

「マルチスケール・マルチフィジックス現象の統合シミュレーション」
平成 17 年度採択研究代表者

佐藤 正樹

(独) 海洋研究開発機構地球環境フロンティア研究センター サブリーダー

全球雲解像大気モデルの熱帯気象予測への実利用化に関する研究

1. 研究実施の概要

本研究では、「全球雲解像モデル」NICAMを気象予測に実利用化するための問題点を明らかにし、その課題の解決を目的とする。特に、熱帯・モンスーン域の積雲が活発な領域の気象予測の妥当性を調べる。そのために、全球雲解像モデル実験を行い、シミュレーション結果の検証のために観測データとの比較を行う。熱帯気象予測の観点からは、季節内変動と台風の発生過程の予測は、従来モデルにおける弱い点であり、全球雲解像モデルによる再現精度の向上が大いに期待される。これまでの研究において、全球雲解像モデルにより、マッデンジュリアン振動 (Madden Julian Oscillation : MJO) とよばれる熱帯の巨大雲集団のマルチスケール構造を世界で初めてシミュレートすることができた。

平成 20 年度は、MJO シミュレーションの定量的な評価と、台風の発生など具体的ターゲットに向けた全球雲解像実験を行った。実験結果の解析によると、MJO などの大規模熱帯擾乱が 2 週間以上にわたり予測可能性が高かったことがわかった。また、MJO を起源とした熱帯低気圧 (台風) の発生を 2 週間以前に予測可能であったことを示した。この結果は AGU Journal Highlight に掲載された。また、2006 年にフィリピンで大規模な土砂災害を引き起こした台風 21 号、ミャンマーに甚大な被害をもたらした 2008 年 4-5 月のミャンマーサイクロンなどさまざまな熱帯低気圧の発生事例実験に取り組んだ。

また、平成 20 年度は、領域版 NICAM を現実的な条件下で稼働させることに成功し、これによりモデルの開発改良を効率化することが可能になった^{7,8,25)}。さらに、NICAM に適用する初期値を向上させる取り組みや衛星データ検証などを進め、モデルのバイアスを低減することを試みた^{10, 11, 12, 16, 17, 22, 23)}。将来のペタフロップスマシーンに向けた準備を開始した。

2. 研究実施内容 (文中にある参照番号は 4.(1)に対応する)

2.1 マッデンジュリアン振動 (MJO) の予測実験

本研究では、全球雲解像モデル NICAM の熱帯気象予測への実利用化を目指して、熱帯域季節内振動（以下、MJO）の予測可能性評価に取り組んでいる¹⁻⁵⁾。従来型の大気大循環モデルの弱点である雲降水システムの日周期から季節内変動を全球雲解像モデルによっていかに向上させるかが課題である^{6, 14, 18, 19, 20, 24)}。MJO は熱帯大気中の季節内の時間スケールにおいて最も卓越する変動であり、30 日から 60 日の周期で熱帯を東向きに伝播する対流偏差と、それに関連する循環偏差とで特徴づけられる。MJO は、日本を含む中高緯度域の大気循環にも大きな影響を与えるため、その予測可能性を正しく評価することは重要である。我々のグループでは昨年度、世界ではじめて現実的な設定のもとで MJO の再現に成功した (Miura et al., 2007)。本年度はこの実験結果の詳細な解析を進めるとともに^{11,12,15,21)}、(1) WMO/CBS 全球モデル国際比較の規格に準じた予報誤差評価、(2) 熱帯域季節内振動の振幅と位相の予測可能性評価、を実施した。図 1 は 3.5 km 格子実験の結果を用いた風速ベクトルの大きさの 5 日後の予報誤差の評価である。図 1 から明らかのように、風（風速ベクトル）は、対流圏下層の熱帯域で良く再現できていることがわかる。この特徴は、解像度を変えた実験や他の物理量でも変わらなかった。各国の現業の気象機関で用いられている全球モデルとの誤差の差は、熱帯域では 3 m/s 以内に収まっている（図省略）。図 2 は、MJO 再現実験で得られた MJO の振幅の時系列である。図 2 が示すように NICAM で再現された MJO の振幅の極大日の観測との誤差は、1 日（2 日）以内に収まっていることがわかる。日々の位相伝播の再現性も定量的に良いことも明らかとなった（図は示さない）。今後は、予報誤差の季節依存性の検討や複数の初期値を用いたアンサンブル実験による予測可能性評価を実施予定である。

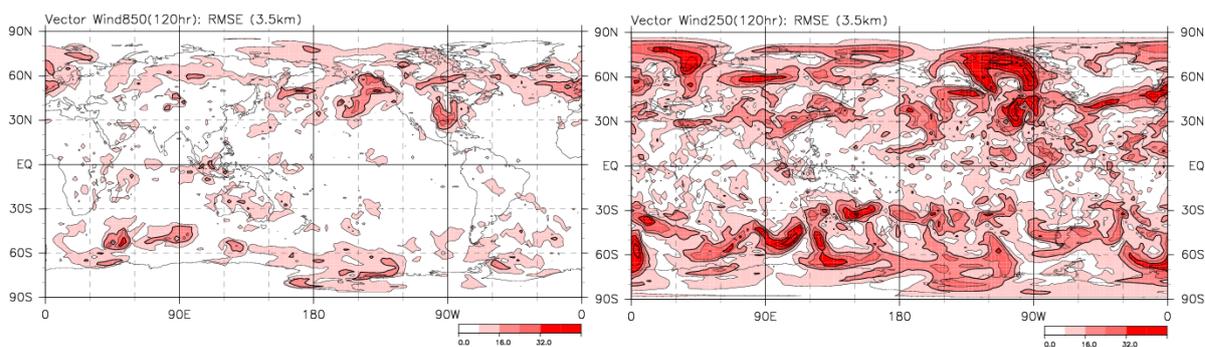


図 1. 3.5km メッシュ全球雲解像モデルによる MJO 再現実験で得られた風速ベクトルの大きさの予報誤差評価（5 日後）。（左）対流圏下層（850 hPa）、（右）対流圏上層（250 hPa）の結果を示す。値が大きいくほど、観測値と比較した誤差が大きい。

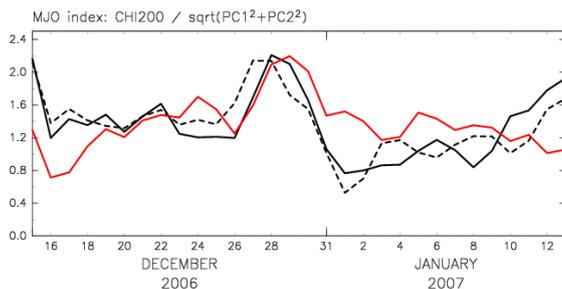


図 2. MJO の振幅の時系列の比較。赤実線、黒実線、黒点線はそれぞれ、NCEP 再解析データ、NICAM 7km 格子データ、NICAM 14km 格子データから計算した MJO の振幅を示す。

2.2 台風の発生予測実験

本研究では NICAM を用いた熱帯低気圧(台風・ハリケーンの総称;以下では熱低と略す)の発生過程のシミュレーションに取り組んできた⁹⁾。熱低は初期にある程度の強さの渦が形成されると、積雲対流の加熱や海面からの水蒸気供給による正フィードバック機構がはたらき、自己励起的に発達することが知られている。もし初期の渦が形成されるまでの発生過程をシミュレーションで予報することができれば、熱低の早期警戒につながり、防災的観点からも重要な取り組みである。しかしながら、熱低の発生シミュレーションは、モデル技術や初期値の不確定性などの問題を伴うため、難しい課題である。本研究では全球雲システム解像モデルを用いることにより、従来の問題点であったモデル領域と解像度の制約を取り除いたシミュレーションを試みた。台風発生のシミュレーションは事例によっては1日前からでも難しい場合があるが、2006年にフィリピンで甚大な土砂災害を引き起こした台風21号の発生シミュレーションでは、台風の発生を3日以上前からとらえることができた(図3)。このシミュレーションでは発生前の雲クラスター(複数の雲の集団)が台風へと組織化する様子も再現された(図4)。また、数千 km もの距離を伝播して台風の発生や急発達に影響する熱帯波動を表現できていることがわかり、3日以上前からの発生予測につながったことが確かめられた。このように、全球雲解像モデルが熱低発生シミュレーションに有用であることが示された。

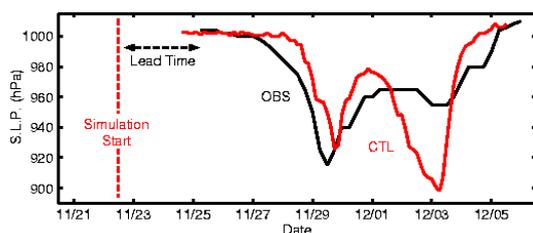


図3. 台風21号の中心気圧; 観測(黒線)とNICAMシミュレーション(赤線)。シミュレーション開始の11月22日から3日ほど何も低圧部の無い状態が続き、11月25日頃から台風が発生する様子が再現された。

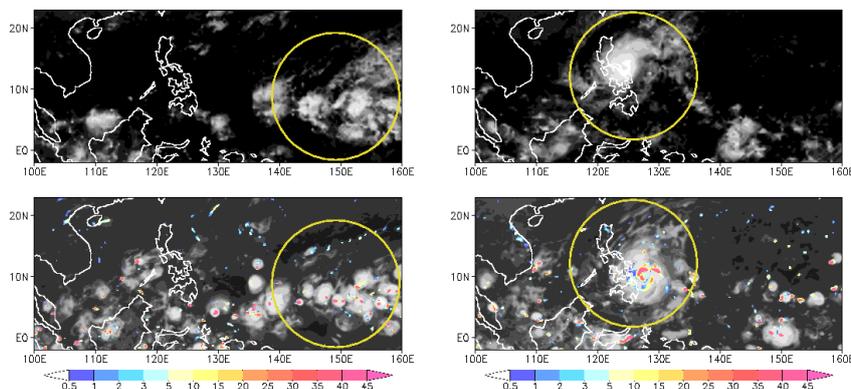


図4. 台風21号に伴う雲パターン。上段は衛星観測の赤外画像、下段はNICAMの外向き長波放射。左は11月24日の台風発生前の雲クラスター、右は11月30日にフィリピンを通過する台風21号。

2.3 ペタフロップスマシンへ向けた準備

NICAM はベクトル計算機である地球シミュレータ上で開発されてきたため、ベクトル計算機向けに最適化されている¹³⁾。しかし近年の大型並列計算機はスカラ計算機が主流となっており、NICAM をスカラマシンでも効率よく稼働させることが課題である。次世代ペタフロップスマシン上で効率よく積分を実施するためには、NICAM のスカラ計算

機上での演算性能や改良点を把握する必要がある。本年度は既存の T2K（東京大学、筑波大学）の超並列スカラ計算機を用いて演算性能の評価を実施した。その結果、現状では地球シミュレータではピーク性能比率が 40%で運用されているのに対して、スカラ計算機ではピーク性能比率は 4~0.4%であることがわかった。特に、プロセス数が増加するとピーク性能比の向上が阻害される傾向がみられる。プロセス数を増加させた場合の課題点として小規模なプロセス間の通信の増加によるオーバーヘッドの増加があげられる。現状の NICAM で地球シミュレータと同程度の計算時間で積分を実施するには簡単な見積もりで 10~100 倍の計算機資源が必要となることを意味する。今後、スカラ計算機向けの最適化を実施する必要があるだろう。

3. 研究実施体制

(1) A 雲解像モデリング・データ解析グループ

① 研究分担グループ長:佐藤 正樹(海洋研究開発機構、サブリーダー)

② 研究項目

- ・総括
- ・全球雲解像モデリング
- ・領域雲解像モデリング
- ・大気大循環モデリング
- ・データ解析

(2) 大気大循環モデリング・データ解析グループ

① 研究分担グループ長:中島 映至(東京大学気候システム研究センター、センター長/教授)

② 研究項目

- ・大気大循環モデリング
- ・データ解析

(3) データ解析グループ

① 研究分担グループ長:中澤 哲夫(気象庁気象研究所、室長)

② 研究項目

- ・データ解析

4. 研究成果の発表等

(1) 論文発表 (原著論文)

1. Satoh, M. (2008) Numerical simulations of heavy rainfalls by a global cloud-resolving model. J. Disaster Research, 3, 33-38.
2. Satoh, M., T. Nasuno, H. Miura, H. Tomita, S. Iga, Y. Takayabu (2008) Precipitation statistics comparison between global cloud resolving simulation with NICAM and TRMM

- PR data. High Resolution Numerical Modelling of the Atmosphere and Ocean, edited by Wataru Ohfuchi and Kevin Hamilton, 99-112, ISBN-13: 978-0387366715, 293pp.
3. Satoh, M., T. Matsuno, T. H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno, S. Iga, (2008) Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *Journal of Computational Physics*, the special issue on Predicting Weather, Climate and Extreme events, 227, 3486-3514, doi:10.1016/j.jcp.2007.02.006.
 4. Nasuno, T., 2008: Equatorial mean zonal wind in a global nonhydrostatic aquaplanet experiment. *J. Meteor. Soc. Japan*, 68A, 219-236.
 5. Mapes, B., S. Tulich, T. Nasuno, and M. Satoh, 2008: Predictability aspects of global aqua-planet simulations with explicit convection. *J. Meteor. Soc. Japan*, 68A, 175-185.
 6. Sato, T., T. Yoshikane, M. Satoh, H. Miura, and H. Fujinami, 2008: Resolution dependency of the diurnal cycle of convective clouds over the Tibetan Plateau in a mesoscale model. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86A, 17-31.
 7. H. Tomita, 2008a: A stretched icosahedral grid by a new grid transformation. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 86A, 107-119.
 8. H. Tomita, 2008b: New microphysics with five and six categories with diagnostic generation of cloud ice. *J. Meteorol. Soc. Japan*, 86A, 121-142.
 9. Fudeyasu, H., Wang, Y., Satoh, M., Nasuno, T., Miura, H., Yanase, W., 2008: The Global Cloud-Resolving Model NICAM Successfully Simulated the Lifecycles of Two Real Tropical Cyclones. *Geophys. Research Lett.*, 35, L22808, doi:10.1029/2008GL036003.
 10. Suzuki, K., Nakajima, T., Satoh, M., Tomita, H., Takemura, T., Nakajima, T. Y., and Stephens, G. L., 2008: Global cloud-resolving simulation of aerosol effect on warm clouds. *Geophys. Res. Letters*, 35, L19817, doi:10.1029/2008GL035449.
 11. Masunaga, H., Satoh, M., Miura, H., 2008: A Joint Satellite and Global CRM Analysis of an MJO event: Model Diagnosis. *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2008JD009986, 113, D17210.
 12. Inoue, T., M. Satoh, H. Miura, B. Mapes, 2008: Characteristics of cloud size of deep convection simulated by a global cloud resolving model. *J. Meteor. Soc. Japan*, 86A, 1-16.
 13. Tomita, H., Goto, K., Satoh, M., 2008: A new approach of atmospheric general circulation model - Global cloud resolving model NICAM and its computational performance -. *SIAM J. Sci. Comput.*, 30, 2755-2776; DOI. 10.1137/070692273.
 14. Nasuno, T., Tomita, H., Iga, S., Miura, H., Satoh, M., 2008: Convectively coupled equatorial waves simulated by a global nonhydrostatic experiment on an aqua planet. *J. Atmos. Sci.*, 65, 1246-1265.
 15. Miura, H., M. Satoh, T. Nasuno, A.T. Noda, and K. Oouchi, 2008: Response to the comment by "K.R. Sperber, J.M. Slingo, D.E. Waliser, P.M. Inness, 2008: Coarse-Resolution Models Only Partly Cloudy" *Science*, 320 (5876), 613.
 16. Patra, P. K., R. M. Law, W. Peters, C. Rodenbeck, M. Takigawa, C. Aulagnier, I. Baker, D. J. Bergmann, P. Bousquet, J. Brandt, L. Bruhwiler, P. J. Cameron-Smith, J. H. Christensen, F. Delage, A. S. Denning, S. Fan, C. Geels, S. Houweling, R. Imasu, U. Karstens, S. R.

- Kawa, J. Kleist, M. C. Krol, S.-J. Lin, R. Lokupitiya, T. Maki, S. Maksyutov, Y. Niwa, R. Onishi, N. Parazoo, G. Pieterse, L. Rivier, M. Satoh, S. Serrar, S. Taguchi, R. Vautard, A. T. Vermeulen, Z. Zhu., 2008: TransCom model simulations of hourly atmospheric CO₂: Analysis of synoptic-scale variations for the period 2002-2003. *Global Biogeochem. Cycles*, 22, GB4013, doi:10.1029/2007GB003081.
17. Collins, W. D., Satoh, M., 2008: Simulating Global Clouds, Past, Present, and Future. in Heintzenberg, J., and R. J. Charlson, eds. 2008. /Clouds in the Perturbed Climate System: Their Relationship to Energy Balance, Atmospheric Dynamics, and Precipitation/. Struengmann Forum Report, vol. 2. Cambridge, MA: The MIT Press, Chap 20, pp.469-486.
 18. Wu, P., M. D. Yamanaka, J. Matsumoto, 2008: The formation of nocturnal rainfall offshore from convection over western Kalimantan (Borneo) Island, *J. Meteor. Soc. Japan*, **86A**, 187-203.
 19. Wu, P., S. Mori, J.-I. Hamada, M. D. Yamanaka, J. Matsumoto, F. Kimura, 2008: Diurnal variation of rainfall and precipitable water over Siberut Island off the western coast of Sumatera Island, *SOLA*, **4**, 125-128, doi: 10.2151/sora.2008-32.
 20. Wu, P., J.-I. Hamada, M. D. Yamanaka, J. Matsumoto (2009), The Impact of Orographically-Induced Gravity Waves on the Diurnal Cycle of Rainfall over Southeast Kalimantan Island, *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, **2**, 35-39.
 21. Nasuno, T., Miura, H., Satoh, M., Noda, A. T., Oouchi, K., 2009: Multi-scale organization of convection in a global numerical simulation of the December 2006 MJO event using explicit moist processes. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87, 335-345.

未発行論文 ("accepted"、"in press"等)

22. Inoue, T., D. Vila, K. Rajendran, A. Hamada, X. Wu, and L. Machado, 2009: Life cycle of deep convective systems over the eastern tropical Pacific observed by TRMM and GOES-W. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87A, in press.
23. Ushio, T., K., Sasashige, T. Kubota, S. Shige, K. Okamoto, K. Aonashi, T. Inoue, N. Takahashi, T. Iguchi, M. Kachi, R. Oki, T. Morimoto, and Z. Kawasaki, 2009: A Kalman filter approach to the global satellite mapping of precipitation (GSMaP) from combined passive microwave and infrared radiometric data. *J. Meteor. Soc. Japan*, 87A, in press.
24. Wu, P., M. Hara, J.-I. Hamada, M. D. Yamanaka and F. Kimura (2009): Why a large amount of rain falls over the sea in the vicinity of western Sumatra Island during nighttime. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, in press.
25. Satoh, M., Matsuda, Y., 2009: Statistics on high-cloud areas and their sensitivities to cloud microphysics using single-cloud experiments. *J. Atmos. Sci.*, accepted.

(2) 特許出願

平成 20 年度 国内特許出願件数 : 0 件 (CREST 研究期間累積件数 : 0 件)

(3) その他

気象集誌特別号の発行 Journal of the Meteorological Society of Japan, "Special issue on the international workshop on high-resolution and cloud modeling, 2006". Volume 86A, 2008, pp.236, edited by M.Satoh and B.Stevens (Co-Chief-editor).