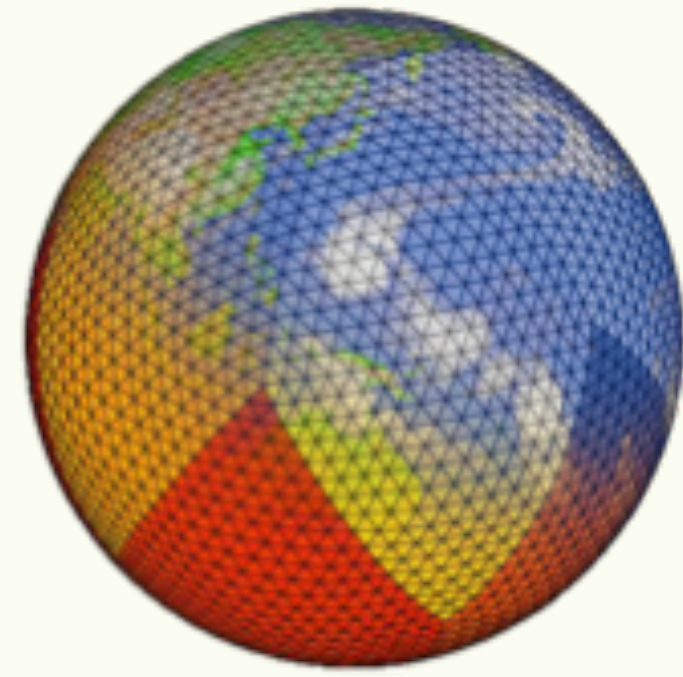


**HPC-AI融合時代における気象・気候シミュレーションの変革と挑戦：
NICAMでの取り組み**

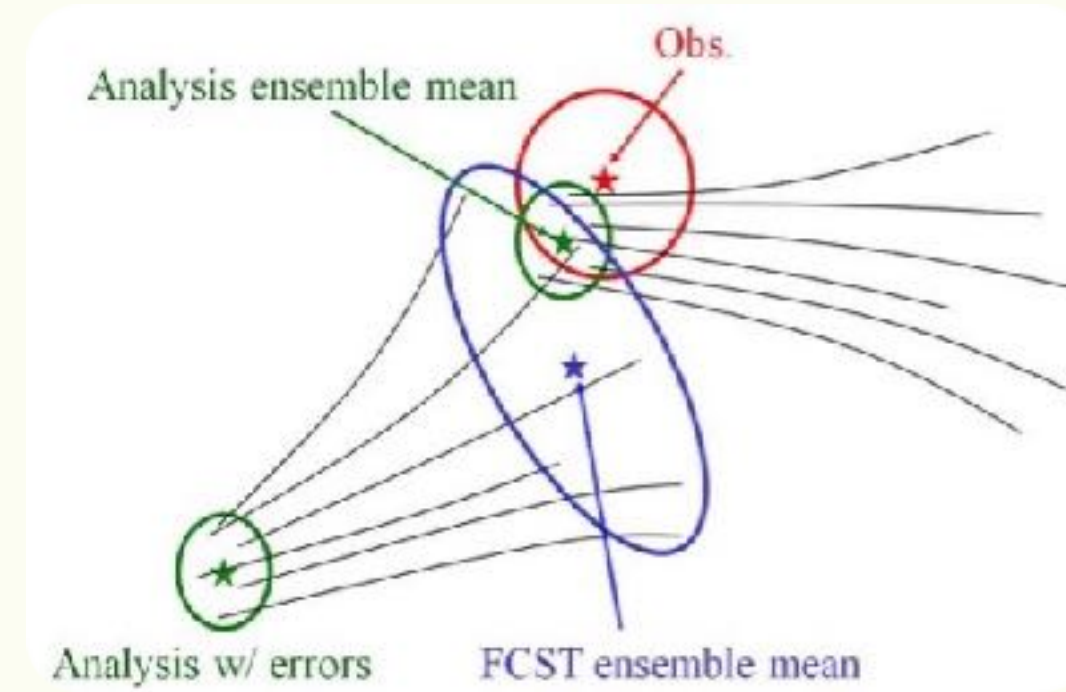
国立環境研究所 地球システム領域 八代 尚

富岳における成果 (1) NICAM-LETKF グランドチャレンジ

HPC



+



HPDA

NICAM

(Global Storm Resolving Model)

LETKF

(Ensemble Data Assimilation System)

- **全球3.5kmメッシュ x 1024メンバーアンサンブルデータ同化計算: 富岳の80%(131,072ノード)を利用**
 - **1.3PB**のデータを2つのアプリケーションで交換
 - 空間解像度とアンサンブルサイズの組み合わせにおいて従来の**500倍以上**大規模な計算

→2020年のACMゴードン・ベル賞ファイナリストに (Yashiro et al.,2020)

富岳における成果（2） ビックデータ同化

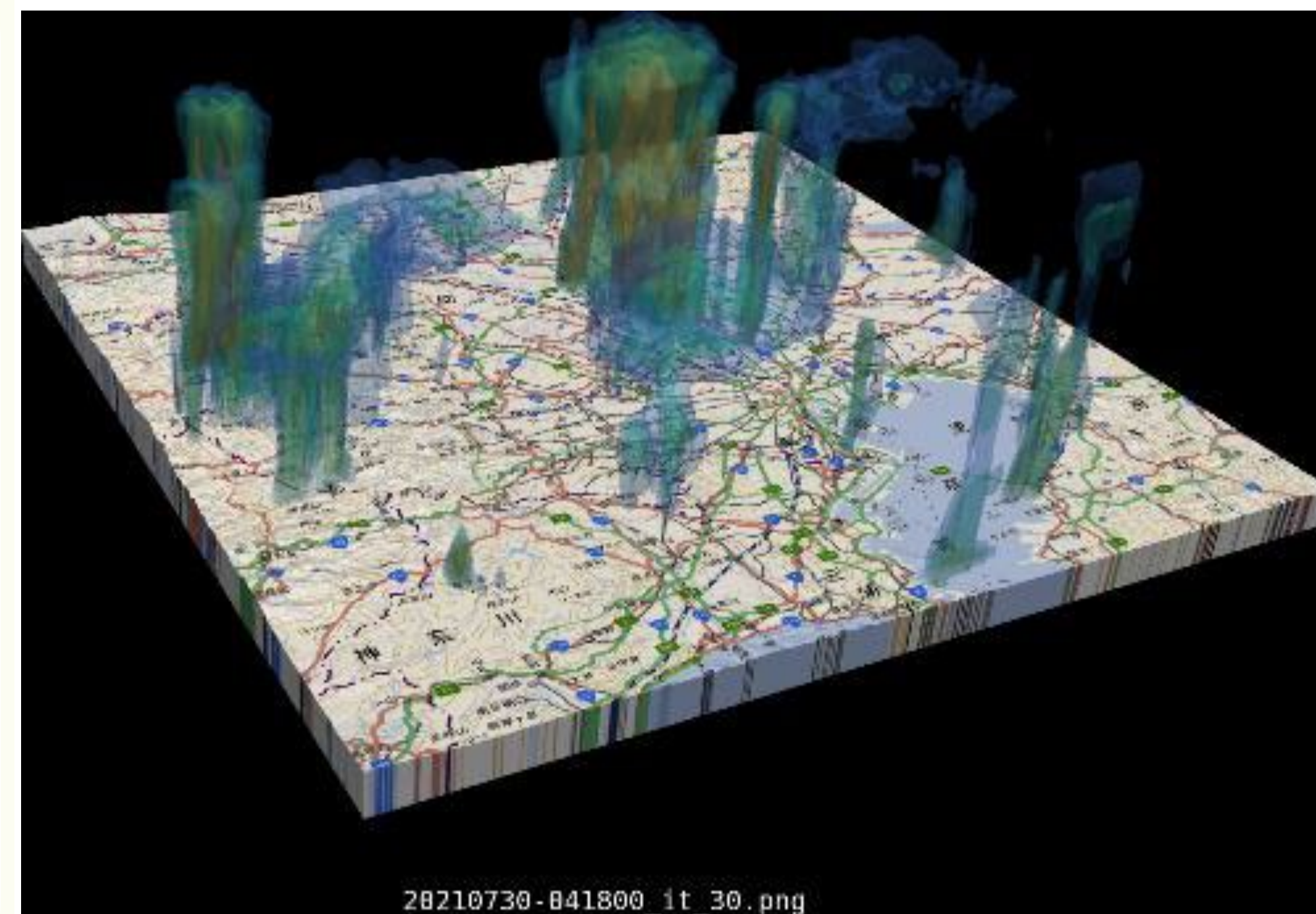
- “Big Data Assimilation: Real-time 30-second-refresh Heavy Rain Forecast Using Fugaku During Tokyo Olympics and Paralympics” (Miyoshi et al., 2023, ACM)

- フェーズドアレイ気象レーダーによる30秒間隔のデータと領域気象モデルSCALE-RM（500mメッシュ解像度）

1000メンバーアンサンブルを用いたデータ同化

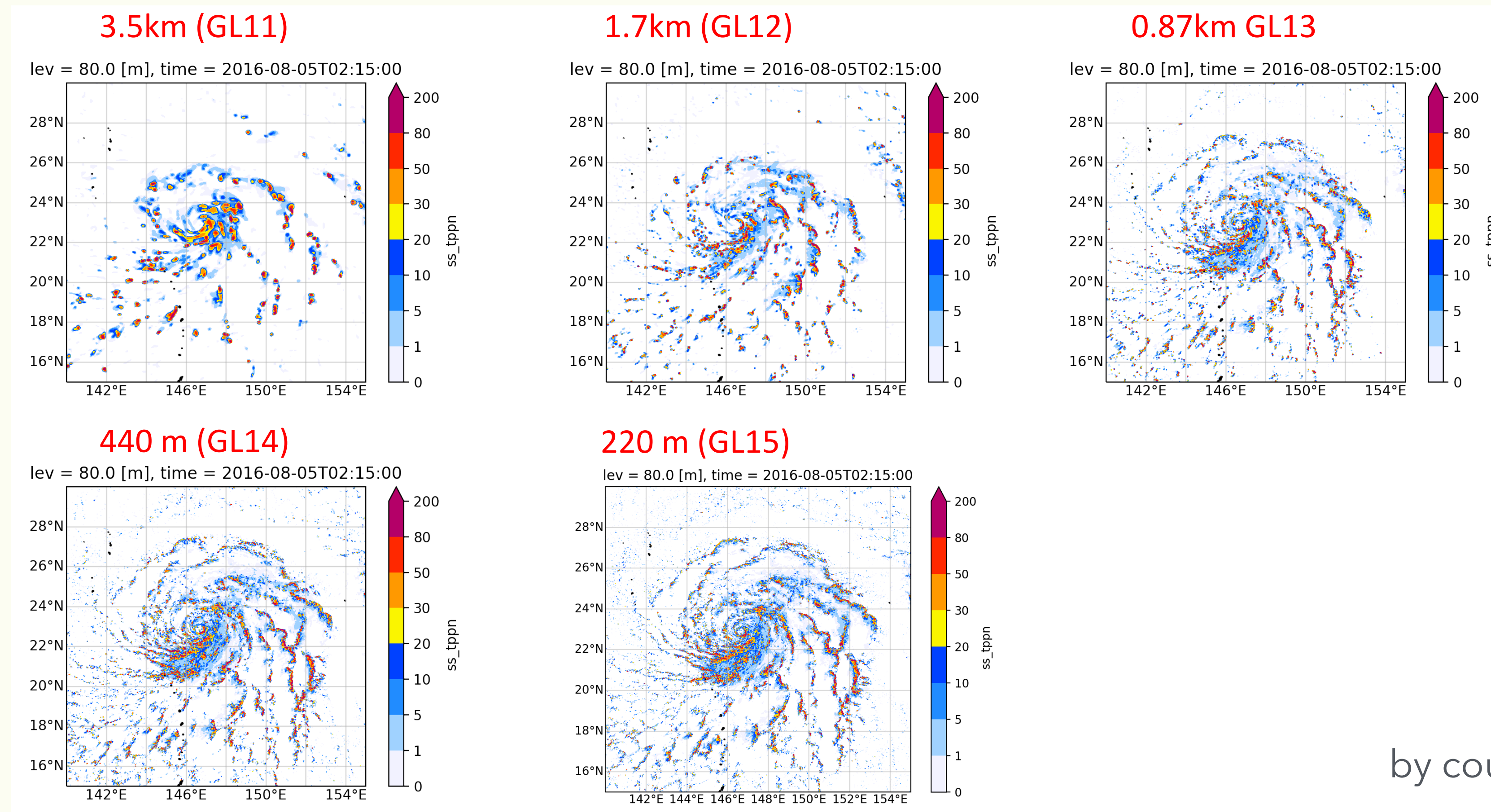
→2023年のACMゴードン・ベル for Climateファイナリストに

NWP system	Center	Data assimilation method	Forecast grid spacing / # grid points	Frequency for initialization / free forecast	Use of radar data	Ensemble forecast grid spacing / # members
LFM [6,7,8,9]	JMA, Japan	Hybrid 3DVar, 5-km grid spacing	2 km / 1581 x 1301 x 76	1 h / 1 h	Assimilation of RH from radar and radial wind	None (MEPS: 5 km / 21 members)
HRRR v4 [10,11,12]	NCEP, US	Hybrid 3D EnVar, 36 members	3 km / 1799 x 1059 x 51	1 h / 1 h	Latent heating	None
HRDPS 6.0.0 [13,14,15]	ECCC, Canada	4DEnVar perturbations from global ensemble	2.5 km / 2576 x 1456 x 62	6 h / 6 h	Latent heat nudging	None
UKV [16,17]	Met Office, UK	4DVar	1.5 km / 622 x 810 x 70	1 h / 1 h	Latent heat nudging	2.2 km / 3 members
AROME France [18,19,20]	Météo-France	3DVar	1.25 km / 2801 x 1791 x 90	1 h / 3 h	Assimilation of pseudo-RH from radar	2.5 km / 12 members
ICON-D2 [21,22,23]	DWD, Germany	LETKF 40 members	2.2 km / 542040 cells x 65 levels	1 h / 3 h	Latent heat nudging	2.2 km / 20 members
BDA2021 This paper	RIKEN, Japan	LETKF 1000 members	500 m / 256 x 256 x 60	30 s / 30 s	Reflectivity, Doppler velocity	500 m / 11 members



富岳における成果 (3) 全球220mメッシュシミュレーション

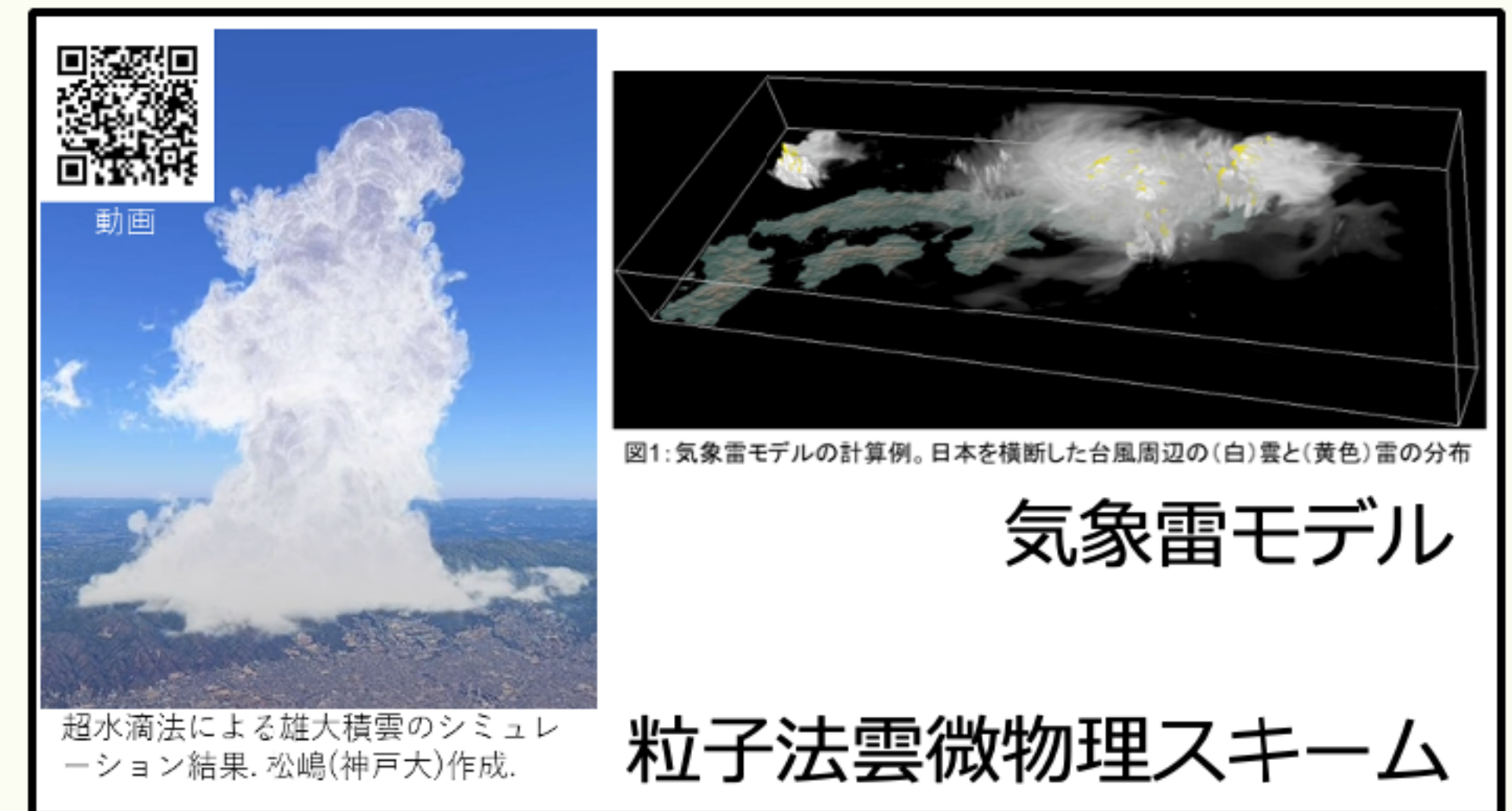
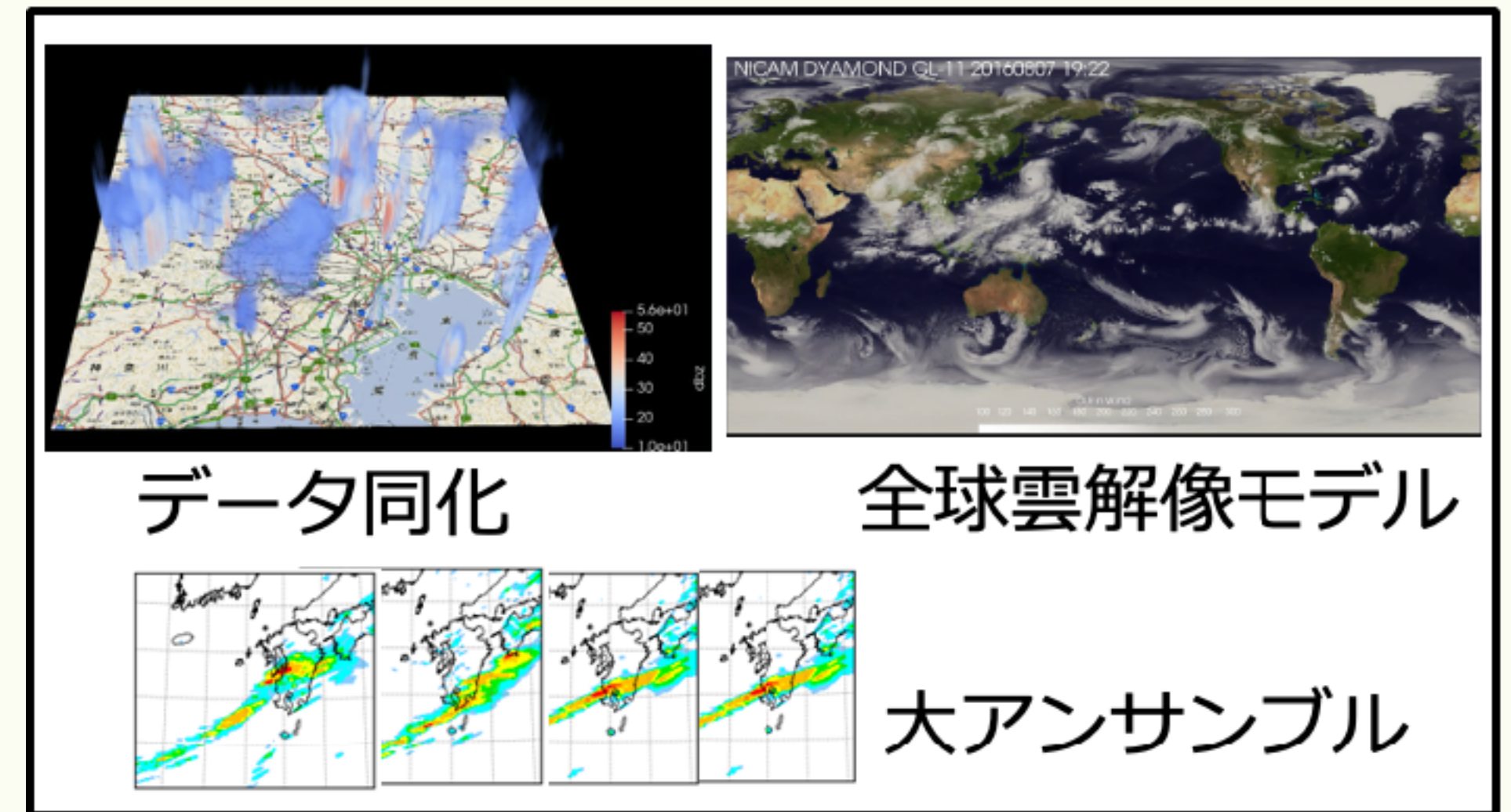
- 東大大気海洋研究所の佐藤正樹教授、松岸博士による実験
- 2016年夏 (DYAMOND相互比較プロジェクト期間と同一): $dx = 3.5\text{km}, 1.7\text{km}, 870\text{m}, 440\text{m}, 220\text{m}$



by courtesy of S.Matsugishi

次世代計算基盤で期待されるブレークスルーと達成目標（気象・気候）

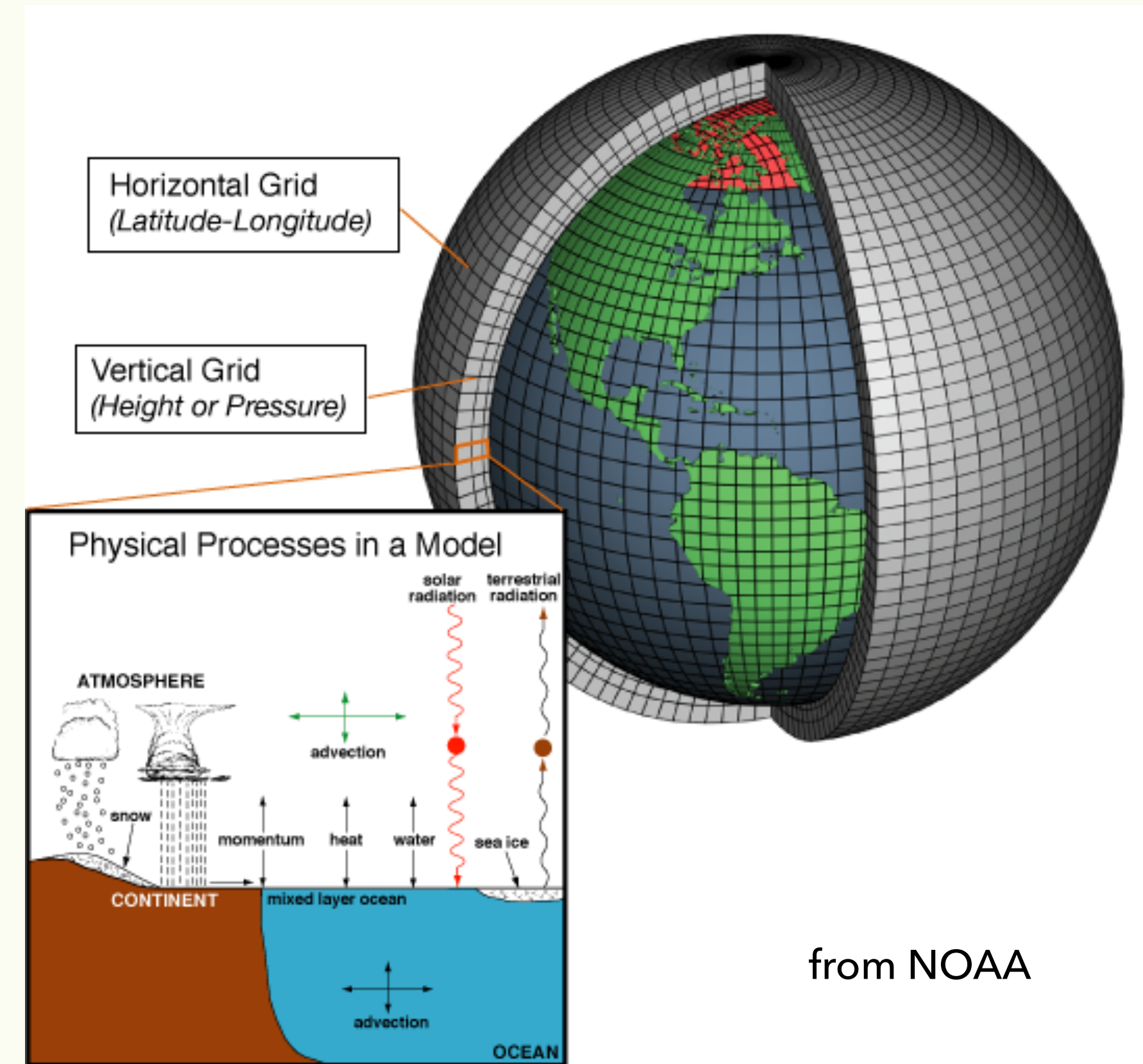
- 集中豪雨・台風予測精度の大幅向上に向けたリアルできめ細やかな気象予測システムの開発。竜巻・雷頻度予測、シナリオを網羅する確率予測、3次元高密度観測による高頻度リアルタイム予測の実現。
- 気候変動の理解と予測を質的に高める精緻な地球システムモデルの実現。台風・極端現象・都市気候予測による適応策での利用、温室効果ガス吸排出量推定によるパリ協定への貢献。AI超解像の活用。
- 微小から惑星スケールに至る現象の包括的理解。
- 精緻な物理的表現が可能な次世代型の力学、雲微物理、放射スキームの開発と実証。AI代理モデル等の加速による富岳比5-10倍以上の大規模計算の実現。



気象・気候シミュレーション研究における挑戦

地球システムの精緻な理解・再現・予測

- 様々な物理現象を統合的に扱いたい：**モデルの複雑化**
- 数mから地球規模までの各時空間スケールでの現象を陽に再現したい：**自由度の増大**
- より長期の計算、より多くのアンサンブル計算を行いたい



気象・気候シミュレーション研究における計算科学的な挑戦

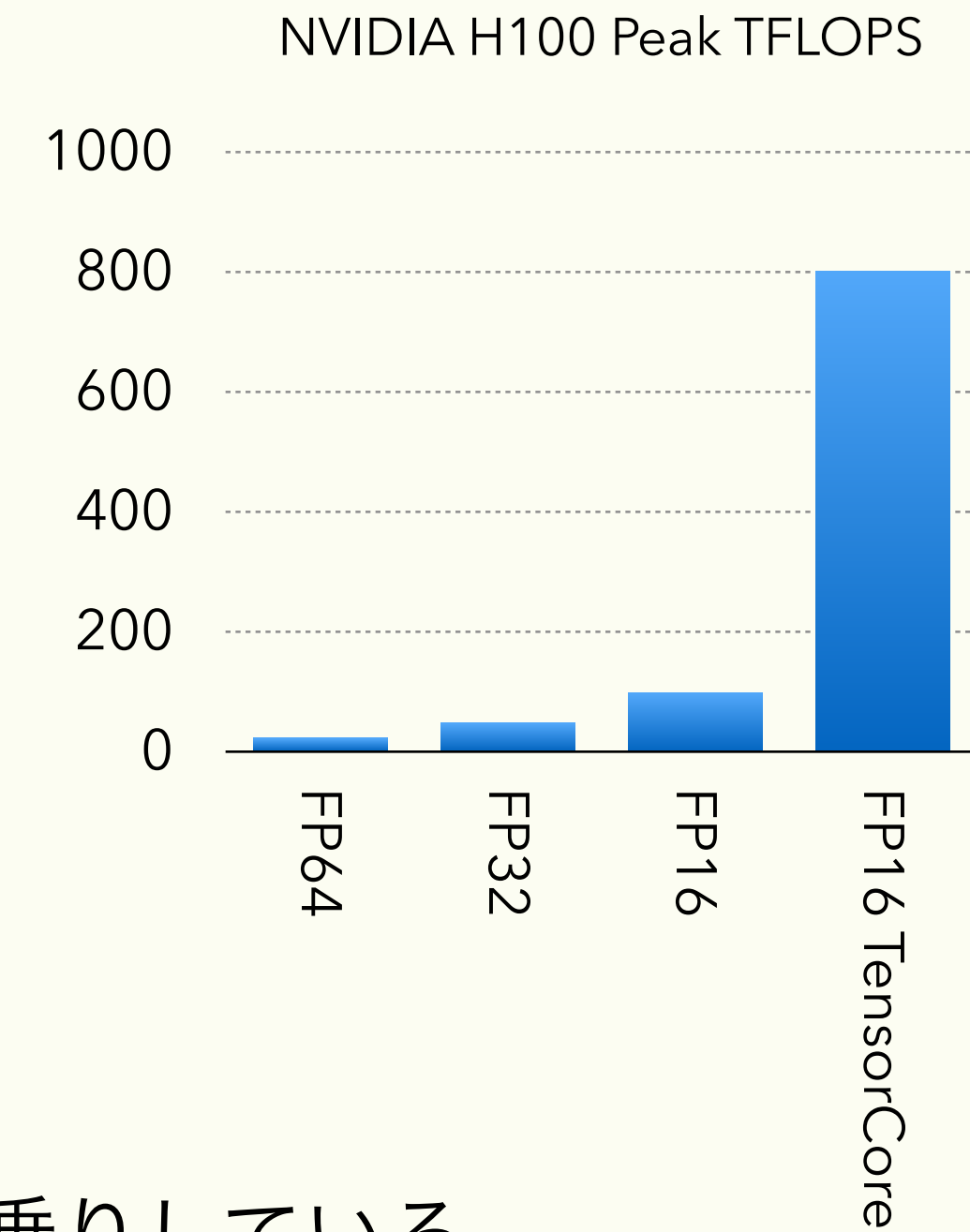
持続可能な開発エコシステムの構築

- Proof of conceptだけでは済まされない：社会実装を見据えた開発が常に必要
- 数十万行にわたる学際的なプログラムの巨大な集合をどうハンドリングするか
- 観測データ前処理、シミュレーション、データ同化、統計処理を含むワークフロー全体が持続可能でなければいけない
- 大きな計算資源を得るには最新の計算機に追従しなくてはならない
：我々の分野はこの20年ずっとトレンドに乗るといふより、振り回されてきた

ポスト富岳時代における気象・気候シミュレーションの方向性

物理モデルとデータ駆動型モデルの併用

- 気象・気候の物理モデルは多岐に渡り、密行列演算ユニットを活用しきれない
 - 最新のGPUでの実行効率は数%
 - 計算結果を忠実に模倣する代理モデルなら演算加速機構を活用できる
 - Algorithm Transformation
- 物理モデルの精緻化とプロセス研究の歩みは止めない
 - これまでのAI気象モデルは物理モデルとデータ同化を用いた精緻なデータセットにタダ乗りしている
 - 観測データのみを用いたデータ駆動型モデルはまだ精度が不十分
- 重く、最適化に限度があり、精緻な物理モデル
+ 軽く、演算加速機構を活用しやすく、教師データに忠実なデータ駆動型モデル



物理モデルの開発に関する課題

多様なアーキテクチャへの適応

- 高速なプロダクションランをデータ駆動型モデルに任せるとはいえ、物理モデルの可用性を拡げるためには高速化・大規模化は不可欠
- Fortran+OpenACCでの最適化では不十分：ポータビリティとしてすべてをカバーしきれない状況が濃厚
- 最適化はすべてのコードに対して適用しないと性能が出ない

開発言語・環境の移行はコミュニティ全体を巻き込む大仕事となる

- これまで綿々と続いてきた大規模なソフトウェア開発エコシステムをそのまま継続する慣性を振り切るには、それなりのエフォートと投資が必要になる
- 可能であれば、段階的な移行を進めたい

海外における状況

- OpenACC最適化は開発においては「最低限行なっていないといけないライン」

C++テンプレートライブラリを用いた全球大気モデルの再実装

- SCREAM (米) : DoEが主導しkokkosを用いて実装。2023年GB for Climateを受賞。
- ICON (欧) : スイスCSCSによるGridTools/GT4PYを用いた実装が進行中、kokkosを用いた実装についても検討中
- FV3GFS (米) : 米NOAAの次期予報モデル。GT4PYを用いた実装がほぼ完了している

Juliaを用いた実装



- ClimateMachine.jl (米) : 領域から全球までをカバーするソフトウェア群。データ同化システム等についても整備

Google JAXを用いた実装



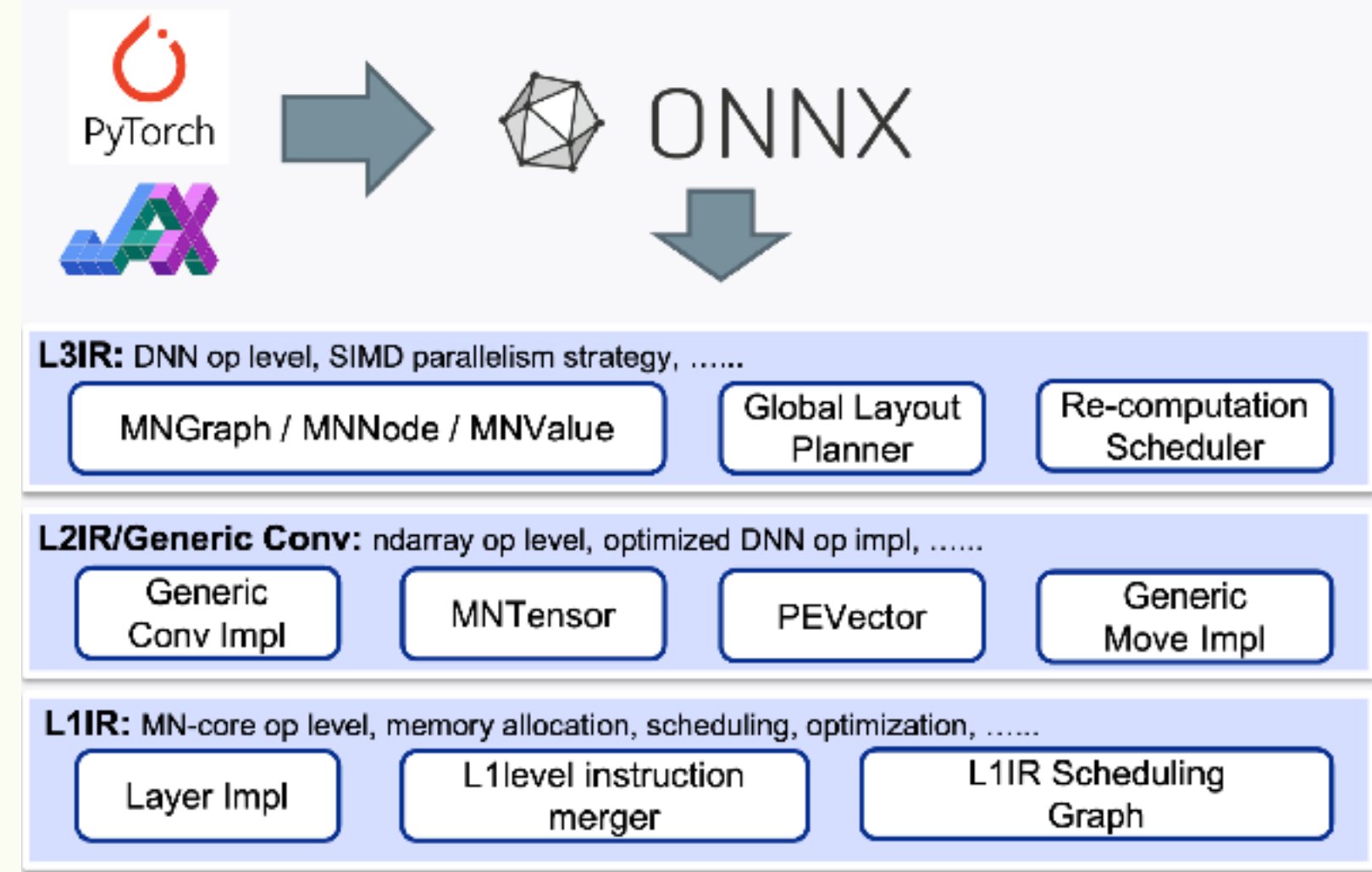
- VEROS (欧) : 全球海洋モデル。大規模並列計算でも十分な性能を発揮

ポスト「富岳」FSでのNICAMの取り組み



神戸大チームでの研究開発

- MN-coreプロセッサへの気象・気候アプリケーションの適用可能性の評価
 - プロセッサ性能を最大限生かした形での性能評価
(本日高屋敷様のご講演)
 - 利用可能な言語環境への移行に伴う問題点の調査と性能評価
: JAX、Juliaを用いた再実装



JAXを用いたNICAM力学コアカーネルの実装評価

- IcoAtmosBenchmark v.1 (<http://github.io/icoatmosbenchmark>)
 - SPPEXA/AIMES project (2016-2019)にて開発されたベンチマークスイート
- ステップ1：ナイーブな実装
 - forループはそのまま残し、Fortranに極力似せた記述：Fortranより100倍低速、JITコンパイラは機能しない
- ステップ2：配列マッピングによる記述
 - Numpy slicingとほぼ同じ記述方法：ステップ1より10倍高速化、水平軸ijのシリアライズはやめなければいけない

Fortran Ver. (抜粋)

```
do l = 1, lall
  do k = 1, kall
    do d = 1, nxyz
      do g = gminm1, gmax
        ij = g
        ip1j = g + 1
        ip1jp1 = g + iall + 1
        ijp1 = g + iall

        vt(g,d,TI) = ( ( + 2.0 * coef_intp(g,1,d,TI,l) &
          - 1.0 * coef_intp(g,2,d,TI,l) &
          - 1.0 * coef_intp(g,3,d,TI,l) ) * scl(ij ,k,l) &
          + ( - 1.0 * coef_intp(g,1,d,TI,l) &
            + 2.0 * coef_intp(g,2,d,TI,l) &
            - 1.0 * coef_intp(g,3,d,TI,l) ) * scl(ip1j ,k,l) &
          + ( - 1.0 * coef_intp(g,1,d,TI,l) &
            - 1.0 * coef_intp(g,2,d,TI,l) &
            + 2.0 * coef_intp(g,3,d,TI,l) ) * scl(ip1jp1,k,l) &
          ) / 3.0

      enddo
    enddo
  enddo
enddo
```

Python Ver.1 (抜粋)

```
for l in range(0, lall):
  for k in range(0, kall):
    for d in range(0, nxyz):
      for g in range(gminm1-1, gmax):
        ij = g
        ip1j = g + 1
        ip1jp1 = g + iall + 1
        ijp1 = g + iall

        vt[g,d,TI] = ( ( 2.0 * coef_intp[g,0,d,TI,l]
          - 1.0 * coef_intp[g,1,d,TI,l]
          - 1.0 * coef_intp[g,2,d,TI,l] ) * scl[ij ,k,l]
          + ( - 1.0 * coef_intp[g,0,d,TI,l]
            + 2.0 * coef_intp[g,1,d,TI,l]
            - 1.0 * coef_intp[g,2,d,TI,l] ) * scl[ip1j ,k,l]
          + ( - 1.0 * coef_intp[g,0,d,TI,l]
            - 1.0 * coef_intp[g,1,d,TI,l]
            + 2.0 * coef_intp[g,2,d,TI,l] ) * scl[ip1jp1,k,l]
          ) / 3.0
```

Juliaを用いたNICAM力学コアカーネルの実装評価

- JAXと同じベンチマークを利用
 - CPUでの評価結果
 - ステップ1：ナイーブな実装
 - Fortranより1700倍低速
 - ステップ2：配列サイズ、ループ長の定数化
 - Fortranより2倍低速
 - ステップ3：添字の範囲検査の省略
 - @inboundsマクロ
 - Fortranと**同等**
 - ステップ4：静的配列への置き換え
 - StaticArraysの適用：メモリ使用量は増える
 - Fortranよりも**2倍高速**
- Juliaの場合、配列マッピング（Broadcast演算）やijループのデシリアライズを行わなくても十分な性能を得られることがわかった

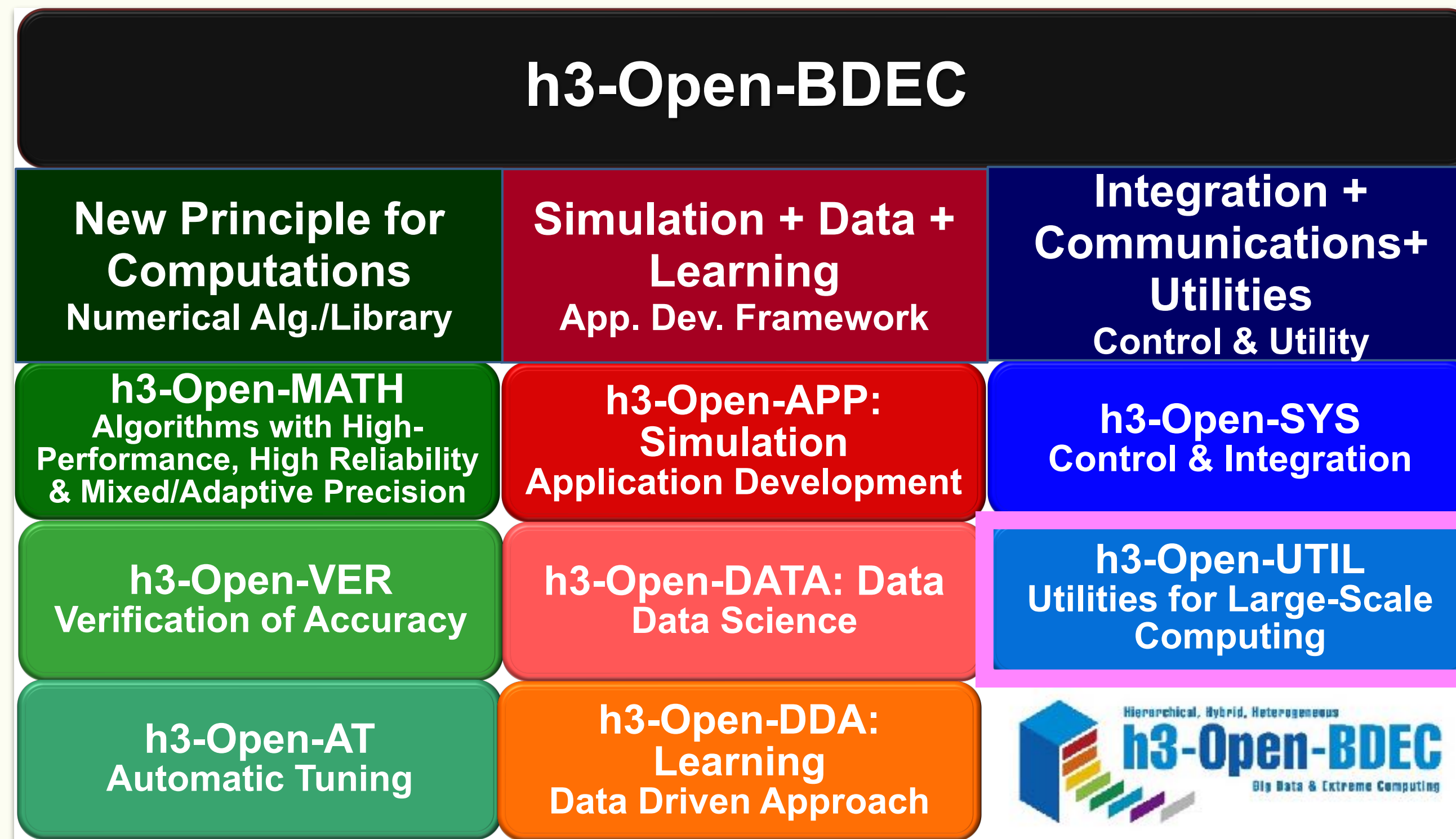
Julia Ver. (抜粋)

```
for l in 1:ADM_lall
  for k in 1:ADM_kall
    for d in 1:ADM_nxyz, g in gminm1:gmax
      ij      = g
      ip1j    = g + 1
      ip1jp1  = g + iall + 1
      ijp1    = g + iall

      vt[g, d, TI] = ( ( 2.0 * coef_intp[g, 1, d, TI, l]
                       - 1.0 * coef_intp[g, 2, d, TI, l]
                       - 1.0 * coef_intp[g, 3, d, TI, l] ) * scl[ij      , k, l]
                    + (-1.0 * coef_intp[g, 1, d, TI, l]
                       + 2.0 * coef_intp[g, 2, d, TI, l]
                       - 1.0 * coef_intp[g, 3, d, TI, l] ) * scl[ip1j    , k, l]
                    + (-1.0 * coef_intp[g, 1, d, TI, l]
                       - 1.0 * coef_intp[g, 2, d, TI, l]
                       + 2.0 * coef_intp[g, 3, d, TI, l] ) * scl[ip1jp1, k, l]
                    ) / 3.0

    end
  end
end
```

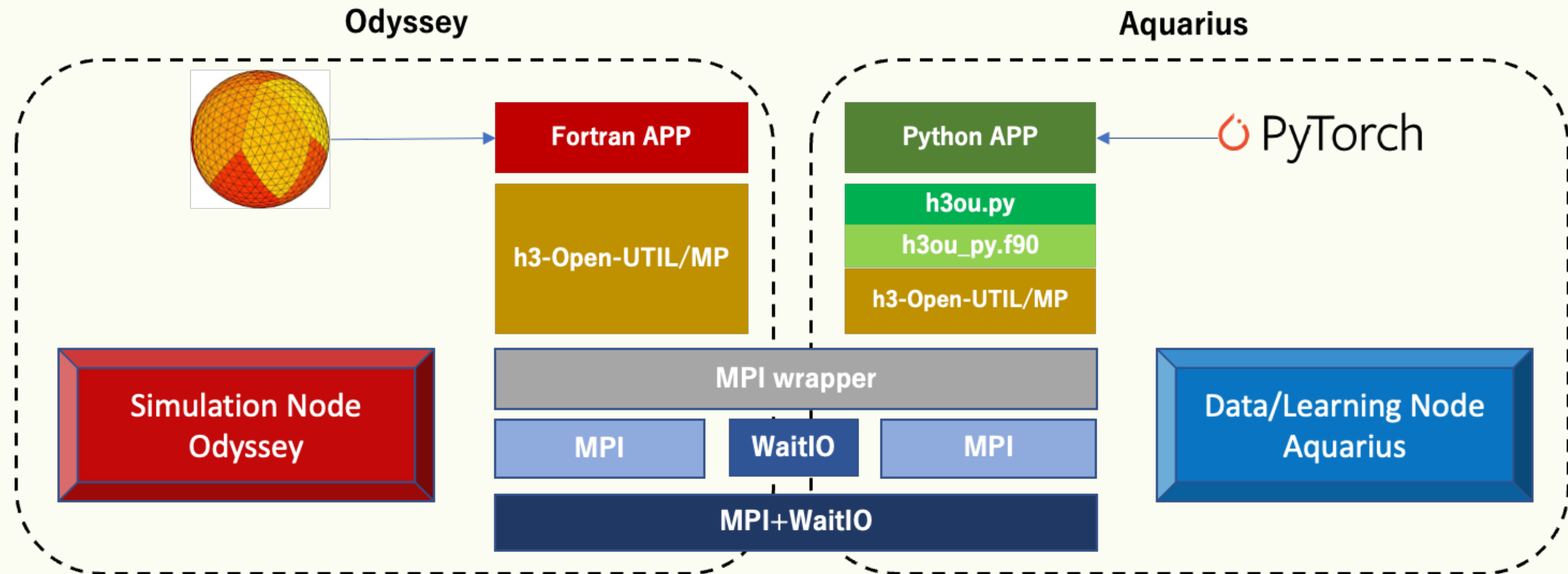
カップリングライブラリh3-Open-UTIL/MPの開発



「計算・データ・学習」融合のための革新的ソフトウェア基盤「h3-Open-BDEC」
(PI:中島研吾教授、科研費基S 2019年度～2023年度)

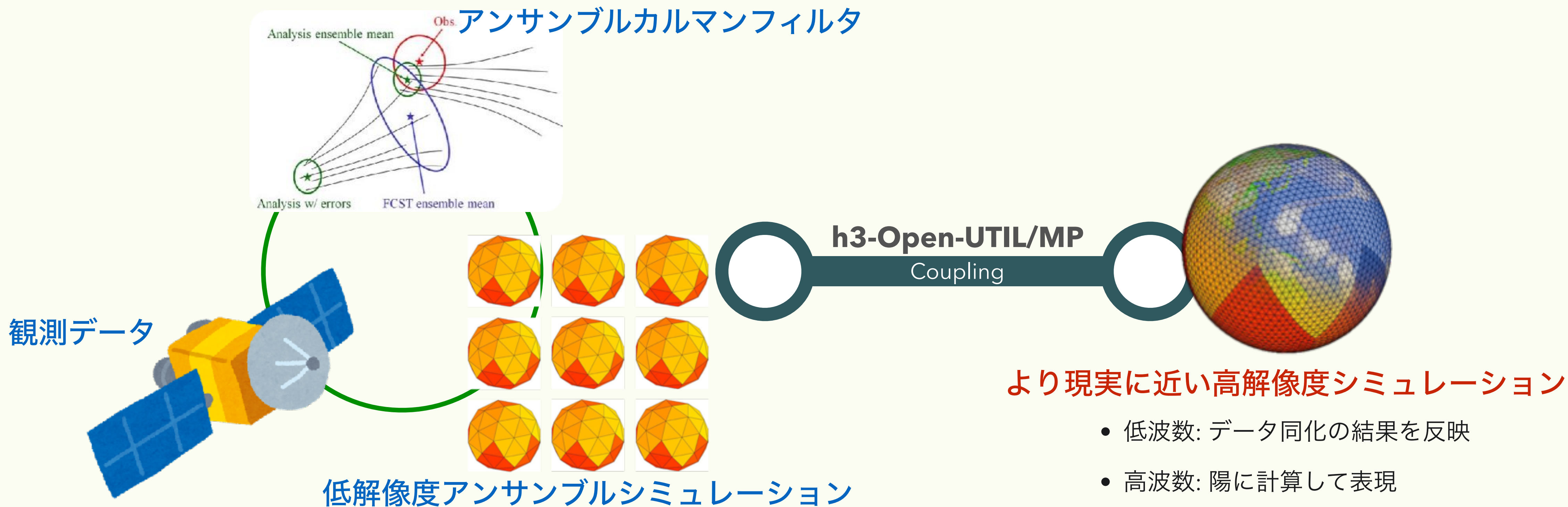
- 異なるアプリケーションを結合するカップリングライブラリh3-Open-UTIL/MPを開発
- 大気モデルと海洋モデル、シミュレーションモデルとファイルI/Oノード、地震動モデルと建物モデル、大気モデルと水文モデル、等の結合実績

カップリングライブラリを用いたHPC-AIリアルタイム連携



h3-Open-UTIL/MPライブラリがレガシーなFortranアプリケーションとPython機械学習ライブラリを結合
：プログラム内の好きな領域を取り出して、教師データを抽出、リマッピングが可能
h3-Open-SYS/WaitIOライブラリを併用することで、異なるスパコンを結合した計算を可能に

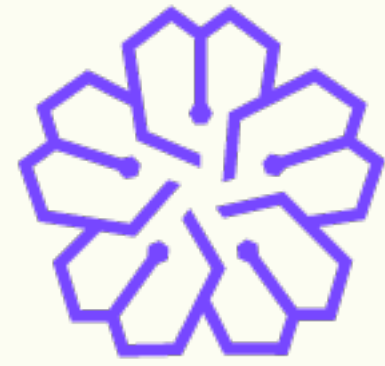
カップリングライブラリを用いたデータ同化システムの高速度化



アンサンブルカップリングシステムによる低解像度-高解像度シミュレーションの融合

- スケール選択型ナッジング（ニュートン緩和）を用いて、低解像度・高解像度計算のそれぞれの利点を生かす
- ➔ 全て高解像度でのデータ同化計算よりも100倍高速に実験可能

欧州コミュニティとの協働：HANAMI project WP4



HANAMI

EuroHPC-JU (2024-2027)

気象・気候モデルのためのベンチマークスイートHPCWの拡充

- High Performance Climate and Weather
- NICAMの力学コアパッケージをHPCWに追加



気候計算実行・評価のためのワークフローマネージャAutoSubmitの適用

- NICAM-COCO大気海洋結合モデルをAutoSubmitを用いて管理



まとめ

ポスト富岳時代は、精緻な物理モデルと高速なデータ駆動型モデルを併用した研究開発を主軸に据える必要がある

- 精緻な物理モデルはプロセス研究を進め、精度の高い教師データを供給するために必要
 - GPUをはじめとするソフトウェア最適化を持続可能な形で進めるためには、Fortranを中心とした開発エコシステムをもうやめる時期が本当に来ている
- 高速なデータ駆動型モデルは、アーキテクチャ変革・計算速度の壁を突破するために必要
 - 先進的なAI技術と分野研究の知見を適切に生かし、早いサイクルで改良していくことが求められる
 - 物理モデルの改良に繋げる利用方法にも期待：特にパラメタリゼーションモデルの革新

次世代計算基盤に係る調査研究事業 理研チーム気象・気候サブグループ

- グループリーダー：小玉知央（**海洋研究開発機構**）

- 参加メンバー（研究協力者含む）

中野満寿男、清木達也、山崎哲、尾形友道、松田景吾、杉山徹、升永竜介、山田洋平、河宮未知生、ハリントン角皆穰恩、上条藍悠、那須野智江（**海洋研究開発機構**） 富田浩文、足立幸穂、西澤誠也、山浦剛、河合佑太、三好健正、大塚成徳（**理化学研究所**） 島伸一郎（**兵庫県立大学**） 佐藤陽祐（**北海道大学**） 吉田龍二（**横浜国立大学**） 平原翔二、雁津克彦、氏家将志、河野耕平、荒波 恒平、沢田 雅洋、松林 健吾、西本 秀祐、石田 凌雅、根本昇、長谷川昌樹（**気象庁**） 山口宗彦（**気象研究所**） 松村 義正、山崎一哉、松岸修平、宮川知己（**東京大学**） 安田勇輝（**東京科学大学**） 林祥介、檜村博基（**神戸大学**） 石岡圭一、竹広真一（**京都大学**） 佐々木洋平（**北海道情報大学**） 八代尚、山下陽介（**国立環境研究所**） 澁谷亮輔（**三井住友海上火災保険**） 荒川隆（**CliMTech**）