

気象の高解像度数値予報

中山寛, 藤田司
気象庁

High-Resolution Numerical Weather Prediction

by
Hiroshi Nakayama, Tukasa Fujita
Japan Meteorological Agency

ABSTRACT

Numerical atmospheric models have been developed for operational weather forecasts at Japan Meteorological Agency (hereafter JMA) since 1959. These models, based on the system of the dynamic and thermodynamic equations, include important physical processes such as precipitation, radiation, turbulence, and so on which affect the dynamical and thermodynamical state of the atmosphere.

Among the numerical operational models at JMA, a mesoscale model (MSM) with a 10 km resolution has been operated for the purpose of disaster prevention, especially for prediction of heavy rainfall, from 2001 through 31 August, 2004. Its dynamics is based on a hydrostatic spectral model, in which hydrostatic balance is assumed in the vertical direction. This assumption holds well for meteorological phenomena whose horizontal scale is large enough compares to that in the vertical such as synoptic high/low pressure systems, but not for those at smaller scale such as cumulus convection. Since heavy rainfall is often produced by ensemble or cluster of cumulus convection, a non-hydrostatic model that can explicitly treat vertical air motion without any assumption or approximation is required in order to simulate atmospheric convection at finer scale. In addition, elaborate moist convection processes describing cloud microphysics responsible for precipitation formation as well as for diabatic heating/cooling in the atmosphere is indispensable to realistic simulations. Aiming at weather forecasts at finer scale near future, JMA has substituted a non-hydrostatic mesoscale model with a bulk microphysical model for the hydrostatic MSM from Sep. 1 2004, the spatial resolution being the same for both model. The model basis comes from a non-hydrostatic model developed at the Meteorological Research Institute (MRI) since 1980s. Afterward, The MRI and the Numerical Prediction Division at JMA continue to collaborate on the model development. The non-hydrostatic mesoscale model presently operated is a fruit of this collaboration.

High-resolution model simulations are made using the above-mentioned non-hydrostatic model, for a case of a typhoon and the associated localized rigorous convection on August. 8 2003, which appeared to produce a strong downburst. In the simulations, horizontal grid spacings are chosen to be 5, 2, and 0.5 km. The finer the grid resolution becomes, the more realistic the representation of precipitation forecasts is. In addition, the simulated height of the mixed layer top at the 0.5 km resolution is found to be very close to that from a sounding data near by. In the future, the JMA plans to use finer resolution model down to around 2 km for operational purpose.

1 気象における数値モデル

気象における数値モデルは、大気の状態を数値表現し物理法則に基づいて計算して予測や研究に用いるものである。乾燥大気の場合、大気の状態は気温 T 、気圧 p 、風の3成分 (u, v, w) と密度 ρ の6つで表される。大気の物理法則に基づいた支配方程式系は、時間発展式と診断式の6つの基礎方程式からなっており、時間発展式である運動方程式には地球回転の効果であるコリオリ力を考慮する。

1. 時間発展式

(a) 運動方程式

(回転系における Navier-Stokes の式 + 重力)

$$\frac{du}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\Omega \sin \phi v = dif.u \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + 2\Omega \sin \phi u = dif.v \quad (2)$$

$$\frac{dw}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g = dif.w \quad (3)$$

(b) 連続の式 (質量保存の法則)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

式(1)~(4)で、 dif は拡散項を示している。

(c) 熱力学の式

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{Q}{C_p \pi} + dif.\theta \quad (5)$$

ここで、 Q は非断熱加熱を表し、

$$\pi \equiv \left(\frac{p}{p_0} \right)^{R/C_p},$$

$$\theta \equiv \frac{T}{\pi}$$

なお、 C_p は乾燥空気の定圧比熱、 R は乾燥空気に対する気体定数、 p_0 は定数である。

2. 診断式

(a) 状態方程式 (密度の診断式)

$$p = \rho RT \quad (6)$$

時間発展式において、鉛直方向の気圧傾度力と重力の釣り合いを仮定して、式(3)を次のような静力学平衡の式におきかえると、鉛直風は水平風と連続の式から診断されることになる。このような方程式系は、プリミティブ方程式系と呼ばれる。

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + g = 0 \quad (7)$$

気象の分野では最小スケールとして積雲などの小規模対流現象を対象とすることが多いため、これと直接関係がないと考えられている音波や高周波の重力波を興味の対象としない。また、これらの波は伝播速度が速いので安定した積分計算のために、方程式系から除いたり、関連する項だけを分けて計算したり、陰解法で解くなどしたりする。

大気モデルの格子(数 km から数十 km)で解像できない現象や非断熱加熱など、大気の風や温度場に作用する過程もモデルに含めないと、大気の状態を適切に再現できない。これらを物理過程とよんで、気流の場を決める過程と区別している。物理過程には、大気と地表面との相互作用や降水過程、放射過程などがある。

気象のモデルで下部境界条件となる地表面の状態に、粗度、アルベド、土の熱容量と熱拡散係数などの物理的・形態的特性や地表面温度、湿り具合、雪氷などの予測可能な変数がある。これらの変数を SiB(Simple Biosphere)と呼ばれる生物圏モデルを導入して予想するモデルもあり、そこでは地中に浸透した水が根から吸い上げられて気孔から蒸散するなど植物活動も考慮している。これらをもとに、大気と地表面との運動量、顕熱、潜熱、水蒸気のフラックスを計算する。

地表面から蒸発した水蒸気が、上昇気流で持ち上げられ、空気塊の断熱冷却による温度低下とともに凝結し、雲水(雲粒)を生成する。雲の中では水は、水蒸気、雲水、雨滴、雲氷、雪、あられ、ひょうなどのさまざまな形態で存在し、これらが多くの過程を経て、降水となって地上に到達する。雲の微物理過程の重要性は、これらの水物質が相変化する際に入出力する熱や放射効果による非断熱加熱(冷却)によって雲内の気塊に熱的な浮力(温度変化)を与えることや、それ自体の質量による荷重を通して、空気塊の運動の鉛直成分の時間変化に深く関与し、雲の力学的構造にも影響を及ぼすことである。高解像度の数値予報に使われるモデルでは、おもにバルク法と呼ばれる雲物理過程パラメタリゼーションが使われている。水物質の形態を前述のような幾つかのカテゴリーに分類し、それぞれの混合比や数濃度を予測するモデルである。また、モデルの空間分解能が雲の空間スケール(数 km)に対して非常に粗い場合、雲自体をモデルで陽に表現することができないので、「仮想的な雲」を作成して熱や水物質の再配分を行わせる対流パラメタリゼーションが用いられる。

短波放射である可視光や紫外線などの太陽放射は大気や地面を加熱し、大気や地面から宇宙空間へ向かって放射される赤外放射は基本的に大気や地面を冷却する。地表面と大気の相互作用を別にすれば、放射が大気や地面の温度構造を大きく変えるには数日を要する。放射を考慮した数日予報のモデルを側面境界値に使う場合、整合性の面から、短い予報期間のモデルにも放射を考慮することが必要となる。また、やませと呼ばれるような下層雲では長波放射による雲頂の冷却が重要な役割を果たし、また、雲によって太陽光が反射される日傘効果や巻雲のような

高い高度のうすい雲による温室効果は地球温暖化などの気候変動予測にとって重要である。

気象の数値予報は初期値問題であり、初期値問題を解くには、大気のある時点での状態を正確に表す初期条件が必要である。初期条件は観測に基づいて与えられるが、大気の観測は時空間的に不均質に分布しており、しかも誤差を含んでいる。特に、海洋上には観測の大きな空白域がある。また、支配方程式系の時間発展式には非線形項が含まれているため、初期条件が僅かに違っているだけで、その誤差は指数関数的に増大してしまうことがある。このため、観測データを有効に使い、初期値の精度を高める工夫をしている。

2 気象庁における数値予報

2.1 現業数値予報システム

気象庁は昭和 34 年にわが国の官公庁として初めて科学計算用の大型コンピュータを導入し、数値予報業務を開始した。その後、数値予報モデルの進歩とコンピュータの技術革新によって、今日では、数値予報は予報業務の根幹となっている。数値予報モデルの結果は、数値予報天気図や格子点値として出力され、民間気象会社や報道機関に提供されているほか、外国の気象機関でも利用されている。

気象庁では現在、表 1 に示すように 4 つの数値予報モデルを運用している。これらのモデルは、天気予報の精度を改善するうえで大きな成果を挙げてきたが、航空気象情報や防災情報の一層の改善には、積雲対流などの小さなスケールの現象をより精密に扱えるモデルが必要となっている。

メソスケール現象の予測のために、2001 年 3 月から、水平解像度 10km の静力学メソ数値予報モデル(MSM)の現業運用を行っている。このモデルは、防災気象情報の高度化を支援することを目的に導入されたものではあるが、モデルの基本的仕様は水平解像度と予報領域などを除き領域モデル(RSM:水平解像度 20km)とほぼ同じで、静力学平衡を仮定したプリミティブ方程式系を用いている。静力学近似は、大規模な大気の運動を表現する場合には良い精度で成り立ち、現在の殆どの現業数値予報モデルで適用されているが、深い対流など運動の水平方向と鉛直方向のスケールの比が 1 に近い現象は正しく表現できないことが分かっており、気象庁の数値予報モデルの支配方程式系に残された最後の大きな近似になっていた。

気象庁では、モデルのさらなる高解像度化にも対応可能な次世代メソ数値予報モデルとして、静力学近似を行わない非静力学メソスケールモデル(NHM)の開発を行ってきた[1, 2]。最近、水平解像度 10km の NHM による予報精度の向上が確認されたため、平成 16 年 9 月から、MSM に代えて運用を開始した。MSM と NHM の仕様の違いを表 2 に示す。静力学近似を除くと、おもな違いは凝結過程で、MSM では格子点での過飽和分を凝結と

表 1: 気象庁の数値予報モデル

	水平解像度 (格子数)	鉛直層 モデル頂	予報時間 (時間)	回数	主用途
全球モデル (GSM)	0.5625 度 (640×320)	40 層 0.4hPa	90/216	2 回/日	週間予報 領域モデルの境界値
台風モデル (TYM)	24km (271×271)	25 層 17.5hPa	84	2 個×4 回/日	台風予報
領域モデル (RSM)	20km (325×257)	40 層 10hPa	51	2 回/日	天気予報 メソ数値予報モデルの境界値
メソ数値予報モデル (MSM)	10km (361×289)	40 層 10hPa	18	4 回/日	防災気象 航空気象情報

表 2: MSM と NHM の比較

	MSM	NHM
力学フレーム	静力学スペクトルモデル 二重フリーエ級数 鉛直は σ -p ハイブリッド座標 モデルトップは 10hPa	非静力学格子モデル 有限差分法 (荒川 C グリッド) 鉛直は z 座標 モデルトップは約 22km
湿潤過程	大規模凝結 積雲対流パラメタリゼーション (Arakawa-schubert + MCA)	雲物理 (3-ice, 雲氷, 雪, あられ) 積雲対流パラメタリゼーション (Kain-Frisch)

する大規模凝結とサブグリッドスケールの凝結を扱う積雲対流パラメタリゼーション (Arakawa-schubert + MCA) を用いている。これに対して、NHM では前述の雲物理過程を導入し、さらに小規模対流に適した積雲対流パラメタリゼーション (Kain-Frisch) を用いている。このため、MSM に比べて大気中の対流をより精度よく扱うことができるようになってきている。

2.2 NHM の予報精度

図 1 は、2004 年 1 月 13 日の事例で、MSM と NHM による予想降水量の比較を行ったものである。この事例では、冬型の気圧配置により北西風が卓越し、日本海側の広い範囲で降雪がもたらされた。図 1 左上と右上は、それぞれ 13 日 00UTC を初期値とした MSM と NHM の 18 時間後の前 3 時間積算降水量の予想で、図 1 左下は対応する時間帯の 3 時間積算レーダー・アメダス解析雨量である。実況では、日本海側の広い範囲で降水があるだけでなく、奥羽山脈や越後山脈の風下側にも一部降水がみられる。MSM では、山脈風下側にほとんど降水を予想せず、しかも、日本海側の降水は実況より多くなっている。これに対し、NHM は山岳部を除くと降水量は観測値に近く、さらに山脈風下側にも降水が予測されるなど、MSM に比べて実況に近い予測となっている。

MSM の降水過程では、大気中で凝結生成された水物質は、即座に降水として地上に落下させている。これに対し NHM では、雲水、雲氷、雨水等の各水物質混合比を予報するだけでなく、雲の中で降水粒子が形成されて地上に落下する過程を計算している。図 2 は、卓越する北西風の風向に沿った、鉛直流 ($m s^{-1}$)、雲水、雲氷、雪の混合比 ($g kg^{-1}$) の鉛直断面図である。日本海上では鉛直流は弱いですが、山脈の風上斜面の強制によって比較的強い上昇流が生じている。一方、山脈の風下斜面では、地表面から高度約 6km まで下降流となっている。山脈風上斜面の比較的大きな上昇流に対応して、高度 1.7~3km で雲水の混合比が大きくなっており、さらにその上空では雲氷

の混合比が大きくなっている。上空の強い北西風によって、雲氷の混合比は山脈の風下斜面の上空にまで広がり、雪の混合比は山脈の風上斜面の上空約 4.5km から、風下側に傾きながら、風下斜面の地表付近に達している。このように雪の混合比の分布が風上から風下へ向かって傾くのは、雪の落下速度がおおよそ $1m s^{-1}$ と小さいためで、雪が落下しながら卓越する北西風によって風下側に流されるためであると推察できる。

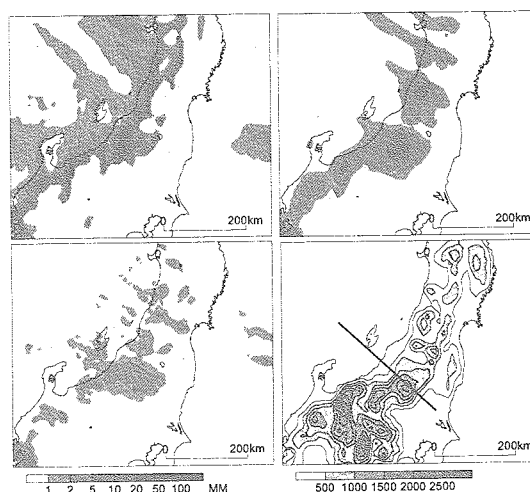


図 1: 2004 年 1 月 13 日 21JST の予想と実況の降水量 (左上:MSM, 右上:NHM, 左下:レーダー・アメダス解析雨量, 右下:モデルの地形で直線は図 2 の切断面)。

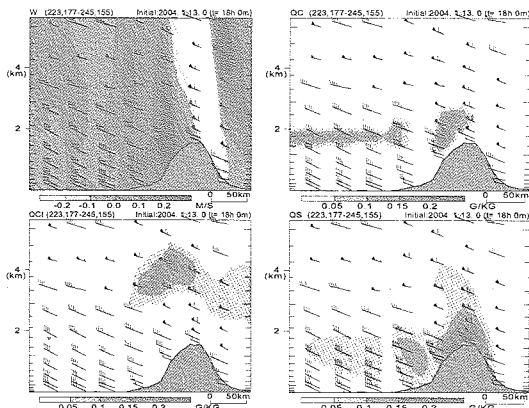


図2: 卓越する北西風の風向に沿った(図1右下の直線)断面図。W:鉛直流 (ms^{-1}), QC:雲水, QI:雲氷, QS:雪の混合比で単位はいずれも (gkg^{-1})。矢羽根は水平風(単位 knot)を示す。また各図の左端が風上側(北西)、図の右端が風下側(南東)を示す。

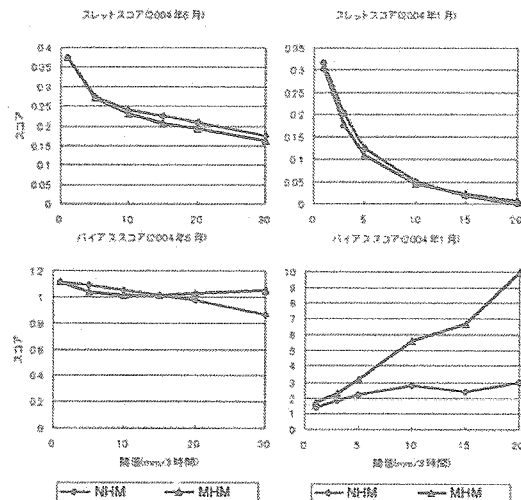


図3: レーダー・アメダス解析雨量に対するNHMの降水強度ごとの検証結果。左:2004年6月, 右:2004年1月, 上段:スレットスコア, 下段:バイアスコア。検証格子間隔は20km, 3時間積算降水量の格子内平均値を用い, 検証範囲は日本の陸上から約40km以内の範囲。

図3はレーダー・アメダス解析雨量に対するNHMの降水強度ごとの検証結果である。上段がスレットスコア(TS)^{*1}, 下段がバイアスコア(BS)^{*2}で, 左が2004年6月の検証, 右が2004年1月の検証である。6月のTSは, ほとんどの強度に対してNHMがMSMを上回り, BSは全般に同程度である。1月のTSはNHMがMSMを上回り, BSはMSMが1よりもかなり大きいものに対して, NHMは1に近づいている。前述のように, NHMは特に山岳の風上の強い降水の予測頻度が高すぎるMSMの欠点を改善している。

3 CeNSS を用いた気象の高解像度計算

前節で述べた現業用の各モデルは, 気象庁の気象資料総合処理システム(COSMETS)・パッチ系計算機(NAPS)のスーパーコンピュータ(日立SR-8000モデルE1 80ノード)で実行されている。気象庁は, 防災情報や航空気象情報のさらなる高度化を目指しており, 高解像度NHMの開発を行っている。CeNSSでは, NHMの水平格子間隔を5kmから500mまで解像度を向上させ, 局地的な激しい気象現象の高分解能予測のための数値予報モデル技術の開発を行っている。

高解像モデルを実行するにあたり, 粗いモデルから順次高分解能モデルへのネストが必要となる。これは, 初期値・境界値の分解能が粗いと, 境界での情報不足のために解像度に応じた予報ができない可能性があるからである。また, モデルの境界付近で計算不安定が起きやすくなる問題もある。図4に示すように初めに格子間隔5kmのNHMを実行する。このとき, 初期値には現業MSMのための四次元変分法[3]によって解析された局地解析(格子間隔10km), 境界値には現業RSMの予報結果(格子間隔20km)を用いる。次に格子間隔2km, 500mと解像度を上げて計算していき, それぞれの初期値・境界値は1段階粗い格子間隔のNHMの予想結果を用いる。各格子間隔でのモデルの仕様は, 表3に示すとおりである。

実際に起きた局地的な激しい気象現象について, 高分解能モデルを用いてシミュレーションを行った。事例は, 2003年8月8日20時30分~21時頃にかけて埼玉県熊谷市で突風が発生し, ゴルフ練習場の鉄塔が倒壊し, 屋根瓦が飛ぶなどの被害が発生したものである。地元気象台の現地調査では被害状況から, 藤田スケールF0~F1^{*3}の竜巻と推定された。

図5は突風が起きた8月8日21JSTを対象としたレーダー・アメダス解析雨量(RA)と8日09JSTを初期値とする格子間隔5kmのNHMの前1時間降水量である。このとき, 台風10号が四国付近にあって北東に進んでいた。RAの雨域は西日本に広がっており, 台風の日に対応する中心付近の雨のない領域は高知県の沿岸にあって, 台風から離れた関東や東海にも降水が見られる。NHMの雨域もほぼ同じ予想をしており, 大きなスケールの気象現象を適切に予想していることがわかる。

図6は, 各格子間隔のモデルの予想結果である。気象レーダー(図6右下)で埼玉県に観測されているまとまった雨雲が, 突風を引き起こしたものだが, 残念ながら今回の数値シミュレーションでは再現できなかった。しかし, 関東山地(図の左側)に注目すると, モデルの解像度が上がるにしたがって, 気象レーダーで観測されている地形に応答するような雨雲の細部の表現が現実に近いように見える。

*1 ある閾値以上の予想の精度を表す指標で, 値が大きいくほど精度が良いことを表す。

*2 ある降水量(閾値)以上の予想の頻度が適正であるか否かを表す指標で, 1に近いほど予想頻度が現実に近いことを表す。

*3 竜巻やダウンバーストの規模を被害から推定するため, シカゴ大学の藤田哲也が1971年に提案した基準。F0は風速17~32m/sで, 煙突やテレビのアンテナが壊れるなどの被害がある。F1は風速33~49で, 屋根瓦が飛び, ガラス窓が割るなどの被害がある。

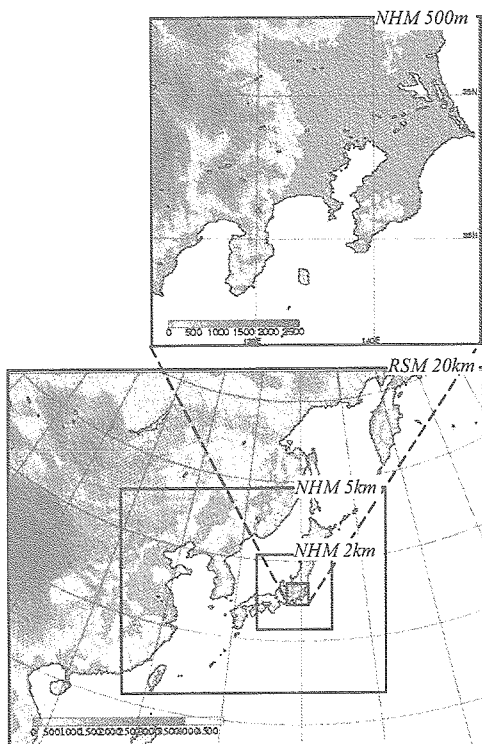


図4: 格子間隔 5km, 2km, 500m の NHM の計算領域と境界値 (RSM) の領域

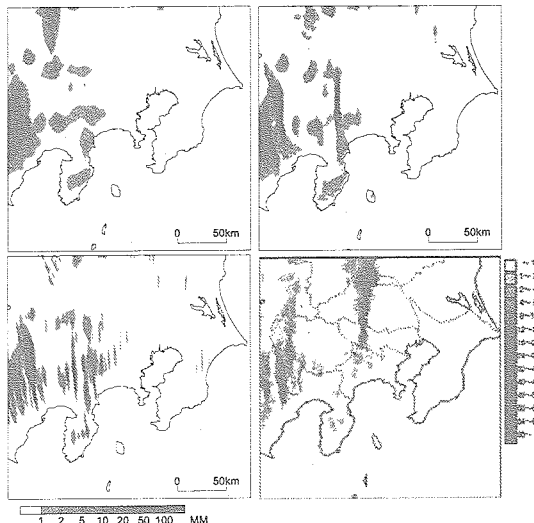


図6: 各格子間隔の NHM の降水の予想。(左上:5km, 右上:2km, 左下:500m, 右下:気象レーダー 2.5km)

図7は各モデルが予想した1時間降水量を5km格子に平均化し、図6の領域について計算したヒストグラム(予想した格子点数)である。格子間隔5kmや2kmでは5mm/hrを越える雨をあまり予想できていないが、格子間隔500mでは、ほぼ実況と同じ頻度分布となっている。解像度が上がることによって、モデルの中で雲物理過程による個々の雨雲の計算がより現実的になったためと考えられる。

図8は館野における高層観測から得られた風速と各モデルが予想した風速の鉛直プロファイルである。破線の実況を見ると、高さ500m付近まで風速が徐々に増加しており、混合層が発達していることがわかる。格子間隔が5kmや2kmのモデルでは混合層が800mと高く予想されているが、500mのモデルではほぼ実況に近い予想となっている。

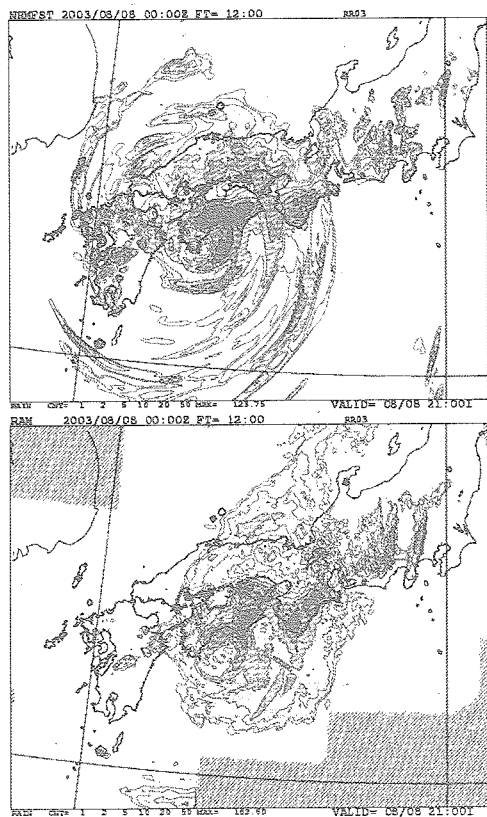


図5: 2004年8月8日21時の前1時間降水量。上:8日09時を初期値とする格子間隔5kmのNHM, 下:レーダー・アメダス解析雨量

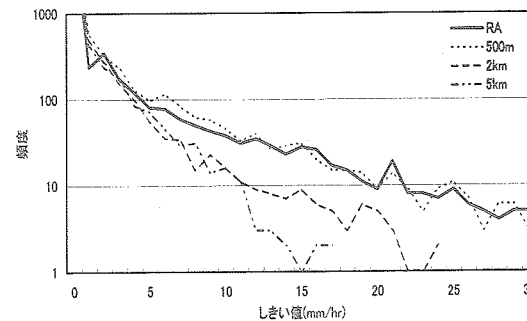


図7: 各格子間隔の NHM の降水強度のヒストグラム(予想した格子点数)

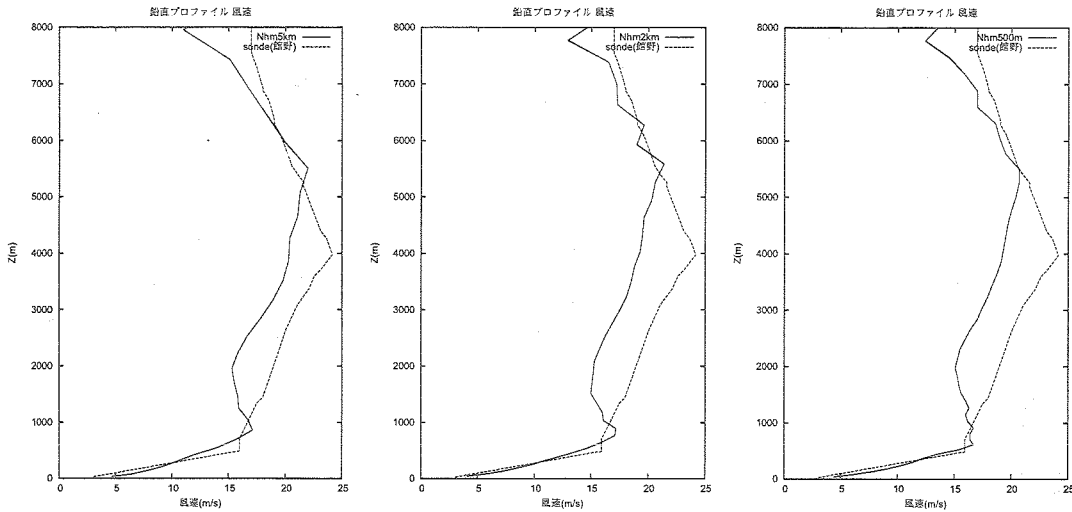


図 8: 館野における高層観測の風速と各格子間隔のNHMの風速の鉛直プロファイル。(左:5km, 中央:2km, 右:500m, 破線:実況, 実線:NHM)

表 3: 各格子間隔のNHMの仕様

	5km NHM	2km NHM	500m NHM
初期時刻	8月8日00UTC	8月8日06UTC	8月8日09UTC
予報時間	15時間	8時間	5時間
初期値	現業局地解析 (水平格子間隔 10km)	5kmNHMの予報値 (水平格子間隔 5km)	2kmNHMの予報値 (水平格子間隔 2km)
境界値	RSMの予報値 (水平格子間隔 20km)	5kmNHMの予報値 (水平格子間隔 5km)	2kmNHMの予報値 (水平格子間隔 2km)
格子数	719 × 575 × 50	500 × 500 × 60	500 × 500 × 70
Δt	24秒(2250ステップ)	10秒(2880ステップ)	5秒(3600ステップ)
CPU	(8 × 4 + 1) プロセス × 4CPU = 132	(5 × 5 + 1) プロセス × 4CPU = 104	(8 × 6 + 1) プロセス × 4CPU = 196
計算時間	5.3時間	3.8時間	5.8時間
ディスク	10GB(モデル面 9GB)	7GB(モデル面 4GB)	19GB(モデル面 14GB)

4 まとめ

気象における数値モデルは、地球回転の効果を考慮した Navier-Stokes の式と熱力学式などを基礎としている。さらに、雲物理過程、太陽・雲・地表面の放射過程などのモデルを組み合わせた総合的システムである。気象庁における数値予報は気象業務の根幹となっており、防災情報や航空気象情報の高度化のため、現在は格子間隔 10km のメソ数値予報モデルを運用している。平成 16 年 9 月からは、静力学メソ数値予報モデル (MSM) に替わって、鉛直加速度の近似を行わない非静力学モデル (NHM) の運用を開始し、さらなる高解像度化を目指している。

CeNSS を用いた気象の高解像度計算にも現業の NHM と同じモデルを用いた。初期値に現業解析システムによる局地解析 (格子間隔 10km)、境界値に現業 RSM の予報結果 (格子間隔 20km) を用い、格子間隔を 5km, 2km, 500m と高解像度化していった。解像度が上がるにしたがって、

予想された降水分布が気象レーダーによって得られた現実の降水分布に近づき、500m では降水量のヒストグラムが実況とほぼ一致した。また、高層観測で得られた風速とモデルの予想を比較すると、5km, 2km では混合層が実況より高く予想されたのに対して、500m では実況とほぼ同じ高さとなっていた。

今後は、計算事例を増やして計算結果を様々な面から検証し、航空機への影響調査につなげていきたい。

参考文献

- [1] Saito, K., T. Kato, H. Eito and C. Muroi, 2001: Documentation of the Meteorological Research Institute/Numerical Prediction Division unified nonhydrostatic model. Technical Reports of the MRI.
- [2] 斉藤和雄, 2003: 気象庁非静力学モデル. 数値予報課報告・別冊第 49 号, 1-15
- [3] 石川宜広, 小泉耕, 2002: 変分法データ同化システムの現業化. 数値予報課報告・別冊第 48 号, 37-59