



多重階層結合系における対流圏大気現象の過去・現在・未来/
日本周辺の海流の力学過程およびその影響の理解

全球ラージエディ シミュレーションへの挑戦

佐藤 正樹¹⁾
松岸 修平¹⁾

Toward global large eddy simulations

Masaki Satoh, Shuhei Matsugishi

1) 東京大学大気海洋研究所

地球大気の循環は上昇流が幅数キロメートル以下の狭い領域に局在する積雲対流によって駆動されている。数値モデルにより積雲対流に伴う上昇流を正確に表現するためには、数百メートルの水平解像度が必要とされている。本研究では、全球非静力学モデル NICAM を用いて、上昇流の正確な表現が期待できる水平格子間隔 220 m の「全球大気ラージエディシミュレーション」を実施する。

1. はじめに

地球大気の循環は上昇流が狭い領域に局在する深い積雲対流（積乱雲）によって駆動されている。深い積雲対流は対流圏の大気を上下に混合し、組織化することで大規模循環の駆動源となる。近年、頻発している線状降水帯に伴う集中豪雨や台風による暴風雨等の極端気象は、狭い領域に上昇流が局在する積乱雲によって引き起こされており、極端気象の予測のためには積乱雲を数値モデル上で正確に表現する必要がある。大気の上昇流は雲・降水の生成に関わり、雲の放射効果を通じて大気のエネルギー収支・水収支に影響を与えるとともに、二酸化炭素等の物質循環における鉛直輸送に大きく影響する。従来の O (100 km) メッシュを用いた気象・気候シミュレーションでは、積雲対流を経験的な定式化でパラメタライズした形で鉛直輸送を組み込んでおり、シミュレーションの不確実性の要因になっている。

近年、数値モデルの高解像度化が進んでおり、全球で深い積雲対流を陽に計算する次世代の気象・気候モデルとして、幅数キロメートルスケールの水平格子を用いて全球をシミュレーションする全球非静力学モデル（全球 km スケールモデル）が世界の各機関で開発されている (Satoh *et al.* 2019; Slingo *et al.* 2022)。しかし、深い積雲対流に伴う上昇流のコアは幅 km 以下であり、数値シミュレーションで上昇流を適切に表現するためには O (100 m) の水平格子間隔の必要性が指摘されている (Brian *et al.* 2003)。全球 km スケールモデルの気象・気候シミュレーションの精密化のためには、大気の上昇流をより正確に表現する O

(100 m) の水平格子間隔のシミュレーションとの比較により数値モデルの限界を理解することが必要である。また、大気の上昇流は降水と密接に関わっており、降水のより正確なシミュレーションのためには、数値モデルにおける上昇流と降水との関係性や解像度依存性の理解が求められている。観測的にも広域で上昇流の特性を把握することは難しく、全球で上昇流を現実的に表現可能な全球超高解像度数値モデルによるシミュレーションに期待がかかっている。

これまで、全球非静力学大気数値モデル NICAM (Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model; Tomita and Satoh 2004; Satoh *et al.* 2008, 2014) を用いて、全球超高解像度シミュレーションを実施してきた (Satoh *et al.* 2017)。Miyamoto *et al.* (2013) はスーパーコンピュータ「京」において、NICAM による当時の最高解像度全球数値シミュレーションとして水平格子間隔 870 m までの様々な解像度の実験を実施した。その結果によると、深い積雲対流に伴う鉛直速度の大きさは、メッシュを 3.5 km, 1.7 km, 870 m と細かくしても収束性が得られなかった。スーパーコンピュータ「富岳」においては、収束性が予想されるさらに高解像度な水平格子間隔 220 m の実験が可能である。この解像度の数値シミュレーションは深い積雲に伴う渦運動を解像することから「全球大気ラージエディシミュレーション」と呼ぶことができる。全球ラージエディシミュレーションにより、全球における大気の上昇流のマルチスケール特性、地理的特性を明らかにすると共に、より正確な上昇流と降水の関係性を得ることが期待できる。深い対流の発達・成熟期における上昇流の統計的特性や多様な大気現象・降水系における上昇流の依存性、深い対流と大規模循環との関係、積雲対流のコアに代表される極端な上昇流の全球分布、地域特性を明らかにすることが解析の目標である。さらに、水平解像度に対する依存性を解析することで、様々な大気現象・降水系を適切に表現するために必要な解像度、解像度に対する収束性を理解する。このような解析から、数値モデルにおける極端気象

の再現性・予測精度の向上が期待される。

本研究では、「富岳」を用いて、全球 220 m メッシュの全球大気ラージエディシミュレーションを実現する。このシミュレーションから、上昇流の水平解像度に対する収束性が得られ、全球的な上昇流の特性が明らかになることが期待される。本稿では、全球 220 m メッシュ実験を含めた解像度依存性・乱流スキーム依存性の実験デザイン、計算特性を示し、解像度依存性について現在まで得られている結果を紹介する。

2. 実験デザイン

NICAM において格子間隔 220 m の水平格子は、正 20 面体の三角形を再帰的に 15 回分割することによって得られる。NICAM では水平格子分割レベルを g-level とよび、GL と略する。水平格子分割レベル GL11, 12, 13, 14, 15 は、それぞれ水平格子間隔約 3.5 km, 1.7 km, 880 m, 440 m, 220 m に対応する。初めに、GL11 を用いて、全球ストーム解像モデル比較実験 DYAMOND (DYNAMICS of the Atmospheric general circulation Modeled On Nonhydrostatic Domains ; Stevens *et al.* 2019) に従い、2016 年 8 月 1 日 00UTC を初期時刻とした 5 日間の実験を行う。図 1 に示すように、GL11 の 8 月 4 日 00UTC の実験結果から GL12, GL13 の初期値データを内挿し、GL12, GL13 による 2 日間の実験を行う。さらに GL12, GL13 の 8 月 5 日 00UTC 実験結果から GL14, GL15 の初期値データを内挿し、GL14 により 1 日間の実験、GL15 により 8 時間の実験を行う。時間ステップは、GL11, 12, 13, 14, 15 に対して、それぞれ 10, 6, 3, 1.5, 0.75 秒とした。鉛直方向には、鉛直層数を 78、対流圏で約 400 m の鉛直間隔をもつ実験を標準実験とする。可能であれば、縦横比 1:1 の鉛直格子間隔約 200 m の実験を実施したいが、「富岳」上の総メモリ量の制約のため現段階では実施ができない。将来的には、高度 1 km 程度に卓越する浅い積雲対流のシミュレーションが表現可能な鉛直格子間隔 30 m 程度の実験を目標とする (Wang and Feingold 2009)。

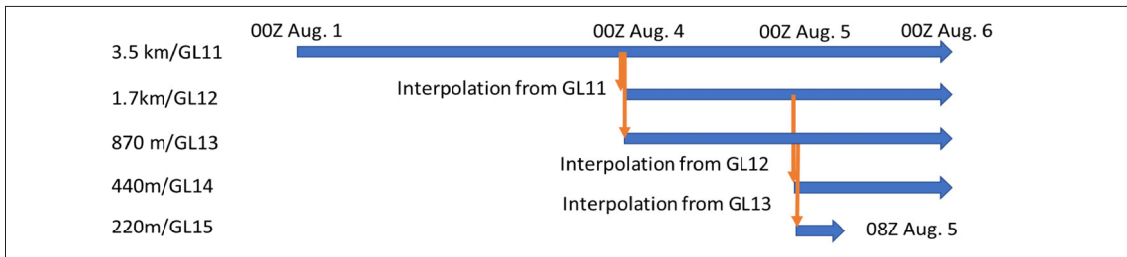


図1 実験デザイン, 各解像度GL11 からGL15 の積分期間. GL11 からGL15 の対応する水平格子間隔は, それぞれ約 3.5km, 1.7km, 870m, 440m, 220mである.

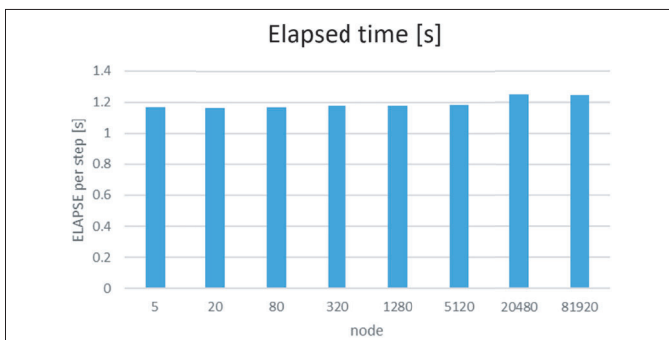


図2 「富岳」上での計算特性. 1ステップ辺りに要するelapsed time[s]の解像度依存性. 横軸GLEVEL 8 から 15 は, それぞれ水平格子間隔約 28km, 14km, 7.0km, 3.5km, 1.7km, 870m, 440m, 220m (GL08 から GL15).

大気のサブグリッド乱流スキームにとって, O (km) から O (100 m) の水平格子間隔シミュレーションは「グレーゾーン」(Honnert *et al.* 2020) と呼ばれている. 本研究では, グレーゾーンスキームを含む乱流スキームの依存性を明らかにすることを目標とする. 通常, O (km) より粗い解像度では, Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN; Nakanishi and Niino 2004) スキーム等の RANS (Reynolds Averaged Numerical Simulation もしくは Reynolds-averaged Navier-Stokes equation) スキームが利用されている. また O (100m) より細かい解像度では, Smagorinsky スキーム等のラージエディシミュレーション (LES) に用いられる LES スキームが利用される. RANS スキーム, グレーゾーンスキーム, LES スキームによる依存性を調べることを目標とする. GL11-15 の解像度依存性の実験をまずグレーゾーンスキームとして MYNN を拡張した Ito *et al.* (2015) の手法を用いたスキームによる実験を実施する. 今後, サブグリッド乱流スキーム (RANS スキーム (MYNN),

LES スキーム (Smagorinsky), およびグレーゾーンスキーム) に対する依存性, および鉛直解像度依存性の解明に取り組む. サブグリッド乱流スキームや鉛直解像度の依存性を通じて, 下層雲の表現およびその地域分布の理解をめざす.

雲物理スキームは水物質 6 カテゴリーを含むシングルモーメントスキーム (NSW6; Tomita 2008; Roh and Satoh 2014) であり, 放射スキームは MSTRNX (Sekiguchi & Nakajima 2008) である.

本稿の段階では, 全球 220 m メッシュ実験に取り組むための計算コードの改良・効率化等の準備を経て, RANS・グレーゾーンスキームによる実験を遂行中である. GL11-14 については計算が完了し, GL15 はグレーゾーンスキームによる 2 時間の計算が終了した. 引き続き, GL15 による 8 時間分の実験を実施し, LES スキームの実験に取り組む.

3. 計算性能

水平格子間隔 220 m の GL15 実験は, 水平方向に $10 \times 4^{15} \approx 100$ 億個の点で変数が定義される.

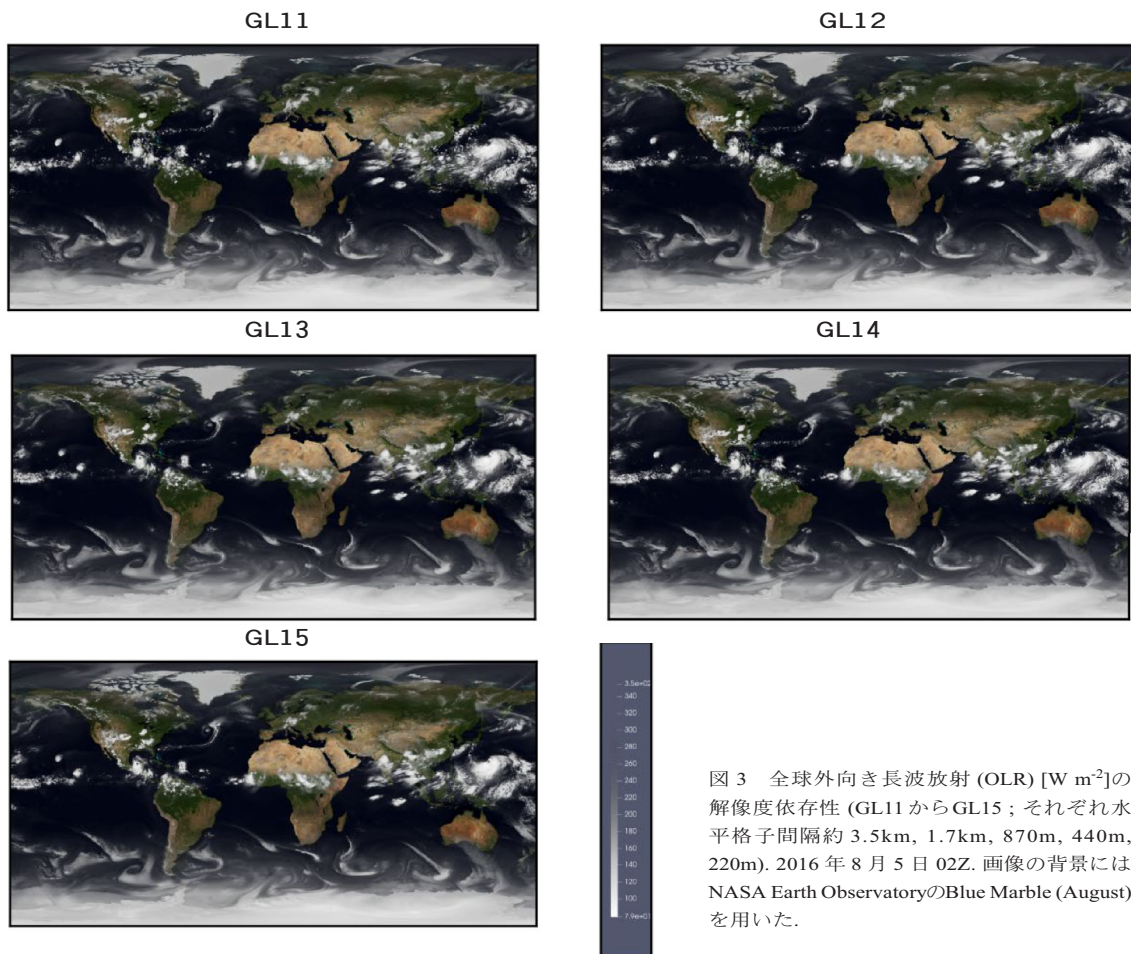


図3 全球外向き長波放射(OLR) [W m^{-2}]の解像度依存性(GL11からGL15;それぞれ水平格子間隔約3.5km, 1.7km, 870m, 440m, 220m). 2016年8月5日02Z. 画像の背景にはNASA Earth ObservatoryのBlue Marble (August)を用いた.

鉛直層数78の場合、3次元変数は約8000億個の格子点からなる。圧縮無の単精度実数で出力する場合、1スナップショットで2次元データは40 GiB(=10 × 4¹⁵ × 4 byte)、3次元データは約3 TiBである。3次元データ(温度、圧力、風の3成分、水物資6変数:計11変数)を1時間毎に8時間(8回分)出力すると、264 TiBを要する。

図2にGL8からGL15のウィークスケーリングの様子を示す。GL8では5ノードを利用し、並列計算における計算領域分割レベルは1(r-level 1)で、Message Passing Interface (MPI)による20並列を行っている。水平格子分割レベルGLを1段階細分化する毎に、計算格子点数は4倍になるの

で、ノード数を4倍利用することでノード辺りの格子点数を解像度によらず一定とした計算を行う。GL15では81,920のノードを利用する。これは「富岳」の全ノード数158,976の51.5%のノード数を利用することになる。GL15では、MPIによる327,680並列と12個のOpenMP並列を併用し、計算に要するコア数は3,932,160、使用する最大総メモリ量は約2 PByteである。計算領域の分割はr-level 8で総領域数655,360となり、1MPI並列辺り2領域の計算を担当することになる。NICAMは単精度を主に使い、一部倍精度を組み合わせた混合精度(Nakano *et al.* 2018)で計算を行うことで省メモリ化と高速化を図る。GL15での

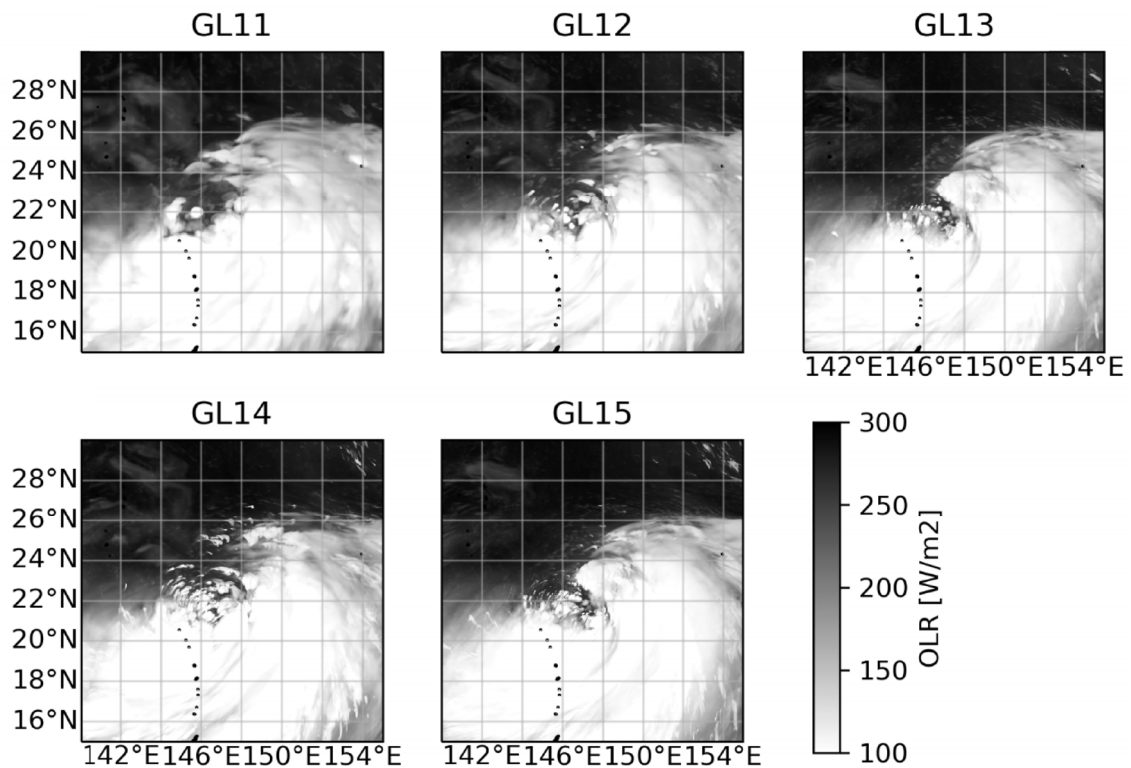


図4 台風OMAIISに伴うOLR[W/m²]の解像度依存性 (GL11 からGL15 ; それぞれ水平格子間隔約 3.5km, 1.7km, 870m, 440m, 220m). 2016年8月5日02Z.

計算速度は約 18PFlops, ピーク性能比は解像度によらず約 7%であり, 良好なウィークスケーリングの結果を示している.

4. 結果

図3に, 2016年8月5日02ZにおけるGL11からGL15までの外向き長波放射 (Outgoing Longwave Radiation; OLR) の全球分布を示す. OLRによって表される上層雲の空間パターンは異なる解像度間においても, 非常に類似性が高い. 太平洋, アマゾン, アフリカ中部の熱帯域では, いずれの解像度でも積雲クラスターに対応した数 100 km スケールでの上層雲の組織化が見られ, 大きさ, 強度, 形状といった性質も類似している. 太平洋西部上の雲の集団の領域を拡大すると, より小さいスケールの雲の形状に実験間の相違が確認

できる. フィリピン等方には台風第5号 OMAIS が再現されており, 台風の眼の領域に雲の晴れ間が見られる.

図4, 5は台風 OMAIS を拡大した領域の OLR および降水を示す. 台風の中心は北緯 22 度, 東経 146 度付近に位置する. 図4の OLR で示されるように, 眼の周囲の上層雲の詳細な分布が解像度間で異なることがわかる. また, 図5の降水分布について, GL11では数 10 km の大きさの強い雨域が台風の眼の周囲に分布するのに対し, 解像度が高くなると眼の北西側では, よりスケールの小さな弱い雨域として表現されるようになる. 眼の北西側では OLR が小さいため, より下層の雲に伴った降水であると考えられる.

GL15の実験は現時点では, 初期値から2時間までであり, まだスピニアップの段階にあると考え

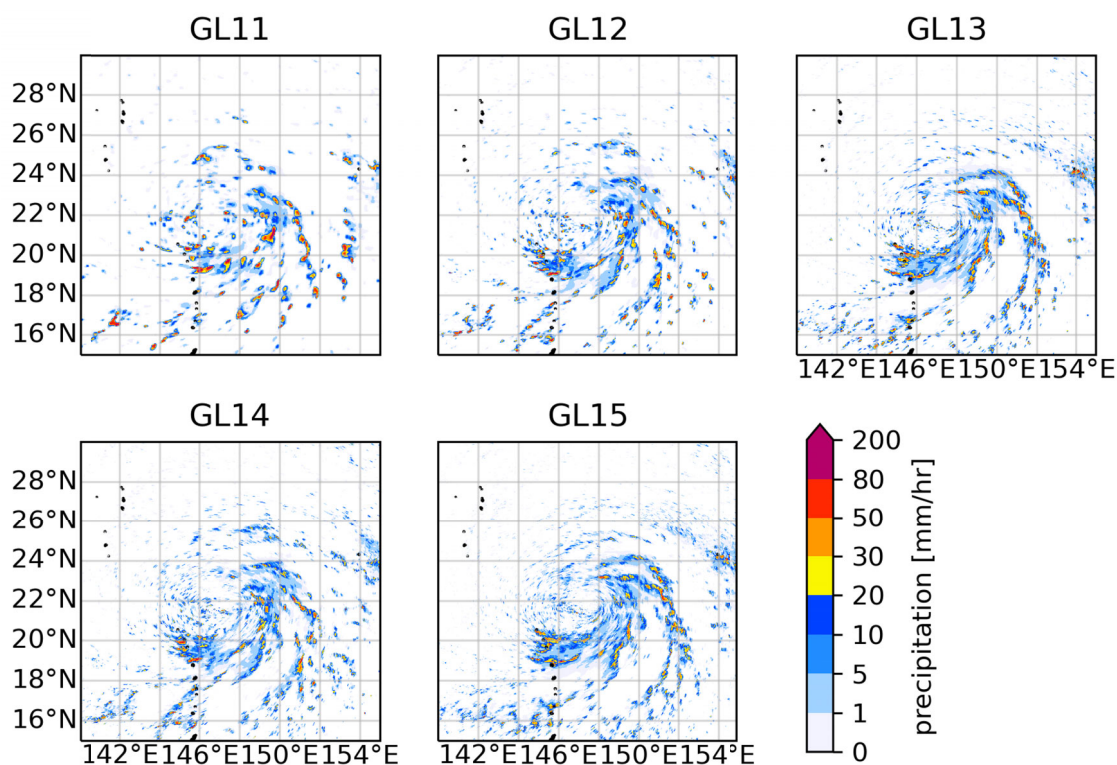


図5 図4と同様, 但し前15分平均降水強度[mm/hr].

られる。一般に、深い対流の励起等のスピニングアップには、4時間程度を要する。引き続き実験を進め、スピニングアップが完了した段階でのデータ解析を進める。特に、鉛直風の解像度依存性や鉛直風の最大値や降水との関係に着目した解析を予定している。

5. まとめと展望

スーパーコンピュータ「富岳」の半分以上のノード数を利用することによって、全球非静力学モデルNICAMによる世界最高解像度の水平格子間隔220mの全球大気の数値シミュレーションを実施した。このような実験は、世界初の「全球大気ラージエディシミュレーション」と呼ぶことができる。水平格子間隔約3.5 kmから220 mまでの実験の解像度間の依存性を調べた。全球的なO(100

km)以上のスケールをもつ上層雲の分布は解像度間の相違は小さいが、O(10 km)より小さなスケールでは詳細構造が異なる。水平格子間隔3.5 kmでは深い積雲に伴う強い降水がパッチ上に分布していたのに対し、水平格子間隔220 mではより弱い対流の表現が可能になった。

NICAMは、対流雲の浮力に伴う鉛直加速が計算可能な全球非静力学モデルとして2000年頃から開発を始めた数値モデルであり、世界初の全球kmスケールモデルとして、地球大気のコアスケールO(km)から惑星スケールO(10,000 km)までのマルチスケール現象の数値データを創出してきた(Satoh *et al.* 2014)。また、NICAMは富岳のターゲットアプリケーションの一部であり、「富岳」上で十二分に性能を発揮するようにチューニングされてきた。NICAMによる大アン

サンプル高解像度全球実験(水平格子間隔 3.5 km, 1000 アンサンブル; NICAM-LETKF による同化実験)は 2020 年 Gordon Bell 賞のファイナリストとして選出された(Yashiro *et al.* 2020)。「富岳」の他の課題においても, 大アンサンブル実験や数十年スケールの気候実験等に幅広く利用されているアプリケーションである。これらの実験に加えて, NICAM による全球 220 m 水平格子の全球ラージエディシミュレーションはさらに挑戦的であり, 物理・力学スキームとプログラムコードのさらなる改良を行い, 「富岳」の計算能力を最大限まで利用することによってはじめて実現できたものである。

全球ラージエディシミュレーションにより期待される成果として, 地球上に存在する様々な降水系について, 積乱雲の渦擾乱 O (100 m)・メソ循環 O (10 km)・対流組織化 O (1000 km) に至るマルチスケール構造を全球で捉えることが可能になる。全球 220 m メッシュ間隔のシミュレーションにより, 大気の上昇流の 100 m から 10,000 km までの O (10⁵) のレンジでのスペクトルが得られ, 降水系のマルチスケール特性やその地域性を調べることが可能になる。上昇流と降水の関係の精緻な解析により, 極端気象予測, 気候予測, 物質循環予測の課題の解決に貢献する。全球モデルとは対照的に, 一部の領域に限定した領域モデルによる下層雲等を対象とした LES 実験は広く行われているが, 対象とする事例の選定に限界があり, また領域の水平方向の境界条件の影響が避けられず, 領域スケール以上の現象との相互作用については調べることができない。例えば, 全球ラージエディシミュレーションを用いることで, 領域 LES のみでは難しい放射収支に影響を及ぼす下層雲等の組織化とより大きなスケールをもつ循環との相互作用の研究の推進が期待される。

Slingo *et al.* (2022) 等で指摘されているように, 今後の気象・気候研究において, O (km) メッシュを用いた全球 km スケールモデルによるシミュレーションの重要度が増すことが予想される。全球 km スケールモデルは, 気候シミュレーション等に用いられてきた粗い解像度の O (100 km) の

水平格子間隔のシミュレーションに比べて雲・降水過程の再現性向上が期待されるものの, 雲・降水プロセスと密接に関わる上昇流が十分に解像できているとはいえない。全球にわたってさらなる高解像度の O (100 m) の水平格子間隔で行う全球ラージエディシミュレーションにより, km スケール以下の水平間隔の数値モデルにおける収束性・水平格子間隔に対する依存性を解明することにより, 全球 km スケールモデルがどこまで再現可能なのか, 全球 km スケールモデルに足りない要素は何かを示し, 改善につなげることができる。従って, 全球ラージエディシミュレーションは, 全球 km スケールモデルの利活用のためにも期待される実験目標である。

謝辞: 計算には, スーパーコンピュータ「富岳」を利用した(課題番号 hp220058)。富岳一般課題「全球大気ラージエディシミュレーション」の参加メンバーの協力に感謝する。

参考文献

- [1] Bryan, G. H., J. C. Wyngaard, J. M. Fritsch, 2003: Resolution requirements for the simulation of deep moist convection, *Mon. Weather Rev.*, 131, 2394-2416. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<2394:RRFTSO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<2394:RRFTSO>2.0.CO;2)
- [2] Honnert, R., G. A. Efstathiou, R. J. Beare, J. Ito, A. Lock, R. Neggers, R. S. Plant, H. H. Shin, L. Tomassini, and B. Zhou: The Atmospheric Boundary Layer and the “Gray Zone” of Turbulence: A Critical Review, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, e2019JD030317, 2020.
- [3] Ito, J., H. Niino, M. Nakanishi, and C. H. Moeng, 2015: An extension of the Mellor–Yamada model to the terra incognita zone for dry convective mixed layers in the free convection regime. *Boundary-layer meteorology*, 157, 23-43.
- [4] Miyamoto, Y., Y. Kajikawa, R. Yoshida, T. Yamaura, H. Yashiro, H. Tomita, 2013: Deep moist atmospheric convection in a subkilometer global simulation, *Geophys. Res. Lett.*, 40, 4922-4926, <https://dx.doi.org/10.1002/grl.50944>
- [5] Nakanishi, M. and H. Niino, 2004: An improved Mellor–Yamada Level-3 model with condensation physics: Its design and verification. *Bound.-Layer Meteor.*, 112, 1-31.
- [6] Nakano, M., Yashiro, H., Kodama, C., Tomita, H., 2018: Single precision in the dynamical core of a nonhydrostatic global atmospheric model: Evaluation using a baroclinic wave test case. *Mon. Wea. Rev.*, 146, 409-416,

<https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0257.1>.

[7] Satoh, M., Matsuno, T., Tomita, H., Miura, H., Nasuno, T., Iga, S., 2008: Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J. Compu. Phys.*, 227, 3486-3514, doi:10.1016/j.jcp.2007.02.006.

[8] Satoh, M., Tomita, H., Yashiro, H., Miura, H., Kodama, C., Seiki, T., Noda, A. T., Yamada, Y., Goto, D., Sawada, M., Miyoshi, T., Niwa, Y., Hara, M., Ohno, Y., Iga, S., Arakawa, T., Inoue, T., Kubokawa, H., 2014: The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: Description and development. *Progress in Earth and Planetary Science*. 1, 18. doi:10.1186/s40645-014-0018-1

[9] Satoh, M., Tomita, H., Yashiro, H., Kajikawa, Y., Miyamoto, Y., Yamaura, T., Miyakawa, T., Nakano, M., Kodama, C., Noda, A. T., Nasuno, T., Yamada, Y., Fukutomi, Y., 2017 Outcomes and challenges of global high-resolution non-hydrostatic atmospheric simulations using the K computer. *Progress in Earth and Planetary Science*, 4, 13, <https://doi.org/10.1186/s40645-017-0127-8>

[10] Slingo, J., P. Bates, P. Bauer, S. Belcher, T. Palmer, G. Stephens, B. Stevens, T. Stocker, G. Teutsch, 2022: Ambitious partnership needed for reliable climate prediction. *Nature Climate Change*, 12, 499-503, <https://dx.doi.org/10.1038/s41558-022-01384-8>

[11] Stevens, B., Satoh, M., Auger, L., Biercamp, J., Bretherton, C., Chen, X., Duben, P., Judt, F., Khairoutdinov, M., Klocke, D., Kodama, C., Kornblueh, L., Lin, S.-L., Putman, W., Shibuya, R., Neumann, P., Rober, N., Vannier, B., Vidale, P.-L., Wedi, N., Zhou, L., 2019: DYAMOND: The Dynamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains. *Progress in Earth and Planetary Science*, 6, 61, <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0304-z>

[12] Tomita, H., 2008: New microphysical schemes with five and six categories by diagnostic generation of cloud ice. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86A, 121-142.

[13] Tomita, H. and Satoh, M., 2004: A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. *Fluid Dyn. Res.*, 34, 357-400.

[14] Yashiro, H., Terasaki, K., Kawai, Y., Kudo, S., Miyoshi, T., Imamura, T., Minami, K., Inoue, H., Nishiki, T., Saji, T., Satoh, M., Tomita, H., 2020: A 1024-Member Ensemble Data Assimilation with 3.5-Km Mesh Global Weather Simulations. 2020 SC20: International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC), Atlanta, GA, US. <https://doi.ieeeecomputersociety.org/10.1109/SC41405.2020.00005>

[15] Wang, H., Feingold, G., 2009: Modeling Mesoscale Cellular Structures and Drizzle in Marine Stratocumulus. Part I: Impact of Drizzle on the Formation and Evolution of Open Cells. *J. Atmos. Sci.*, 66, 3237-3256.

