

# 全球高解像度モデルを用いた 気象・気候研究の現状と展望

小玉知央 (kodamac@jamstec.go.jp)

海洋研究開発機構 (JAMSTEC)

地球環境部門環境変動予測研究センター

雲解像モデル開発応用グループ

資料協力：山田洋平・高須賀大輔（海洋研究開発機構）、升永竜介、末松環（東大大気海洋研究所）

# 自己紹介

## 経歴

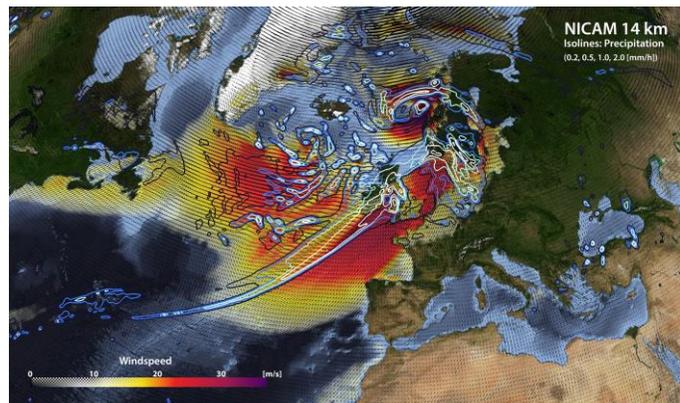
- 東北大学理学部・理学研究科 (2000 - 2009)
  - 物理系 → 地球物理学専攻 → 流体地球物理学講座
- JAMSTEC (2009 - 現在)
  - 横浜研究所 → Max-Planck気象研究所 → 横浜研究所

## 専門分野：気象学、特に気候力学

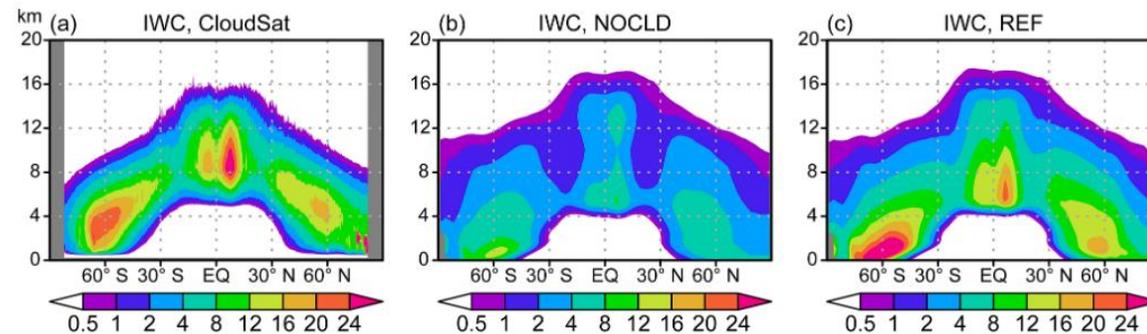
- 温帯低気圧、雲・降水システム、成層圏
- 数値シミュレーション、モデル再現性評価、将来気候予測
- 高性能計算 (ノードマッピング、IO)



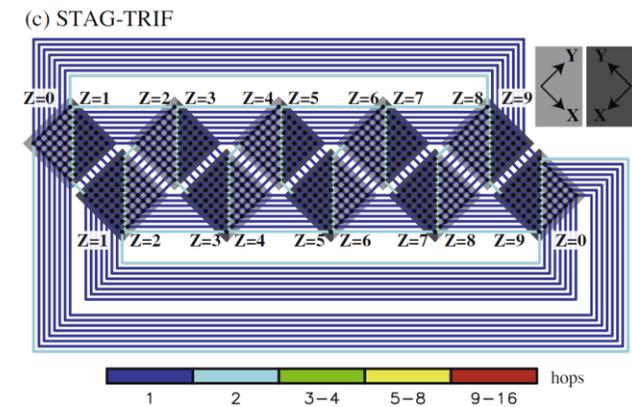
地球シミュレータ (4代目)



温帯低気圧に伴う降水と風。  
Kodama et al. (2019) GRL



東西平均した氷の南北鉛直断面 [ $10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$ ].  
Kodama et al. (2021) GMD

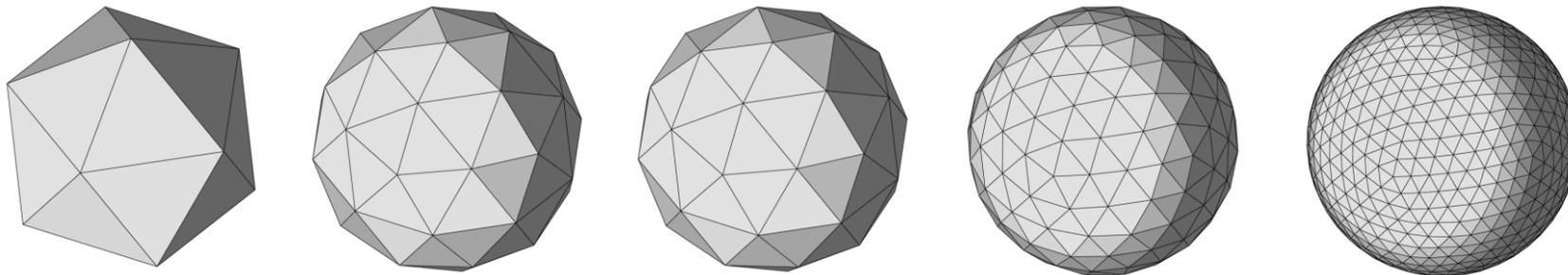


並列計算の通信最適化例。  
Kodama et al. (2014) PARCO

# NICAM

Non-hydrostatic ICosahedral Atmospheric Model  
(非静力学正二十面体大気モデル)  
Tomita and Satoh (2004); Satoh et al. (2008, 2014)

- 海洋研究開発機構、東京大学、理化学研究所、国立環境研究所が中心になって開発している研究用の全球大気モデル
  - 大気モデル +  $\alpha$  (海洋、陸面)
- 数km (雲解像) 以下の格子サイズを見据えて開発
  - 非静力学 (ナビエ-ストークス) 方程式系・有限体積法
  - 雲・対流をより直接的に計算することが可能
  - 京コンピュータでは全球870m格子まで計算した実績がある
    - 富岳では全球220m格子を目指す課題が来年度開始予定



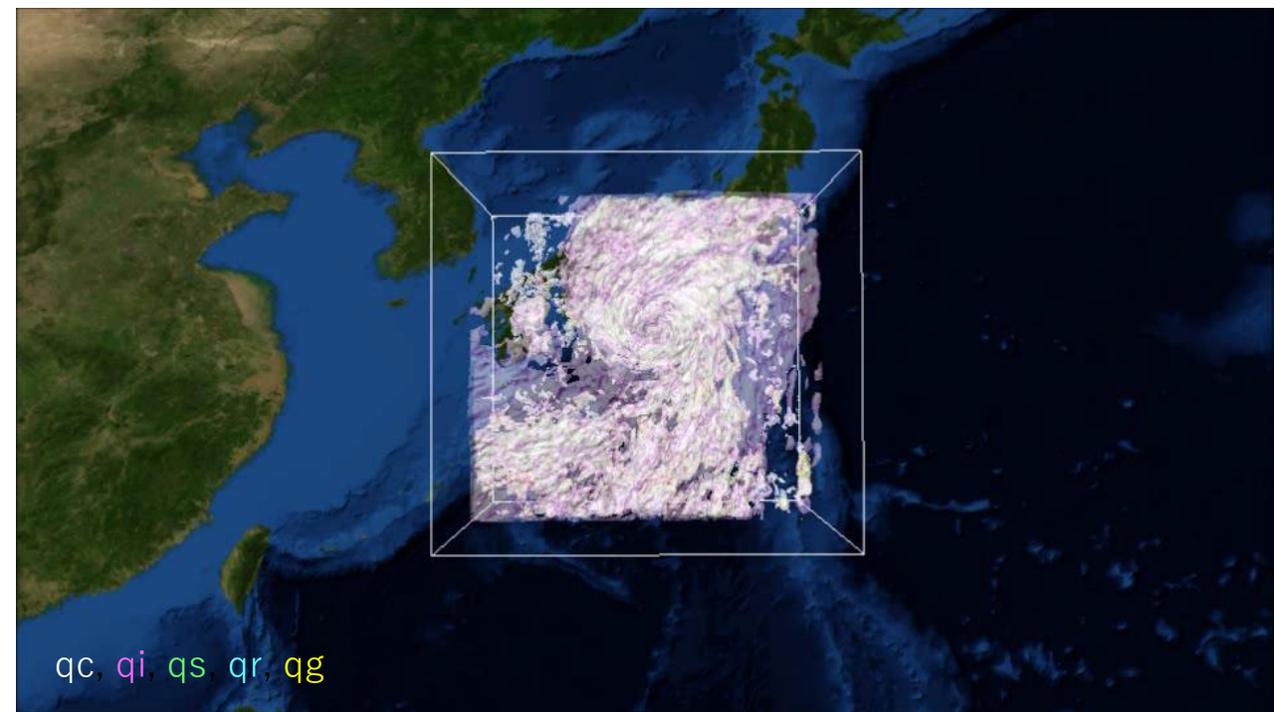
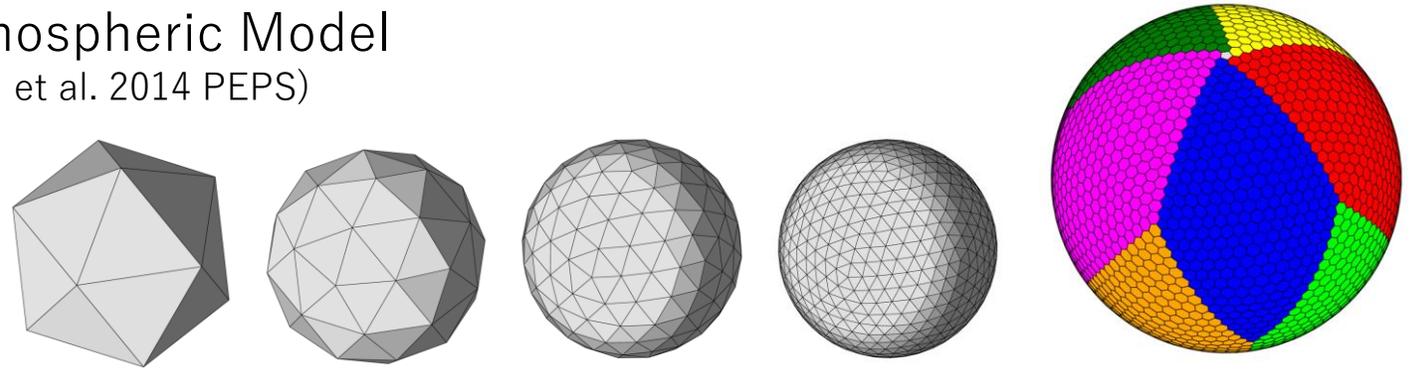
# Museum of NICAM simulations

NICAM : Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model

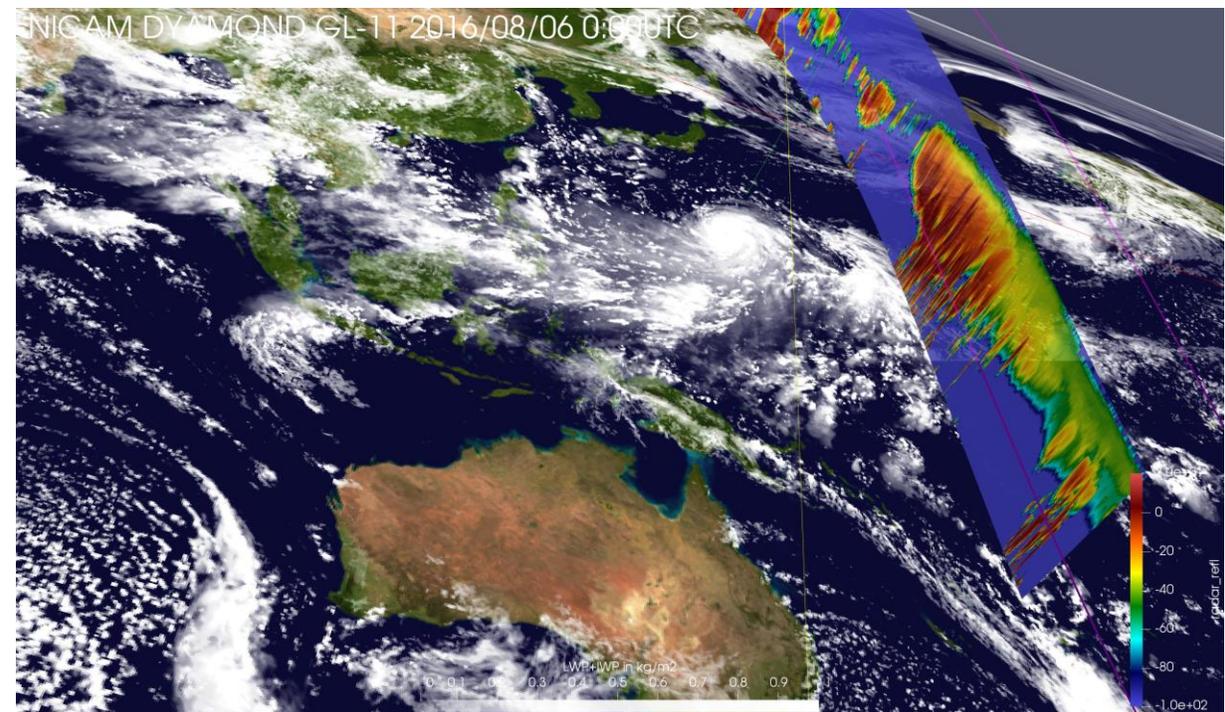
(Tomita and Satoh 2004 FDR; Satoh et al. 2008 JCP; Satoh et al. 2014 PEPS)

Designed for massive parallelism

Good portability (supercomputer ~ PC)



3.5km mesh data from Yohei Yamada. Visualization by CYBERNET.

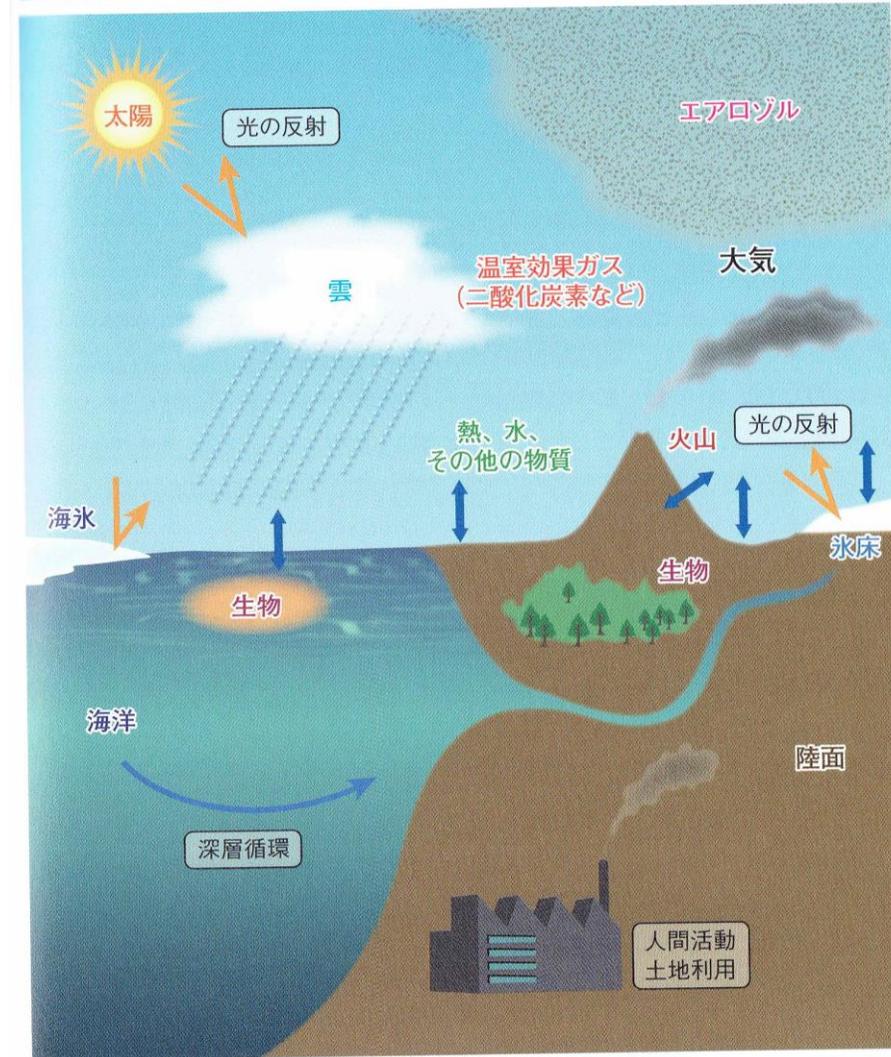


Radar reflectivity diagnosed by COSP CloudSat simulator. Background image by NASA.

# 気象・気候モデル

- 大気モデル
  - 力学過程
    - 運動方程式、熱力学式、質量保存式、状態方程式
  - 物理過程
    - 放射、雲、乱流、、、、
- 海洋・海氷、陸面モデル、、、、
- エアロゾル、化学、陸域・海洋生態系モデル、、、、
- 主な用途
  - 現象の再現・理解
  - 天気予報、季節予報、気候予測

図02-01-01 地球上の気候システム



出典：『異常気象と地球温暖化』鬼頭昭雄著／岩波新書を元に作成

出典：「異常気象と温暖化がわかる」  
河宮未知生監修／技術評論社

# 気象と気候

- 気象：刻一刻と変わる大気の状態
  - 大気の状態：気温、風、湿度、雨量、雲量、など
  - 気象予報では初期条件の方が重要。決定論的。
- 気候：ある期間における気象の統計量
  - 例：今年の夏は暑かった、日本海側は雪が多い
  - 気候予測では外部強制の方が重要

全国 神奈川県 川崎市の防災情報

発表中の防災情報  
情報は出ていません。

天気予報 (一覧表)

| 日付              | 今日<br>28日(月) | 明日<br>29日(火) | 明後日<br>30日(水) | 31日(木)  | 01日(金) | 02日(土) | 03日(日) |
|-----------------|--------------|--------------|---------------|---------|--------|--------|--------|
| 神奈川県            | 晴後曇          | 曇            | 曇             | 曇一時雨    | 晴時々曇   | 晴時々曇   | 曇      |
| 降水確率(%)         | -/10/10/10   | 10/10/20/30  | 40            | 50      | 20     | 20     | 40     |
| 信頼度             | -            | -            | B             | C       | A      | A      | C      |
| 横浜<br>最低/最高(°C) | - / 18       | 9 / 14       | 10 / 19       | 11 / 20 | 7 / 14 | 6 / 13 | 7 / 14 |

2週間気温予報へ

詳しく見る

アメダス (一覧表)

地点名をクリックすると一覧表を表示します

| 03/28 10:20 | 日吉  | 世田谷 | 羽田     | 横浜     | 府中     |
|-------------|-----|-----|--------|--------|--------|
| 気温          | ... | ... | 16.2°C | 16.2°C | 15.1°C |

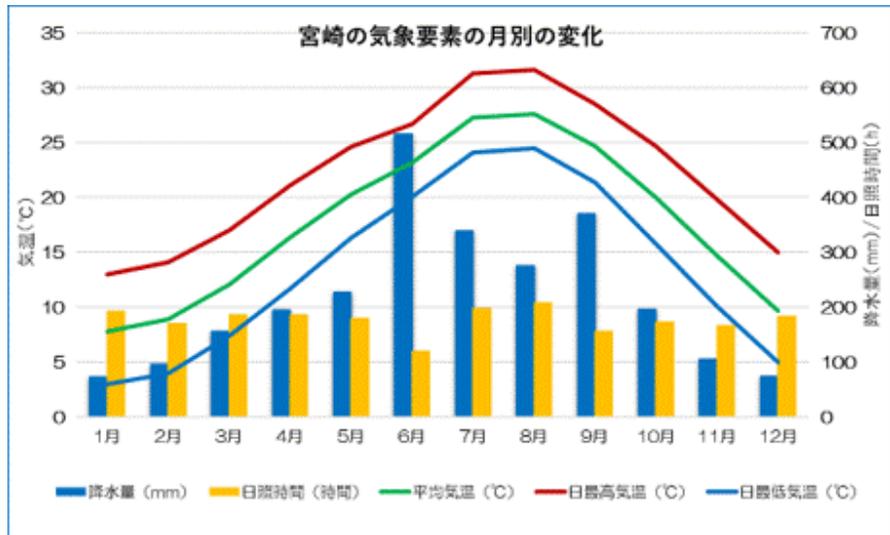


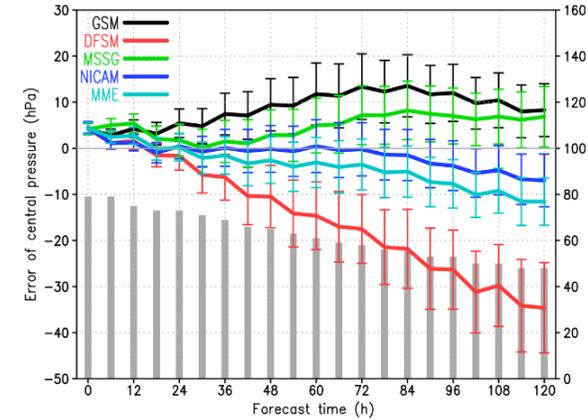
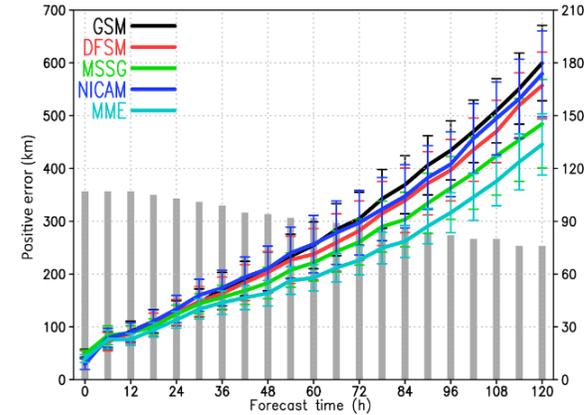
図02-03-02 世界の気候区分



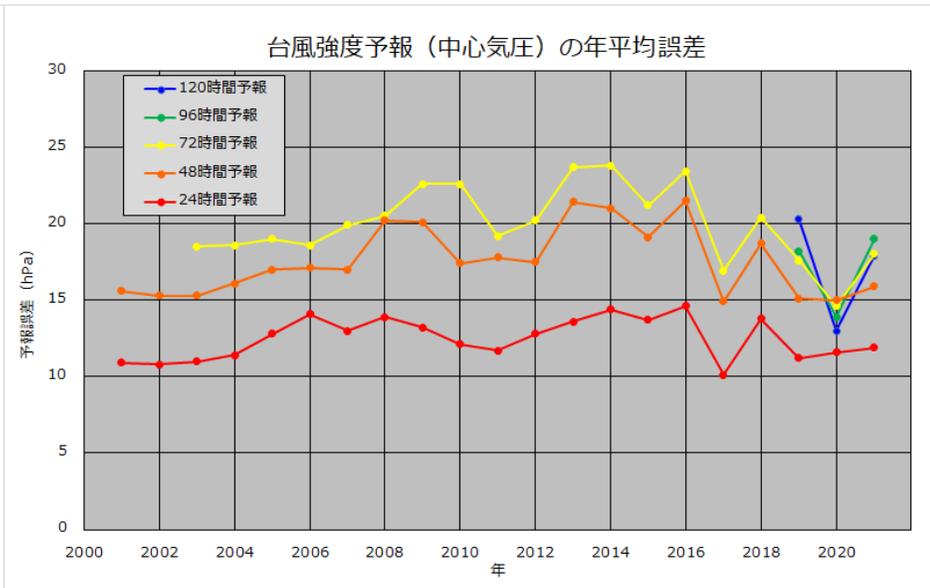
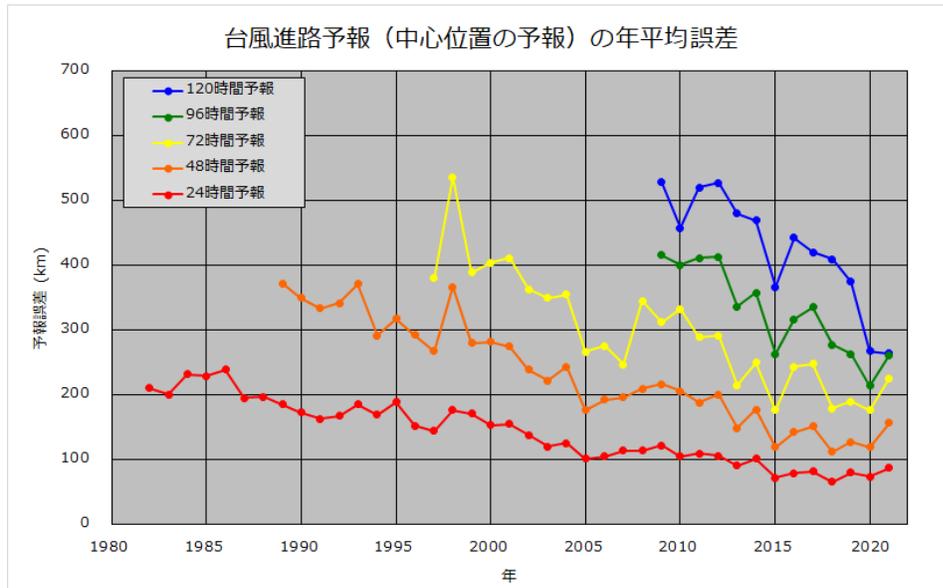
出典：気象庁、異常気象と温暖化がわかる

# (台風の) 天気予報・延長予報

- 気象庁の予報精度トレンド
  - 進路はよくなっている
  - 強度は大きな改善は見られない
- 高解像度化→台風の構造再現性が改善→強度の再現性も改善（かも）
- 週を越える予報はまだ研究段階



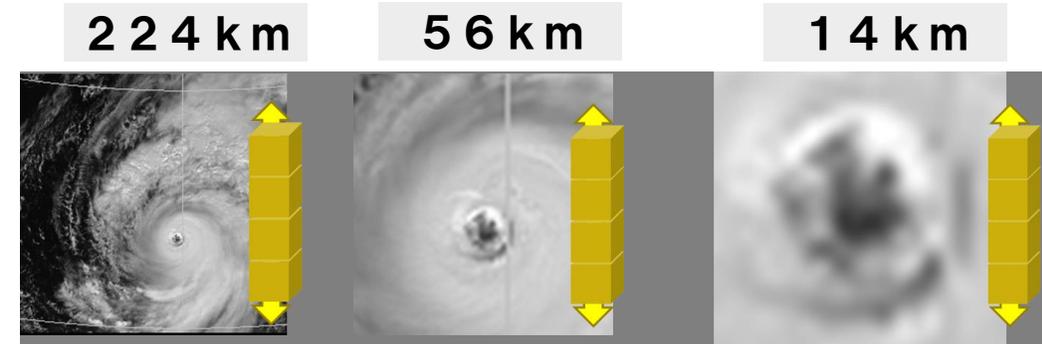
全球20km格子の現業予報モデル（GSM）と全球7km格子モデルの台風予報成績。Nakano et al. (2017) GMD



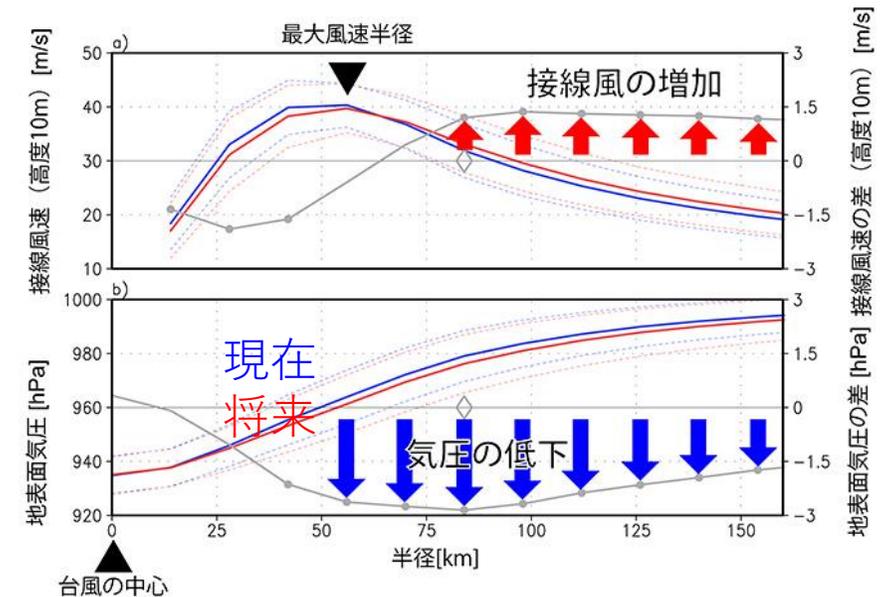
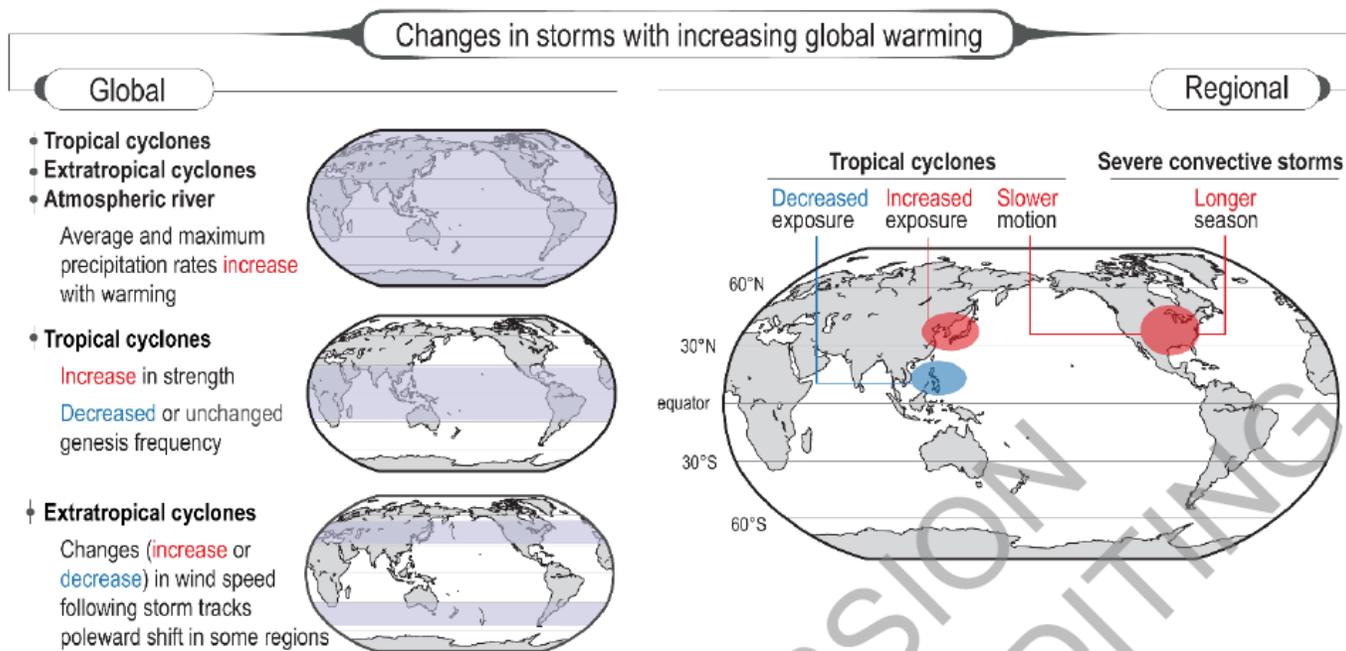
出典：気象庁

# (台風) 将来気候予測

- 台風の将来気候予測
  - 台風に伴う降水：**増加**
  - 強い台風の割合：**増加**
  - 台風の発生数：**減少**または**変化なし**

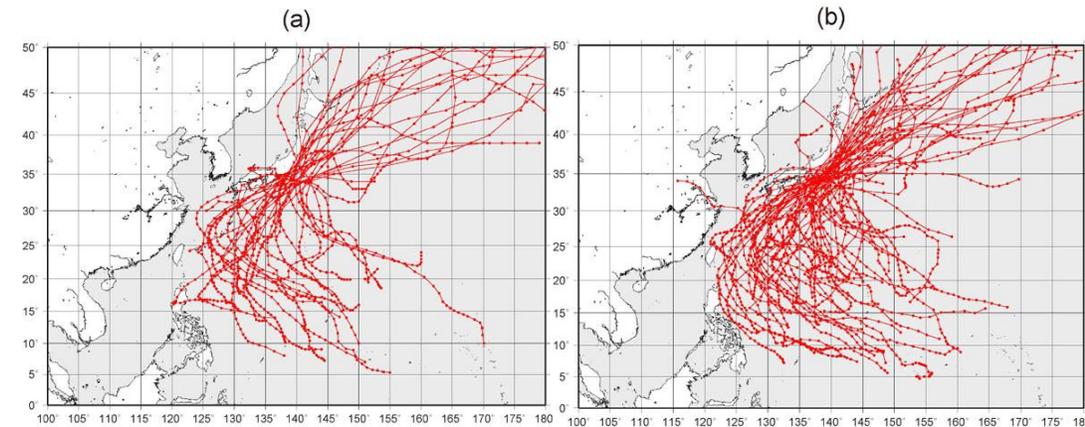
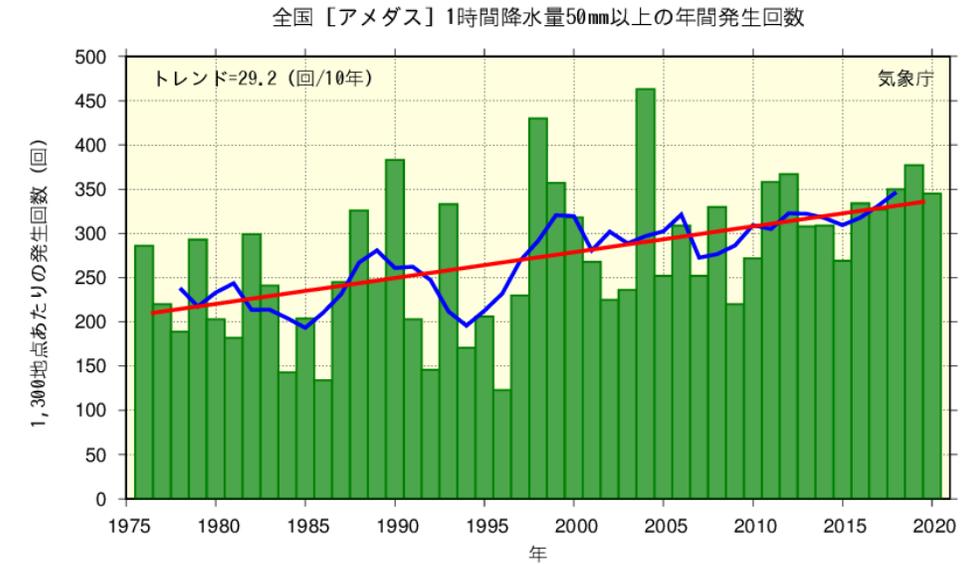


- これらは主に低解像度 (O(100km)) 気候モデルの結果
  - 14kmモデルでは強風域の拡大を示唆 (Yamada et al. 2017 JC)



# 地球温暖化問題に対する関心の高まり

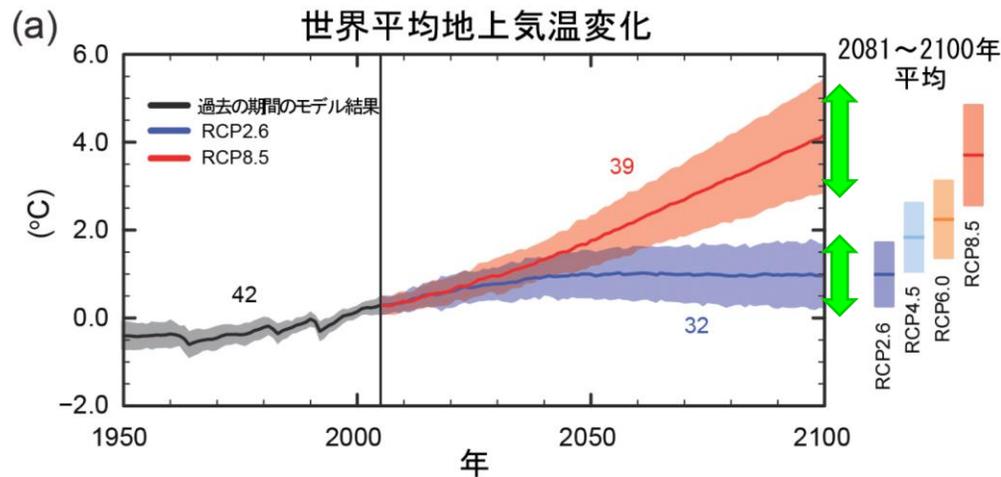
- 極端現象の増加傾向
  - 大雨、猛暑、台風、・・・
- 国内外の動き
  - IPCCおよびアル・ゴア氏がノーベル平和賞受賞（2007年）
  - パリ協定（2015年）：世界の気温上昇を2°C以下、できれば1.5°C以下に抑える努力をする
  - SDGs（2015年）：持続可能な開発目標。2030年に向けた17の目標
  - 気候非常事態宣言（国、自治体、等）
  - 気候変動適応法（2018年）



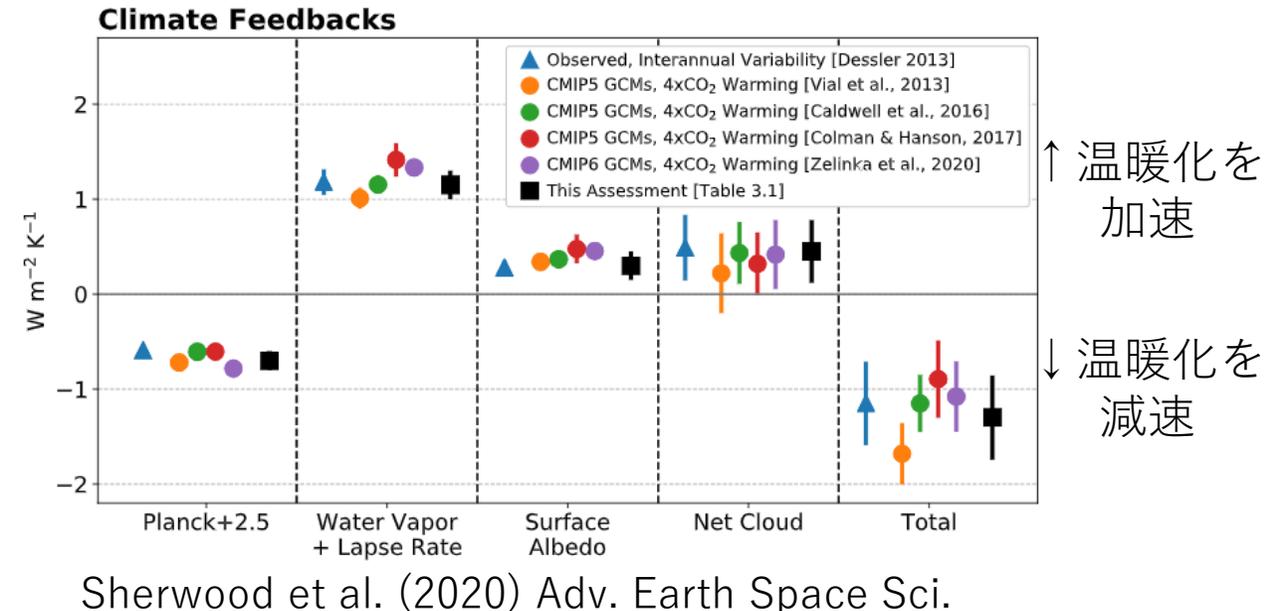
1980-1999年（左）および2000-2019年（右）に東京に接近した台風の経路図。  
Yamaguchi and Maeda (2020) JMSJ

# 気候感度：外力に対する応答の定量的指標

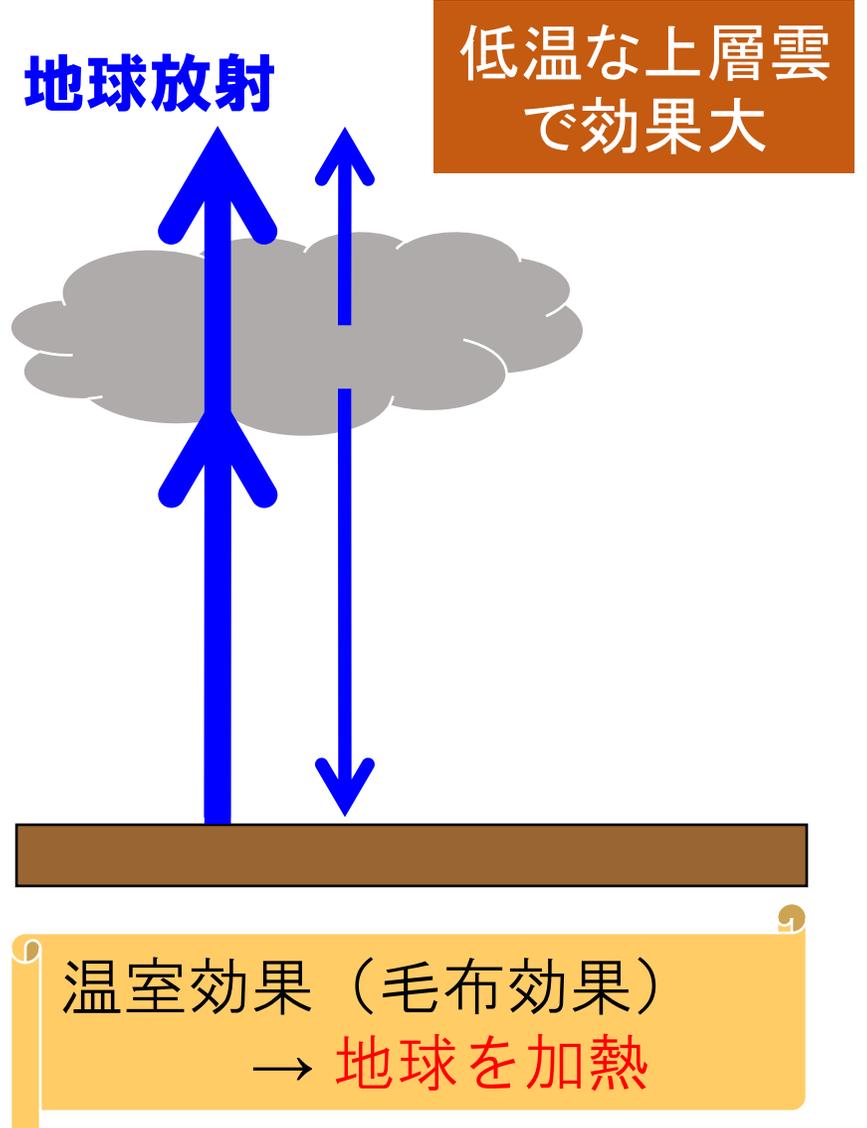
- (平衡) 気候感度：CO<sub>2</sub>倍増時の気温上昇量
  - 観測とモデルによる最新の推定値：2.3~4.5K (Sherwood et al. 2020)
- 同じ外力に対する気候モデルの応答
  - 気候モデルに依存して大きく異なる
  - 特に雲の応答の違いが寄与している



図：数値シミュレーションによる予測  
IPCC第5次評価報告書（気象庁訳）より

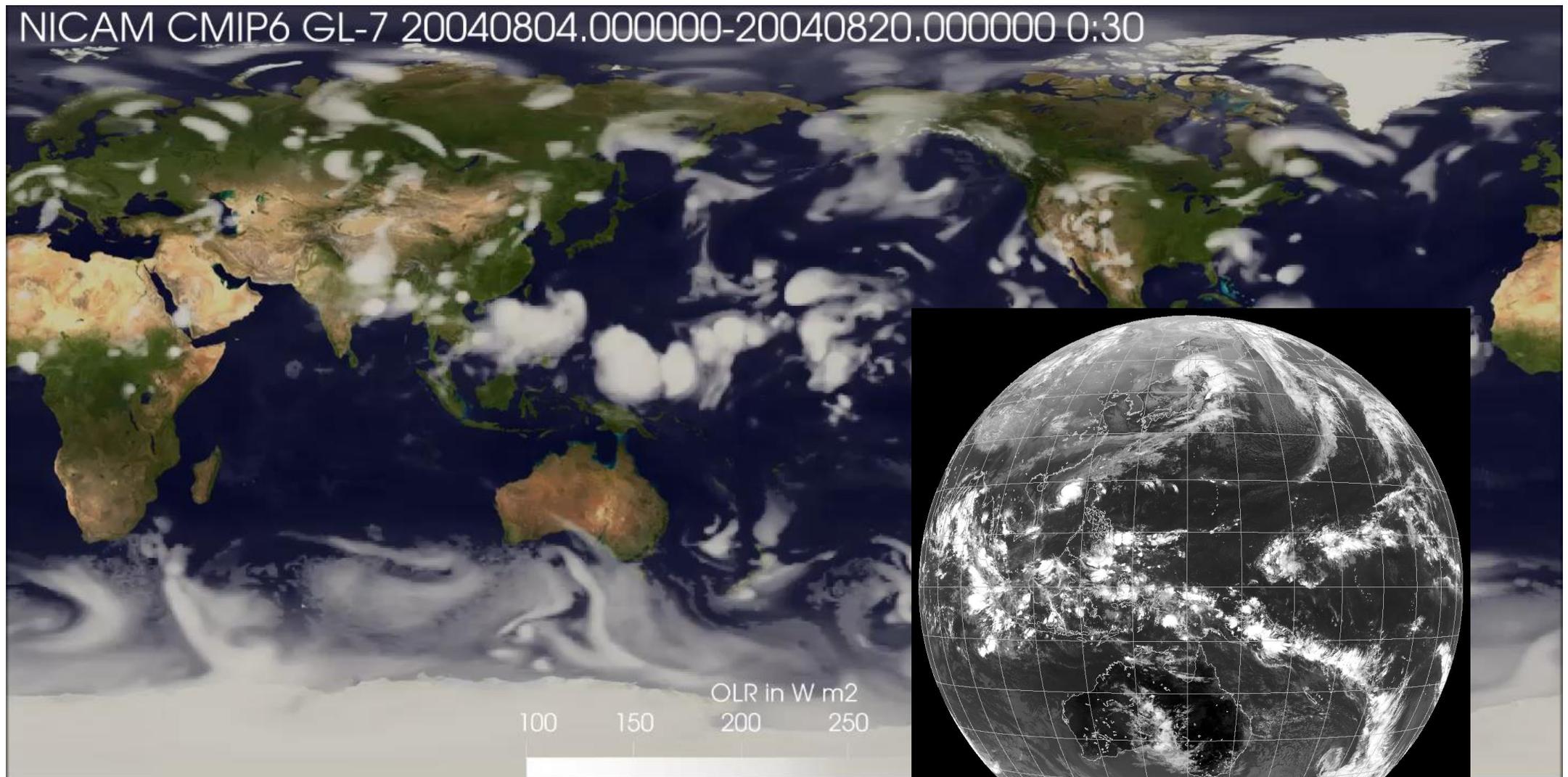


# 気候変動における雲の役割



# 56kmメッシュの場合 . . .

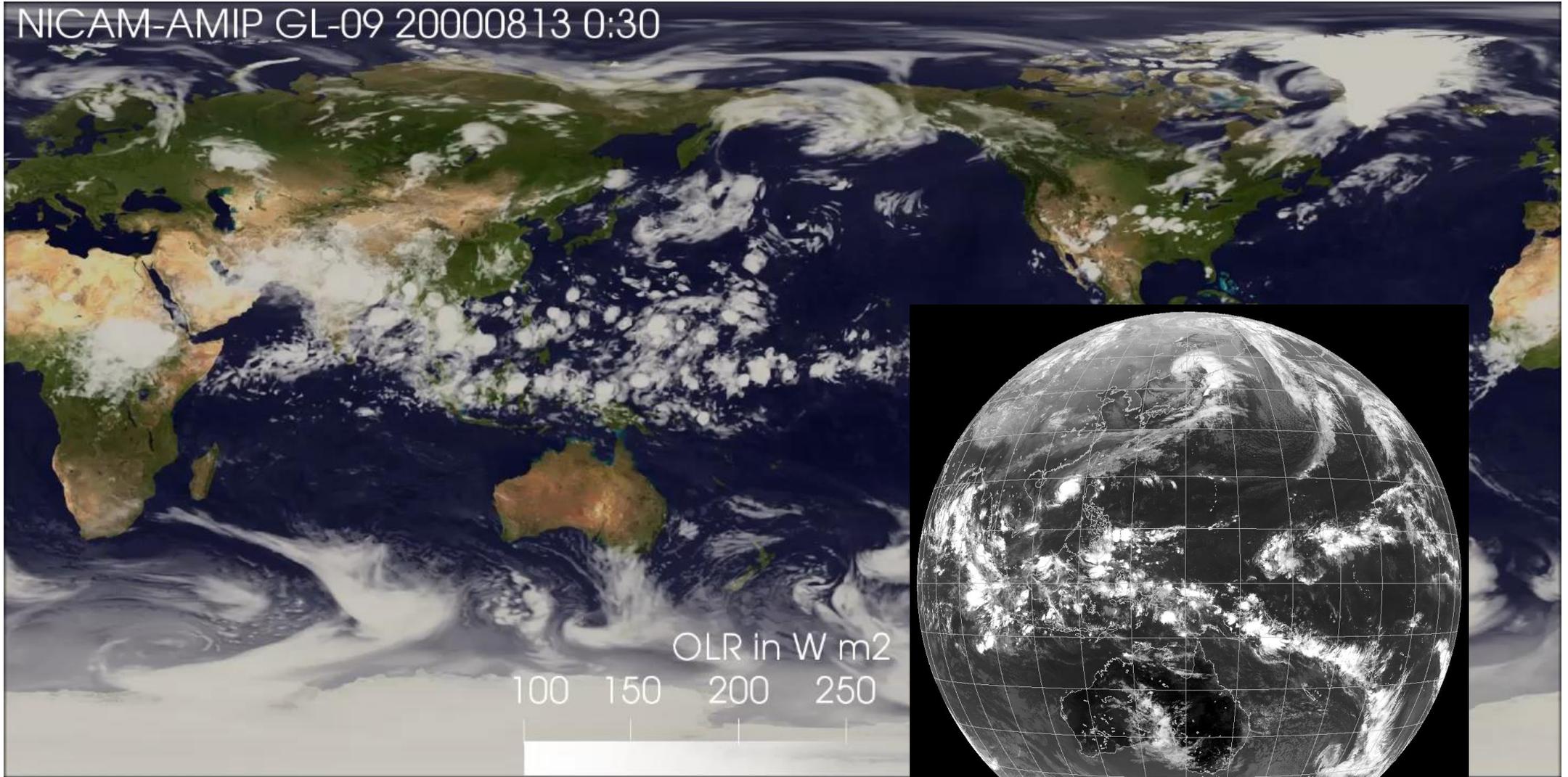
NICAM CMIP6 GL-7 20040804.000000-20040820.000000 0:30



※シミュレーション結果は日本の夏季

# 14kmメッシュにすると

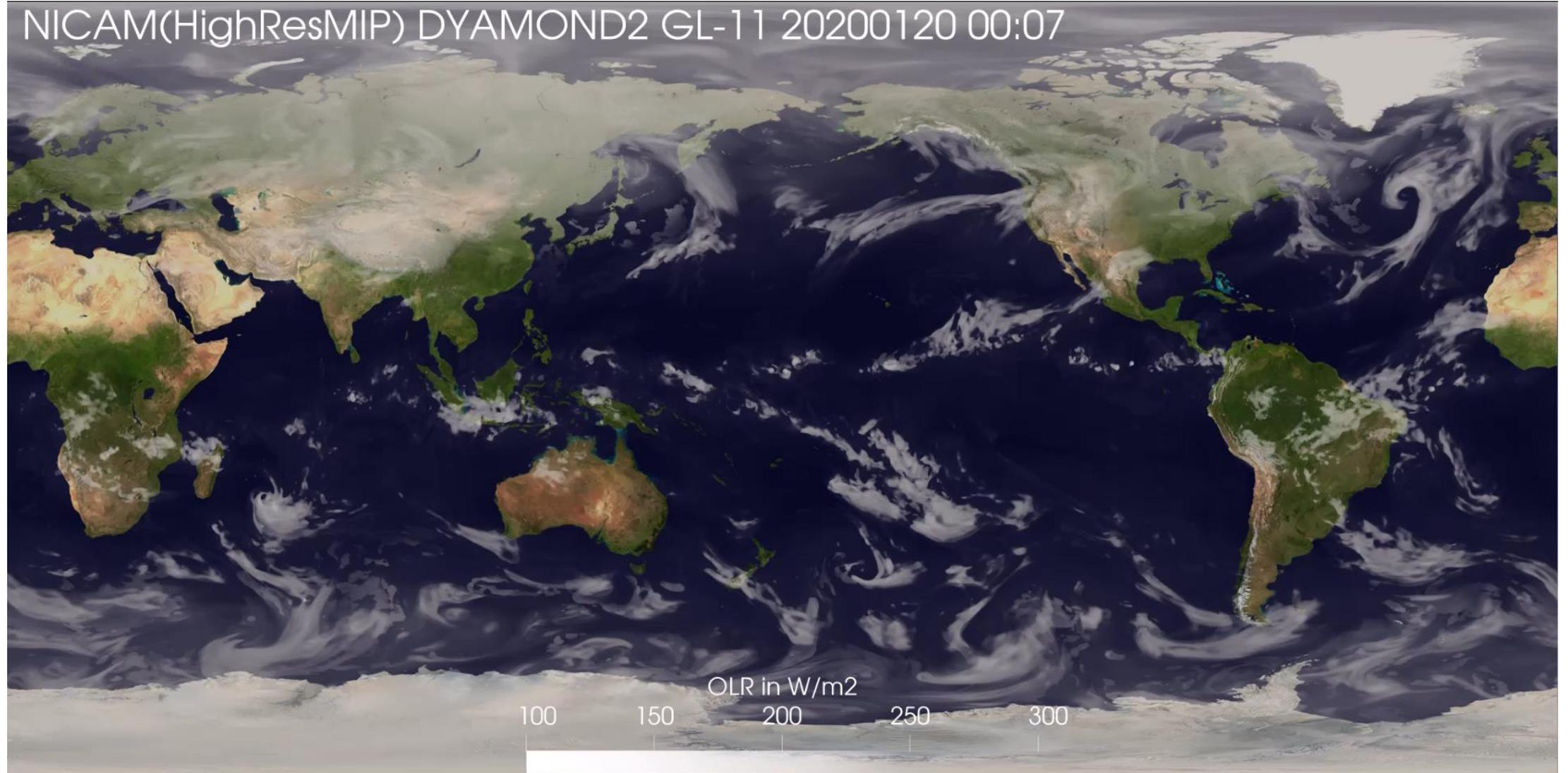
NICAM-AMIP GL-09 20000813 0:30



※シミュレーション結果は日本の夏季

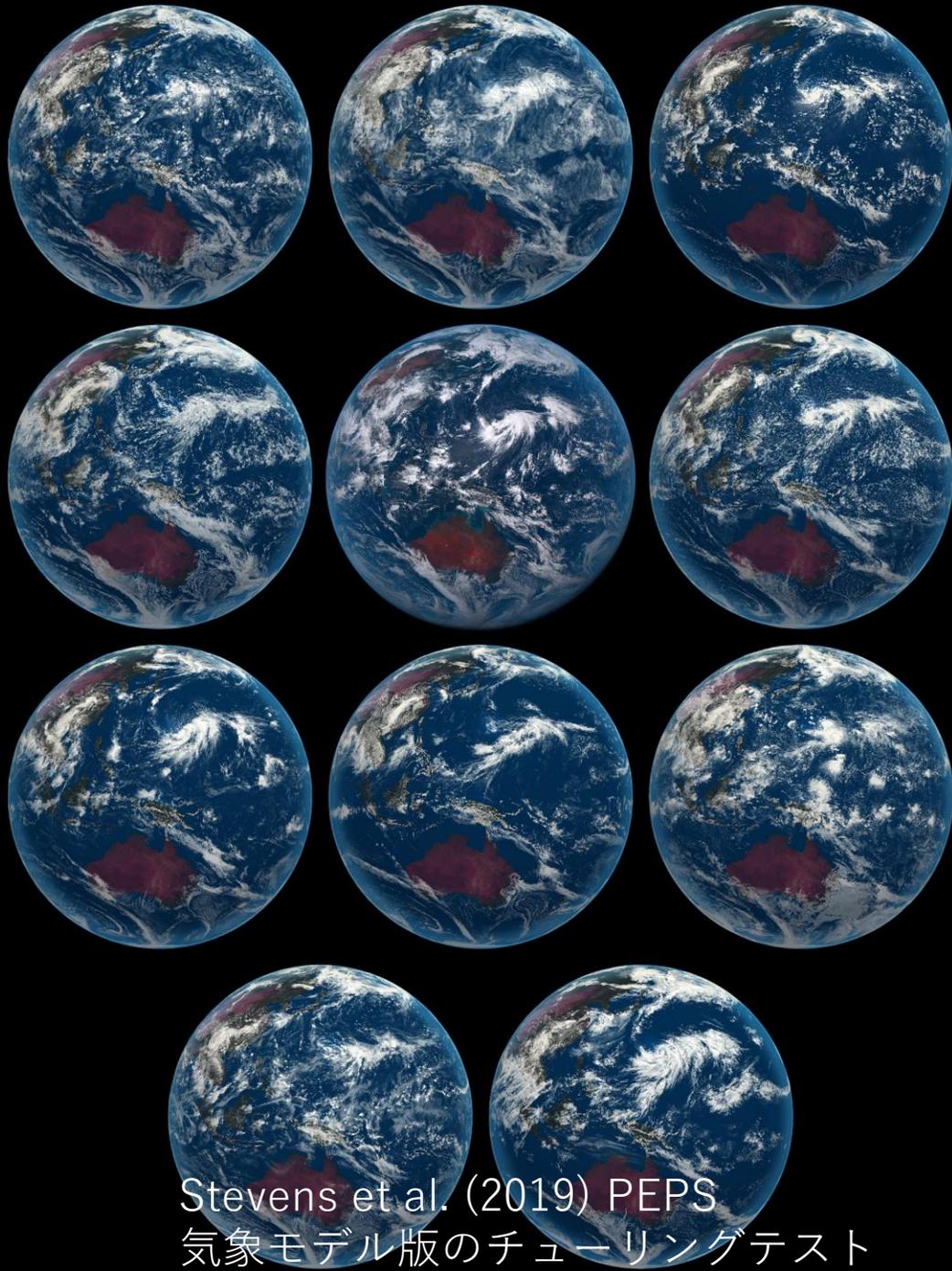
# 3.5kmメッシュ@富岳

データ：末松環氏、可視化：小玉



※シミュレーション結果は日本の冬季

# 全球雲解像/嵐解像モデル



Stevens et al. (2019) PEPS  
気象モデル版のチューリングテスト

# 次の戦略 . . .

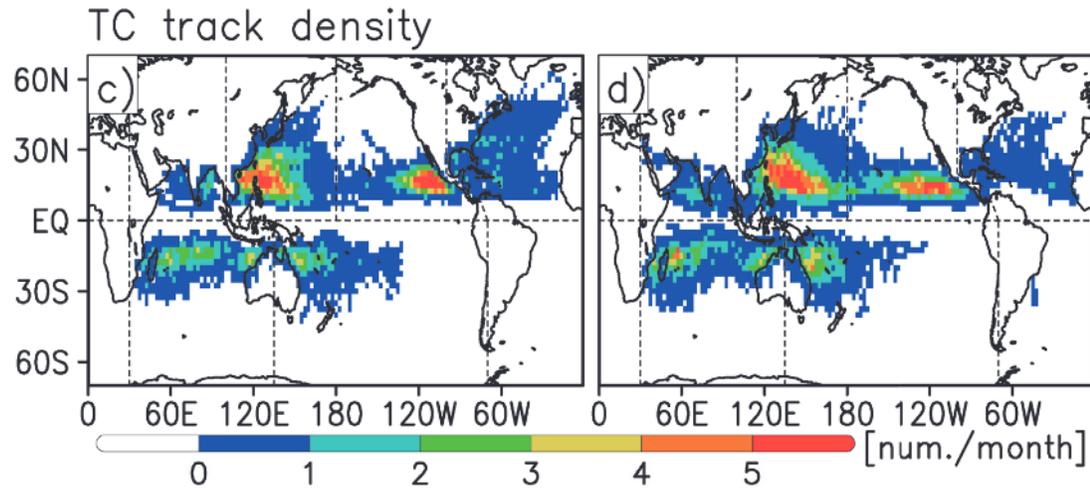
- 高解像度化：嵐 or 雲解像 ( $dx < \sim 5-3\text{km}$ )、LES ( $dx < \sim 100\text{m}$ )
- 大アンサンブル化：外部強制・内部変動の理解、確率予測
- 長期積分化：全球雲解像モデルの気候モデル化
- 複雑化：あらゆる意味で
- (マルチモデル化、AI活用)

表：全球高解像度モデルのロードマップ案。計算科学ロードマップ2022の気象・気候の節より（執筆中）

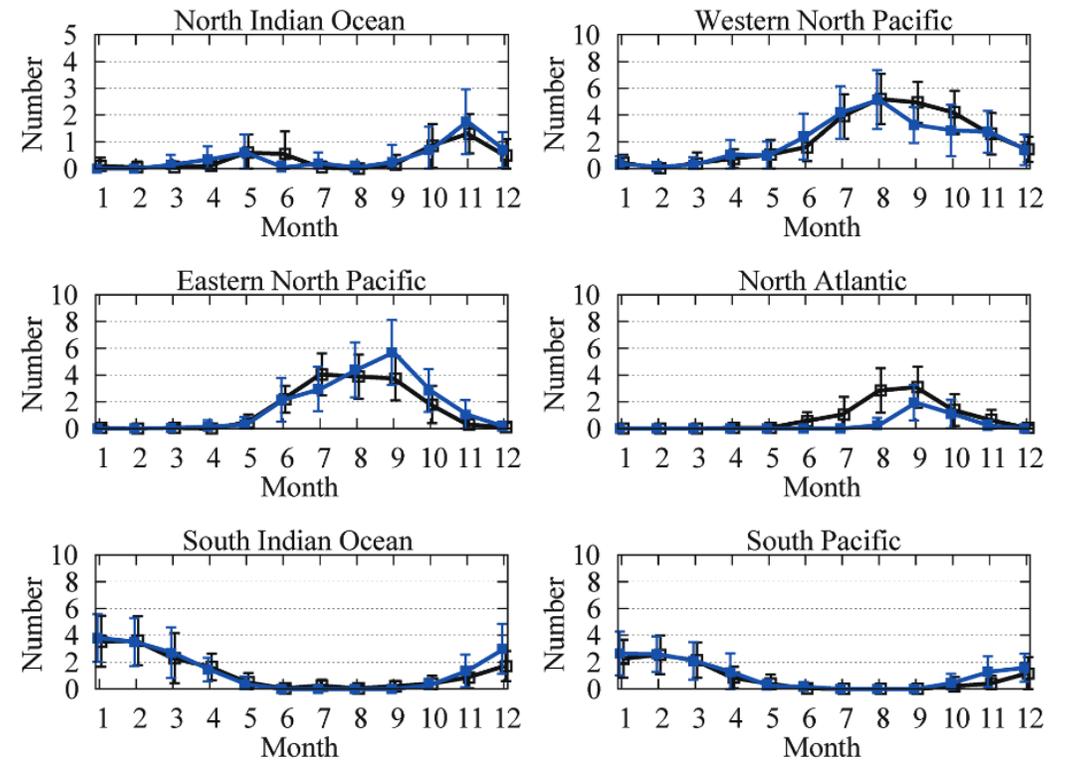
|              | 2022～                   | 2024～ | 2026～ | 2028～                          | 2030～ |
|--------------|-------------------------|-------|-------|--------------------------------|-------|
| 全球規模での高解像度予測 | 全球LESモデル開発<br>全球200 m実験 |       |       | 全球100 m実験 (LES)                |       |
|              | O( $10^3$ )アンサンブル予報実験   |       |       | O( $10^3$ )アンサンブル<br>全球雲解像予報実験 |       |
|              | 全球雲解像10年気候実験            |       |       | 全球雲解像100年気候実験                  |       |
|              | 全球雲解像地球システムモデル開発        |       |       | 全球雲解像地球システム実験                  |       |

# これまでの気候実験の取り組み@京

- 14kmメッシュ30年現在・将来気候実験 (Kodama et al. 2015 JMSJ)
  - 恐らく当時世界最高解像度の気候実験 (但し大気単体モデル)
  - 特に台風の分布・季節性の再現性が予想外に良かった
    - AIの学習データとしても活用された (Matsuoka et al. 2018, Matsuoka 2021)
  - (当然?) 再現性が悪い部分も目立つ



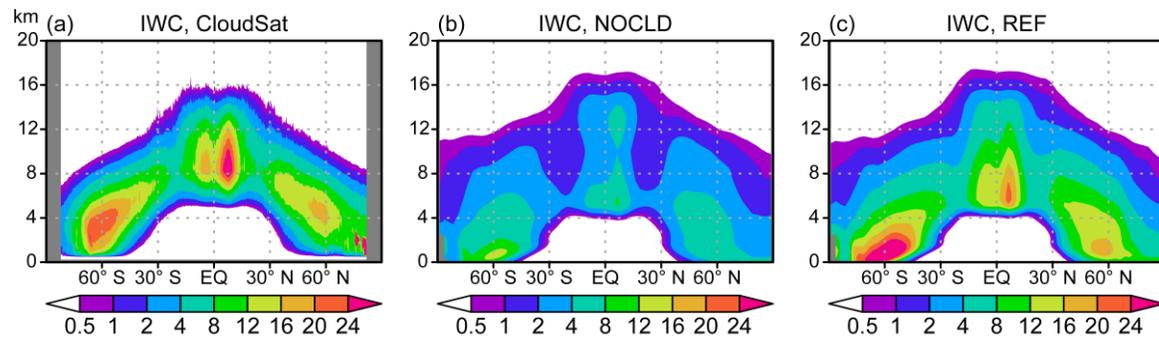
台風の通過密度。(左) 観測、(右) モデル



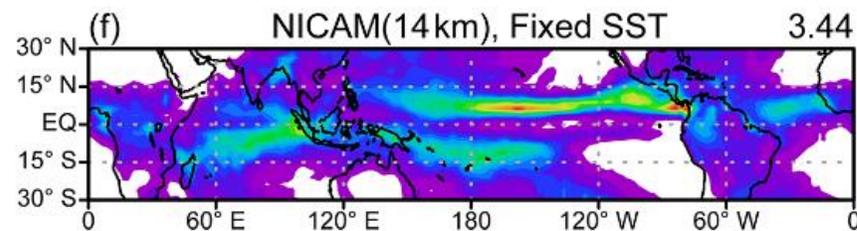
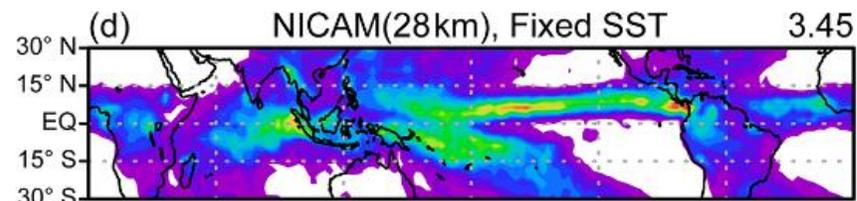
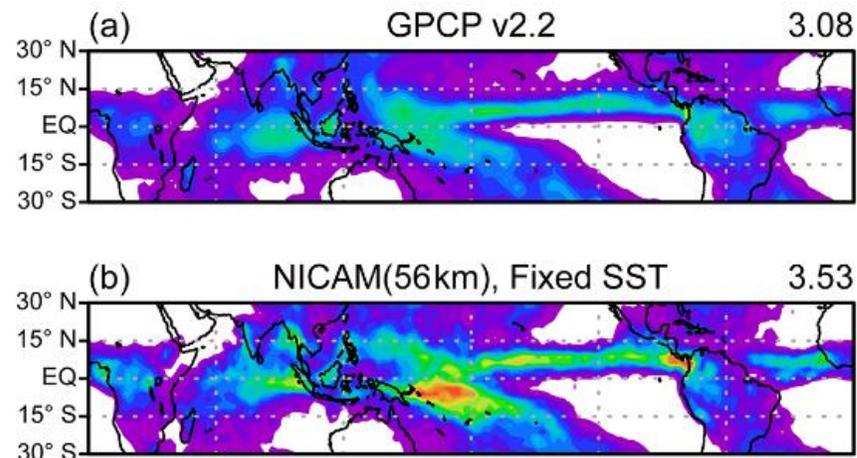
台風発生数の季節変化。黒：観測、青：モデル

# 気候バイアスとの闘い

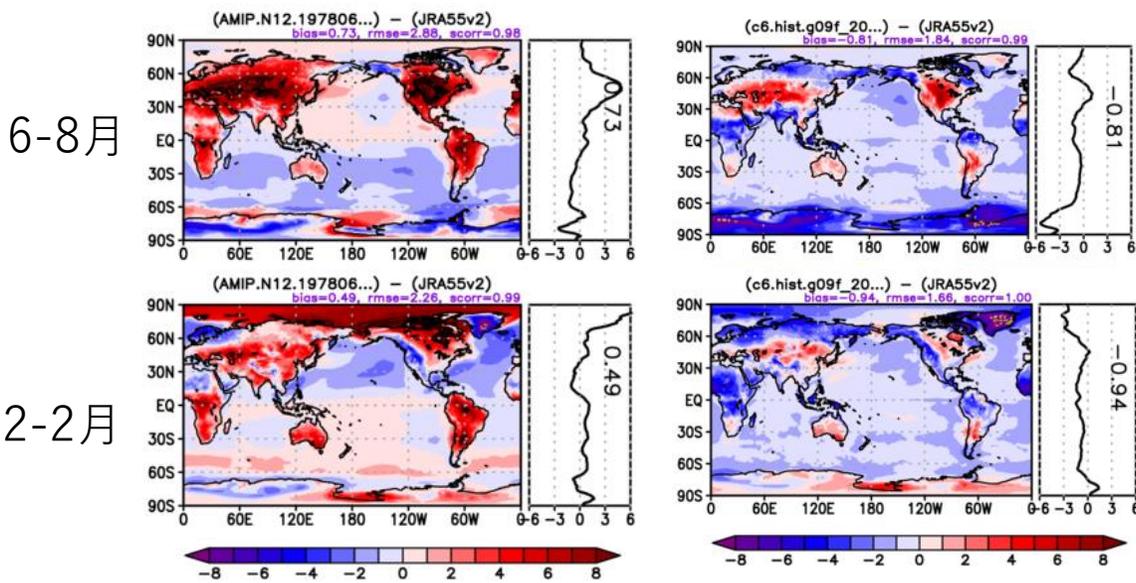
Kodama et al. (2021) GMD



東西平均した氷の南北鉛直断面 [ $10^{-6} \text{ kg m}^{-3}$ ]  
 (a) CloudSat衛星観測、(b) old NICAM (c) new NICAM



Precipitation,  $\text{mm d}^{-1}$ , Jun 2004-Mar 2005



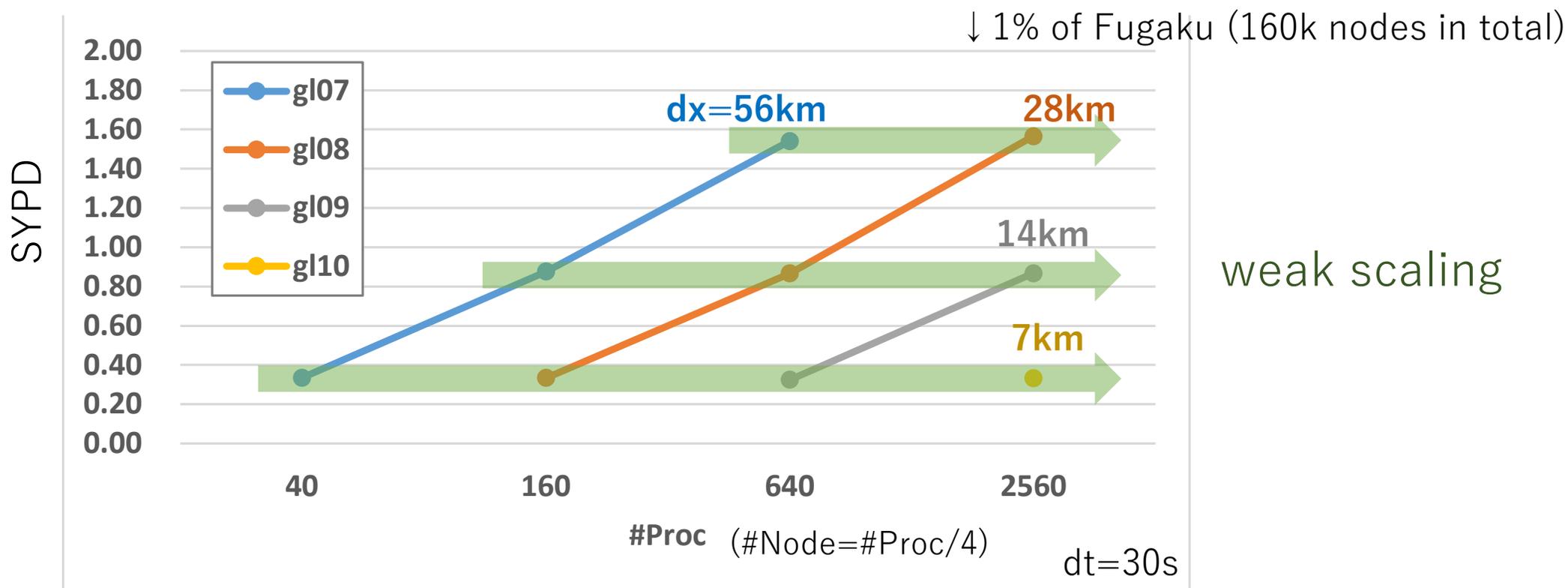
6-8月

12-2月

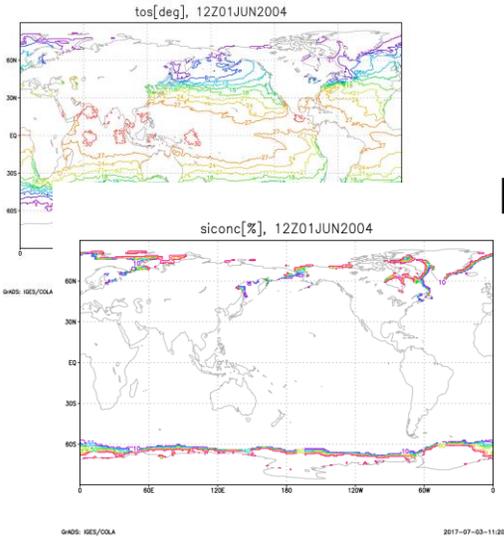
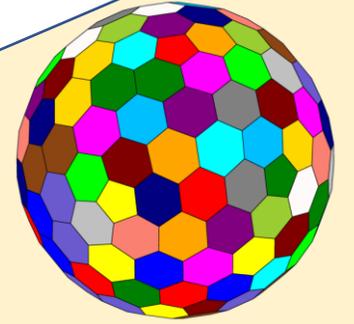
地上気温の気候バイアス (対JRA-55再解析)。  
 (左) old NICAM、(右) new NICAM

# Scalability of NICAM on Fugaku

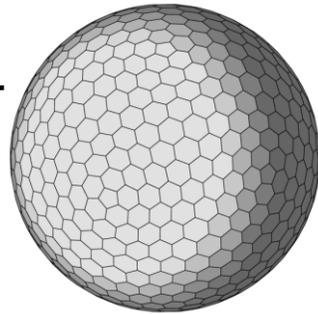
- Target: NICAM (DP), rich output necessary for CMIP protocol
- Metric: Simulation Year Per Day (SYPD)
- At least  $dx=7\text{km}$  climate simulation is possible on Fugaku.
  - Excellent weak scaling performance suggests  $dx=3.5\text{km}$  climate simulation is feasible.



# Workflow of NICAM climate simulation



h & v interp.



icosahedral (ico), z\* grid

run

output

ico, z

visualize & analyze

h interp. (ico2ll)

ll, z

CMORnize

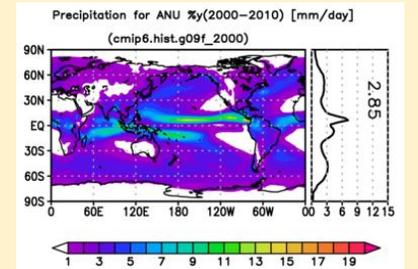
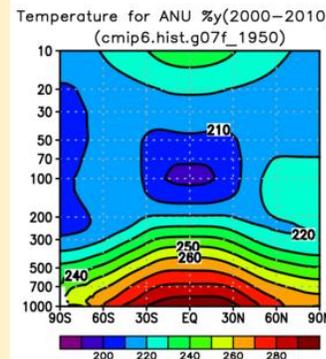
CMIP6 as native data

h interp. (roughen)

v interp. (z2pre)

ll, p

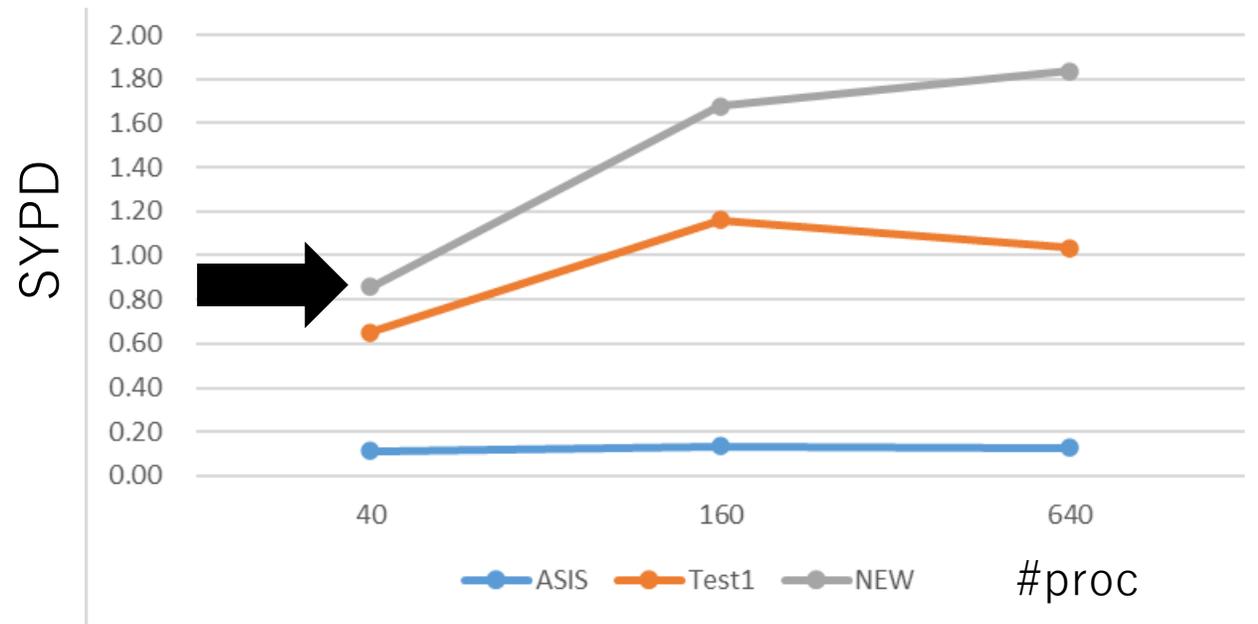
ll, z



In my experience, many people prefer to analyze **high-resolution 2D lat-lon data** and/or **low-resolution (p-level) lat-lon data**, not icosahedral data.

# Performance of post-process on Fugaku

- Target: Grid remapping (icosahedral -> latlon grid), dx=14km
- SYPD for the remapping (0.85 with #proc=40) is now greater than that for the main simulation (0.3 with #proc=640).
  - Better performance was achieved by (1) parallelized file output at the cost of many lat-lon files for each layer, (2) reduced amount of MPI communication, and (3) use of local SSD disk on Fugaku. Use of MPI-IO under consideration.



Note: remapping here is limited to some key variables.

# 全球高解像度モデルを取り巻く課題

- モデルの気候バイアス、パラメータチューニング
  - 何かを合わせると何かが合わない・・・
    - NICAMのような相対的に第一原理的なモデルでは、チューニングは更に困難
  - 気候モデルはエネルギーバランスが命？
    - (真の) 気候モデル = 大気海洋結合モデルで気候ドリフトせず走<sup>ズ</sup>
    - (現状) NICAM = ほぼ大気モデル。海洋は外部境界条件。
- HPC発展への追従、近々にはGPU対応
  - やればいいだけ、、、だがコードが長いので容易ではない
  - 知識のgapや人材難も深刻：気象学会に計算科学連絡会を設立準備中
- Strong-scaling問題
  - 高解像度化や大アンサンブル実験に比べて、長期積分の高速化は難しい
  - 物理スキーム（特に放射・雲微物理）のAIベース代理モデルでの置き換え？
    - 特に欧米の動きが早い。アプローチもこれだけではなく様々。
    - とはいえ、まだ始まったばかり・・・極端現象には本当に適用可能か？

NICAM develop ブランチ  
2022.3.25時点  
コードの行数：462,710行  
ファイル数：429  
開発関係者：20名程度

# まとめ

- 全球高解像度モデルを用いた気象・気候研究により、台風をはじめとする極端現象に対する理解・予測や気候感度の推定に対する信頼性向上がこの5-10年で大きく進展するだろう
  - 対象・目的に応じて高解像度化、大アンサンブル化、長期積分化、複雑化をバランスよく進めていくのが重要
- 気象・気候モデルの高速化やリファクタリングは容易ではないが、（私自身の知識updateも含めて）人材育成を進めながら長期的な視点で着実に進める必要がある
  - AIの積極的な活用もこの数年で大きく進みそう

# 謝辞

- Financial support

- Program for Promoting Researches on the Supercomputer Fugaku (Large Ensemble Atmospheric and Environmental Prediction for Disaster Prevention and Mitigation) (JPMXP1020351142) of the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), Japan
- Grants-in-Aid for Scientific Research, (for Transformative Research Area (B)), Grant Number 20H05728, "Challenge to a global cloud-resolving climate modeling" of MEXT, Japan
- The Integrated Research Program for Advancing Climate Models (TOUGOU) (JPMXD0717935457) of MEXT, Japan

Program for Promoting Researches on the Supercomputer Fugaku  
Large Ensemble Atmospheric and Environmental Prediction  
for Disaster Prevention and Mitigation

Deep Numerical Analysis  
気候学への挑戦



**TOUGOU**

Integrated Research Program  
for Advancing Climate Models

- Computational resource

- The supercomputer Fugaku provided by RIKEN through the HPCI System Research Project (Project ID: hp200128, hp200271, hp210085, hp210166)
- The Earth simulator by JAMSTEC