

我国の数値予報システムの現状 (1) 概要*

木 田 秀 次**

1. はじめに

今年の3月、気象庁における数値予報30周年を迎えて、関係者による記念パーティが催された。時あたかも気象庁の数値予報が、全球モデルの大幅改訂で世界最高のレベルに達した直後でもあり、出席者の感慨にも格別のものであった。今日の数値短期予報の成功は、気象学発展の一つの帰結である。と同時に、次なる大きな目標に向けて新たな一歩が始まったとも言える。

この30年間の数値予報の技術的進歩の大きさゆえに、現在、気象庁において数値予報がどのように行われているか分りにくくなっている、という学会員が少なくないようである。そういう声に応えるべく、ここに現行数値予報のあらましを紹介することになった。本稿はその解説シリーズの最初に位置するもので、概要のみを紹介し、次号以下、第一線の担当者によって現行数値予報の実情などが紹介される。それらが、気象庁の数値予報の現状を知って頂く手がかりになれば幸いである。

なお、本稿は、筆者が書いた気象庁初任者研修のための解説と30周年記念文集第2章とを合わせ且つ少し書き改めたものである。そのため、次の2章と3章は、数値予報について初めてという人が対象であるので、既に数値予報の原理など良く御存知の読者は、4章までスキップして頂いて差し支えない。

2. 数値予報とは何か

天気予報するにはどうすれば良いか。それこそ大昔から人間は、なんとか天気予報ができないものか、と思いつけて来たに違いない。そして、長年の経験から、天気にもある程度の規則性・系統性のあることに気が付き、それを天気予報に結びつけようとした。その一つが、天気の先駆現象に注目することである。例えば、夕焼け

があれば翌日は晴れる、という経験則はその代表的なものである。こういう方法による天気予報は観天望気と呼ばれ、短時間先の予報や特定の地域の予報など状況によっては便利で有効である。とは言え、観天望気は、時として主観に片よりすぎる恐れがあり、天気予報としての精度という点でも必ずしも十分とはいえず、2日後3日後などの天気予報となると大変難しい。

そういう観天望気の方法をのり越えるものとして、広い範囲での天気を把握しその動向を調べて天気を予報する方法が19世紀の後半にヨーロッパで始まった。すなわち、天気図の登場である。これは、天気を見るのに、それまでの肉眼だけで見ていたのとは異なり、天気のパターンを見るという新しい目を人間が持つようになったことを意味する。その結果、天気は移動するということが発見した。天気図を描くことによって天気の移動が予想できれば、それは天気予報にとって貴重な情報になることは言うまでもない。こうして観天望気にかわる近代的な天気予報の方法が成立した。これは総観的天気予報法と呼ばれ、現在でも役立っている。

しかしながら、天気は複雑に変化する。そのため、天気のパターンの移動という見方だけでは天気予報の精度には限界がある。それではどの様に天気のパターンは変化するかとなると、実はそれが予報として最も難しい問題である。なぜなら、その変化を予報するには天気の変化の仕組(メカニズム)がしっかりと分かっている必要はないからである。観天望気や総観的予報法では、経験則に基づき天気の変化も予想するのであるが、その経験則自体があまり確たるものでないから、その天気予報の精度も低くならざるを得ない。それでは、何時何如なる天気の変化でも経験則にたよらず予報できるためには、一体どうすればよいのか。

これまでは天気予報のためにということで、天気という概念に気をとられすぎていたきらいがある。そのせいで、天気の特徴にばかり目が行き、観天望气的に天気を見、あるいは天気のパターンを見て来たようである。し

* The current status of numerical weather prediction system in Japan (1) Outline.

** Hideji Kida, 気象庁数値予報課 (現所属・気象研究所).

かし、あらゆる天気を扱うためには、天気らしくない天気つまり明確に概念化されていない天気も含まれるべきであるから、天気という概念にこだわらずそれをいったん捨てることから始める必要がある。天気という形で大気中の気象現象を見ないとすれば、大気の状態は、物理的状态つまり気圧が980 mb、風速が8 m/s、気温が25度といったような気象の要素で表されるだけのものになる。

この様に天気という概念やそれに関する経験則をいったん無視し、天気を物理的要素のレベルで把握し、その要素の変化を予報して、予報された要素をもう一度元の天気という概念に組み立て直すというやり方で、天気を予報する方法がある。これが、数値天気予報あるいは単に数値予報と呼ばれる天気予報法である。気象庁での現在の天気予報はこの数値予報法が基礎になっている。

天気現象を天気という概念でとらえず、物理的要素に分解すると、いかなる天気もそれら要素の組合せの一つとしてとらえることができる。例えば、曇りという天気なら大気中の微小水滴の含有量の如何として記述できる。そして、その大気中の微小水滴量が増加するか減少するかは、その場所での水蒸気の含有量や気温・気圧などが関係して来る。一方、水蒸気量の時間的变化は、その場に水蒸気が流入してくるか流出するかなど水蒸気の輸送の状況に影響される。また気温の変化には種々の効果が影響する。このようにして、気象の各要素は互いに複雑に影響し合いながら変化する。しかし、各要素の間で生じる影響の仕方は、幸いにも物理学の基本法則で定量的にとらえられるものである。このように考え、それらの法則を数式化し、その計算を実行して、気象要素の将来の状態を予測するのが「数値予報」という方法である。

気象の要素の中で特に重要なものは、気温、風（風向、風速）、気圧、湿度、水滴量、日射量などである。言うまでもなく、これらの要素は物理量として客観的に計測可能であり、物理学的な記述が可能である。例えば、気温の変化については熱力学の第1法則が関係し、風の変化についてはニュートンの運動の法則が関係し、気圧の変化については空気の質量保存則が関係する。また、それら物理量は互いに気体の状態式（つまりボイル・シャルルの法則）で関係し合っている。すなわち、これら気象要素に関係している物理的法則は全て分かっており、その基礎は非常に明確である。その意味で、数値予報は客観的であり、以前の観天望気や総観的予報のよう

に（人間の経験に基づく判断という）主観が入らないという長所がある。

参考のために、数値予報に関する主な物理法則と気象要素との関係に触れておこう。それらの関係を数式で表したものは数値予報のための基礎方程式とか支配方程式とか呼ばれる。その原理から言って、それらは普遍的（世界共通）である。ただし、どのような天気を予報の対象にするかによっては、物理法則の一部を変形したり簡略化して扱うこともある。そのため数値予報のための基礎方程式に多少の違いが生じ得る。気象庁の数値予報では、プリミティブ方程式系と呼ばれている関係式を基礎方程式として使っている。これは、世界的に広く使われているものである。この方程式の基になる考え方を極く簡略に概念的にのみ説明しておこう。

まず、風についてであるが、これは風速と風向とで表現されるので、ベクトル（矢印）で表し、 V と書く。ある場所を通過する空気塊の V の時間変化は、ニュートンの運動の法則により、その空気塊に作用している力の（単位質量当りの）合力に比例するので、

$$(V \text{の時間変化}) = (\text{合力})$$

と表せる。右辺の合力の中身は、気圧（の傾度力）や転向力（コリオリの力）、重力、摩擦力などがある。転向力は地球自転の効果で生じる力である。気圧傾度力は気圧の分布、また転向力と摩擦力は風の分布が、おのおの分からないと計算できない。

次に、同じく気温 T の時間変化は、熱力学の第1法則（エネルギーの保存則）と気体の状態式との二つの法則が関わり、

$$(T \text{の時間変化}) = (\text{加熱} \cdot \text{放熱})$$

$$+ (\text{空気の膨張} \cdot \text{圧縮の効果})$$

のように表せる。右辺の第一項は、放射（日射や赤外線）や水蒸気（凝結・蒸発）、あるいは地表面での熱交換などによる大気の加熱・冷却を含む。第二項は、加熱の有無とは全く無関係に起こる気温の変化であるので、断熱過程と呼ばれている。それで第一項の方を非断熱過程という。現実の大気中ではそれらの二つの過程が同時に起って気温が変化する。従って、数値予報はそれらの過程を一々計算しなければならない。

さて、気圧についてであるが、プリミティブ方程式系では静力学の仮定と呼ばれる近似法則が使われる。その法則は、「ある場所での気圧はその場所に乗っかっている空気の重量（単位面積当り）に等しい」ということである。気圧の正確な定義からはこの様には言えないので

あるが、現実にはほぼ成り立つ経験則として極めて便利な近似法則である。この仮定と空気質量の保存則とから、気圧Pの時間変化は

$$(Pの時間変化) = (空気の発散 \cdot 収斂)$$

として簡単に表現できる。すなわち、空気柱において総計として空気が発散し少なくなりつつある所では気圧Pは下降するし、逆に収斂するところでは気圧は上がる。数値予報では、各高度における風の水平分布から空気の発散や収斂を計算する。

その他の気象要素も同様にして、それらの時間変化は物理の基本法則に基づいて記述される。上では、特に具体的に数式化されたものは示されていないが、その数式は偏微分方程式の形になる。それを如何にして解くかが次の問題になるが、解き方には大別して二種類ある。一つはグリッド法であり、他の一つはスペクトル法である。いずれの方法も元の偏微分方程式の近似解法であって、厳密な解を得るものではない。すなわち、誤差がある。しかし、その誤差の程度は近似解法の精度を高めることによって少なくできる。

ところで、上の物理法則の関係を見ても分かる通り、右辺は全て、ある時点における大気の状態がどうであるかを表している。従って、その右辺を記述するには全ての場所での大気の状態が分かっているといけませんが、上述のごとく、それは近似的にしか表現できず、そのため誤差が避けられない。それとは別に、我々は大気の実況を知るために観測をするわけであるが、それには必ず観測誤差が伴う。この様に、上の式の右辺には計算上の誤差と観測技術上の誤差とが含まれる。これら二つの誤差が数値天気予報の誤差のもとになる。数値予報の関係者たちは、これらの誤差を少しでも少なくして天気予報の精度を上げる努力をしている。

3. 数値予報モデルとは

数値予報の原理は、前節で述べたように、大気の状態を主な気象要素で記述し、それらの要素の時間変化を物理の基本法則にのっとり定量的に求めるものである。さて話をもう少し先へ進める。大気の状態を完全に把握するには、全ての場所で各気象要素の値が分からなければならない。しかし、現実にはそれは不可能なので、なるべく多数の場所での値が分かればそれでよし、とするほかない。そのための格子点の配置については、なるべく偏りのない均質な分布がよい(ただし鉛直方向については大気の密度成層や境界層などを考慮して格子点は下層

ほど密になるように取る)。そのように考えて、大気全体を3次的に分布する格子網で覆う。そして、その各格子点において気象要素の値が分かるものとする。別の言い方をすると、それら格子点以外の場所(空間)の状態は何も分からないということになるが、格子点での値はその格子点のまわりの状態を代表しているとも考えることもできる。気象庁での数値予報に使われている格子網には二種類あって、一つは、全球予報モデルの場合で、地球全体の大気を扱うので緯線と経線の交点として水平方向の2次元の格子網をつくり、それを鉛直方向に大体同じ程度の高度間隔で何重にもかさねて3次元の格子網にする。二つは、アジアや日本域、台風予報モデルなどの場合で、これらはある特定の領域の大気だけを扱うので緯線・経線に必ずしもとらわれる必要がなく、ポーラステレオ法などの地図上における直交線の交点として水平方向の格子網をつくる。鉛直方向については、全球の場合と同じようにとる(ただし、高度のレベルの取り方については全球モデルの場合と違い得る)。この様な格子網は、格子点の数が多ければ多いほど大気の状態を詳しく表現できることは言うまでもない。

以上の様に大気を3次元の格子網で覆い、それらの各格子点における大気の状態(気象要素)が分かるとすると、大気の状態は各格子点の気象要素の数値に変換して把握された(あるいは記述された)と考えることができる。すなわち、大気の状態という物理的実体は数値として抽象化されて表される。その数値の集まりはいつでも元の大気の状態に翻訳できる。とすれば、物理的実体としての本当の大気とは別に、数値として抽象化された形の仮想的なもう一つの大気が存在すると考えることもできる。後者のような仮の大気は「数値大気」と呼ばれる。

数値大気は、有限の数の格子点上で記述されるが、それら格子点上の気象要素は、本当の大気の場合と同じ物理学の基本法則によって支配されていると考える。つまり、数値大気の基礎方程式も(前述の)プリミティブ方程式であると仮定できる。しかしながら、それは、偏微分方程式で表されているので、例えばグリッド法による数値大気の場合のような不連続な格子点上の気象要素を扱う場合には適当でない。それで、その関係式のもつ性質がそのまま保有されかつ格子点上の数値に対して適用可能な別の形の関係式が必要になる。そのような数値大気に適した形に変形した数式は差分式と呼ばれる。こうして、グリッド法の数値大気の基礎方程式は「プリミティブ方程式の差分式」ということになる。

一方、スペクトル法と呼ばれる方法では、上記のグリッド法のように格子点上の数値を各格子点毎に捉らえるのではなく、まず数値大気はスペクトル(波長)で構成されていると考え、そのスペクトルの寄与の和として各格子点上の数値を捉らえる。スペクトル法による数値大気は、上で述べたような実空間における有限個の格子点で表現されるのではなく、スペクトル空間における有限個のスペクトル(の位相と振幅と)で表現される。この意味で、スペクトル法の数値大気は実空間においては連続であり、格子網のように飛び飛びの場所では数値が存在しないといった不連続大気ではない。その代わりに、スペクトル空間では飛び飛びの不連続なスペクトルしか存在しないのである。この様に、グリッド法とスペクトル法とでは数値大気と言っても差異がある。しかし、いずれの方法による数値大気でも精度が十分に高い場合には、見かけの違いこそあれ元の実体としての天気へ翻訳したときには実質上ほとんど同じになる。気象庁の数値予報は、スペクトル法による数値大気モデルが使用されている。次に、それらのモデルについて特徴などを紹介する。

4. 気象庁の数値予報モデル

4.1 全球予報モデル(GSM)

何日も先まで天気を予報するには、地球規模の広がりで大気の状態を把握する必要がある。なぜなら、遠く離れた所での大気の状態が日本付近の数日後の天気に影響を与え得るからである。その点、今日明日の天気については何千キロも離れた所の大気の状態に影響されるということはない。数値予報の精度が向上し、より先の天気予報が望まれるようになるにつれ数値予報に必要な情報(大気の状態)の範囲が広域化して、現在では週間予報を行うために地球全域を対象としなければならない様になっている。それに対応するために、気象庁では全球予報モデルが開発され、1987年12月16日からルーチン用として稼働している。このモデルの前には北半球だけを対象にしたモデルが使われていた。半球から全球に拡張されたことで8日先までの数値予報が毎日実行されるようになり、週間予報の精度向上に貢献している。1988年3月1日に分解能が向上され、これに伴い数値予報の先進国の仲間に入った。そして、約1年半後の1989年11月14日には大幅に改良された現行の**全球予報モデル**に切り換えられ、世界最高のレベルに達している(第1表参照)。

第1表 全球予報モデル(GSM)の仕様

予報領域	全球
計算法	スペクトル法
水平解像度	三角形切断 T106 (格子間隔~110 km)
鉛直解像度	21層
鉛直のレベルの気圧*	995, 980, 955, 920, 875, 820, 756, 685, 607, 526, 444, 365, 292, 228, 174, 130, 97, 71, 50, 29, 10
初期化	全物理過程を含む 鉛直全モード(21モード)
物理過程	
降水過程	大規模凝結
積雲対流	Kuo 方式, 浅い積雲対流
境界層	クロージャ・モデル(L2)
短波放射	分子・雲水・地面の多重散乱, オゾン, 水蒸気, 雲水の吸収
長波放射	バンド・モデル 吸収物質(オゾン, 水蒸気, ダイマー, 二酸化炭素)
雲量	相対湿度の2次関数
陸面温度	植生モデル(Sib)
接地境界	Louis のスキーム
重力波抵抗	山岳波の造波抵抗
予報期間	3日(毎日, 00 Z) 8日(毎日, 12 Z) 15日(毎月3回)

* 地上気圧を 1000 mb とする。

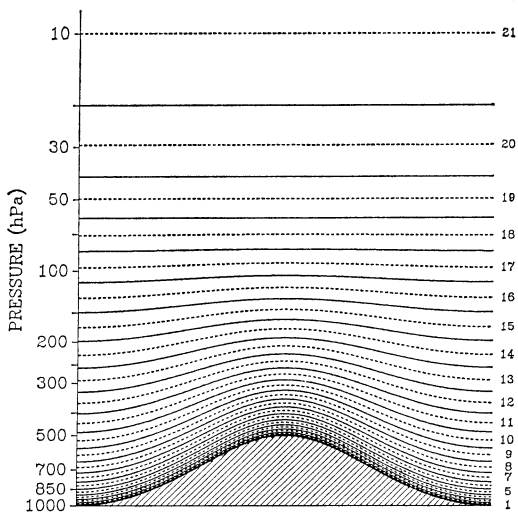
全球予報モデルは、既に述べたごとく、スペクトル法に基づいて作成されているので Global Spectral Model (GSM) と名付けられている。このモデルの基礎方程式はプリミティブ方程式で、鉛直方向の座標系としては気圧・シグマ混合系と呼ばれる鉛直座標系が使われている(第1図参照)。8日予報やさらに先の延長予報になると、今度は、鉛直方向の広い範囲の大気の影響するようになるので、成層圏の上部の状態まで勘定に入れて予報する必要が出て来る。気圧・シグマ混合系の鉛直座標系

第2表 アジア域予報モデル（ASM）の仕様

計算法	スペクトル法 (2重フーリエ級数)
格子間隔	75 km の変換格子 (ポーラーステレオ 60°N)
格子の数と波	変換格子 129 * 109 最大波数 83 * 70
鉛直の層数	16
鉛直の層	995, 980, 950, 900, 830, 750, 670, 590, 510, 430, 350, 270, 195, 130, 75, 25
時間差分	セミ・イムプリシット
初期化	非線型ノーマル・モード インCREMENT法
初期値	アジア太平洋解析 150 km
境界値	GSM の予報値
物理過程	
放射	GSM に同じ
重力波抵抗	GSM に同じ
降水過程	大規模凝結 湿潤対流調節 雨滴の蒸発
雲量	GSM に同じ
海面水温	毎日の解析値
海水分布	月ごとの気候値
地表面温度	地中の3レベルの地温を予想
境界層	クロージャ・モデル (L2) Louis のスキーム

なお、留意すべきことであるが、スペクトル・モデルの場合、その分解能の表現は、最小波長で表すか格子点間隔Dで表すかによって違いがある。すなわち、最小波長の波を確かにその波長の波として格子点で表現するには（つまり、いわゆるエリアシングを防ぐためには）、DがLの約1/3以下でなくてはならない。GSMの場合にはLが350 kmで、Dが110 kmである。予報に必要な物理過程の情報は格子点毎に決定（計算）されるので、Dをもってモデルの最小スケールということも可能だが、物理的現象としての最小スケールは、Lである。

GSMでは、大気加熱・冷却をもたらす放射過程や水蒸気の凝結・蒸発、地表での熱交換など、大気の運動

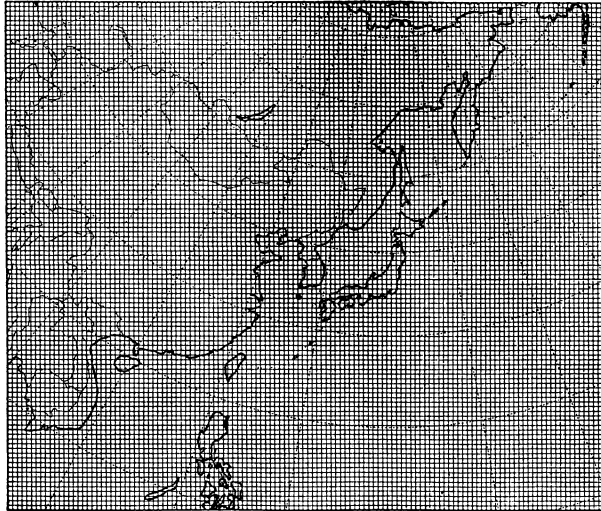


T106 L21 GSM HYBRID VERTICAL COORDINATE

第1図 全球予報モデル（GSM）の鉛直レベルの配置

はその様な成層圏の状態をより良く表現するのに効果的である。なお、ここでシグマ系とは、大気鉛直方向の座標の一種で、その上端から地表面までの大気に対して地表気圧を単位として各高度の気圧を目盛ったものである。従って、平野でも山上でも、地表面では必ずシグマ座標は1になり、大気の上端では0になる。

さて、GSMの最新のモデルは、スペクトルの波数が106である。今何かの気象要素を考えると、その値が東西方向に変化するとしよう。緯線に沿って地球を一周した時その変化の凹凸の具合をsin関数とみなしてその波の数がn個あれば、それを波数nのスペクトル成分と呼ぶ。すなわち、波数nが大きいかほどその気象要素の水平方向の変化の規模が小さいことを意味する。従って、気象庁のGSMは地球一周の長さに対して106回の凹凸が表現できることになるが、それを波長で考えると約350 kmである。スペクトル・モデルは、実は（計算の都合上）グリッド・モデルの場合のような格子網を併用しており、その格子の水平間隔はスペクトル成分の最短波長の約3分の1つまり約110 kmである。これが、スペクトル数値大気学の最小の水平スケールになる。すなわち、地球表面全体がほぼ均等に約110 km間隔の格子点で覆われていることに相当する。このGSMは、1990年現在、世界的に最も分解能の細かい業務用全球予報モデルである。



第2図 アジア域予報モデル (ASM) の範囲と水平格子網。

(風)のエネルギー源が詳しく扱われている。特に、陸地面では植生が熱や水蒸気の交換に複雑な影響を与えているが、気象庁のGSMはその過程を世界で最も進んだ形で取入れている予報モデルである。地球の表面はその70%が海面であるが、大気にとって重要な要素は海水面温度である。幸い海水面温度は短時日ではほとんど変化しないので、現況さえ観測できれば、それを予報期間中の海水面温度であると仮定して使える。しかし、何週間も先のことになると海水面温度も変化するので、その場合には海水面温度を予報する必要が出て来る。そのため、研究は進められてはいるが、当面は1~2週間先の予報を考えているので、GSMでは気象衛星などで観測された海水面温度が使用されている。

4.2 アジア域予報モデル (ASM)

気象庁の天気予報は言うまでもなく日本を中心とした地域の予報が主な対象である。従って、この地域の予報をなるべく詳しい精度のよいものにする必要がある。そのためには、前述の全球予報モデルのように全球を扱うのではなく、アジア域だけを扱うモデルが考えられる。この様に領域を限ると、必然的に、有効な予報期間は短くならざるをえない。なぜなら、前にも述べたように天気現象は時間が先になればなるほど広い範囲の大気の状態が影響してくるからである。それで、気象庁ではアジア域の詳しい予報を目指して、Asia Spectral Model(ASM)が2日先予報のために使われている(第2図および第2表参照)。

ASMは、その名の通り、スペクトル法に基づく数値予報モデルである。ただし、GSMでのスペクトル法がそのまま同じに使われているわけではない。限られた領域の場合には、その領域の周囲(境界)をどのように数学的に処理するかという大変難しい問題がある。GSMでは全球をスッポリ扱うので境界というものを考えなくて済んだ。しかし、気象庁では、領域モデルにおける境界の数学的困難を現実的に上手に処理するのに成功し、世界でもユニークなスペクトル法に基づく領域モデルを開発した。その一つがASMである。

領域の限定は、地球大気を領域内と領域外に分割することになる。そのため、領域の境界で、空気そのものを始めとし色々な物理量が交換されることを考える必要が出て来る。その交換の大きさの如何は境界の外側の大気の状態にも依存するから、たとえ領域モデルとは言え領域外の大気の状態も予報しなければならない。すなわち、領域を限ったモデルであっても領域内だけを扱えばよいというものではないのである。それで、領域外の大気についての予報はGSMを利用する。そして領域内についてはアジア域モデルを用いて、領域内を詳しく表現するためにスペクトルの最小波長をGSMの場合の約半分(すなわち約200 km, 格子間隔で約75 km)にする。ASMとGSMの基本的な違いはこの分解能の差にある。これにより、GSMで表せないような前線付近の狭い降雨域などがASMではかなり良く表現できるようになった。

アジア域予報モデルの領域範囲は、ポーラーステレオ投影法による地図において、日本域を中心に南北約7,000 km, 東西約 8,000 km の矩形の領域である。その周囲(境界)より外側は前述の様に GSM である。アジア域モデルは GSM よりも細かいスケールの現象が表現できるが、その細かいスケールの現象が境界をまたいで外側へ移動しようとする時、GSM ではその現象が表現出来ないでそれは境界でブロックされたり反射されたりして、非現実的なことが生じる。分解能の違うモデルが境界を接する場合には常に起る難しい問題である。これをある程度まで解決するために、境界で起ったブロックや反射を消し去る方法が工夫されている。これによって、領域内部の予報精度にあまり悪い影響が及ばなくなるが、その効果も長時間の内には薄れて来るので、領域限定の予報モデルはどうしても予報できる時間の長さに制約がつく。全球予報モデルの場合には、このような計算上の問題は無い。

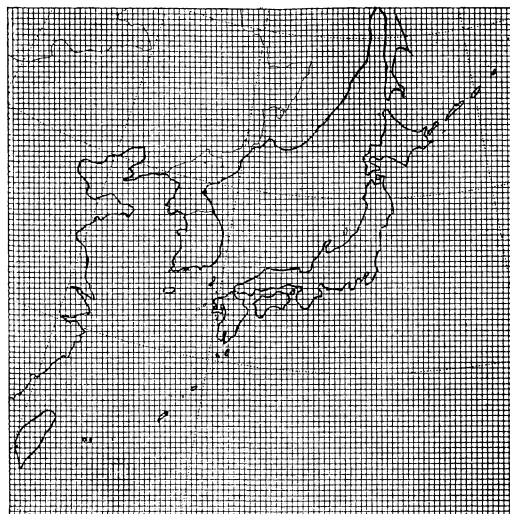
4.3 日本域予報モデル (JSM)

前述の ASM よりさらに詳しい予報を可能にするため、日本列島とその周辺だけを含む小領域の予報モデルがあり、日本域予報モデルと呼ばれている。すなわち、Japan Spectral Model (JSM) がそれである (第3図および第3表参照)。

これは、大体 ASM と同じ仕組の予報モデルであるが、24時間予報のために使用されている。比較的短時間予報であるので、天気の変化に関わる物理過程としては放射による熱の計算などは簡略に行なわれている。このモデルの分解能は、約40 km である。水平面で見ると、JSM は GSM よりおおよそ10倍多い情報を与えてくれる。これにより、地方や県のスケールでの天気予報が可能になる。

JSM は領域モデルであるので、ASM の時の GSM の様に領域外の状態を表現するモデルが必要であるが、そのモデルとして ASM が使われる。すなわち、GSM の内側に ASM があり、ASM の内側に JSM がある。この JSM においては、日本列島の主山系が表現されており、そのスケールの地形による上昇気流などで起こる降水なども予報できるが、まだ主峯などは個々に表現できるには至っていない。

JSM の登場によって、低気圧や前線に伴う降水の1日予報が以前よりはるかにきめ細かいものになった。しかしながら、数時間先までの短時間降水予報となると、観測データをモデルにどの様に取り込むかという難しい



第3図 日本域予報モデル (JSM) の範囲と水平格子網。

第3表 日本域予報モデル (JSM) の仕様

計算法	スペクトル法 (2重フーリエ級数)
格子間隔	40 km の変換格子 (ポーラーステレオ 60°N)
格子の数と波	変換格子 97 * 97 最大波数 62 * 62
鉛直の層数	19
鉛直の層	990, 975, 960, 935, 900, 855, 800, 735, 660, 580, 500, 420, 345, 275, 210, 150, 90, 30
時間差分	セミ・イムプリシット
初期化	非線型ノーマル・モード (インクリメント法)
初期値	極東解析 80 km
境界値	ASM の予報値

問題があって、短時間先の予報であるにもかかわらず逆にそれに対する数値予報の適用は難しくなる。そのため、JSM は、観測データがモデルになじみ始める数時間以後1日先までの時間帯の予報に効果を発揮している。

4.4 台風予報モデル (TYM)

毎日の天気予報業務ではないが、しばしば発生する台

第4表 台風予報モデル(TYM)の仕様

計算法	スペクトル法(2重フーリエ級数)
格子間隔	50 km(台風中心付近で)
格子の数と波	変換格子 109*109 最大波数 70
投影法	ランベルト(日本用) メルカトル(RSMC用)
領域の範囲	主台風の初期位置が中心 5400 km*5400 km
鉛直の層数	8
鉛直の層	980, 905, 725, 500, 325, 200, 125, 50
時間積分	セミ・イムプリシット
初期値	モデル台風を一般場に重ねる
境界値	GSMの予報値
物理過程	
積雲対流	Kuoの方式
PBL	K理論
接地境界層	バルタ法
海水面温度	解析値

風の進路の予報は災害防止の上から大変重要な仕事である。この台風予報についても数値予報の方法が採用されているが、台風の予報のためには通常の天気の数値予報モデルと違うモデルの使われ方がなされている。台風予報モデル(Typhoon model, TYM)も領域モデルであるが、その領域は台風の位置が中心になるよう台風毎にその都度変えられる。領域の広さはおおよそ5,400 km四方で、その境界はGSMとつながっている。これで2日先までの台風の位置を予報する。ただし、予報の計算は60時間先まで行われる(第4表参照)。

台風は普通海洋上にあるので、その詳細な観測データを得ることがなかなか困難である。従って、台風の詳しい構造(風や水蒸気の分布など)は分からない場合が多い。しかし、台風の構造はどの台風もおおよそ似ているので、台風の規模と中心気圧とが分かればその台風の構造は大体近似的に推定できる。この様に台風の主なパラメータから台風付近の風の分布を推定(これは台風モデルのポーガス・データと呼ばれている)し、これを観測データのように見做して予報モデルに組込む。台風に関

する主な情報は気象衛星による観測から得られている。

GSMやASM, JSMなどはルーチンとして使われているが、TYMは台風が日本の南方に発生した時のみ使われる。TYMの分解能はASMとJSMとの中間位で、格子間隔でいうと約50 kmである。モデルの仕様は他の領域モデルとおおよそ同じである。台風の存在個数も色々であるが、複数の台風が同時期に存在する場合には、それぞれの台風毎にその中心位置に合せたTYMで予報される。

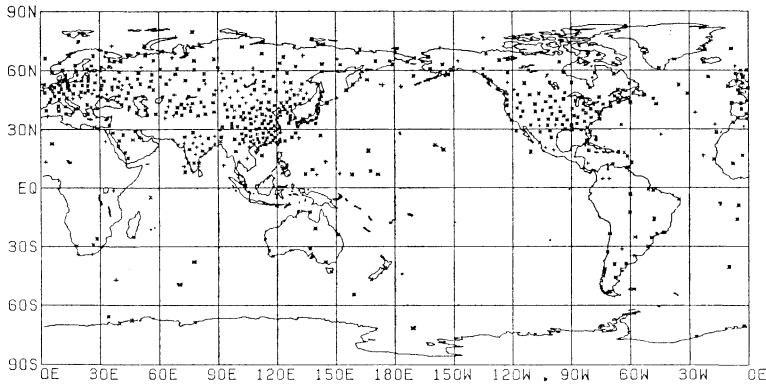
5. 気象庁の数値予報システム

数値予報を実施するには、以上に述べた数値モデルが必要であるのは言うまでもないが、それだけでは数値予報は成り立たない。すなわち、数値予報には現在の大気の状態が分かっているはじめて予報のための計算ができる。従って、大気の状態を知ること、つまり大気を観測することが数値予報の最初の作業になる。気象庁では気象衛星による広範囲の観測結果を始めとして、世界各地の観測所からの定時気象観測データを収集し、それに基づいて数値予報を行っている。観測に始まり予報に至るまでには、膨大な数値情報の加工とその流れがあるが、次にそのシステムの概要を紹介しよう。

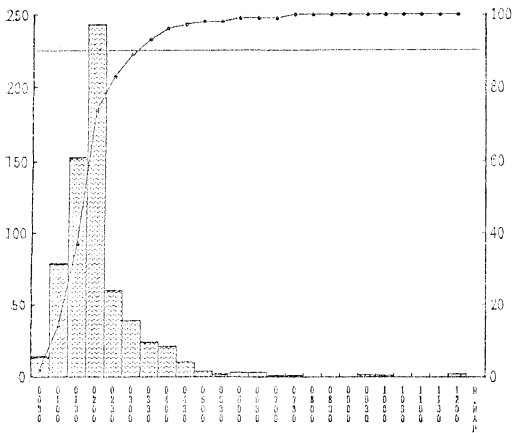
5.1 観測とデータ通信

世界中で実施されている気象観測は、WMO(国連・世界気象機関)のもとに定時に一斉に行われる。それは、世界時の0(9)時、6(15)時、12(21)時、18(3)時の毎日4回の地上・海上観測と0時、12時の毎日2回の高層観測とである。ただし()内の時刻は日本時である。ある一日を例にとって、高層観測が行われた地点の世界分布を第4図に示しておく。その他、気象衛星による観測が観測所の少ない地域の観測を補っている。これら全ての観測は、GTS(世界気象通信組織)を通じて世界中から日本の気象庁に伝送されてくる。データの入電時間の分布は、日によって少々異なるが、平均的にはおおよそ第5図のようである。なお、代表的な観測データの種類を第5表に示す。

気象庁に届いたデータは、C-ADESS(Central Automated Data Editing and Switching System, シー・アデス)と呼ばれるデータ編集装置によって整理され、数値予報のためのNAPS(Numerical Analysis and Prediction System, ナプス)と呼ばれる高速計算装置に送り込まれる。気象庁では、C-ADESSとNAPSとが結合したシステムをCOSMETS(Computer System for Meteorological Services, コスメッツ)と略称してい



第4図 高層観測地点の世界分布の例（1990年3月30日）。



第5図 高層観測データの入電時間分布の例。左縦軸、個数。右縦軸、積算入電率。横軸、観測時からの経過時間（30分間隔）。（1989年8月の月平均値）。

第5表 観測データの種類。

データ記号	内容
SYNOP	観測所・船舶の地上観測
TEMP	A 観測所・船舶のゾンデ観測（指定面）
	B 同上（特異点）
	C 同A（100 mb より上層）
	D 同B（100 mb より上層）
AIREP	航空機の風・気温
SATOB	静止衛星の風ベクトル
SATEMA	軌道衛星による層厚データ
SAEMC	同上
ROCOB	気象ロケットの風・気温・密度（成層圏以上）
METAR	飛行場気象観測（地上）
DRIBU	浮遊ブイの海面の気圧・気温
AMEDAS	アメダスの4要素
GMS	GMS の雲量・黒体輝度温度

る。

5.2 データの解読と解析

C-ADESS から NAPS に入ったデータは、先ず気象データとしての意味が解読される。すなわち、膨大な量の記号と数値の羅列から、どの地点の何のデータであるかが整理される。この過程は、データのデコーディング（decoding）と呼ばれている。世界中に散在する観測地点は、その地理的分布が一様でなく且つ規則的でもないが、これは数値予報モデルにとって不都合なことである。なぜなら、数値予報モデルにとって必要なデータはそのモデルの格子点上のデータであるからである。それで、実際の観測地点のデータから、モデルの各格子点に

相当する場所の気象状況を推定する作業が必要になる。例えば、仮に数値モデルでのある一つの格子点が東京に位置していたとするならば、仙台や福岡、あるいは東シナ海の洋上での観測データなどからどの様にして東京の気象状況を推定できるか、という問題である。

多数の実測データからモデルの各格子点でのデータを推定するには、大気についての理解と経験が必要である。すなわち、各格子点での大気の状態は決してバラバラに独立して存在するのではなく互に影響や制約を及ぼしながら関係し合っている、と考えるのであるが、それがどのような関係であるかについては、大気の力学過程が無

縁であるわけがないし、実際の天気現象についての経験にも裏打ちされていなければならない。その様な認識に立って、限られた数の観測データから大気の状態を推定し各格子点でのデータを系統的に得る。その方法と作業を客観解析と呼ぶ。客観解析の結果は、大気の実況の記述であるから、予報に利用される他、大気の実況記録にもなる。真の大気の実況を知ることには大変難しいことであるが、より精度の高い客観解析法が開発されたら過去の実況記録そのものを見直しも起こり得る。また、観測精度が高くて、誤った実況把握からは精度の高い予報は不可能であるから、客観解析の意味は大変大きい。

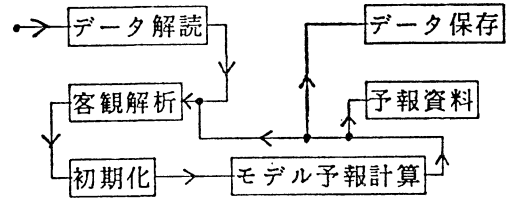
客観解析については、最近、気象庁数値予報課から総合的かつ専門的な解説書が発行された。詳しいことに関心のある人はそれを見て欲しい。

5.3 初期化

数値モデルの各格子点での気象情報は、客観解析によって得られるが、それで直ちに数値予報モデルの計算を始めて良いかと言うと必ずしもそうではない。その理由は、客観解析で大気の実況がより詳細に正しく分かれば分かるほど、皮肉なことに、数値予報モデルの能力の範囲内で処理仕切れない要素の情報が含まれてくるからである。例えば言うならば、視力が0.1の人に裸眼で正しく判別させるためにはそれに見合った大きさの字を見せなければならないが、もしそれを無視してはるかに小さい字をいっぱい見せるとそれらを何かの図案であるかのように見誤ることもあり得るだろう。すなわち、視力によって判別能力の限界が自ずと定まる。この関係が実況とモデルの間にも有るのである。

それで、数値予報モデルの能力を勘案して意味のあるデータだけを取り出し、あるいは意味のあるように加工して、それをモデルに与えてやるという作業が付け加わる。どのようなデータが数値予報モデルにとって意味があるかについてはやや専門的な理解を必要とするが、簡単に言うと、モデルの分解能以下の細かいスケールの現象を取除いたものである。そのようなデータを得る作業過程は、データの初期化(イニシャリゼーション, initialization)と呼ばれている。初期化は、その前段の客観解析と密接に関連しているので、これらを一まとめにして単に客観解析と称することもあるが、作業過程の内容とその意味は異なる。初期化されたデータは、大気の実況を忠実にそのまま表現するものでなく、数値予報モデルによる予報の精度が最適になるように整理・加工されたものである。

NAPS



第6図 NAPSにおけるデータの流れ。C-ADESSからデータが入力される。

5.4 予報解析サイクル

さて、初期値として加工されたデータは、次に数値予報モデルに渡される(第6図参照)。モデルは、それを初期条件として、大型計算機によって時間積分される。すなわち、小さな時間ステップ(例えば5分)刻みに先へ先へと次々に予報が積み重ねられる。

例えば6時間後の予報をすると、ちょうどその時刻は世界中で気象観測(地上・海上・気象衛星)をする時刻でもある。従って、その時刻では予報の結果と実際の大気の状態との二つのデータが揃うことになる。一般に観測地点は数が限られているが、もし予報の精度が良ければ、観測地点の不足を予報モデルのデータで補うこともある程度まで可能であろう。この様に考えると、観測データと予報モデルのデータを一つのデータセットとして、前述の客観解析の対象にすることも可能である。これは予報モデルの精度が良ければ良いほど効果的である。

観測データと予報データを一括して客観解析し、それに基づき初期値データを作り、予報を行う。気象庁の数値予報では、それを6時間毎に行っている。つまり、大気の状態は6時間毎に高い精度で把握される。ただし、世界各地の高層観測の取り込みは12時間毎になる。この様に予報と観測とを一体化させ、大気の状態の変化を時々刻々追跡する作業は予報解析サイクルと呼ばれている。これは良い初期値を得るために必要であるばかりでなく、観測データのない所での大気の状態を精度良く推定する手法としても有効である。例えば、気候変化が起こっているのではないかということが問題になっても、そもそも大気の状態が精度よく把握されていないと何とも判断できないが、予報解析サイクルによるデータはその判断の良い材料になる。

5.5 数値予報モデルの計算

気象庁の数値予報は1日2回定時に行われる。世界時

で00時と12時、日本時で09時と21時である。ただし、これらの時刻は世界での観測の時刻であって、つまり数値予報システムのための最初の作業の始まる時刻を意味する。全球予報モデル（GSM）の場合には、観測データを世界中から集めるために6時間かける。それより後で入電したデータは数値予報には使われない。すなわち、集ったデータをデコーディングするまでに、6時間が経過する。デコーディングに続き、客観解析されて初期値ができ、予報モデルの計算が始まる。24時間や48時間予報のような場合には、それぞれ JSM や ASM が使われるが、観測データの打切り時間を3時間にとどめ（注：日本近郊なのでこれで十分データは集まる）、数値予報作業の経過時間の短縮が計られている。

JSM や ASM のような領域予報モデルでは領域の周囲における境界値を与える必要があるが、その値は、ASM に対しては GSM で予報したデータを、JSM に対しては ASM で予報したデータを、それぞれ与える。そのためには、予報のための各モデルの計算は、GSM-ASM-JSM の順番になる。しかし、GSM は上に述べたようにデータの収集だけで観測時点から6時間も時間が経過するので、短時間予報としては時間がかかり過ぎる。この問題を解決するために、その12時間前の定時を初期値とする GSM の72時間予報で得られるデータを ASM の境界値に使う。台風予報モデル（TYM）による台風進路の60時間予報についても同様である。

現行では、日本時で午前9時の定時を初期時刻とする24時間や48時間予報の領域モデルの計算は正午に始まり、その計算の処理が完了するのにざっと1時間かかる。従って、24時間予報に関して言うと、翌日の午前9時までの予報データが得られるものの、そのうち始めの約4時間は予報としての意味はない。すなわち、現在のところ、観測データの伝送や計算機の演算速度の制約のせいで、定時から4時間以内の有効な短時間予報を数値予報システムで行うのは難しい。気象庁では、その問題に対処するために、数値予報モデルの方法にこだわらない短時間降水予報法を開発している。

一方、週間予報については、それに対する数値予報の精度が改良されてきたことから、現在は毎日1回世界時で12時を初期時刻とする8日（192時間）予報が GSM で行われている。さらに、月3回、15日予報の計算も試行されている。

5.6 予報結果の出力

予報モデルによって得られた予報値は、モデルの格子

第6表 保存データの種類（*：一般公開のデータ）

* 全球解析値（対流圏，成層圏）
* アジア解析値（対流圏，成層圏は全球に同じ）
* 日本域解析値（対流圏，成層圏は全球に同じ）
* 海面水温解析値（2・5度毎，1・0度毎）
全球解析第一推定値
全球モデル・リスタートデータ
* 全球予報値（P面格子，シグマ面スペクトル，3日予報，8日予報，15日予報）
* アジア予報値（2日予報）
* 日本域予報値（1日予報）
台風予報値（60時間予報）
* 物理モニター（全球，アジア，日本）
* ソートデータ
* レーダーデータ
* アメダスデータ
* 雨量合成値
データ品質管理情報（全球，アジア，日本）
衛星降水強度指数
予報精度検証結果
* 過去の客観解析値（1960—）
* 過去のソートデータ（1975—）

点における数値（GPV：Grid Point Value）であるが、数値のままよりも天気図のように図化して表現された方が分かり易いので、おのおのの気象要素に相応しい図にして出力される。それらは、大気の実況を表す客観解析の結果や将来の状態のモデル予想図であるが、その出力はほとんど自動化されていて、必要に応じて気象庁の各官署や外国の関係機関、その他に伝送される。ただし、最終的に出される天気予報やその図は、数値モデルの計算結果そのままではなく、その予報限界や性質などを勘案して専門の予報官が作成したものである。

一部のデータは、最近になって GPV の数値のまま配信されるようになったが、それに伴い、受信する側でそのデータに基づく必要な図や表を自ら作成することが部分的に可能になっている。しかし、その GPV の意味や性質などを良く心得て利用することが大切である。

なお、気象庁数値予報課では、毎日の数値予報の主な出力を磁気テープや光ディスクなどに保存している。その出力データの種類の第6表に示されている。

6. おわりに

当解説シリーズの構成として、(2) 全球予報モデル、

(3) 領域予報モデル, そして(4) 数値予報出力の利用, などが予定されている。気象庁の数値予報をより良く知って頂くために, 気象庁数値予報課では数値予報研

修テキスト, 数値予報課報告・別冊, テクニカルレポート, ニュースレターなどを発行している。関心のある方は御覧頂きたい。

第11回風工学シンポジウム開催案内

〔共催〕 日本学術会議災害工学研究連絡委員会風工学専門委員会, 電気学会, 土木学会 (幹事学協会), 日本気象学会, 日本建築学会, 日本鋼構造協会, 日本風工学会

「第11回風工学シンポジウム」を関連学協会共催で下記のとおり開催し, 研究情報の交換と相互の親睦をはかることになりました。会員各位におかれましては, 下記要領によりふるってご参加下さいますようご案内申し上げます。

1. 開催期日: 1990年12月6日(木)～7日(金)
2. 会場: 中央大学理工学部校舎5号館大教室 (5F) (東京都文京区春日 1-13-27)
交通機関: JR「水道橋駅」下車徒歩10分, 地下鉄丸ノ内線「後楽園駅」下車徒歩5分, 地下鉄都営三田線「春日駅」下車徒歩7分
3. 参加費: 6,000円 (論文集代を含む)
4. 定員: 300名
5. 参加申込み要領
 - (1) 申込み期限: 1990年11月15日(木)
 - (2) 申込み方法: 下記①～④の項を参考に必要事項を明記し, 郵便振替で参加費をご送金下さい。
 - ① 口座番号: 東京 4-155256 (振込料は各自ご負担願います)
 - ② 加入者名: 第11回風工学シンポジウム運営委員会
 - ③ 郵便振込通知票裏面の通信欄に下記事項をご記

入下さい。

氏名, 所属, 論文集送付先住所, 懇親会への出入

④ 領収書は特に発行いたしませんので, 必要とされます方はその旨通信欄にお書き下さい。

(3) その他

① 参加券は論文集に同封し11月中旬に送付します。

② 原則として参加申込みの取消しがありましても, 参加費の払い戻しは致しませんのでご了承ください。

③ 締切り期日前でも定員になり次第申込みを締切りますので, なるべくお早目にお申込み下さい。

④ 問い合わせ先

〒160 東京都新宿区四谷1丁目無番地

土木学会事務局 第11回風工学シンポジウム運営委員会 (担当 黛 巖)
TEL 03-355-3441 (内線161)
FAX 03-355-3446

6. 懇親会

下記により懇親会を開催しますので, 参加ご希望の方はシンポジウム参加申込み時にお申込み下さい。

- ① 日時: 1990年12月6日(木) (シンポジウム第1日目終了後)
- ② 会場: 中央大学理工学部食堂 (5号館地下1階)
- ③ 会費: 4000円 (会費は当日会場受付にてお支払い下さい)