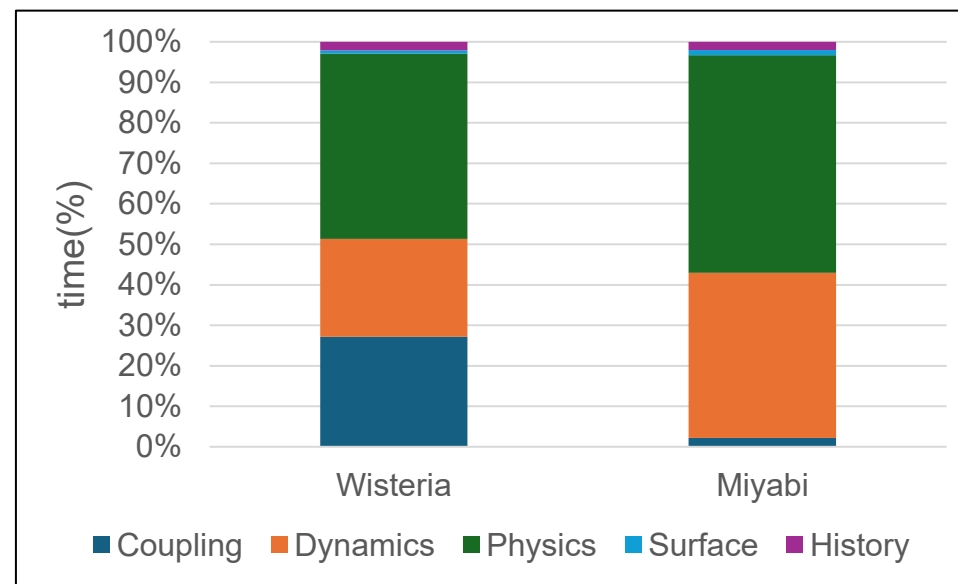
実行性能

実行条件

Model	System	Processes	Nodes	Processes/Node	Threads
NICAM	Wisteria-Odyssey	640	160	4	12
	Miyabi-C	640	32	20	5
NICE	Wisteria-Aquarius	20	3	7	None
	Miyabi-G	20	20	1	None



NICAM各部の実行時間



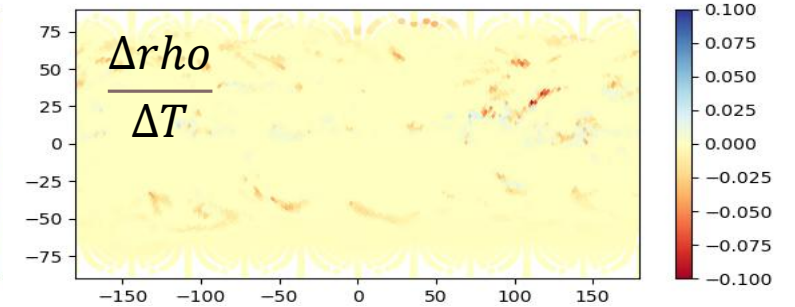
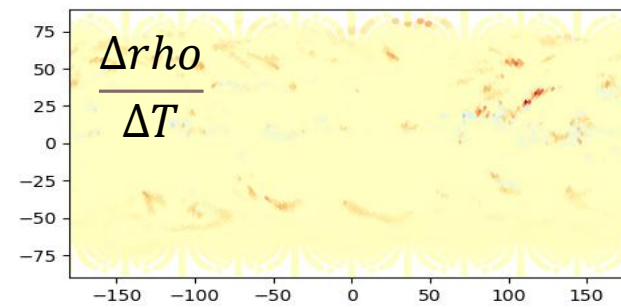
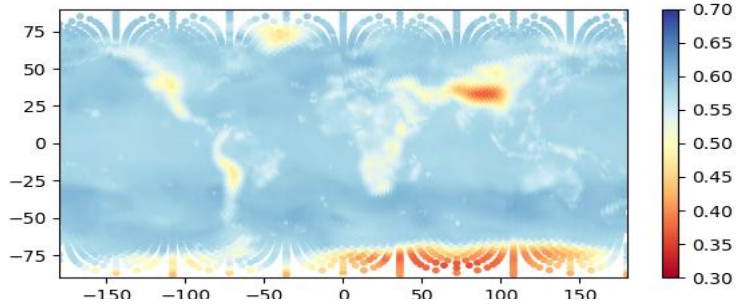
NICAM各部の実行時間割合

シミュレーションとAIの比較

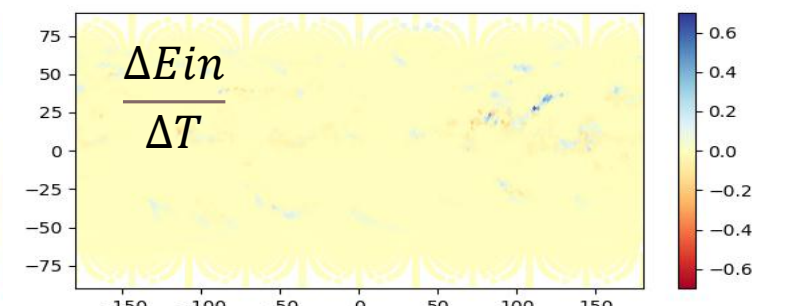
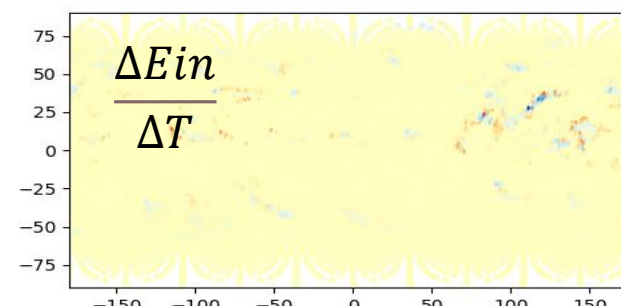
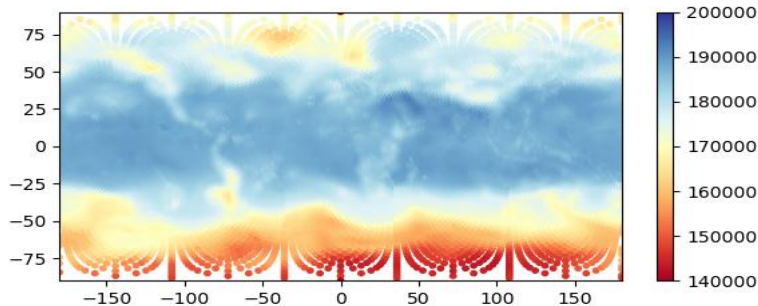
入力: 空気密度, 内部エネルギー, 水蒸気密度

出力: その時間方向勾配, 傾向は良く捉えられている [荒川, 八代(環境研), 中島 2022]

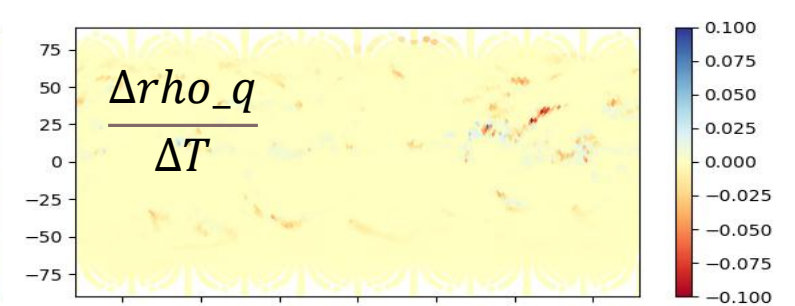
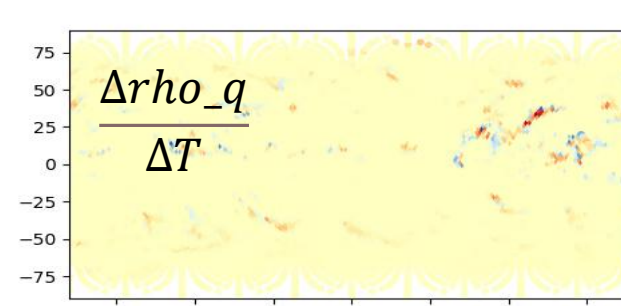
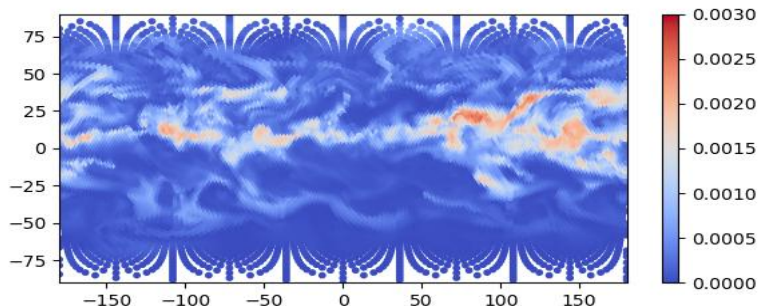
空気密度
rho



内部
エネルギー
Ein



水蒸気
密度
rho_q



入力

Simulations

Prediction by ML/NN

2022
3 parameters
for 3 variables

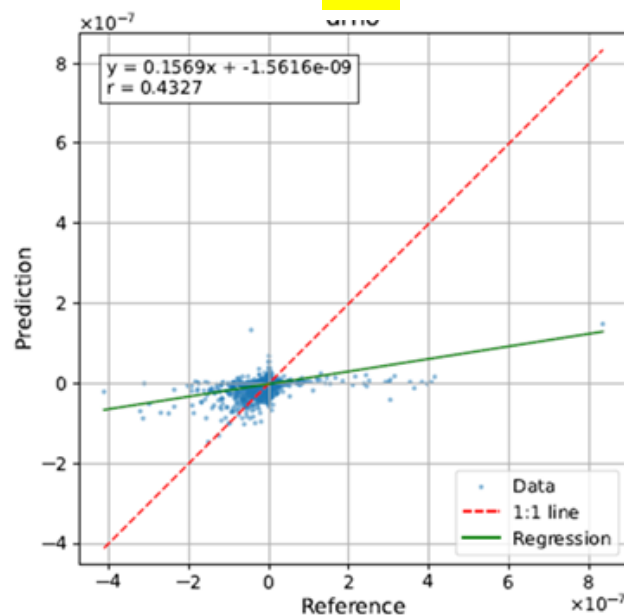
[Arakawa et al.
SCA/HPCAsia 2026
Poster]

2025
8 parameters
for 3 variables

Density of:
Cloud Water
Rain, Ice, Snow
Graupel

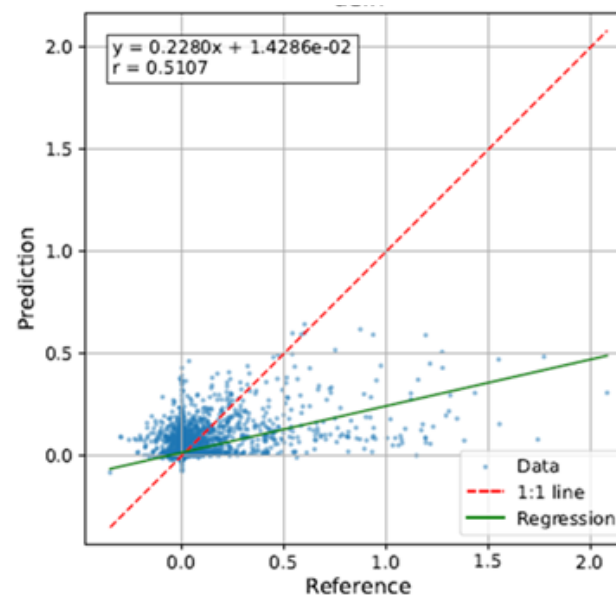
Air Density

ρ_{ho}



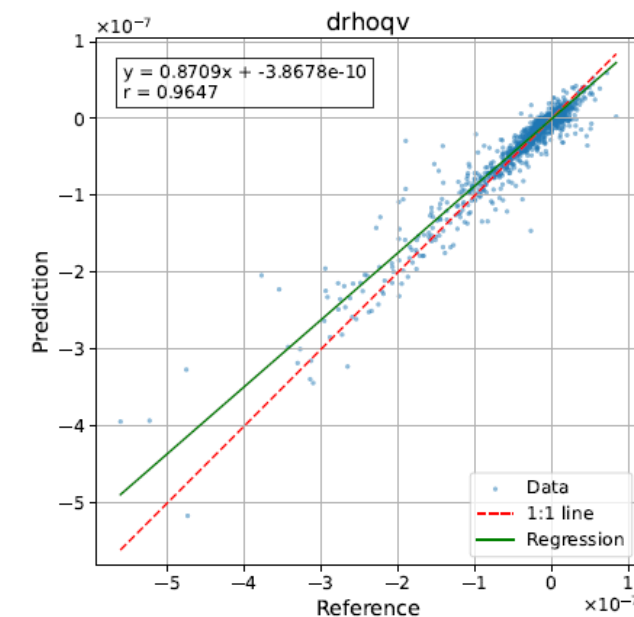
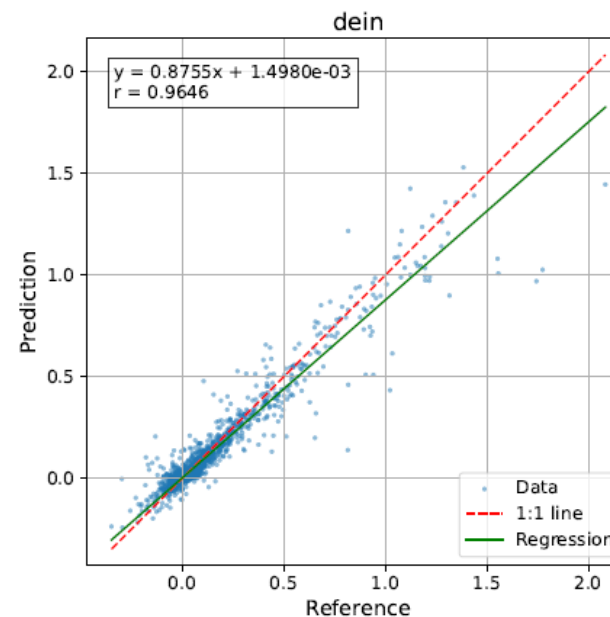
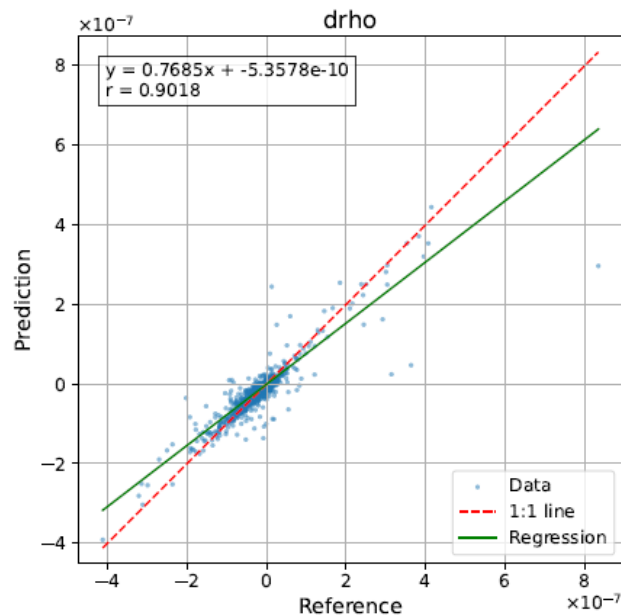
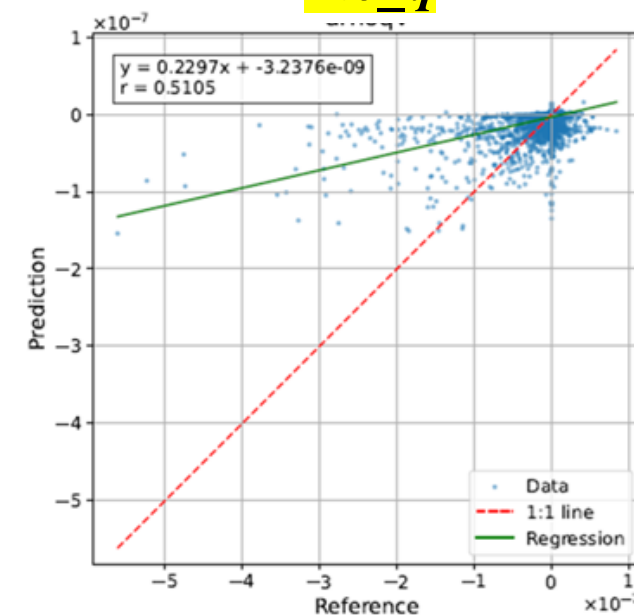
Internal Energy

E_{in}



Vapor Density

ρ_{ho_q}



令和7年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 科学技術賞受賞（科学技術振興部門）

計算／データ／学習の融合による革新的計算科学手法の振興
（中島研吾，住元真司，荒川 隆，下川邊隆史，塙 敏博）



まとめ

- モジュラースパコンを用いたシミュレーションと学習の連携システムを構築
 - システムによってロードバランスは異なる
 - 効率的な運用には適切な資源配分が必要
 - より柔軟かつ広範囲の連携
 - Odyssey + Miyabi-G
- 適切な入力変数を選ぶことで再現性は大幅に向上
 - 適切な学習のためには対象ドメインの知識が必要
 - まだ十分ではない
 - 保存すべき量が保存されるような学習が必要
 - 適切な学習アルゴリズムの選択
 - 異なるドメインに所属する研究コミュニティの連携が不可欠
 - 同時にドメインをまたいで全体を俯瞰・サポートできる人材も不可欠