

第34回メソ気象研究会の報告

—熱帯域の降水を伴うメソ擾乱の観測とモデリング—

コンピーナー : 山田広幸 (海洋研究開発機構)

1. はじめに

第34回メソ気象研究会は、「熱帯域の降水を伴うメソ擾乱の観測とモデリング」というテーマで、秋季大会前日の2010年10月26日(火)に京都大学宇治おうばくプラザにおいて開催された。熱帯では、潜在不安定な成層が一様に広がる環境のもとで、クラウドクラスターのような数十~数百 km の大きさに集団化したメソ対流系が発現することが知られている。メソ対流系の発達に、より大きな水平規模を持つ擾乱や熱帯波動が関係している一方で、メソ対流系自身による潜熱解放が擾乱や波動の発生源になるともいわれている。このように、中緯度帯の傾圧不安定波に比べ一般性の高い理論構築が難しい熱帯擾乱の複雑さが、メソ対流系の発生予測をはじめ、熱帯域の予報精度の向上を阻む原因の一つになっている。しかし近年、衛星観測の高精度化や、非静力学雲解像数値モデルの性能向上により、メソ対流系と大規模擾乱との関係を調べる手段が飛躍的に充実し、マルチスケール相互作用の理解が進展しようとしている。本研究では、熱帯域の降水過程やメソ擾乱に焦点を当て、6名の方に最新の研究内容を紹介して頂いた。メソ気象研究会では、伝統的に中緯度の現象を対象とすることが多いが、今回は熱帯という普段と異なるテーマであるにもかかわらず、95名の参加者があった。

2. 熱帯の対流系と中緯度の対流系 : 構造・組織化
・環境場の影響

竹見哲也 (京都大学防災研究所)

スコールラインやレインバンドなどメソ対流系(MCS)は熱帯・亜熱帯・温帯といった多様な気候環境において形成され、各地域の事例についてはこれま

で豊富な研究の蓄積がある。しかし、例えば熱帯と中緯度のメソ対流系の違いに関して比較した研究は意外と多くない。熱帯と中緯度では総観場の特徴が大きく異なり、それがMCSの環境場としての気温・水蒸気量・風速の空間分布の違いに表れる。環境条件が異なればMCSの構造や組織化過程もそれに応じて変わるはずである。例えば、熱帯と中緯度の積乱雲の上昇流には大きな違いがあること(LeMone and Zipser 1980)、熱帯海洋性と中緯度大陸性のMCSの環境場の違いは浮力の鉛直プロファイルに顕著にみられること(Lucas *et al.* 1994)が分かっている。さらに衛星観測のデータの蓄積により最も強い積乱雲はどこにあるかという議論も進んでいる(Zipser *et al.* 2006)。本研究では、熱帯と中緯度の浮力プロファイルの違いがMCSの構造や強度にどのように影響を及ぼすのかについて、数値実験により調べた(Takemi 2010, 2007)。特にCAPEが同程度であっても浮力プロファイルが違う環境場を対象とした。

非静力学モデルWRFを用い、熱帯海洋性や中緯度大陸性の合計3通りの典型的な気温・水蒸気量の鉛直プロファイルを水平方向に一様に与え、理想化した大気環境場を設定した。MCSとしてスコールラインを想定し、南北側面境界には周期条件、東西側面境界には放射条件を設定し、水平格子幅500 mでの数値実験を行い、MCSの構造や強度を調べた。用いた物理過程は乱流混合と雲微物理過程のみという簡略化したものである。最下層の空気塊が持つCAPEは各プロファイルについて 2600 Jkg^{-1} と同じ値に設定した。また風速の鉛直シアーは下層または中層に弱いまたは強いシアーなど、ひとつの熱力学プロファイルについて5通りに変化させ、鉛直シアーに対する感度の違いも調べた。

地上空気塊のCAPEは同じであるにもかかわらず、

熱帯型の MCS による平均的な降水強度は中緯度型の場合に比べて極めて弱いという結果が得られた。上昇流の強さを比較すると、時空間で平均した上昇流の強さは中緯度型の場合が熱帯型の場合より若干強いのみであったが、一方で上昇流の領域最大値は熱帯型でせいぜい 10 ms^{-1} であったものが中緯度型では 30 ms^{-1} を超える強さとなった。また上昇流が占める面積は、中緯度型の場合が熱帯型の場合よりも 3 倍以上広がった。このように熱帯型と中緯度型との上昇流の強度に顕著な違いがあることが数値実験で表現され、観測事実と整合的な結果が得られた。このような対流強度の違いが MCS の組織化過程に影響を及ぼし、その結果として MCS の構造や強度が、熱帯対中緯度や海洋性対大陸性など環境場によって大きく変わると言える。

本研究では地上空気塊の CAPE を同じにして浮力プロファイルの違いに対する感度を調べた。通常 CAPE は地上空気塊や境界層で平均した空気塊で診断されるが、ここでは持ち上げる高度を地上から各格子レベルで CAPE を計算した。各格子レベルの空気塊の CAPE は、中緯度型の場合には大きな数値が深い層で存在し、熱帯型では正の CAPE を持つ層が極めて薄いことが分かった。このように浮力プロファイルの違いという環境場の特徴を診断するひとつの方法として、CAPE の鉛直分布を調べることを挙げられる (Takemi 2010)。

3. 全球非静力学数値実験における熱帯のメソ擾乱

那須野 智江 (海洋研究開発機構)

地球上の湿潤対流が多様な時空間スケールをもつ集合体として存在し、メソスケールに組織化した対流システムがその基本要素をなすことは、熱帯・中緯度に共通する特質として知られている。惑星渦度が小さく中緯度に卓越する力学バランスの成立しない熱帯域では、マッデン・ジュリアン振動 (Madden and Julian 1971, 1972; 以下 MJO) に代表されるような惑星規模に及ぶ擾乱があり、また様々な熱帯波動擾乱が常時発生して、階層構造を構成する対流システムに影響を及ぼす。これらの熱帯の対流の振る舞いを数値実験によって正確に再現し、そのメカニズムを解明するためには、数値モデルにおいて湿潤過程を適切に扱うことが極めて重要である。

全球非静力学モデルは、正にこの目的を見据えて開発された画期的な道具立てといえる。世界初の全球雲解像モデル NICAM (Satoh *et al.* 2008) の開発は

2000年から始まり、2005年以降シミュレーション実績を積んできた。理想化実験 (Tomita *et al.* 2005ほか)、現実条件実験 (Miura *et al.* 2007ほか) の実施を経て、近年では積分期間も徐々に伸び (5 ヶ月程度)、温暖化想定計算も行っている。これまでに用いてきた水平格子間隔 ($3.5 \sim 14 \text{ km}$) は積雲対流を十分に解像できるほど細かいとはいえないが、メソスケールの対流システムは近似的に解像できており、熱帯の大規模雲擾乱や雲システムの階層構造やスケール間の相互関係について調べることができた。その結果、従来型の大気大循環モデルや領域雲解像モデルによる研究からは予想できなかった知見も得られつつある。

ここでは2006年12月の MJO 事例の再現計算 (Miura *et al.* 2007) について紹介する。この事例ではゆっくり東進する (約 5 ms^{-1}) MJO に伴う大規模な対流域の中で $10 \sim 15 \text{ ms}^{-1}$ で東進する東西スケール $1000 \sim 2000 \text{ km}$ の対流性擾乱が繰り返し発生しており、数値計算でその両方を再現することができた。シミュレートされた東進擾乱の中にはスコールラインと同様のメカニズムによって 1-2 日間に亘り強い降水を伴うものもあり、これは MJO の発達に伴う鉛直風速シアや潜在不安定の増加の中でよく発達できたケースと思われる。東進擾乱の力学的構造は赤道に捕捉された東進重力波と整合的であり、東進擾乱に伴う対流域の空間分布はまた南北風成分をもつ西進擾乱の位相構造ともよく対応していた。これらは対流の組織化における複数の波動擾乱の複合的な影響を示唆する。よく似た対流の振る舞いは水惑星数値計算においても見られた。今後、長期計算・短期予報計算のそれぞれにおいて計算精度の向上を進めつつ計算事例を積み重ね、メソ気象研究についても新たなメッセージを発信し続けたい。

4. Madden-Julian 振動における降雨バンドに伴う運動量の輸送効果に関する研究

宮川知己 (東京大学大気海洋研究所)

熱帯域を東西数 1000 km スケールの対流活発域が東進する Madden-Julian 振動 (MJO) は熱帯大気において最も顕著な季節内変動であるが、対流活発域の対流雲群に内在する複雑な階層構造の果たす役割の理解が不十分であり、全球大気の数値モデルによる再現精度も低い。

本研究では、全球雲解像モデル (NICAM, Satoh

et al. 2008) が高精度の MJO 再現に成功した事例 (Miura *et al.* 2007) の出力データを用い、MJO 対流活発域内に内在する対流雲システムによる運動量輸送 (Convective Momentum Transport : CMT) に着目して解析した。

NICAM の地表降水量データにより個々の対流雲システムを識別し、それぞれの対流雲システムに伴う運動量輸送が背景場に与える加減速効果のベクトル (CMT ベクトル) を高度別に求めた。CMT ベクトルを MJO の対流中心に相対的な位置で合成した高度別の水平図を作成したところ、以下のような特徴が見られた。

- ・絶対値の大きい CMT ベクトルは MJO 対流中心から西側へ経度20度までの範囲に多く分布する。
- ・MJO 対流中心から西側20度までの範囲に分布する絶対値の大きな CMT ベクトルは明瞭な指向性を示し、その東西成分は地表付近 (~1.6 km) では西風加速、対流圏下層~中層 (2 km~6.5 km) では東風加速、対流圏上層 (11 km~) では西風加速がそれぞれ卓越する鉛直3層構造を形成する。

さらに、MJO の通過に伴う背景東西風の変化における CMT による寄与を運動量の収支解析により調べた。運動量の収支において CMT の効果は大規模場の移流項や気圧傾度項と同等の大きさを持っており、例えば東西風加速成分が負 (東風加速) の CMT ベクトルが顕著であった対流圏下層~中層においては、MJO の通過に伴う東西風変化が平均で +10 m (東→西) であるのに対して、CMT による負の加速効果が平均で -16 m と大きく寄与していた。

出力データの診断的な解析では CMT の効果を除外した場合の他項の振る舞いがわからないため踏み込んだ議論をすることは難しいものの、CMT が MJO の東進を遅らせる、MJO の高度と共に西に傾いた鉛直構造を維持するなどの役割を持つ可能性がある。

またこれらの東西風加速効果は、対流圏中層以下では水平風の鉛直シアを強化する性質を持つことから、従来の大気大循環モデルに用いられている鉛直勾配拡散型の積雲スキームでは表現されないと考えられ、改善の余地があることを示唆している。

5. 東南アジア域における短期予報の精度検証

林 修吾 (気象研究所)

熱帯域を対象とした高解像度の領域モデルによる予報実験は、単発の事例解析的な数値シミュレーション

以外ではあまり行われてこなかった。これは、これまで領域モデルの運用・開発が主に中高緯度を対象に行われて来たことや、熱帯域を対象として十分な計算資源や人的資源を投じることが出来なかったためである。

本研究では、科振費プロジェクト「東南アジア地域の気象災害軽減国際共同研究 (2009年度終了)」において、東南アジア地域の気象予測向上のために数値予報の導入と改善を目指し、これまで予報経験の少ない東南アジア域での数値予報を1ヶ月分実行した。その予報精度を統計的に検証した結果を報告する。

この目的のために次のような設定で数値実験を行いその予報精度を統計的に比較・検証した。

1. 二つの解像度：水平格子間隔20 km と 5 km。
2. 二つの領域：東南アジア域と日本域。
3. 二つのモデル：NHM (Saito *et al.* 2006) と WRF-ARW (Skamarock *et al.* 2005)。

20 km 解像度ではどちらのモデル・領域とも NCEP-GFS 予報値を初期値・境界値に与え、同じ格子数で36時間予報を行った。5 km 解像度モデルは20 km 解像度モデルの6時間予報値から1-way ネスティングし30時間予報を行った。それぞれ1ヶ月分予報し後半24時間を検証に利用した。予報精度検証には、全球降水データ (CMORPH)、地上気象観測、ゾンデ観測を用いた。

これにより以下のような結果が得られた。

1. 解像度：どちらの領域でも、高解像度 (5 km) の方が予報精度が良かった。
2. 領域：東南アジア域での対 CMORPH 3時間降水量の予報精度は、全く同じ設定を使っている日本域に比べ、とても悪かった (イクイタブルスコアで半分以下)。気温と湿度の鉛直プロファイルは、東南アジア域では大きなバイアスがあった。気温の日変化は日本域ではよく再現されていたが、東南アジア域では (2地点のみの観測との検証だが) 日変化が小さく予報されていた。
3. モデル：どちらのモデルも、日本域ではよいスコアを示し、東南アジア域ではよくないスコアを示した。CMORPH 3時間降水量に対する予報精度は、どちらの領域でも NHM の方が WRF よりわずかに良かった。鉛直プロファイルはどちらも同じ程度の子報精度だったが、東南アジア域での NHM の相対湿度は予報精度が悪かった。日本域での NHM の地上気温の子報精度は極めてよかった。東南アジ

ア域のNHMの気温日変化は観測&WRFよりも小さく悪かった。

このように、同じ設定で実行した場合でも、東南アジア域の方が日本域よりも全般的に予報精度が悪かった。ここでは示さないが、モデルのパラメータ等をいくつか変更してもこの傾向は変わらなかった。熱帯域での予報精度の向上には、より詳細にモデルの再現性を調査し、個々の問題点の解消に努めていく必要がある。

6. 熱帯メソ擾乱：衛星観測の限界に挑む

増永浩彦（名古屋大学地球水循環研究センター）

衛星観測は惑星・総観規模の擾乱を捉える上で欠かさない手段である一方、メソスケールの擾乱を直接とらえる能力には限界がある。Nakazawa (1988) は静止気象衛星赤外データをもとに季節内変動からクラウドクラスターに至る雲擾乱の階層構造を明らかにしたが、メソスケール擾乱はクラウドクラスターよりもさらに下部の階層を構成し固有の内部構造を持つことが知られている（本稿の第7節を参照）。そもそも、雲層下に隠れた雨域を直接判別できない静止衛星データから、メソ擾乱を直接同定することは難しい。一方、熱帯降雨観測衛星（TRMM）に代表される低軌道衛星は過去10年で急速な技術的発展を見せ、これらの衛星が上空を通過した瞬間のスナップショットからメソ擾乱の詳細な空間構造を解析できるようになった。しかし低軌道衛星の観測頻度は一日2回程度と間欠的で、個々のメソ対流系を追跡する定点観測には向かない。対流システムが発達する前後数時間から数日にわたり大気環境場（気温や湿度など）が推移する時間変化を明らかにするには、半日に一度の観測間隔では自ずと限界がある。

しかし、軌道要素の異なる二つの低軌道衛星を組み合わせると、すこし面白い解析ができる。上述のTRMM衛星は、観測地方時が約23日周期でドリフトする太陽非同期軌道を周回するため、他の太陽同期衛星（決まった地方時に上空を通過する衛星）と観測時刻が異なり、かつその時刻差が日々変動する。そこで、この観測時刻差を変数に取ってTRMMとAqua衛星搭載赤外サウンダAIRS（気温や大気ガスの鉛直分布を推定するセンサ）の長期間観測値を集計し、気温・湿度プロファイルが積雲対流の前後で推移する大気熱力学場の時系列を統計的に描き出すコンポジット解析を試みた。

解析の結果から、深い対流の発達に先立つ自由対流圏の湿潤化および対流発達後の乾燥化が明確に見られた。また対流活発期には、対流圏上層で気温の正偏差および下層では負偏差が見られた。いわゆるTop-heavyな Q_1 プロファイルが前者の上層加熱をもたらす一方、対流圏下層では大規模上昇流に伴う断熱冷却が卓越し気温の低下をもたらしたと考えられる。このような湿度と気温変化が複合的に関わる結果として、CAPEは深い対流の直前半日程度で急激に減少し、その後1-2日かけて緩やかに回復することが明らかになった。深い対流が急速にCAPEを消費する観測事実は「準平衡」仮説（Arakawa and Schubert 1974）が前提とする迅速な対流調節が機能していることを裏付けるが、対流発達後のCAPE回復期の存在は、対流調節が大規模場の不安定を単純に解消するよりは大気応答が減衰振動のように振る舞うことを示唆する。一方、浅い対流についても同様なコンポジット解析を実行した。誌面の都合で詳細は省くが、浅い対流と大規模大気場の相互作用は深い対流とは定性的に異なる振る舞いを示すことが確認された。これらの解析はまだ試行段階ではありさらなる検討が必要だが、低軌道衛星の時間サンプリングの限界を補う新たな解析手法の有用性を示すと言えるだろう。

7. スーパークラウドクラスターに伴う降水システムの観測的研究

山田広幸（海洋研究開発機構）

熱帯の対流活動は、大気循環の原動力としての役割を持つが、その伝播特性には依然として不明な点が多い。赤道線を東へ伝播する大規模な雲域であるスーパークラウドクラスター（以下SCC）は、それより小規模なクラウドクラスター（CC）により構成されることが知られており、そのCCは西進することが多いが、時には東進することもある（Chen *et al.* 1996）。CCの伝播特性と赤道波との関係が過去に調べられている一方、衛星赤外画像で識別できる雲域は上層の雲の動きを表したもので、対流域の動きを表したのではないと指摘する研究例がある（Rickenbach 1999）。実際、2006年に赤道インド洋で実施された特別観測（MISMO）では、西進する雲域の中を東進する背の低い対流性降水システムが、観測船「みらい」搭載のレーダーによって観測されている。つまり、対流域の伝播特性を理解するためには、その動きを雲頂ではなく降水強度の分布から識別する必要があ

る。本発表では一例として、MISMO 期間中の東進する降水システムの構造を調べた Yamada *et al.* (2010) の解析結果を紹介した。この研究では、衛星マイクロ波から推定された降水強度を用いて降雨域を識別し、降雨強度が極大となる経度を中心に観測データをコンポジットすることにより、その平均的な構造を調べている。

東進する降水システムは、ひとつの SCC 内に複数存在し、東西500 km、南北1000 km 程度の水平規模を持っていた。海上風の東西収束は、降水強度が極大となる経度より約300 km 東側に位置しており、ここでは背の低い対流性エコーが多く存在し、それより西では背が高く層状エコーの割合が増加した。高層データを用いて鉛直構造を調べたところ、東西風と温度の偏差は、ともに対流圏内で上に向かって西に傾き、成層圏では逆に東へ傾く構造がみられ、東進するケルビン波に似た構造を伴っていた。下層収束と対をなす発散域は高度10 km 付近に存在し、上昇流が圏界面まで達しない浅いものであることが示唆された。これらの解析結果は、東進する SCC の中に背の低い総観規模(波長2000 km 程度)の東進する重力波が存在していることを示唆している。

このような東進する降水システムは、2次元の数値実験において重力波の応答として現れる降水系(Numaguti and Hayashi 2000など)と似ている。また、東進速度が 8.7 ms^{-1} と遅い点も、等価深度が小さいことと整合的である。このことから、SCC の東進には浅い重力波の存在が関係している可能性がある。このことは、観測事例のさらなる蓄積と、雲解像モデルを用いた数値実験によって検証される必要があるだろう。

8. 総合討論

上記6件の発表をもとに、主に2つの点について議論を行った。ひとつは雲の組織化に対する浅い対流の役割である。これまで、メソ対流システムの組織化においては、圏界面まで達する深い対流の役割が注目されてきたが、この研究会では浅い対流の存在、またはその役割に触れた発表が4件(那須野、宮川、増永、山田)もあったことは意外だった(注:これはコンピューターが事前に意図して人選した結果ではない)。浅い対流は、MJO の対流発生期に卓越するなど、熱帯気象の分野でも注目を集めつつある。衛星観測や雲解像数値モデルの発展とともに、その力学的・熱力学

的な役割の解明が進むことが期待される。

もう一つの論点は、領域モデルの精度が熱帯では中緯度ほど良くないことである。本研究会では一例として林(気象研)に報告して頂いたが、他のモデルも同じ問題を抱えているという報告がある。これには初期値・境界値に用いる親モデルの予報精度や、積雲対流パラメタリゼーションの抱える問題など、モデルに内在する要因が関係すると考えられる。さらに、竹見(京都大学)の講演にあるように、同じCAPEでも浮力プロファイルが熱帯と中緯度とは異なることや、対流の発現に必要な強制力の弱さなど、メソ対流系の発達機構が地域によって異なることにも起因していると考えられる。この問題について、メソ対流系の構造や発達過程をモデル間で相互比較して原因を究明してみるのが良いとの提案があった。その相互比較には異なるモデルの出力結果を共通のサーバーに蓄積し、観測データとも比較できる環境を整備する必要があることも提案された。これらの実現は予算の都合上直ちには難しいかもしれないが、検討の価値がある。いずれにしても、熱帯気象はメソ気象の観点から見て研究の余地を多く残す分野であるため、いずれまた熱帯をテーマとしたメソ気象研究会を提案してみたい。

謝辞

今回のメソ気象研究会を開催するに当たって、研究会事務局の気象庁の加藤輝氏には多大のご助力を頂きました。また、会場の予約・準備・運営には、京都大学防災研究所の竹見哲也准教授および職員、学生の方々に協力して頂きました。この場を借りて謝意を表する次第です。

略語一覧

AIRS : Atmospheric Infrared Sounder
 CAPE : Convective Available Potential Energy
 CMORPH : Climate Prediction Center Morphing Technique
 GFS : Global Forecast System
 MCS : Mesoscale Convective System
 MJO : Madden-Julian Oscillation
 NCEP : National Centers for Environmental Prediction
 NHM : Nonhydrostatic Model
 NICAM : Nonhydrostatic Icosahedral Atmospheric Model
 TRMM : Tropical Rainfall Measuring Mission
 WRF : Weather Research and Forecasting Model

参 考 文 献

- Arakawa, A. and W. H. Schubert, 1974 : Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 674-701.
- Chen, S. S., R. A. Houze Jr. and B. E. Mapes, 1996 : Multiscale variability of deep convection in relation to large-scale circulation in TOGA COARE. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 1380-1409.
- LeMone, M. A. and E. J. Zipser, 1980 : Cumulonimbus vertical velocity events in GATE. Part I : Diameter, intensity and mass flux. *J. Atmos. Sci.*, **37**, 2444-2457.
- Lucas, C., E. J. Zipser and M. A. LeMone, 1994 : Vertical velocity in oceanic convection off tropical Australia. *J. Atmos. Sci.*, **51**, 3183-3193.
- Madden, A. R. and P. R. Julian, 1971 : Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, **28**, 702-708.
- Madden, R. A. and P. R. Julian, 1972 : Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40-50 day period. *J. Atmos. Sci.*, **29**, 1109-1123.
- Miura, H., M. Satoh, T. Nasuno, A. T. Noda and K. Oouchi, 2007 : A Madden-Julian Oscillation event realistically simulated using a global cloud-resolving model. *Science*, **318**, 1763-1765.
- Nakazawa, T., 1988 : Tropical super clusters within intraseasonal variations over the western Pacific. *J. Meteor. Soc. Japan*, **66**, 823-839.
- Numaguti, A. and Y. Hayashi, 2000 : Gravity-wave dynamics of the hierarchical structure of super cloud clusters. *J. Meteor. Soc. Japan*, **78**, 301-331.
- Rickenbach, T. M., 1999 : Cloud-top evolution of tropical oceanic squall lines from radar reflectivity and infrared satellite data. *Mon. Wea. Rev.*, **127**, 2951-2976.
- Saito, K., T. Fujita, Y. Yamada, J. Ishida, Y. Kumagai, K. Aranami, S. Ohmori, R. Nagasawa, S. Kumagai, C. Muroi, T. Kato, H. Eito and Y. Yamazaki, 2006 : The Operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. *Mon. Wea. Rev.* **134**, 1266-1298.
- 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. Comput. Phys.*, **227**, 3486-3514.
- Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang and J. G. Powers, 2005 : A Description of the Advanced Research WRF Version 2. NCAR Tech. Note, (468), 88pp.
- Takemi, T., 2007 : Environmental stability control of the intensity of squall lines under low-level shear conditions. *J. Geophys. Res.*, **112**, D24110, doi : 10.1029/2007JD008793.
- Takemi, T., 2010 : Dependence of the precipitation intensity in mesoscale convective systems to temperature lapse rate. *Atmos. Res.*, **96**, 273-285.
- Tomita, H., H. Miura, S. Iga, T. Nasuno and M. Satoh, 2005 : A global cloud-resolving simulation : Preliminary results from an aqua planet experiment. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L08805, doi : 10.1029/2005GL022459.
- Yamada, H., K. Yoneyama, M. Katsumata and R. Shirooka, 2010 : Observations of a super cloud cluster accompanied by synoptic-scale eastward-propagating precipitating systems over the Indian Ocean. *J. Atmos. Sci.*, **67**, 1456-1473.
- Zipser, E. J., D. J. Cecil, C. Liu, S. W. Nesbitt and D. P. Yorty, 2006 : Where are the most intense thunderstorms on Earth? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **87**, 1057-1071.