

4. 全球雲解像モデル NICAM による MISMO-MJO 再現実験

佐藤 正 樹*

1. はじめに

全球を数 km メッシュで覆う高解像度大気大循環像モデルによる数値実験が可能になり、マッデン・ジュリアン振動や熱帯擾乱のシミュレーション研究が進捗しつつある。数 km メッシュの全球モデルは「全球雲解像モデル」(GCRM) とよばれ、従来の粗い解像度大気大循環モデル (GCM) のように積雲パラメタリゼーションを用いる必要がない。GCM では、積雲パラメタリゼーションの調整によって熱帯擾乱のふるまいが大きく変わり、特にマッデン・ジュリアン振動 (MJO) をいかに再現するかは、近年大きな課題として認識されていた (Lin *et al.* 2006)。これに対して、GCRM ではモデル内で積雲対流に伴う循環や組織化を自発的に作り出すことができるので、熱帯擾乱をより自然に忠実に再現できるものと期待がかけられていた。

Miura *et al.* (2007) は、2006年12月に発生した MJO の GCRM による再現実験にとりくみ、MJO のゆっくりとした東方伝播、内部構造について、現実にもみられるような特徴の再現に成功した。この事例は、MISMO (Mirai Indian Ocean cruise for the Study of the MJO-convection Onset) 集中観測期間 (11月) の翌月に発生したもので、MJO としては比較的強度が強かった現象である。この事例の解析により、MJO の東進メカニズムにおける地形の役割、赤道に沿った西進・東進擾乱の役割について明らかになった。次いで、我々は、この事例実験の発展として、GCRM による MISMO 期間のシミュレーションに取り組んだ。

MISMO 集中観測期間の11月から翌年1月までの赤道上の雲活動のようすを第1図に示す。11月下旬の東経60度から90度付近のインド洋洋上を東進する擾乱が、MISMO 集中観測期間に観測船「みらい」によって捉えられた MJO 現象である。翌月の12月中旬から1月中旬にかけて、東経60度付近から日付変更線付近までゆっくり東進する擾乱がみられる。MISMO 期間の MJO よりも明瞭に擾乱が持続していることが確認できるだろう。

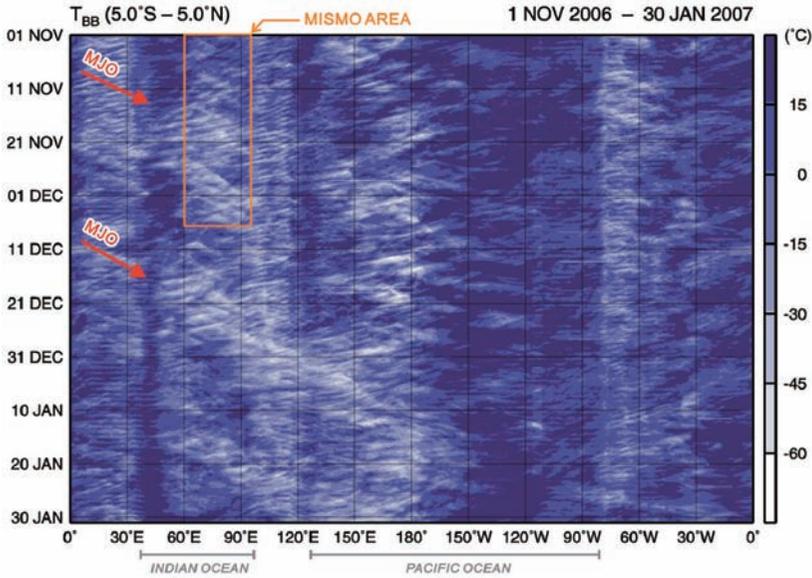
このシンポジウム原稿では、12月に発生した MJO の GCRM による再現実験について紹介し、MISMO 期間の MJO 再現実験の結果についても示す。それにより GCRM 計算により明らかになった MJO の発生・伝播のメカニズム、今後の課題について議論する。本原稿の研究内容は、三浦裕亮氏 (JAMSTEC/東京大学)、安永数明氏 (JAMSTEC) によるものである。

2. 全球雲解像モデルによる MJO シミュレーション

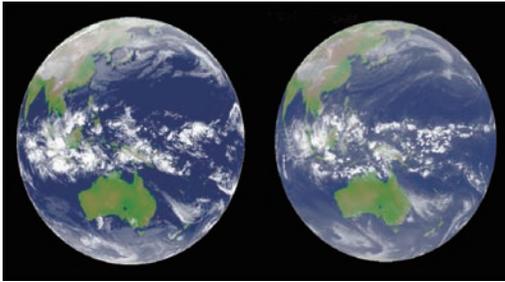
非静力学方程式系にもとづく正20面体分割格子全球大気モデル NICAM を地球シミュレータで走らせることにより、約3.5km メッシュの全球雲解像実験が可能になった (Sato *et al.* 2008)。NICAM による数値実験は、通常いくつかの解像度の実験を組み合わせで行っている。「雲解像実験」とよべるのは、一般には5 km メッシュ以下であるが、3.5km メッシュ全球実験は計算量・データともに膨大になる。そこで、同じ物理過程を用いて、7 km メッシュ、14km メッシュ実験を行い3.5km メッシュ実験と比較する。これによって、解像度依存性を調べるとともに、より低計算負荷のもとでの感度実験を行うことができる。本

* 東京大学大気海洋研究所/海洋研究開発機構地球環境変動領域。

© 2010 日本気象学会



第1図 2006年11月から2007年1月末までの赤道に沿った雲の変化。静止気象衛星観測 (GLOBAL-IR) による赤外面像 (等価黒体温度 TBB) を5N-5S で平均。単位°C。着目する二つのMJOに対応する雲列を矢印で示す。MISMO集中観測期間を四角枠で囲む。



第2図 右: NICAM3.5kmメッシュ実験で再現した雲画像 (OLR)。左: MTSAT-1Rによる雲画像 (TBB)。2006年12月29日00UTC。

実験では、12月15日00UTCの1度メッシュの客観解析データを初期値として与え、NICAMによる14km、7kmメッシュ実験を1か月間実施し、また3.5kmメッシュ実験を25日00UTCから7日間実施した。

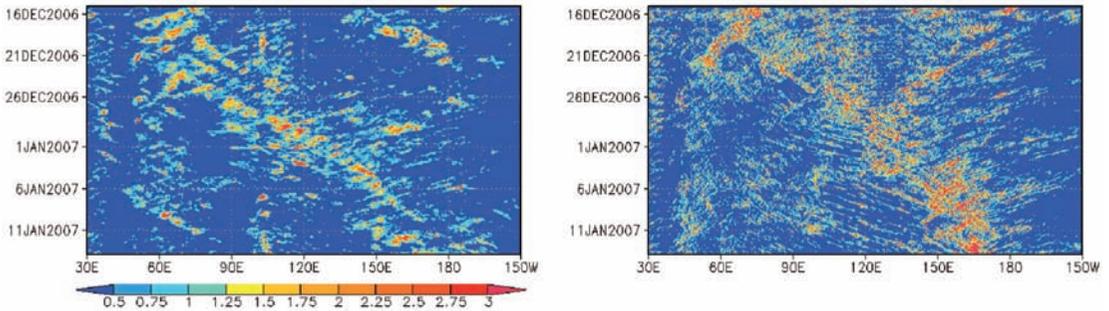
NICAMによるシミュレートされた雲のイメージを、第2図に示す。積分開始後4日目の12月29日00UTCについて、3.5kmメッシュ実験の外向き赤外放射 (OLR) の分布を静止気象衛星 MTSAT-1R の TBB と比較したものである。海洋大陸上の数千 km

の広がりをもつ雲域は、MJOに伴う雲集団に対応するもので、雲集団の大規模な組織化が再現されている。中緯度の低気圧は位置、大きさともほぼ観測と同じ位置にシミュレートされており、熱帯に関しても積雲クラスターの観測と実験の対応関係がみられる。海洋上と陸上の積雲対流活動の差異が明瞭に現われており、特に対流の日変化がよく再現されていることが解析されている。

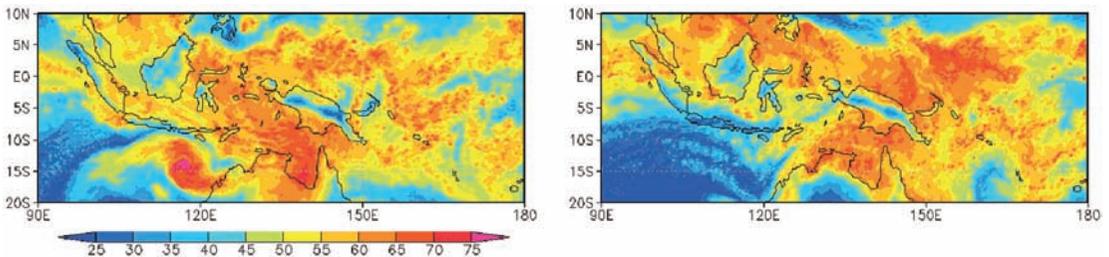
第3図は、7kmメッシュ実験によって得られた赤道に沿った降水分布を、観測 (TRMM) の結果と比べたものである。個々の対流セルについて観測とシミュレーションとを対応づける

ことはできないが、MJOに伴う大規模な降水域が、12月26日頃に東経120度付近、1月2日頃に東経140度付近、1月15日頃に日付変更線付近に達するようすが観測と同様に捉えられている。従来の大気大循環モデルでは、初期場にMJOに伴う水蒸気や循環を与えたとしても、MJOの持続を再現することすら難しく、現実的な位相速度での東進伝播、そのタイミングを数値的に再現することは、さらに困難とされていた。NICAMでの再現実験によるMJOは、対流の持続、ゆっくりとした東進伝播 (約5 m/s)、そのタイミングとも1か月にわたってよく捉えられている。このようなMJOに伴う大規模スケールの構造、運動に関しては、14km、7km、3.5kmメッシュいずれの解像度の実験でも同様に再現されていた。このことは14kmメッシュ実験もMJO研究には有用であることを意味する。一方、MJO内部の雲の詳細構造を細かく見ると解像度による依存性があり、特に積雲クラスターに伴う上層の雲のサイズ分布は3.5kmメッシュの方が観測に近い (Inoue *et al.* 2008)。

第3図には大規模なMJOの東進だけでなく、比較的位相速度の速い東進擾乱や、特にMJOの東側での西進擾乱が、観測と同様にシミュレートされている。



第3図 赤道域(10S-5N平均)での降水の時間変化. 2006年12月15日から2007年1月15日まで. 左: 観測 (TRMM3B42), 右: NICAM 7 km メッシュ実験. 単位 mm/hr. Miura *et al.* (2007) より.



第4図 NICAM 7 km メッシュ実験により計算された可降水量の分布. 左: 2007年1月2日00UTC. 右: 同6日00UTC. 単位 kg/m². Miura *et al.* (2007) より.

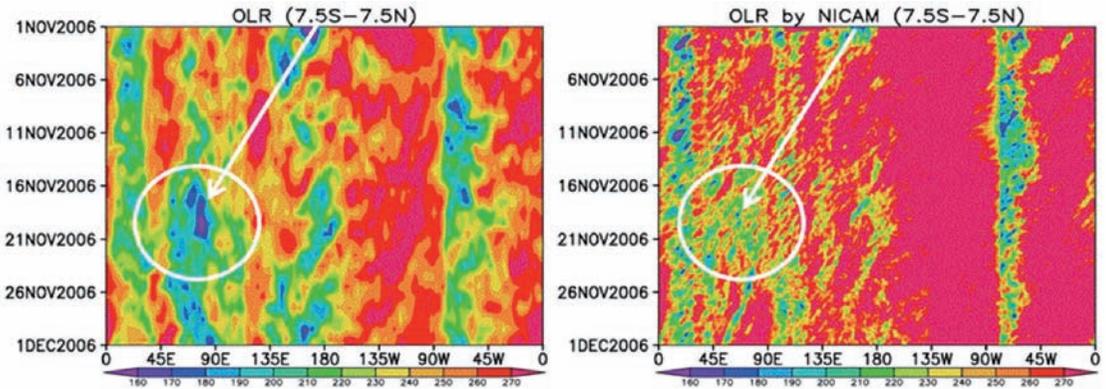
このような積雲対流の擾乱を、MJOの内部、周辺環境まで再現できることがGCRM実験の特徴である。本実験によるNICAMの実験結果を解析することによって得られたMJOの伝播に関する知見として、次の点をあげることができる。14kmメッシュによる海面水温(SST)や島嶼地形の影響などに関する感度実験の結果、本MJOの東進伝播に関してはSSTの時間変化(従って大気海洋相互作用)は重要でなく、むしろニューギニア島等の地形の影響やSSTの東西非対称性が重要であることがわかった。第4図にMJOがニューギニア島をジャンプする前後で可降水量の水平分布がどのように変わったかを示す。左が通過前(1月2日)、右が通過後(6日)である。MJO通過前にはニューギニア島にブロックされ、南西方に水蒸気が蓄積されている。この後、東方から水蒸気を伴う西進擾乱が東経140度付近に到達し、ニューギニア島北東方に水蒸気の蓄積をもたらす。このような環境場において対流活動がニューギニア島東方で活発化し、MJO本体のジャンプが実現する。仮にニューギニア島を取り除いた実験を行うと、MJOはニューギ

ニア島にブロックされることなく、東進速度が非常に速くなることが確認された。

3. MISMO 実験

2006年12月に発生した比較的活発なMJOについてのNICAMによる実験例を示した。特別な工夫をしなくとも、GCRMを使えばMJOをよく再現できることを理解することができた。この結果をもとに、MISMO集中観測が実施された2006年11月についてもNICAMで実験を行うことにした。第1図に示すように、この期間にもMJOに伴う雲の東進伝搬が見られる。特に、MISMOはMJOの発生(onset)メカニズムを解明するための特別観測であるため、集中観測期間中の11月20日頃にMJOの発生が捉えられたのは幸いであった。

MISMOによって観測されたMJO発生が再現されるかを調べるため、11月1日のデータを初期値として用いたNICAMによる14kmメッシュ実験を行った(Miura *et al.* 2009)。第5図は、観測されたOLRとNICAM実験によるOLRを比べたものである。11月



第5図 MISMO集中観測期間(2006年11月)のNICAM14kmメッシュ実験による結果. 赤道(7.5S-7.5N)に沿ったOLRの時間変化. 単位 W/m^2 . 左: 観測値(NOAA-OLR, 1日2.5度間隔). 右: NICAM14kmメッシュ実験. 初期値は2006年11月1日00UTC. 白丸はMJOの発生, 矢印は西進擾乱の伝播.

中旬より, それぞれの図の白丸で示すような対流活動の活発化が再現されている. 11月1日頃の初期場に目を向けると, 日付変更線付近から出発する西進擾乱が存在することがわかる. この擾乱がインド洋の東経90度付近に到達した時点でMJOが発生している. 一方, 速度ポテンシャルに現れる大規模スケールでの下層の収束場をみると, 同じく11月初旬に日付変更線付近にあった収束場が東進し, 中旬にインド洋に達しているのが確認された(図省略). 今回のMJOは, 東進する下層収束場(おそらくケルビン波)と西進する擾乱の交差する位置でちょうど発生しているように見える. このような, MJOにおける東進擾乱, 西進擾乱の役割は, Masunaga *et al.* (2006)でも指摘されており, 今回のNICAMによるシミュレーション, MISMOによる観測でもこれらの存在が確認された.

12月の事例では, 14kmと7kmメッシュの実験では, MJOや総観規模の擾乱に関してはよく類似した構造を再現することができた. MISMOのケースでの再現実験は14kmメッシュのものであるが, 示したように現実的な発生のタイミングがとらえられている. 7kmメッシュでの再現実験も今後実施し解析を進める予定である. それにより, 積雲クラスターやレインバンドといったメソ対流の役割や, いわゆる“preconditioning”の実態についても観測と対応させて調べることができであろう.

4. 海洋観測への期待

最後に, 本シンポジウムのテーマ「海洋観測が切り拓く気候システム科学」とGCRMの関係についてコメントしたい. GCRMは大気モデルを高解像度化したものであり, 今後海洋モデルとの結合は考えられるとしても, 海洋循環をモデリングするものではない. 本講演では, 大気海洋観測MISMOに関連したGCRMシミュレーションの結果を示したことで, 間接的に海洋観測への期待について言及したことになる. しかし, GCRMが特に熱帯の積雲対流のシミュレーションの再現を目的として開発されたものであることを考慮すれば, GCRMは海洋観測と密接にリンクするものであるといえる.

熱帯の積雲対流は, 西太平洋のウォームプールやインド洋といった海洋上で活発な活動をする. 対流活動自体はインド亜大陸や海洋大陸の陸上でより活発であるが, その変動には海洋とのコントラストが重要である. 海洋上の積雲対流は, 積雲クラスターの組織化, MJOや季節内振動, 熱帯低気圧の発生に関連し, それらのシミュレーションの改善がGCRMに期待されている. これらの現象は, 海洋上であるがために観測頻度が少なく, 現象を理解するための包括的な4次元時空間的データが限定的にしか得られないのが現状である. 人工衛星によるリモートセンシングはこれらの現象を把握するためのキーであるが, 現象の連続的な3次元構造の把握に十分ではない. 3次元構造の把握のためには, MISMOのような直接的なデータの取得

が求められるが、海洋上の現地観測にはまた局地性などの欠点がある。これらをつなぐ役割をするのがモデルであり、特に積雲対流が主体となる現象には、今後GCRM実験が重要な役割を果たしていくことになるであろう。

海洋上の積雲対流について、降水の高頻度高解像度観測の重要性はかねてより指摘されているが、例えば、大気下端に拡がるコールドプールの強度・拡がりや、海洋混合層との相互作用について、観測データによりモデルを検証する必要がある。気候モデルの不確定性の大きな要因である下層雲や、中規模積雲（コンジェスタス）についても、モデルでの再現性の向上が要請されており、海洋上の下からの観測に期待される。

5. 終りに

全球雲解像モデルGCRMにより、MJOや熱帯の積雲クラスターが現実と対応できる程度に再現されたことで、観測とモデルの連携が特に強まったといえる。GCRMによる数kmメッシュで解像される現象が、ちょうどMISMOや衛星観測によって直接捉えられる現象に対応したことが背景にある。MISMOだけでなく、今後予定される台風の集中観測、アジアモンスーン年（AMY）、熱帯対流年（YOTC）等の観測にも、GCRMは相補的な役割を果たしてことが期待される。観測を現象の科学的理解の進展だけでなく、モデルの改良、さらにモデルによる短期・長期予測精度の向上へ生かすことによって、観測の意義がより高まるものと考えられる。

謝 辞

本研究はJST/CRESTのサポートをうけた。NICAMによる数値実験には、地球シミュレータを用いた。本原稿の作成には三浦裕亮氏、安永数明氏、山田広幸氏、那須野智江氏に協力いただいた。

参 考 文 献

- Inoue, T., M. Satoh, H. Miura and B. Mapes, 2008 : Characteristics of cloud size of deep convection simulated by a global cloud resolving model over the western tropical Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, **86A**, 1-15.
- Lin, J.-L. *et al.*, 2006 : Tropical intraseasonal variability in 14 IPCC AR4 climate models. Part I : Convective signals. *J. Climate*, **19**, 2665-2690.
- Masunaga, H., T. S. L'Ecuyer and C. D. Kummerow, 2006 : The Madden-Julian Oscillation recorded in early observations from the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM). *J. Atmos. Sci.*, **63**, 2777-2794.
- 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.
- Miura, H., M. Satoh and M. Katsumata, 2009 : Spontaneous onset of a Madden-Julian Oscillation event in a cloud-system-resolving simulation. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L13802, doi : 10.1029/2009GL039056.
- Satoh, M., T. Matsuno, H. Tomita, H. Miura, T. Nasuno and S. Iga, 2008 : Nonhydrostatic icosahedral atmospheric model (NICAM) for global cloud resolving simulations. *J. Comp. Phys.*, **227**, 3486-3514.