

—解説②—

## 数値予報利用の現状

札幌管区气象台 中山 嵩

### 1 はしがき

気象庁では、1959年に当時の大型コンピュータを設置し、数値予報業務を開始して以来、気象学の発展、数値予報技術の進歩、気象衛星をはじめとする観測技術の進歩、世界の観測データを短時間で収集する気象通信の改善、コンピュータの進歩等を背景に、数値予報モデルのレベルアップを繰り返し、数値予報の精度向上を図ってきました。

1988年にはスーパーコンピュータを核とする気象資料総合処理システム(COSMETS)の運用を開始し、世界の主要な気象センターで、既にスーパーコンピュータを使って運用されているのとはほぼ同性能の全球モデルの運用開始及び領域モデルのレベルアップを行い、数値予報の高度化を進めました。

数値予報結果は、今では天気予報の主要な予報作業資料として使われていますが、有線FAXや無線FAXで伝送される図形表示の資料が主となっています。しかし、1989年3月に東京管区内(関東、東海、甲信越地方等)の気象官署を結ぶコンピュータネットワークの展開により、これらの気象官署では、最新のワークステーションでCOSMETSから送られてくる数値予報の格子点データを予報作業に使えるようになりました。

数値予報では、将来の大気の状態が3次元で表されています。有線FAXや無線FAXでも、3次元的に大気状態が把握し易いように様々な工夫により図形表示されていますが、最新のワークステーションでは、格子点データを利用できるので、より詳細な大気状態の把握が容易になります。数値予報の豊富な情報を有効に利用できる新局面が開かれてきました。

### 2 客観解析と数値予報

COSMETSでは、国内及び国際通信回線で世界各所で観測されたデータ、地上気象観測、海上気象観測、航空気象観測、静止衛星や軌道衛星観測、レーダー観測、地域気象観測所(アメダス)観測等の多量な各種データの中継、収集、編集処理、これらのデータを用いた客観解析、数値予報、降水短時間予報等の計算処理、それらの結果の送信処理等が迅速に行われています。客観解析や数値予報の膨大な計算はスーパーコンピュータで処理されています。

現在、気象庁で運用されている客観解析と数値予報モデル(台風モデルを除く)の概要を表1、表2に示します。

客観解析や数値予報では、大気の状態を表すのに規則正しく並んだ細かい格子の網を使っています。この格子網を何枚も重ねて地球を仮想的に覆い、その格子点上に気圧、気温、風等の値を与えて大気の状態を表

表1 客観解析の概要

モデル	全球解析	アジア解析	日本域解析
格子間隔	1.875°×1.875°の 等経緯度格子	ポーラステレオ 60°Nで150km	ポーラステレオ 60°Nで80km
領域	全球 192×97	アジア域 93×81	日本域 69×69
解析レベル と要素	Pmsl, SFC(V;T,T-Td), 1000mb(Z) 850,700,500,400,300mb (V,Z,T,T-Td) 250,200,150,100mb (V,Z,T) 70,50,30,20,10mb (V,Z,T)		
解析法	対流圏 最適内挿法 (全球モデルによる6時間予報 値を推定値として使用)  成層圏 あてはめ法 (推定値を使用せず)	対流圏 最適内挿法 (全球モデルによる6時間 予報値を推定値 として使用)  成層圏 最適内挿法 (予報値及び6時間前の 全球解析値を推定値として 使用)	対流圏 最適内挿法 (アジアモデルによる 12時間予報値を推定値 として使用)  成層圏 最適内挿法 (予報値及び6時間前の 全球解析値を推定値として 使用)

(測候時報 (1987) をもとに作成)

わしています (図1)。大気の水分解能はその格子間隔で決まり、鉛直分解能は重ねた網の数 (層の数) で決まります。ヒマラヤ山岳付近の地形を例にして水分解能の相違による表現の変化を図2に示します。格子間隔が約 180 km、約 100 km と約 50 km の例で、格子間隔が約 50 km になると現実に近い地形が表わせるようになります。

数値予報の処理過程は、収集された観測データをコンピュータで処理可能な数値に変換する解読過程 (デコーディング)、誤ったデータを取り除いたり、補正する過程 (データの品質管理)、地球上に不規則に分布した観測点の観測データから規則正しく配置された格子点の値を求める過程 (客観解析)、数値予報モデルにより将来の大気の状態を予測する過程 (数値予報)、それらの計算結果を図形データや文字/数値データに変換してコード化する過程 (画像処理) で構成されています。観測データの収集から、利用者に計算結果を送信するまでの時間が限られているために、ソフト面からも各過程で様々な工夫が

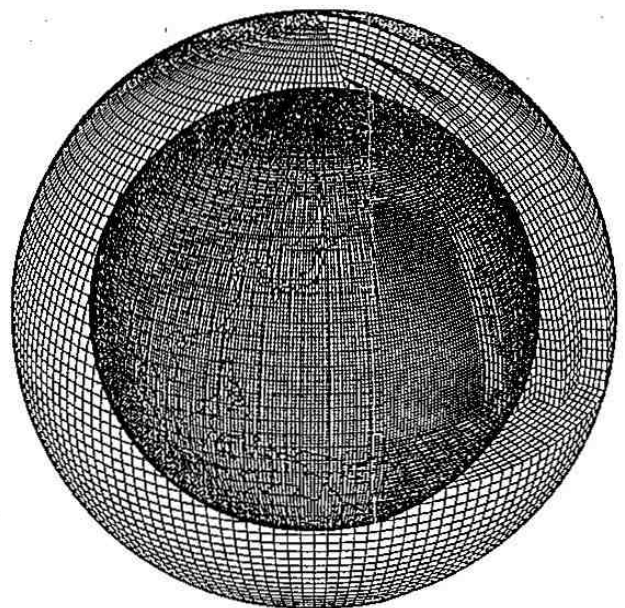


図1 全球の仮想的な格子網

表2 数値予報モデルの概要

	全球モデル	アジアモデル	日本域モデル
予報領域	全球	アジア域	日本域
空間スキーム	スペクトル法	スペクトル法(2重フーリエ級数)	
水平解像度	三角形切断 T63	最大波数: 83×70	最大波数: 62×62
格子間隔換算	約180km	75kmの変換格子	40kmの変換格子 (ポーラーステレオ60°N)
鉛直解像度	16層	16層	19層
イニシャリゼーション	ノンリア・ノーマルモード・イニシャリゼーション 全物理過程を含む鉛直全モード		
初期値	全球解析	アジア解析	日本域解析
物理過程	クオ方式、浅い積雲対流		
積雲対流	大規模凝結、視霧対流調節 雨滴の蒸発		
境界層	クロージャ・モデル(レベル2)		
接地境界層	モーニン・オブコフの相似則		
放射過程	(短波放射) 雲と地表面による多重散乱を考慮 吸収物質(オゾン、水蒸気) (長波放射) バンドモデルに基づいたパラメタリゼーション 吸収物質(オゾン、水蒸気、ダイマー、 二酸化炭素)	地表面温度の計算の時のみ考慮	
陸面温度	復元強制法による予測	地中に3層を取り地中温度も予測する	
雲量	相対湿度の2次関数	3つの層の相対湿度から上、中、下層雲量を求める 地表面温度の計算に用いる	
側面境界条件		全球モデル	アジアモデル
予報期間	3日(毎日、00Z)、8日(毎日、12Z)	2日(00Z、12Z)	1日(00Z、12Z)

(測候時報 (1987) をもとに作成)



図2 ヒマラヤ山岳付近の地形表現  
左端：格子間隔約 180 km、中間：格子間隔約 100 km 右端：格子間隔約 50 km

なされ、少しでも迅速に処理できるようにしています。計算時間の最もかかる数値予報では、時間積分に経済的な演算方法を使用し、物理過程もできるかぎり簡略化して計算時間を少しでも減少させる努力がなされています。

客観解析には、観測の精度に応じて統計的にみて最も精度の良い解析値が得られる方法がとられています。多種類の機器による観測がありますので機器の観測精度に応じた重み等を付け、力学的な関係とも矛盾しないように解析しています。また、数値予報結果を推定値として使い、観測データの少ない領域での解析を良くするようにしています。全球の客観解析の場合には、6時間の予報解析サイクルを採用し、解析時の6時間前の解析値を初期値とした全球モデルの6時間予報値を使って客観解析し、格子点の近くに観測データがなければ、モデルの予報値を解析値としています。これを繰り返して6時間毎の全球客観解析を行い、観測データをできるだけ多く解析に取り入れるようにしています。数値予報の精度向上が客観解析の精度向上に、客観解析の精度向上が数値予報の精度向上に結びつくように工夫されています。

数値予報は、流体力学方程式や熱力学の第一法則等の物理法則をもとに将来の大気の状態を予測しています。時間積分は、短い時間ステップを繰り返しながら進められますが、1ステップ当たり進めることのできる時間間隔は、格子間隔と予報領域内の最大風速によって決まってきます。格子間隔を1/2にすると単純計算で約8倍の計算時間がかかります。限られた運用時間内に多様な利用目的に対処するために、1週間先までの全球の大気状態の把握には全球モデル、2日先までのアジア地域の詳しい大気状態の把握にはアジアモデル、1日先までの日本列島のより詳細な大気状態の把握には日本域モデルという構成で運用しています。台風モデルでは、台風の進路予測を目的にしていますので、台風が表わせるように格子間隔が決められています。台風の進路予測の精度を上げるために予測開始時に予測対象とする台風が予測領域の真中の位置にできるように予測領域を設定しています。

数値予報モデルに組み込まれている物理過程は、モデルによって多少異なっています。全球モデルでは、太陽からの短波放射、大気や地表面からの長波放射が考慮されています。吸収物質として二酸化炭素、水蒸気、オゾン等があり、水蒸気はモデルで予測されていますが、他の物質は気候値に準じたものが用いられています。領域モデルでは地表面温度を予測する時に地表面での放射収支を計算し、境界層内の風や気温の日変化も予測しています。どのモデルも雲の放射効果を考慮しており、雲を相対湿度から換算する方法が用いられています。海面や陸面からの顕熱や潜熱が大気へ輸送され、大気中で積雲等による潜熱の放出で大気を加熱する効果も考慮されています。その際、水蒸気が凝結しますので降水として地表面に落します。領域モデルでは、雨滴の蒸発の効果も考慮されています。海面水温は、解析時の7日前からのデータを使って気候値からの偏差を計算し、気候値にこの偏差を加えた値を使っています。その他、境界層での乱流、山岳によって生じる重力波が大気に与える抵抗等の物理過程も考慮されています。

全球モデルの予測結果は、アジアモデルや台風モデルの境界値として使われています。全球の観測データは、アジア地域の観測データより収集するのに時間がかかりますので12時間前の全球モデルの予測結果が境界値として使われています。日本域モデルの境界値としては同じ初期値のアジアモデルの予測結果が使われています。領域モデルの予測精度は、その境界値の良し悪しに影響されますので全球モデルの予測精度の向上が領域モデルの予測精度向上につながっていきます。

### 3 数値予報の予測精度

1959年に北半球バロトロピックモデルとアジア域の4層準地衡風モデルによる数値予報業務が開始されました。以来、北半球域とアジア域の数値予報モデルが運用され、1973年にアジア域の数値予報モデルがプリミティブモデルに改良され、1975年北半球域の数値予報モデルがプリミティブモデルに改良されました。1983年には日本域の数値予報モデルの運用がプリミティブモデルで開始されました。1988年3月からスーパーコンピュータを使って、北半球モデルに代えて全球モデルの運用が開始され、同時にアジア域と日本域の数値予報モデルのレベルアップも図られました。

1984年3月から1989年5月までの北半球モデル及び全球モデルの予測精度の変遷を500mbの高度のTendency Correlation (TC) と Root Mean Square Error (RMSE) で示します(図3)。TCは、初期値

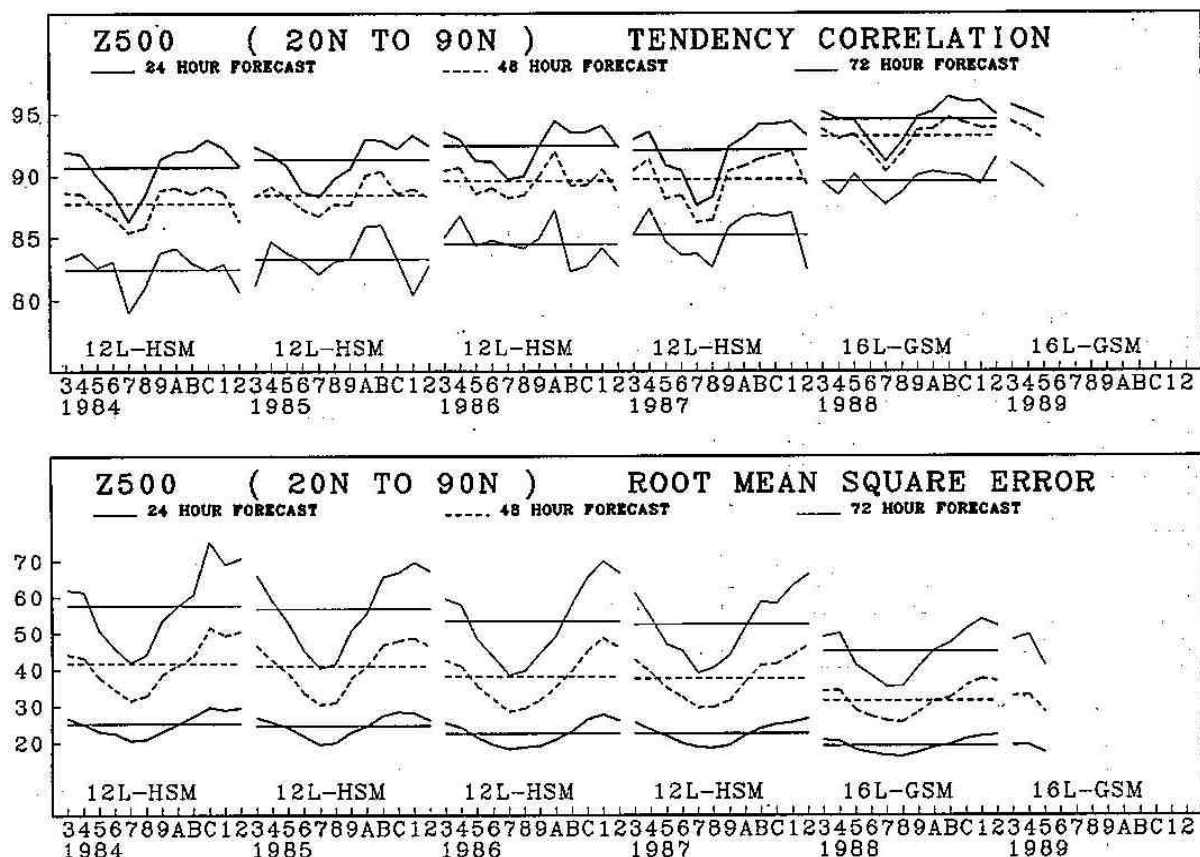


図3 北半球及び全球モデルの500mb高度の予測精度  
 上段：Tendency Correlation (TC) 下段：Root Mean Square Error (RMSE)  
 1984年3月から1989年5月の期間

から予測された値がどのくらい正しく変化するかを示すもので、初期値からの予測値の変化量と初期の解析値からの予測に対応する解析値の変化量の相関係数で、RMSEは、予測値のエラーの二乗平均の平方根です。夏には、太平洋高気圧が卓越したり、春や秋には、高低気圧の移動等があり、500mbの高度変化は、一般に夏には小さく、春や秋には大きくなります。TCやRMSEは、これに対応して季節的に変化しています。

全球モデルの精度は、北半球モデルの精度より著しく向上していることが解ります。TCでは、全球モデルの48時間予測が北半球モデルの24時間予測より良く、全球モデルの72時間予測が北半球モデルの48時間予測にほぼ対応しています。RMSEでは、全球モデルの48時間および72時間予測が北半球モデルの36時間及び60時間予測にそれぞれほぼ対応しています。また、TCやRMSEの季節的に変化する幅も全球モデルの



方が北半球モデルより小さくなっています。

全球モデルの精度が向上している主な理由として、北半球モデルではモデルの構成上、赤道に人為的な壁を設定し、南北半球の空気の入りがないとせざるをえないこと、全球モデルの方が水平分解能が良くなっていること等が上げられます。

日本域モデルによる北海道域内の6地域(図4)を対象に地上気温の予測精度を最高気温と最低気温で示します。モデルの格子間隔は約40kmですので、格子点の予測値と格子点を中心とする40km×40kmの域内にあるアメダス地点の観測値の算術平均値とを比較しています。モデルの予測期間内の最高気温と最低気温をそれらの出現時刻を考慮しないで比較しています。

札幌と苫小牧周辺(E)で、最高気温と最低気温の誤差が±1.5℃以内に収まった割合を月毎に求めた結果を図5に示します。期間は1988年3月から11月までの9ヶ月間で、系統的な誤差を除いてあります。80%前後に達するのは3、10、11月の最高気温のみとなっています。特徴的な予測と観測の相関散布図を図6に示します。左上段は、札幌と苫小牧周辺(E)での10月の最高気温で系統的な誤差が1.5℃程度ありますが相

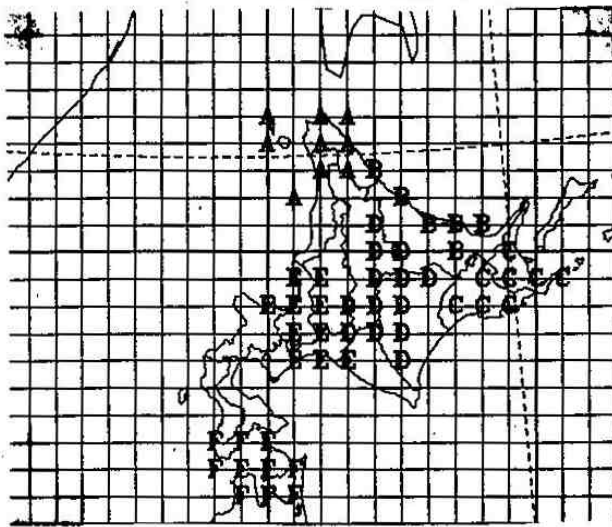


図4 北海道域内の検証対象地域  
 A: 宗谷、留萌の比較的平坦な地域と島  
 B: オホーツク海沿岸  
 C: 釧路、根室  
 D: 山地  
 E: 札幌-苫小牧の周辺  
 F: 津軽海峡

関が非常に高いことが解ります。右上段は、釧路、根室(C)の7月の最高気温で予測の方が観測より高くなっています。道東の霧がモデルで表されていないためと考えられています。左下段は、オホーツク

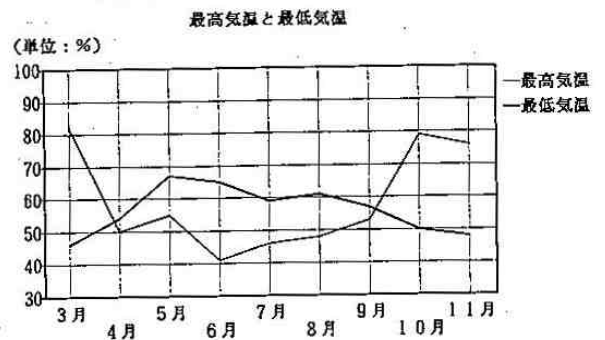


図5 日本域モデルの最高気温と最低気温の予測精度  
 札幌-苫小牧の周辺の最高気温と最低気温の予測精度。  
 系統的誤差を除いて、予測誤差が±1.5℃以内の百分率。  
 期間: 1988年3月から11月

海沿岸(B)の4月の最高気温で観測では20℃以上に達していますが予測では5℃程度となっています。モデルでは4月のオホーツク海側がまだ雪に覆われているとして計算されていることが主因と考えられています。右下段は、宗谷、留萌の比較的平坦な地域と島(A)の3月の最低気温で観測では-20℃以下まで下がっているのに予測では-10℃前後までしか下がらず、全道的な予測傾向となっています。放射冷却による気温降下をモデルでは表されていないためと考えられています。

上層に比べて陸地上の風や気温等の予測精度が良くない理由として、日本域モデルの約40kmの水平解像度でも日本列島の複雑な地形を十分にモデルに取り込めないことも挙げられます。

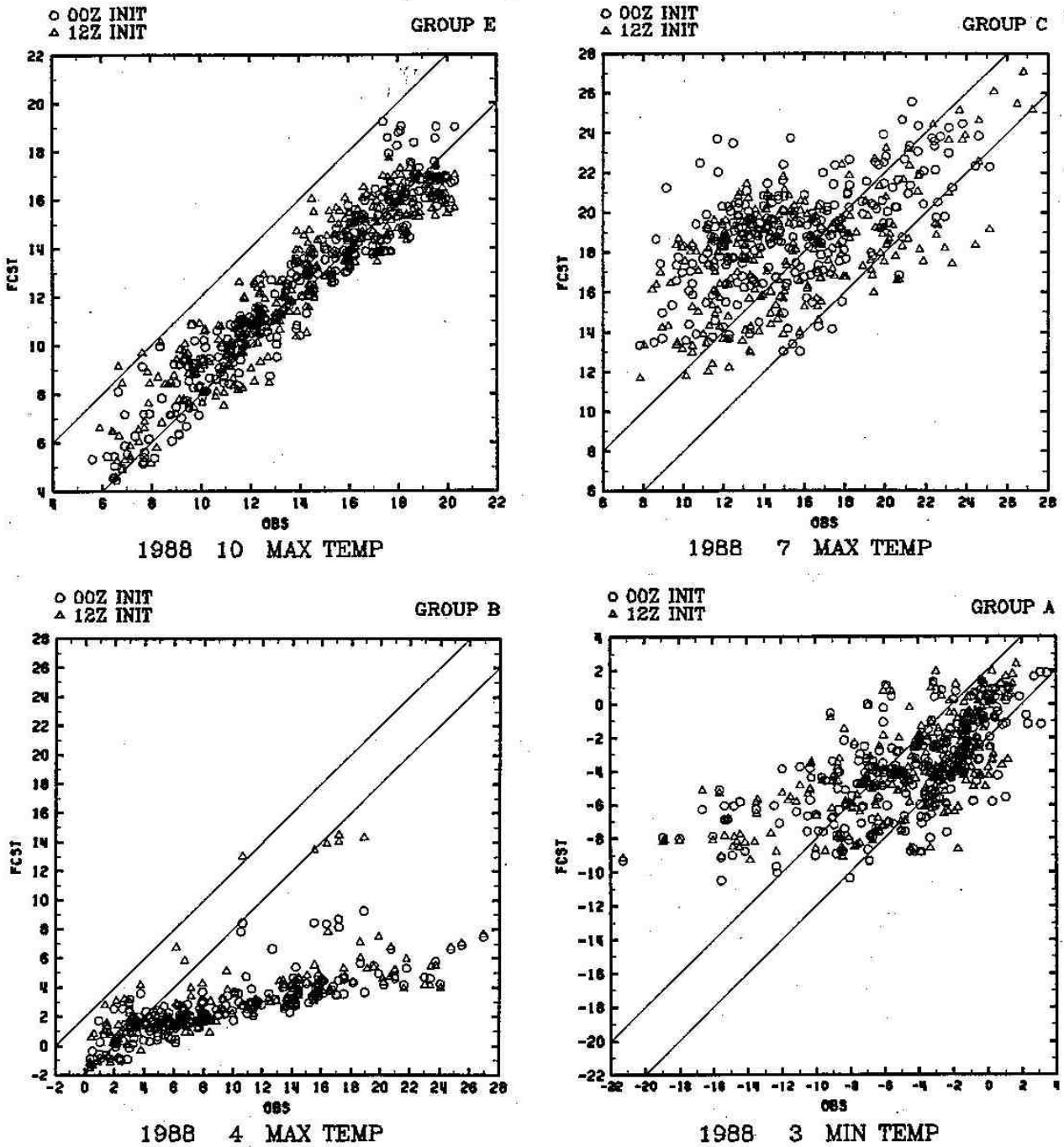


図6 日本域モデルの最高気温と最低気温の相関散布図  
 左上段：札幌－苫小牧の周辺の1988年10月の最高気温  
 右上段：釧路、根室の1988年7月の最高気温  
 左下段：オホーツク海沿岸の1988年4月の最高気温  
 右下段：宗谷、留萌の比較的平坦な地域と島の1988年3月の最低気温  
 縦軸は予測値、横軸は観測値。目盛りは、図ごとに異なる。

#### 4 数値予報の利用

複雑な気象現象を予測する数値予報には予測誤差が避けられません。数値予報モデルの改良を通して予測精度を向上させる努力が続けられています。一方、統計モデルのように予測誤差をできるかぎり減少させる数値予報の利用技術も実用化されていますし、現在では、数値予報結果を利用した特殊目的の数値モデルの開発や実用化が進められています。また、OA 機器の発展により、数値予報の豊富な情報を有効に利用する新局面が開かれてきました。数値予報の利用の現状を紹介します。

気象庁は、世界気象機関 (WMO) と国際民間航空機関 (ICAO) の定めるアジア航空地域の地域空域予報中樞 (RAFC) の役割を果たしています。その一環として国際航空悪天予想図を作成し、国内外に送信しています。この予想図は、COSMETS の最新のワークステーションを使ってマン・マシンで作成されています。航空機の運航に悪影響を与える前線を人間が描画し、雲域や晴天乱流域等を全球モデルの結果から求め、それらの結果を合成して図形化しています (図 7)。全球モデルの結果から前線の描画に必要な複数の気象要素の

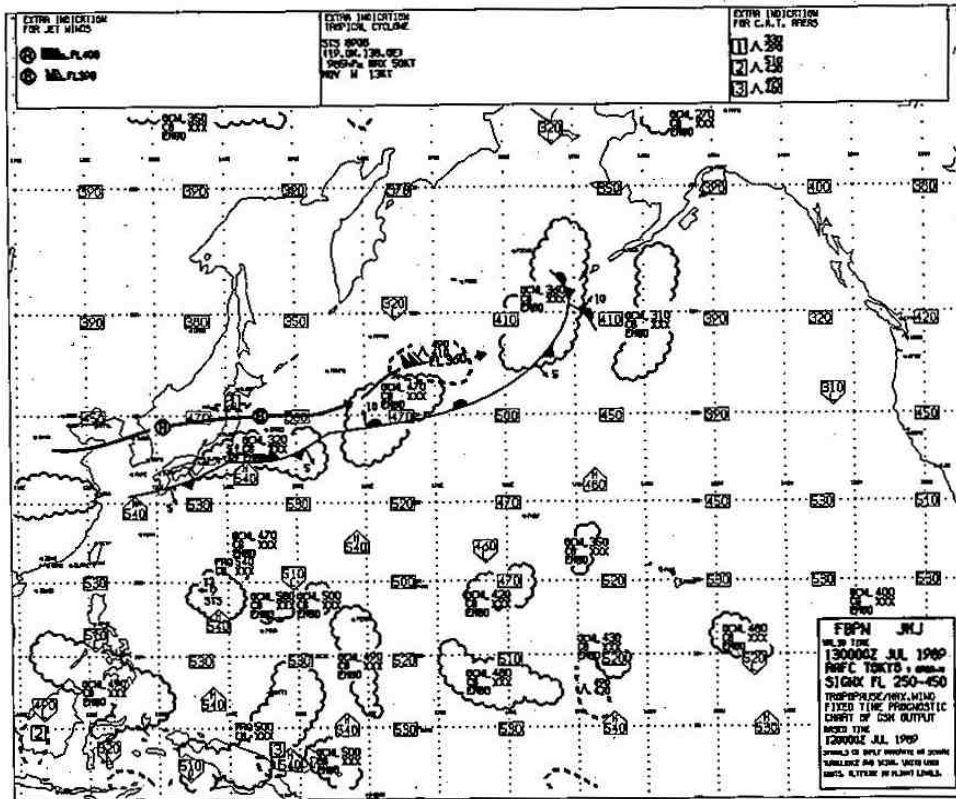


図 7 国際航空用悪天予想図

マンマシンで作成した北太平洋域航空用悪天気予想図。  
航空に悪影響を与える恐れのある前線を人間が描画。  
1989年7月12日9時を初期値とする24時間先の予想図。

予測分布を求め、ワークステーション画面上に重ね合わせて表示し、画面上で人間が前線の描画作業を行います。重ね合わせる気象要素は任意に選択でき、画面の拡大、縮小もできるようになっています。こうしたマンマシン機能を使っての予想図の作成は、世界に先駆けて気象庁で開始されましたが、今後、マンマシン機能を使う方向に進んでいくのではないかと思います。



昨年度、東京管区内に展開された新たなコンピュータネットワークは、国内の気象官署に順次展開されてくると思います。将来の大気の状態を把握するのに数値予報結果が最新のワークステーションでどのように使われているのか例示します。

日本域モデルの地上の気温、風や降水量等の1時間毎の値が、海面気圧や上層の気温、風等の3時間毎の値が24時間先まで画面上に平面図と任意の地点の時系列図として表示されます(図8)。

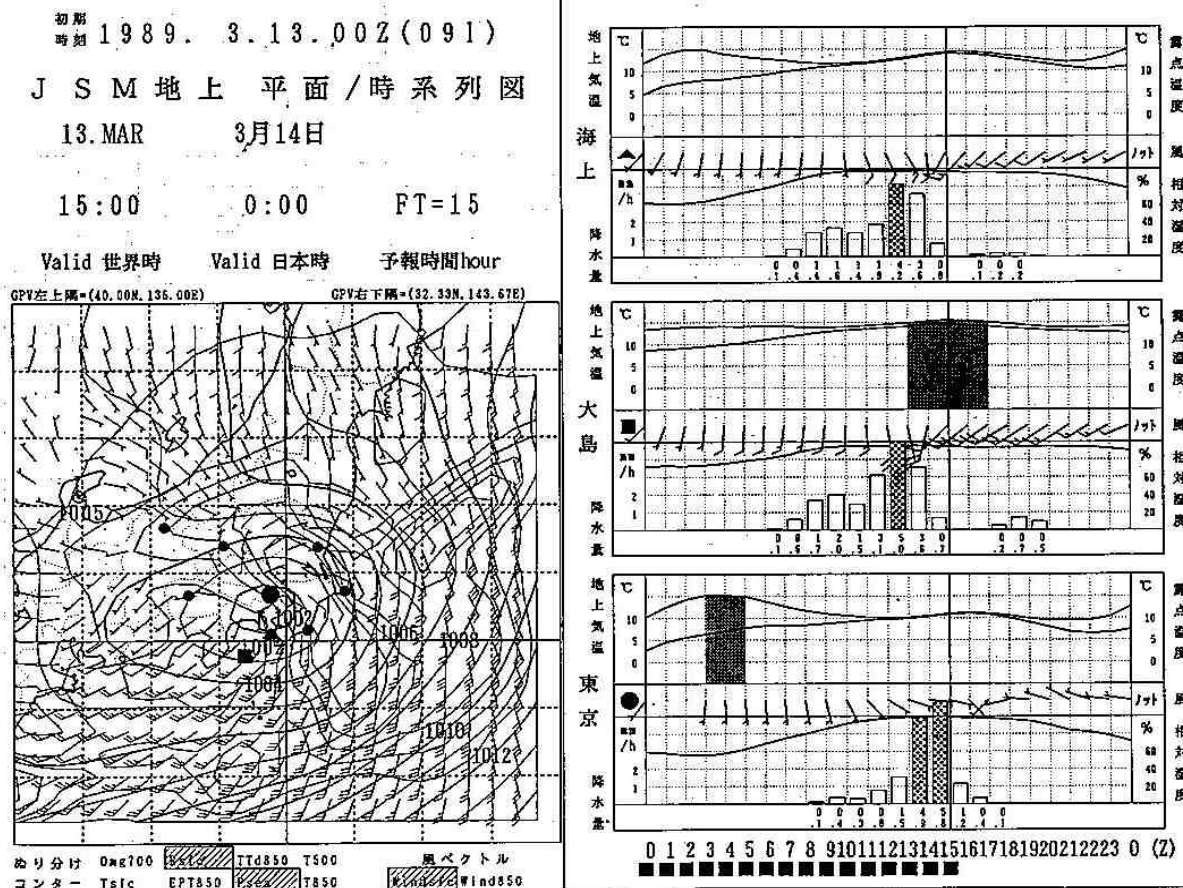


図8 日本域モデルの画面例  
 日本域モデルによる地上気象要素の平面図と時系列図。  
 1989年3月13日9時を初期値とする15時間先の予測図。

平面図の表示領域は、札幌管区では北海道を含む領域となります。平面図は動画で任意の気象要素の重ね合わせ表示もできますので大気の状態の時間変化が把握できますし、動画を途中で停止してある時間の大気の状態を検討することもできます。時系列図には、注意報や警報の基準値をセットすると予測値がその値に達すると色が変わる機能もあります。時系列表示できる地点は任意に決められますが、一度に決められる数は限られています。

一方、アジアモデルの地上気圧、降水量及び上層の気温や風等の6時間毎の値が48時間先まで画面上に平面図、3次元気象図、断面図として表示されます。表示領域は、日本付近となります。平面図は、日本域モデルの平面図とほぼ同じ機能をもっています。3次元気象図は、大気の状態を同一画面上で3次元的に表示する画面です。地上気圧や850mbの気温は色で、850mb、500mbと300mbの高度は網目で表示し、低気圧の発達状況等が3次元的に表わされます。高校の気象学の講義の教材としても使うことができるのではな

いかと思います。大気の断面図は、航空気象用として使われます(図9)。任意の5地点を選択すると5地点

ASM 広域 断面図  
 1989/ 6/ 7/00Z initial  
 6/ 8/00Z valid  
 ( 24hr forecast )

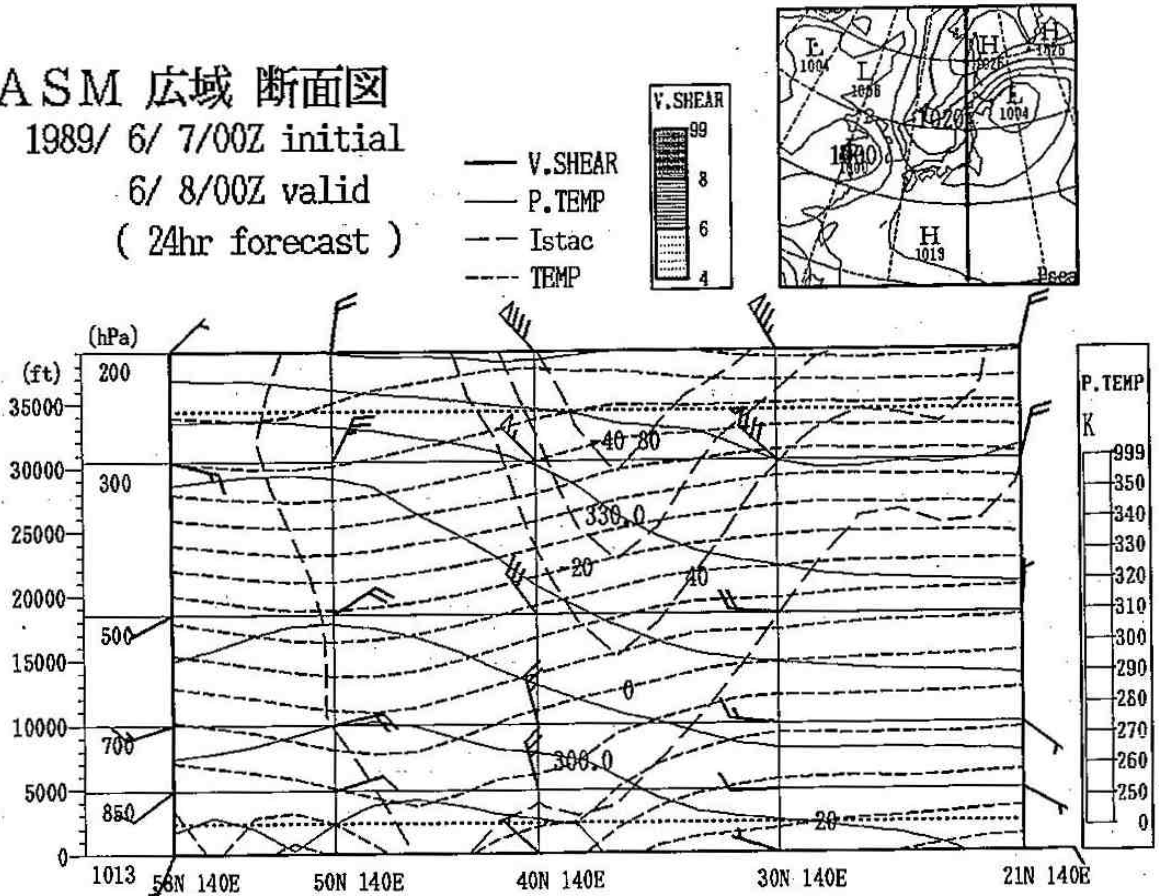


図9 アジアモデルの画面例  
 アジアモデルによる大気の断面図。  
 1989年6月7日9時を初期値とする24時間先の予測図。

に沿った風、気温、鉛直シア一等の断面図が表示できます。動画ともなっていますので断面の時間変化を把握できますし、動画を停止して任意の時間の断面を検討することができます。画面上の右上端に地上気圧分布と断面を切った線も同時に表示されていますので使い易くなっています。

数値予報モデルの格子点データを使った特殊目的の数値モデルが COSMETS で計算処理されています。今後、様々な目的に応じた同種の数値モデルが開発される可能性がありますので例示します。

降水短時間予報業務が1989年7月から北海道西部を対象に開始されました。この業務には降水短時間予報モデルが使われています。降水短時間予報モデルでは、レーダーとアメダスの観測データから解析された降水の実況分布をパターンマッチングにより比較して降水の移動と変化の傾向を求め、その結果を使って時間的に補外し、3時間先までの降水分布を5 km メッシュで予測しています。日本域モデルの格子点データも補足としてですが使われています。降水短時間予報の例を図10に示します。

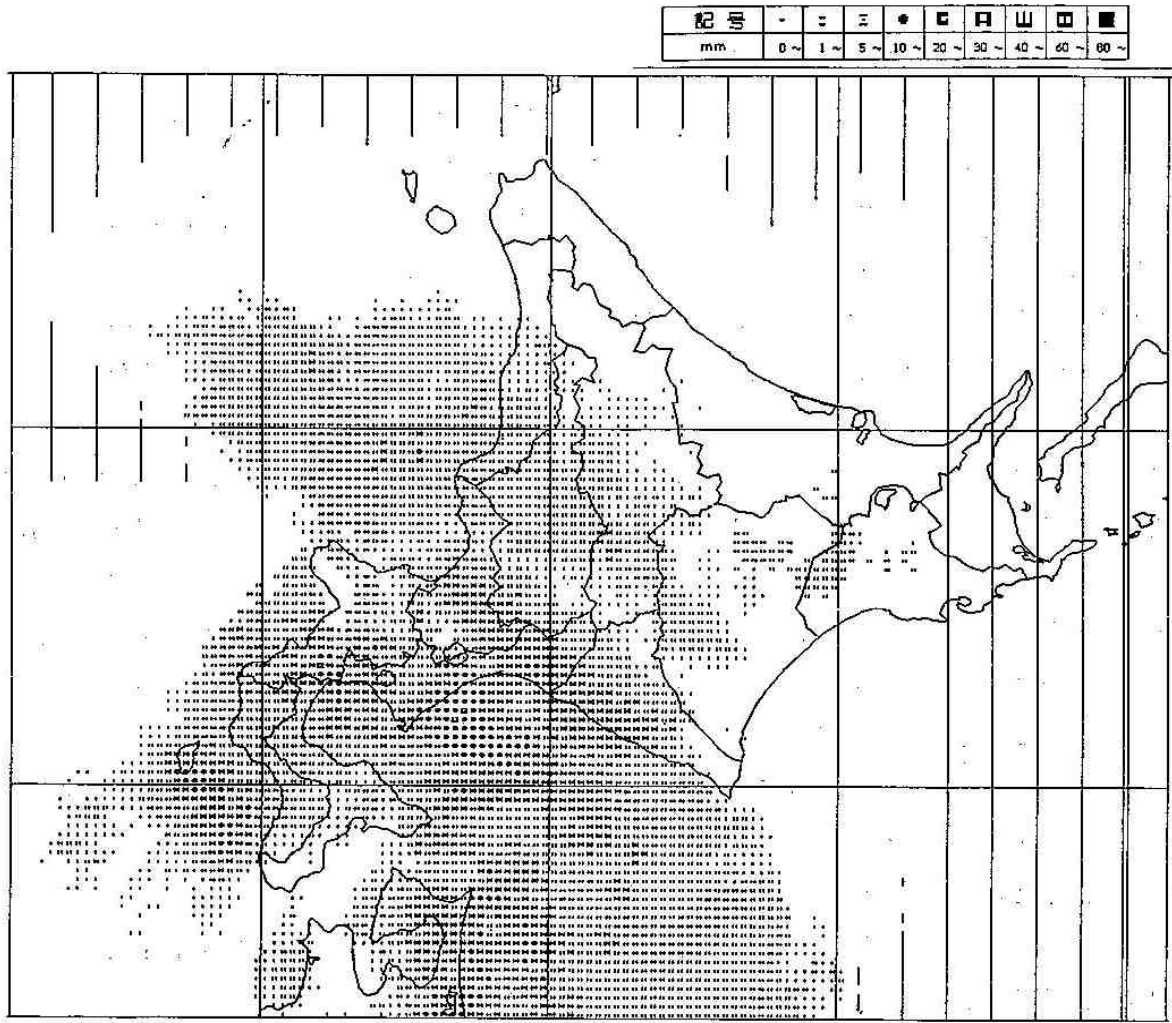


図10 降水短時間予想図。  
1989年6月29日0時を初期値とする1時間先の前1時間の降水量の予想図。  
胆振地方と石狩南部に大雨警報が発表されていた時で非常に良い予想結果でした。

気象庁海洋気象部で開発中の数値モデルに数値海水モデルがあります。オホーツク海の流氷の動向を1週間先まで予測するのを目的にしており、実用化されるのが待たれます。数値海水モデルでは、流氷の運動と結氷、成長、融解が考慮されています。流氷の運動は風や海流の影響を受け、流氷の成長や融解は放射や海面水温等の影響を受けます。風や放射計算にアジアモデルや全球モデルの結果が使われています。

数値予報モデルの結果と降水や地上気温等の実況とを結びつけるのに統計モデルが多用されています。降水確率予報では、MOSと呼ばれる統計的な方法が基になっています。MOSは、数値予報モデルの結果と実況とを直接結びつけて統計的関係を求める方法です。MOSが最も精度の良い統計的関係を求めることができると思いますが、数値予報モデルが変わると改めて統計的関係を求め直さなければならない弱点がありま

す。これに対して実況間の統計的関係を求めて、予測因子とみなす実況値に代えて数値予報モデルの結果を使う PPM という方法があります。PPM は、MOS より精度が落ちますが、数値予報モデルが変わっても再計算する必要がありません。地方官署では、数値予報結果を蓄積し、処理するのは難しいと思います。最も望ましいのは、調査・研究により得られた知見を生かせるような統計モデルではないかと思います。

## 5 あとがき

数値予報は、科学的方法により、将来の大気の状態を予測しています。物理過程の解明、新しい観測技術の改良、コンピュータの進歩等とともに数値予報は、着実に改善されていくものと期待されます。更に力学的モデルによる1ヶ月予報の実現にも努力が続けられていくと思います。

新しいコンピュータネットワークの展開は、より一層地方の特性に応じた資料の作成や伝送システムが可能となり、地方官署の抱える様々な問題に新しい光が当てられると思います。

北海道においては、登別の大雨、石狩湾の小低による大雪、日本海や道東の霧や層雲等の問題を抱えています。今までに蓄積されてきた豊富な調査、研究の成果、今後の調査、研究の成果をどう生かしていくかが課題となると思います。

メソ的、局地的な気象現象がどこまで数値予報で予測されているかの検討、気象現象の把握の新たなソフトの開発の検討、豊富な調査、研究結果と数値予報結果を結びつけてシステムティックに対応する方法の検討等を通して、調査、研究成果を実用化し、総合化していくことが必要ではないかと思います。また、日本域モデルの結果を利用して特殊目的の数値モデル（例えば境界層モデル）も検討課題に上がるかもしれません。数値予報の豊富な情報内容を有効に利用する方法を開発し、防災上欠くことのできない気象情報、社会活動や産業活動に役立つ気象情報等に反映させていくことが大切だと思います。

将来、客観解析や数値予報の格子点データが、より多くの利用者に提供され、社会活動や産業活動に有効に利用されるようになることを期待しています。数値予報には、予測誤差がありますが、将来の大気状態の定量的な予測結果です。予測誤差を考慮して利用していくことが大切です。

この解説が、数値予報の利用についての理解に少しでも役立てば幸いです。最後に、資料を提供して下さいった気象庁数値予報課と札幌管区气象台予報課の諸氏にお礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 気象庁予報部 (1987) : 気象資料総合処理システムの概要 測候時報 第54巻 第6号
- 気象庁予報部数値予報課 (1988) : 国際航空用悪天予想図について 測候時報 第55巻 第1号
- 竹村行雄 (1987) : 雨の短時間予報 天気 34
- 立平良三・保科正男 (1984) : 確率予報 気象研究ノート 第150号
- 二宮洗三 (1985) : 数値予報の現状と将来 気象 No.342