

# 気象庁非静力学モデルの現業化について

石田 純一<sup>1</sup>、藤田 司<sup>1</sup>、山田 芳則<sup>1</sup>、大森 志郎<sup>1</sup>、長澤 亮二<sup>1</sup>、田中 小緒里<sup>1</sup>、荒波 恒平<sup>1</sup>、中山 寛<sup>1</sup>、原 旅人<sup>1</sup>、熊谷 幸浩<sup>2</sup>、齊藤 和雄<sup>3</sup>、永戸 久喜<sup>3</sup>、加藤 輝之<sup>3</sup>、室井 ちあし<sup>3</sup>

(1: 気象庁数値予報課、2: 気象庁観測システム整備運用室、3: 気象研究所予報研究部)

## 1. はじめに

気象庁では防災気象情報の高度化を支援するために、2001年3月より水平格子間隔10kmのメソ数値予報モデルの運用を行っている。運用開始当初は、RSMとほぼ同じ仕様である静力学スペクトルモデルを用いていたが、2004年9月に非静力学モデルによる運用へと切り替え、静力学近似を廃するとともに、降水過程の精緻化を行った。以下では静力学スペクトルモデルによるメソ数値予報を旧MSM、非静力学モデルによるメソ数値予報をNHMと呼ぶ。

現業運用を開始した非静力学モデルは、気象研究所と気象庁数値予報課が共同で開発を行ってきた、気象庁非静力学モデル(JMANHM)である。現在までの開発の経緯については齊藤(2003a)や藤田(2004)をご覧ください。

現業モデルとして運用を行うためには、1年を通じたさまざまな現象に対して、防災気象情報を支援できるだけの精度が求められる。一方で、限られた時間の中でできるだけ高速にモデル計算を行う必要がある。さらに、1年を通して安全に運用を行うために、堅牢な計算安定性も必要である。

そこで、NHMを用いて2003年6,7月の2週間と2004年1月の2週間に対して予報実験(以下、「性能評価試験」と呼ぶ)を行った。また、現業運用に先立って、モデル及びガイダンスの評価と慣熟期間を設けるために、2004年3月から8月まで現業運用と同じ仕様(ノード数だけ現業運用と異なる)で試験運用を行った。性能評価試験及び試験運用において、NHMは旧MSMより精度を向上させていることを確認している。

一方で、高速化については、タイムステップ(DT)を伸ばすと同時に並列化手法の改善や最適化を施すことにより、現業運用に必要なとされる速度を得られた。旧MSMではおよそ20分以内(DTが可変であるため所要時間は一定でない)であったが、NHMでは約22分である。また、2003年4月から2004年1月まで、現業運用と同じ初期値・境界値を用いた準定常的な試験を実行して、計算安定性のチェックを行い、安定性の向上を図った。なお、試験運用中に、計算不安定による異常終了は起きていない。

本講演では、2004年9月より現業運用を開始したNHMのシステムの概要を述べるとともに、予想事例を紹介する。さらに、今後の開発計画についても簡単に紹介する。なお、性能評価試験や試験運用の統計的検証結果については、田中(本講演予稿)や田中(2004)をごらんいただきたい。

## 2. 現業運用のNHM

格子数、格子間隔、予報時間については旧MSMと同じである。初期値は旧MSMと同じメソ解析を与える。ただし、解析変数の違いや地形・鉛直座標系などが異なるために要素変換や空間内挿を行っている。なお、現在のメソ解析では雲物理量の解析を行っていない。初期値にこれらの物理量を与えずにゼロとすると、降水の立ち上がりが遅くなり予報初期のスコアに悪影響を及ぼすことが考えられる(石田・成田 2003)。そこで、メソ解析による相対湿度が90%以上の格子に、前回の予報値を与える手法を用いた。モデル地形は米国地質調査研究所が中心となってまとめた30秒メッシュのGTOPO30を平滑化して作成している。地形に起因するノイズを生じさせないように、短波長成分を減衰させて、およそ15km相当に平滑化した。

支配方程式として完全圧縮非静力学方程式系を用い、音波についてはHE-VI法(スプリット・イクスプリシット法)で扱っ

ている。DTを40秒としているが、重力波の安定化が不十分であるケースが見られたため、温位と風の移流項をショートタイムステップで評価することとした(齊藤 2003b)。また、これまでHE-VI法では浮力を温位の摂動から計算していたが、新たに密度の摂動から計算をするようにして平均気圧の予想を改善した(齊藤 2004)。移流項の計算にあたって、3次、4次、5次の水平差分スキームを実装し、安定性や計算コストの観点から4次のフラックス形式を採用した(藤田 2003)。さらに移流補正スキーム(Kato 1998)を全ての予報変数に適用した。また、格子スケールの対流が卓越することを抑制するため、上昇流の大きな場所で選択的に水蒸気に2次の拡散を施す、適応水蒸気拡散を組み込んだ。

雲物理過程についてはバルク法を用い、雲水・雨・雲氷・雪・あられの混合比を予報変数としている(山田 2003)。積雲対流パラメタリゼーションにはKain-Fritschスキームを用いる。これはWRFのコードを移植したものであるが、水平解像度25kmのNCEPのETAモデルに適したパラメータとなっていたので、水平解像度10kmのNHMに適するようにパラメータを変更している(大森・山田 2003)。これにより、降水予想の精度の改善を目指している。TKEについては、当初は予報変数としていたが、計算モードがしばしば見られた。しかし、これを解決するために移流補正や移流のスプリットを行うと、計算時間がかかり延びると考えられた。そこで、TKEを予想する代わりに、局所平衡を仮定して診断的に求めるようにした。また、境界層が発達する際には混合長を境界層の高さを考慮するようにした(熊谷・齊藤 2004)。これにより、乱流混合がより生じやすくなり、地表付近が湿りすぎる問題が解決された。接地境界層はモニン・オブコフの相似則に基づく。バルク係数の計算において、陸上ではSommeria(1976)の方法を用いていたが、Louis(1982)の方法に変更した。これにより地上気温の予想改善を図った(熊谷ほか 2003)。表1に仕様の比較についてまとめた。

表1 旧MSMとNHMの仕様

モデル	旧MSM(～2004.08)	現業NHM(2004.09～)
格子間隔	10km	同左
格子数	361x289x40L	同左
予報回数	4回/日	同左
予報時間	18時間	同左
初期値	メソ解析	メソ解析 雲物理量のサイクル化
境界値	RSM予報値	同左
地形の元データ	GTOPO30	同左
地形の平滑化	約15km相当に平滑化 波数切断による	約15km相当に平滑化
支配方程式	プリミティブ方程式系	完全圧縮方程式系
水平離散化	スペクトル法	格子点法
水平移流項	変換法	4次フラックス形式 移流補正
鉛直座標	$\sigma$ -Pハイブリッド座標	Z*座標
鉛直移流項	-----	2次フラックス形式
予報変数	U,V,Tv,ln(Ps)	$\rho u, \rho v, \rho w, \theta, P$
予報変数(水物質)	qv	qv, qc, qci, qr, qs, qg
雲物理過程	(大規模凝結過程)	バルク法(3ice)
積雲対流スキーム	荒川-シュエバート 湿潤対流調節	Kain-Fritschスキーム
適応水蒸気拡散	なし	2次水平拡散
大気境界層	レベル2クロージャ ノンローカル境界層	TKEの診断 ノンローカル効果を考慮
接地境界層	相似則	同左
	陸: Louis、海: Kondo	
放射過程	GSM8911	同左
地被状態	陸、雪面、海・湖、海氷	同左

### 3. 2004年台風第16号による降水事例

NHMと旧MSMでは数値予報モデルとしては大きく異なるものの、格子間隔が10kmであり非静力学の効果が必ずしも大きくないこと、また同一の初期値・境界値を用いていることから、降水の予想特性が特に大きく変わるわけではない。しかし、地形性降水の予想特性が異なることがある。

ここでは、2004年台風第16号による降水事例を紹介する。台風第16号は2004年8月30日午前9時30分頃に鹿児島県に大型で強い勢力で上陸し、ゆっくりとした速度で九州、中国地方を縦断した。図1に8月29日21UTCの前3時間積算降水量と地上気圧、地上風を示す。左はNHMによる予想、中はレーダー・アメダス解析雨量及びアメダスによる実況、右は旧MSMによる予想をそれぞれ示す。なお、予報初期時刻はいずれも8月29日06UTCである。旧MSMでは宮崎県側の南東斜面の降水を過剰に予想する一方で、熊本県にはほとんど降水を予想していない。一方、NHMでは宮崎県、熊本県の降水予想はほぼ実況に近い量となっている。

このような違いが生じた理由として、雲物理過程の有無が考えられる。旧MSMでは大規模凝結スキームを採用している。そのため南東斜面で持ち上げられ凝結した水蒸気がその場で地上降水となってしまう。しかし、NHMではバルク法による雲物理過程を用いて、凝結した水蒸気は雨滴となり、風下へも移流する。この効果を考慮することにより、山地の風下にあたる熊本県でも、降水を予想できたと考えられる。このような予想は台風第16号以外の台風の事例でも見られた。また、冬季の寒気の吹き出しによる降雪でも、同様の理由による予想の改善が見られる。

### 4. 今後の計画

気象庁では2006年3月に計算機システムを更新する予定であり、その際にはNHMの格子間隔を5kmとし、予報回数を1日8回とする予定である。また、2007年3月からは予報時間を33時間まで延長する予定である。10kmNHMの現業化の際に得られた知見を最大限に活用して試験を行い、予報精度の改善を図りたい。5km化に向けて予想特性の調査を開始したところである。現時点で開発を想定している事項を以下に簡単に述べる。鉛直座標にはZ\*系を用いているが、上層での精度向上を目指して、ハイブリッド座標への変更を検討している。また、鉛直差分の高次化(現在は2次)も必要かもしれない。雲物理過程は10kmでの現業化のために簡略化した部分があるが、高解像度化に伴い高度化を図る必要がある。例えば、雲水・雨水の2モーメント化や部分凝結法の実装、4iceスキームなどの開発・試験を考えている。また、格子間隔が5kmの場合は、どのような積雲対流パラメタリゼーションを用いるか(あるいは用いないか)といった問題も重要である。現在のKain-Fritsch法のパラメータを格子間隔5kmに適する

ようにすることが重要であると同時に、Grell法の導入も検討している。放射過程の開発も急務である。現在、現業GSMで用いている放射スキームの導入に向けて開発を行っている(長澤ほか 本予稿集)。また積雪や蒸発散効率の予報変数化、さらにはSiBの導入も計画している。そのほか乱流過程や地表面過程の精査も必要であろう。様々な角度から開発項目を検討していき、総合的な精度向上に結び付けたい。

### 参考文献

- 藤田司 2003: 移流スキーム. 数値予報課報告・別冊第49号, 36-51.
- 藤田司 2004: メソ数値予報モデルの非静力学化. 平成16年度数値予報研修テキスト, 1-2.
- 石田純一, 成田正巳 2003: 非静力学モデルの現業化に向けて. 数値予報課報告・別冊第49号, 93-94.
- Kato T., 1998: Numerical simulation of band-shaped torrential rain over southern Kyushu, Japan on 1 August 1993. J. Meteor. Soc. Japan. 76, 97-128.
- 熊谷幸浩, 齊藤和雄 2004: 気象庁非静力学モデルの境界層過程の改良. 日本気象学会春季大会予稿集, C104.
- 熊谷幸浩, 齊藤和雄, 吉田優, 新野宏 2003: 気象庁非静力学モデルの陸上の地表面過程の改良. 日本気象学会秋季大会予稿集, A206.
- Louis, J. F., M. Tiedtke and J. F. Geleyn, 1982: A short history of the operational PBL parameterization at ECMWF. Workshop on Planetary Boundary Layer Parameterization, ECMWF, England, 59-79.
- 大森志郎, 山田芳則 2003: 現業用NHMにおけるKain-Fritschスキームの導入について. 第5回非静力学モデルに関するワークショップ講演予稿集, 26-27.
- 齊藤和雄 2003a: NHMの開発経緯. 数値予報課報告・別冊第49号, 6-8.
- 齊藤和雄 2003b: 時間積分法. 数値予報課報告・別冊第49号, 26-35.
- 齊藤和雄 2004: NHM時間積分における浮力の扱いと連続式における水蒸気拡散の考慮について. 日本気象学会春季大会予稿集, C103.
- Sommeria, G., 1976: Three - dimensional simulation of turbulent processes in an undisturbed trade wind boundary layer. J. Atmos. Sci., 33, 216-241.
- 田中小緒里 2004: 統計的検証. 平成16年度数値予報研修テキスト, 11-20.
- 山田芳則 2003: 雲の微物理過程. 数値予報課報告・別冊第49号, 52-76.

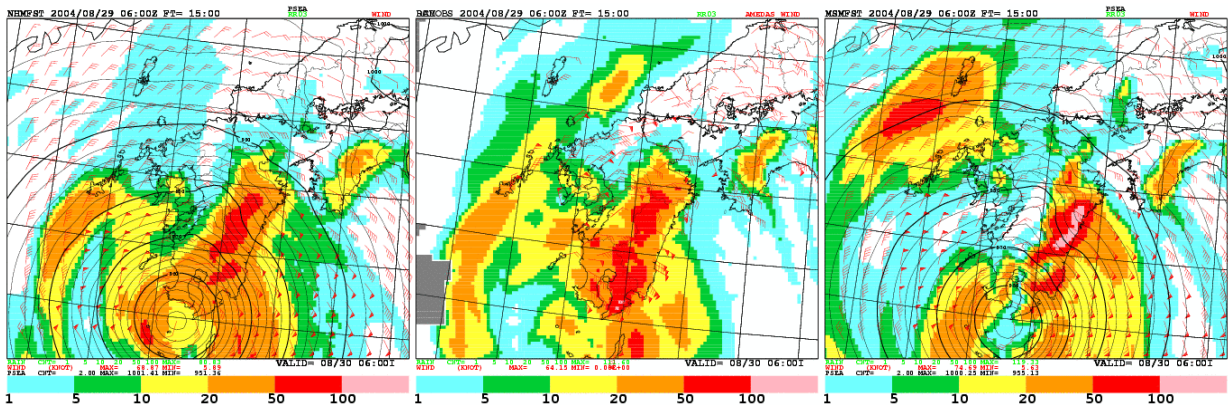


図2 2004年台風第16号による降水。2004年8月29日21UTCの前3時間積算降水量と地上気圧、地上風。

左: NHMによる予想、中: レーダー・アメダス解析雨量及びアメダスによる実況、右: 旧MSMによる予想。予報初期時刻はいずれも8月29日06UTC。旧MSMでは宮崎県に過剰な降水を予想し、熊本県ではほとんど降水を予想していない。一方、NHMでは宮崎県、熊本県の降水はほぼ実況に近い量を予想している。