

2. GPSと天気予報

— 新しい数値予報システムのはなし —

札幌管区气象台技術部予報課 明石 秀平

はじめに

GPSはGlobal Positioning Systemの略で、全地球測位システムと呼ばれています。GPSが天気予報にも深く関わっているという話をとおして、現在開発中の新しい天気予報システムについて解説します。まず最初に、私たちを取り巻く大気中のさまざまな現象の姿と、それを予測する数値予報という技術について簡単におさらいしてから、GPSを登場させようと思います。それでは、基本となる天気の科学から始めましょう。

1 天気のすがた

階層構造 私たちのまわりの自然界には、さまざまな事物や現象が存在していますが、それらは無秩序に集まっているのではなく、一見単純に見える現象も、さまざまな大きさ(スケール)の物質や構造が

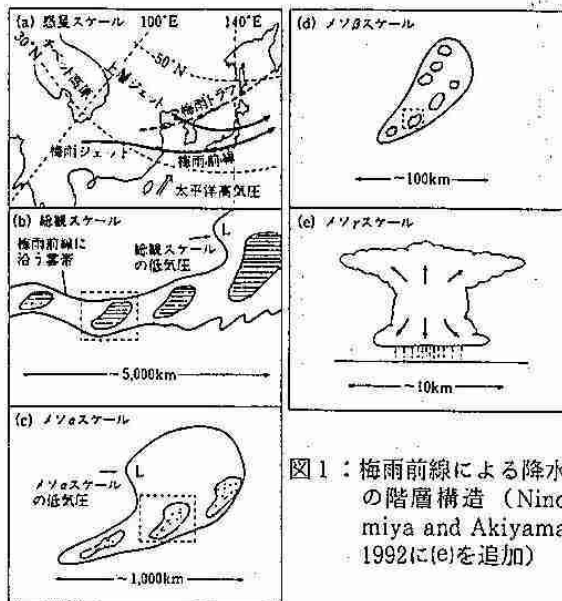


図1：梅雨前線による降水の階層構造 (Ninomiya and Akiyama, 1992に(e)を追加)

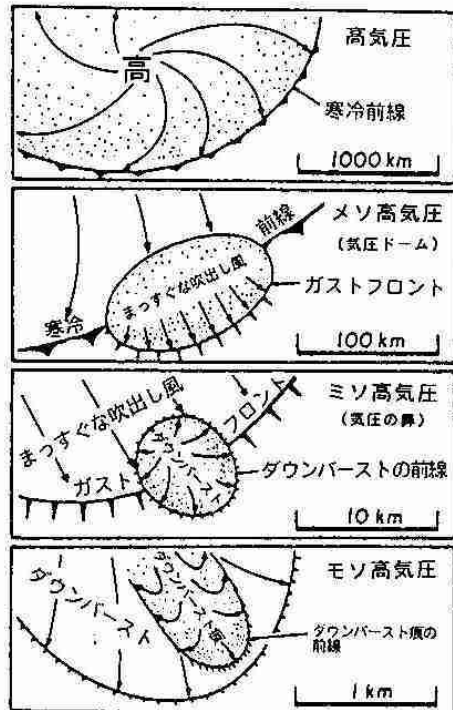


図2：ダウンバーストの階層構造 (Fujita,1981を和訳)

積み重なった結果として存在しています。その代表的な例は物質の基本構造で、今世紀に入ってから、(分子-)原子-素粒子-クォークのように、次々と究極の物質構造が明らかにされ、今も最先端の研究が続けられています。今回は天気予報のお話ですが、晴れ、曇りや雨・雪などの天気を決めている大気中の現象にも、階層構造があります。

図1は梅雨前線の例ですが、(a)の梅雨前線には、中国大陸から数千キロにわたって延びる(b)の雲バンドがあります。その中に、通常よりは小さな(c)の低気圧(メソ低気圧と呼びます。「メソ」とは「中間の」の意味です。)が隠れています。メソ低気圧は、ところどころに強い雨雲のかたまり(d)を持っていて、

最終的には一つ一つの積乱雲(e)が頭上にさしかかると雨になるわけです。

もう一つの例をあげると、図2は航空機事故の原因として解明されたダウンバースト(強い下降気流)の概念図です。一番上の図の高気圧は、ごく普通に見られる高気圧とほとんど同じで、中心から寒冷前線の方向へ吹き出す風は、おおよそ数m/s程度の風速です。寒冷前線の一部では、特に強い風(ガスト)が吹き出す場所があり、そのガストの前線でダウンバーストが発生します。この階層構造では、現象が小さくなればなるほど、風速が大きくなるという特徴があり、ダウンバーストの風速は台風やトルネード並の数10m/sにまで達し、航空機を墜落させたり、電柱をなぎ倒したりします。

現象のスケール これらの例で見たように、大気中にはさまざまなスケールの現象があり、大まかに分類すると、図3のようになります。この図では、縦軸に空間スケール、つまり現象の水平方向への広がりを取り、横軸には現象が継続する時間の長さをとってあります。これらの軸の目盛りは対数になっているので、通常とは違って一目盛り進むごとに距離や時間が10倍になることに注意してください。

この中でもっとも大きなスケールの現象は、最近、異常気象の原因として名指しされることの多い「エルニーニョ現象」です。簡単に言えば、太平洋赤道海域の海水温が高くなることで、地球上の各地の気象に影響するというものですが、1万キロ(赤道から北極までの距離)前後の広がり、1~2年にわたって続く現象です。

右から3番目の楕円に「高低気圧」が入っています。これが毎日の天気を基本的に支配する現象で、大きさは数千キロ、数日~1週間程度の寿命です。低気圧や、次の楕円に入っている前線が近づくと雨が降り出しますが、実際の雨雲である積乱雲は、さらに小さなスケールの現象です。雨降りが何時間も続いているようでも、一つ一つの雨雲は1キロ程度の大きさなので、雨の降り方は10分程度で変化することが多いのです。また、豪雨や暴風などの激しい天気は、これら小スケールの現象に伴って発生することが多いので、特に「メソスケール現象」と名づけて、それをいかに予想するかが、最近の予報の焦点となっています。

この図を見て、さまざまな現象がだいたい一直線上に並んでいることに気がつくでしょう。つまり、

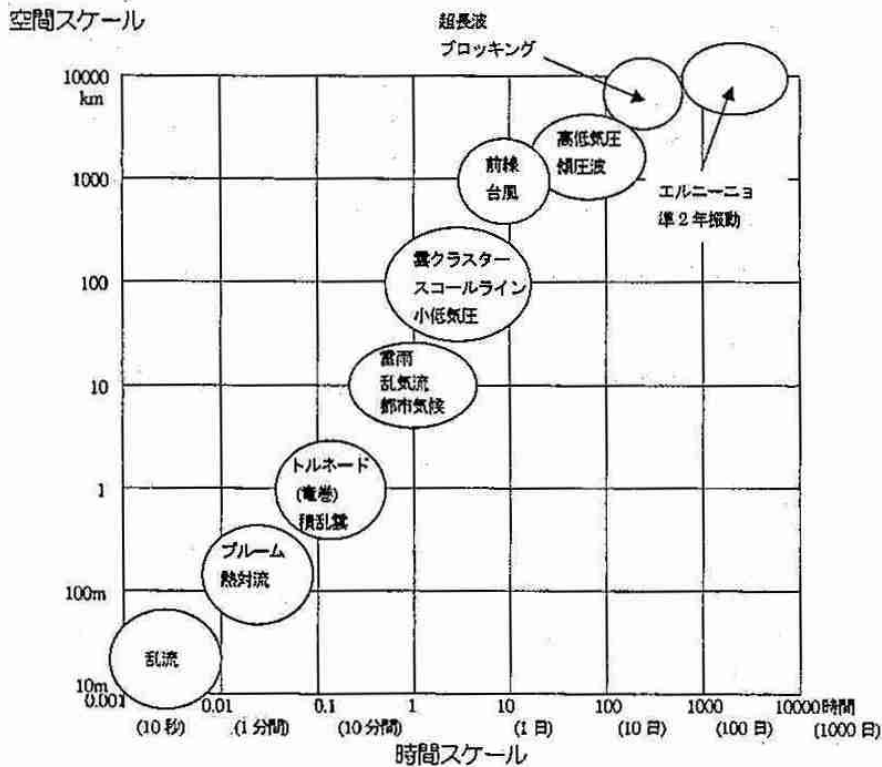


図3：大気中のさまざまな現象のスケール

空間的な広がりが大きな現象は寿命が長く、逆にローカルな現象は短命であるということです。不思議なことに、「大きくて短命」とか「小さくて長寿」という現象はまず無い、と言えます。また、図から直接はわかりませんが、これらの現象はそれぞれ独立に現れるわけではなく、それぞれがエネルギーをやりとりして、発生の原因・結果としても関係しあっていることも知られています。

2 数値天気予報

スーパーコンピューター 天気予報と言えば、どのようなイメージを持つでしょうか。「下駄を投げる」というのは冗談としても、「蛙が鳴く」とか「山に笠雲がかかる」(図4)と雨になるとか、天気ことわざが昔からあります。ことわざの中には、まったく根拠のないものもありますが、現在の知識で見直すと、科学的に納得できる因果関係を説明しているものもけっこうあります。



図4: 富士山にかかる笠雲の分類 (阿部正直, 1939)

次に連想するのは、天気図を前に考えをめぐらす予報官の姿でしょうか。20年から30年前は確かに、予報官個人の経験や「かん」がものをいっていました。天気現象をもたらす大気の物理法則を理解し、その地域と季節にふさわしい、どのような天気変化を考えられるか、それが予報官の仕事でした。

しかし、現代の天気予報はまったく別の姿です。数値(天気)予報という技術が天気予報の中心的役割を果たしています。電子計算機(スーパーコンピューター)を用いて、大気の振舞いを記述する運動方程式を計算し、その答えとして、天気分布と変化を一目でわかる形で出力してくれます(図5)。つ

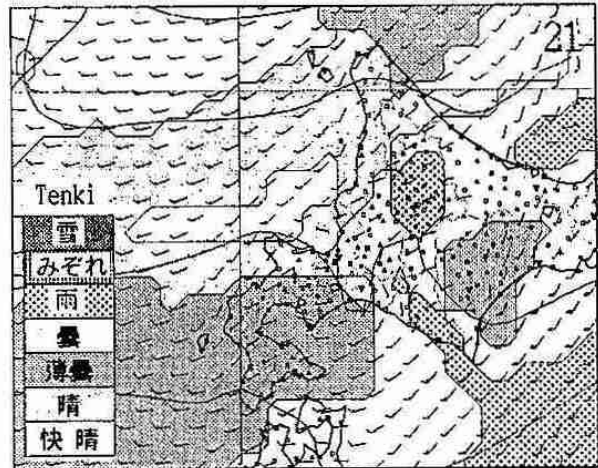


図5: コンピューターによる天気分布の予測例 (1999年6月16日の21時を予想)

まり、現代の天気予報は、物理学の法則に基づく大気現象の数値シミュレーションであると言って良いでしょう。現代の予報官は、数値予報の誤り(コンピューターも時々間違えるのです)を修正したり、数値予報が苦手な部分を補ったりして、適切な天気予報を発表するように仕事が変わってきました。そして、大雨や強風が予想されると、タイミング良く注意報や警報を発表し、自治体や警察・消防などと連携して災害の防止を目指すこと、それが予報官のもう一つの重要な仕事になっています。

数値予報モデル 数値予報では、大気の現在の状態を観測して、大気の流れ(運動や変化)を説明する数種の運動方程式にデータとして入力し、それを解いて、将来の大気の状態を予測します。その時に、計算しやすいように大気の状態をモデル化することから、「数値予報モデル」とよばれますが、具体的には図6のように、実際の地球に似せて、海や山を

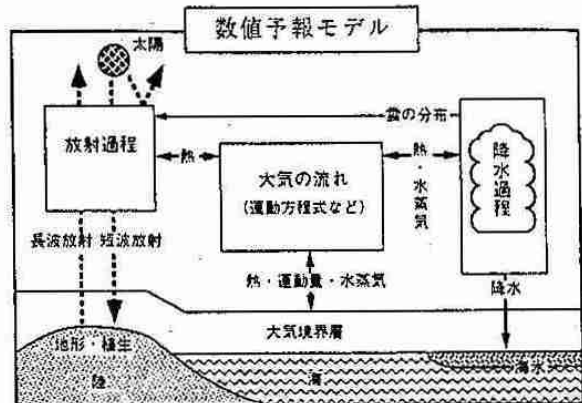


図6: 数値予報モデルの構成

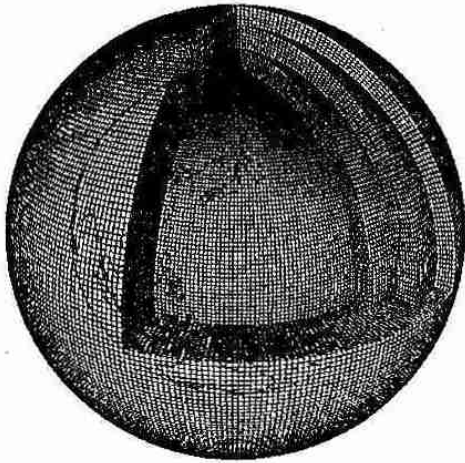


図7：数値予報に用いられる格子網の概念

作り、太陽からの熱、雲からの降水など、さまざまな現象をモデル化して、大気の運動や、熱エネルギーや物質のやり取りを計算します。

気象庁の「数値予報モデル」を紹介しましょう。代表的なモデルとしては、まず、全球モデル GSM (Global Spectral Model) があります。GSM は文字どおり地球全体が対象で、水平・垂直に規則正しく並んだ格子で地球を覆い(図7)、それぞれの点にデータを与えて、大気の状態を計算します。格子の間隔は約55km、地球全体で $640 \times 320 = 204,800$ 格子になります。垂直方向にも30層に分けているので、合計ではさらに30倍の約600万格子が一度の計算の対象となります。しかし、一回の計算で予想が完了するのではなく、数分間隔で少しずつ計算しながら予想を延ばしていきます。GSM は192時間

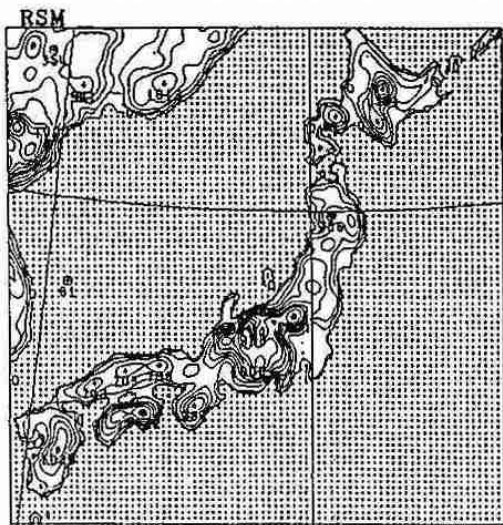


図8：RSM で表現している日本列島の地形

(8日先)まで予想するため、膨大なデータ量と計算量(計算時間)がかかり、数値予報のためにはいつもその時代の最新鋭の電子計算機が使われています。GSMの主な利用目的は週間天気予報と台風の進路予報などです。

もうひとつ、領域モデル RSM (Regional Spectral Model) があります。RSM は日本を中心とした東アジア領域が対象で、この範囲だけで水平格子間隔約20 km、 $257 \times 217 = 55,769$ 格子、鉛直方向には36層という細かな網の目で構成されています。主な用途は明後日までの天気予報ですが、天気分布予報や時系列予報などの新しい天気予報もこのモデルで作成しています。RSMの日本列島の地形は図8のようになります。北海道付近を見ると、大雪山系、日高山脈などの山地、渡島半島や知床半島が識別できる細かさです。先の図5の天気分布はRSMから計算したものです。

3 観測データ

観測システム 数値予報を支える技術の第一は、もちろん方程式を精度良く解いていく計算技法であり、スーパーコンピュータの能力であるのは間違いありません。それと同等かそれ以上重要と考えられるのが観測データ(の質と量)です。前章で、数値予報とは観測データをもとに、大気の将来ある姿を再現するシミュレーションだと述べましたが、もともとの観測データがどれだけ自然の有り様をとらえているかが非常に大切です。言い換えれば、観測データに予測を生み出す「種」が含まれていなければ、いくら精密に計算しても、「現象」は生まれてこないのです。

その観測データの現状を紹介します。図9の(a)は最もなじみ深い地上気象観測です。世界気象機関に加盟する世界中の国々の観測所で、毎日時刻を決めて一斉に、天気、風向・風速、気圧、気温、湿度、雲量、降水量などを観測しています。この図には5,000点以上の観測点が含まれています。次の(b)は、高層気象観測で、一日2~4回、測定器を下げた気球を揚げて、約30km上空までの気圧、気温や風などを測ります。観測点数は数分の1に減少しますが、3次元のデータが得られるため、数値予報にとっては、最も大切な観測データと言えます。この他に、

船舶や航空機、無人の海洋気象ブイによる観測なども行われています。

これらの地上気象と高層は地上からの観測のため、陸上や島に限られ、海上の観測点はごく少なくなります。陸上でも砂漠や極地方は観測点の密度が薄くなっています。地球全体を覆う数値予報の格子網にデータを与えるためには、なるべく地球上に均一に分布した観測データが欲しいので、気象衛星による観測が重要になります。図9の(c)は、米国のNOAA衛星の観測から得られた気温のデータで、基本的には海陸や緯度を問わず、均一なデータが得られます。日本の静止気象衛星「ひまわり」の観測も、気温や風、雲量、海面水温などのデータとして使われています。

これらのデータを組み合わせて、現在の数値予報の精度が達成されているわけです。

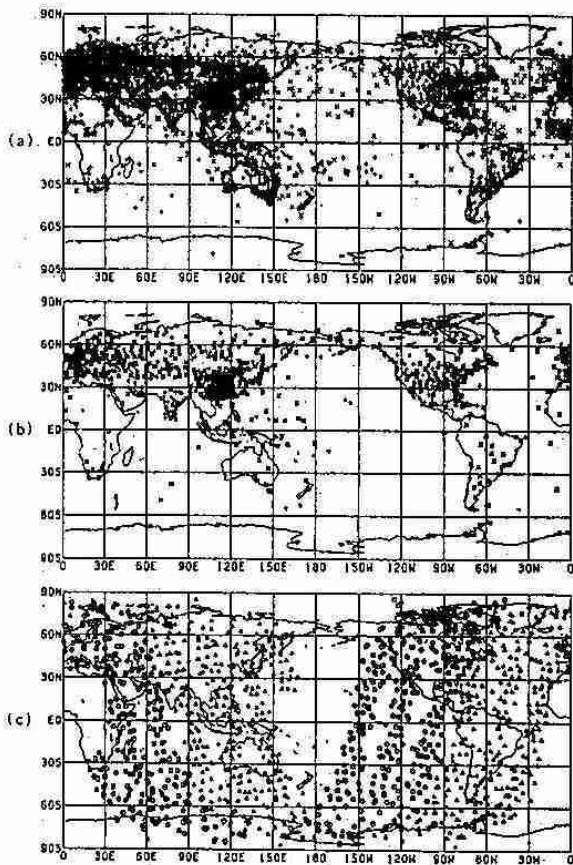


図9：数値予報に用いた観測データの分布
1992年11月30日の例
(a)地上気象観測 (b)高層気象観測
(c)気象衛星の観測

4 観測データとしてのGPS

MSM 気象庁はメソ数値予報モデル MSM (Mes oScaleModel) を開発し、現在試験運用中です。MSM はメソ気象現象を対象にして、天気予報の精度を高めながら、大雨や暴風などの気象災害にも的確に対応しようというモデルです。そのために水平格子間隔10kmと、現行RSMの倍に分解能を高めています。RSMより狭い範囲を対象に、1日4回の運用が計画されています。MSMの分解能がわかるように、図10には北海道領域の地形の表現をRSMと比べる形で示しました。かなり細かな地形が判別できて、例えば積丹半島や夕張山地などが分ります。羊蹄山を中心とした山々も見えそうです。

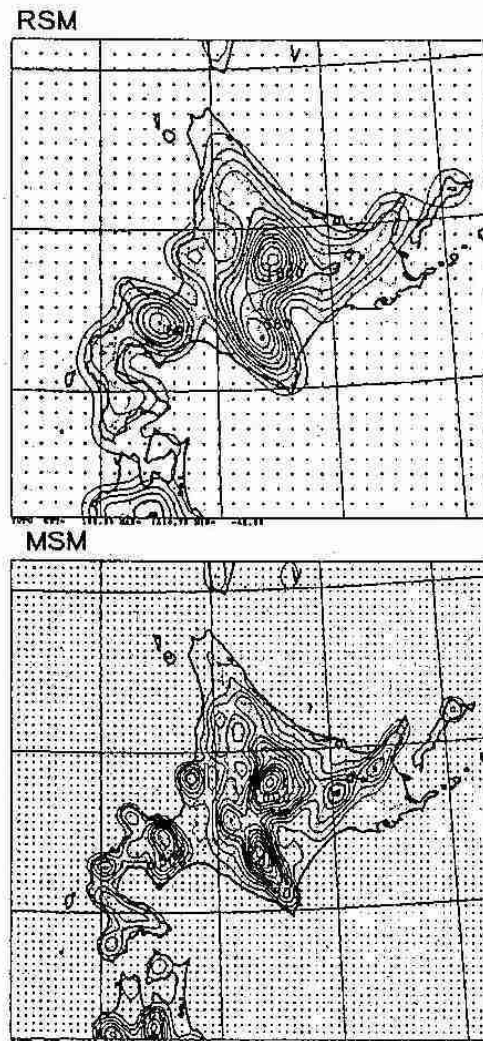


図10：RSM（上）と比較した MSM（下）の地形表現

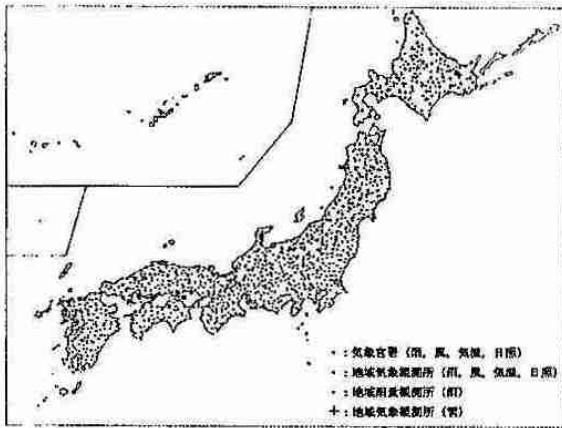


図11：気象庁のアメダス観測網

モデルの性能を高めた時に、次の問題は観測データです。前の節で見たような通常の観測網のデータは、空間的にも時間的にも粗すぎて、MSM が目標とするメソ現象がデータとして含まれていなかったということにもなりかねません。MSM には、まず、アメダスの観測 (図11) を使います。アメダスは地上だけの観測で、風・気温・日照時間・降水量に限られ、地点の間隔は20km程度で、やや物足りません。次に、レーダー観測のデータ (図12) もアメダスと組み合わせて、5 kmメッシュの降水量データとして入力します。しかし、まだまだ空間的に、時間的に細かな観測データを探する必要があります。GPS そこで、新しいモデルにはふさわしい新しいデータをという考え方が生まれ、いよいよ GPS の出番です。GPS、全地球測位システムは、米国によって開発・運用されている最新の測量、位置決定システムです。地上約2万キロの高さを周回する24個の衛星 (図13) のうち、4個以上の衛星からの電波を受信して、三角測量と同じ原理で、自分の現

在の位置を決定します。通信技術の発達によって小型の設備が実用化され、最近のカーナビゲーションでは主流のシステムになりました。

このデータが、最新の数値モデルのための観測データでもあるのです。その原理を説明しましょう。GPSは、衛星から観測点まで電波が伝わるのにかかる時間をもとに、衛星との距離を計算します。この距離計算の精度が大切です。カーナビで使うのなら、数十mぐらいの誤差があっても、ほとんど「使い物」になります。しかし、地震予知などを目的とした地殻変動を検出することも、GPSの大切な役目であり、この場合は数mmの精度で距離を決定しなければなりません。そのためには、衛星に搭載している時計の時刻を正確に補正することから始めて、衛星からの電波が通過してくる大気の影響を補正する必要があります。

大気の影響の中で最も大きいのは、水蒸気の量です (気象の分野では、水蒸気が全て雨に変わったと仮定して「可降水量」と呼びます)。電波の通り路で水蒸気が多いほど、地上へ到着する時刻は遅くなります。この関係を逆に応用すると、GPSのデータを解析して、大気の可降水量や気温を推定できることがわかってきました。

特に日本付近では、地殻変動を監視している国土地理院が、電子基準点 (図14) として日本全土に高密度のGPS観測網 (図15) を展開しているので、きめこまかなデータが得られる条件が世界一整っています。今までの高層観測では、せいぜい200~300 km間隔で1日2~4回しか算出できなかった可降水量が、10~20km間隔で、しかも10分ごとに算出できます。図16は日本列島を寒冷前線が通過したと

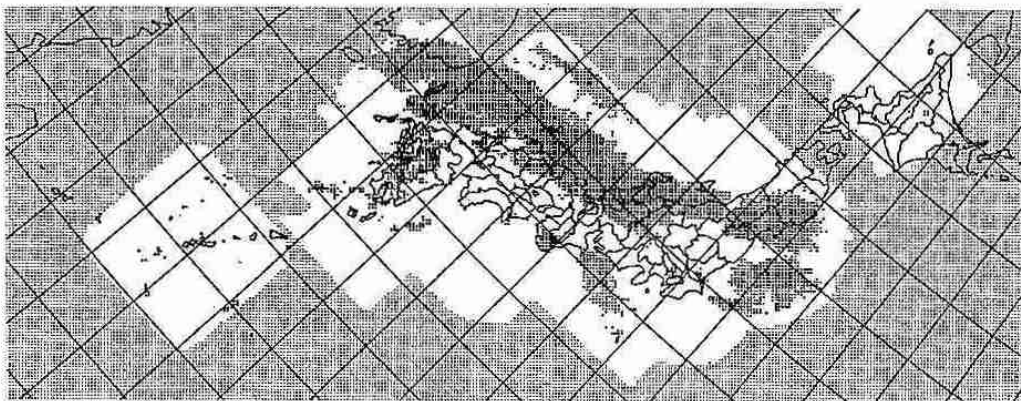


図12：気象庁レーダーの全国合成図

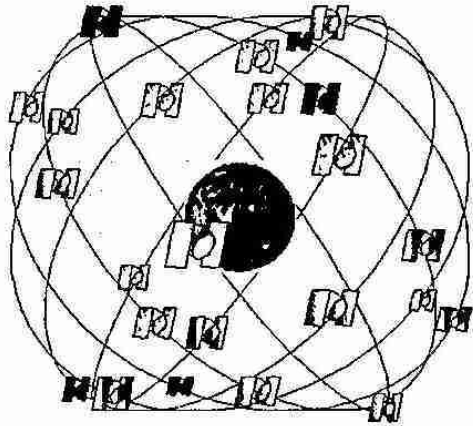


図13：GPS の衛星（東京商船大学のHPより）

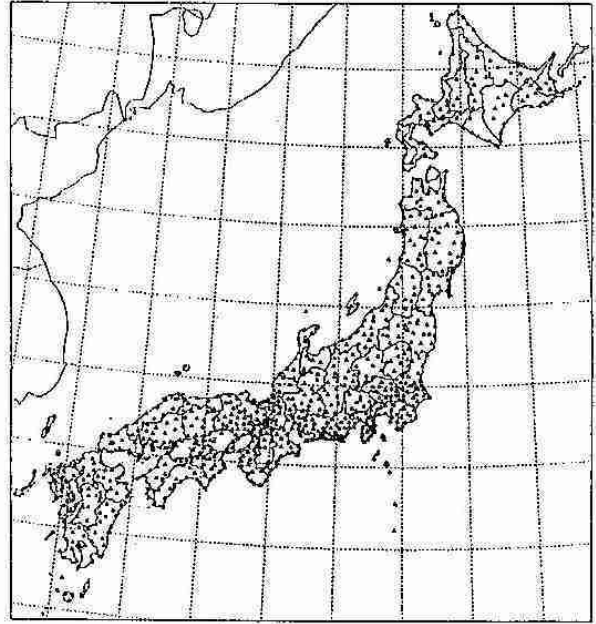
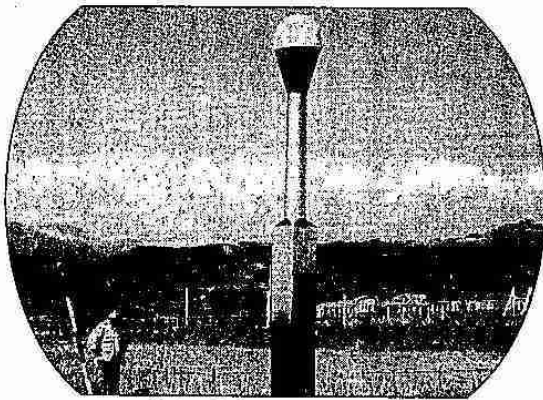


図15：国土地理院の全国GPS観測網（萬納寺信崇, 1998）



電子基準点 瀬棚町

図14：国土地理院の電子基準点（「国土地理院概要」より）

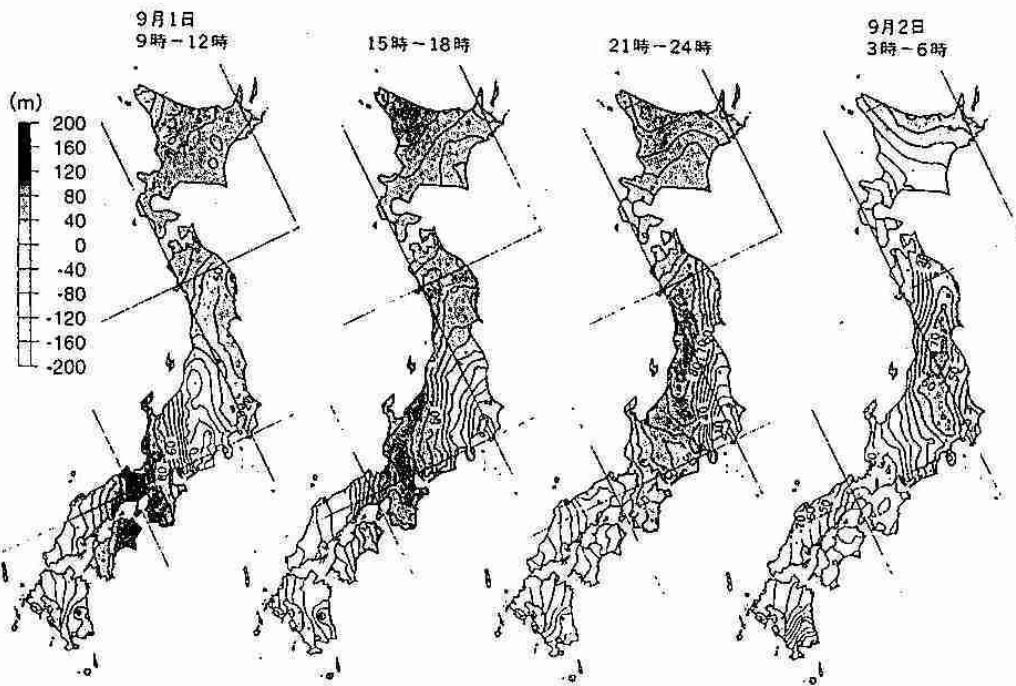


図16：GPS による前線通過時の可降水量の変化（岩淵他、1997）

きの、可降水量分布の変化を捉えたものです。湿った状態から乾いた状態へ移り変わる様子が、きめこまかく算出されています。

このように、もともとGPSは天気予報のためのシステムではないのですが、気象観測データとして

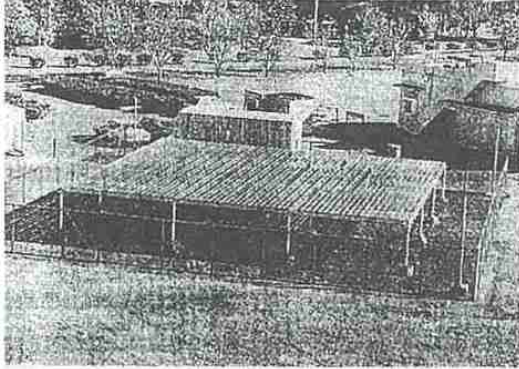


図17：ウィンドプロファイラーのアンテナ（気象研究所）

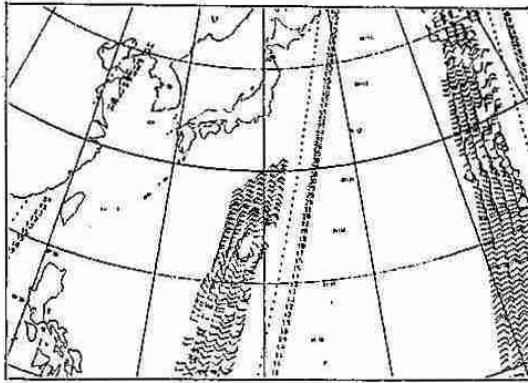


図18：ERS-1衛星による海上の風と波高の観測例

も非常に役に立つことが確認されました。この他にも、次のようなさまざまな観測データを使います。ドップラーレーダーやウィンドプロファイラー（図17）という新機能のレーダーによる観測データからは、地上の風や上空の風の細かな分布が提供されます。航空機に搭載して自動的に気温や風を観測し、通報するACARSというシステム。ADEOS（日本）やDSMP（米国）、ERS（欧州）などの地球観測衛星のデータ（図18）も、風や可降水量のデータとして使う計画です。図19はこれらのデータを、最初に見た現象のスケール図の形で整理したものです。このようなデータの利用は、日本だけではなく、米国でも新型の統合観測システムという構想（図20）が進められています。

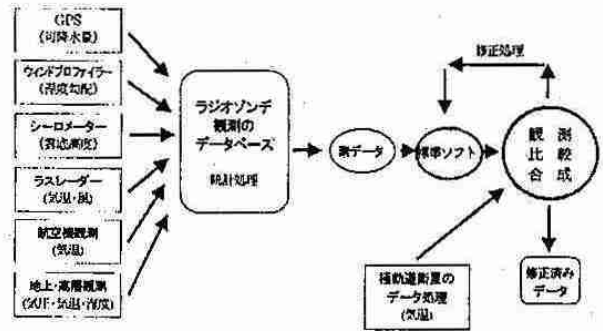


図20：米国海洋大気庁の新観測データ利用システム (Stankov, 1998を和訳)

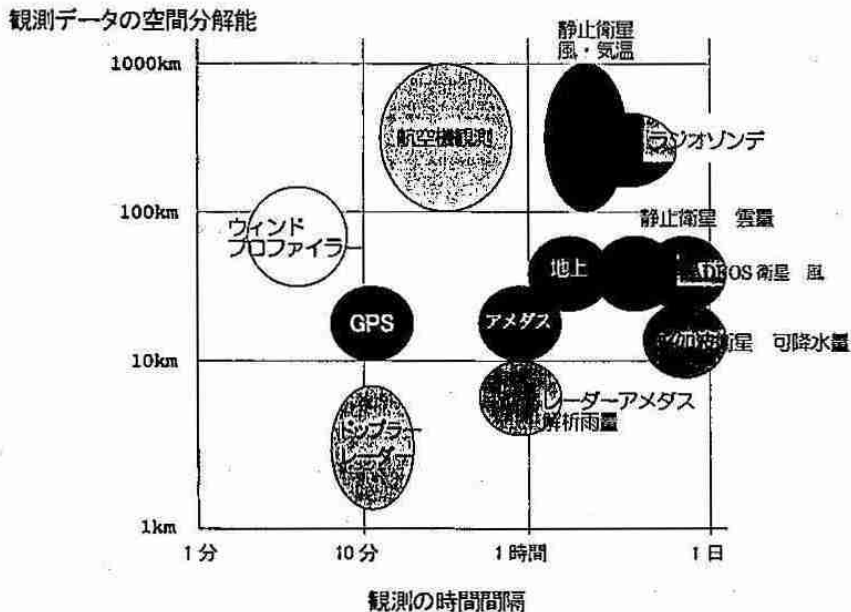


図19：新しい観測データのスケールによる分類（平、1993 を改変）

5 天気予報の将来

天気予報の将来 前章で説明したメソモデルの試験結果を紹介しましょう。図21は北海道の風の予報を、MSMとRSMで比めたものですが、MSMのほうが日高山脈でせき止められる地上の風の分布をより実際に近い形で予想しています。この他に強雨域の予想での改善にもMSMの有効性が確かめられています。一方、地球全体を相手にして、長期的な気候の振舞いを予測する分野のモデルも発展しつつあり、地球を環境システムとして監視するためにも使われるようになってきました。

このような変化の中で、予報官が関わって発表する天気予報も、数値予報などの精度にふさわしいありかたに変わって行こうとしています。当面の方向としては、毎日の天気予報は、言葉や文章の上ではなるべく簡潔に表すようにしながら、細かく天気の見通しを伝えることができる時系列予報などでは、さらに精度を高め、予報項目も増やす計画です。そしてメソモデルを駆使して、防災のための局地現象の予想にも全力をあげることが、21世紀初めの予報官の仕事になると考えられています。天気予報に加えて、防災情報のプロフェッショナルとしての予報官の姿です。

予報とカオス ヒット映画「ジュラシックパーク」の原作者であるマイケル・クライトン氏はかつて新聞のインタビューに答えて、「現代人は中世の錬金術師を笑うが、同様に、次の世紀の人たちは完全な気象予測をしようと努力している現代人を笑うだろう。」と話しました。クライトン氏が言うように、

かつて、数値予報モデルをどんどん精密化し、分解能を上げれば、予報の精度は着実に向上するという考え方が支配的であった時期がありました。しかし、20年ぐらい前から、カオス（混沌）という理論が確立し、決定論的な天気予報の考え方は修正を迫られました。

「バタフライ（蝶々）効果」という言葉があります。地球上のどこかで蝶が羽ばたいただけで、その空気の動きが拡大して伝搬し、別の場所の天気を変えてしまうという意味です。やや荒唐無稽な誇張したたとえですが、実際、大気はその振る舞いを決して完全には予測できない、カオスという性質を持っています。それに加えて、気象観測には、ある程度の観測誤差が避けられません。誤差を含んだ観測データから出発したモデルの予想結果も、カオス的な性質を持ってしまいます。例えば図22は計算の初期値に少しずつ誤差を与えたときの気温予想の変化

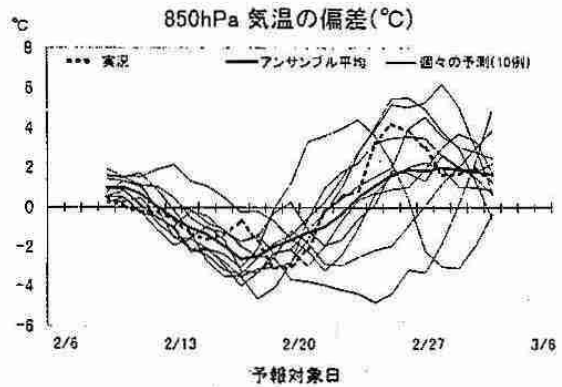


図22：アンサンブル予報の実例 1997年2月6日のデータによる向こう1か月間の気温予想 誤差を与えた10例のグラフと、その平均、及び実況

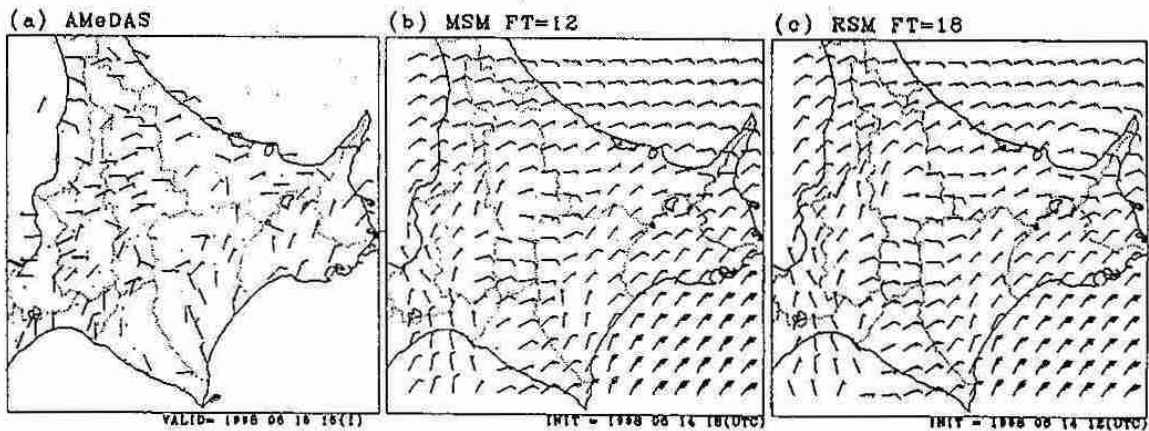


図21：MSMによる北海道付近の地上風の予報 (a)アメダスによる実況 (b)MSMの予想 (c)RSMによる予想

(これら一群の予想結果をアンサンブル—仏語で全体、合奏など—と言っています。)を示しています。初めに与えた変化はごく少なくとも、予想を続けていくと、まるで正反対の予想結果が得られることがわかります。

最近では、アンサンブル予報を使い、モデルの予想のばらつき具合を精度として示すことも、週間天気予報や1カ月予報で試みられています。同じ予報文でも、ばらつき具合が小さいときはかなり確実で、逆にアンサンブルがばらついている時は、ちょっと自信がない予報というように、信頼度を付け加えた天気予報になります。近い将来は、ごく短い期間の予報でも、アンサンブル的な性質を利用する可能性があります。

予報の適中率 図23は戦後約50年間の天気予報の適中率の変化です。70%ちょっとからスタートした予報の成績は、年ごとの変化では紆余曲折があるものの、長い目で見ると徐々に向上し、85%近い高得点を得るまでになってきました。この背景には、大気現象を理解して当たる予報を目指してきた予報官の努力の積み重ねと、これまで見てきた数値予報の改良を進めたことの両方があります。今後もMSMのようなメソモデルと、GPSに代表される新しいコンセプトの観測データを利用して精度向上の努力は続けられるでしょう。

ただし、言葉でいうほど簡単な仕事ではありません。たとえ首尾良く成果があらわれたとしても、10

年間ほどかかって数%の適中率向上があれば御の字というのが、現代の天気予報の世界なのです。

参考図書 (さらに天気予報を知りたい方へ)

- 岩崎俊樹：数値予報、共立出版 (1993)
- 大川隆：北海道の動気候、北大図書刊行会 (1992)
- 小倉義光：お天気科学、森北出版 (1994)
- 気象衛星センター監修：「ひまわり」で見る四季の気象、大蔵省印刷局 (1993)
- 気象庁編：今日の気象業務—守ります 人と自然と—この地球一、大蔵省印刷局 (1999、毎年発行)
- 白木正規：百万人の天気教室、成山堂書店 (1995)
- 二宮洗三、新田尚、山岸米二郎編：図解 気象の大百科、オーム社 (1997)
- 古川武彦：わかりやすい天気予報の知識と技術、オーム社 (1998)
- NHK放送文化研究所：改訂NHK気象ハンドブック、NHK出版 (1996)

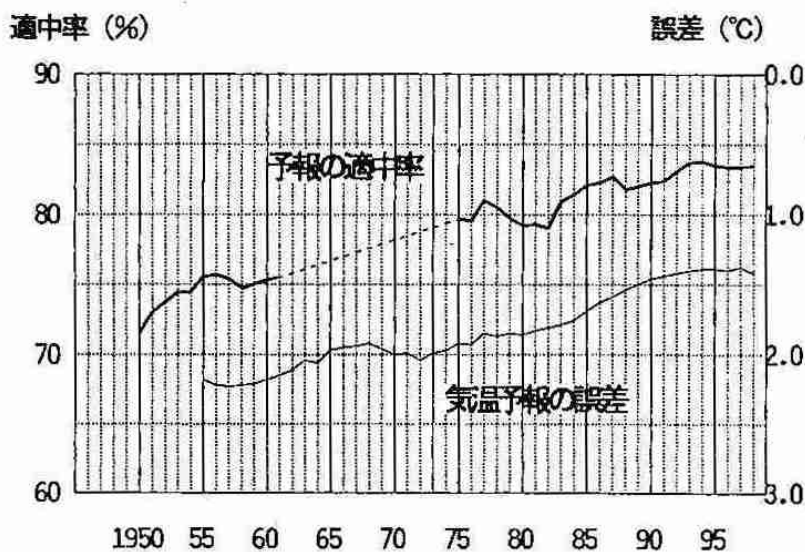


図23：天気予報の精度（東京地方） 点線部分は資料が欠けている