

## 第5章 全球・領域・台風モデル<sup>1</sup>

### 5.1 次期モデルの概要

第5章では2006年3月に運用開始予定の第8世代数値解析予報システム(NAPS-8)で運用される全球・領域・台風モデルおよびアンサンブル予報について解説する。NAPS-8運用開始当初は全球・領域・台風モデルとも、第7世代数値解析予報システム(NAPS-7)とはほぼ同じ運用である。表5.1.1にNAPS-8における各モデルの運用計画を示す。

全球モデル(GSM)の仕様は、NAPS-8運用開始当初はNAPS-7と同一の予定である。ただし運用に関しては、航空予報プロダクトであるGSM航空悪天GPV作成を支援するために、06, 18UTC初期値の36時間予報を追加する。GSMはNAPS-8運用開始から約1年後を目標に、モデルの水平・鉛直解像度を領域モデルと同等程度に強化する計画である。NAPS-8におけるGSMの概要は第5.2節で解説する。

領域モデル(RSM)と台風モデル(TYM)の仕様・運用は、NAPS-8においてもNAPS-7と同一である。NAPS-8運用開始から約1年後に計画されているGSMの高解像度化により、RSMとTYMはGSMに統合される予定である。この統合により、領域モデル特有の側面境界が予報場へ及ぼす悪影響を排除し、短期から週間にわたって一貫した高品質な予報値の提供をめざす。NAPS-8におけるRSMとTYMの概要を第5.3節に記述する。

週間アンサンブル予報は、NAPS-7の25メンバーを

NAPS-8運用開始から51メンバーに増強する。また、使用する全球モデルの水平・鉛直の解像度はNAPS-7とほぼ同等となるが、力学・物理過程に対しては改良が行われる予定である。さらに、NAPS-8運用開始から約1年後を目標に、アンサンブル予報に使用する全球モデルの水平・鉛直解像度を強化し、初期摂動作成法を変更する計画である。また、台風予報の高度化および確率的予測情報の提供を支援するために台風アンサンブル予報の業務化を新たに計画している。NAPS-8におけるアンサンブル予報の概要は第5.4節に記述する。

### 5.2 全球モデル

ここではNAPS-8における全球モデル(GSM)の仕様と運用について説明する。NAPS-8でアンサンブル予報に用いる低解像度のモデルは、ここで説明するものとは水平解像度だけが異なる予定である。

GSMは2001年3月のNAPS-7の運用開始時に、鉛直層数が30層から40層へと強化され、モデル最上層も10hPaから0.4hPaへと引き上げられた。これにより、モデルの上部境界の対流圏への影響が軽減され、衛星データ等の同化を効果的に行うことが可能になった(松村2000b)。また同時期には、モデルの地形データも改訂された。

2005年2月には移流計算スキームとして、従来のオイラー法に代わりセミラグランジュ法(吉村・松村2004)が

表5.1.1 全球・領域・台風各モデルおよびアンサンブル予報のNAPS-8における運用計画。T、TLは水平解像度(切断波数)を、Lは鉛直層数を表す。アンサンブルのMはメンバー数を、BGM、SVは初期摂動作成の手法を表す(第5.4節参照)。台風モデルと台風アンサンブル(予定)はRSMC東京の責任領域に台風が存在する場合または24時間以内に予想される場合のみ運用される。

	NAPS-7 (~2006年2月)	NAPS-8(2006年3月~)	
		更新当初	約1年後(予定)
全球モデル	TL319L40 90時間予報(00UTC) 216時間予報(12UTC)	TL319L40 36時間予報(06,18UTC) 90時間予報(00UTC) 216時間予報(12UTC)	TL959L60 84時間予報 (00,06,18UTC) 216時間予報(12UTC)
領域モデル	20kmL40 51時間予報(00,12UTC)	同左	全球モデルに統合
台風モデル	24kmL25 84時間予報 (00,06,12,18UTC)	同左	全球モデルに統合
週間アンサンブル	T106L40M25-BGM 216時間予報(12UTC)	TL159L40M51-BGM 216時間予報(12UTC)	TL319L60M51-SV 216時間予報(12UTC)
台風アンサンブル			TL319L60M11-SV 84時間予報 (00,06,12,18UTC)

<sup>1</sup> 北川 裕人

導入された。セミラグランジュ法では、移流に関する CFL 条件の制約がないため、オイラー法よりも積分時間ステップを長くすることができる。時間ステップを長くすると積分に必要な総ステップ数が減らせるので、計算時間の大幅な短縮が可能になる。このことは、オイラー法ではより短い積分時間ステップが必要となる高解像度モデル(片山 2004)や、計算量の多い 4 次元変分法をデータ同化手法に採用する際には特に重要である。セミラグランジュ法の導入により、GSM の積分時間ステップは従来の約 300 秒から 900 秒へ伸長することができた(山口ほか 2004)。しかしながらセミラグランジュ法にも弱点がある。たとえば、移流の上流点を求めるときに空間内挿が必要となるため、モデルの空間解像度が実質的に低下してしまう恐れがある。一方、オイラー法では移流項を計算すると格子から波への変換により波のエイリアシングが生じるが、セミラグランジュ法ではこれが起こらないため、波から格子への変換の際にはより少ない格子点数で済むという利点がある(松村 2000a)。この変換格子はリニア格子と呼ばれ、リニア格子を適用した場合の水平解像度(切断波数)の表記は TL319 などとすることになっている。このように、セミラグランジュ法ではリニア格子を採用することにより、同じ格子点の数に対してオイラー法よりも高い水平解像度(波)を適用し、空間内挿に伴う実質的な解像度の低下を回避している。セミラグランジュ法の導入時には、(i) 水平解像度(波)を従来の T213 から TL319 へ強化(鉛直解像度は変更なし)、(ii) 予報の初期値化手法を従来の非線形ノーマルモード法から鉛直モード法とインクリメンタル法の併用(村上・松村 2004)へ変更、(iii) 全球データ同化手法を従来の 3 次元変分法から 4 次元変分法へ変更した(データ同化については第 4 章を参照)。

物理過程についても NAPS-7 の運用開始以降、さまざまな改良が行われてきた。2001 年 3 月には積雲対流スキームが改良され、予報が進むにつれ熱帯域の大気大循環が正しく維持されなくなる問題を解消した(隈 2000; 中川 2001)。同時期には、モデル最上層の上方拡張に伴う放射過程の調整、および重力波抵抗の計算に用いる地形パラメータなども改訂された。

2003 年 5 月には再び積雲対流スキームが改良された。ここでは、積雲対流に伴う降水の再蒸発過程の見直しと積雲対流の補償下降流の改善により、熱帯域を中心とする下層気温の冷却バイアスが緩和され、夏季日本付近における太平洋高気圧の表現などが改善された(中川 2004)。

2004 年 7 月には雲氷落下スキームの改良、降水のタイムステップ依存性緩和、海洋層積雲パラメタリゼーションの導入が行われ、海上下層雲や上層氷雲の表現が改善された(川合 2004)。同時期には氷床における地表面アルベド(日射反射率)も修正された(平井・坂下 2005)。

表 5.2.1 NAPS-8 運用開始当初の全球モデルの仕様。

予報変数	東西・南北風、気温、比湿、雲水、地表気圧
支配方程式	プリミティブ方程式系 セミラグランジュ法
水平方向の表現	スペクトル法/ガウス格子(リニア)
水平解像度	TL319(約 0.5625° 間隔)
鉛直の予報領域	地表~0.4hPa(モデル最上層)
鉛直方向の表現	ハイブリッド( $\sigma$ -P)鉛直座標
鉛直解像度	40 層(地表~800hPa に約 8 層)
時間積分	リーブフロッグ・スキーム セミ・インプリシット法(重力波) タイム・フィルター
水平拡散	4 次の線形拡散
鉛直拡散	局所的な K アプローチ
初期値化	鉛直モード法 インクリメンタル法
重力波抵抗	地形起源(短波・長波)
放射	2 方向近似法(短波) k 分布法・テーブル参照法(長波)
積雲対流	マスフラックス・スキーム
雲	雲量(格子内部分凝結)を考慮
降水	積雲頂からの生成 雲水からの変換
海氷	表層温度を予報
積雪被覆	積雪等価水量を予報
地表特性	開水・海氷・陸(12 種の植生)
地表フラックス	放射フラックス(短波・長波) 乱流フラックス(バルク形式)
陸面過程	生物圏(SiB)モデル

2004 年 12 月には放射スキームの改良を行った。長波放射の計算方法が全面的に改訂され、従来の統計的バンドモデルに基づく計算法からラインバイライン法(厳密計算法)に基づく k-分布法・テーブル参照法へ変更となった。これにより、対流圏から成層圏にわたって放射計算の精度が大きく向上し、モデルの気温予測の精度が大幅に改善された(藪ほか 2005)。

2005 年 7 月には放射計算における雲の効果の取り扱いを改良し、対流圏上層における気温バイアスの緩和を図った(北川ほか 2005)。また、放射計算に用いるオゾン気候値も東西一様の 2 次元気候値から 3 次元の気候値に改訂された。

2006 年 3 月に運用開始を予定している NAPS-8 では、GSM の仕様は最初の約 1 年は NAPS-7 と同一になる予定である。すなわち、解像度は TL319L40、力学・物理過程は NAPS-7 と同一である。表 5.2.1 に NAPS-8 運用開始時における GSM の仕様を示す。00, 12UTC 初期時刻における予報時間はそれぞれ NAPS-7 と同じ 90, 216 時間であり、予報プロダクトも基本的に変更はない。これに加えて、GSM 航空悪天 GPV 作成を支援するため

に、新たに06, 18UTCを初期時刻とする36時間予報の運用が予定されている。

GSMはNAPS-8運用開始の約1年後を目標に大幅な解像度の強化を計画している。水平解像度をNAPS-7での約60kmから領域モデル(RSM)並の解像度へ強化し、鉛直層数もNAPS-7の40層から60層へ強化(モデル最上層は0.4hPaから0.1hPaへ引き上げ)する計画である。この新しい高解像度GSMは現在のRSM、TYMを吸収・統合し、単一のモデル(高解像度GSM)により短期～週間にわたって高精度かつ均質な予測特性をもつプロダクトの提供をめざす。予報時間については、TYMに代わって台風予報を支援するために、00, 06, 18UTCの各初期時刻には84時間予報を、12UTC初期時刻には216時間予報を実施する予定である。

新しい高解像度GSMの業務化を実現するために、現在さまざまな開発を行っている。力学フレームはモデルの効率化・高速化を目的に、適合ガウス格子(宮本2005)、2次元分割並列化(宮本2005)や2タイムレベル時間積分法(吉村・松村2005)の開発が進められている。また、物理過程に関してもさまざまな改良を進めており、たとえば重力波抵抗(山田2005)、境界層過程

(北川2005)、陸面過程(大泉・保坂2000; 平井・坂下2005)などの改良を計画している。

### 5.3 領域・台風モデル

ここではNAPS-8における領域モデル(RSM)・台風モデル(TYM)の仕様・運用について説明する。すでに第5.2節で述べたように、RSMおよびTYMは、NAPS-8で実現するGSMの水平・鉛直解像度の強化により、新しい高解像度GSMに統合・廃止される計画である。

2001年3月のNAPS-7運用開始以降、RSMの物理過程についても改良を行い、モデルの精度向上を図ってきた。2004年4月に適応水蒸気拡散が導入され、従来から問題になっていた低気圧の過剰発達や格子スケールでの偽低気圧の発生などの問題が緩和された。

2006年3月運用開始予定のNAPS-8では、RSMの仕様(水平解像度20km・鉛直40層や物理過程など)はNAPS-7と同一である(萬納寺2000を参照)。運用についても、00, 12UTC初期時刻にNAPS-7と同じ51時間予報を実施し、予報プロダクトにも変更はない。

予報モデルの変更ではないが、2006年3月に予定される海面水温解析の変更がRSMの予報に与える影響

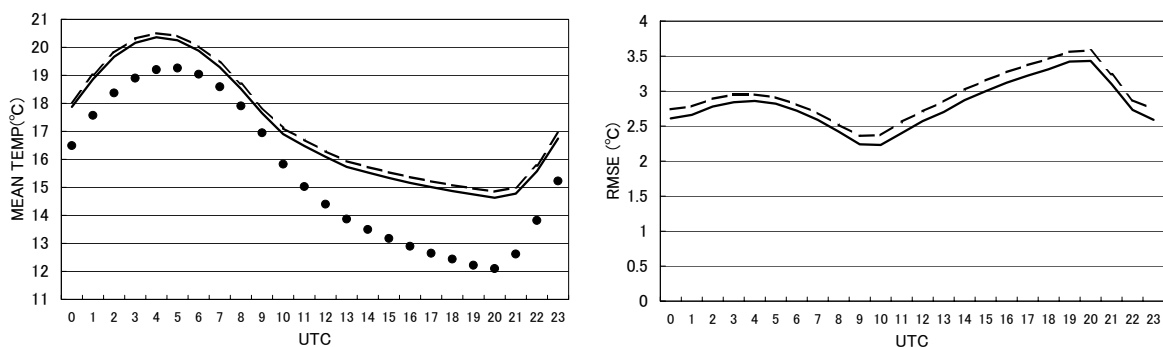


図 5.3.1 RSM の地上気温予測の検証(2004 年 5 月前半、全国平均)。数値予報課作成の海面水温解析(破線)と MGDSST (実線)を使用した場合。予測値とアメダス観測値(●)を比較したもの(左)と予測値の対アメダス RMSE(右)。横軸は予測対象となる時刻(valid time)を表している。(作成: 坂下卓也、細見卓也)

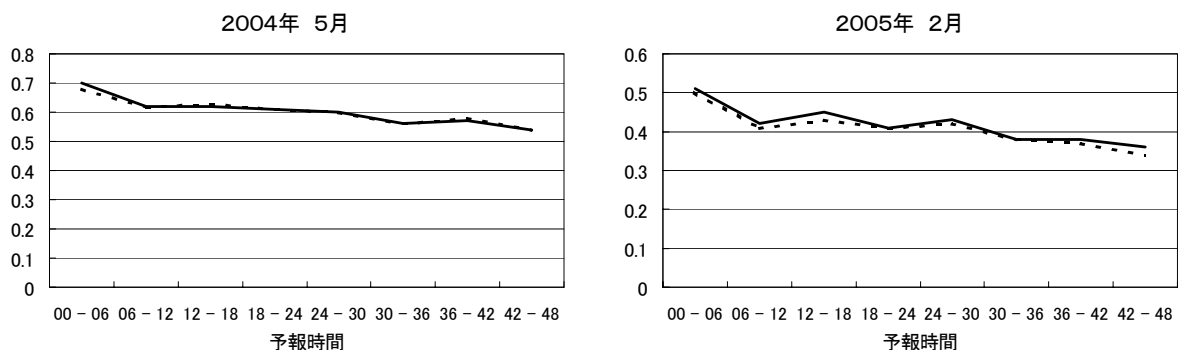


図 5.3.2 RSM の対アメダス降水スレツトスコア(80km 検証格子、全国平均、閾値 1mm/6 時間)。数値予報課作成の海面水温解析(点線)と MGDSST を使用した場合(実線)。2004 年 5 月前半(左)と 2005 年 2 月前半(右)の結果。横軸は予報時間。(作成: 細見卓也)

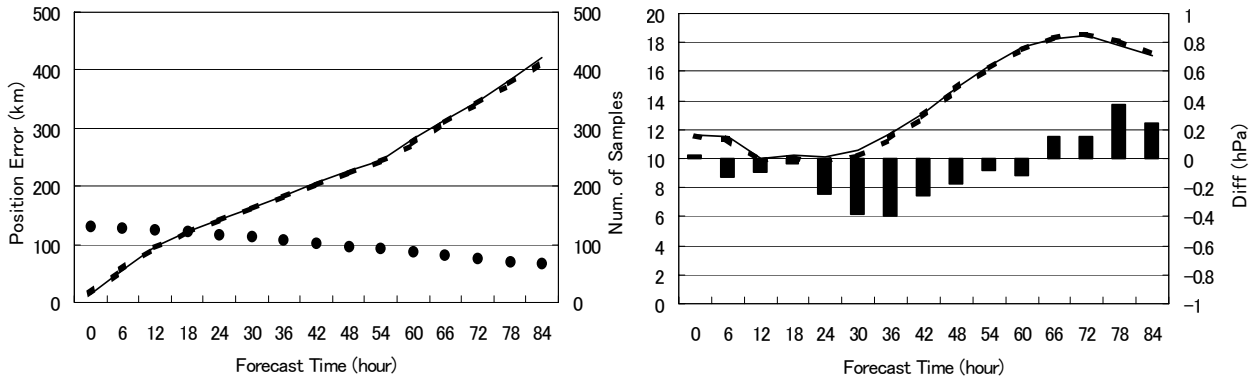


図 5.3.3 TYM による台風進路予測誤差(左)と台風中心気圧の RMSE(右)。数値予報課作成の海面水温解析(太破線)と MGDSST(細実線)を使用した場合。横軸は予報時間。左図中の黒丸(●)は事例数を、右図中の縦棒(■)は RMSE の(破線から実線を引いた)差を表す。検証は 2004 年の台風第 6, 15, 17, 23, 27 号を対象とした。(作成: 酒井亮太)

を紹介しておく。NAPS-8 では RSM に使用される海面水温解析は数値予報課作成の  $1^\circ$  格子のものから、海洋気象情報室作成の  $0.25^\circ$  格子の高解像度全球日別海面水温解析(MGDSST)へ変更される(第 4.4 節参照)。海面水温解析は RSM では海域における下部境界条件として扱われるため、解析値の変更は RSM の予報特性にも影響を与える。たとえば、海面水温は下部境界条件として海岸部を中心とする陸域の地上気温予測の特性に影響することが考えられる。図 5.3.1 は RSM 地上気温予測をアメダス気温観測と比較したものである。暖候期には、RSM の地上気温の高温バイアスが MGDSST の利用により緩和されていることが確認できる。寒候期におけるインパクトは暖候期に比べると小さかった(図略)。さらに、図 5.3.2 はそれぞれの海面水温解析を用いた場合の RSM 降水スコアの比較である。暖・寒候期ともに海面水温解析の変更が降水予測精度に与える効果はほぼ中立である。また、上層気温場や高度場の予報精度に対する効果もほぼ中立であった(図略)。

RSM は NAPS-8 運用開始から約 1 年後に、GSM の水平・鉛直解像度の大幅な強化に伴って、統合・廃止される計画である。これにより、従来の領域予報の弱点であった側面境界に関係した予測精度の劣化などが解消されると期待できる。

TYM についても 2001 年 3 月の NAPS-7 運用開始以降、幾つかの改良が行われてきた。2002 年には 2 回にわたって台風ボーガスの改良が行われた(酒井・美濃 2002)。また 2003 年 7 月には雲水予報スキームの導入をはじめとする物理過程の改良を行い、台風の進路および強度の予測精度が向上した(酒井・細見 2003)。

2006 年 3 月運用開始予定の NAPS-8 では、TYM の仕様(水平解像度  $24\text{km}$ ・鉛直 25 層や物理過程など)は NAPS-7 と同一である(萬納寺 2000 を参照)。運用についても NAPS-7 と同様、00, 06, 12, 18UTC 各初期時刻に 84 時間予報が、最大 2 個の台風に対して実施され

る。

TYM もモデル自体に変更はないが、下部境界条件となる海面水温の解析が RSM と同様に MGDSST へ変更になる。海面水温は TYM の下部境界条件として、台風の予測特性に影響を与える可能性が考えられる。図 5.3.3 はそれぞれの海面水温解析を用いた場合の台風の進路と強度の予測誤差である。海面水温解析の変更が TYM の台風予測の精度に与える効果はほぼ中立であった。

TYM も NAPS-8 運用開始から約 1 年後に、高解像度 GSM に統合される予定である。これにより、台風が 3 個以上ある場合にも高解像度 GSM により台風予報の支援が可能になる。

#### 5.4 アンサンブル予報

週間アンサンブル予報は 2001 年 3 月の NAPS-7 運用開始とともに正式運用が始まり(松村 2000c; 経田 2000)、これ以降、初期摂動作成法や予報モデルについて改良が行われてきた。2002 年 2 月からは熱帯域(北緯  $20^\circ$  ~ 南緯  $20^\circ$ )にも初期摂動を与えるように変更し、夏季日本付近における予報スプレッドの過小を改善した(経田 2002)。予報モデルは 2003 年 6 月に積雲対流スキームの改良が行われ、熱帯域等における下層気温の冷却バイアスの軽減や太平洋高気圧の表現などが改善された。2005 年 3 月には雲スキームおよび氷床域の地表面アルベド(日射反射率)の改訂が行われた。

2006 年 3 月の NAPS-8 運用開始時点では、初期摂動作成の手法には NAPS-7 と同じ成長モード育成法(BGM 法)が採用される。ただし、メンバー数は NAPS-7 の 25 から 51 へと倍増する予定である。図 5.4.1 はメンバー数 25 と 51 の週間アンサンブル予報について、スプレッドと予報誤差の大きさを比較したものである(北半球 500hPa 高度場、2003 年 8 月平均)。25 メンバーのアン

サンプルはスプレッドの大きさが予報誤差に比べて夏季にはやや小さい傾向が見られ、実際の場合をメンバーで捕捉しきれていない可能性がある。51メンバーのアンサンブルは25メンバーと比較してスプレッドの大きさが平均的に予報誤差の大きさと同程度になっており、スプレッドの大きさがより適切であることが確認できる。アンサンブルメンバー数の増強については、2006年発行予定の数値予報課報告・別冊第52号に詳しく掲載される予定なのでそちらも参照してほしい。

NAPS-8ではアンサンブル予報に使用するモデルも改訂され、第5.2節で説明したGSMと水平解像度だけが異なるモデルを採用する予定である。つまり、移流計算にセミラグランジュ法を採用し、物理過程には放射過程の改良(2004年12月と2005年7月の改良)を反映させる(第5.2節参照)。水平解像度(波)はセミラグランジュ法の導入に伴い、T106からTL159へ強化される(格子の解像度はどちらも約 $1.125^\circ$  間隔に相当)。鉛直層数は40でNAPS-7と同じである。運用はNAPS-7と同様に、毎日12UTC初期時刻に216時間の予報を実施する。図5.4.2はNAPS-7におけるアンサンブル予報モデルとNAPS-8で導入を予定するアンサンブル予報モ

デルのコントロールラン予報のスコアを比較したものである(北半球500hPa高度場のRMSE)。2003年8月、2004年1月ともに、北半球500hPa高度で見た両方のモデルの予報スコアはほぼ同等である。

週間アンサンブル予報はNAPS-8運用開始の約1年後に、予報モデルの水平・鉛直解像度の大幅な強化が計画されている。水平解像度はNAPS-7でのGSMと同じTL319、鉛直層数は60である。モデル解像度の強化により、地形の効果や地表付近の予測、表現などにも改善が期待できる。また初期摂動作成の手法は後述の台風アンサンブル予報の手法と共通化し開発の効率化を図れるよう、NAPS-7のBGM法から特異ベクトルを利用した方法(SV法)へ変更する計画である。

さらにNAPS-8運用開始の約1年後には、台風予報の高度化を目的とする台風アンサンブル予報の実用化も計画している。ここでは予測対象を台風とするために、主に台風周辺などに初期摂動を与える。初期摂動の作成には、特定の領域での初期摂動作成に優れているSV法を採用する計画である。SV法は台風アンサンブル予報を実施するときだけ摂動計算を行えばよいので、常に成長モードの育成が必要なBGM法に比べて計算

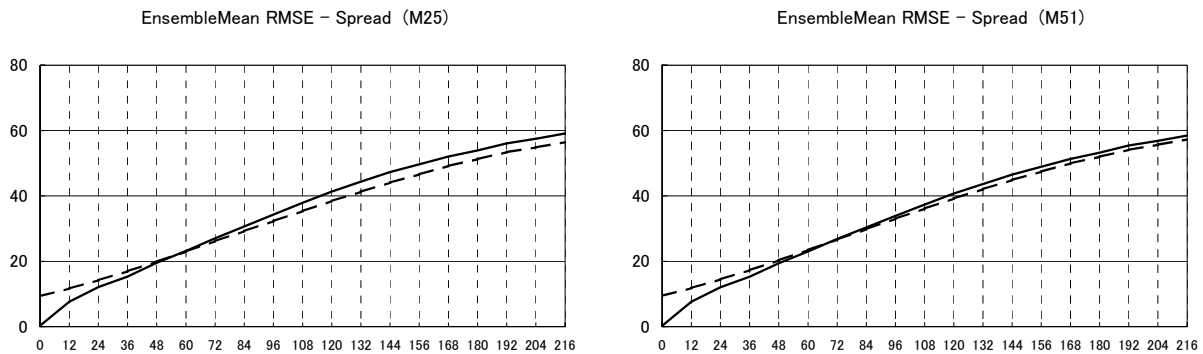


図 5.4.1 週間アンサンブル予報の予報誤差(実線)とスプレッド(破線)の比較(北半球500hPa高度場、2003年8月平均)。メンバー数がそれぞれ25(左)と51(右)の場合。横軸は予報時間。(作成: 酒井亮太)

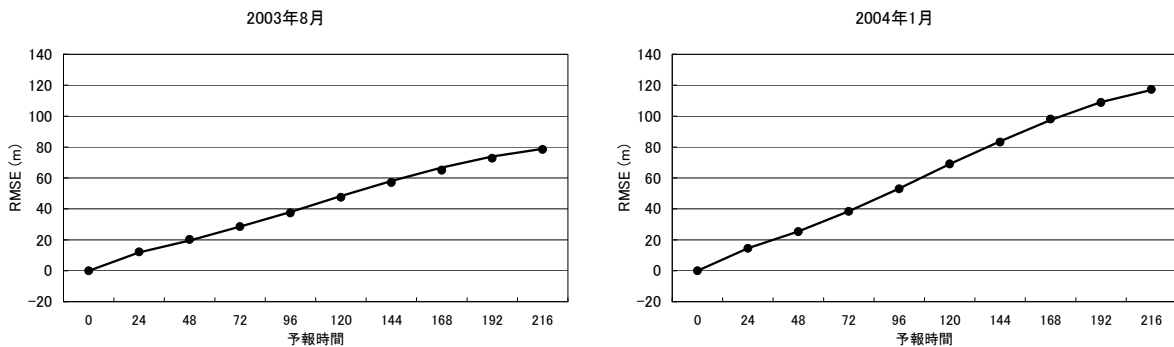


図 5.4.2 NAPS-7で使用している週間アンサンブル予報モデル(黒丸●)とNAPS-8で導入予定のモデル(実線)の予報スコア(コントロールラン)。2003年8月(左)および2004年1月(右)における北半球500hPa高度場のRMSE(月平均)。(作成: 山口宗彦)

コスト面でも有利である。運用は台風予測を行う場合に、1日4回(00, 06, 12, 18UTC)11メンバーの84時間予報を実施する計画である。予報モデルは週間アンサンブル予報と同じモデルを利用する予定である。

#### 参考文献

- 大泉三津夫, 保坂征宏, 2000: 陸面過程. 数値予報課報告・別冊第46号, 気象庁予報部, 48-66.
- 片山桂一, 2004: 高解像度モデル. 数値予報課報告・別冊第50号, 気象庁予報部, 85-91.
- 川合秀明, 2004: 雲水過程. 数値予報課報告・別冊第50号, 気象庁予報部, 72-80.
- 北川裕人, 2005: 大気境界層過程. 数値予報課報告・別冊第51号, 気象庁予報部, 67-69.
- 北川裕人, 藪将吉, 村井臣哉, 2005: 雲-放射過程. 数値予報課報告・別冊第51号, 気象庁予報部, 65-66.
- 経田正幸, 2000: 週間アンサンブル予報システムの性能. 平成12年度数値予報研修テキスト/数値予報課報告別冊第47号, 気象庁予報部, 86-93.
- 経田正幸, 2002: 週間アンサンブル予報. 平成14年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 30-34.
- 隈健一, 2000: GSM9912の性能と改良. 平成12年度数値予報研修テキスト/数値予報課報告・別冊第47号, 気象庁予報部, 82-85.
- 酒井亮太, 細見卓也, 2003: 台風モデルの物理過程の改良. 平成15年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 17-21.
- 酒井亮太, 美濃寛士, 2002: TYMの台風ボーガスの改良. 平成14年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 15-18.
- 中川雅之, 2001: 全球モデル(GSM)の変更とその影響. 平成13年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 34-37.
- 中川雅之, 2004: 積雲対流パラメタリゼーション. 数値予報課報告・別冊第50号, 気象庁予報部, 43-50.
- 平井雅之, 坂下卓也, 2005: 陸面過程. 数値予報課報告・別冊第51号, 気象庁予報部, 70-75.
- 松村崇行, 2000a: セミラグランジュ法. 数値予報課報告・別冊第46号, 気象庁予報部, 67-84.
- 松村崇行, 2000b: 高解像度全球モデル. 平成12年度数値予報研修テキスト/数値予報課報告・別冊第47号, 気象庁予報部, 17-20.
- 松村崇行, 2000c: 週間アンサンブル予報システム. 平成12年度数値予報研修テキスト/数値予報課報告・別冊第47号, 気象庁予報部, 21-22.
- 萬納寺信崇, 2000: 領域モデル(RSM, MSM, TYM). 平成12年度数値予報研修テキスト/数値予報課報告・別冊第47号, 気象庁予報部, 23-27.
- 宮本健吾, 2005: 適合ガウス格子. 数値予報課報告・別冊第51号, 気象庁予報部, 39-42.
- 宮本健吾, 2005: 2次元分割並列化. 数値予報課報告・別冊第51号, 気象庁予報部, 43-47.
- 村上裕之, 松村崇行, 2004: 初期値化. 数値予報課報告・別冊第50号, 気象庁予報部, 61-71.
- 藪将吉, 村井臣哉, 北川裕人, 2005: 晴天放射スキーム. 数値予報課報告・別冊第51号, 気象庁予報部, 53-64.
- 山口宗彦, 片山桂一, 松村崇行, 2004: 統一全球モデルの予報特性. 数値予報課報告・別冊第50号, 気象庁予報部, 81-84.
- 山田和孝, 2005: 重力波抵抗スキーム. 数値予報課報告・別冊第51号, 気象庁予報部, 48-52.
- 吉村裕正, 松村崇行, 2004: セミラグランジュ統一モデル. 数値予報課報告・別冊第50号, 気象庁予報部, 51-60.
- 吉村裕正, 松村崇行, 2005: 2タイムレベル時間積分法. 数値予報課報告・別冊第51号, 気象庁予報部, 35-38.