

台風と熱帯擾乱*

中 澤 哲 夫**

1. はじめに

台風 (以後、ハリケーンも含めた言葉として使うことにする) は、地球科学の多くの知見を総合して初めて理解できる現象の1つと断言していいであろう。1960年代に大山勝通氏¹⁾や Charney and Eliassen²⁾が提唱した台風の維持メカニズム (第2種条件付不安定, CISK) により世界で初めて台風の再現に成功して以後、多くの分野で台風の理解を深める研究が行われてきた。たとえば、それらは、台風モデルの高度化と対流雲の効果のパラメータ化であり、大気海洋相互作用に関する理解である。前者については、山岬正紀氏の最近の研究³⁾を含めて多くの研究があるし、地球シミュレータによる非静力学モデルによる実験⁴⁾、台風に伴って発生した強風や突風の再現実験なども行われるようになってきている。また、後者については、CBLAST (Coupled Boundary Layer Air-Sea Transfer; <http://www.aoml.noaa.gov/hrd/project2005/cblast.html>) と呼ばれる大気海洋相互作用に関する研究計画が米国で行われ、台風などの強風下での海洋との交換係数やフラックスの評価が行われている。最近では気象観測衛星により、台風のデータベースが公開されており^{5,6)}、台風の研究にも大いに役立ってきている。

本稿では、台風や熱帯季節内変動の解析研究を中心に、私から見て興味深いと思われる近年の成果と今後の課題について述べたいと思う。

2. 温暖化と台風

2007年2月2日、「気候変動に関する政府間パネル」

(IPCC) は、自然科学的根拠をまとめる第1作業部会の政策決定者向け要約⁷⁾を発表した。この要約では、前回に比べ、いくつかの踏み込んだ内容や新たな見解が述べられている。まず、温暖化の原因が人為起源の温室効果ガスによるとほぼ断定し、2030年までにどの排出シナリオでも10年あたり0.2度昇温することなどを示した。台風の変化傾向については、「熱帯低気圧の発生数にははっきりした増減傾向はないが、北大西洋の強い熱帯低気圧の強度に1970年以降増加傾向が見られる」とし、将来予測については、「熱帯での海面水温の上昇に伴い、熱帯低気圧の強度は強まり、最大風速や降水強度が増加する。全球的な発生数の減少も起こる可能性が高い」とした。前者の結論には、Webster⁸⁾、Emanuel⁹⁾、Trenberth¹⁰⁾らの見解が取り入れられたようであるが、この見解を問題視する Pielke *et al.*¹¹⁾の見解 (1970年といえば、まだ衛星による観測も不十分な時代のことであり、強い熱帯低気圧の個数も過小評価している可能性が高い、という点が反駁の理由) もあり、まだ IPCC のような結論を出すのは早い気がする。ここで、北西太平洋について言及されていないのは、釜堀らによるタイムリーな論文¹²⁾があったことが反映されているようである。また台風の将来予測に関する結論には、現在気候に比べ、温暖化時には、弱い台風は減り、強い台風が増えるという気象研究所の結果¹³⁾によるところが大きい。この結果は、熱帯低気圧に関する将来予測を行っている世界のモデルの中で最も解像度の高い (20キロ分解能) モデルによるが、海域ごとの発生数や強度別の個数などについて言及するのはまだ難しく、今後さらに高解像度の非静力学モデルなどによる精度の高い予測が行われる必要がある。

* Tropical cyclones and tropical disturbances.

** Tetsuo NAKAZAWA, 気象研究所.

© 2007 日本気象学会

3. 日本への台風上陸

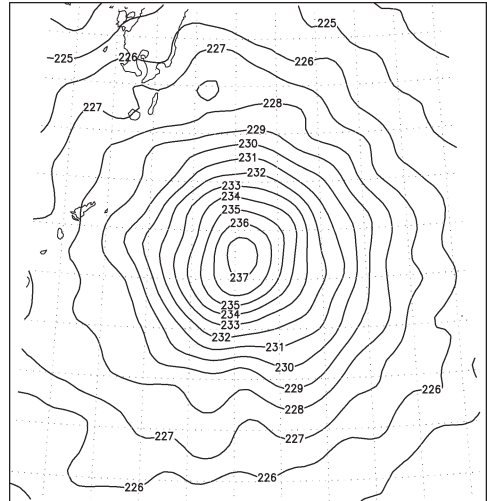
2004年に日本に10個もの記録的な台風が上陸し、200名もの犠牲者を出したことは記憶に新しい¹⁴⁾。引き続き2005年には、アメリカのニューオーリンズ市にハリケーン・カトリーナが上陸し、堤防の決壊により1700名を超える死者が出たこともまだ私たちの脳裏に残っている¹⁵⁾。日本への年間平均上陸数が2.6個(1971年から2000年の30年平均)であることや、第2位が6個という点から考えてみても、いかに2004年が異常な年であったのかわかる。なぜ2004年には上陸が多かったのか、他の年と何が違っていたのか、日本への台風上陸を決めている要因は何か。まだ明確な回答は与えられていないが、最近、日本への台風上陸に特徴的な循環場(台風上陸モードと呼ぶ)が存在することがわかってきた¹⁶⁾。このモードは、エルニーニョ/ラニーニャに関連したモードに次いで卓越するモードとして見いだされたものである。

台風の日本上陸数が多い(少ない)年には、対流圏下層で、日本付近に高(低)気圧偏差、フィリピンの東海上に低(高)気圧偏差が卓越している。フィリピンの東海上の偏差は、対流圏上中層まで順圧的な構造であることもわかっている。このような偏差に伴う指向流が、日本への台風上陸を制御しているらしい。しかし、このような偏差の維持機構は未解明であり、今後の研究に待つところが大きい。

4. 衛星リモートセンシングの応用

1960年、世界で最初に気象関係の人工衛星TIROS1号が打ち上げられ、地球の雲分布を見ることができた。その後、1970年代後半には静止気象衛星が打ち上げられ、「ひまわり」からの画像はお茶の間でも日常的に見ることができるようになった。私が気象庁に勤務し始めたのは1980年4月、気象研究所がつくばに移転した直後であったが、当時村上勝人氏が1977年に打ち上げられた「ひまわり1号」の赤外画像からヒストグラムデータを作成しており、日変化の解析¹⁷⁾をしていたことが思い出される。

当時は、「ひまわり」に代表される可視赤外放射計が主流だったが、1980年代になると、マイクロ波センサーの活躍が始まる。その代表的なセンサーは、放射計ではSSM/I, AMSR, AMSR-E, TMIなど、散乱計ではNSCATやQuikSCAT、さらにTRMMの降雨レーダ(PR)、そして、探査計のAMSUなど多彩だ。放射計からは、可降水量、降水量、海面水温、



第1図 AMSU から求めた、2004年の台風第16号周辺の200 hPaにおける気温分布 (K)。

海上風速などが得られる。散乱計からは、海上風が得られる。降雨レーダは地上の気象レーダ同様、降水強度を求める測器である。探査計は、気温や水蒸気の鉛直分布を推定するものである。ということで、これらのマイクロ波センサーがいかに台風にとって重要なデータをもたらしているか、理解してもらえらるであろう。ここでは、AMSUの結果についてのみ紹介する。第1図は、AMSUから求めた2004年の台風第16号の200 hPa面での気温である。台風を中心付近に温暖核が解析されている。

5. 何が課題か?

国際的な台風関連の大きな会議に、世界気象機関(WMO)が主催する「熱帯低気圧に関する国際ワークショップ」(IWTC)がある。4年に1回開かれるIWTCの第6回目の会議(IWTC-VI)が、2006年11月、中央アメリカのコスタリカで開かれた。会議資料はWebで公開されている(<http://severe.worldweather.org/iwtc/>)。研究者だけでなく、現業に携わる予報担当者も参加する点がユニークである。4年間に科学論文のレビューを行い、今後の台風研究の方向性を打ち出すとともに、WMO等に勧告を行う。IWTC-VIの主要勧告内容を挙げてみよう。WMO向け、研究向けそして現業向けの3種類の勧告があるが、ここでは、特に研究向けの勧告について述べる。

- ・熱帯低気圧の強度/構造予測に注力すべき。力学モデル、大気海洋結合モデル、統計的力学モデルなど、強度予測を改善するあらゆる方法が推進されるべき。
- ・熱帯低気圧に関連している学界が、熱帯に関連したTHORPEX活動、とりわけTHORPEX太平洋アジア地域研究計画(T-PARC)と、THORPEX全球統合アンサンブルシステム(TIGGE)に協力すべき。さらに、個別勧告では、(1) 利用可能データ、(2) 進路予測、(3) 強度・構造予測、(4) アンサンブル予測、(5) 温帯低気圧化と発生、(6) 季節予測、(7) 風、(8) 高潮と水文学的予測、(9) 被害評価と防災、(10) 訓練・教育・啓発、(11) 定義まで、非常に多岐にわたっている。

ちなみに、「温暖化と台風」に関連して、この会議の参加者による声明が出され、WMOから記者発表が行われている (http://www.wmo.ch/pages/prog/arep/index_en.html)。その内容は第2章で述べたIPCC第4次報告とはかなり異なり、「今後温暖化が進めば、強い台風の頻度は多くなるかもしれないが、少なくとも最近の活発に見える台風活動の原因を温暖化と結びつけることはできない」という内容である。

6. THORPEX と台風・熱帯気象研究

IWTC-VIの主要勧告の2番目にTHORPEXという言葉が出てくる。THORPEXとは、WMOが推進している、社会・経済的に影響の大きい天気現象の1日~2週間先までの数値予測の精度向上を加速させることを目的とした国際研究プログラムである。国際的な取組みは、WMOのホームページ (http://www.wmo.int/pages/prog/arep/thorpex/index_en.html) を、日本における活動については日本気象学会の「THORPEX研究連絡会」のホームページ (<http://www.es.jamstec.go.jp/esc/research/AtmOcn/thorpex/>) を参考にしていただきたい。

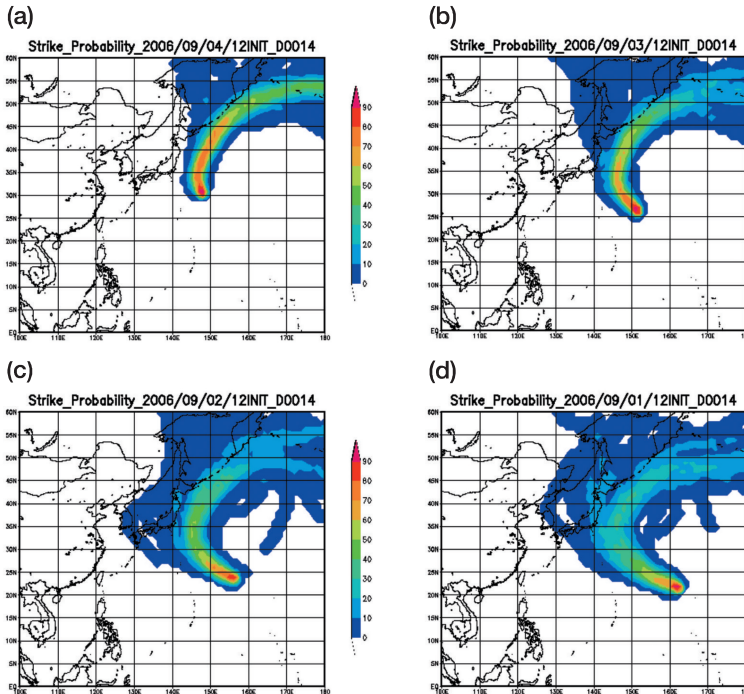
天気予測の誤差は、大きく分けて、数値予測モデルが持つ誤差と、観測に起因する初期値の誤差の2つがある。数値予測モデルの急速な進展や、地球観測衛星からのさまざまなデータにより、天気予測の精度は格段に向上している。今後とも数値予測モデルの改良は、物理過程などを中心に課題は多い。しかし、たとえ仮に数値予測モデルが100%完璧なものになったとしても、初期値が実際の大気状態を十分に表現できていないと予測結果は当たらない。そこで、1つの初期

値から1つの予測結果を出す(決定論的予測)のではなく、観測精度内で初期値を少しずつ変えて、いくつかの初期値を作り、それぞれを初期値として予測を行う、アンサンブル予測(確率論的予測)が提案され、気象庁をはじめ世界の多くの気象予報センターで現業化されている¹⁸⁾。アンサンブル予測の結果を使うことにより、予測を良くするために重要な領域(ターゲット域)や高度・変数などの情報をあらかじめ得ることができるようになってきた。その情報をもとにして、航空機などにより機動的観測を行えば、予測を改善できる可能性が高い。このような観測は、Targeting Observationとか、Adaptive Observationなどと呼ばれているが、ここでは、最適観測法と呼ぶことにする。すでに欧米では、実際にアンサンブル予測と最適観測法を結びつけた大掛かりな研究観測がこれまでに何回か実施されてきているが、それらは、中緯度での冬季の急発達する低気圧を対象としたものであり、台風に対してはまだ行われていない。

まず、現在のアンサンブル予測の現状について、台風の進路予測を例に示したい。気象庁では、1999年3月から、週間アンサンブル予測の試験運用が開始され、2001年3月から本運用に移行した。一例として、2006年台風第12号(Ioke)の例を示す。この台風は、中部太平洋でハリケーンとなり、日付変更線を越えてきた珍しい台風である。日本には上陸しなかったが、ずっと西進し、三陸沖を北上していった。この台風の週間アンサンブル予測結果を第2図に示す。この図は、台風接近確率図と呼ばれるもので、ここでは、初期時刻から120時間以内に、各格子点で台風が120キロ以内に近づく確率を示している。この4枚の図は、予測の初期時刻が1日ずつ異なる。(a)の新しい時刻からの予測によると、暖色系のはっきりした線が見えるが、これは、アンサンブルの各メンバーのばらつきが少ないことを示している。この経路は、すでに、それより3日まえの予測(d)でも、ほぼ同じラインに沿って確率が高くなっていったことがわかる。

アンサンブル予測によるターゲット域の算出はうまく行くのかとの質問もあろう。いくつかある算出法でターゲット域が異なるとの研究結果も出されているが、気象庁で行っているいくつかの台風の事例では、求められるターゲット域の有効性が確認されている。

これらの結果を踏まえた上で、我々は、T-PARCにより台風に対する最適観測法を実現しようとしている。T-PARCは、2008年の夏から初冬にかけて北西



第2図 2006年台風第12号の台風接近確率図。初期値が異なる4枚の図を示す。
(a) 9月4日12 UTC, (b) 3日, (c) 2日, (d) 1日初期値の結果。

太平洋で予定されている THORPEX の地域観測実験計画であり、THORPEX のアジア地域委員会と北米地域委員会を中心となって進めている計画である。アジア地域委員会では、台風の発生、転向、温低化などに焦点を絞った研究を行う予定であるが、北米地域委員会は、台風や冬の低気圧が、北米など風下側に与える影響についても研究を行う、としている。すでに米国では、米国科学財団 (NSF) の資金確保に成功し、2008年に向けて順調に計画の具体化が進んでいる。このような動きと比較すると、日本を含め東アジア各国での具体化は遅れているが、やっと日本でも、航空機による最適観測法のための台風観測を実施できる目処ができたところである。日本としては、このほかにも、気象庁の数値予報課を中心に、アンサンブル予測技術の高度化、湿潤特異ベクトル法の改良などに取組むとともに、アンサンブル予報情報やターゲット域情報などの THORPEX 研究者への資料提供、静止気象衛星データの高度利用、海洋観測船などによる高層強化観測の実施など、T-PARC への貢献について、大学や他の研究機関の研究者とともに、検討を進めている。

台風に対する最適観測法は、以下のような内容で実

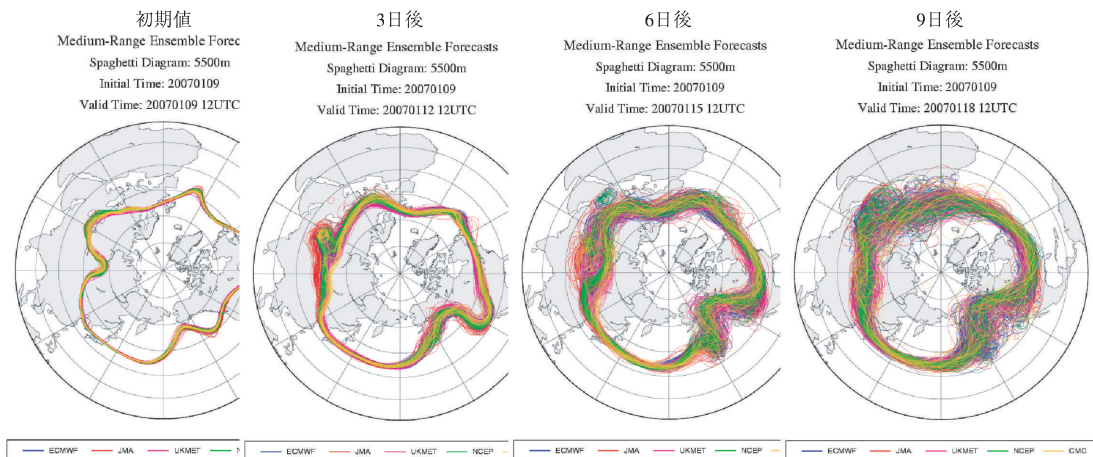
施する予定である。

- (1) 台風が日本の南海上で発生し、日本に接近する可能性が出てくる。しかし、アンサンブル予測で見ると、進路予報の分散が大きい。
- (2) アンサンブル予測の感度解析を行い、ターゲット域を求める。
- (3) ターゲット域で航空機観測を行う。
- (4) 観測データを数値予報に取り込み、予報精度の改善をはかる。

アンサンブル予測情報については、ECMWF と NCEP そして CMA に世界中の現業センターのアンサンブルデータを置いて、世界中の研究者、技術者がアクセスできる、TIGGE と呼ばれるデータベース構

築が進んでいる。筑波大学の松枝未遠氏によれば、すでにそのプロトタイプが NCEP で稼働し始めているとのことである。第3図に、松枝氏からいただいた 500 hPa 高度場での、全アンサンブルメンバー295個の5500 m 高度場の等値線を記入した「スパゲッティダイアグラム」の予報変化を示す。初期にはほとんどのメンバーが一致しているが、時間が経つとともに、ユーラシア大陸と北米西海岸あたりで、ばらつきが大きくなっていることがわかる。T-PARC の時に、台風の最適観測を行うにあたり、世界中のアンサンブル予報からのターゲット域情報を入手することを検討している。

静止気象衛星による、台風周辺域での高時間分解能 (1 分間隔) のラピッドスキャンデータ (<http://www.data.jma.go.jp/obd/sat/data/web/rapid.html>) にも期待したい。このデータを用いることにより、台風の眼の内部の克明な様子や、台風をとりまく雨雲の微細な構造とその時間変化、台風周辺の対流圏中下層の雲の流れなどを知ることができるだけでなく、衛星データによる最適観測法とも言うべき手法を実施することができ、台風の予報改善に寄与すると期待される。



第3図 全アンサンブルメンバー (295メンバー) の500 hPaでの5500 m等値線の予報結果。2007年1月9日12 UTC初期値。松枝氏提供。(http://air.geo.tsukuba.ac.jp/~mio/tigge2.html)

7. 季節内変動の理解はどこまで進んだか

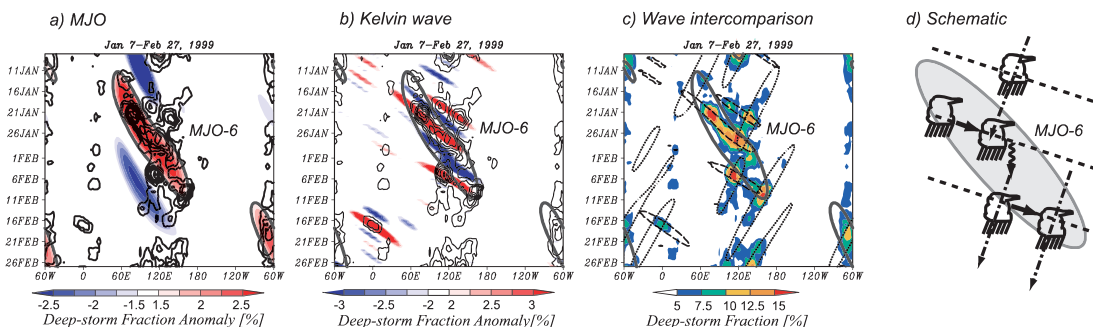
これまで、台風について主として話をしてきたが、熱帯でまだ十分に理解できていない現象の1つに30日から60日で地球を東回りに回っている「季節内変動」(発見者にちなんで、Madden-Julian Oscillation, MJOと呼ばれる)がある。2006年3月に、イタリアのトリエステで、「熱帯対流とMJOの組織化と維持に関するワークショップ」が開かれ、レディング大学のHoskins, Slingo両教授や、コロラド州立大学のJohnson教授、ハワイ大学のWang教授、米国大気研究センターのHolland博士、ジョージア工科大学のWebster教授、東アングリア大学のMatthews教授など、熱帯気象学やMJOについてのそうそうたる専門家が顔を揃えた。

会議で取り上げられたテーマは以下の通りである。

(1) 熱帯の組織化された対流を理解する

- (2) MJOを理解する(理論, 個々の対流の解像, スーパーパラメタリゼーション)
- (3) 熱帯と中緯度の相互作用
- (4) 季節内変動とモンスーン
- (5) すべての物理過程を含んだ全球モデルでの組織化対流と熱帯の変動
- (6) 予報可能性と予報に関わる問題
- (7) 年々変動と気候変化との相互作用

この会議でもっとも大きな貢献をしたのは、東大気候システム研究センターの佐藤正樹氏らのグループが、地球シミュレータを使って行った全球非静力学モデルのシミュレーション結果だ⁴⁾。彼らは、全球を約3.5km間隔で正20面体を分割した格子を用い、積雲パラメタリゼーションを行わずに、陽に対流を解像するモデルでMJOの再現を試みた。陸地を入れない全球を海だけで覆ったモデルの結果は、現実に観測され



第4図 MJOと赤道波との相互作用の一例 (Masunaga et al.¹⁹⁾より)。

るスーパークラスターとその内部構造の再現にみごとに成功している。ただ、スーパークラスターの1つ上の階層であるMJOのゆっくりと東進するモードは見えていないようだ。スーパークラスターの東進速度が $15\text{--}20\text{ ms}^{-1}$ と、ほぼ湿潤ケルビン波と同定されるのに対して、波数1のモードは、これより早く 23 ms^{-1} という速度で東進していた。MJOは $5\text{--}10\text{ ms}^{-1}$ でゆっくり東進するので、このモードはMJOとは全く似ていない。スーパークラスターとその内部構造を再現できた点で、彼らの研究はMJOの研究に大きな足跡を残したと言っていると思う。

では、MJOの構成要素であるスーパークラスターやそれを構成するクラウドクラスターの再現はできているのに、ゆっくり東進するMJOモードはなぜ見えていないのか。現時点では推測の域を出ないが、今回の会議で何人かの研究者と議論する中で、海洋との関連を指摘する声が多かった。たとえば、それらは大気海洋混合層の取扱いであり、海面水温や熱・エネルギー交換などの重要性である。前者は、ケルビン波応答が既存のクラウドクラスターの東側で、対流圏下層で、水蒸気収束を引き起こし、それが新しいクラウドクラスターを生み出すために、全体としてスーパークラスターが東進しているわけで、大気海洋混合層のモデルでの取扱いが位相速度や組織化に大きく影響していると考えられるからである。海面温度は、現在赤道で摂氏27度に設定されているとのことであるが、これはやや現実より低い。彼らは、28、29度での実験も行ったが、うまく再現はできなかつたそうである。

今回の会議を一言で言うと、Mel Shapiro博士が言っていた、「結局のところ、まだまだMJOの機構はわかっていないではないか」ということだ。今後の研究の方向性を議論した時に、「そもそもMJOをどう定義すべきか一致した見解がない」などとまとめられている点で、わたしたちの現状を反映していると言えよう。

Shapiro博士の意見に対して、わたしは、東大の佐藤正樹氏らのグループが、地球シミュレータを使って全球雲解像モデルを走らせている結果が有望であること、しかし、スーパークラスターの組織化としてのMJOについてはまだ未解明の点があることなどを伝えた。

最近衛星データを使ってMJOの発達・衰弱に西進する赤道ロスビー波が関与しているという面白い解析結果が発表されている¹⁹⁾。この点も面白いと思うのだ

が、わたしが個人的に興味を持ったのは、MJOの内部構造のほうだ。第4図にMJOと赤道波との相互作用の実例を示す。Nakazawa²⁰⁾に示されているように、MJOが東進するスーパークラスターから構成されていることが明瞭である。

つい最近、東大の佐藤正樹氏らのグループが、2006年12月のMJOの再現に成功したとの報に接した。まだ詳細は不明だが、MTSATの画像と比較して、東進伝搬特性はほぼ再現できているようだ。データ解析が進めば、MJOの機構解明が一気に進むかもしれない。

参考文献

- 1) Ooyama, K., 1964 : *Geofisica Internacional*, 4, 187-198.
- 2) Charney, J. and A. Eliassen, 1964 : *J. Atmos. Sci.*, 21, 68-75.
- 3) Yamasaki, M., 2005 : *J. Meteor. Soc. Japan*, 83, 1057-1084.
- 4) Tomita, H., 2005 : *Geophys. Res. Lett.*, 32, L08805, doi : 10.1029/2005GL022459.
- 5) http://www.nrlmry.navy.mil/tc_pages/tc_home.html
- 6) http://sharaku.eorc.jaxa.jp/TYP_DB/index_j.shtml
- 7) <http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf> (日本語要約は、<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/ipcc/ar4/index.html> から)
- 8) Webster, P. *et al.*, 2005 : *Science*, 309, 1844-1846.
- 9) Emanuel, K., 2005 : *Nature*, 436, 686-688.
- 10) Trenberth, K., 2005 : *Science*, 308, 1753-1754.
- 11) Pielke, R. A., Jr. *et al.*, 2005 : *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 86, 1571-1575.
- 12) Kamahori, H. *et al.*, 2006 : *SOLA*, 2, 104-107, doi : 10.2151/sola.2006-027.
- 13) Oouchi, K. *et al.*, 2006 : *J. Meteor. Soc. Japan*, 84, 259-276.
- 14) 気象研究所, 2006 : 気象研究所技術報告, 49, 36 pp.
- 15) 気象研究所台風研究部ほか, 2006 : 天気, 53, 49-59.
- 16) 中澤哲夫, K. Rajendran, 2006 : 月刊海洋, 38, 678-687.
- 17) Murakami, M., 1983 : *J. Meteor. Soc. Japan*, 61, 60-76.
- 18) 気象庁予報部, 2006 : アンサンブル技術の短期・中期予報への利用 (気象業務支援センター発行), 130pp.
- 19) Masunaga, H. *et al.*, 2006 : *J. Atmos. Sci.*, 63, 2777-2794.
- 20) Nakazawa, T., 1988 : *J. Meteor. Soc. Japan*, 66, 823-839.