

気象・気候のデジタルツイン？： NICAM による高解像度シミュレーション

中野満寿男（海洋研究開発機構 地球環境部門 環境変動予測研究センター）

1. はじめに

最近デジタルツインという言葉をよく聞く。これはサイバー空間にリアル空間を再現するもので、気象・気候の精緻な再現シミュレーションはそれらのデジタルツインの一形態と言ってもいいのかもしれない。

全球非静力学モデル NICAM(Tomita and Satoh 2004; Satoh et al. 2014)は「京」コンピュータ上で

世界初となる 1km メッシュより細かい 870m 解像度での全球シミュレーションを達成(Miyamoto et al. 2013)するなど、高解像度全球大気シミュレーション研究で世界をリードしてきた。本講義では、NICAM による研究内容について紹介する他、猛迫する欧米勢の高解像度全球モデリングの動向や地球デジタルツインの構築の動向を紹介しつつ、今後を展望したい。

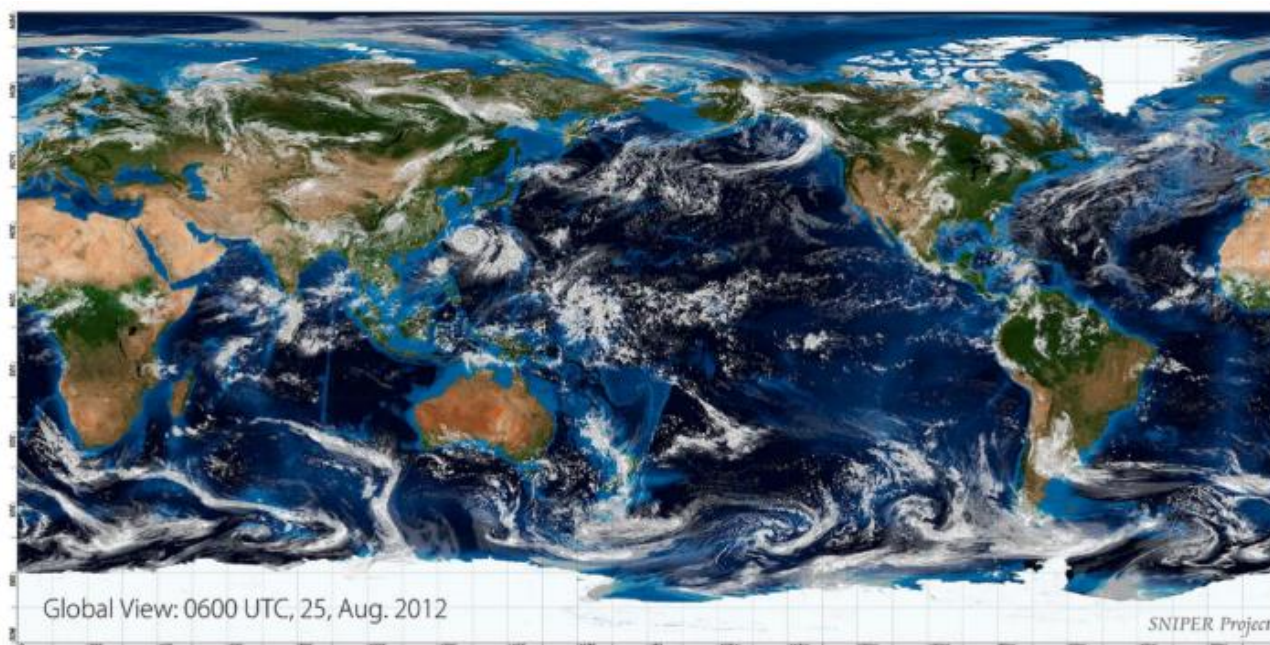


図1 全球 870m 実験で再現された雲水量の分布(Miyamoto et al. 2013)

2. NICAM の特徴

高解像度シミュレーションを行うべく開発された NICAM は従来型の全球気象気候モデルと比して、いくつかの大きな相違点がある。第一に、正 20 面体格子を採用していることである。従来型のモデルでは極付近に格子が集中し、高解像度化の際に大きな問題となるが、正 20 面体格子の採用により全球をほぼ一様な格子間隔で覆うことが可能となっている。また、領域分割が容易であり、2000 年代以降主流となった大規模並列計算機で効率よく実行させることができる。第二に従来型のモデルは静力学平衡を仮

定した方程式（いわゆるプリミティブ方程式）を採用しているのに対して、NICAM は完全圧縮系の方程式を採用している。これにより、静水圧近似が成り立たなくなる 10km より高解像度でのシミュレーションも可能である。第三に高解像度計算に必要な精緻な物理過程を導入している。特に、雨水や雪、あられなどの水物質の時間発展を表現できる雲微物理過程が導入されており、積雲パラメタリゼーションに頼らないシミュレーションを行うことができる。

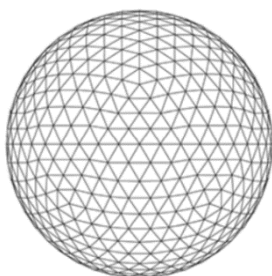


図 2 正 20 面体格子の例 (900km 格子)
(Satoh et al.2014)

3. NICAM とスーパーコンピュータ

NICAM は高解像度シミュレーションが可能のように開発されているが、高解像度シミュレーションには高速な計算機が必要となる。一般に格子間隔を半分にする、格子点数が 4 倍になり、時間刻みを半分にする必要がある、このため計算量は $4 \times 2 = 8$ 倍に増える。このため、NICAM による高解像度シミュレーションの歴史は日本のフラッグシップマシンと呼ばれるスーパーコンピュータの歴史と深く関わっている。講義ではすべての研究を紹介できないが、以下に筆者が厳選した epoch making な論文を紹介しておく。

3.1 地球シミュレータ (「京」登場まで) 時代

NICAM の開発は地球シミュレータで 3.5km 解像度でのシミュレーションを行うことを目指して 2000 年から開始された (Satoh et al. 2014)。初代地球シミュレータの運用が開始されたのは 2002 年である。数年後には 3.5km メッシュでの水惑星 (陸のない地球) 実験 (Tomita et al. 2005) や、地形を入れた実験 (Miura et al. 2007) で、赤道上を大規模雲集団が 30–90 日周期で東進する、マッデンジュリアン振動 (MJO) と呼ばれる現象を現実的に再現することに成功した。

MJO は熱帯低気圧の発生とも深く関わっていることがよく知られている (Nakazawa 1986)。Fudeyasu et al. (2008) は 7km メッシュの NICAM を用いて、2006 年の南半球冬に発生した 2 つの熱帯低気圧の発生とその後の進路を 1–2 週間前から予測できることを示した。また Oouchi et al. (2009) は 2004 年 6 月に発生した台風第 4 号の発生が 3 週間程度前から予測可能であることを示した。

14km メッシュではあるが、気候研究にも用いられた。Yamada et al. (2010) は 5 ヶ月の現在気候実

験、将来気候実験を行い、将来気候では熱帯低気圧発生数の現象、強い熱帯低気圧の増加しうることを示した。

余談であるが、この時代、筆者は NICAM グループには所属していない。ただ、学会などで NICAM を用いた研究成果を聞くたびにすごい世の中になったのだと感じ、また、自らもいつか NICAM を用いた研究を行いたいと思ったのを鮮明に覚えている。「京」コンピュータの登場とともに筆者は NICAM 研究にハマることになる。

3.2 「京」コンピュータ時代

「京」コンピュータの運用は 2012 年から開始された。これは当時の地球シミュレータより理論性能で約 80 倍速い計算機であった。豊富な計算資源の使い道は、高解像度化だけでなく、事例・アンサンブル数の増加、モデルの複雑化がありうる。

高解像度化では、グランドチャレンジとして 870m メッシュの計算が実行され、雲対流のコアが複数の格子で表現できるようになったことが示された (Miyamoto et al. 2013)。

地球シミュレータ時代は事例研究によるデモンストレーションが中心だった MJO・台風予測研究は、多くの事例やアンサンブル数の実験ができるようになり、科学的知見を得るまでに大きく進歩した。Miyakawa et al. (2014) は多くのアンサンブル実験により、1 ヶ月先まで MJO の予測が可能であることを実証した。Nakano et al. (2015) は、2004 年の多くの台風について 2 週間前から発生の予測が可能であることを示し、熱帯北西太平洋におけるモンスーントラフの予測が肝となることを示した。

モデルの複雑化という意味では 2 つの大きな進歩があった。1 つ目は海洋モデルとの結合である。Miyakawa et al. (2017) は海洋モデル COCO と結合した NICAM (NICOCO) を用いて、インドネシア付近に対流中心があった MJO によって、太平洋東部で東風が強化され、湧昇が引き起こされたことで 1997–1998 年のエルニーニョ現象の終了へとつながったことを明らかにした。2 つ目はデータ同化の実装である。局所アンサンブル変換カルマンフィルタ (LETKF) が実装され (NICAM-LETKF ; Terasaki et al. 2015)、NICAM 自身で観測データを取り込み、シミュレーション結果と融合することにより、初期値を作ることが可能となった。これはリアル空間をサイバー空間に再現する技術にほかならない。現在

JAXA において、現業的に解析予報サイクルを行うシステム NEXRA (NICAM-LETKF JAXA Research Analysis) が運用されており、Web でデータが公開されている (https://www.eorc.jaxa.jp/theme/NEXRA/index_j.htm)。

気候研究では、積分期間が地球シミュレータ時代の 5 ヶ月から 30 年へと飛躍的に伸びた(Kodama et al. 2015)。シミュレートされる台風の個数が増えたことで、同じクラスの中心気圧で比較しても、将来気候では、現在気候よりも強風半径が大きくなることが明らかになった(Yamada et al. 2017)。

3.3 富岳時代

「富岳」の運用は 2021 年 3 月から開始された。「富岳」の開発では、アプリケーションが「京」の 100 倍の速度で動作することが目標として掲げられ、その実現のためアプリケーション・ハードウェアの協調設計 (コデザイン) が実施された。「富岳」の理論性能は「京」の 44 倍しかないので、不足分はソフトウェアの改良で補う必要がある。NICAM-LETKF は 100 倍の高速化を達成するべき 9 つのターゲットアプリのうちの 1 つに選ばれ、NICAM-LETKF のデータ同化サイクルにおけるデータハンドリングの再設計(Yashiro et al. 2016)と単精度演算の利用(Nakano et al. 2018)の 2 つの大きな改良が行われた。結果、NICAM-LETKF は「富岳」実機で「京」の 127 倍高速になった(フラッグシップ 2020 プロジェクト, 2022)。Yashiro et al. (2020)は 3.5km メッシュで 1024 メンバーのアンサンブルデータ同化実験を成功させ、スパコン業界のノーベル賞とも言われる ACM ゴードン・ベル賞の 2020 年ファイナリストに選ばれた。富岳では他にも、令和元年房総半島台風の 1000 メンバーアンサンブル実験や、3.5km メッシュでの 10 年気候実験、全球 LES 実験が現在進行中である。

4. 高解像度全球気候モデリングの世界動向

近年では、NICAM と同じような、全球非静力学モデルが欧米を中心にいくつか開発されている。現在競争が激化しているのは嵐解像(storm-resolving)と呼ばれる約 3km 格子モデルによる気候実験(10 年以上)の達成である。2019 年には 10km メッシュより高解像度の 9 つのモデル (うち 8 つは 5km メッシュより高解像度である。)を用いて、2016 年 8 月

1 日からの 40 日積分を行う DYAMOND と呼ばれるモデル間相互比較実験が行われた(Stevens et al. 2019)。2016 年 8 月は北日本に相次いで台風が上陸し、甚大な被害が出た月であり、各モデルでの台風の再現性も詳細に調べられている(Judt et al. 2021)。

DYAMOND はたかだか 2 ヶ月程度の計算であるが、現在、欧米では数 km メッシュのモデルを用いた気候実験 (10 年以上) を目指す巨大プロジェクトが動いている。米国ではエネルギー省 (DOE) の E3SM (The Energy Exascale Earth System Modeling) プロジェクトが進行中である。2022 年 5 月にスパコンランキング Top500 において初の 1 ExaFlops 超えの性能を叩き出し、「富岳」を退けて 1 位で華々しくデビューした Frontier や今年中に 2ExaFlops 超えの性能で登場するとみられる Aurora において、3.25km モデルでの気候実験を実行するとみられる。また CESM(Community Earth System Model)とよばれるモデルで 3-4km メッシュを目指すプロジェクト EarthWorks も進行中である。CESM はオープンソースであることが特徴である。欧州では 3km モデルで 30 年積分を目指す NextGEMS が進行中であり、2023 年にはプロダクト実験が開始される予定になっている。

日本においては科研費学術変革領域研究 B「DNA 気候学への挑戦」において、3.5kmNICAM による気候実験が「富岳」上で進行中である。

5. 地球デジタルツイン構築への動き

前章で紹介した嵐解像全球モデルによるシミュレーションや再解析では、これまで解像度の不足のために不可能であった、地域的に詳細な、豪雨や強風といった極端気象を含む気象気候の再現や、将来予測が可能となりえる。このため、気象の研究者のみならず、気候変動に伴う適応策の検討やエネルギー・農業・防災といった様々な分野からも大きな需要がある。このようなシミュレーションデータや再解析データ、観測データを集積し、ユーザーがこれらに簡単にアクセスし、必要な解析を行うためのシステムが登場すれば、地球の過去から現在・未来に至るまでの様々なシナリオを手にとるように解析することが可能になり、例えば地球温暖化に伴う適応策も立てやすくなる。そのようなシステム、すなわち、嵐解像モデル、それを動かすスーパーコンピュータ、データを集積するデータプラットフォーム、データ

にアクセスするためのインターフェイスなどを統合したものを「地球デジタルツイン(Digital Earth)」として開発しようという動きは、世界気候計画(WCRP)が灯台活動(Lighthouse activity)の一つとして Digital Earth 構築を後押ししていることもあり、特に欧州で活発である。DestinE (Destination Earth)や DITTO (Digital Twins of the Ocean)といった超大型プロジェクトが立ち上がり研究開発が進んでいる。日本の気象気候研究コミュニティーでもこのような大きな流れは認知されており、様々な研究グループが開発してきた個々の要素技術の連携について議論が始まろうとしている。

6. まとめと展望

以上を簡単にまとめると、NICAM は当時ぶつちぎりの性能を持った地球シミュレータと開発者の血のにじむような努力により、3.5km メッシュでのシミュレーションを成功させて以来、フラッグシップマシンの更新やさまざまなモデル開発改良の努力も相まって、これまで、世界の全球高解像度シミュレーション研究を牽引してきた。しかしここに来て、欧米が NICAM に追いつき、追い越そうとしているのが現状である。「地球デジタルツイン」の開発では、日本は欧州に遅れをとっている。

今後、日本においても「地球デジタルツイン」の開発に向けて動きが活発になることが予測される。全球嵐解像シミュレーションが可能なモデルは「地球デジタルツイン」に必要不可欠な構成要素であるので、今後も NICAM やの開発改良が必要である。NICAM の開発の進歩は、今後もフラッグシップマシンの開発とともにあるであろう。折しもポスト「富岳」時代の次世代計算基盤の調査研究が始まりつつあり、筆者も参画予定である。「富岳」開発において、コデザインが功を奏したことから今後のフラッグシップマシン開発においてもコデザインが行われることが想像される。フラッグシップマシンの性能をフルに引き出すためには、気象だけでなく計算機も熟知する人材が必要である。特に若い学生さんには、計算機やモデル開発にも興味をもってもらえたら幸いである。

参考文献

Fudeyasu, H., Y. Wang, M. Satoh, T. Nasuno, H. Miura, and W. Yanase, 2008: Global cloud-

system-resolving model NICAM successfully simulated the lifecycles of two real tropical cyclones. *Geophys. Res. Lett.*, **35**, L22808.

Judt, F., and Coauthors, 2021: Tropical Cyclones in Global Storm-Resolving Models. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, **99**, 579–602.

Kodama, C., and Coauthors, 2015: A 20-Year Climatology of a NICAM AMIP-Type Simulation. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, **93**, 393–424.

Miura, H., M. Satoh, T. Nasuno, A. T. Noda, and K. Oouchi, 2007: A Madden-Julian oscillation event realistically simulated by a global cloud-resolving model. *Science*, **318**, 1763–1765.

Miyakawa, T., and Coauthors, 2014: Madden-Julian Oscillation prediction skill of a new-generation global model demonstrated using a supercomputer. *Nat. Commun.*, **5**, 3769.

Miyakawa, T., H. Yashiro, T. Suzuki, H. Tatebe, and M. Satoh, 2017: A Madden-Julian Oscillation event remotely accelerates ocean upwelling to abruptly terminate the 1997/1998 super El Niño. *Geophys. Res. Lett.*, **44**, 9489–9495.

Miyamoto, Y., Y. Kajikawa, R. Yoshida, T. Yamaura, H. Yashiro, and H. Tomita, 2013: Deep moist atmospheric convection in a subkilometer global simulation. *Geophys. Res. Lett.*, **40**, <https://doi.org/10.1002/grl.50944>.

Nakano, M., M. Sawada, T. Nasuno, and M. Satoh, 2015: Intraseasonal variability and tropical cyclogenesis in the western North Pacific simulated by a global nonhydrostatic atmospheric model. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 565–571.

—, H. Yashiro, C. Kodama, H. Tomita, M. Nakano, H. Yashiro, C. Kodama, and H. Tomita, 2018:

- Single Precision in the Dynamical Core of a Nonhydrostatic Global Atmospheric Model: Evaluation Using a Baroclinic Wave Test Case. *Mon. Weather Rev.*, MWR-D-17-0257.1.
- Nakazawa, T., 1986: Intraseasonal Variations During the of OLR FGGE in the Tropics Year. *JMSJ*, **64**, 17–34.
- Oouchi, K., A. T. Noda, M. Satoh, H. Miura, H. Tomita, T. Nasuno, and S.-I. Iga, 2009: A Simulated Preconditioning of Typhoon Genesis Controlled by a Boreal Summer Madden-Julian Oscillation Event in a Global Cloud-system-resolving Model. *SOLA*, **5**, 65–68.
- Satoh, M., and Coauthors, 2014: The Non-hydrostatic Icosahedral Atmospheric Model: description and development. *Progress in Earth and Planetary Science*, **1**, 1–32.
- Stevens, B., and Coauthors, 2019: DYAMOND: the Dynamics of the Atmospheric general circulation Modeled On Non-hydrostatic Domains. *Progress in Earth and Planetary Science*, **6**, 1–17.
- Terasaki, K., M. Sawada, and T. Miyoshi, 2015: Local Ensemble Transform Kalman Filter Experiments with the Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model NICAM. *SOLA*, **11**, 23–26.
- Tomita, H., and M. Satoh, 2004: A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. *Fluid Dyn. Res.*, **34**, 357–400.
- Tomita, H., H. Miura, S. Iga, T. Nasuno, and M. Satoh, 2005: A global cloud-resolving simulation: Preliminary results from an aqua planet experiment. *Geophys. Res. Lett.* <https://doi.org/10.1029/2005GL022459>.
- Yamada, Y., K. Oouchi, M. Satoh, H. Tomita, and W. Yanase, 2010: Projection of changes in tropical cyclone activity and cloud height due to greenhouse warming: Global cloud-system-resolving approach. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, <https://doi.org/10.1029/2010gl042518>.
- , M. Satoh, M. Sugi, C. Kodama, A. T. Noda, M. Nakano, and T. Nasuno, 2017: Response of tropical cyclone activity and structure to global warming in a high-resolution global nonhydrostatic model. *J. Clim.*, **30**, 9703–9724.
- Yashiro, H., K. Terasaki, T. Miyoshi, and H. Tomita, 2016: Performance evaluation of a throughput-aware framework for ensemble data assimilation: The case of NICAM-LETKF. *Geoscientific Model Development*, **9**, 2293–2300.
- Hisashi Yashiro, Koji Terasaki, Yuta Kawai, Shuhei Kudo, Takemasa Miyoshi, Toshiyuki Imamura, Kazuo Minami, Hikaru Inoue, Tatsuo Nishiki, Takayuki Saji, Masaki Satoh, and Hirofumi Tomita. 2020: A 1024-member ensemble data assimilation with 3.5-km mesh global weather simulations. In Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC '20). IEEE Press, Article 1, 1–10.
- フラッグシップ 2020 プロジェクト, 2022: 富岳コデザイン・レポート～フラッグシップ 2020 プロジェクト・テクニカルレポート～, pp423, <https://www.r-ccs.riken.jp/wp/wp-content/uploads/2022/03/fs2020-report-j.pdf>