

第8回非静力学モデルに関するワークショップの報告*

齊藤和雄^{*1}・岩崎俊樹^{*2}・佐藤正樹^{*3}・本田有機^{*4}
加藤輝之^{*5}・栗原和夫^{*6}・余偉明^{*7}・新野宏^{*8}

1. はじめに

2006年11月29日～30日に第8回非静力学モデルに関するワークショップ(主催: 気象研究所・日本気象学会非静力学数値モデル研究連絡会)が気象研究所で開催された。本ワークショップは、高精度非静力学モデルを利用した気象及び気候研究の推進、非静力学モデルの力学フレーム・物理過程の開発に関する情報交換の場として1999年に始まった。最初の2回は、非静力学数値モデルの共同利用・共同開発の枠組みを探るための有志団体による打ち合わせ会として行われ、日本気象学会の下部組織「非静力学数値モデル研究連絡会(非静力2000)」が発足した2001年度の第3回目からは、科学的な議論を深めることに主眼を置いたオープンなワークショップとなっている。第1表に示すように、毎年秋の行事として定着してきている。今回は、気象研究所が非静力学数値モデル研究連絡会とともに主催となり、つくばでの初めての開催として気象研究所講堂で2日間に渡りワークショップを開催した。

1955年に米国で数値予報の業務化が始まって約半世紀が過ぎ、この間、気象モデルはバロトロピックモデルから準地衡風モデル、プリミティブモデルへと大気状態を記述する方程式系の近似を除去しながら精度を

高めてきた。非静力学モデルは、当初、小スケールの現象理解のための研究用の道具として開発されたが、現在では現業メソ数値予報に本格的に用いられるようになってきている。気象庁では気象研究所とともに気象庁非静力学モデル(JMA-NHM; 以下単にNHMとする)を開発し、2004年に、英国、ドイツに次いで主要予報センターでは世界で3番目に、非静力学メソモデル(MSM)の現業運用を開始した(Saito *et al.*, 2006)。2006年3月からは、モデルの分解能を水平5km、鉛直50層へと強化している。これは東西4000km近い領域をカバーする本格的数値予報モデルとしては、現時点で世界最高の解像度である。また2006年に入ってから、米国環境予測センターが6月に、中国気象局が7月に、それぞれ現業領域モデルの非静力学化を行っている。一方、地球環境フロンティア研究センターでは非静力学正20面体大気モデルNICAM(Satoh *et al.*, 2005)を開発し、地球シミュレータを用いた全球雲解像シミュレーションを開始している。かつてプリミティブモデルが数値予報モデルのスタンダードとなったように、気象予報モデルにとって非静力学モデルは特殊なものではなくなりつつある。

今回のワークショップは、気象研究所で開催されたこともあり、29件の研究発表とこれまでで最大規模の109名の参加者があった。対応者の予想を超える数で、用意した100部の予稿集が初日でなくなってしまう、急遽コピーで増刷することになってしまった。参加者が多かったのは、気象研究所から、従来のメソ気象関係者に加えて、気候研究部や海洋研究部などからも含む58名の参加があったためだった。本ワークショップのセッション(第2表)に見られるように、現在の非静力学モデルの対象は気候研究から乱流にいたる気象学の幅広いレンジに渡っており、その応用範囲をさらに広げようとしている。

以下に、各セッションの座長による講演内容の概要

* Report on the 8th Workshop on Nonhydrostatic Modeling.

^{*1} Kazuo SAITO, 気象研究所.

^{*2} Toshiaki IWASAKI, 東北大学大学院理学研究科.

^{*3} Masaki SATOH, 東京大学気候システム研究センター/地球環境フロンティア研究センター.

^{*4} Yuki HONDA, 気象庁数値予報課.

^{*5} Teruyuki KATO, 気象研究所.

^{*6} Kazuo KURIHARA, 気象研究所.

^{*7} Weiming SHA, 東北大学大学院理学研究科.

^{*8} Hiroshi NIINO, 東京大学海洋研究所.

© 2007 日本気象学会

第1表 これまでの非静力学モデルに関するワークショップ。

	期日	場所	参考文献
第1回	1999年9月29日(水)	東大気候システム研究センター(東京)	
第2回	2000年3月17日(金) -3月18日(土)	東北大学(宮城)	
第3回	2001年9月18日(火) -9月19日(水)	学術総合センター(東京)	岩崎ほか(2002)
第4回	2002年11月30日(土) -12月1日(日)	コープイン京都(京都)	里村ほか(2003)
第5回	2003年11月25日(火) -11月26日(水)	海洋科学技術センター(神奈川)	佐藤ほか(2004)
第6回	2004年11月25日(木) -11月26日(金)	パレス松洲(宮城)	野田ほか(2005)
第7回	2005年10月5日(水) -10月6日(木)	東京大学海洋研究所(東京)	新野ほか(2005)
第8回	2006年11月29日(水) -11月30日(木)	気象研究所(茨城)	本報告

第2表 第8回非静力学モデルに関するワークショップのセッション。

期日	セッション	本報告	座長
11月29日(水)	趣旨説明		斉藤
	海洋モデルと大気海洋結合モデル	2.1節	佐藤
	雲解像モデル, 降雪	2.2節	本田
	データ同化とアンサンブル予報	2.3節	岩崎
	懇親会		岩崎
11月30日(木)	台風	2.4節	加藤
	気象庁現業モデル	2.5節	栗原
	全球モデル	2.6節	斉藤
	局地モデル	2.7節	余
	境界層・都市気象モデル	2.8節	新野
	総合討論	2.9節	斉藤

を紹介する。なお、pdfファイル化されたワークショップ予稿集は、気象研究所のホームページ <http://www.mri-jma.go.jp/Topics/NHMworkshop/8thNHMworkshop.html> から入手できる(後日、非静力学数値モデル研究連絡会のホームページ <http://wind.geophys.tohoku.ac.jp/nonhydro/workshop/> にアーカイブされる予定)。(斉藤和雄)

2. セッションの概要

2.1 海洋モデルと大気海洋結合モデル

本セッションでは2件の海洋非静力学モデルと1件の大気海洋結合モデルの発表があった。海洋モデルについては、松村(東大気候システム研究センター)と

中野(気象研究所)、結合モデルについては石川(京都大学大学院理学研究科)が発表を行った。

松村、中野両氏ともに、ビジネス非圧縮方程式系を用いたモデルを開発しており、沈み込み域のプリュームのシミュレーションの結果などを示した。非圧縮系方程式系ではポアソンソルバーが必要になり、松村はマルチグリッド法、中野は前処理付き双共役残差法を採用している。ポアソンソルバーの高速化には多くの課題があり、並列化や地形の扱いも関係するので、両氏ともさまざまな工夫を試みている。

石川・里村(京都大学大学院理学研究科)は大気海洋結合モデルを用いて、平均背景風による熱帯の対流の組織化の違いを調べ、WISHE (Wind Induced Surface Heat Exchange) の影響は特に重要ではないと結論付けた。この研究では、海面状態を海洋モデルの循環を解いて求めている

ことが特徴であるが、運動のない混合層モデル (slab ocean) を用いても結果は変わらないとのことである。大気の積雲シミュレーションで、大気海洋結合の効果が重要かどうかについては、まだ一般的な結論は得られていないようである。

従来の大循環モデルでは、大気と海洋モデルの開発が比較的独立にすすめられてきたのに対し、非静力学モデルに関しては方程式系や数値スキーム、地形の扱い、モデルの妥当性の確認のための標準実験など、大気と海洋に多くの共通な課題があり、今後も連携を進めていくことが望まれる。また、今回はワークショップを通して熱帯の積雲対流の講演は少なかったもので、次回に多くの発表を期待したい。(佐藤正樹)

2.2 雲解像モデル, 降雪

本セッションでは, 気象庁気象研究所で行われている水平分解能 1 km 以下の NHM による数値計算を利用した研究に関して 4 件の報告がなされた。

村田 (気象研究所) は, 質量フラックス型の積雲対流パラメタリゼーションでのデトレイメントの改良を目的に, 水平分解能 200 m の JMA-NHM の予報結果から抽出された積雲についてエントレイメント率を計算し, デトレイメントを検出した。エントレイメント率に対する鉛直速度, 雲量の寄与を評価し, デトレイメントと負の浮力鉛直傾度に強い相関があることを示し, 浮力が急激に減少することで空気塊が上下に収縮しデトレイメントが起こっていることを示唆した。

加藤・林 (気象研究所) は, 2005年12月の豪雪時について, 水平分解能 1 km の NHM で予報されている雲頂高度が2006年1月よりも高いことを確かめ, 客観解析データの解析から分かっている積乱雲の潜在的発達高度が例年より 100 hPa ほど高いことと整合していることを示した。また, 水平分解能 5 km の NHM では雪雲の雲頂高度が高くなることやダブルピークを持つことを示し, 解像度や積雲対流の取り扱いの違いによる影響を示唆した。

永戸・青梨 (気象研究所) は, NHM に見られる雪の過大評価の水平解像度依存性の調査のため, 水平分解能 5 km, 2 km, 1 km, 0.5 km, 0.25 km, 0.125 km の実験を行った。この結果, 地上降水量分布などについては大きな違いはなく, 降水物質別にみても解像度向上とともに雪が減りあられと雲水が増加する傾向はあるが, 0.5 km 以下では解像度依存性がなくなることを確認した。しかし, 雪の過大評価の解消には繋がらなかったため, 雲物理過程の改良の必要性を示した。

橋本 (気象研究所) ほかは, NHM にドライアイスの上昇による氷晶発生とシーディング飛行機の飛行経路長を求めるためのスキームを組み込み, シーディングによる降雨・降雪に与える影響の定量的評価を事前に行うことを試みた。水平分解能 500 m のシミュレーションを行い, シーディングにより増大した氷晶数濃度が実験結果と整合がとれていて, 増雪効果があることを確認した。(本田有機)

2.3 データ同化とアンサンブル予報

4次元データ同化技術は数値モデルとともに予報精度を支配する重要なプロセスである。数値モデルの性

能が向上するに従い, その重要性はますます高まっている。本セッションでは5つの講演があった。

本田 (気象庁) は, NHM をベースとした4次元変分法によるデータ同化スキームについて講演した。開発は現業化の最終段階にあり, サイクル実験を行っている。雲物理過程を含むデータ同化スキームもすでに開発されているが, 計算時間の制約から当面利用しない。

川畑・黒田 (気象研究所) ほかは雲物理過程を含めた非静力学4次元変分法によりドップラーレーダー動径風データやGPS可降水量を同化し, 予報へのインパクトを調べた。練馬豪雨のケースは良く再現されたが, レーダー反射強度データを同化すると, 再現結果はその手法の違いに大変敏感で, 降水にかかわる非線形の効果についてさらに検討が必要だとしている。

清水 (防災科学技術研究所) ほかは, Xバンド・マルチパラメータレーダのデータをナッジング法により雲解像モデル CReSS に同化し, 降水強度の維持について調べた。デュアルドップラーシステムによって得られた2次元水平風を同化するとともに水蒸気量を調整することによって降水を維持することが出来た。

三好・荒波 (気象庁) は, アンサンブル・カルマンフィルタを NHM に適用した。領域モデルの場合, 側面境界近くではスプレッドが小さくなり観測データを取り込むことが困難となる場合があるが, 内部領域ではスプレッドも大きくなり, アンサンブル・カルマンフィルタを有効に使えることを確認した。

齊藤 (発表は瀬古, 気象研究所) ほかは, 2008年北京オリンピックに合わせて実施されるアンサンブル予報比較実験について話した。水平解像度を 15 km に揃え, 5機関の領域モデルについて予報比較を行った。NHM の結果ではアンサンブル予報のスプレッドが小さいものの, 予報精度は高かった。好成績の主な理由は4次元変分法による領域解析を初期値に利用したためだと考えた。(岩崎俊樹)

2.4 台風

本セッションでは台風の発達メカニズムおよび付随現象に関する2つの話題が提供された。まず, 沢田 (東北大学大学院理学研究科) ほか理想化した台風の数値実験 (水平格子間隔 5 km) から氷晶過程の有無・氷晶の落下速度が台風の発達や構造に及ぼす影響について発表した。氷晶過程を考慮した実験 (cold rain) に比べて, 氷晶を含まない実験 (warm rain)

では目の大きさや最大風速半径が約1.5倍になり、中心気圧も深まり、台風が過度に発達することを示した。また感度実験の結果から、氷晶の融解・昇華蒸発の影響が大きいことが示唆され、氷晶の落下速度の遅いことが議論された。

益子（気象研究所）は、2way 多重移動格子モデル（水平格子間隔 6 km と 2 km）を用いて、台風0422号が関東沿岸を通過時に台風の中心近傍でもたらされた強風の形成メカニズムについて調べ、“gap flow”と呼ばれるメカニズムと同等であることを示した。“gap flow”とは、山岳によって流路幅が狭まることで捕捉された冷気が、山岳の影響がなくなる出口で発散的に広がり下降することで作られる強風のことである。益子はさらに、水平解像度250 m の雲解像モデルを用いることで、台風0613号にともない延岡で発生した竜巻をもたらした積乱雲の再現に成功し、スーパーセルの構造を持っていることを示した。（加藤輝之）

2.5 気象庁現業モデル

気象庁では 5 km メッシュ非静力学モデル (MSM) を現業メソ数値予報モデルとして運用している。気象庁のメソ数値モデルは精度向上を目指して常に改良が進められているが、今回発表された2007年度中の運用のための改良は、実り多いものと感じられた。

荒波（気象庁）ほかがその概要を示したが、改良は多岐に渡っている。主なものは、鉛直座標としてハイブリッド座標を導入し対流圏中上層のノイズ軽減を図ったこと、乱流過程として Mellor-Yamada Level3と部分凝結スキームを組み込み、放射過程に用いる雲量に部分凝結スキームで計算した雲量を使用すること、雲水の落下を考慮すること、および、Kain-Fritsch スキーム（以下 KF スキーム）の改良などである。さらに初期値としてメソ4次元変分法アウトーループに非静力学モデルの3時間予報値を用いるようにしている。これらの改良を加えたモデルの精度は向上し、強い降水の表現が格段に改良された事例や、降水のスコアが向上し、気温の日較差が実際に近くなることなどが報告された。

これらの改良の詳細が3つの講演で示された。長澤（気象庁）は、放射計算に用いる雲量を、これまでの統計的な相対湿度と雲量の関係からの計算にかわり、雲物理学から求められる雲の量によって計算する方法を検討している。しかし、雲が降水域などの限られた

場所にしか計算されず、地表面での短波放射が過大になる。原（気象庁）は Nakanishi and Niino (2006) によって開発された Mellor-Yamada Level3の改良スキームを導入し、部分凝結スキームによる雲水量、雲水量を放射計算に使うことを試みた結果を報告している。この改良により、気温、風速、高度などの鉛直プロファイルが改善し、短波放射量も適切になった。現業モデルではこの結果が採用される。非静力学 MSM では降水過程として雲物理過程と同時に KF スキームを併用している。成田（気象庁）は、これについてトリガー関数に相対湿度に基づく摂動を与えることにより、格子スケールの不自然な対流の発生を押さえることができることを示した。

モデルが高分解能になるに従って、わずかな降水域のずれでも統計的なスコアの悪化を招く。そのため、低解像度モデルに比べて、精度が適正に評価できないことは、これまで常に問題にされてきた。瀬川・本田（気象庁）はこれに対し、検証格子を設定し、その中の降水が閾値を越えるモデル格子数とレーダーアメダスの観測格子数を用いて格子降水面積率を求め、それから予報精度を評価する格子降水面積スコア (PAS) を提案している。これにより MSM と 20 km 領域モデル (RSM) を比較し、1 mm 以上の降水、10 mm 以上の降水とも MSM の精度が高いことを明らかにした。このようなメソモデルに適した精度評価方法は、今後の開発に大きく役立つものと期待される。（栗原和夫）

2.6 全球モデル

本セッションでは、全球モデルに関する最近の取り組みに関する3件の報告があった。

彭（地球シミュレータセンター）は、陰陽グリッド上球面浅水波の特性線解法について講演した。数値計算上の時間刻みの制約を緩和する手法として、セミインプリシット法が使われているが、楕円方程式など大規模な行列計算を必要とする。特性線解法は電磁気分野で行われている方法で、時空間平面を情報が伝わる伝播速度に沿って解を求める。彭は浅水波モデルを介して重力波と流れをセミラグランジュ的に一緒に解く解法を試み、重力波の伝播速度によらない大きな時間刻みで安定な積分が可能であることを示した。非静力学モデルへの応用は、音波項をどのように特性方程式に整理するかが課題である。

佐藤（東大気候システム研究センター/地球環境フ

ロンティア研究センター)は、開発中の非静力学正20面体大気モデル NICAM の現状と課題について報告した。これまで、理想的な水惑星条件下での3.5 km メッシュ全球雲解像実験を実施し、現実的な海陸分布・地形を導入した実験に取りかかっている。地形を導入した現実条件化の積分を安定に行うために、地形の急勾配を取り除く非線形フィルター、3次ルンゲクッタ法による時間積分、鉛直拡散を計算する場合の安定度に制限をかける手法などを開発した。モデル開発を促進するために、地球半径を小さくした小惑星実験やストレッチ格子モデルなどを用いて放射対流平衡実験や物理過程開発を行っている。

三浦(地球環境フロンティア研究センター)ほかは、NICAM を用いた現実気象場の再現実験について報告した。NCEP 再解析データを初期値に用いて、積雲パラメタリゼーションなしに14, 7, 3.5 km の解像度による実験を行った。中緯度の雲分布の時間変化や、台風の移動・発達について、現実と定量的に比較できるような結果が得られた。一方で、熱帯において雲の組織化が過大評価される、海洋性大陸での積雲の日変化が再現されない、などの問題も見られた。境界層スキームによる水蒸気混合に改善すべき点があると考えられ、改良を進めている。(斉藤和雄)

2.7 局地モデル

中村・野田(地球環境フロンティア研究センター)は、NHM を用いて、GCSS モデル間雲比較実験プロジェクトで境界層内の層雲・浅い対流雲ケースについて再現実験を行い、そのモデリング結果を紹介した。観測と似たような結果が得られているが、モデル間での比較結果としてまだ収束には至っていない。今後、ビン法による計算結果を参考してパラメタリゼーションスキームの確立が重要であると示された。

栗原(気象研究所)ほかは、日本地域における詳細な地球温暖化予測のため、陸面過程モデル SiB を組み込んだ NHM を用いて 4 km 解像度の地域気候モデルを開発した。その性能評価として2001年9月から2002年8月までの1年間長期積分を実施しその結果を報告した。検証には観測のアメダス気温とレーダーアメダス降水量が用いられて概ね一致した結果が得られたが、気候値の再現を調べるには更に長期間積分が必要である。

中山(気象庁)ほかは、力学的短時間予報と飛行場予報に限定した将来的に現業予報利用可能な水平格子

間隔 2 km 程度の高分解能局地モデル(LFM)開発の途中経過及び予備実験の結果について話した。気象庁 MSM に比べて、LFM は高速データ同化技術を導入するほかに多面にわたり性能がアップされている。MSM は水平格子間隔 5 km で鉛直50層だが、LFM は 2 km で60層になっている。MSM には積雲対流スキームを用いているに対して、LFM は雲物理のみである。予備実験の結果では、降水強度のピークがよく表現されたものの、弱い降水の予報精度が悪く強い降水の頻度が過剰に出る等の問題点があり、今後改良を重ねていく。

星野(東北大学大学院理学研究科)ほかは、構築中の宮城県における局地気象予報システム Down Scaling Simulation System (DS3) について紹介した。2006年6月より、気象庁 MSM の水平解像度 5 km よりさらに細かい 1.5 km 格子間隔で宮城県の局地気象数値予報を試験的に行っている。現在、予報結果は東北大学気象研究室にある専用 web ページに講座内限定で公開している。DS3はまだ試運転段階であり、今後はシステムの前報性能を評価し、高解像度の局地気象予報システムとして完成させる。(余 偉明)

2.8 境界層・都市気象モデル

野田(地球環境フロンティア研究センター)ほかは、独自に開発した、雲を伴う大気境界層乱流の1次元パラメタリゼーションスキームを提案し、やませ発生時の高層観測データを用いてその結果が LES (Large Eddy Simulation) モデルと遜色ないことを示した。ここで、部分凝結スキームとしては Mellor (1977) を用いている。また、このスキームを 10 km 格子の NHM に組み込み、やませの再現が改善される可能性を示した。

青柳・清野(気象研究所)は、NHM に気象庁(2005)の簡易都市キャノピーモデルを組み込み、2005年夏の典型的な晴天日に適用した結果について報告した。大手町での気温の観測結果と比較したところ、キャノピーモデルを組み込まない場合に比して、午前中は差が無いものの、午後から明け方にかけては 2 K ほど高温になり観測に近づくことがわかった。今後、熱伝導方程式にもとづくビル温度の予報やビル/地面間の熱的相互作用係数の取り扱いを改善するなどの工夫を図っていく計画とのことであった。

余(東北大学大学院理学研究科)は、日中の都市キャノピーのモデリングに資するため、建築研究所の

風洞実験で測定された粗度要素上の不安定成層流をLESで再現することを試みた。粗度要素1つ1つを忠実に表現する詳細な計算には感銘を受けたが、計算コストを下げるために周期境界条件を用いざるを得ない点はLESの弱点で、対流混合層が下流に向かって成長する風洞実験との整合性をどうとるかが今後の課題のように思われた。(新野 宏)

2.9 総合討論とまとめ

総合討論では、斉藤（気象研究所）が司会となって、2日間のワークショップでの質疑を振り返った。大気モデルと海洋モデルには多くの共通点があり、ポアソンソルバーの開発などで情報交換・連携が可能であること、雲解像モデルはパラメタリゼーション研究の有力な道具になること、現実的な気象人工制御のシミュレーション実験が可能になってきたこと、非静力学4次元変分法では降水過程の非線形性への対処が解決すべき問題として残っていること、気象庁現業モデルでは予報時間延長に伴い、物理過程の改良が大きく進展していること、全球モデルには、結合型モデルと準一様格子、セミインプリシットセミラグランジアンなどいくつかの方式が考えられ、結論は出ていないものの、全球雲解像実験が可能になりつつあること、領域気候モデルや、雲解像局地モデル、LESを用いたパラメタリゼーション研究が盛んになるであろうこと、などを確認した。雲解像モデルを用いた顕著現象の再現に関して、北海道佐呂間町で発生した竜巻をもたらした積乱雲の再現実験について、加藤（気象研究所）に、臨時の話題提供をしてもらった。

今回のワークショップは、気象研究所で開催したこともあり、NHMに関連する講演が多数を占めた。少々偏った集会になるのではとも危惧したが、気象庁外の多くの参加者からも、大変面白いワークショップだった、大成功だったと思う、などの感想を聞くことができた。気象庁予報部数値予報課から現業モデル改良に関して多くの講演があったが、モデルの問題点などについてよく調べており、他のモデルを開発している者にとっても有意義な研究会だったのではと思う。来年のワークショップは京都で行う予定になってお

り、新しい話題について、さまざまな情報が得られるものと楽しみにしている。

最後になりますが、本ワークショップの開催にあたって、気象研究所企画室、会計課、総務課、および研究部の関係者に、準備や運営で大変お世話になりました。深く御礼申し上げます。(斉藤和雄)

参考文献

- 岩崎俊樹, 斉藤和雄, 里村雄彦, 室井ちあし, 新野 宏, 2002: 第3回非静力学モデルに関するワークショップの報告, 天気, 49, 299-301.
- 気象庁, 2005: ヒートアイランド監視報告(平成16年夏季・関東地方), <http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpinfo/himr/2004/chapter02.html> (最終閲覧2007年1月17日).
- Mellor, G.L., 1977: The Gaussian cloud model relations, *J. Atmos. Sci.*, 34, 356-358.
- Nakanishi, M. and H. Niino, 2006: An improved Mellor-Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog, *Bound.-Layer Meteor.*, 119, 397-407.
- 新野 宏, 伊賀啓太, 瀬古 弘, 吉崎正憲, 岩崎俊樹, 斉藤和雄, 里村雄彦, 2005: 第7回非静力学モデルに関するワークショップの報告, 天気, 52, 935-939.
- 野田 暁, 竹見哲也, 若月孝泰, 日下博幸, 富田浩文, 本田有機, 永戸久喜, 岩崎俊樹, 2005: 第6回非静力学モデルに関するワークショップの報告, 天気, 52, 369-372.
- 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.
- 佐藤正樹, 岩崎俊樹, 安永数明, 榎本 剛, 本田有機, 竹見哲也, 2004: 第5回非静力学モデルに関するワークショップの報告, 天気, 51, 371-374.
- Satoh, M., H. Tomita, H. Miura, S. Iga and T. Nasuno, 2005: Development of a global cloud-resolving model—a multi-scale structure of tropical convections—, *J. Earth Simulator*, 3, 11-19.
- 里村雄彦, 岩崎俊樹, 佐藤正樹, 加藤輝之, 重 尚一, 余偉明, 2003: 第4回非静力学モデルに関するワークショップの報告, 天気, 50, 259-260.