

全球大気シミュレーションにおいてどこまで解像度が必要か？ ～ 「地球シミュレータ」と「京」での大規模計算から示唆されること～

富田浩文^{†1}

概要： 全球大気シミュレーションにおいて、最も不確定性の高い要素は、雲である。雲をどう表現するのかは、気象気候モデルの一つの鍵を握っている。地球シミュレータ時代に登場した全球雲解像モデルは、ある一定の成功をおさめ、現在の戦略プロジェクト分野3の研究での重要なツールとなっている。本稿では、地球シミュレータから京においての一連の研究の流れを概観するとともに、雲の表現においてモデル解像度が果たす役割について、最新の京の実験結果を踏まえて、議論する。

1. はじめに

1950年代以降、気象モデルは、日々の天気予報に広く用いられてきた。常に時代の最先端スーパーコンピュータを駆使し、傾圧不安定波（中緯度の低気圧・高気圧）対流不安定（潜熱開放に伴う浮力による上昇流）などを如何に精度よく計算するかが一つの目標であった。天気予報モデルは、原理的には、積分期間を延長することで気候モデルとしても機能する。古くは真鍋淑郎氏の先駆的な気候モデル研究から始まり、現在まで脈々と続けられている。特に近年は、将来気候の予測をモデル計算で評価することが社会的な要請として各国のモデル計算がスパコン上で計算され、IPCCの報告書もその結果を踏まえたものとなっている。

古今東西、気象・気候学者が最も頭を悩ませている問題の一つが雲の表現方法である。短期間予報の気象では、雲は時として大雨を降らすので、雲表現の精緻化は、至上課題であることは言うまでもない。また、長期間の気候問題では、雲は、太陽・地球放射、大気中に漂うエアロゾルなどと相互作用の果て、雲分布が決まることになり、これが地球の熱収支に大きく寄与するため、正確な気候変動予測をおこなうためには、やはり雲表現の精緻化を避けて通るわけにはいかない。

2. 雲を正確に表現するためには

雲の水平スケールは、入道雲のような背の高い雲で高々10 km程度、大気境界層上部での比較的背の低い雲では、数100m程度である。2000年ぐらいまでは、モデルの解像度がこれよりもずっと粗く、雲を直接表現あるいは解像するというようなことは夢物語とされていた。このため、雲の効果は、経験的あるいは思考実験に基づくある種の仮定に基づいたパラメータ化を行い、その効果を取り入れてきた（例えば、Arakawa & Shubert 1974）。このパラメータ化が、天気予報・気候変動予測は、大きな不確定要素になっている。ところが、地球シミュレータの登場により、その圧倒的な計算能力・メモリ量により、パラメータ化ではなく、

解像度を飛躍的に高めた一つ一つの雲を表現するモデルが登場した[2,3]。計算手法もこれまでの方法から一変した[4-6]。静力学平衡を仮定したスペクトルモデルから、より原理的な方程式（静水圧仮定からの脱却）を用い、解像度を高めたときに効率よく計算できるスキームが開発された。そのひとつが、全球雲解像モデル NICAM である。

全球雲解像モデルの登場は、世界的に見てもセンセーショナルであった。2005年、世界初の全球雲解像実験[7]を皮切りに、NICAM を使った我々の研究グループは、次々と成果を出し続けてきた。雲の生成消滅を原理に基づく計算が評価されてきたものの、一方で、当時の最高解像度は、格子間隔 3.5 km であり、世界の気象・気候研究者からは、解像度がまだ十分でない、本当の意味での雲解像とは言えないとの批判・指摘も受けてきた。我々の主張は、3.5 km や 7 km の解像度でも、雲の原理的な生成消滅を陽に表現しているモデルは、たとえ一つ一つの雲表現の解像度が足りなくても、メソスケール雲擾乱（水平スケール数 10 km）は、定量的にも表現でき、その結果、従来型の大気モデルでは限界である大規模に組織化した雲擾乱の再現が可能になるというものである。2007年には、マッデンジュリアン振動の再現によって、そのことを証明する結果となった[8]。

3. 京の登場による飛躍的な進展

2011年、京の共用開始が始まり、HPCI 戦略分野3では、これらの地球シミュレータでの成功を受けて、もっと多くの実験を行うことによって統計的な評価を行うことが始まっている。一方で、「水平格子 3.5 km 計算でも積乱雲の真の直接的表現は定量的には解像度不足である」という批判への回答を与えるべく、より解像度の高い計算を行い、積雲対流の統計的性質が解像度によってどのように変わっていくか？あるいは、収束傾向を見せるか？という観点からの計算を行った。この問題は、気象気候計算のコミュニティの中で grey zone problem として、未だ解決されていない問題である。我々は、「京」の4分の1からほぼ全系を使って、この問題にトライした。最高解像度は、ついに水平格子 1 km を切り（約 870 m）鉛直層数もこれまでの倍の 100 層にまで上げ、積雲対流の統計的性質（数、上昇流コアの

^{†1} (独)理化学研究所計算科学研究機構 / (独)海洋研究開発機構 (兼務)

表現、積雲対流間の距離)を綿密に調べた(図1)。ここでは、その結果だけにとどめるが、2 kmの解像度以下では、これらの表現が劇的に改善され、収束傾向にあることが分かった[9]。実は、水平格子 870mの計算でもまだ完全な収束は見せていない。しかしながら、この grey zone problem の解決へ確実に一歩前進したと言える結果である。

このような計算は、「京」を駆使しなければなしえない研究であったが、それでも計算を遂行する上で様々な困難に直面した。まず、NICAM は、もともとベクトルコンピュータ上で最適化されており、スカラー計算機である京で最適化し効率を上げることに大きなエフォートを割いた。さらに実際に実行する段階では、どのように領域をマッピングすればよいか、かつてない大規模並列において I/O の改善も大きなテーマであった。現在、最高解像度においては、全系を使って、1日積分するのに、約1日かかっている。また、気象気候計算特有の問題であるが、大量の出力をそのあと解析することになり、この解析時間を以下に短くするかも実際上成果へのスループットを上げるためには重要で、解析プログラム自体を並列化し、京で行うなどして、ようやく求める解析結果を得る。

4. 今後の課題と計算機

上記のように、京では、実質上 870m 格子間隔のランが限界であるが、今後のスパコンでは更に解像度を上げることが必要であることが分かった。では、どこまで上げればよいか? 本当に収束する解像度はどこか? これを更に原理的な方法で行うことが一つの課題であるが、現在、全球雲解像モデルのプロダクトランと並行して、領域高解像度モデルの開発を行っており、このモデルを使って、ある気象環境場での統計的性質の収束性を検証することを考えている。これらを明らかにすることで、全球モデルへフィードバックすることができる。

解像度は、やはり必要である。上記は、積雲対流に関する研究であるが、気候学的には、もう少しマイルドな雲、背の浅い雲、層積雲を再現することも重要であると考えられる。層積雲は、積乱雲よりも更に小さなスケールの雲であり、これを再現するには、更に高度な手法と計算機能力が必要になってくる。ここで言う高度な手法とは、より原理的な流体計算、Large Eddy Simulation(LES)であり、地球シミュレータ時代に計算手法として大きく質的な変化で前進したように、我々が次に期待する手法である。ただし、現在の LES は湿潤大気(相変化を伴う系)へ直接応用するには未だ問題点が多く、今後の解決するべき難問であることは間違いない。同時に、それを検証するためには、京よりもっと能力の高い計算機が必要になってくる。今後の計算機に期待するが、これまでのような計算機の発展だけに依存するのでは限界があり、アプリケーション側も積極的に計算機開発へ参入し、計算機科学者との協調設計が鍵

である。このような研究はすでに理化学研究所計算科学研究機構で始まっている[10]。

なお、本稿は、気象気候モデルの要件の一つ、解像度に焦点を当てたが、同時に、雲や放射など物理過程モデルの精緻化も並行して進めていく問題であり、また、それらを何本も走らせて初めて真の成果が得られるものであることは忘れてはならない。どの分野でも、これまでもよく議論されてきた capable computing か capacity computing かという取捨選択論はナンセンスであり、どちらもバランスよく計算を行うことが、真の科学的成果を得るために重要であるということ強調しておきたい。

参考文献

- 1) Arakawa, A. and Schubert, H.: Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment. Part I, J. Atmos. Sci., 31, 671-701(1974)
- 2) Tomita, H., M. Satoh, H. Miura and Y. Niwa: Current status of nonhydrostatic modeling at NICAM, ECMWF Workshop on Non-hydrostatic Modelling, page 171-182, ECMWF, (2011)
- 3) Satoh, M., Matsuno, H., Tomita, H., Miura, H., Nasuno, T., and Iga, S.: Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model(NICAM) for global cloud resolving simulations, J. Comput. Phys., 227, 3486-3514(2008)
- 4) Tomita, H., Tsugawa, M., Satoh, M., Goto, K. : Shallow water model on a modified icosahedral geodesic grid by using spring dynamics. J. Comp. Phys., 174, 579-613(2001)
- 5) Satoh, M. (2003) : Conservative scheme for a compressible nonhydrostatic model with moist processes. Mon. Wea. Rev., 131, 1033-1050
- 6) Tomita, H. and Satoh, M. (2004) : A new dynamical framework of nonhydrostatic global model using the icosahedral grid. Fluid Dyn. Res., 34, 357-400.
- 7) Tomita, H., Miura, H., Iga, S., Nasuno, T., and Satoh, M.: A global cloud-resolving simulation: preliminary results from an aqua planet experiment. Geophys. Res. Lett., vol.32, L08805 (2005)
- 8) Miura, H., Satoh, M., Nasuno, T., Noda, A. T., Oouchi, K. : A Madden-Julian Oscillation event simulated using a global cloud-resolving model. Science, 318, 1763-1765(2007)
- 9) Miyamoto, Y., Kajikawa, Y., Yoshida, R., Yamaura, T., Yashiro, H., Tomita, H. : Deep moist atmospheric convection in a subkilometer global simulation, Geophys. Res. Lett. Vo.40, 4922-4926(2018)
- 10) SCALE project : <http://scale.aics.riken.jp/index.html>

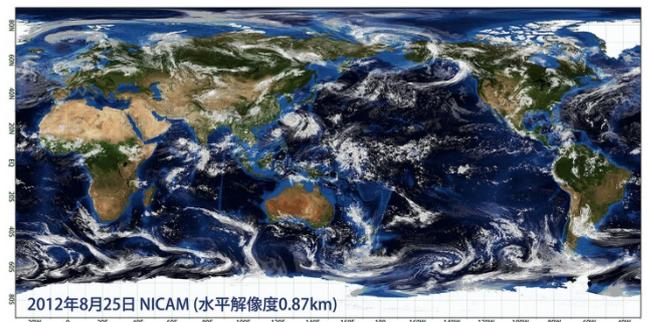


図1 . 再現された 1 km 格子全球大気雲の分布