

「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 地球環境変動領域・チームリーダー

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、従来の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。

気候・気象モデリングのコミュニティーでは、より正確な気候・気象現象を予測するために、大気モデルと海洋モデルとの高解像結合モデリング、地球システムモデルとしての統合化を進めている。現実に利用可能な計算資源のもとでは、高解像度で複雑なモデルほど可能な積分時間が短くなり、具体的な目的に応じて解像度と積分時間の組み合わせが決められる。当該 CREST では、現有資源のもとで全球雲解像モデルと海洋モデルとのフル結合モデルによる実験を行ったとしても投資に見合った結果は得られないとの判断から、超高解像の全球大気モデルにターゲットをしばった研究を進めている。特に、物理過程の改善、熱帯擾乱の再現性・予測可能性の向上に焦点をあてている。もちろん、本グループでは、将来を見越して海洋等の他グループとの連携を進めており、大気海洋結合モデルの開発の準備を進めているが、当該 CREST 内の研究の中では具体的な計画として実施することは予定していない。

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)とよばれる大規模熱帯擾乱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、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ることを示した。平成21年度は、甚大な被害をもたらした熱帯低気圧Nargis(ミャンマー、2008年5月)の

Fengshen(フィリピン, 2008年6月)の再現実験を行い、季節内変動と熱帯低気圧の予測可能性について研究を進めた。また、次世代スーパーコンピュータに向けた準備を進めた。

§ 2. 研究実施体制

(1)「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((独)海洋研究開発機構、チームリーダー)

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

§ 3. 研究実施内容

(文中に番号がある場合は(4-1)に対応する)

3-1 まとめ

平成 21 年度は、MJO と台風の発生の関係について着目し、全球雲解像実験における再現性について解析を進めた。特に、全球雲解像モデル実験のマルチスケール相互作用の解析を行うとともに^{3,6,7,8,10,24}、日変化から季節内変動までの時間変動の解析^{2,4,5,23,26}、より適切な事例実験を行うための初期値の検討や^{15,16}、さまざまな事例についての台風発生の再現実験を行った。全球雲解像モデルの物理過程(雲物理過程、境界層過程等)の改良を進め^{1,9,11,12,22,25,27}、人工衛星観測データを利用したモデルの検証を行った^{13,14,17,21}。また、次世代コンピュータを念頭においた全球雲解像モデルの性能測定および改良を行った。

3-2 熱帯低気圧の発生過程のシミュレーション

本研究ではNICAMを用いた熱帯低気圧(台風・ハリケーン・サイクロンの総称)の発生過程のシミュレーションに取り組んできた。熱帯低気圧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。初期の渦が形成した後の発達過程のシミュレーションは比較的実現しやすく、現業の気象機関でも強度や経路の予報がなされているが、初期の渦そのものが形成する発生過程のシミュレーションは初期場の不確定性などの問題を伴うために難しい課題である。しかしながら、もし初期の渦が形成されるまでの発生過程の理解が進んで予報精度が上がれば、熱帯低気圧のより早期の警戒につながるので防災面での重要性も高い。我々は気象庁気象研究所の台風予報研究^{18-20, 27-28}の結果をふまえ、NICAMでの台風シミュレーションの改善をめざしている。

本年度の研究では2008年6月にフィリピン沖でフェリーの沈没事故を引き起こした台風Fengshenに対し、格子間隔7kmの領域シミュレーションを行った。この事例はPALAU2008という集中観測でもとらえられており、観測との比較という点でも適当な事例である。まず様々な初期時刻やデータセットを試し、台風発生(2008年6月19日00TC)の3日前の初期時刻を用いた実験で台風の発生が再現できていることを確認した。台風の発生前(15日)には数十~百kmの対流システムが散在しているのに対し(図1a)、台風発生後(19日)には台風中心に積雲対流が組織化している(図1d)。接線方向の循環の動径高度分布では、発生前は大きなスケールで弱い反時計回りの循環があるのに対し(図1b)、発達後は半径50kmにピークを持つ強い下層の循環が示された(図1e)。また、動径方向の循環は発生前には不明瞭であるのに対し(図1c)、発生後にはエクマン層の力学により下層1km以下に中心へ向かう強い流れが存在している(図1f)。台風の発生後に見られた構造は台風の発達メカニズムと整合的であるのに対し、台風の発生前は循環が弱く異なるメカニズムによって渦が形成すると考えられる。詳細な解析により、積雲対流の集団的な効果が渦の強化に貢献していることが確認された(図略)。今後は、より解像度の高い3.5km格子のシミュレ

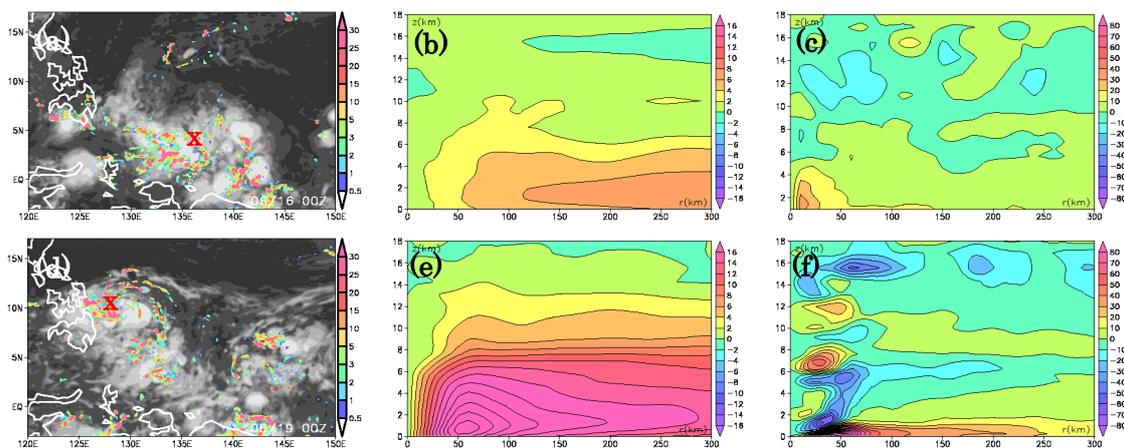


図1 NICAMで再現された台風Fengshenの発生前(上段;16日0000UTC)と後(下段;19日0000UTC)の構造。(a),(d) 雲(グレー)と降水(カラー)の水平分布。×印は擾乱の中心位置。(b),(e) 接線方向の風の動径高度分布。(c),(f) 動径方向の風の動径高度分布(中心へ向かう風が正)。

ーションを行い、積雲対流の組織化のメカニズムをより詳細に調べる。

3-3 熱帯低気圧の発生過程とモンスーンオンセット、熱帯域季節内振動のシミュレーション

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^{2,3,4,5,6,7,20}。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モンスーンオンセットや MJO といった季節内周期の時間スケール変動の予測可能性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。モンスーンオンセットや MJO 通過に伴い生成される対流/循環偏差は、初期渦の生成を介して熱帯低気圧(サイクロン/台風)の発生に関与する可能性が従来から指摘されている。サイクロン/台風の発生予測は、災害の早期警戒だけでなく日本を含む中高緯度域の大気循環場の予測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。今年度は、これらモンスーンオンセットや MJO の予測可能性が熱帯低気圧発生予測可能性に与える影響を調査するため、2008年4月27日にベンガル湾で発生し甚大な被害をもたらしたサイクロン Nargis を対象として、サイクロン発生初期値アンサンブルシミュレーションを実施した。Nargis 発生4日前以降の4/23, 24, 25, 26, 27 を初期値(初期日)とする計算では、いずれの場合でもベンガル湾でサイクロンが発生し、Nargis と同様に東よりの進路(図2)、構造(図3)がよく再現された。これらのサイクロンは下層西風域の北進(モンスーンオンセットに伴う現象)に伴って発生しており(図4)、MJO 通過に伴う下層西風強風域の発生後の初期渦の生成/発達によるサイクロン生成、といった観測データで得られる一連のシナリオをモデル内でも再現することが出来た。ところが、MJO のシグナル、下層西風域の北進の再現性が悪い例(初期値4月10日)では、サイクロンを再現することが出来なかった。このことは、Nargis 発生再現には MJO やモンスーンオンセットの予測可能性の向上が重要であったことを示唆している。

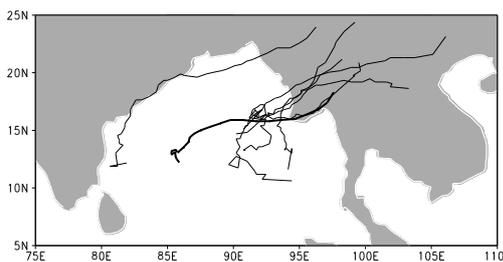


図2. サイクロン Nargis のベストトラック(太線)とモデル内で発生したサイクロンのトラック(細線).

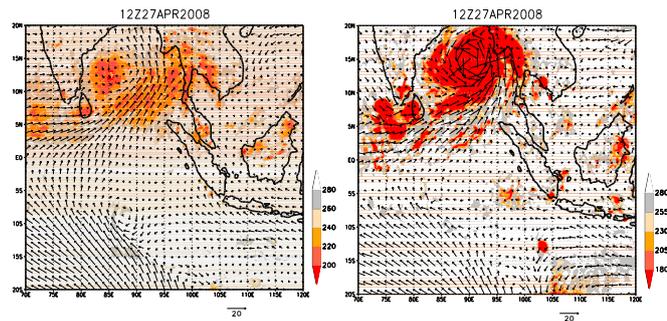


図3. 2008/4/27/12UTC の海拔 10m の地表面風(ベクトル, m/s)と OLR(右陰影, W/m^2), 放射輝度温度(左陰影, K)の水平分布. 左図は観測, 右図は NICAM によるアンサンブル実験結果の一例である。

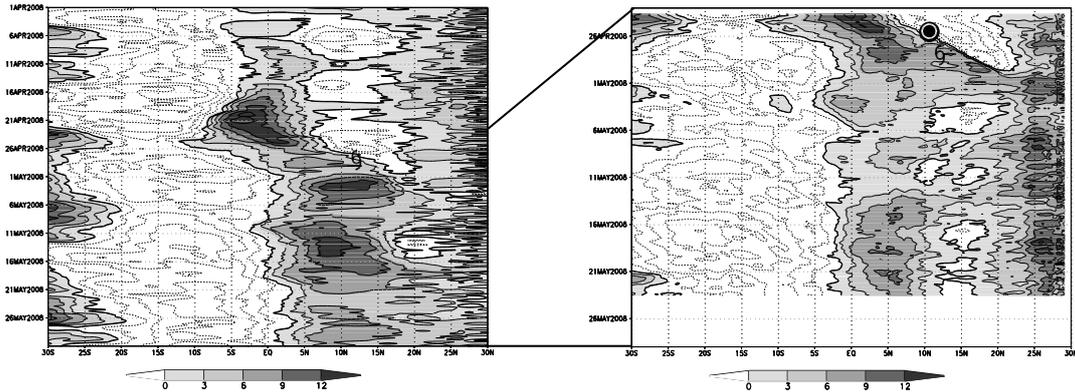


図4. 80E-100E の領域で東西平均した 850-hPa 東西風 (m/s) の時間発展. (左図) JMA/JCDAS (再解析データ, 4/1-5/31), (右図) 4月23日を初期値とする NICAM の結果(4/23-5/23). 台風記号はサイクロン Nargis の発生した場所と時間を示す. ⊙の記号は, モデル内で発生したサイクロンの場所と時間を示す.

3-4 次世代スパコンへの準備

昨年度から、2012年稼働予定の次世代スーパーコンピュータへの準備を始めているが、今年度は、複数のスカラー機でNICAMのデフォルトコードのパフォーマンスを調べた。7km格子モデルについて、筑波大学のT2Kシステムでの実効パフォーマンスは3.3%であった(2560コア使用時)。同様の問題規模で米国COLAとの協力の下、Cray XT4での実行パフォーマンスを調べたところ2.9%であった。これらはいずれもプロセッサにAMD Opteronを使ったもので、Byte/Flops値(以下BF値)が0.3程度である。一方、問題規模は異なるが、最近のPCで使われる最新のIntel Core i7でパフォーマンスを測定したところ、6%程度のパフォーマンスを得た。この、スカラー機として高いパフォーマンスは、BF値が0.45と高いことに起因しているものと考えられる。また、日本IBMとの協力により、BlueGene/Pでも測定を行った。このマシンはBF値が1.0で、格子モデルを扱う上では、非常にバランスの取れたマシンであるが、6.5%程度までしか伸びなかった。ひとつの原因にうまくSIMD(Single Instruction Multi Data)が使われていないことが上げられる。そこで、一部のSIMD化を図った最適化コード(力学過程でメインルーチンとなる発散計算部分)で見積もったところ、11%程度の高いパフォーマンスが得られることが分かった。以上のことから考察すると、次世代スパコンに搭載されるFujitsu SPARC64 VIIIfxでのBF値が0.5であることから、何もチューニングしない状態でも5%程度のパフォーマンスは確保できるものと思われる。更なるパフォーマンス向上のためには、キャッシュの有効利用が必要であるが、現在、理化学研究所と協力して、チューニング作業に入り始めている。このチューニングにより、次世代スパコンに搭載されるCPUに類似性の高いCPUで、上記の力学過程メインルーチンで10%以上の性能が得られることが分かった。これらのノウハウの蓄積により、来年度からは本格的に次世代スパコンへのチューニング作業に入る見通しである。

§ 4. 成果発表等

(4-1) 原著論文発表

●論文詳細情報

- [1] Satoh, M., Matsuda, Y. (2009) Statistics on high-cloud areas and their sensitivities to cloud microphysics using single-cloud experiments. *J. Atmos. Sci.*, 66, 2659-2677, DOI: 10.1175/2009JAS2948.1.
- [2] Sato, T., Miura, H., Satoh, M., Takayabu, Y. N., Wang, Y. (2009) Diurnal cycle of precipitation over the tropics simulated by a global cloud resolving model. *J. Clim.*, 22, 4809-4826; DOI:10.1175/2009JCLI2890.1.
- [3] 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, doi:10.2151/jmsj.87.335.
- [4] Miura, H., Satoh, M., Katsumata, M. (2009) Spontaneous onset of a Madden-Julian oscillation event in a cloud-system-resolving simulation. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L13802, doi:10.1029/2009GL039056.
- [5] Oouchi, K., Noda, A. T., Satoh, M., Wang, B., Xie, S.-P., Takahashi, H., Yasunari, T. (2009) Asian summer monsoon simulated by a global cloud-system resolving model: Diurnal to intra-seasonal variability. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L11815, doi:10.1029/2009GL038271.
- [6] Oouchi, K., Noda, A.T., Satoh, M., Miura, H., Tomita, H., Nasuno, T., Iga, S.-I. (2009) A simulated preconditioning of typhoon genesis controlled by a boreal summer Madden-Julian Oscillation event in a global cloud-resolving mode. *SOLA*, 5, 065.068, doi:10.2151/sola.2009.017.
- [7] Liu, P., Satoh, M., Wang, B., Fudeyasu, H., Nasuno, T., Li, T., Miura, H., Taniguchi, H., Masunaga, H., Fu, X., Annamalai, H. (2009) An MJO Simulated by the NICAM at 14-km and 7-km Resolutions. *Mon. Wea. Rev.*, 137, 3254-3268, DOI: 10.1175/2009MWR2965.1.
- [8] Watanabe, M., S. Emori, M. Satoh, H. Miura (2009) A PDF-based hybrid prognostic cloud scheme for general circulation models. *Clim. Dyn.*, 33, 795-816, doi:10.1007/s00382-008-0489-0.
- [9] Tomita, H. (2009) Analysis of Spurious Surface Temperature at the Atmosphere-Land Interface and a New Method to Solve the Surface Energy Balance Equation. *J. Hydrometeor.* 10, 833-844, doi: 10.1175/2008JHM1080.1.
- [10] Terasaki, K., H. L. Tanaka, Satoh, M. (2009) Characteristics of the Kinetic Energy Spectrum of NICAM. *SOLA*, 5, 180-183, doi:10.2151/sola.2009.046.
- [11] Collins, W. D., Satoh, M. (2009) Simulating Global Clouds, Past, Present, and Future. Chap 20 of "Heintzenberg, J., and R. J. Charlson, eds. 2009. *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, pp.469-486. The Ernst Struengmann Forum, The MIT Press.

- [12] Quaas, J., S. Bony, W. D. Collins, L. Donner, A. Illingworth, A. Jones, U. Lohmann, M. Satoh, S. E. Schwartz, W.-K. Tao, and R. Wood (2009) Current understanding and quantification of clouds in the changing climate system and strategies for reducing critical uncertainties. Chap 24 of "Heintzenberg, J., and R. J. Charlson, eds. 2009. 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, pp.557-573. The Ernst Struengmann Forum, The MIT Press.
- [13] Mukai, M., and T. Nakajima, 2009: Potentiality of aerosols in changing the precipitation field in Asia. SOLA, 5, 97-100, doi:10.2151/sola.2009-025.
- [14] Nakajima, T.Y., H. Masunaga and T. Nakajima, 2009: Near-global scale retrieval of the optical and microphysical properties of clouds from Midori-II GLI and AMSR data. J. Remote Sens. Soc. Japan, 29, 29-39.
- [15] Kondo, K. and H. L. Tanaka 2009: Comparison of the extended Kalman filter and the ensemble Kalman filter using the barotropic general circulation model. J. Meteor. Soc. Japan, 87, 347-359, DOI:10.2151/jmsj.87.347.
- [16] Kondo, K. and H.L. Tanaka, 2009: Applying the local ensemble transform Kalman filter to the nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM). SOLA, 5, 121-124, doi:10.2151/sola.2009-031.
- [17] Satoh, M., Inoue, T., and Miura, H., 2010: Evaluations of cloud properties of global and local cloud-system resolving models using CALIPSO/CloudSat simulators. J. Geophys. Res., , 115, D00H14, doi:10.1029/2009JD012247.
- [18] Yamaguchi, M., T. Iriguchi, T. Nakazawa and C.-C. Wu, 2009: An observing system experiment for Typhoon Conson (2004) using a singular vector method and DOTSTAR data. Mon. Wea. Rev., 137, 2801-2816, DOI: 10.1175/2009MWR2683.1.
- [19] Nakazawa, T. and K. Rajendran, 2009: Interannual variability of tropical rainfall characteristics and the impact of the altitude boost from TRMM PR 3A25 data. J. Meteor. Soc. Japan, 87A, 317-338, DOI:10.2151/jmsj.87A.317.
- [20] Nakazawa, T. and S. Hoshino, 2009: Intercomparison of Dvorak parameters in the tropical cyclone datasets over the western North Pacific. SOLA, 5, 33-36, doi:10.2151/sola.2009-009.

未発行論文 ("accepted"、"in press"等)

- [21] Inoue, T., Satoh, M., Hagihara, Y., Miura, H., and Schmetz, J., 2010: Comparison of high-level

- clouds represented in a global cloud-system resolving model with CALIPSO/CloudSat and geostationary satellite observations. *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2009JD012371, in press.
- [22] Sherwood, S.C., Ingram, W., Tsushima, Y., Satoh, M., Roberts, M., 2010: Relative humidity in a warmer climate. *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2009JD012585, in press.
- [23] Matsuno, T., Satoh, M., Tomita, H., Nasuno, T., Iga, S., Miura, H., Noda, A. T., Oouchi, K., Sato, T., Fudeyasu, H., Yanase, W., 2010: Cloud-cluster-resolving global atmosphere modeling - A challenge for the new age of tropical meteorology. The WMO 4th International Workshop on Monsoons (IWM-IV), Beijing in October 2008, Lecture Note, in press.
- [24] Kubokawa, H., Fujiwara, M., Nasuno, T., Satoh, M., 2010: Analysis of the tropical tropopause layer using the Nonhydrostatic ICosahedral Atmospheric Model (NICAM): 1. Aqua-planet experiments. *J. Geophys. Res.*, doi:10.1029/2009JD012686, in press.
- [25] Noda, A.T., Oouchi, K., Satoh, M., Tomita, H., Iga, S.-I., Tsushima, Y., 2010: Importance of the subgrid-scale turbulent moist process: cloud distribution in global cloud-resolving simulations. *Atmospheric Research*, doi:10.1016/j.atmosres.2009.05.007, in press.
- [26] Yasunaga, K., T. Nasuno, H. Miura, T. N. Takayabu, and M. Yoshizaki, 2010: Afternoon precipitation peak simulated in an Aqua-planet global cloud-resolving model (Aqua-planet-NICAM). *J. Meteor. Soc. Japan*, in press.
- [27] Suzuki, K., T. Nakajima, T.Y. Nakajima, A.P. Khain, 2010: A study of correlation pattern between effective particle radius and optical thickness of warm clouds with a spectral bin microphysics cloud model. *J. Atmos. Sci.*, in press.
- [28] Bessho, K., T. Nakazawa, S. Nishimura and K. Kato, 2010: Warm core structures in organized cloud clusters developing or not developing into tropical storms observed by Advanced Microwave Sounding Unit. *Mon. Wea. Rev.*, in press.

(4-2) その他

2009年8月21日: テレビ朝日スーパーJチャンネル出演。2009年の台風の傾向について解説(佐藤正樹)。