

第3章 数値予報応用技術の開発と検証

3.1 RSM及びMSM最大風速ガイダンス¹

3.1.1 はじめに

予報作業支援システムにおいては防災気象情報作成支援ガイダンス（以降「防災ガイダンス」と略す）を基本資料として注警報が作成される。数値予報課ではRSMに基づく最大降水量ガイダンスと最大風速ガイダンスを作成し、前者を2002年6月より後者を2002年10月より、試験配信している。今回はMSMを利用した最大風速ガイダンスを作成したのでこれらの最大風速ガイダンスの作成方法と精度を紹介する。

3.1.2 作成手法

天気予報ガイダンスとしては従来から3時間毎の正時の風を対象とした風ガイダンスが作成され、配信されている。しかし、防災に必要なのはある期間内の最大風速である。この最大風速と風ガイダンスの予測対象である3時間毎の正時の風との比較を図3.1.1に示す。比較を行った期間は2003年1月～6月、要素は全予測地点を平均した3時間毎の正時の風速（観測値）とその前3時間内の最大風速（観測値）である。その結果、最大風速は正時の風速に比べて最大で1.5m/s、最小で0.8m/s、平均で1.1m/s強かった。倍率は1.3から1.6倍で、時間帯によって異なる。

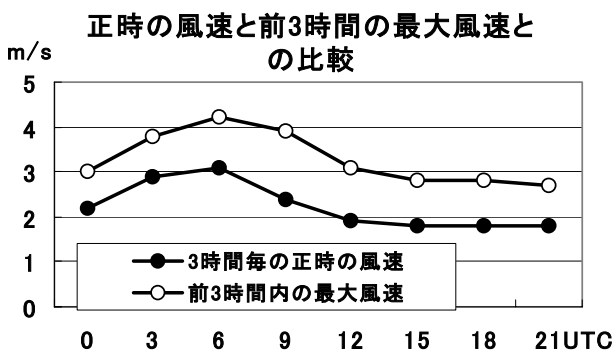


図3.1.1 3時間毎の最大風速と正時の風速の期間平均

したがって、風ガイダンスを利用して最大風速を予測することは困難である。そこで、3時間内の10分毎のアメダス観測値から求めた最大風速を目的変数とする最大風速ガイダンスを開発した。

最大風速ガイダンスは、従来からの風ガイダンスと同様に対象時間毎に予測式を持ち、目的変数並びに説明変数に地上風の東西成分・南北成分のみを使用し、各説明変数の係数はカルマンフィルターによって逐次更新される。この手法は風ガイダンスと同

じである（国次 1997）。また、この手法のみでは予測風速に負のバイアスを生じることから、風ガイダンスと同様に、風速の補正を行っている（木村 1998）。風ガイダンスとの差異は対象時間、目的変数、及び説明変数（MSM最大風速ガイダンスは予測時刻が18時間先まで）で、これらを表3.1.1に示す。

表3.1.1 風ガイダンスと最大風速ガイダンスとの比較
（但し、MSM用は予測時間が18時間先まで）

	風ガイダンス	最大風速ガイダンス
対象時間	3時間毎の正時	3時間毎の正時の前3時間
目的変数	対象時刻に通報された風	対象時間帯内に通報された中の最大風
説明変数	対象時刻のRSM地上風	対象時間帯をはさむ4時刻のRSM(MSM)地上風のうち風速最大の風

なお、このガイダンスは係数更新用の3時間内の最大風速を得る際にアメダスの10分値を使用している。アメダス10分値が通報されない地点²の3時間内の最大風速は、毎正時の観測値の中から選ばれるために、アメダス10分値が通報される地点と比べて任意の10分間の最大風速に対して負バイアスが大きい。

3.1.3 RSM最大風速ガイダンスの予測特性と精度

RSM最大風速ガイダンスの平均的な予測特性と精度を、全予測対象地点を平均した検証スコアを用いて調査した。

以下の検証で使用した資料の期間は2003年1月～6月、対象としたのは全予測対象地点のFT(予報時間)=6, 9, 12, 15の総計である。

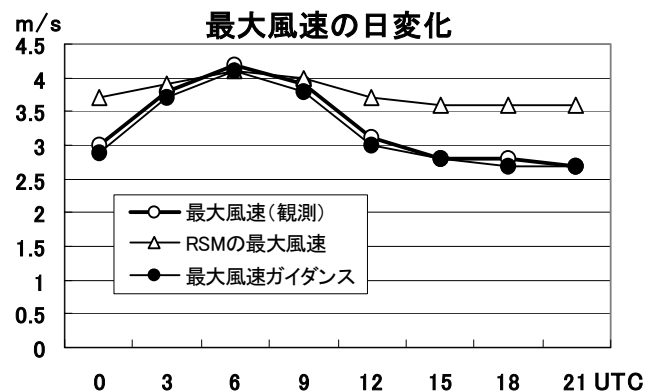


図3.1.2 3時間毎の正時の最大風速の期間平均

¹ 松本逸平

² 特別地域観測所（2003年8月時点）

(1) 予測風の強さと日変化

図3. 1. 2に「3時間毎の最大風速」における観測値、RSMの最大風速、及びガイダンス値の日変化を示す。

RSMの最大風速は日中の00～09UTCには観測値と同程度の風を予測しているが、夜間を中心とした09～00UTCには0.6～0.9m/s強く予想している。RSMの地上風はアメダスに比べて日変化が小さいことが分っており（美濃 1997）、最大風速においても同様に小さい。これに対してガイダンスの予測値は、観測値とのバイアスがほとんど無く、日変化をよく表している。これは各予測時間ごとに係数を持つと共に風速の補正を行っている効果と考えられる。

(2) 予測風速と風向の平方根平均二乗誤差 (RMSE)

図3. 1. 3（上）にはRSMモデル値及びガイダンス値における「3時間毎の最大風速」に対するRMSEを（下）にはその風向に対するRMSEを示す。

風速のRMSEについても最大風速ガイダンスはモデルに対して大きく改善している。夜間を中心とする時間帯の改善がやや大きいのは、日中の00～09UTCにおいてRSMの最大風速が観測値に対してほとんどバイアスが無いにもかかわらず、当該時間帯には0.6～0.9m/sの正バイアスを持つことに起因すると考えられる。

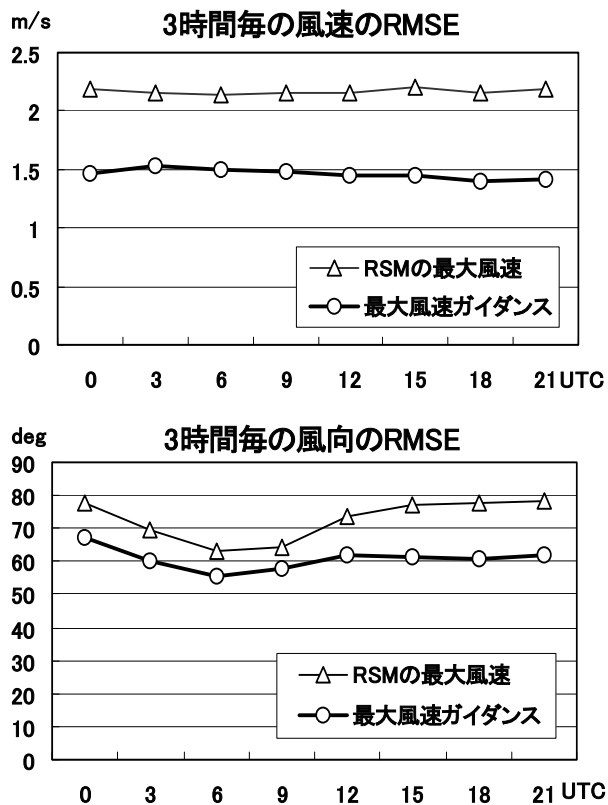


図3. 1. 3 最大風速ガイダンスの3時間毎の風速（上）と風向（下）の平方根平均二乗誤差 (RMSE)

風向のRMSEについても全ての時間帯について改善しており、風速の強い時間帯の誤差が小さい。

(3) スレツスコアとバイアスコアによる検証

この最大風速ガイダンスを現業的に利用するに当たっては、ある程度以上強い風を予測した場合の精度と予測傾向が重要である。このため、閾値を1m/s刻みにして閾値より強い風が吹いた場合を適中としたスレツスコア（図3. 1. 4上）とバイアスコア（図3. 1. 4下）で検証した。アメダスは1m/s単位で報じられる。このため、予測値はアメダスの観測アルゴリズムを考慮し、四捨五入して整数にした値を使用した。

スレツスコア（図3. 1. 4上）では最大風速ガイダンスはモデルからの改善が顕著である。バイアスコア（図3. 1. 4下）では最大風速ガイダンスは風速10m/sを超えると、予測頻度がやや低下するが、風速15m/sまで現実に近い1の近傍の値を保っている。

これらから、最大風速ガイダンスはRSMの最大風速を明瞭に改善していることがわかる。また、注意発表の目安となる12m/sを閾値とするスレツスコアは0.4近くある。図には示さないが、FT=30, 33, 36, 39を対象とした場合、スレツスコアはこれより0.04～0.05落ちるが、風速12m/sを閾値とした場合でも0.33を確保しており、概ね実用的精度を確保していると考えられる。

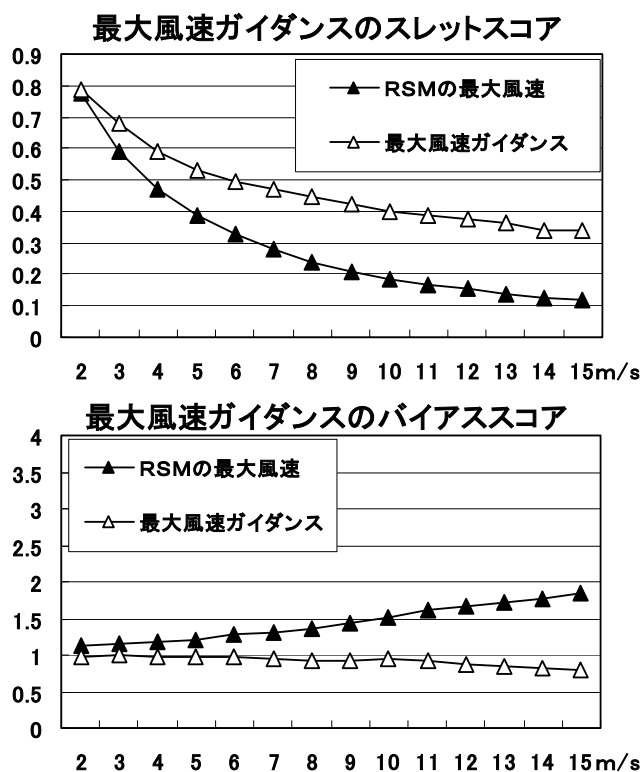


図3. 1. 4 最大風速ガイダンスの風速のスレツスコア（上）とバイアスコア（下）

3.1.4 MSM 最大風速ガイダンスの予測特性と精度

MSM最大風速ガイダンスはFT=18までの期間、RSM最大風速ガイダンスに代えて使用することを目的に作成した。そこで、その妥当性について、RSM最大風速ガイダンス同様に全予測地点を平均した検証スコアを利用して調査した。

以下の検証で使用した資料の期間は2003年1月～6月、対象としたのはRSM最大風速ガイダンスにおいては全予測対象地点のFT=6, 9, 12, 15の総計、MSM最大風速ガイダンスにおいてはFT=9, 12の総計である。

(1) 風向風速のRMSEの検証

MSMの最大風速の特性を見るために観測値とモデルの最大風速とを比較したところ(図3.1.5上)、モデルの最大風速はMSMもRSMと同様に日変化が小さい。また、その値はRSM最大風速よりやや小さい。これに対してMSM最大風速ガイダンスはRSM最大風速ガイダンスもそうであったように(図3.1.2参照)ほぼ観測値と一致している。また、MSM最大風速ガイダンスの予測風速のRMSEはRSM最大風速ガイダンスと同等程度かやや小さいと見られる(図3.1.5下)。

図は掲載しないが、風向のRMSEは03～06、06～09UTCの時間帯で差が無い他は、MSMのほうがRSMと比べて僅かに良い。

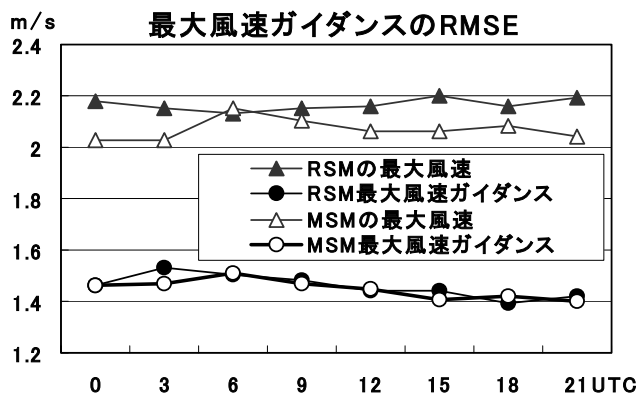
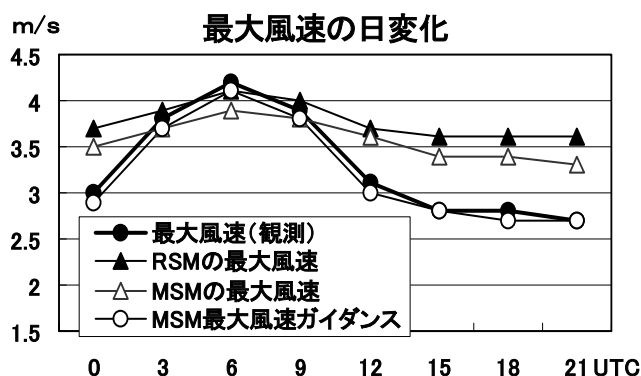


図3.1.5 最大風速の日変化の期間平均(上)
最大風速ガイダンスのRMSE(下)

(2) スレツスコアとバイアススコアによる検証

MSM最大風速ガイダンスはRSM最大風速ガイダンスに置き換えて使うことから、スレツスコアにおいても閾値に風速の大きな値を用いた際、RSM最大風速ガイダンスより精度が良いことが要求される。検証した結果、スレツスコア(図3.1.6上)では微差ながら、MSM最大風速ガイダンスのほうが精度が良かった。バイアススコア(図3.1.6下)でもMSM最大風速ガイダンスのほうが、風速の強い部分において、現実に近いと考えられる1に近い。

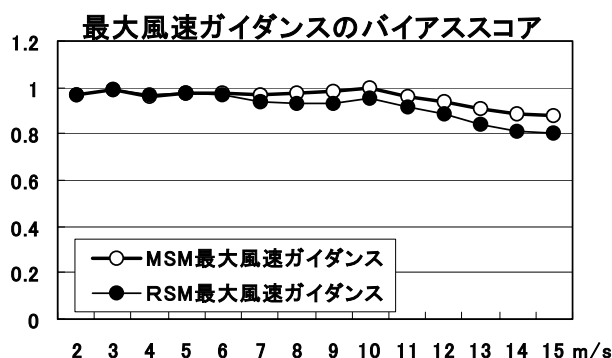
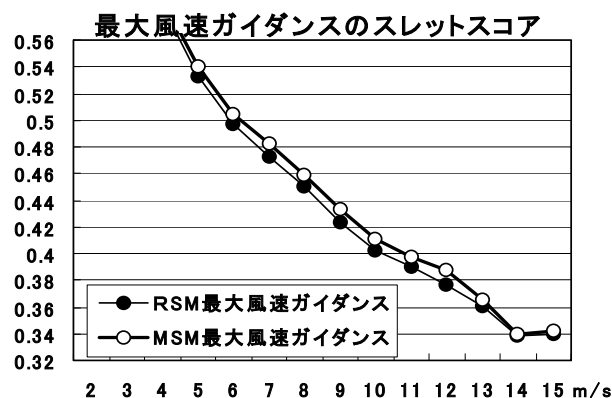


図3.1.6 最大風速ガイダンスの
スレツスコアとバイアススコア

表3.1.2 最大風速ガイダンスの強風時における
ヒット率と捕捉率

RSM最大風速 ガイダンス	予測回数 (回)	ヒット率 (%)	捕捉率 (%)
10m/s以上	23435	59	54
12m/s以上	8596	58	52
15m/s以上	2072	57	46

MSM最大風速 ガイダンス	予測回数 (回)	ヒット率 (%)	捕捉率 (%)
10m/s以上	24503	58	58
12m/s以上	9074	58	54
15m/s以上	2253	55	48

今回作成した最大風速ガイダンスにおいて、閾値を10m/s、12m/s、15m/s以上の風を対象とした予測回数、ヒット率³、捕捉率⁴は表3.1.2の通りである。注意報発表に関してひとつの目安となる12m/s以上の風に対して、両最大風速ガイダンスはヒット率、捕捉率共に50%を超える精度を確保できた。

3.1.5 実際の運用を想定した場合の精度検証

これまでの検証の結果、MSM最大風速ガイダンスはRSM最大風速ガイダンスと比べて同等またはそれ以上の精度が期待できることがわかった。しかも、MSM最大風速ガイダンスは初期時刻から3時間以内に配信されることから、RSM最大風速ガイダンスでは使用できない、FT=06（対象時間帯はFT=03-06）から使用可能である。さらに、この時間帯は初期時刻に近いことから他の時間帯に比べて精度が良いことが期待できる。しかし、MSMは観測データの取り込みにおける打ち切り時刻が他のモデルより早いことと、00UTC及び12UTCにおいては境界値に12時間前のRSMの予測値を使用していることから、初期時刻によって精度に差があることが考えられる。このため、実際に運用した場合に各初期時刻毎のMSM最大風速ガイダンスの精度がどのように推移するかを、RSM最大風速ガイダンスの精度の推移と併せて時系列的に比較した（図3.1.7）。

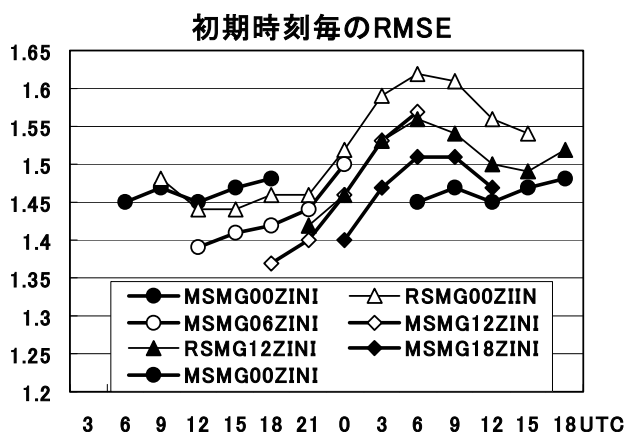


図3.1.7 初期時刻毎のRMSE

配信時刻の関係からMSMガイダンスはFT=3-6の時間帯から使用可能なので、FT=6からの値を、RSMガイダンスはFT=6-9の時間帯から使用可能なので、FT=9から掲載した。

図中の太線は6時間ごとに出力されるMSM最大風速ガイダンスのRMSEの時系列である。MSMガイダンスは、次の最大風速ガイダンス（RSM又はMSM）が出力されるまでは、それまでのどの最大風速ガイダンスよりも精度が良い（RMSEが小さい）。

一方、RSM最大風速ガイダンスは00Z初期値（△）、12Z初期値（▲）ともFT=12以降にはその直前のMSM最大風速ガイダンスと同程度又はそれ以上の精度があることが分る。しかし、次に出力される6時間後をイニシャルとするMSM最大風速ガイダンスよりRMSEが大きい。

3.1.6 まとめ

これらの結果からは、RSM最大風速ガイダンス、MSM最大風速ガイダンスともに、概ね実用的な精度を持っていると考えられる。また、それらの使用法は、「最新のMSM最大風速ガイダンスを用い、MSM最大風速ガイダンスより先の予想はRSM最大風速ガイダンスを用いることを基本とする。但し、RSM最大風速ガイダンスの配信直後から次のMSM最大風速ガイダンス配信まではRSM最大風速ガイダンスをFT=12以降に使用する」こととすると、最大風速ガイダンス全体の精度としては最も良くなると考えられる。

但し、風は局地性が強いために、実際の運用に当たってはそれぞれの地点における特性を把握する必要がある。日ごろから、モデルの傾向とガイダンス値の観測値に対する傾向に注意を払いつつ使用していただきたい。

参考文献

- 美濃寛士，1997：陸上風の検証．平成9年度数値予報研修テキスト，気象庁予報部，20-24.
- 国次雅司，1997：風ガイダンスの開発．平成9年度量的予報研修テキスト，気象庁予報部，39-44.
- 木村陽一，1998：風ガイダンスの統計的特徴と風速補正．平成10年度量的予報研修テキスト，気象庁予報部，79-84.

³ ヒット率：閾値以上を予測した回数のうち閾値以上の風を観測した回数の比率

⁴ 捕捉率：閾値以上の風の観測数に対する的中した回数の比率

3.2. 気温ガイダンスの改善¹

3.2.1 はじめに

気温ガイダンスは、1996年3月のNAPS更新時に、それまでの重回帰分析により作成した予測式を更新せずに使用する方式からカルマンフィルターによる逐次係数更新方式（以下このガイダンスを旧ガイダンスと記す）に変更され、以来7年間大きな変更は行われなかった。

そして、この間に次のような問題点が見出された。

①説明変数として使っていた「風」の正負が原因で異常値が計算されることがある。

- ・たとえば係数が西風で気温を上げる状態であれば東風では気温を下げることになるが、これは必ずしも適切ではない。

②説明変数として使っていた「RSM気温と気候値との差」が原因で異常値が計算されることがある。

- ・この説明変数の係数の変化速度の調整が不十分であると考えられる。

③係数変化の小さい地点があり、気温のベースの変化に追従できない場合がある。

- ・盛夏期の高温ベースへの変化に対して対応が悪い地点がある。

④時系列気温において、特定の予報時刻にバイアスがある。

- ・作成手法に問題がある。

これらの問題点については、当面の対策として利用上の注意を周知してきた。一方、その原因の究明が進んできたところで、2002年1月北海道川湯において①を原因として最低気温を40℃も外すという事例が発生した。また、ほぼ同じ頃北海道音威子府（オトイネツプ）において②を原因として20℃以上も外すという事例が発生した。利用にあたって修正を前提とするにしてもこのような極端な事例はガイダンスに対する信頼性を損なうものであるので、これを契機にこれまで見出されていた問題点を改善する大幅な改良を施した（以下改良版と呼ぶ）。

改良版の初期係数作成やパラメータ調整は、2001年4月から2002年3月の1年間の資料で行った。また、第3.2.4項の統計的検証には、この初期係数とパラメータを利用して2002年4月から2002年12月まで実行した結果を使用した。検証結果が良好だったので、改良版の実行をそのまま継続し、2003年1月28日の運用開始につなげた。

気温ガイダンスは、最高・最低気温ガイダンスと3時間毎の時系列気温ガイダンスの2種類で構成されている。本節では先に最高・最低気温ガイダンス

の改良と検証について述べ、次に時系列気温ガイダンスの改良とその検証について解説する。

なお、この改良は海老原（現鹿児島地方気象台）が数値予報課に在籍当時行ったものである。

3.2.2 最高・最低気温ガイダンスの改良

(1) 説明変数の改良

気温ガイダンスの予測式は以下の通りで、この形式は変更していない。

$$\text{Tobs} - \text{Trsm} = C_0 + C_1 \times X_1 + \dots + C_n \times X_n$$

C_i : 係数（カルマンフィルターで逐次更新する）

X_i : 説明変数（数値予報 GPV を利用）

Tobs : 地上気温観測値

Trsm : RSM 気温

①地上風に関する説明変数の変更

初めに、地上風に関する説明変数が原因で異常値が計算された例を示す。

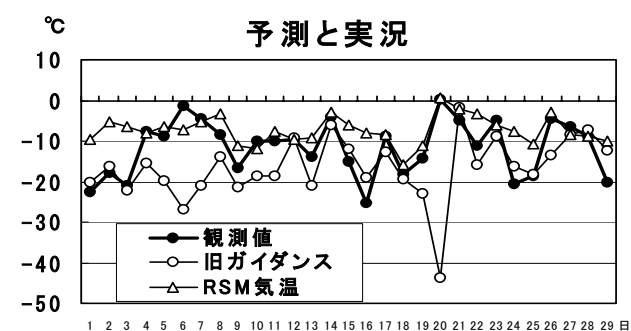


図 3.2.1 北海道川湯の最低気温の予測と実況
(2002 年 1 月)

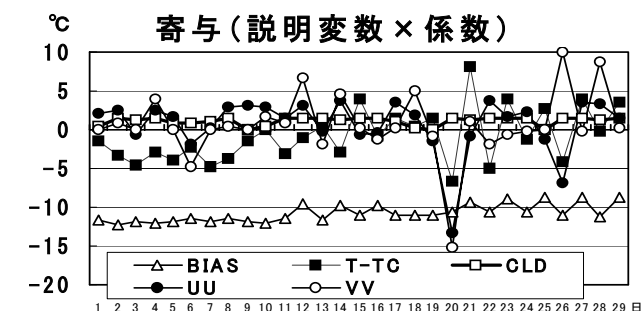


図 3.2.2 説明変数毎の RSM 地上気温の補正量に対する
寄与（説明変数×係数）
図の略号は表 3.2.1 を参照

図 3.2.1 は北海道川湯における 12UTC を初期時刻とする翌日の最低気温予測とその実況で、1 か月分の経過である。20 日における予測で旧ガイダンスは 40℃以上外し、6 日の予測でも 20℃以上外した。

図 3.2.2 は同じ期間における説明変数毎の RSM 気温の補正量に対する寄与（説明変数×係数）である。

¹ 松本逸平、海老原智（現鹿児島地方気象台）

20日は風の東西成分(UU)と南北成分(VV)からの寄与がそれぞれ約 -15°C で、これだけで約 -30°C の補正になる。このとき川湯における風の両成分の係数は北又は西風で気温を上げる補正をする状態になっていたが、この日は南東の強風が予想されており、この風向とその大きな風速をそのまま使ったことが異常値の原因となった。このような事例の改善のため、地上風に関する説明変数に次の変更を加えた。

- ・ これまで東西・南北の風成分に正負の符号をつけ取り扱っていたものを東・西・南・北風成分とし、正の値のみを独立して扱う(例えば西風成分が正の値を持つとき、東風成分は0になる)。
- ・ 放射冷却を弱める効果として風速を追加する。
- ・ 各成分、風速それぞれについて地点毎に上限値を設ける。

②温度に関する説明変数の変更

次に説明変数として使っていた「RSM 気温と気候値との差(以下 T-TC と記す)」が原因で異常値が計算された例を示す。

図 3.2.3 は北海道音威子府の 00UTC を初期時刻とする翌日の最低気温の予測と実況で、1 か月分の経過を示した。8 日、21～23 日、27 日の予測において、RSM は実況値に近いのに対し、旧ガイダンスは $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ 外していた。

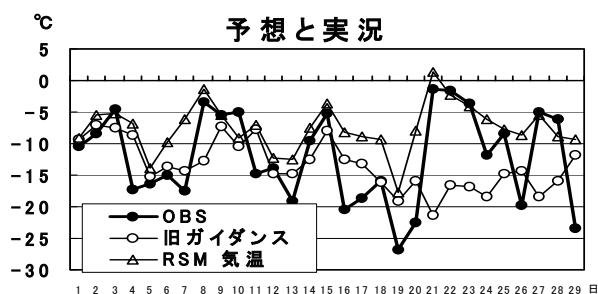


図 3.2.3 北海道音威子府の最低気温の予測と実況
(2002 年 1 月)

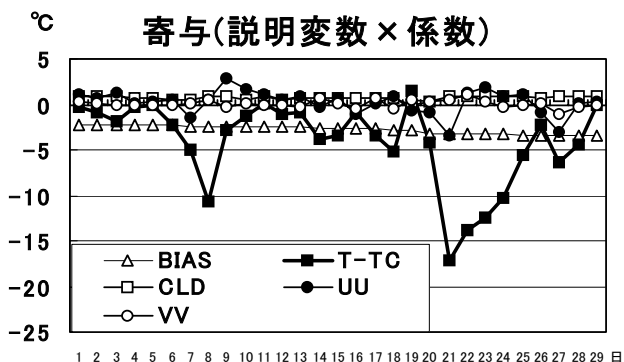


図 3.2.4 説明変数毎の RSM 地上気温の補正量に対する寄与 (2002 年 1 月)

図の略号は表 3.2.1 を参照

同じ期間の RSM 地上気温の補正量に対する寄与(係数×説明変数)を図 3.2.4 に示す。最低気温ガイダンスが予測を大きく外した 8 日、21～23 日、27 日には「T-TC」による補正量が特に大きくこの補正量がそのまま誤差につながった。

このため、これが原因で今回の事例のように補正が不適切になる場合があると考え、RSM 気温そのものを「T-TC」に代えて単独で説明変数とした。

この結果、新たに選んだ説明変数は表 3.2.1 の通りである。比較のために旧ガイダンスの説明変数も併記した。

表 3.2.1 ガイダンスに使用している説明変数

旧ガイダンス	改良版
バイアス項 : BIAS	バイアス項 : BIAS
RSM 気温と気候値との差	RSM 気温 : TRSM
地上東西風成分 : UU	地上西風成分 : WST
	地上東風成分 : EST
地上南北風成分 : VV	地上南風成分 : STH
	地上北風成分 : NTH
	地上風速 : FF
中下層雲量 : CLD	中下層雲量 : CLD

(2) 追従性の改良

旧ガイダンスには係数変化の小さい地点があり、盛夏期の高温ベースに RSM 気温が対応できていないときに、最高気温ガイダンスが迅速に追従できない場合があった。これに対処するため、次の処置を行った。

① 更新のタイミングを早める。

最高・最低気温ガイダンスでは次の時間帯の気温を予測している。

00UTC 初期値 :

MAX01(当日の最高気温)、MIN01(翌日の最低気温)、MAX02(翌日の最高気温)、MIN02(翌々日の最低気温)

12UTC 初期値 :

MAX11(翌日の最高気温)、MIN11(翌日の最低気温)、MAX12(翌々日の最高気温)、MIN12(翌々日の最低気温)

MAX02, MIN02, MAX12, MIN12 は予測に対する実況を得られるのが 2 日後になる。このため、旧ガイダンスでは、これらは 2 通りの係数を持ち、1 日おきに交互に係数更新を行っていた。

この方法では実況がガイダンスに反映されるのが翌々日からになるうえに 2 日に一回となる。そこで、係数を 1 セットにし、係数更新を毎日行えるように更新手順を変更した。これによって実況のガイダンスへの反映のタイミングが翌日からと 1 日早まると共に係数を更新する回数も倍増し、場の変化をガイ

ダンスに反映させ易くなった。

② 係数変化速度のパラメータ調整

旧ガイドンスでは地点により係数の変化速度にばらつきがあった。このため、係数の変化速度を決めるパラメータを再調整して、全地点で一定の変化速度を確保できるようにした。

3.2.3 最高・最低気温ガイドンスの特定地点における検証

この検証で利用する改良版予測値は初期係数を使い、2001年4月からあらためて実行して得られたものである。

図3.2.5は地上風に関する説明変数が原因で40℃以上外した2002年1月の北海道川湯における12UTCを初期時刻とする翌日の最低気温予測を対象とした改良版と旧ガイドンスとの比較である。太線(◇)が改良版で、20日の誤差はほとんど無くなった。また、その他の日にも改善が見られた。

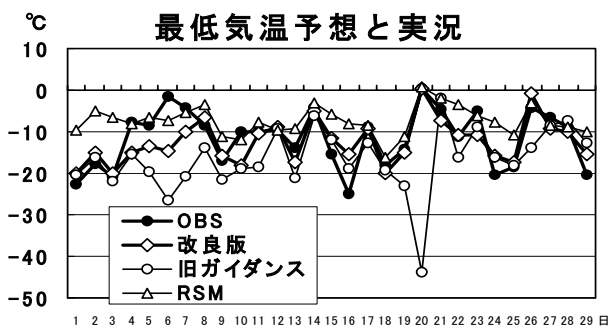


図 3.2.5 北海道川湯の最低気温予測を対象とした改良版と旧ガイドンスとの比較
(2002年1月)

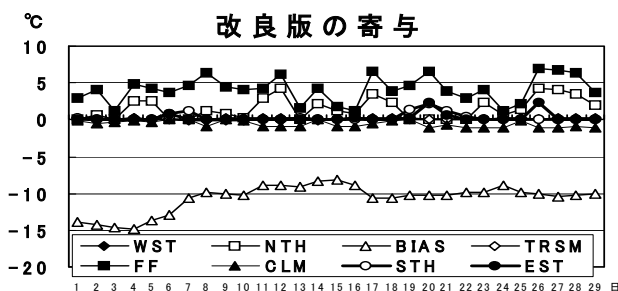


図 3.2.6 改良版における説明変数毎のRSM地上気温の補正量に対する寄与
(北海道川湯の最低気温:2002年1月)

同じ期間の説明変数毎の寄与(係数×説明変数)を示したのが図3.2.6である。問題の20日は風速で+6℃、南風と東風とでそれぞれ+2℃ほど補正しており、風で気温を下げるように補正していた旧ガイドンス(図3.2.2)とは大きく異なる。同様に、6日と26日も風に関する項が有効に働いており、風の説明

変数を変えた効果が現れた。

図3.2.7は、説明変数の「T-TC」が原因で10～20℃外した例としてあげた、2002年1月の北海道音威子府の最低気温の改良版と旧ガイドンスとの比較である。問題の8日、21～23日及び27日には、旧ガイドンスを大きく改善した。

また、図3.2.8は同じ期間の説明変数毎の寄与(係数×説明変数)である。問題のあった8日、21～23日及び27日に旧ガイドンスのT-TCで現われたような問題点は特に見出されない。これまで寄与の大きかった「T-TC」に代わるRSM気温の寄与は全期間を通じてほぼゼロである。この地点では他の説明変数の係数が有効に変動し、異常な予測値が発現しなかったと考えられる。

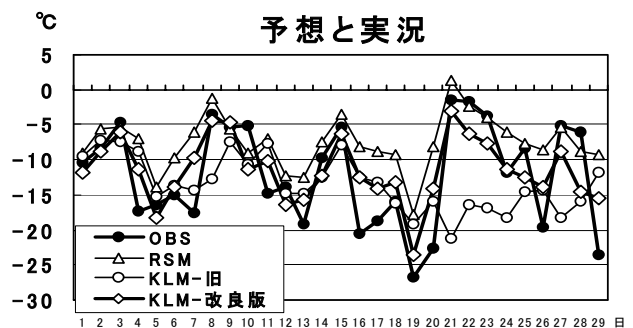


図 3.2.7 北海道音威子府の最低気温予測を対象とした改良版と旧ガイドンスとの比較改良版の検証
(2002年1月)

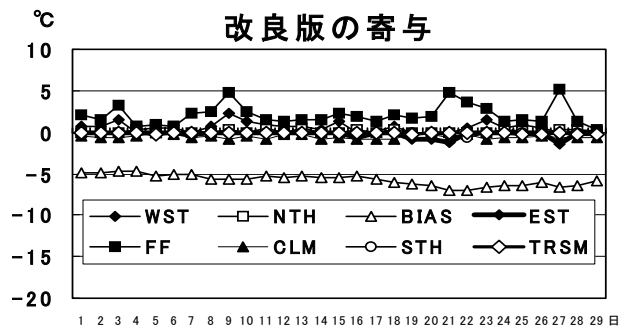


図 3.2.8 改良版における説明変数毎のRSM地上気温の補正量に対する寄与
(北海道音威子府の最低気温:2002年1月)

一方で「T-TC」に代えて説明変数として採用したRSM気温は次の通り別の地点において有効性が確認できる。図3.2.9は2002年1月における、東京の最低気温の予測と実況、図3.2.10は同時期の各説明変数の寄与である。3日、9日、14日、20日、26日は9日を除いて実況気温も高極だが、RSM気温には高極のときに実際より高く予測する傾向があるように見える。これに対応して改良版ガイドンスはこれらの日に大きなマイナス補正をして実況に近づけている。

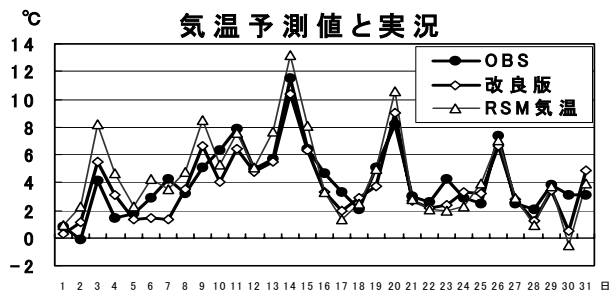


図 3.2.9 東京の最低気温予測 (2002 年 1 月)

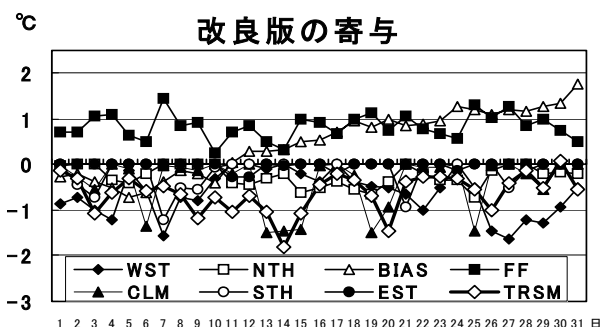


図 3.2.10 東京の最低気温予測における
説明変数毎の寄与 (2002 年 1 月)

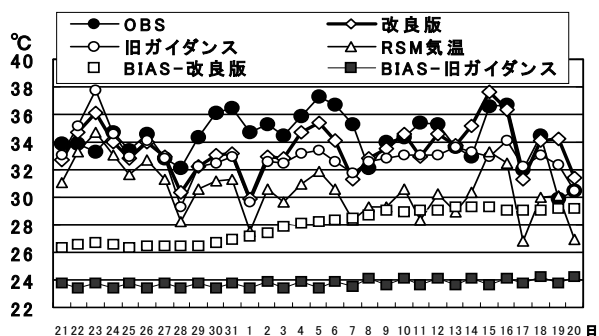


図 3.2.11 名古屋の翌日の最高気温の実況と予測
(2002 年 7 ~ 8 月) 縦軸、左側は最高気温 (°C)
右側はバイアス項の係数 (= 寄与 (°C)) 横軸は日を表す

このとき、「説明変数としての RSM 気温」の寄与は低極を示しており、RSM 気温 (TRSM) が説明変数として有効に働いたことを示している。

最後に追従性の検証例を示す。図 3.2.11 に名古屋における 00UTC を初期時刻とする翌日の最高気温予測を対象とした 2002 年 7 月下旬から 8 月中旬の経過を示す。

7 月末から実況が高温ベースになったのに対し、RSM 気温は逆に下がり、両者の差が大きくなった。旧ガイダンスはこの状態の変化に対する追従が悪く、予報が実況より低い状態が続いたが、改良版では 8 月 4 日頃からは実況に近い予測になった。同図に併せて掲載したバイアス項の係数変化を見ると、旧ガイダンス (BIAS-旧ガイダンス) では応答が悪いが、改

良版 (BIAS-改良版) では状態の変化によく応答しており、改良の効果が現れている。

3.2.4 統計的検証

全体としての精度を評価するために改良版、旧ガイダンス及び、RSM の統計的検証を行った。統計期間は 2002 年 4 月から 2002 年 12 月までである。

まず、全体の傾向を見るために全国平均の最高・最低気温ガイダンスのバイアス及び「平方根平均二乗誤差 (RMSE)」により比較した。図 3.2.12 のバイアスの全国平均においては、RSM は最低気温が高すぎ、最高気温が低すぎる傾向が見られるが、ガイダンスは改良版、旧ガイダンス共にバイアスをほぼ 0 に補正しており、新旧で大きな差は見られない。図 3.2.13 の RMSE の全国平均においては、最低気温における改良版の旧ガイダンスからの明瞭な改善が見られ、最高気温においても改善が見られる。

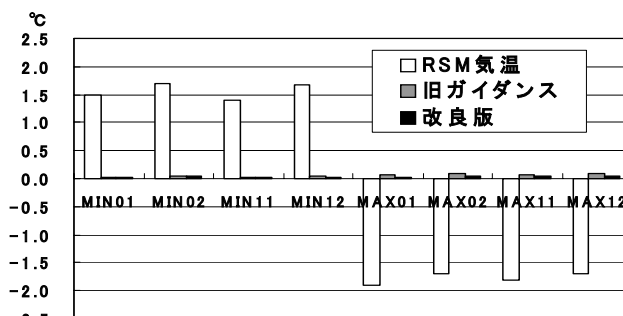


図 3.2.12 最高・最低気温ガイダンスの
バイアスの全国平均

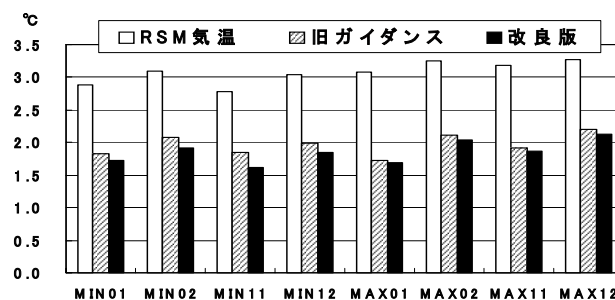


図 3.2.13 最高・最低気温ガイダンスの
RMSE の全国平均

次に、改良改善の効果が及んでいる範囲を確かめるために図 3.2.14 に予報中枢別の最低気温の RMSE を示す。これによると、改善が全国の地域に及んでいることがわかる。裏を返せば、「地上風」や「T-TC」の説明変数の問題等で生じた、不適切な予測をしていたという事例が全国に及んでいたことになる。また、図 3.2.15 に示す最高気温においても改良版は旧ガイダンスを改善しており、その効果は広範囲に及んでいる。

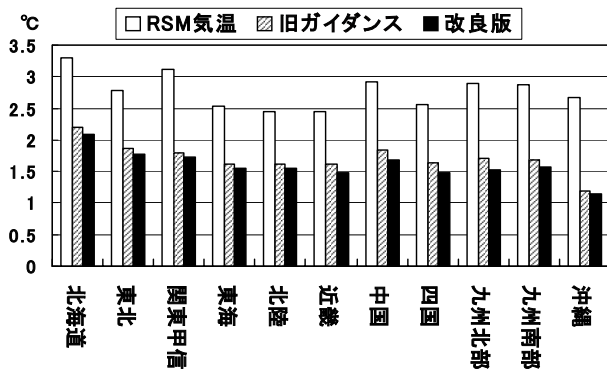


図 3.2.14 地域別に見た最低気温(MIN01)の RMSE

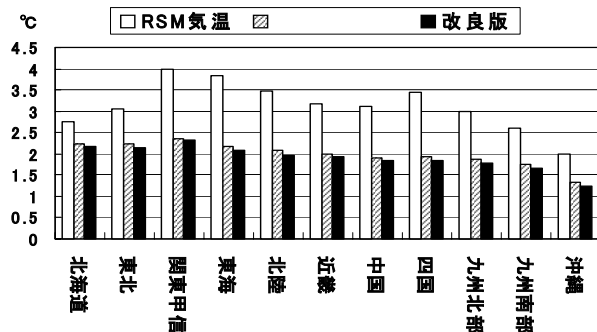


図 3.2.15 地域別に見た最高気温(MAX02)の RMSE

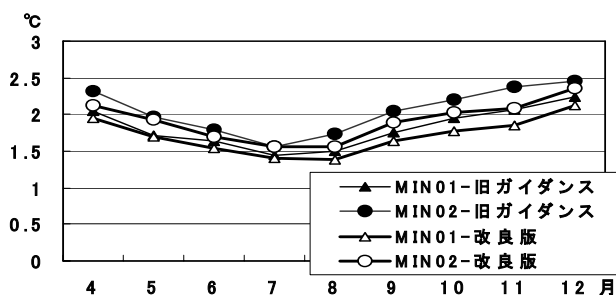


図 3.2.16 月別最低気温の RMSE : 00Z 初期値

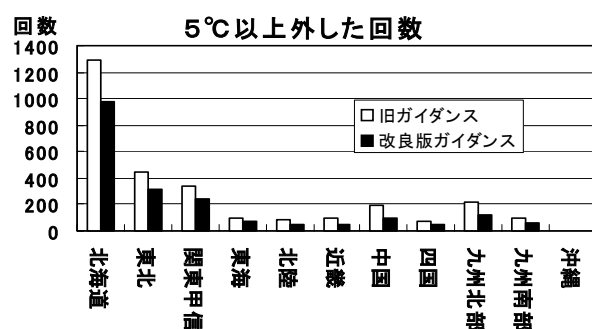


図 3.2.17 地域別大外し回数
00Z 初期値における翌日の最低気温

さらに、図 3.2.16 の全国平均した月別の最低気温の RMSE で見ても (MIN01 は翌日の、MIN02 は翌々日の最低気温を表す)、各月とも改良版は旧ガイダンスを改善しており、特に 8 月以降の改善が目立つ。

図 3.2.17 は 00Z 初期値における翌日の最低気温予想において 5℃以上外した回数である。改良版は旧

ガイダンスで出現した回数を 7 割以下にしており、大幅な改善が見られる。また、10℃以上外した回数も、北海道で 45 回を 30 回に、関東甲信で 3 回を 2 回に減らした他、中国で 2 回、九州北部で 1 回あったものがなくなるなど改良版における改善が目立つ。

図 3.2.18 は全国平均した月別の最高気温の RMSE である (MAX01 は当日の、MAX02 は翌日の最高気温を表す)。当日の最高気温については改良版は旧ガイダンスと同程度か、やや改善であるが、翌日の最高気温では改善の幅がやや大きい。これは第 3.2.2 項(2)で述べた追随性の改良の効果と考えられる。

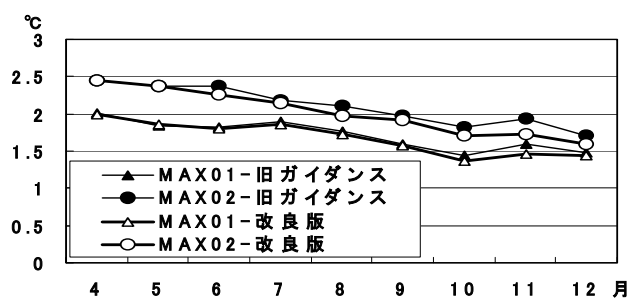


図 3.2.18 月別最高気温の RMSE : 12Z 初期値

これまでの検証に見られた改良版の効果は次の通りである。

- ① 異常な予測に関して改善が見られた。
- ② RMSE でも全国的に精度向上が見られた(これまで全国的に異常値が計算されていた可能性がある)。
- ③ 状態の変化への追随性にも改善が見られた。

3.2.5 時系列気温ガイダンス作成方法の変更

旧ガイダンスでは、図 3.2.19 のように RSM 気温時系列を、初期時刻の実況、最高・最低気温と 51 時間予報 (以下 FT=51) のガイダンスで補正したものを時系列気温ガイダンスとしていた。

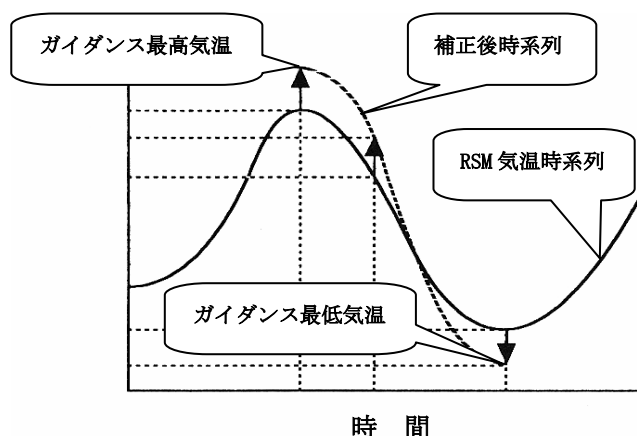


図 3.2.19 時系列気温ガイダンスの作成手法

この手法ではガイダンスが存在する時刻の誤差を、その中間の時間帯に内挿して RSM 気温時系列を補正するため、図 3.2.20 のように最高、最低気温出現時と FT=51 ではバイアスが十分に除去されているが、それ以外にバイアスが目立つ時刻が生じるという問題があった。

これを解消するために時系列気温ガイダンス作成手法の変更を行った。新しい手法では 3 時間毎の各時刻に独立の予測式を作成することとし、00Z 初期値 12Z 初期値用共に FT=06~51 の 16 個の式を持つようにし、バイアスを 0 に近づけると共に精度 (RMSE) の向上を図った。

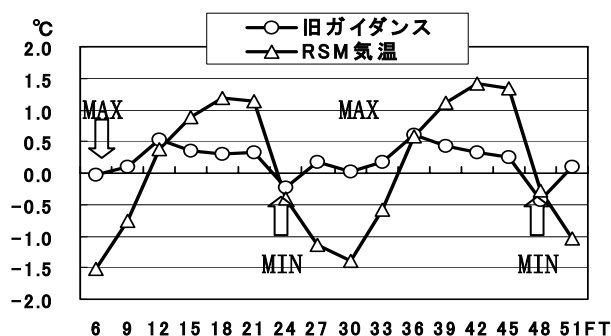


図 3.2.20 旧ガイダンスにおける時系列気温ガイダンスのバイアス (2002 年 4~12 月)

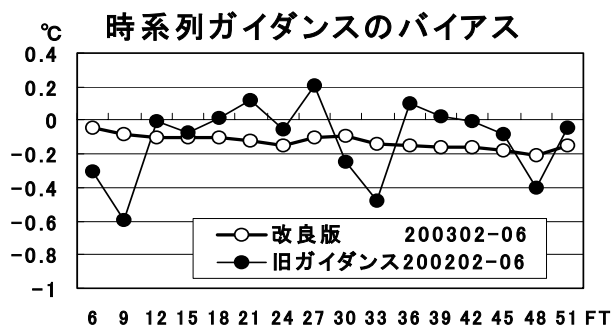


図 3.2.21 時系列気温ガイダンスのバイアスの比較
旧ガイダンス検証期間:2002 年 2~6 月
改良版検証期間:2003 年 2~6 月

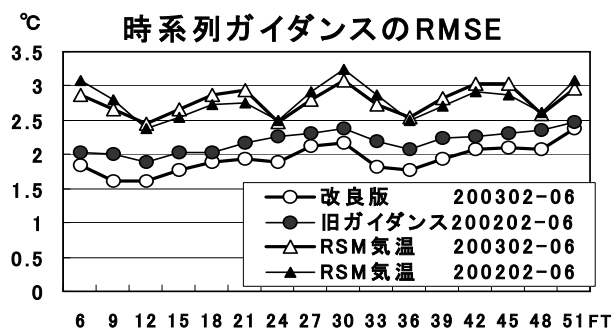


図 3.2.22 時系列気温ガイダンスの RMSE の比較
旧ガイダンス検証期間:2002 年 2~6 月
改良版検証期間:2003 年 2~6 月

3.2.6 時系列ガイダンスの検証

時系列ガイダンスに対し、改良版の運用開始後の 2003 年 2 月~6 月を対象として、統計的検証を行った。比較対象は昨年の同時期である 2002 年 2 月~6 月における旧ガイダンスに対する同じ検証である。

図 3.2.21 は改良版と旧ガイダンスのバイアスの比較である。改良版 (太線○) に若干の負バイアスがあるが、特定の時刻における大きなバイアスの出現は無い。図 3.2.22 は RMSE の比較である。両期間の RSM (▲及び△) の RMSE に大きな差は見られないが、RMSE は改良版 (○) のほうが旧ガイダンス (●) に比べて明瞭に小さくなった。特に図 3.2.21 で旧ガイダンスのバイアスが大きかった FT=9, 33, 48 において、大きく精度が向上していることがわかる。

3.2.7 まとめ

気温ガイダンスはカルマンフィルターによる逐次係数更新方式に変更されてからの 7 年間に各方面から様々な問題点が発見・指摘されてきた。その原因の解明が進んだことにより、今回様々な改良を加えることができた。特に、説明変数の変更と係数の変化速度の調整は、最低気温予測における改善としてその効果が明瞭に現れた。パラメータ調整による係数の追従性の改良についてもその効果が見られる。また、時系列気温ガイダンス作成方法の変更により、時系列気温予測においては全体の精度が向上すると共に特に一部の時刻においては大幅な精度改善が見られた。

このように気温ガイダンスは、今回の改良版導入と共に、より精度の高いガイダンスに生まれ変わった。しかし、旧ガイダンスと同様カルマンフィルターを使用していることから、利用に当たっての留意事項 (国次 1996) には大きな変更点はない。日ごろから RSM の傾向とガイダンスの補正值に注意を払いつつ使用し、問題があった際は情報を共有すると共に原因調査及び対策の検討を行うことが重要である。

なお、2003 年 6 月 2 日から、最高・最低気温ガイダンスにおいては目的変数にアメダス 10 分値を利用するようにした。これまでの気象官署の予測では最高・最低気温ガイダンスが 1 時間単位の観測値を利用することによるバイアスがあったが、これはほぼ解消されたと見て良い。

参考文献

国次雅司, 1996: 気温ガイダンスの事例検証。

平成 8 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 52-54。

3.3 降水短時間予報オブジェクト指向モデルの開発状況¹

3.3.1 はじめに

現在の降水短時間予報は100kmメッシュ毎のパターンマッチングおよび地形性降水の補正計算を基盤とした実況補外の手法を主に用いている（予報部予報課 1991）。実況補外では、パターンマッチングで1～3時間程度異なる2つの時刻の100km四方領域の降水量分布について、位置ずれ（移動ベクトル）を求めて降水域を外挿（補外）している。従って、実況補外では200km程度よりも大きな空間スケールと数時間以上の持続性を持つような降水系の降水量予測には向いているが、20km程度の空間スケールと数時間未満の持続性しかない対流性降水系（熱雷・熱界雷）の降水量予測には向いていない。

今、気象庁は防災気象情報の高度化に取り組んでおり、降水短時間予報を注意報・警報の発表・解除の判断材料として利用しようと計画している。しかし、そのためには、前述の現在の実況補外が不得意とする、20km程度の空間スケールで急発達する、対流性の強雨の予測精度を向上させる必要がある。

その対処の一つとして、2003年6月に降水短時間予報ルーチンの発表時間間隔を従来の1時間から30分に短縮した。これによって、30分間で急発達した対流性強雨域を予想初期値に取り込むことができる。

一方、本質的な予測技術の高度化として、気象庁は空間スケールが数十km程度の積乱雲の集団と考えられる対流性降水域を降水強度場から抽出し、個々の対流性降水域ごとにその移動や降水強度の時間変化を予測する技術を開発してきた。これがオブジェクト指向モデル(Object Oriented Model、以降、OOMと略す)²であり、現在、対流性降水域の抽出とその移動予測についてはほぼ完成し、現業化に向けた試験を行っている。

また、対流性強雨の急激な時間変化に対応するための降水強度の時間変化計算を基盤とする盛衰予測については来年度以降に毎時下層風解析やメソ数値予報モデル（以降、MSMと略す）を用いた技術開発を行うことを検討している。

本節では主にOOMにおける対流性降水域の抽出とその移動予測の手法、予測事例について解説する。

3.3.2 降水短時間予報の概要

図3.3.1はOOM導入に伴う降水短時間予報の新しい処理の流れを示したものである。

OOMの導入によって降水短時間予報は次の4つの処理から構成されるようになる。

- (a) 実況補外（Extrapolation for 6 hours、以降、EX6と略す）
- (b) OOM
- (c) MSMとの結合（Merging with model、以降、MRGと略す）
- (d) 平滑化（Smoothing of merged precipitation forecast、以降、SMTと略す）

現在の降水短時間予報の流れは(a)、(c)、(d)の順で、EX6の予想降水量とMSMの予想降水量を結合してMRGを作成し、平滑化して降水短時間予報（SMT）としている（荒木 2000）。

今年度の導入を目指しているのは(b)のOOMの処理であり、OOMで計算された移動ベクトルの補正值を(a)のEX6の移動ベクトルに反映させる部分である。

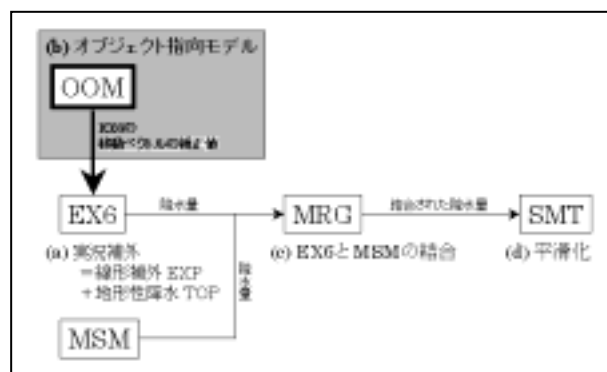


図3.3.1 OOM導入に伴う降水短時間予報の新しい処理の流れ

3.3.2 OOMとは

OOMとは、基本的にはレーダーデータをもとに広範囲な予測領域にある降水場の中から比較的独立した対流性降水域を一つのまとまりとして抽出し、その移動や盛衰を個別に予測するものである。この抽出した個々の対流性降水域をセルと定義する（具体的なセルの抽出方法は第3.3.3項で詳述）。それぞれのセルは独立した個体として取り扱われ、観測時刻毎に、セルの中心の位置・中心の移動速度・降水域の広がり・最大降水強度・降水強度の出現頻度分布に関する統計値（平均、分散、歪度、尖度）・持続時間・活動段階（発生期、発達期、最盛期、衰弱期）といった個別の性質（以降、属性と呼ぶ）を求める。そして、このセルの属性の時間変化を外挿などの手法で予測することにより、将来の降水量分布の予測を行う。従って、従来の時間的・空間的な均質性を

¹ 西垣 語人

² 本節で解説するOOMの「オブジェクト指向」とは関連のある降水域をひとまとまり（Object）の独立性を持ったものとして扱うという意味でC++やJAVAなどのプログラム言語において使われる「オブジェクト指向」と共通性を持っている。

仮定したパターンマッチングとは大きく異なる。

OOMの予測はセルの移動予測とセルの盛衰予測の2段階で構成される。

移動予測については、観測時刻毎に行うレーダーエコー強度データからのセルの抽出と、観測時刻間のセルの関連付け（追跡）ができれば、外挿手法によって実現可能である。盛衰予測については、複数の上層（4, 6, 8, 10km面）のエコー強度データ、雷標定データ、ウィンドプロファイラやドップラーレーダーの観測値を用いて解析された風の場合（毎時下層風解析）なども利用し、セルの活動段階や環境場の状態を判定して降水強度の変化傾向や最大発達可能性を決めればよい。

3.3.3 セルの移動予測アルゴリズム

現在のEX6は、100kmメッシュ毎にパターンマッチングを行って1個の移動ベクトルを計算し、それを各降水格子点に内挿して降水予測に用いる。もしも、エコー発生初期などのように降水域が小さくてパターンマッチングが不可能な場合は、MSMの20kmメッシュ700hPa風で代替して同様に内挿して用いる。従って、降水域は100kmスケールの代表的な移動ベクトルで移動し、100kmより小さなスケールの降水域の個別の移動方向と速度はほとんど考慮されない。

これに対してOOMは、各時刻におけるセルの中心位置から個々のセルが10分間でどのように移動したのかを調べ、その追跡結果からセルの中心移動ベクトルを計算して降水予測に用いる。このため、個々のセルの移動を考慮することができる。しかしながら、OOMではセルと同定されなかった、セルの周囲に広がる弱い降水域の移動ベクトルが求まらないため、セルの中心移動ベクトルをEX6の移動ベクトル場に埋め込むという処理が必要になる。

これから述べるセルの抽出・追跡アルゴリズムは、アメリカの国立大気研究センター（National Center for Atmospheric Research、NCAR）で開発されたThunderstorm Identification Tracking Analysis and Nowcasting（以降、TITANと略す、Dixon and Wiener 1993; Wilson et al. 1998）で用いられているものをベースとしたものである。予報部予報課で作成された航空用雷ナウキャストもほとんど同じアルゴリズムを採用している。

具体的なセルの抽出・追跡、およびセルの中心移動ベクトルの計算は次の手順で行う。

(1) セルの抽出処理

10分間隔の各時刻における最低高度面³の

³ 平成11年度までは最低高度面データは2km（富士山は

2.5kmメッシュレーダーエコー強度合成データから、日本全域にわたって降水強度8mm/h以上の格子が10個以上互いに接して集まった部分をセルとして抽出する⁴。但し、降水強度の閾値は全国の大雨注意報・警報基準を考慮してやや低めの8mm/hとした。また、降水面積の閾値は10km以上のスケールを対象とするため、10個以上のグリッドを含むセルのみを対象とした。

こうして抽出されたセルに対して、いくつかのセル属性を計算する。特に移動予測に用いられる中心の位置は次のように求められる。まず、抽出したセルを構成するエコー強度格子の集合に対して主成分分析を行う。その結果を用いて、セルの外形を楕円で近似し、セルの属性として近似楕円の中心の位置、長径と短径の長さ、長径の向きを算出する。長径と短径の長さ、長径の向きは(8)の処理で利用する。楕円で近似する計算については、付録の(1)を参照されたい。

(2) 孤立したセルの判別・除外処理

次に、各時刻で抽出されたセルが孤立したものであるかどうかを判別する。各時刻のセルの近似楕円の中心から半径7.5kmの円を考える。7.5kmは速度12.5m/sで10分間移動した距離に相当する。もし、10分前にこの円内に中心を持つセルがなければ新たに発生した孤立セル（以降、孤立発生セルと呼ぶ）として判別される。同様に10分前のセルの中心から半径7.5kmの円内に中心を持つセルが現在なければ、前10分以内に消滅した孤立セル（以降、孤立消滅セルと呼ぶ）として判別される。なお、速度12.5m/s未満という判断基準は、通常の擾乱の移動速度が10.0m/s程度、台風の強風半径内が平均風速15.0m/s以上であることから、10.0～15.0m/s程度の値を想定したことによる。

このような孤立発生セルと孤立消滅セルを図3.3.2に示す。この図は細実線楕円a～dが10分前の4個のセル、太実線楕円A・B₁・B₂・C・E・Fが現在の6個のセルを表す。また、点線の円弧はそれぞれセルd・E・Fの中心から半径7.5kmの円の一部

4km) 定高度データであったが、レーダーサイト毎に観測可能な最低仰角データを合成したものに変更された。従って、観測可能な最低高度は観測方位角とサイトからの距離に依存する。

⁴ 当然、この抽出条件のみでは鉛直方向に伸びた対流性の降水域以外の強降水域も抽出されるが、持続時間が短い場合や不自然な中心の移動経路を示す場合にはある程度除外可能である。このような降水域としては温帯低気圧などに伴う層状性降水があり、本来オブジェクトとして取り扱うべきではない。将来は、上層のエコー強度も考慮することにより、対流性の強雨セルのみを抽出するようにアルゴリズムを高度化できると考えている。

を表す。この円（円弧）の内側には、10分前のdに対しては現在のセル、現在のE・Fに対しては10分前のセルが存在しない。従って、これらは孤立セルであり、dは孤立消滅セル、E・Fは孤立発生セルである。各時刻における孤立発生・消滅セルは(3)～(5)の処理から除外され、孤立発生セルの移動ベクトルのみ、(6)の処理で決定する。

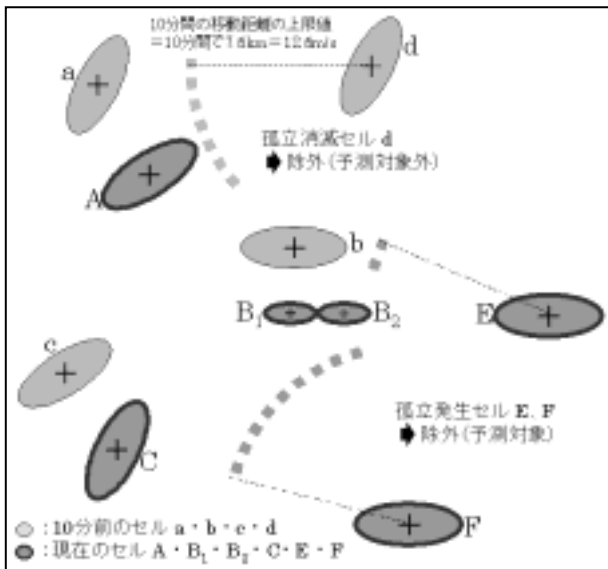


図3.3.2 孤立発生・消滅セルの判別・除外処理

(3) セルの個数合わせによるセルの分裂・併合判別処理

各時刻のデータから孤立発生・消滅セルを除外した後、10分前のデータと比較してセルの個数が10分間で変わらない場合は次の(4)同一セルの組合せとセルの中心移動ベクトルの第一推定処理を行う。変化している場合はセルの分裂・併合が起きたとみなす。

図3.3.3に10分前から現在にかけて、孤立発生・消滅セル以外のセルの個数が増加した場合の処理（以降、分裂処理と呼ぶ）を示す。図3.3.3では10分前の3個のセルa・b・cから現在の4個のセルA・B₁・B₂・Cに増加している。この場合、10分前のある1個のセルが、現在の時刻の中では中心間の距離が最も近い2個のセルB₁・B₂に分裂し、3個から4個に増加したと判別する。

次にセルB₁とB₂を合成したセルBを作成する。セルBの中心の位置・長径と短径の長さ・長径の向きなどの値は、合成するセルB₁・B₂のそれぞれの面積を重みとした平均値を用いる。

一方、10分前から現在にかけてセルの個数が減少した場合（図略）、10分前の時刻の中で中心間の距離が最も近かったセルが併合していると判別する。この10分前の2個のセルを1個に合成してその属性も分裂の場合と同様に計算する。こ

れを併合処理と呼ぶ。

このように、分裂・併合処理のどちらの場合でも、セルの合成により孤立発生・消滅セル以外のセルの個数が10分前と現在とで同じ3個になるように個数を調節する。ここで、注意しておきたいのは、この(3)の処理で分裂したとしたセルB₁・B₂が10分前のどのセルと関連付けられるかは、次の(4)の処理で決まる点である。必ずしも、セルbと関連付けられるとは限らない。また、最も近い2つのセルが分裂したと判別することにしたが、たまたま発生したセルが孤立しておらず、既存のセルの近くにいれば、誤って分裂したセルとみなされることがある。併合の場合も、たまたま消滅したセルを併合したとする場合があり得る。

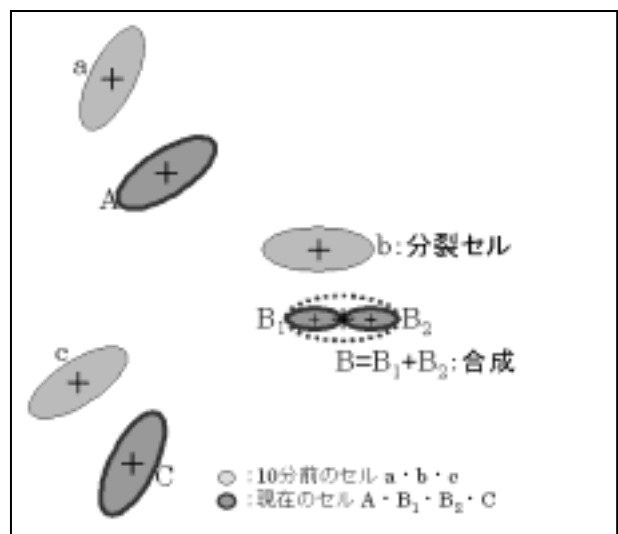


図3.3.3 10分前から現在にかけてセルの個数が増加した場合の処理（3個から4個に増加、分裂とみなす場合）

(4) 同一セルの組合せとセルの中心移動ベクトルの第一推定処理

分裂・併合処理により各時刻におけるセルの個数は10分前と同じとなるので、現在のセルを10分前と1対1に関連付けてセルの10分間の移動を決定できる。このとき、10分前と現在とで中心間の距離が最も近いセルの組合せ⁵を同一のセル

⁵ 正確には、10分前と現在における[(セルの中心距離)² + (セルの面積変化)²]^{0.5}という量（以降、L_Gと呼ぶ）が最小になる組合せで決定している。これは面積変化、すなわち形の変化も小さいということを条件に追加している。L_Gが最小となる組合せでも1対1に決まらずに複数セルと多対1の組合せができる一方、組合せのないセルができる場合がある。個々のセルではなく系全体のL_Gの和が最小となるような1対1の組合せに修正する。ほとんどの場合、10分間の移動距離に対し同時刻のセルは互いに十分離れている上に面積変化の影響は小さいので、多対1の組合せはできず、最も近いセル同士を同一のセルと判断して組み合わせることになる。

の移動と判断し、その10分間の中心移動ベクトルの第一推定値を求める。

図3.3.4は10分前と現在とで同一のセルの組合せを表し、3本の太実線矢印がそれぞれセルa・b・cの中心移動ベクトルの第一推定値を表す。

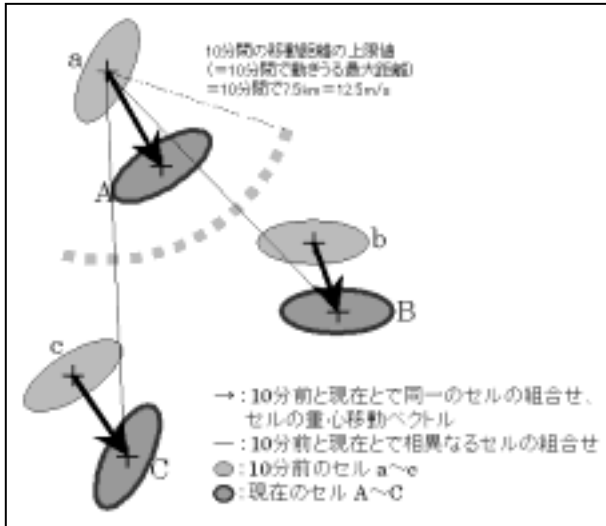


図3.3.4 10分前と現在とで同一のセルの組合せ

(5) 孤立発生セルを除くセルの中心移動ベクトルの調整処理

(4)の処理で中心移動ベクトルの第一推定値を求めた。しかし、セルの移動履歴において移動ベクトルの向きと大きさの時間変動が激しい場合、第一推定値による移動予測は本来のセルの移動経路から大きくずれた予想になってしまう。そのため、第一推定値を時間平均値で代替する必要があると生じてくる。

また、(3)の分裂・併合判別処理では、(2)で孤立セルと判別されず、7.5km以内に存在したセルの中で、発生または消滅したセルを誤って分裂または併合処理してしまう可能性がある。分裂セルと発生セルの判別は難しいところであるが、合成したセルが分裂セルならば分裂前の移動ベクトルを維持すると考えられる。逆に発生セルならば移動ベクトルが変化するのであろう。

このようなことを考慮して移動ベクトルに関して次の調整を行う。

(4)の処理で求めた中心移動ベクトルの第一推定値と下記の①、②のベクトルとの差について、その大きさが10分間で2.0km (=約3.3m/s) 以上ずれた場合には、(4)で求めた中心移動ベクトルの第一推定値は不適切であると判断して、

①問題のセルの中心移動履歴をもとに各時刻の中心移動ベクトルを追跡期間にわたって平均した値 (時間平均値)

②問題のセルの周囲200km圏内に同時刻存在し

た他のセルの中心移動ベクトルを距離の重みで平均した値 (領域平均値)

③現在のEX6の移動ベクトル (OOM対象外)

という優先順位で、中心移動ベクトルを代替する。

(6) 孤立発生セルに対する移動ベクトル計算処理

孤立発生セルの移動ベクトルは前項の(5)の処理に準じて決定する。(2)で孤立発生セルと判断されたセルは移動履歴がないので、①の時間平均値をとばして②の領域平均値から順に中心移動ベクトルとして代替していく。セルE・Fの移動ベクトルは、図3.3.4のa・b・cの中心移動ベクトルの領域平均値から代替していく。

(7) セルの追跡処理

現在の降水短時間予報ルーチンは30分ごとに起動しているので、(1)~(6)までの各時刻の10分間の追跡処理をルーチン1回あたり3回繰り返し、予測計算開始時刻の30分前から計算開始時刻までの30分間を通してセルを追跡する。もしも、30分前のルーチンで、1時間前から30分前まで追跡できたセルがあれば、そのセルを引き続き最新のルーチンでも追跡する。このため、セルの抽出条件を満たさないレベルにまでセルが衰弱して消滅したとみなされるか、または追跡開始から24時間経過するまで、セルの追跡は継続される。

(8) セルの中心移動ベクトルのEX6の移動ベクトル場への埋め込み処理

EX6の移動ベクトルに(4)~(7)で求めたセルの中心移動ベクトルを埋め込んで、100kmより小さなスケールの移動を考慮した2.5kmメッシュ移動ベクトル場を作成する。ここで補足しておく、TITANではセルの近似楕円およびその軌跡のみを予測対象としている。航空用雷ナウキャストでもセルを発雷域とみなして補外予測しているのみであり、いずれもセルの周囲にある弱降水域の移動予測は行っていない。これに対して、降水短時間予報OOMでは、セルについてはOOMで決めた中心移動ベクトル、弱降水域についてはEX6の移動ベクトルで移動予測を行う。ところが、一般にOOMで求めたセルの中心移動ベクトルと弱降水域のEX6で求めた移動ベクトルとは異なっているので、単純に中心移動ベクトルをEX6の移動ベクトルに埋め込んだのではセルと弱降水域との境界で移動ベクトルに大きな不連続が生じる。これにより、セルとして抽出された強降水域が不自然に引き伸ばされたり、無降水域 (すき間) が発生したりすることがある。そこで、セルの中心移動ベクトルとEX6の移動ベクトルが境界付近で滑らかに接続されるように補正している。詳細は付録の(3)で説明する。

以上が、セルの抽出・追跡、およびセルの中心移動ベクトルの計算手順である。

3.3.4 事例検証

ここでは、現在のEX6で計算した移動ベクトルによる単純な線形補外予測（以降、EXPと呼ぶ）とOOMで補正した線形補外予測の予想降水強度分布の差を比較したい。本来、地形性降水まで考慮した実況補外予測（現在のEX6）と比較し、OOMによる移動ベクトルの補正効果を確認すべきであるが、これについては別の機会に報告したい。

この検証の留意点として、EX6の移動ベクトルはパターンマッチングで求まる場合とパターンマッチングが不可能でMSMの700hPa風を使う場合があることである。両者には相当の差があるので、それぞれの例についてOOMの補正効果を示す。

1つ目に、予想初期時刻がエコー発生初期でパターンマッチングが不可能だったため、移動ベクトルをMSMの700hPa風で代替した事例について述べる。この事例は関東甲信地方における2002年8月4日05UTCを予報初期時刻とする1時間後06UTCの2.5kmメッシュの降水量分布予測である。

図3.3.5(a)に05UTC、図3.3.5(c)に06UTCの実況降水強度分布を示す。図3.3.5(d)にEXP、図3.3.5(e)にOOMによる1時間後の06UTCの予想降水強度分布を表す。これらの図において、赤色は8.0mm/h以上の強降水域、青色は1.0mm/h以上8.0mm/h未満の弱降水域を表す。図3.3.5(b)に図3.3.5(a)の05UTCの実況降水強度分布から抽出したセルの近似楕円を赤色楕円で示す。図3.3.5(a)～(e)の5つの図に共通して、アルファベット付きの輪郭のみの楕円は今回の事例検証で注目すべきセルであり、細実線楕円a～cが05UTCのセルの実況位置、太実線楕円A～CがOOM、点線楕円A'～C'がEXPによるセルa～cそれぞれの1時間後の補外予想位置を表す。また、図3.3.5(b)の正方形中の棒線は点線がEXPに用いた現在のEX6の移動ベクトル、実線がOOMのセルの中心移動ベクトルの向きと大きさを表し、ベクトルの始点は楕円の中心としている。地理的にはセルa、b、cはそれぞれ栃木県日光地方南東斜面、埼玉県秩父地方山岳部、東京都多摩地方山岳部に位置している。

06UTCの実況降水強度分布とEXPおよびOOMによる1時間後の06UTCの補外予想を比較するため、図3.3.5(c)を見ると、OOM予想のセルA、Bの方がEXP予想のセルA'、B'よりも実況のセルの位置に合っていることが分かる。図3.3.5(b)を見ると、セルaの場合、A'のEX6の移動ベクトルが東を向いているのに対してAの中心移動ベクトルは南を向いており、図3.3.5(c)の実況でもaが南東斜面を山越えせずにほぼ横滑りして南進している。このaの動きは地形効

果によるものであり、OOMでは地形性降水を考慮しなくても移動予測可能であることが分かる。また、セルbの場合、B'の移動ベクトルが東を向いているのに対してBの移動ベクトルはほとんどゼロで、図3.3.5(c)の実況でもbが山岳部に固定されている。やはり、OOMでは地形で停滞しているセルが地形性降水を考慮しなくても予測できたことになる。これに対してセルcの場合、図3.3.5(b)を見るとC、C'共に移動ベクトルがほぼ一致して東向きであるが、図3.3.5(c)の実況では山岳部にセルが固定されたかもししくは山越え後に衰弱して消滅したと見られ、両者の予想は共に空振りしている。

このようにパターンマッチング不可能な場合であっても、セルcのような場合を除いて、OOMではセルの移動ベクトルを精度良く求めることができ、EXPよりも降水強度分布を良く予測できるという利点がある。

2つ目に、パターンマッチングが可能だった事例について述べる。この事例は関東甲信地方における2003年7月21日05UTCを予報初期時刻とする1時間後06UTCの2.5kmメッシュの降水量分布予測である。

図3.3.6(a)～(e)は図3.3.5の場合と同様な表示内容であり、この事例については2つのセルa、bに注目した。地理的にはセルa、bはそれぞれ、栃木県南西部、東京都多摩地方の東側に開けた山すそに位置している。

図3.3.6(c)を見ると、図3.3.6(e)のOOM予想のセルA、Bと周辺の弱降水域の方が図3.3.6(d)のEXP予想のセルA'、B'のものよりも実況に合っている。図3.3.6(b)を見ると、セルa、bの両方の場合とも、A'、B'のEX6の移動ベクトルが東南東を向いているのに対してA、Bの中心移動ベクトルは南南東を向いている。図3.3.6(c)の実況でもa、bが平野部を南～南東進し、かつ周辺の弱降水域が南南東進しており、OOMで予想された移動ベクトルの向きの方が実況に近い。この事例についてもOOMがEXPよりも降水強度分布を良く表現できているのが分かる。

OOMはこうした弱降水域も含めた移動予測にも成功し、中心移動ベクトルのEX6の移動ベクトル場への埋め込み処理が効を奏している。

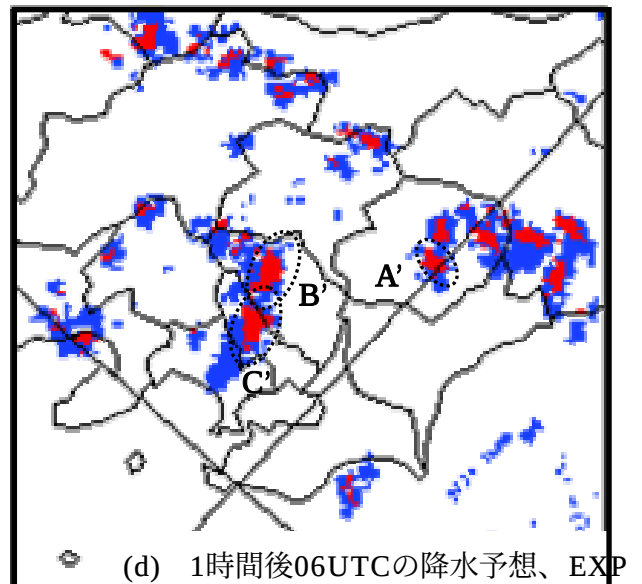
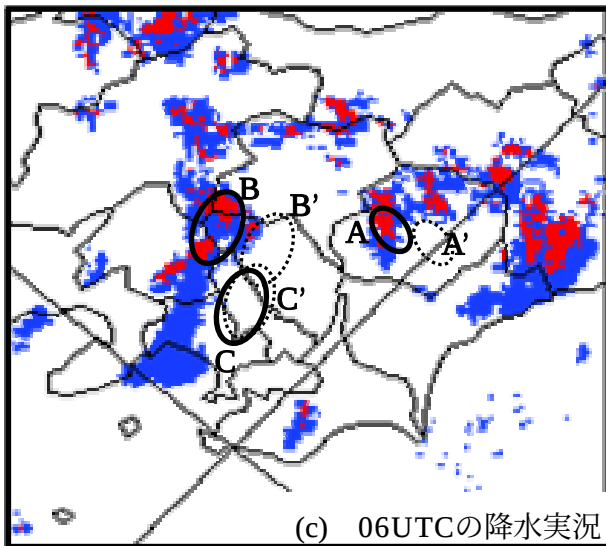
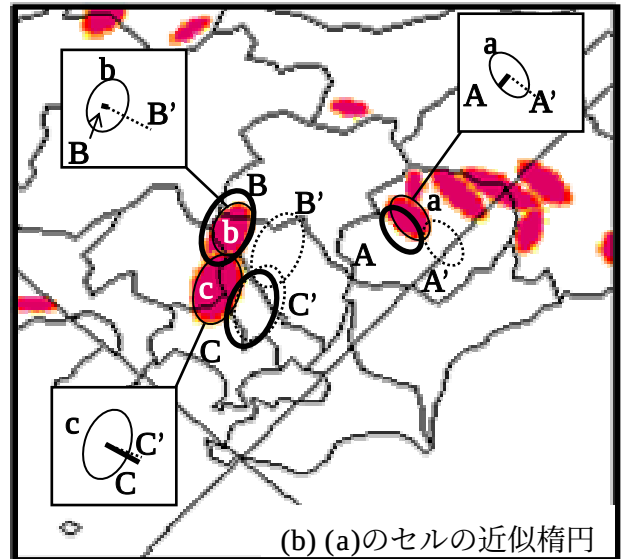
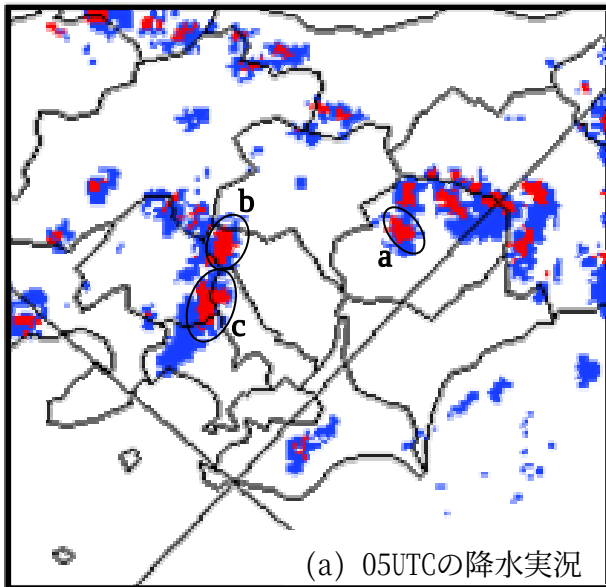
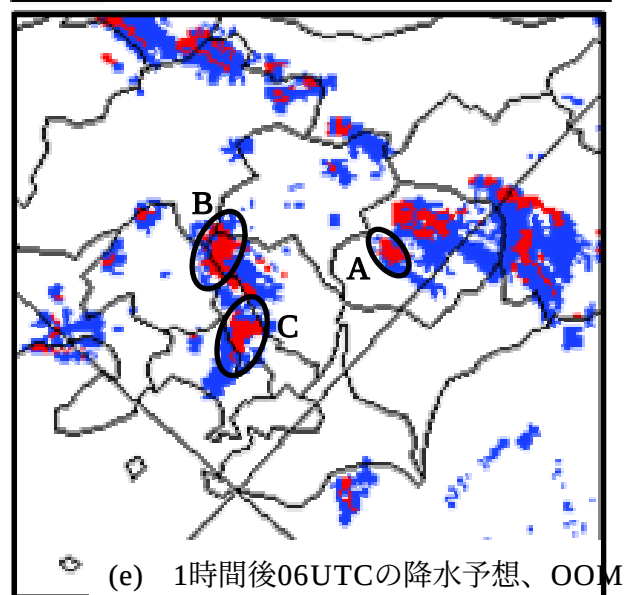


図3.3.5 関東甲信地方での2002年8月4日05, 06UTCの実況降水強度分布（左列）およびEXPとOOMによる05UTCを初期時刻とする1時間後の予想降水強度分布（右列）



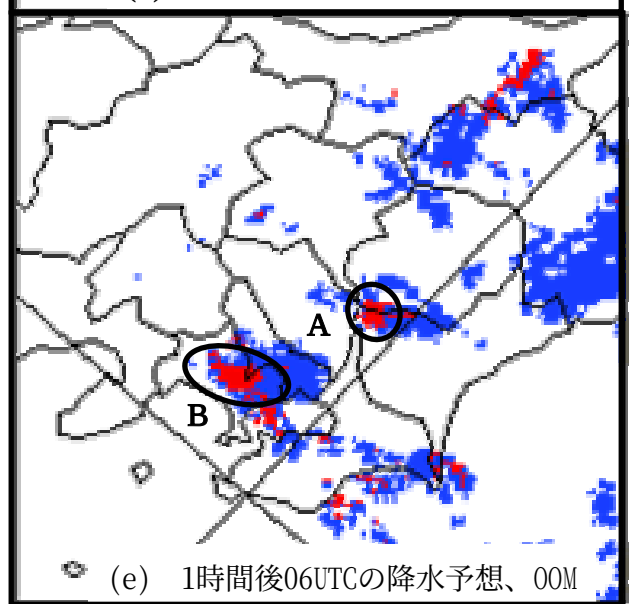
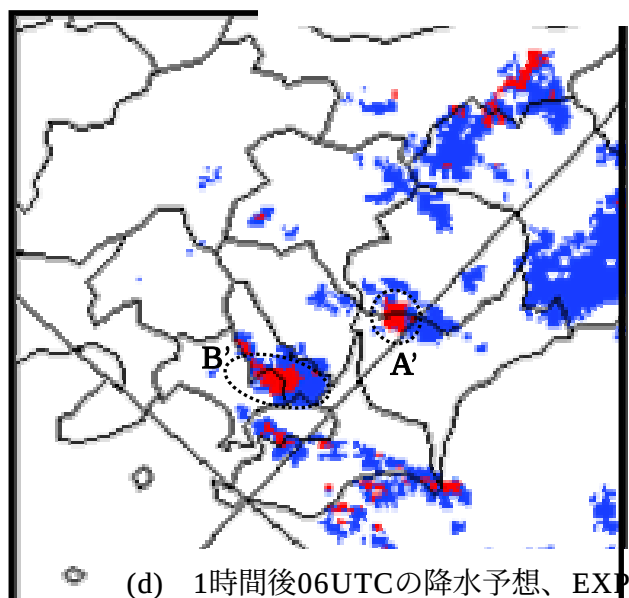
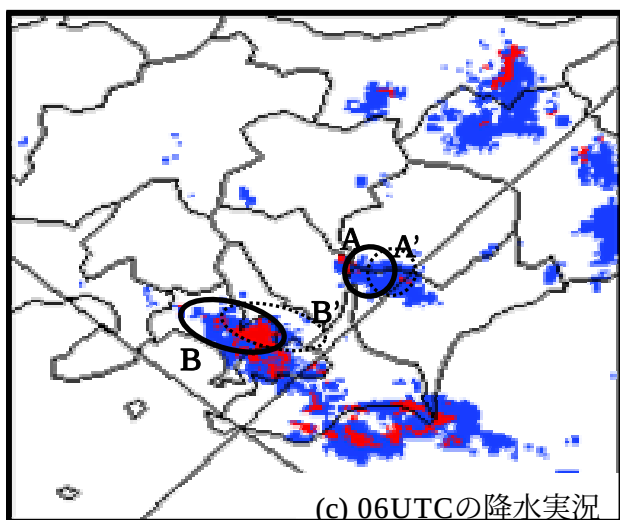
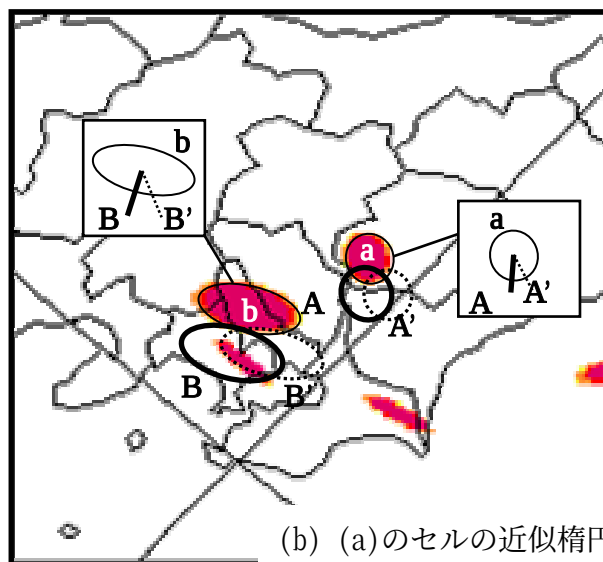
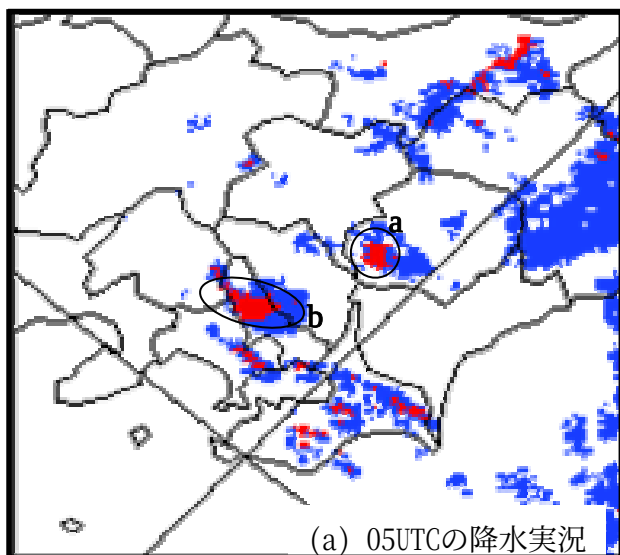


図3.3.6 関東甲信地方での2003年7月21日05, 06UTCの実況降水強度分布（左列）およびEXPとOOMによる05UTCを初期時刻とする1時間後の予想降水強度分布（右列）

3.3.5 現在の問題点と今後の課題

本節の検証は地形性降水を考慮しない予測EXPの事例検証にとどまった。今後、現業化のために地形性降水を考慮したEX6と、OOMを導入したEX6についてスコアを使った検証を行う予定である。

第3.3.3項で述べたセルの移動予測アルゴリズムにおける問題点について述べる。

1つ目は、(2)の処理では10分間で移動可能な距離7.5kmの範囲内にある孤立していない発生・消滅セルは除外できない点である。除外できなかった発生・消滅セルが存在したために個数が変化する場合もあり得る。(3)の処理では、誤って分裂セルではなく発生セルと合成したり、併合セルではなく消滅セルと合成したりすることもあり得る。

この点に関しては、現在、(5)の①移動ベクトルの時間平均値で判別しているだけなので、発生・消滅セルの判別処理の高度化が必要である。

2つ目は、(5)の移動ベクトルの調整についてである。この処理方法だと、発生直後の孤立セルについては周囲200km圏内に他のセルが存在しなければ③の現在のEX6の移動ベクトルで補外する。しかし、このような場合は基本的にエコー発生初期でパターンマッチングが不可能であると考えられ、移動ベクトルがMSMの700hPa予想風となり精度は悪い。このような場合のために、現在のEX6の移動ベクトルを毎時下層風解析値やアメダス実況風をもとに修正できるよう、アルゴリズムを改良する必要がある。

この改良の方向性を示唆するものとして上口・西垣(2001)の報告がある。彼らは、東京管区気象台・宇都宮地方気象台(1991)の「栃木県内の熱雷・熱界雷は館野の高層風に従い、鉛直シアが大きい場合に700hPa風に対して約70%の速さで右にずれながら進行するものが多い」という調査報告に注目し、Bunkers et al. (2000)のスーパーセルの内部力学による移動予測法(Internal Dynamics Method、以降、IDMと略す)を応用して、茨城県内を通過する熱雷・熱界雷に対して「右ずれ」の効果を取り入れた移動予測の検証を行った。IDMの移動ベクトルは館野における06UTCのレーウィン観測風から計算し⁶、従来の700hPa風の線形補外よりもIDM移動ベクトルの方が移動方向角の平方根平均二乗誤差(RMSE)を約70%小さくする結果を得た。

また、セルの盛衰が顕著であると考えられる下記の①、②のような擾乱の場合、レーダーデータから計算された中心移動ベクトルを用いても、正確には移動予測することはできない。なぜなら、強降水域

として抽出するセルの形が大きく時間変化し、セルの中心がセル全体の動きとは異なる動きを示すからである。極端な場合、中心がセル全体の動きに対して直角方向(横滑り)・正反対方向(逆走)に動く。

- ① 台風・前線(帯)・スコールラインといったメソ α スケール以上の組織化された降水系の一部である場合(台風のスパイラルバンド、前線帯の地形性降水など)
- ② 熱雷・熱界雷などのメソ β スケールの組織化されたセルにおいて、セルと環境との間の相互作用(雲物理(凝結、蒸発、降水過程、entrainment、detrainment)＋力学(down-draft、cold air out-break))によって雲水量・降水量の激しい変動がある場合

①については、近似楕円の長径が100km以上、長径に対する短径比が0.2未満、長径の2倍を半径とする同心円内での降水面積率が80%以上、同じ同心円内で降水強度0.0mm/hの格子がない、といったいずれかの条件を満たすときに①の場合であると判断して、OOMの予測対象から除外している。しかし、②については特に除外していない。

これらの予測困難な場合を考えると、現在のOOMの移動予測はセルの盛衰による降水域の形の変化がそれ程激しくない場合に有効であることが分かる。一方、メソ β スケールの対流性降水は数十分～数時間の時間スケールで発達・衰弱のライフサイクルをたどるため、目先2～3時間後の予測精度を上げるためにはセルの盛衰予測の開発が不可欠である。

今後は上層レーダーデータ、雷標定データ、毎時下層風解析値およびモデル予想値などを用いて、セルの活動段階、セルの持つ対流不安定エネルギー、セルの移動先の環境場(収束・発散・安定度)、地形、などを考慮したセルの盛衰予測技術を開発していく。

最後に、注意報・警報の発表のリードタイムを十分とるためにはセルの発生予測が重要であるが、将来、理想的には高解像度の数値予報モデルを用いるべきであろう。一方、モデル予想値と実況値との差を考慮すれば、実況値に基づいて予想するナウキャストも必要であり、可降水量が多くて対流不安定エネルギーが大きい収束域の検出など、対流性降水の発生概念に立脚した方法で求めることが想定される。

謝辞

気象庁予報部予報課の藤本英生氏には航空用雷ナウキャストのプログラムを提供していただきました。気象庁気象研究所の平沢正信氏にはTITANに関するコメントやセル抽出のアルゴリズムに関する助言をしていただきました。そのほか、降水短時間予報ワーキンググループの皆様から様々な助言をいただきました。この場を借りて皆様に謝意を表します。

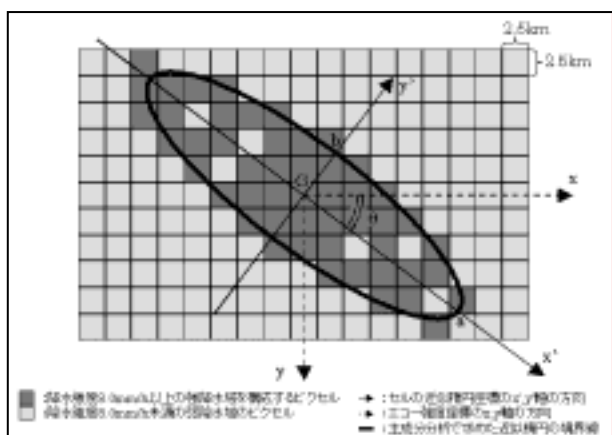
⁶ IDM移動ベクトルは500～1000hPa間の鉛直シアベクトルに対して右向きに直交する補正ベクトルを計算し、500～1000hPa間の平均風と和をとって求める。

付録

セルの中心移動ベクトルの埋め込み処理による移動ベクトルの補正方法について順を追って具体的に述べる。補正方法は順に、(1)主成分分析によるセルの近似楕円計算処理、(2)セルの近似楕円内外判定処理、(3)セルの中心移動ベクトルの埋め込み処理、の3つで構成される。なお、補正されるEX6の移動ベクトルは2.5km格子に内挿した値である。

(1) 主成分分析によるセルの近似楕円計算処理

図A-1は主成分分析によって求められた近似楕円の模式図を表す。点線矢印はエコー強度座標(x, y)の座標軸を表し、実線矢印は近似楕円の中心Gから見た座標(x', y')の座標軸を表す。また、太実線楕円はセルの近似楕円で、aは長径、bは短径、θは長径の向き(=x軸とx'軸のなす角)を表す。



図A-1 主成分分析から求まる近似楕円の模式図

まず最初に、最低高度面の2.5kmメッシュエコー強度合成データにおいて、降水強度8.0mm/h以上の2.5kmエコー強度格子(以降、ピクセルと呼ぶ)が縦・横・斜めに隣接して10格子以上集合している場合(図では濃灰色の格子の集合にあたる)、この集合をOOM予測対象のセルとして抽出する。

2番目に、この集合のピクセルの位置(x, y)について、エコー強度などの重みを考慮せずに平均・分散・共分散をそれぞれ計算する。この位置の平均がピクセルの集合の中心で、近似楕円の中心Gとする。

3番目に、近似楕円の長径・短径の長さおよび長径の向きを求める。一般に、ピクセルの集合はGを中心とした円状には分布せず、ある方向に長く伸びて分布している。従って、この集合の外形を最も精度良く近似できる楕円は、エコー強度座標のx軸に対していろいろな向きに傾いている。この傾きを主成分分析で求め、中心Gから見てピクセルの位置の分散が最も大きいx'軸の方向と、逆に分散が最も小

さく、かつx'軸に直交するy'軸の方向を求める。

x'軸方向およびy'軸方向の分散からそれぞれ近似楕円の長径aと短径bの長さを求める。x軸とx'軸のなす角度がそのまま長径の向きθとなる。

ここまでの近似楕円計算については予報課の航空用雷ナウキャストと同様である。

(2) セルの近似楕円内外判定処理

次に、移動ベクトルの補正値を求めようとしている格子点が、近似楕円の内部・境界・外部のどこにあるのかを定量的に判定するため、近似楕円の長径a・短径b・長径の向きθで規格化された、近似楕円の中心からの格子点の距離を計算する。

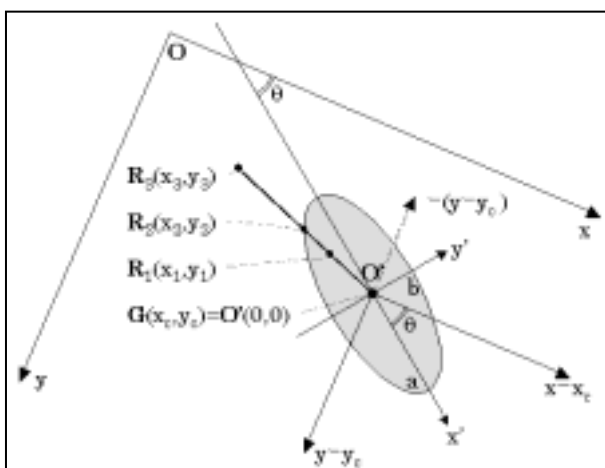
今、主成分分析によって求められたセルの近似楕円の方程式は

$$\frac{x'^2}{a^2} + \frac{y'^2}{b^2} = 1 \quad (A-1)$$

である。但し、(x', y')は近似楕円上の境界点、aは長径、bは短径を表す。(A-1)式で表現される近似楕円をr(>0)倍に拡大した楕円上の点(x', y')が満たす方程式は次式となる。

$$\frac{x'^2}{(ra)^2} + \frac{y'^2}{(rb)^2} = 1 \quad \text{または} \quad r^2 = \frac{x'^2}{a^2} + \frac{y'^2}{b^2} \quad (A-2)$$

この方程式から、rは近似楕円の長径・短径によって規格化された距離であることが分かる。図A-2にセルの中心を原点とする近似楕円座標とエコー強度座標(斜軸ランベルト座標)との位置関係および近似楕円内外判定の解説図を示す。



図A-2 近似楕円座標とエコー強度座標(斜軸ランベルト座標)との位置関係および近似楕円内外判定の模式図

近似楕円座標はz軸上方から見下ろしてx軸とy軸の配置が順に反時計回りであるのに対して、エコー強度座標は時計回りであるため、両座標は次式に示すような並進・鏡映・回転移動によって結ばれてい

る。エコー強度座標から見た問題の格子点の座標と近似楕円の中心をそれぞれ、 (x, y) と (x_c, y_c) とすると、

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - x_c \\ y - y_c \end{pmatrix} \quad (\text{A-3})$$

但し、右辺の第1行列は反時計回りに θ 回転する回転移動を表す行列、第2行列は x 軸に対する鏡映移動を表す行列である。この式の行列計算から次式を得る。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (x - x_c) \cos \theta + (y - y_c) \sin \theta \\ (x - x_c) \sin \theta - (y - y_c) \cos \theta \end{pmatrix} \quad (\text{A-4})$$

(A-4)式を(A-2)式に代入して近似楕円座標の値 (x', y') を消去すると次の式が導出される。

$$\begin{aligned} r^2 = & \left(\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2} \right) (x - x_c)^2 \\ & + 2(x - x_c)(y - y_c) \left(\frac{1}{a^2} - \frac{1}{b^2} \right) \sin \theta \cos \theta \quad (\text{A-5}) \\ & + \left(\frac{\sin^2 \theta}{a^2} + \frac{\cos^2 \theta}{b^2} \right) (y - y_c)^2 \end{aligned}$$

この(A-5)式から近似楕円における格子点の内外判定は、 $0 \leq r < 1$: 内部、 $r = 1$: 境界、 $r > 1$: 外部、となる。図A-2でセルの中心を $G(x_c, y_c)$ とすると、点 $R_1(x_1, y_1)$ 、 $R_2(x_2, y_2)$ 、 $R_3(x_3, y_3)$ は順に近似楕円の内部・境界・外部の点であり、それぞれ、 $0 \leq r = GR_1 < 1$ 、 $r = GR_2 = 1$ 、 $r = GR_3 > 1$ 、となっている。

(3) セルの中心移動ベクトルの埋め込み処理

最後に、この規格化距離 r を使って2.5km格子に内挿した現在のEX6の移動ベクトル場にセルの中心移動ベクトルを埋め込む。具体的には、次の(A-6)式をセルの中心移動ベクトルに対する重み関数 $w(r)$ として採用し、(A-7)式に従って問題の格子点における移動ベクトルの補正值 $\mathbf{V}_M$ を計算する。

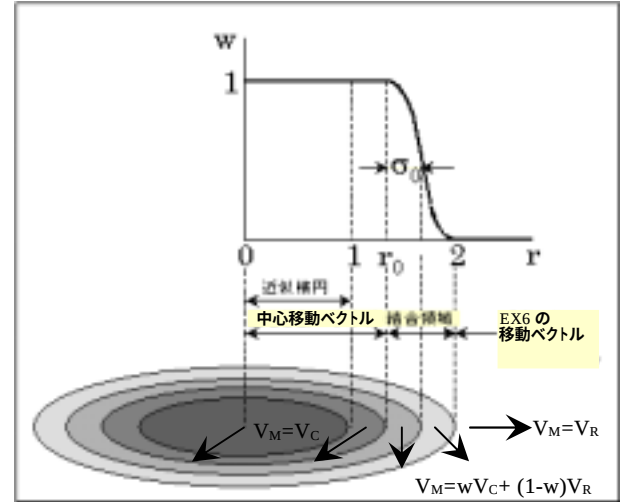
$$w(r) = \begin{cases} 1 & (0 \leq r \leq r_0) \\ \exp \left[- \left(\frac{r - r_0}{\sigma_0} \right)^2 \right] & (r_0 < r \leq 2) \\ 0 & (2 < r) \end{cases} \quad (\text{A-6})$$

$$\mathbf{V}_M = w \mathbf{V}_C + (1 - w) \mathbf{V}_R \quad (\text{A-7})$$

但し、 $r_0 = 1.25 (> 1.00)$ 、 $\sigma_0 = 0.375$ 、 $\mathbf{V}_C$ はセルの中心移動ベクトル、 $\mathbf{V}_R$ はEX6の移動ベクトルである。

図A-3に近似楕円・重み関数 w ・移動ベクトルの補正值 $\mathbf{V}_M$ の解説図を示す。図のように、 w は中心移動ベクトル $\mathbf{V}_C$ 領域 ($0 \leq r \leq r_0$)、結合領域 ($r_0 < r \leq 2.0$)、EX6の移動ベクトル $\mathbf{V}_R$ 領域 ($2.0 < r$) とに分割して適用する。 w によって、 $\mathbf{V}_C$ を $\mathbf{V}_R$ に滑らかに接続して埋め込み、移動ベクトル場を $\mathbf{V}_R$ から $\mathbf{V}_M$ に補正する。図の中で、近似楕円の中心から外部に向かって $\mathbf{V}_M$

が左回転しながら変化しているのが分かる。このとき、結合領域では $\mathbf{V}_R$ と $\mathbf{V}_C$ との速度シアが発生するため、予想時刻が長くなるにつれて降水域の形が変わる。 $r_0 = 1.00$ としない理由はここにあって、 $r_0 = 1.00$ では近似楕円の外部に突出した8.0mm/h以上のピクセルが引き伸ばされる。すなわち、防災上注意すべきセルとして抽出された強降水域の引き伸ばしが起きやすくなるためである。回避策として $r_0 = 1.25$ と設定し、降水域の変形はできるだけセル外部とみなされた弱降水域ですますことにしている。



図A-3 近似楕円・重み関数 w ・移動ベクトルの補正值 $\mathbf{V}_M$ の模式図

参考文献

- 荒木公仁, 2000: 降水6時間予報. 平成12年度数値予報研修テキスト, 数値予報課報告・別冊47号, 気象庁予報部, 36-41.
- 上口弘晃, 西垣語人, 2001: 館野・ホドグラフによる雷雲の移動予測法. 気象庁研究時報・52巻別冊, 平成12年度管区気象研究会誌選集, 78-79.
- 気象庁東京管区气象台, 1991: 熱雷に関する地域特性の調査. 解説資料, 18, 70-73.
- 予報部予報課, 1991: 降水短時間予報プロダクト作成におけるデータ処理について. 測候時報, 58, 198-207.
- Bunkers, M. J., et al. 2000: Predicting Supercell Motion Using a New Hodograph Technique. Wea. Forecasting, 15, 61-79.
- Dixon M. and G. Wiener 1993: TITAN: Thunderstorm identification, tracking, analysis and nowcasting - a radar-based methodology. J. Atmos. Oceanic Tech., 10, 785-797.
- Wilson et al., 1998: Nowcasting Thunderstorms: A Status Report. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79, 10, 2079-2100.