

第1章 領域モデル

1.1 メソ数値予報モデルの統計的検証¹

1.1.1 はじめに

2002年3月にメソ数値予報モデル(MSM)の解析方法がプレラン方式(萬納寺 2000)から4次元変分法(石川・小泉 2002)へと変更になった。4次元変分法では物理法則を考慮して同化を行うために、プレラン方式よりも、モデルに対してバランスの良い解析値を作成できるようになった。

本節では、4次元変分法導入後の2002年4月から7月において、解析雨量データ、ゾンデデータに対してMSMを統計的に検証した結果を示す。比較の対象として、プレラン方式のMSMの2001年4月から7月の検証結果も合わせて示す。ただし、異なる期間の検証には年々変動が含まれており、この中から4次元変分法導入による影響のみを評価する必要がある。そこで、2001年以降、大きく仕様を変更していないRSMの変化を年々変動の指標として評価した。なお、MSMの試験運用期間中の検証結果については、事例調査は石川(2001)に、統計的検証は石川・小泉(2002)に記載されているので必要に応じて参照していただきたい。

1.1.2 降水の検証結果

降水の検証として、図1.1.1に解析雨量に対するスレットスコアを示す。スレットスコアは1に近いほど予報が観測に近い。閾値は、3時間積算雨量を40km格子で平均した値が、10mm、5mm、1mm以上とした。なお、図は3時間積算雨量に対するスコアを6時間毎にまとめて示す。閾値10mmでは、2002年のFT=00-06でRSMよりMSMが大きく、それ以外ではMSMとRSMはほぼ同等か若干大きい。閾値1mm、5mmでは、2001年、2002年のどちらも予報時間全体(FTが0から18)に渡って、MSMのスコアはRSMとほぼ同等か若干小さい。また、2001年と2002年のスコアを比べると、MSMのスコアは全ての閾値で予報時間全体に渡って、2001年より2002年の方が高くなっていることが分かる。RSMも同様の特徴であるため、これは年々変動であると考えられる。

次に、年々変動を除いて4次元変分法導入の影響を見るために、図1.1.1に示したスレットスコアの年変化のモデルによる差を図1.1.2に示す。値は、MSMの差(2002年－2001年)－RSMの差(2002年－2001年)を示す。つまり、図の値が正であれば4次元変分法の導入によってMSMの予報精度が上がったことを示す。閾値10mmについては、FT=00-06で正にな

っており、FT=06-12、12-18では0に近い。この予報初期でのスコアの改善は、4次元変分法では解析雨量をプレラン方式よりもうまく同化できるようになったことが原因である。閾値5mm、1mmでは、FT=06-12、12-18で、正になっている。これは、プレラン方式では、予報初期に高いスレットスコアを出しても、その後維持できないという性質があった(郷田 1998)のに対し、4次元変分法では、予報時間経過に伴うスコアの低下は緩やかになったことを表している。FT=00-06は負であるので、閾値5mm、1mmについては予報初期で若干プレラン方式の方が精度が高い。

図1.1.3にバイアススコアを示す。閾値などの設定は図1.1.1と同じである。バイアススコアは1より大きいと空振りが多いことを、1より小さいと見逃しが多いことを示す。2001年、2002年ともにMSMのバイアススコアは全て1を超えており、値はRSMよりも大きい。年変化に着目すると、RSMでは全ての閾値で予報時間全体に渡って2001年より2002年のスコアが大きくなっている。MSMでも同様の傾向が見られるが、閾値10mm、5mmのFT=00-06のスコアは若干小さくなったか、ほとんど変化がない。RSMの変動を年々変動と考えると、バイアススコアは改善された。つまり、プレラン方式のMSMには物理的初期値化により、予報開始直後は降水の予報頻度が多すぎるといった特徴があった(郷田 1998)が、4次元変分法になってこの性質が改善された。

以上のことから、4次元変分法導入後、10mmの予報初期において、MSMの予報精度は大幅に改善され、5mm、1mmで予報時間経過によるスレットスコアの低下はプレラン方式よりも緩やかになったことが分かる。また、RSMとMSMの精度を比較すると、10mmではMSMの方が良く、5mm、1mmではほぼ同程度であった。なお、これは同じ予報時間に対しての比較であり、RSMよりも予報回数が多く、配信時間が早いというMSMの利点は考慮していない。このことを考慮した両者の精度比較については、郷田(2001)を参照いただきたい。

1.1.3 国内ゾンデ観測に対する検証結果

4次元変分法導入に伴い、初期値として利用する解析変数に変更された。その結果、初期値の温度と高度の特性が変わった。しかし、その他の変数や予報値に明確な差は見られなかった。以下では、その詳細を述べる。

¹ 田中小緒里

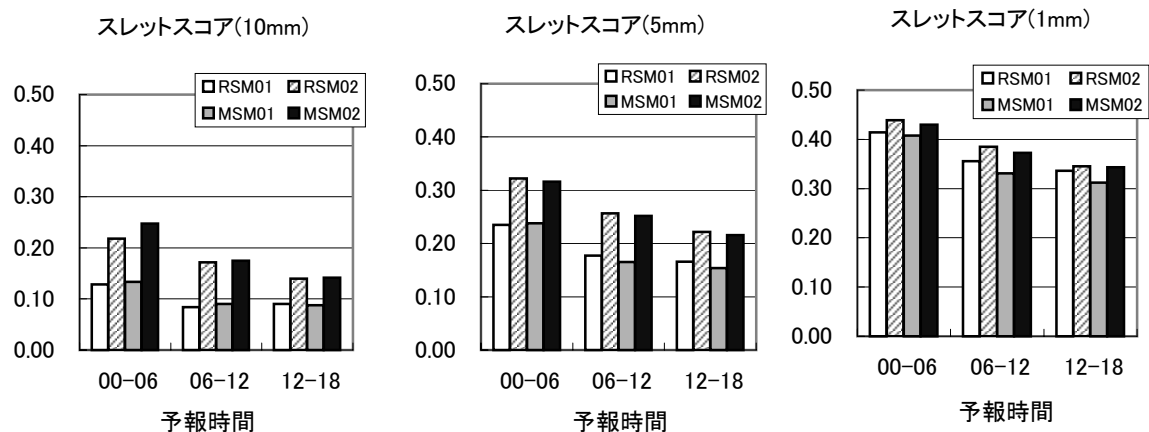


図1.1.1 解析雨量に対するスレットスコア。閾値は、3時間積算雨量を40km格子で平均して10mm(左)、5mm(中央)、1mm(右)以上。なお、図は6時間毎にまとめたもの。横軸は予報時間、棒グラフは、左からRSM2001年、RSM2002年、MSM2001年、MSM2002年を示す。

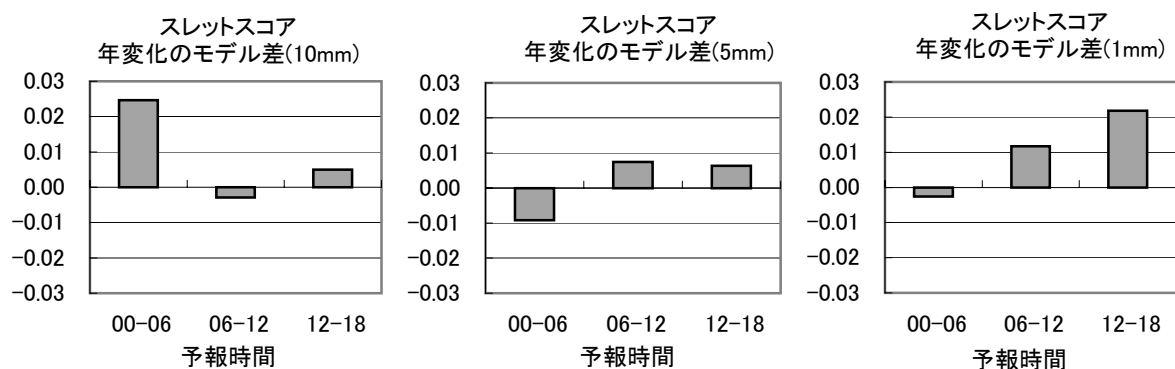


図1.1.2 図1.1.1と同じ。ただしスレットスコア年変化のモデル差。値は、MSMの差(2002年－2001年)－RSMの差(2002年－2001年)。

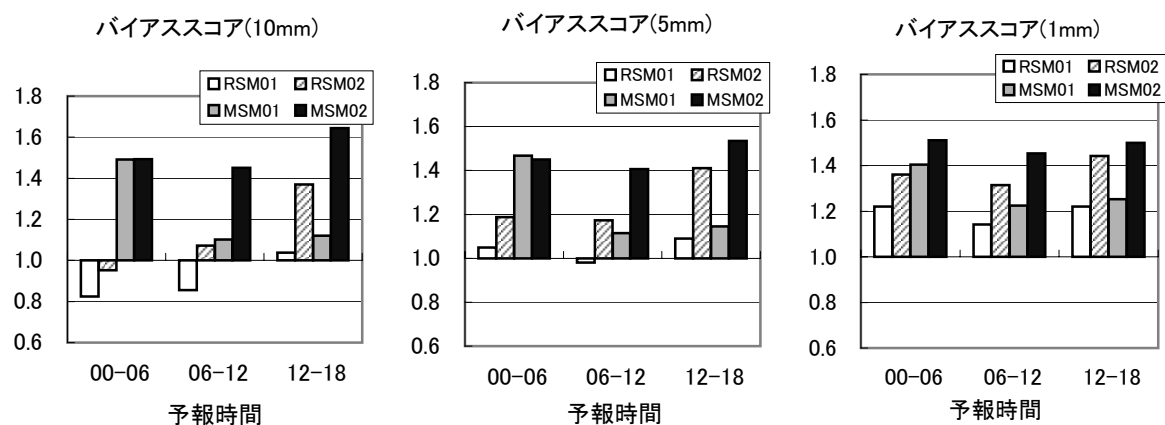


図1.1.3 図1.1.1と同じ。ただし、バイアススコア。

図1.1.4に国内ゾンデの高度、気温、東西風に対するFT=0とFT=12の平方根平均二乗誤差（以下、RMSE）とその平均を示す。調査は、850hPa面、500hPa面、250hPa面に対して行ったが、それぞれの面の特徴は同じであったので500hPa面のみ示す。境界値や同化に使われるデータの違いから、06、18UTC初期値のMSMの特性は必ずしも00、12UTC初期値のMSMと同じではない。しかし、ゾンデデータが00UTCと12UTCに限られ、同じ予報時間を検証できないために、ここでは初期時刻が00UTCと12UTCのMSMのFT=0とFT=12についてのみ述べる。よって、図1.1.4に示す結果は、00UTC初期時刻のMSMと12UTC初期時刻のMSMの結果を平均したものである。降水の検証と同様に、年々変動を見る指標としてRSMの結果を合わせて示す。

まず、RMSEの値に注目すると、全般的にRSMのRMSEがMSMのRMSEよりも小さい。このことについては郷田(2001)に述べてあるのでここでは議論しない。

FT=0では、MSMのRMSEの平均は、気温では2001年より2002年の方が小さく、月変動の大きさと比べるとその変化は大きい。逆に、高度の平均は、2001年より2002年の方が大きくなっている。ただし、月変動の大きさと比べると気温の場合ほど大きな変化ではない。FT=0において、気温、高度とも、RSMのRMSEの平均は2001年と2002年であまり変化が無いことから、MSMの変化は、4次元変分法の導入の影響と考える。この気温の変化は、プレラン方式では、高度から変換された気温を初期値で利用して

いたのに対して、4次元変分法では解析した気温自身をそのまま初期値として利用するように変更したことが原因である。一方、高度の変化は、気温とは逆に4次元変分法になって気温を変換して高度を求めるようになったことが原因である。東西風のFT=0では、2001年と2002年でMSMとRSMのRMSEの大小が逆転しているが、差は小さいことから、今後の推移を追った後で影響を判断する必要がある。FT=12では、全ての要素で、4次元変分法導入前後で大きな変化はない。

以上の結果からも分かるように、4次元変分法では、より気温の観測値に合わせた解析値を作成するようになった。初期値を利用する際には、4次元変分法導入前後でこのような特性の違いがあることに注意していただきたい。

参考文献

- 石川宜広， 2001： 4次元変分法を用いた予報実験．平成13年度数値予報研修テキスト 気象庁予報部， 9-12．
- 石川宜広，小泉耕， 2002： メソ4次元変分法．数値予報課報告・別冊第48号， 37-59．
- 郷田治稔，1998： 局地数値予報の試験運用．数値予報課報告・別冊第44号， 53-72．
- 郷田治稔，2001： メソ数値予報モデル（MSM）の統計的検証．平成13年度数値予報研修テキスト 気象庁予報部， 4-8．
- 萬納寺信崇，2000： 領域モデル(RSM, MSM, TYM)．数値予報課報告・別冊第47号， 23-27．

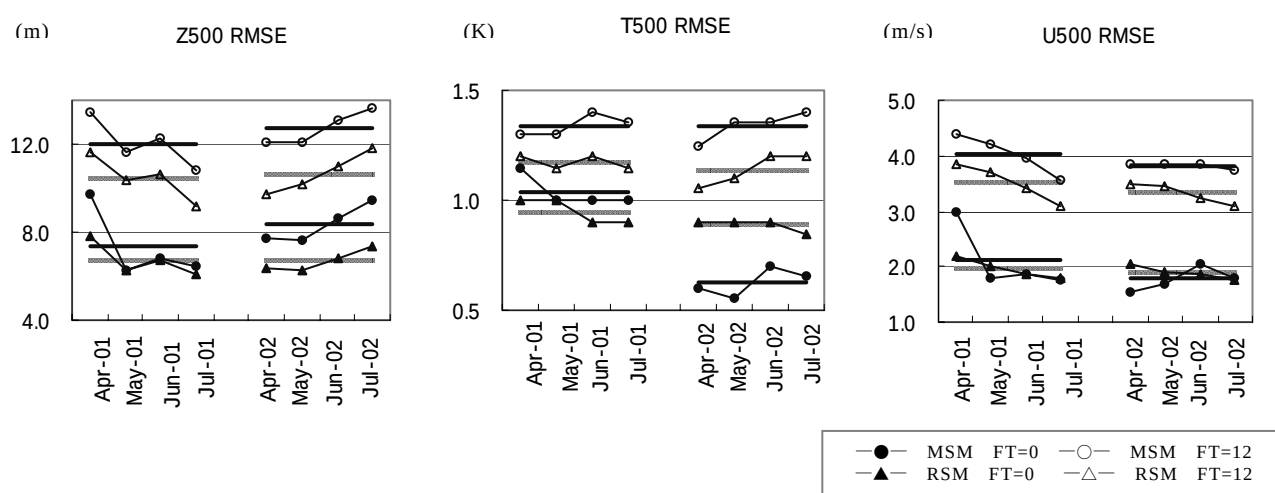


図1.1.4 国内ゾンデに対する500hPa面の高度(左)、気温(中)、東西風(右)のRMSE。●はMSMのFT=0、○はMSMのFT=12、▲はRSMのFT=0、△はRSMのFT=12、濃い太線はMSMの、薄い太線はRSMのRMSEの年平均を示す。期間は、2001年4月から7月(左側)、2002年4月から7月(右側)である。

1.2 メソ4次元変分法の改良¹

1.2.1 はじめに

2002年3月にメソ解析に4次元変分法が導入され降水予報の精度向上に寄与した(第1.1節、第3.2節)。導入前には1ヶ月間のサイクル実験を2回行い性能や安定性を確認してきたが(石川・小泉 2002)、運用開始後に100hPaおよびそれより上の解析場に不自然なインクリメント(第一推定値に対する修正量)が現れることがあることが判明した。第1.2.2項ではこの問題の原因とその対策について述べる。

また石川・小泉(2002)にもあるとおり、現在のメソ解析には台風ボーガスが使用されていないため、初期値における台風の位置がずれる場合がある。これまで使用されてきた形式の台風ボーガスを4次元変分法に組み込むのは難しいため、何らかの工夫が必要になる。第1.2.3項ではメソ解析への台風ボーガス導入のための開発の現状について述べる。

1.2.2 上層の不自然なインクリメント

(1) 症状

図1.2.1は、メソ4次元変分法がルーチン化されて間もない2002年3月23日18UTCの解析の30hPa高度である。図1.2.2に示した第一推定値の高度場と比較して、朝鮮半島から日本の南海上にかけてかなり不自



図1.2.1 2002年3月23日18UTCの解析による30hPaの高度



図1.2.2 2002年3月23日18UTCの解析に用いられた第一推定値の30hPa高度

然な構造が見られる。初期値におけるこのような歪みは、航空支援資料に悪影響を及ぼすおそれがある。

こうした歪みは、対流圏上部から成層圏にかけて、気温にかなり大きな解析インクリメントが与えられたために生じたことがわかったが、このインクリメントに対応するような観測は存在していない。

(2) 原因

調査の結果、成層圏に現れた気温インクリメントは解析雨量の同化と関連していることが判明した。

予報モデルが降水を作り出す最も基本的なプロセスは「飽和に達した格子点で凝結した水が降水として落下する」というものである。現在の4次元変分法では、解析雨量の同化においてモデルが作る降水と解析雨量が近くなるように、飽和した格子点で凝結する水の量を調節している。しかし、未飽和の格子点の水蒸気量や気温を調節して飽和に近づける、ということとはできない。

したがって対流圏中下層は乾燥していて成層圏に飽和層があるような場合に降水量が観測されると、対流圏中下層を湿潤化させるのではなく、成層圏の飽和層での凝結量を増やすようにインクリメントが計算される。しかし、本来対流圏上部～成層圏での飽和水蒸気量はごくわずかであるから、そこでの凝結量を観測された降水量に合わせようとすると、比湿と気温を不自然なほど大きく変えてしまう。これがここでとりあげた不具合の原因であると考えられる。

(3) 対策

上に述べたようなことが起こるのは、成層圏で凝結した水が地面に到達するまでの間に蒸発せず、モデルの降水量として算出される場合に限られる。つまり、成層圏で作られた降水が途中の乾燥した層で完全に蒸発し、地上の降水量が0になれば成層圏にインクリメントを生じることはない。

モデルの中には、凝結した水が落下する途中で再蒸発する過程が組み込まれているが、高速化のために一部計算が簡略化されていることから、降水量が完全に0にはなりにくいことがわかっている。この計



図1.2.3 図1.2.1に同じ。ただし、降水の再蒸発について本文に述べた修正を施した場合。

¹ 小泉 耕

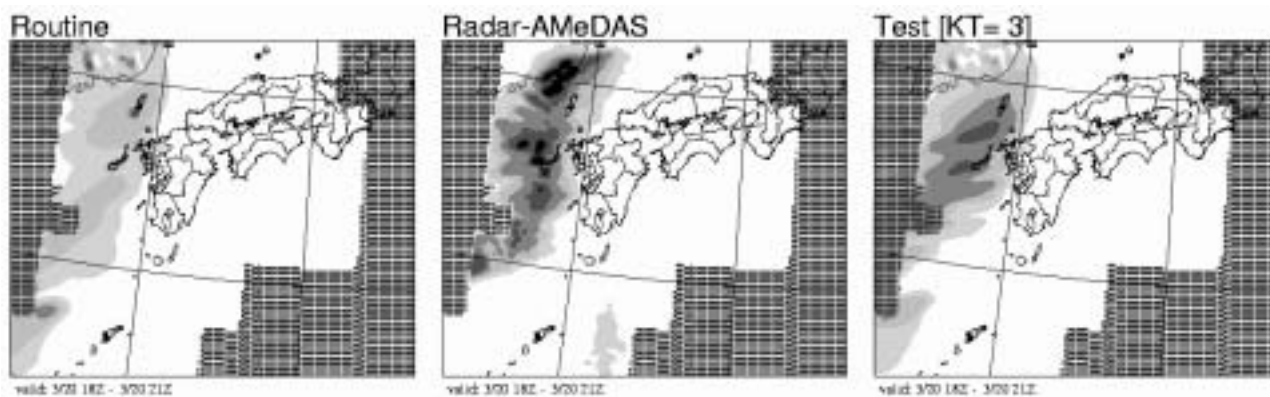


図1.2.4 2002年3月20日18UTCを初期値する3時間予報の降水量。左から、従来の4次元変分法による初期値からの予報、解析雨量、本文で述べた修正を施した4次元変分法による初期値からの予報。

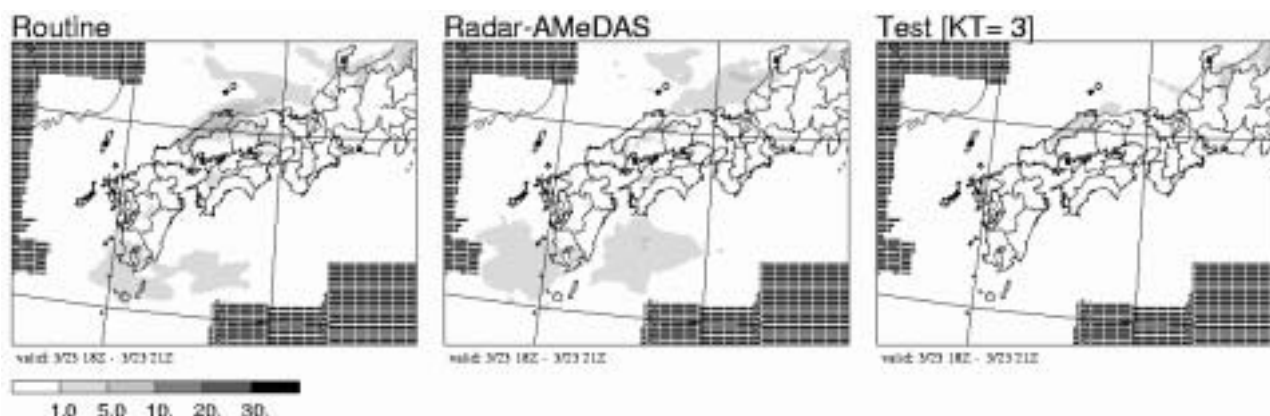


図1.2.5 図1.2.4に同じ。ただし、2002年3月23日18UTC初期値の場合。

算を精密化すると、成層圏で作られた降水が途中の乾燥した層で完全に蒸発するようになった。これによって本項の不具合は解消する(図1.2.3)ため、2002年5月30日にルーチン化した。

この修正により、やや強い降水については予報が良くなる場合がある(図1.2.4)。ただし、弱い雨については若干対応が悪くなる場合がある(図1.2.5)。

弱い降水がうまく出ないことについては、第一推定値で中下層が乾燥していたときに解析雨量のデータだけではそれを修正できない、ということに問題の本質がある。今後、新規の衛星データ(SSM/Iなど)を同化し水蒸気の情報が増加することによって、第一推定値の水蒸気場が適切に修正されることが期待されるが、他方で解析雨量をもとに水蒸気の鉛直プロファイル調節する物理的初期値化の手法を再び利用することも検討する余地がある。

1.2.3 台風ボーガス

(1) 必要性和問題点

全球解析や領域解析においては、モデルの初期値に適切な台風構造を与えるために、台風位置情報をもとに作成した人工的な台風構造(台風ボーガス)を第一推定値に埋め込むという手法を採っている(大野木 1997)。これに対しメソ解析においては、2001

年3月にメソ数値予報モデル(以下MSMと略す)が正式運用となった当初から台風ボーガスが使用されないまま今日に至っている。メソ解析がブレラン(多田 2000)で行われていた時には、領域モデル(以下RSMと略す)の予報値を内挿したものから毎回の解析がスタートしていたので、台風ボーガスはRSMの予報値を通じて間接的にメソ解析に反映していた。しかし、4次元変分法導入時にメソ解析は予報・解析サイクルを構成することになったため、現在では、台風ボーガスをメソ解析に直接反映する手段が無い。このため、側面境界から台風が入ってくる時のように境界値から台風の情報が与えられる場合は良いが、MSMの領域内で台風が発生する場合には、その位置が適切に解析されないことがある。

一方で、4次元変分法においては「解析値」は解析時刻の数時間前を初期値とするモデルの予報値であり、この予報値が観測に合うようにその初期値を修正する。したがって解析値を直接加工すると、せっかくモデルによってバランス良く作られた場をゆがめることになるので、従来のように「解析の元になる場に台風ボーガスを埋め込む」という方法を採用することは適切でない。

(2) 疑似観測型台風ボーガス

そこで、ボーガス構造を埋め込む代わりに、ボー

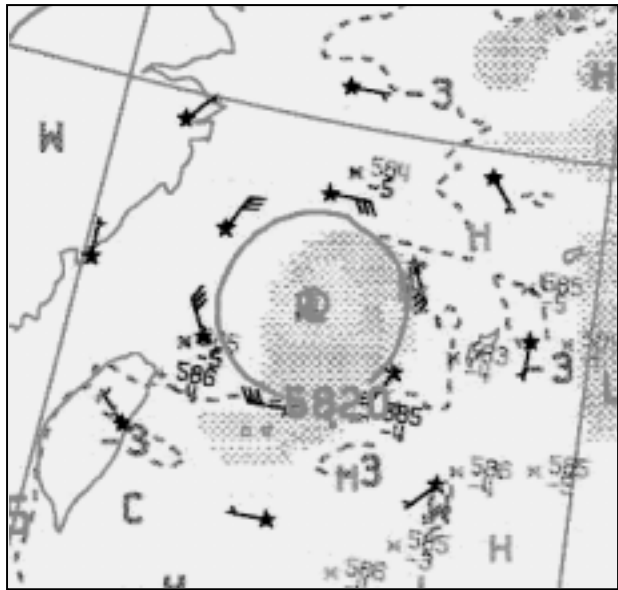


図1.2.6 疑似観測型台風ボーガスの例。2001年9月14日18UTCの500hPa面の解析モニタ図を拡大したもの。★に矢羽の付いたものが台風ボーガスの疑似観測データ。台風16号の中心から200kmと400kmの円周上にデータが並んでいる。高度(灰色の実線)と気温(灰色の破線)の等値線が合わせて描かれている。なお、×は衛星観測(ATOVs)のデータ。

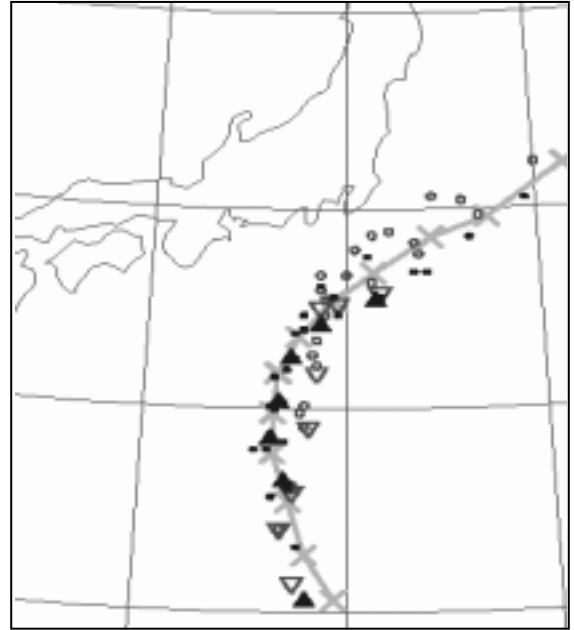


図1.2.7 台風 T0117 の中心位置。灰色の太線が観測された位置。▽▲がそれぞれボーガスなし/ありの場合の初期値の位置で、白丸・黒丸がそれぞれボーガスなし/ありの6時間ごとの予想位置。2001年9月18日06UTCから9月20日00UTCまでの8例について示した。▲や黒丸はおおむねベストトラック上にあるのに対し、▽や白丸は位置がずれている。

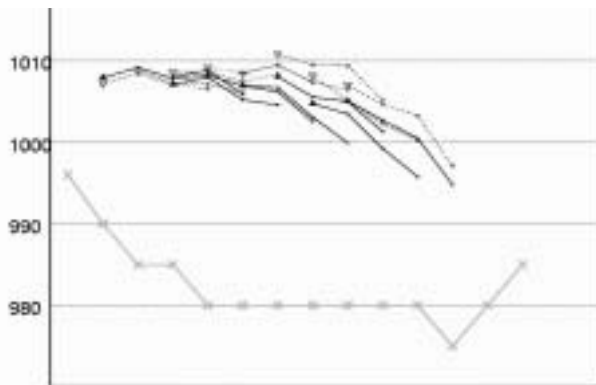


図1.2.8 台風T0117の中心気圧。灰色の実線が観測値。点線が台風ボーガスを用いない場合の、実線が台風ボーガスを用いた場合のMSMでの中心気圧。▽▲がそれぞれボーガスなし/ありの場合の初期値の中心気圧で、白丸・黒丸がそれぞれボーガスなし/ありの6時間ごとの予想中心気圧。2001年9月18日06UTCから9月20日00UTCまでの8例について示した。

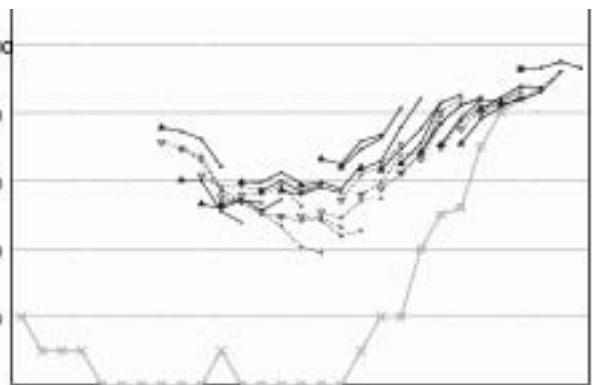


図1.2.9 図1.2.8に同じ。ただし、台風T0115の中心気圧。2001年9月7日12UTCから9月12日00UTCまでの35例について示した。

ガス構造から算出される地上気圧と風を、あたかも観測データのように見なして他の観測データと一緒に4次元変分法で同化する、という方法を採用することとした。この場合、疑似観測データをどのような密度で与えるかという点に任意性があるが、台風の構造を表現しつつ過度な密集を避けるという観点から、ここでは台風中心位置および中心からほぼ200km間隔の同心円上に等間隔(台風中心から見た方位角

で30度～60度間隔。円周の長さによって調節。)で配置して実験を行った。疑似観測データの例を図1.2.6に掲げる。

もうひとつ調節可能なパラメータとしてボーガス構造の深さがある。数値モデルには解像度に応じて表現可能な台風構造に限界がある。たとえば水平スケールが小さく強い台風において、海面更正気圧の勾配が空間的に大きく変化しているような場合、格

子間隔が粗いモデルではこれを忠実に表現することはできない。このため、ボーガスを作成する際には対象となるモデルの解像度に適した構造にする必要がある(詳細については大野木(1997)を参照)。また、MSMのように側面境界を持つモデルでは境界から台風が入ってくる場合も多いので、境界値を与えるモデルにおけるボーガス構造との整合も重要である。本項の実験では、メソ解析の繰り返し計算を行うモデルの格子間隔がRSMと同じであることから、領域解析の台風ボーガスで採用されている値を採用した。

MSMはデータ打ち切り時刻が「初期値の時刻+50分」であるため、実際の運用時に初期値の時刻の台風位置情報が解析に間に合うかどうかは微妙である。ここでは、6時間前の位置情報しか使用できないという設定とした。なお、プレランの時代にRSMから間接的に情報を得ていた時でも、与えられるRSMの初期値の時刻はMSMの初期値の時刻の6または12時間前であったので、条件が悪くなったわけではない。

(3) 実験の進捗状況と今後の課題

現在、2001年9月の台風(第15号、第16号、第17号)について実験を行っている。図1.2.7は台風17号について台風ボーガスを用いた場合と用いなかった場合の予想中心位置を示したものである。日本の南海上では、台風ボーガスを用いないと中心位置が実際よりも東にずれてしまうのに対し、台風ボーガスを用いるとこれが修正されていることがわかる。また中心気圧の予想については図1.2.8のとおり、台風ボーガスを用いることで実際の中心気圧にやや近い予想となっている。

一方、台風15号についてはボーガスを用いることによってかえって中心気圧が浅くなる場合があり(図1.2.9)、台風に伴う降水についてもボーガスを用いた方がスコアが若干悪化した(図省略)。台風15号の場合に限らず、ボーガスデータの風速が近傍の実観測の風速より弱いといった例も見られ、人工的な構造をモデルの中に作り出すことによって問題が生じる場合があることが明らかになっている。

台風の位置や強度の情報をモデルの初期値に的確に反映し、かつモデルの中の物理的なバランスを崩さないような台風ボーガスを与えることは容易ではないが、当面次の2つのパラメータを調節して最適な設定を得ようと考えている。

一つはボーガスデータの作成範囲である。現在の台風ボーガスの作成範囲は強風半径に比例するように決められているが、上で触れた台風15号は強風半径が大きいため、かなり広い領域に疑似観測データが配置され、結果としてモデルの中の大きなスケール場をゆがめた可能性がある。第1.4節ではボーガス領域の範囲を狭めることが予報の改善につながるということが述べられているが、ここでもボーガスデータを与える領域を台風中心付近に限定することで解析および予報が改善する可能性がある。

もう一つは(2)でも触れた「ボーガス構造の深さ」である。疑似観測データとしてボーガスを与える場合は、ボーガス構造が直接初期値に現れるわけではなくデータ同化を通して(モデルが表現できる範囲で)反映されるのであるから、必ずしも前もってモデルの表現能力に合わせたボーガスにしておく必要はないかもしれない。そうだとすると、現在の設定よりも深いボーガスを与えることで、解析場に作られる台風がより適切なものとなる可能性がある。

これらを調節することにより、台風の位置および強度の情報をMSMの初期値に的確に反映させる手法を確立し、早期に現業化したいと考えている。

参考文献

- 石川宜広・小泉耕, 2002: メソ4次元変分法. 数値予報課報告・別冊第48号, p37-59.
- 大野木和敏, 1997: 台風ボーガス. 数値予報課報告・別冊第43号, p52-61.
- 多田英夫, 2000: 大気解析. 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号合併号, p13-15.

1.3 メソスケール低気圧の過発達の改善に向けて¹

1.3.1 はじめに

領域モデル（RSM）が1996年3月に導入されて以降、水平スケールが200～300km程度のメソスケール低気圧が実況より発達し過ぎたり、天気図では解析されず実際には存否が不明な低気圧をモデルが予報するという問題が指摘されてきた。この問題を改善するために、積雲対流パラメタリゼーション（荒川-シューバートスキーム）をより高度化されたものに置き換える開発を行っている。同時に、降水過程全般や放射過程を更新し、雲水量を予報変数として追加することで、より精度の高い物理過程を導入する開発を行っている。これら新しい物理過程が組み込まれた実験版RSMで予報実験を行ったところ、いくつかの事例で過発達の事例に改善が見られた。本節ではこれまでの開発の経緯と予報実験の結果を示し、実験版RSMの予報特性を報告する。

1.3.2 メソスケール低気圧の過発達と降水過程

RSMで見られるメソスケール低気圧の過発達は、予報に与える影響が大きいことから重点的に調査が行われ、その一部について研修テキストなどで報告が行われた（中村 1997; 中村 1998; 美濃 1999; 今泉 2001）。

このうち、中村（1997）は理想的条件での予報実験を行い、このような低気圧の過発達は水蒸気の凝結による下層への非断熱加熱によって起きることを示し、この現象を抑制するためには積雲対流パラメタリゼーションの検討と改良が必要であると述べた。

現在のRSMの降水過程は以下の3つの過程で構成

大規模凝結：過飽和を飽和に調節する格子スケールの凝結

荒川-シューバート（A-S）スキーム：積雲対流パラメタリゼーション

湿潤対流調節：A-Sスキームより雲底高度の高い中層対流のパラメタリゼーション

中村（1997）の事例解析では、過発達したメソスケールの低気圧近傍では大規模凝結による降水量がA-Sスキームと対流調節に比べて卓越していた。また、加熱率の鉛直分布は大規模凝結による900hPaから700hPaといった下層への加熱が非常に大きかった。

大規模凝結による降水量が卓越する傾向は中村が調べた事例に限らず、現RSMの一般的な予報特性として、中緯度の海洋上で見られる。図1.3.1には、モデルによる2002年6月の月積算降水量を、現RSMでの降水過程別に示した。現RSMでは、日本の南海上の梅雨前線に対応する雨域では、大規模凝結による降水量（左）が卓越し、多いところで500mm程度ある。一方、A-Sスキームと対流調節を合わせた降水量（右）は最大100mm程度と、大規模凝結に比べ少ない。

一般に、モデルの解像度が高くなれば、対流活動は格子スケールで表現される割合が高まるため、大規模凝結による雨量が多くなってよい。しかし、現RSMでは、A-Sスキームによる不安定の解消が弱いことが原因で、大規模凝結が過剰となり、メソスケール低気圧の過発達が起きている可能性が考えられる。

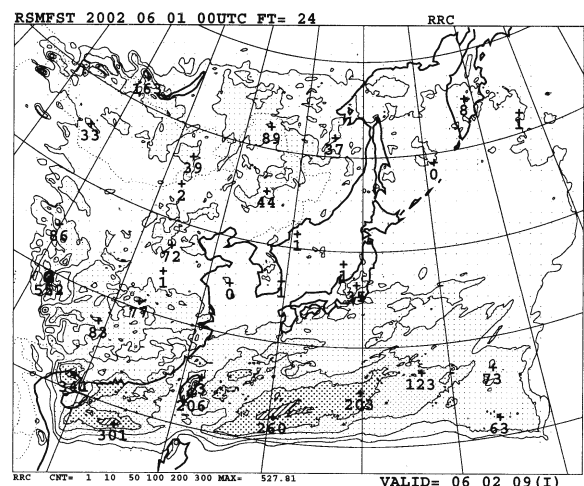
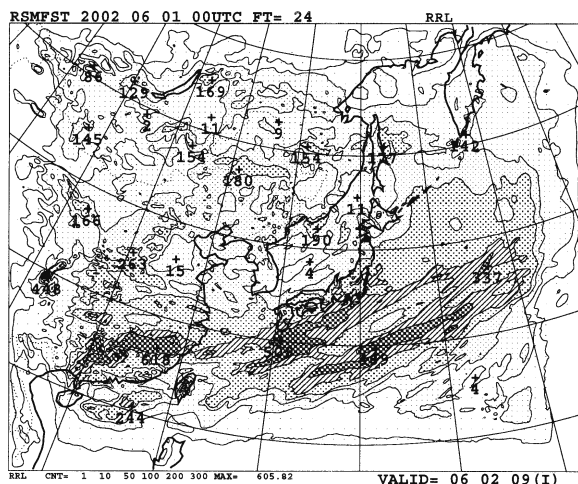


図1.3.1 2002年6月の00UTCを初期値とする24時間予報での月積算降水量を降水過程別に示した。

（左）大規模凝結による降水量、（右）パラメタリゼーション（A-Sスキームと対流調節）による降水量。等値線は1,10,50,100,200,300mm。側面境界付近で降水量が少ないのは、モデル内で降水を人為的に減少させているため。

（図1.3.5も同様。）

されている。

¹ 細見卓也

これまでも、現RSMのA-Sスキームで、より効果的に不安定を解消するようにパラメータの調整を試みたが、予報特性に目立った変化は見られなかった。現RSMのA-Sスキームは1996年3月以前に開発されたものだが、全球モデル（GSM）ではその後も改良が続けられている。このA-Sスキームは積雲励起のメカニズムを改良するといった高度化が行われているため、現RSMのA-Sスキームよりも、広い領域で不安定を効果的に解消することが期待された。そこで実験版RSMでは、現在のものに代えてGSMのA-Sスキームを降水過程に組み込み、その他の物理過程の一部も次項で述べるように新しいものに置き換えて予報実験を行った。

1.3.3 実験版RSMの物理過程

A-Sスキームも含めて、この実験版RSMには、1999年12月に物理過程を改良して現業化されたGSM（GSM9912）の降水過程を使用した。この降水過程の改良とその効果については隈（2000）に詳しく述べられている。GSM9912では、A-Sスキームの改良と共に、従来の大規模凝結に代えて雲水スキームを導入し、雲水量を予報変数として追加した。実験版RSMにも同様に、GSM9912の雲水スキームを降水過程に組み込んで雲水量を予報変数として追加した。雲水量を予報変数とすることで、A-Sスキームで計算された雲水を、従来のように全てを降水として地上に落下させず、一部を雲水のまま扱うことが可能になる。

また、雲水量や雲水スキームで診断的に求められる雲量を放射過程で使用するための対応が行われ、精度が向上したGSM9912の放射過程を組み込んだ。この放射過程の詳細は北川（2000）を参照していただきたい。

1.3.4 メソスケール低気圧が過発達する事例

本項ではメソスケール低気圧が過発達する事例について紹介する。図1.3.2に2002年6月16日06UTCの地上天気図を、図1.3.3 には対応する時刻の現RSMと実験版RSMの18時間予報（6月15日12UTC初期値）を示す。現RSMでは東海地方の南海上の前線上にメソスケール低気圧があり、その中心付近では6時間で80mm強の降水が見られる。実験版のRSMでは四国の南海上に50mm弱の降水が見られる。この付近にシヤーが見られるものの、明瞭な低気圧は見られない。一方、図1.3.2の地上天気図には、現RSMで予報されている低気圧は解析されておらず、実験版RSMが実況に近い表現をしている。

図1.3.4にはこの低気圧周辺での降水過程による大気への加熱率を、降水過程別に鉛直断面図で示す。現RSMでは大規模凝結による加熱（左上）が大半を

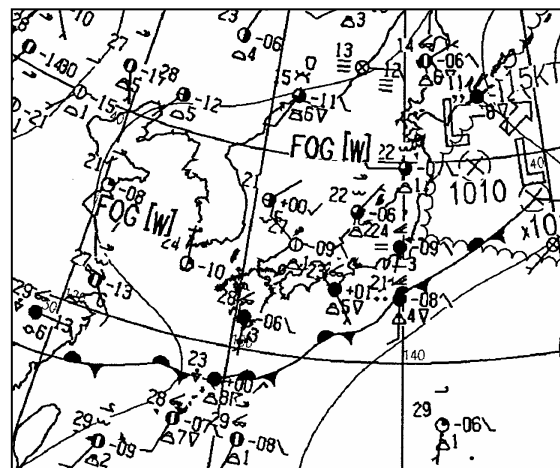


図1.3.2 地上天気図（2002年6月16日06UTC）

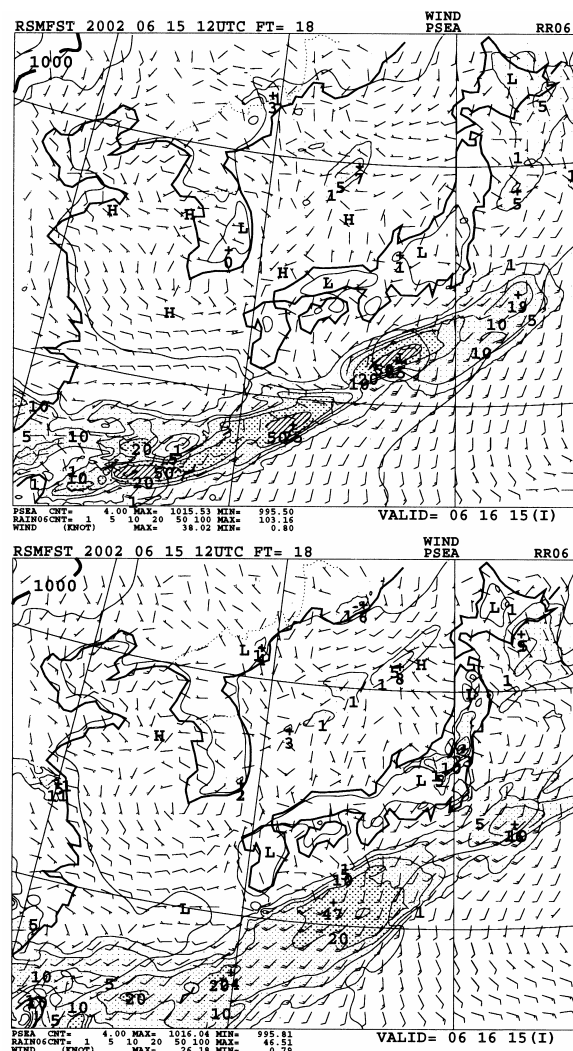


図1.3.3 2002年6月15日12UTC初期値の18時間予報での海面気圧（hPa）・6時間積算降水量（mm）。（上）現RSM、（下）実験版RSM。等値線は気圧が4hPa、降水量が1,5,10,20,50,100mm。

占め、A-Sスキームなどによる加熱（右上）はほとんど見られない。実験版RSMではA-Sスキームによる加熱（右下）が鉛直方向に広く見られる。また、大規模凝結に代わる雲水スキームの加熱量（左下）は現RSMのものに比べて、大きいところで 2.2×10^{-3} (K/sec) から 0.8×10^{-3} (K/sec) 程度へと全般に小さくなり、局所的に下層へ集中した加熱も見られなくなっている。

この事例では、高度化されたA-Sスキームにより不安定が効果的に解消されたことで、現RSMで見られる下層への非断熱加熱が強まらず、それに伴うメソスケールの低気圧の発達を抑えられたことが分かる。

1.3.5 2001年10月の予報実験

実験版RSMによる予報実験を2001年10月の1ヶ月間行った。図1.3.5には現RSMと実験版のA-Sスキームなどによる月積算降水量を示した。実験版RSMは本州の南海上で、パラメタリゼーションによる降水量が50mm以上や100mm以上といった領域を大幅に広げている。前項の結果とも合わせて、現RSMに比べてA-Sスキームがより広い範囲で効果的に不安定を解消していると考えられる。

ゾンデに対して検証した結果を00,12UTCの初期時刻別に一部の要素について示した。以下に検証結果の特徴をあげる。以下では平方根平均二乗誤差 (Root Mean Square Error) をRMSEと略す。

- 250hPa東西風では、実験版RSMは平均誤差を大きく減らし、現RSMで見られる予報時間後半での風速の負バイアスを改善する。また、RMSEを予報後半で現RSMに比べて減らしている。
- 500hPa高度では、初期値を除くどの予報時間でも平均誤差、RMSE共に改善する。また、500hPa気温では、実験版RSMは24時間予報以降の平均誤差やRMSEを改善する。
- 850hPa気温では、実験版RSMが00UTC初期値の予報では平均誤差をどの予報時間でも0.1から0.2度ほど減らす。一方、12UTCでは0.1度ほど平均誤差を増やしている。RMSEでは12UTC初期値はどの予報時間でも中立、00UTC初期値は12時間予報が中立で、その他の予報時間は0.1度ほど改善する。

この他の要素についても実験版RSMは現RSMと

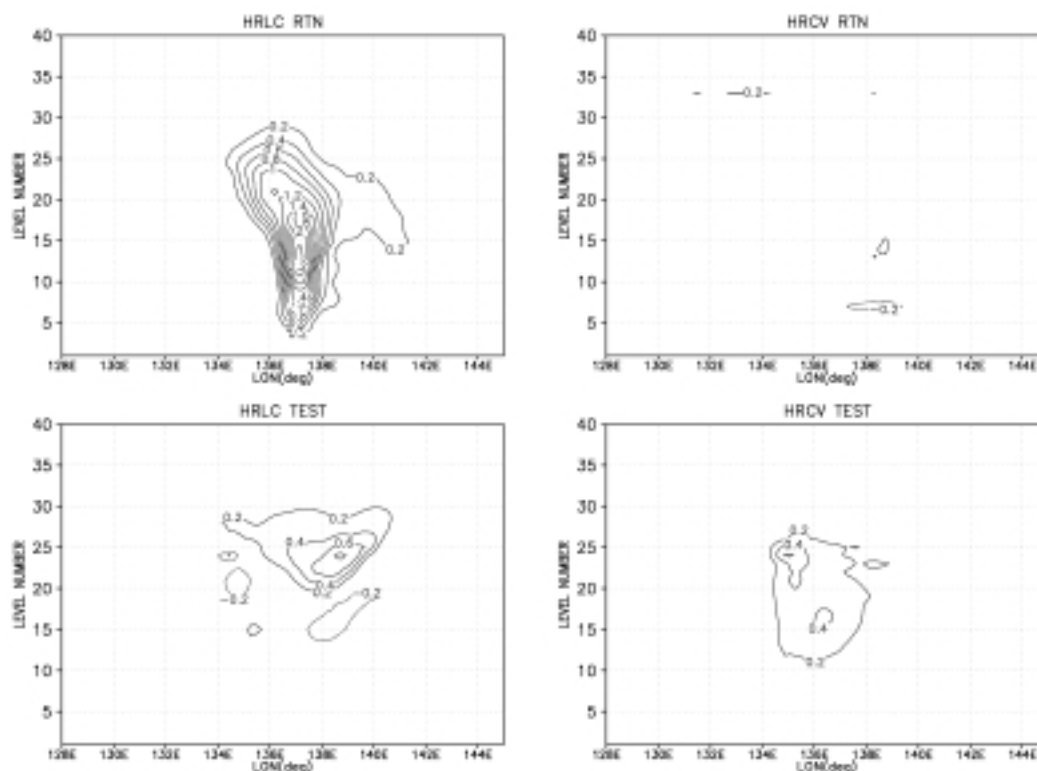


図1.3.4 2002年6月15日12UTC初期値の18時間予報での前6時間平均の大気への加熱量 (10^{-3} K/sec)。

北緯32度に沿って、東経128度から145度までの鉛直断面図。(左列) 大規模凝結 (実験版RSMは雲水スキーム) による加熱量 (HRLC)、(右列) A-Sスキームと対流調節による加熱量 (HRCV)。上段は現RSM (RTN)、下段は実験版RSM (TEST)。鉛直軸はモデル面で、気圧面ではないことに注意が必要。地表面の気圧が1000hPaの場合、15層がおよそ750hPa、25層がおよそ400hPaとなる。

また、図1.3.6には現RSMと実験版RSMの予報を

比較して概ね良好な結果が得られ、現業モデルとし

でも基本的な精度が確保されている。

1.3.6 今後の課題

本節では、A-Sスキームなどの物理過程を変更した実験版RSMの概要と予報実験の結果を報告した。天気図で解析されず、実際には存否が不明なメソスケールの低気圧が現RSMで予報された事例で、実験版RSMは発達を抑えることが分かった。また、第1.3.4項での加熱率の鉛直分布や第1.3.5項での積算降水量の比較から、実験版RSMのA-Sスキームは、より広い範囲で効果的に不安定を解消していると考えられる。さらに、ゾンデに対する検証から、2001年10月の統計的な予報場の予報精度を向上することが分かった。

これまでの予報実験から実験版RSMでは、今回示した事例を含めて、いくつかの事例で過発達が抑制されることを確認している。しかし、メソスケール低気圧を含め、低気圧の過発達の問題は、この降水過程の変更だけで全てが解決されるわけではない。中村（1998）が指摘した傾斜対流のパラメタリゼーションや地表面過程など、低気圧の過発達に関する物理過程での課題が残されている。また、今回取り上げた事例よりもスケールの大きな低気圧の事例として、美濃（1999）や今泉（2001）は、解析変数から予報変数への変数変換において、温度場が不自然に変化したり水蒸気量が保存されないことで低気圧が過発達するなどの、予報精度を悪化させる問題を指摘している。これらについては、物理過程の改良や領域解析への4次元変分法の導入を通じて、引き続き改善を図ってゆく。

本節で紹介した実験版RSMは、物理過程をRSM向けに調整する作業を行うとともに、気温など他の予報要素への影響も調査中であり、良好な結果が得られれば現業化を予定している。メソ数値予報モデル（MSM）は近い将来に非静力学モデルにその役割を譲るため、ここで紹介した物理過程の変更はMSMには行わない予定にしているが、台風モデル（TYM）には予報精度が良好であれば同様の変更を計画している。

参考文献

- 今泉孝男, 2001: 偽低気圧の発達問題. 平成13年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 20-25.
北川裕人, 2000: 放射過程. 数値予報課報告・別冊第46号, 気象庁予報部, 16-31.
隈健一, 2000: 降水及び雲水過程について. 数値予報課報告・別冊第46号, 気象庁予報部, 32-47.
中村誠臣, 1997: 低気圧の発達しすぎの問題. 平成9年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 37-42.

- 中村誠臣, 1998: 降水過程. 数値予報課報告・別冊第44号, 気象庁予報部, 42-52.
美濃寛士, 1999: 事例検証（第9回合同マップディスカッション事例）. 平成11年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 14-22.

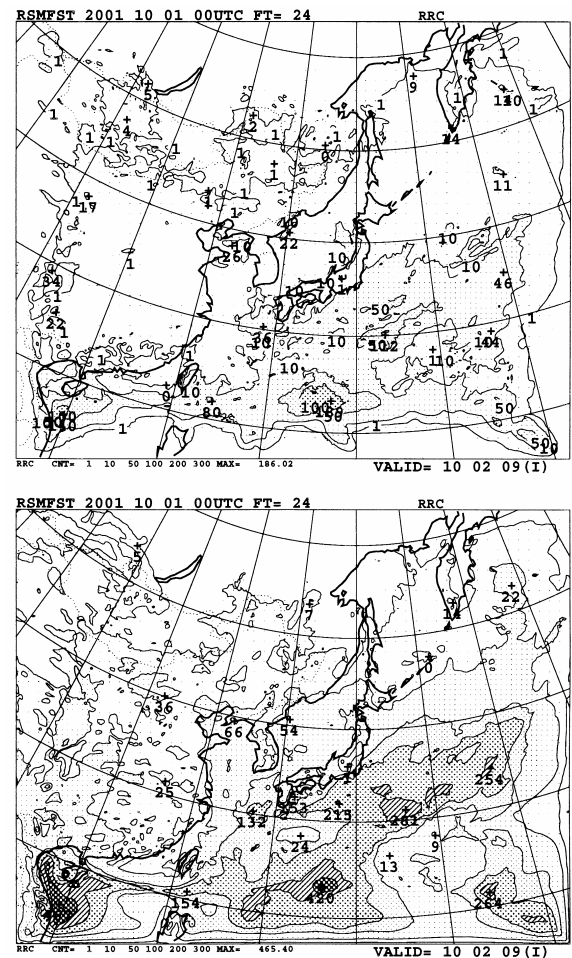


図1.3.5 2001年10月の月積算降水量のうち、パラメタリゼーション（A-Sスキームと対流調節）によるもの。（上）現RSM、（下）実験版RSM。等値線は図1.3.1と同じ。

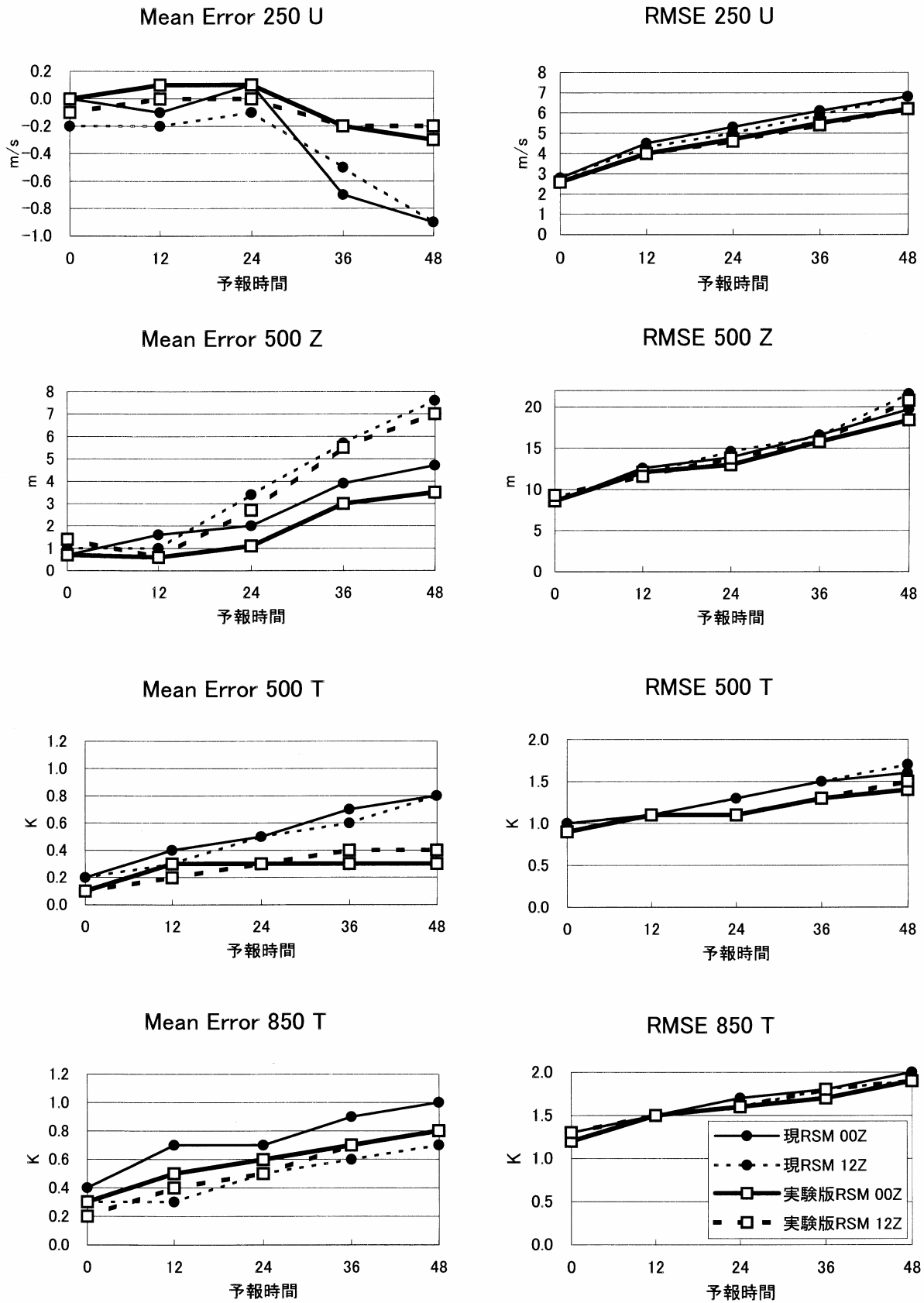


図1.3.6 2001年10月の予報実験での対ゾンデ検証結果。側面境界付近などを除くRSMの予報領域が対象。
 上から250hPa東西風、500hPa高度、500hPa気温、850hPa気温。左列は平均誤差（Mean Error）、右列は平方
 根平均二乗誤差（Root Mean Square Error）。□は実験版RSM、●は現RSM。実線は00UTC初期値の予報、破
 線は12UTC初期値の予報をそれぞれ表す。

1.4 台風モデルの検証と改良¹

1.4.1 はじめに

台風モデル（以下TYMと略す）は2001年3月の数値解析予報システムの更新に伴い高解像度化され、水平解像度24km、鉛直25層となった（露木 2001）。新しいTYMによる台風予報の検証については酒井（2001）で述べられているが、2001年8月の台風第9号までの検証で事例数が少ないため、系統的な誤差について十分な議論ができていなかった。ここでは、2001年に発生したすべての台風²に対するTYMの台風予報の検証結果について、全球モデル（以下GSMと略す）の結果と合わせて報告する。なお、台風の解析値としては、事後解析結果（以下ベストトラックと呼ぶ）を用いている。

また、TYMの台風予報の精度を改善するためにTYMの台風ボーガスの改良を行ったので、その結果についても報告する。

1.4.2 台風予報の検証

(1) 進路予報の検証

TYMとGSMの進路予報の誤差の経年変化（1996年から2001年まで）を図1.4.1に示す。台風は年によって発生数や予報の難しさが異なるため、この年々変動を考えると成績の推移をそのままモデルの性能の変化であると解釈できないことに注意が必要である。TYM,GSMともに過去5年間は48時間予報で約300km、72時間予報で約400kmの進路予報誤差とな

っている。2001年もほぼ同程度となっていて、水平及び鉛直方向の高解像度化（GSMは鉛直方向のみ）による、台風進路予報誤差の改善は確認できない。

次に台風進路予報の系統誤差の特徴を見るため、TYMとGSMの72時間進路予報の系統誤差の分布図を図1.4.2に示す。ただし、2001年台風第11号は他の台風とは異なった誤差の特徴を持っていたので除いている。2001年台風第11号の進路予報の誤差特性とそれに対するTYMの改良については第1.4.3節で述べる。進路予報の系統誤差の特徴は、TYMとGSMでよく似ている。すなわちルソン島の西の南シナ海を中心とする海域では、実況位置よりも北東方向に予報する系統誤差があり、日本付近では実況よりも西方向に予報する系統誤差がある。前者の特徴は、GSMが予報第2～3日に太平洋高気圧の勢力を弱く予報する傾向があり（第2.1節参照）、その予報値を側面境界値として用いるTYMにも影響を及ぼしているためと推測される。後者の特徴は、2000年以前にも見られた傾向（Nagata and Tonoshiro 2001）であるが、2001年は特に明瞭に現れている。この系統誤差を詳しく調べるため、72時間予報の台風中心の位置を、解析位置に対してプロットした散布図を、転向前と転向後に分けて図1.4.3に示す。TYMでは、転向前については台風の解析位置（散布図の中心）の周りにほぼ偏りなく予報位置が分布しているが、転向後については台風の解析位置の西側により多く分布している。このことは、転向後に台風の進行速度を実況より遅めに予報していることが多いことを

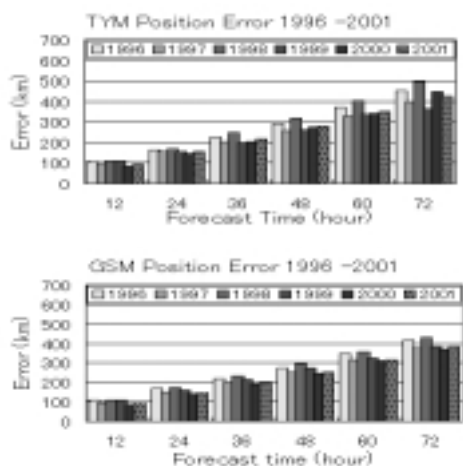


図1.4.1 TYMとGSMの台風進路予報誤差の経年変化図（1996年～2001年）
上図：TYM、下図：GSM。TYM・GSMともに72時間予報までの年平均の進路予報誤差の経年変化を表示している。

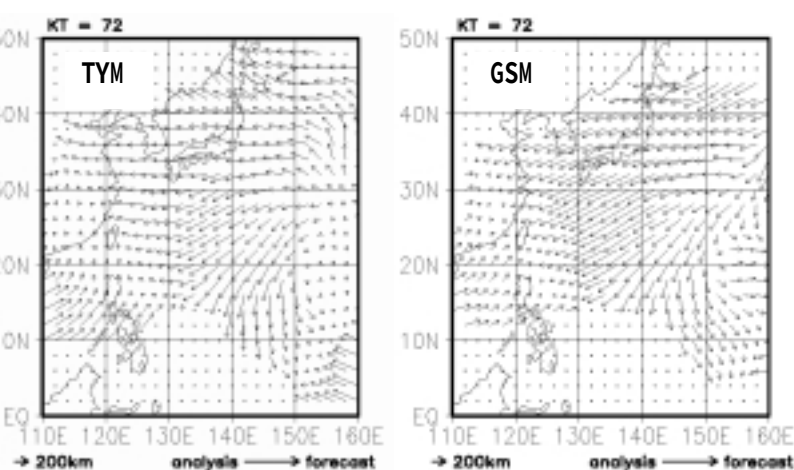


図1.4.2 72時間進路予報の誤差分布図（左図：TYM、右図：GSM）

実況の台風中心から見た、予報の台風中心位置をベクトルで示した図。ベクトルのスケールは図の左下に示してある。2001年台風第11号を除く、2001年のすべての台風に対する予報を対象とする。

¹ 酒井 亮太（ただし第1.4.3項は酒井 亮太・美濃 寛士（予報課））

² 2001年に発生した台風はすべて、2001年3月の数値解析予報システム更新後に発生している。発生数は26個である。

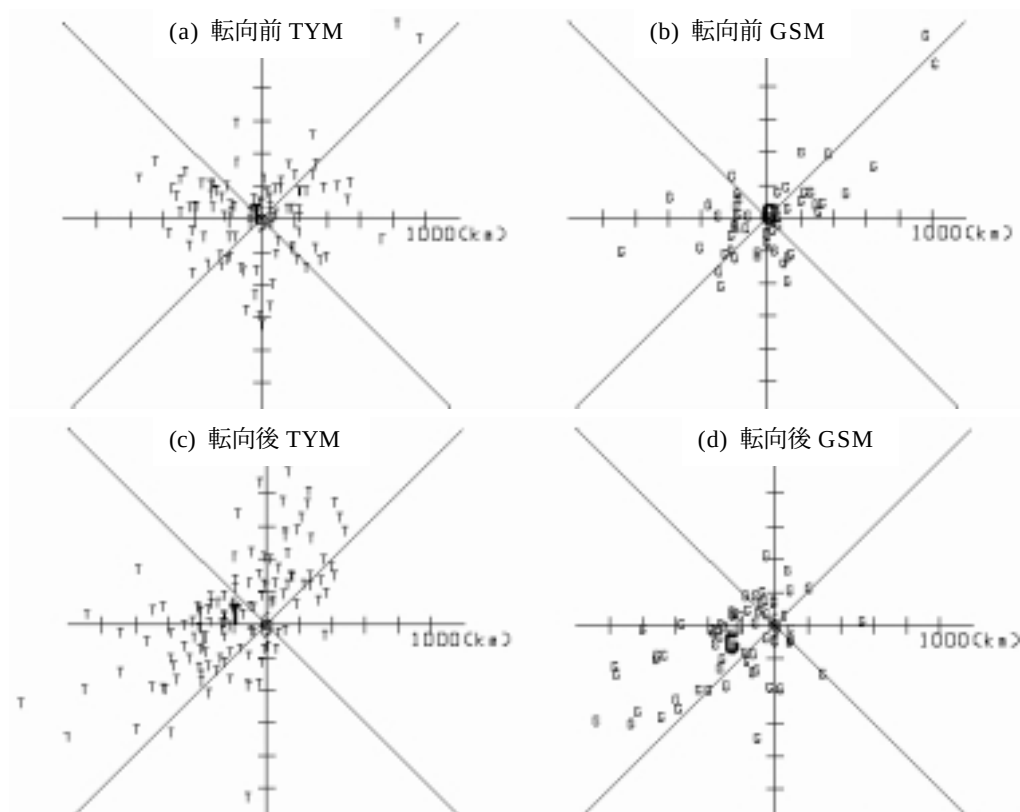


図1.4.3 72時間予報の予報位置の散布図

上段が転向前、下段が転向後、左側がTYM、右側がGSM。実況の台風中心位置に相対的な予報の台風の中心位置をプロットしている。縦軸の正は北、横軸の正は東へのずれに対応する。太字の「T」と「G」は、それぞれTYMとGSMの平均のずれを表わしている。

意味している。この傾向はGSMでも同様に現れており、GSMの系統誤差が側面境界を通してTYMの系統誤差に反映している可能性がある。GSMには日本列島付近の緯度帯で500hPaの西風を弱く予報する系統誤差があり（第2.1.3項(2)参照）、このことが転向後の台風の進行速度が系統的に遅いことに影響していると考えられる。

(2) 強度予報の検証

2000年と2001年の、TYMによる台風中心気圧の予報の平均誤差（以下MEと略す）と平方根平均二乗誤差（以下RMSEと略す）を図1.4.4に示す。2000年は予報期間を通して正のバイアスがあり、台風の中心気圧の深まりを十分表現できていなかった。これに対して2001年はバイアスが小さくなって、これまで解像度が低いために表現できなかった台風の中心気圧を、より現実的に表現できる場合が多くなったと考えられる。RMSEは、72時間までは2000年より2001年の方が小さく、予報精度は向上している。しかし、72時間以降は2001年の方がRMSEがわずかに大きくなっている。Sakai et al.(2002)によれば、上陸しない事例に限った検証では、72時間以降も強

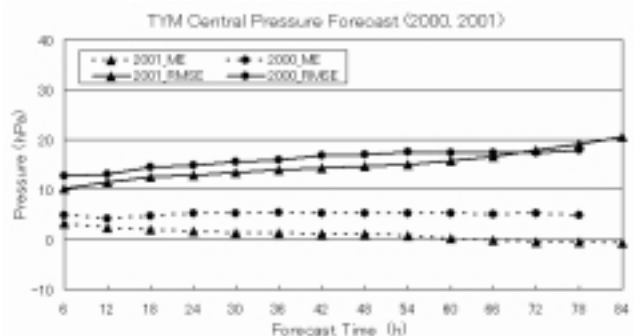


図1.4.4 2000年と2001年のTYMの台風中心気圧予報誤差（ME, RMSE）

●が2000年、▲が2001年に対応し、点線がME、実線がRMSEを表わしている。2000年は78時間予報まで、2001年は84時間予報までである。

度予報の精度が改善しており、上陸台風の進路予報誤差が強度予報に悪影響を与えていることが示唆されている。この点は今後の課題である。

次に、TYMの48時間予報における台風中心気圧の予報と解析の散布図を図1.4.5に示す。解析の中心気圧が940hPa以上の台風については、わずかに深く予

報する傾向があるものの、直線 $y=x$ 付近に分布しており、各階級の平均値も直線 $y=x$ 付近にあり、予報精度が良いといえる。一方、解析の中心気圧が940hPa未満の台風については、解析よりも浅く予報する傾向が見られる。

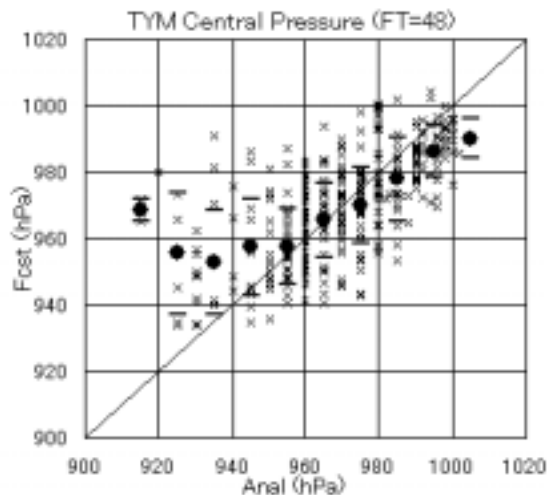


図1.4.5 TYMの台風中心気圧の48時間予報と解析値の散布図（2001年）

縦軸は予報、横軸は解析値を表している。×は個々の予報・解析値、●は10hPa毎の平均誤差、—は（平均誤差）±（標準偏差）をそれぞれ表している。

1.4.3 TYMの台風ボーガスの改良

(1) 台風ボーガス領域の変更

2001年に発生した台風に対するTYMの進路予報のうち、台風第11号の予報誤差は特に大きく、年間の全台風に対する進路予報の成績に大きな影響を及ぼした。図1.4.6は台風第11号に対するTYMとGSMのそれぞれの全進路予報とベストトラックによる台風の進路を示したものである。転向前に台風が西進して東経140度に達する前は、TYM,GSM共に実況とは異なる北上の予報を示しているが、これは実況で日本の南東海上に寒冷渦があり、モデルでは台風と寒冷渦との相互作用を予報していたが、実際には相互作用がなかったためと考えられる。この点については、これから述べる台風ボーガスの改良とは直接関係ないので議論はしない。転向前の台風が西進して東経140度を越えると、GSMは実況に近い進路を予報しているのに対して、TYMは各予報開始直後から北上を予報して、実況と大きく異なっている。TYMはGSMの予報値を側面境界値として利用し、また初期値もGSMと同じ全球解析を用いているため、一般的に進路予報は似ていることが多い。しかし、TYMはGSMとは異なった独自の方法で台風ボーガスを作成して初期場に台風を表現していることから、TYMの台風ボーガスが大きく影響していると考えられた。

TYMの台風ボーガスは、衛星観測や通報された観測データをもとに気象庁予報課が現業作業の中で速

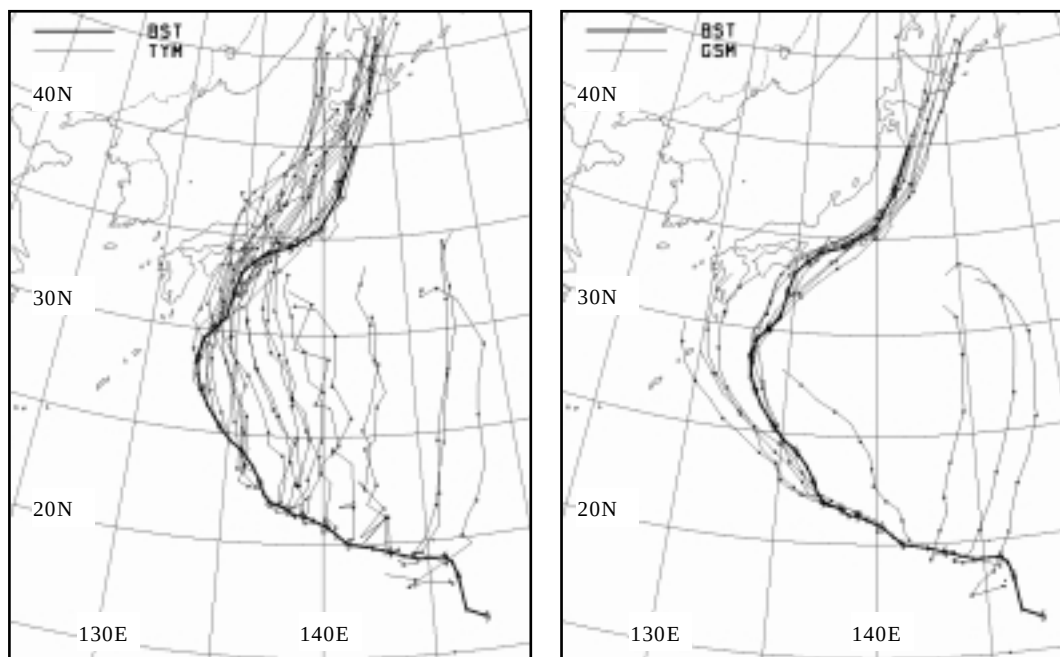


図1.4.6 前現業モデルでの2001年台風第11号の全進路予報とベストトラックによる台風進路
左図がTYMの全進路予報、右図がGSMの全進路予報。TYMは1日4回（00,06,12,18UTC初期値）の84時間予報、GSMは1日2回（00,12UTC初期値）の90時間予報まで描画している。
太線がベストトラック、細線が予報。

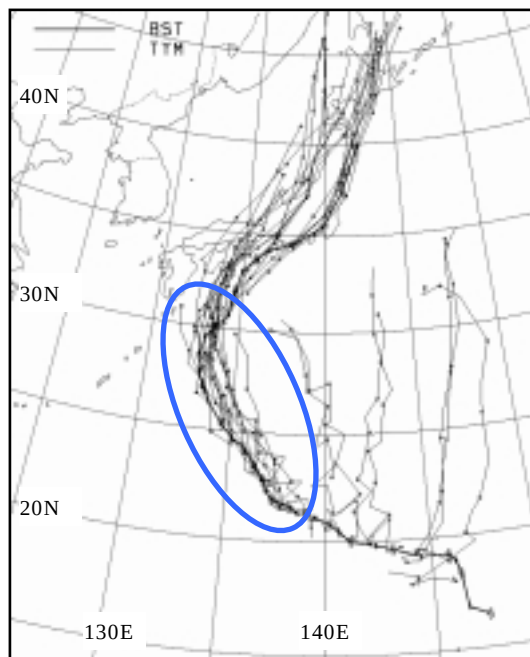


図1.4.7 TYMの台風ボーガス領域の半径に上限を設定した場合の2001年台風第11号の全進路予報とベストトラックによる台風進路

1日4回(00,06,12,18UTC初期値)の84時間予報。楕円で示す部分の進路予報が大きく改善している。太線がベストトラック、細線が予報。

報的に決定した台風の強風半径(風速30kt半径)と中心気圧を基に作成したボーガス台風を、全球解析で作られた初期場に埋め込むことにより作成されている(上野 2000)。初期場にボーガス台風を埋め込む領域は強風半径で決定されていて、強風半径が300km未満では、強風半径の2倍、300km以上では強風半径+300kmを半径とした円内である³(上野 2000; JMA 2002)。

台風第11号は強風半径が他の台風と比べて特に大きく解析されたことが特徴であり、最も大きかった時(2001年8月17日18UTC)には強風半径は南北約890km、東西約1100kmであった。このときのTYMの台風ボーガス領域は半径約1300kmに達し、全球解析で作成された初期場に広範囲にわたりボーガス台風を埋め込んでいる。このため、TYMの台風ボーガスによって解析場を必要以上に変えたことによる悪影響の可能性が考えられた。そこでボーガス領域の半径に800kmの上限を設定する(強風半径500km以上の台風についてはボーガス領域の半径を一定とする)ことを試みた。図1.4.7はボーガス領域の半径にこの上限を設定した場合のTYMにおける台風第11号の全進路予報である。図1.4.6と比較すると、転

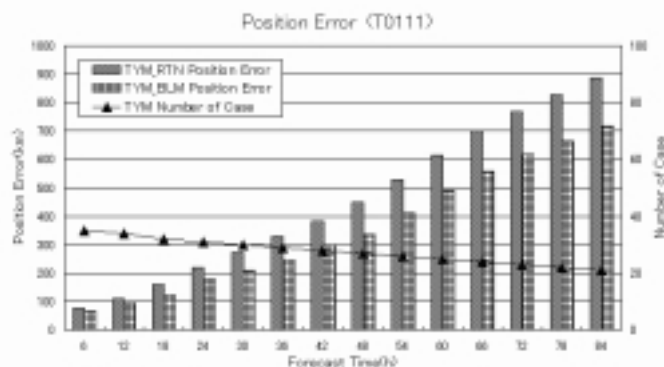


図1.4.8 前現業モデルとボーガス領域の半径に上限を設定した場合の2001年台風第11号の進路予報誤差と事例数

棒グラフが位置の予報誤差で左側の縦軸に対応。折れ線グラフが事例数で右側の縦軸に対応。横軸が予報時間。凡例のTYM_RTNが前現業モデルでの進路予報誤差、TYM_BLMがボーガス領域に上限を設定した場合の進路予報誤差を表している。

向前に台風が東経140度以西を北西進中に現れていた台風を北上させる系統誤差が大きく改善されている。台風第11号に対する進路予報誤差(図1.4.8)も大幅に改善されている。

この台風ボーガス領域の半径に上限を設定する影響が及ぶ他の台風についても評価したところ、進路予報誤差は改善もしくは中立であった。このことから、台風ボーガス領域の半径への上限の設定を2002年台風第3号から現業化している。

(2) ボーガス台風構造の変更

TYMでは、強度予報資料を提供することを大きな目的としているため、ボーガス台風作成時に実況とほぼ同程度の中心気圧を持った台風を作成している⁴。第1.4.2項で述べたようにTYMの高解像度化により、台風の中心気圧をより現実に近い深さまで表現できる場合が多くなったが、水平スケールが小さく中心気圧が深い台風の中には、高解像度化後のTYMでも現実に近い深さの中心気圧を表現することができないものが少なくない。そのような場合、実況に近い中心気圧を持ったボーガス台風を初期場に作成しても、中心付近の構造が解像度と比較して細かすぎるため、その構造を維持することができない。このため、予報の初期の段階でモデルで表現できる構造になるまで台風の中心気圧が急激に浅くなることがあり、このことが、不必要に予報の場を乱し予報結果に悪影響を与える可能性があった。そこで、強

³ 強風域が偏っている場合は、長半径と短半径の平均を円とする領域内となる。

⁴ 全球解析や領域解析で作成する台風ボーガスは、モデルの解像度などを考慮して中心気圧を浅めている場合が多い(大野木 1997)。

風半径と中心気圧の解析値によって決定されるボーガス台風⁵に替えて、モデルの解像度で表現可能な構造となるように中心気圧を調整（浅く）したボーガ

ス台風を作ることを試みた⁵。

図1.4.9は2001年12月22日00UTC初期値の2001年台風第25号のTYMの予報における、台風中心を通

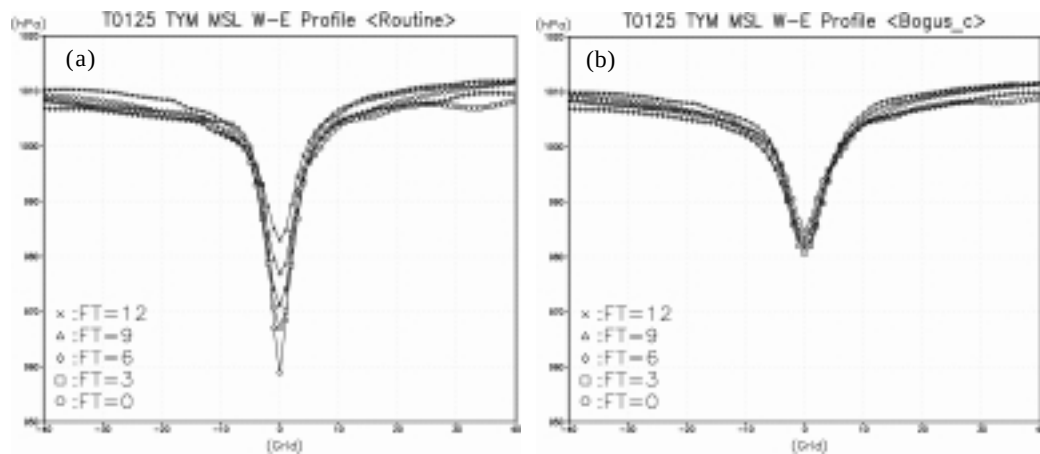


図1.4.9 台風中心付近の海面気圧の東西方向プロファイル(a),(b)と36時間の中心気圧予報(c)

(a)が前現業モデル、(b)が解像度を考慮した台風ボーガスモデルを表わす。縦軸は中心気圧、横軸は0を中心とした東西方向の格子番号。

(c)のグラフの中で、BSTが解析値、RTNが前現業モデル、BGCが解像度を考慮した台風ボーガスモデルを表わす。縦軸は中心気圧、横軸は予報時間。

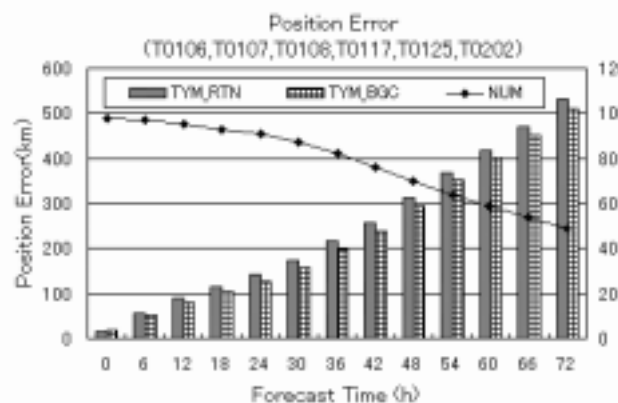
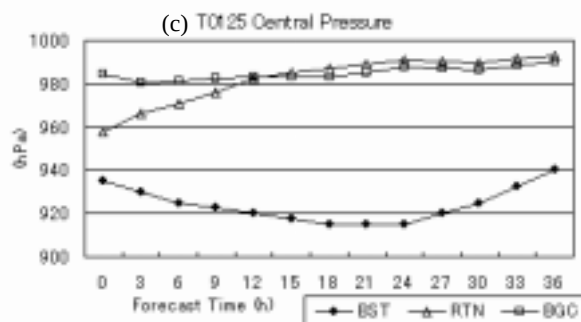


図1.4.10 前現業モデルとボーガス台風構造を変更した場合の進路予報誤差と事例数（2001年台風第6,7,8,17,25号と2002年台風第2号）

棒グラフが位置の予報誤差で左側の縦軸に対応。折れ線グラフが事例数で右側の縦軸に対応。横軸が予報時間。凡例の TYM_RTN が前現業モデルでの進路予報誤差、TYM_BGC がボーガス台風構造を変更した場合の進路予報誤差を表わしている。

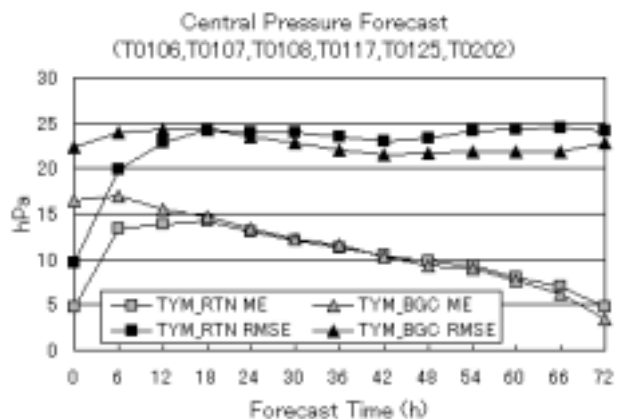


図1.4.11 前現業モデルとボーガス台風構造を変更した場合の中心気圧予報誤差（2001年台風第6,7,8,17,25号と2002年台風第2号）

凡例のTYM_RTNが前現業モデルでの中心気圧予報誤差、TYM_BGCがボーガス台風構造を変更した場合の中心気圧予報誤差を表わしている。

⁵ ボーガス台風の海面気圧のプロファイルを作成する際、台風の中心付近で気圧傾度が最大となる地点の半径がモデルの格子間隔の2倍より小さくならないように、海面気圧のプロファイルを調整している。ボーガス台風の海面気圧のプロファイルの作成については、大野木（1997）や上野（2000）、JMA（2002）を参照。

る東西方向の海面気圧プロファイルである。モデルの解像度を考慮しないボーガスを利用した場合(a)は、周辺部の気圧プロファイルがあまり変わることなく、予報開始直後から中心気圧が急激に上昇する。一方モデルの解像度を考慮したボーガスを利用した場合(b)は、予報開始後12時間までは中心気圧がほとんど変わっていない。予報初期時刻から36時間予報までの中心気圧の予報と解析値を示した図1.4.9(c)を見ると、現在のTYMの解像度では、この事例の台風の中心気圧を十分表現できないため、両方とも実況より中心気圧は浅い。しかし時間変化傾向を見ると、実況では24時間予報にあたる時刻まで台風は発達しているのに対して、(a)は予報開始直後から中心気圧が浅くなるが、(b)はそれほど急激に中心気圧が浅くなることがない。気圧の変化傾向と12時間以降の予報誤差の違いを考慮すると、モデルの解像度を考慮した場合(b)の方が有効といえる。

また、このボーガス台風構造の変更の影響が及ぶ他の台風についても評価したところ、進路予報誤差(図1.4.10)や中心気圧予報誤差(図1.4.11)の統計では、予報初期の中心気圧を除いて、モデルの解像度を考慮したボーガスの方が良い成績となっている。以上のことから、初期値における中心気圧が解析値より浅くなったとしても、モデルの解像度を考慮したボーガス台風を初期場に埋め込んだ方が、より良い予報資料を提供できることがわかる。解像度を考慮したボーガス台風の作成は、2002年台風第12号から現業化している。

1.4.4 まとめ

2001年のTYMによる台風予報の検証の結果、以下の特徴が見られた。

- ・進路予報誤差について、過去5年間と比較して大きな改善は確認できなかった。
- ・進路予報の系統誤差として、TYM,GSMともに、転向後に実況よりも西側に台風を予報する傾向がある。これはGSMで日本付近の西風を弱く予報する系統誤差に起因するものと考えられる。
- ・強度予報について、モデルの高解像度化によって台風の中心気圧の予報のバイアスが小さくなり、モデルで台風の中心気圧をより実況に近く表現できる場合が多くなった。
- ・解析の中心気圧が940hPa未満の強い台風についてはかなり弱く予報し、逆に弱い台風については、中心気圧をやや強く予報する傾向がある。
- ・台風の中心気圧の予報のRMSEは、72時間予報までは2000年よりも良くなっているが、それ以

降の時間は若干悪くなっている。台風が上陸するタイミングの予報のずれが影響していると思われる、進路予報と合わせて改善を図っていくことが必要である。

TYMの台風ボーガスについて、①台風ボーガス領域の半径に上限を設定する、②解像度を考慮したボーガス台風を作成する、という2点の変更を行った結果、以下の改善が見られた。

- ・TYMの台風ボーガス領域の半径に上限を設定したところ、2001年台風第11号の進路予報が大きく改善された。他の台風についても改善もしくは中立の結果となった。
- ・ボーガス台風の構造を作成する際、解像度を考慮することによって、中心気圧の変化傾向や12時間予報以降の予報誤差が改善されたとともに、進路予報もほぼすべての予報時間にわたって改善された。

台風ボーガスを通じた初期値の改良が、予報期間の後半まで大きな影響を与える事例が見られたことからわかるように、台風の予報に対する初期値のインパクトは大きい。台風ボーガスの改良については、今後もさらに調査を進めていく必要がある。

参考文献

- 上野充, 2000: 数値予報モデルによる台風予報. 気象研究ノート, **197**, 131-286.
- 大野木和敏, 1997: 台風ボーガス. 数値予報課報告・別冊43号, 気象庁予報部, 52-61.
- 酒井亮太, 2001: 台風モデル(TYM). 平成13年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 26-29.
- 露木義, 2001: 新しい数値解析予報システムの概要. 平成13年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1-3.
- JMA, 2002: Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency. Appendix to WMO Numerical Weather Prediction Progress Report, 157pp.
- Nagata, M and J. Tonoshiro, 2001: A simple guidance scheme for tropical cyclone predictions. RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review, No.4, 21-34.
- Sakai, R, H. Mino and M. Nagata, 2002: Verifications of tropical cyclone predictions of the new numerical models at JMA. RSMC Tokyo-Typhoon Center Technical Review, No.5, 1-18.