



# 天 気

1985年11月  
Vol. 32, No. 11

601 (研究および気象事業体制)

## ヨーロッパ中期予報センター

### —その機構と活動—\*

金光正郎\*\*

#### 1. はじめに

ここ数年、数値予報に関連してヨーロッパ中期予報センターまたは ECMWF (European Centre for Medium Range Weather Forecasts の略) という名前が頻繁に聞かれるようになった。このセンターは7~10日の予報の数値モデルを用いて行う事を目的として、ヨーロッパの各国が共同出資して作ったもので、予報を始める前から世界の数値予報関係者の間で注目されていた。実際の子報は1979年の夏から始まったが、1年も経たないうちにその精度が他の国の数値モデルよりも格段に優れていることが明らかになった。そしてそれ以来世界をリードする状態が続いている(第1図参考)。ECMWF が予報を開始するまでは米国気象局が一番精度の高い予報を出していたが、ECMWF に追い抜かれてからは米国々内でも大きな問題となり、当事者が学術会議に呼ばれ厳しい質問を受けた事実もある程、そのインパクトは大きかった。その後の ECMWF は研究面での活躍も目覚ましく、世界の気象研究の中心は米国大気科学研究所(NCAR) から ECMWF に移ったと言われている程である。

著者はこのセンターに2度に渡って各1年程滞在した経験を持つが、センターの機構・活動などについて質問を受けることも多く、データや出版物には非常に役に立つものも多いので、ここにセンターの機構と活動の解説をさせていただきます。さらに、最近の数値予報研

究の動向をあわせて解説すべく研究開発班の紹介を詳しく行うよう考慮した。

#### 2. ECMWF の機構

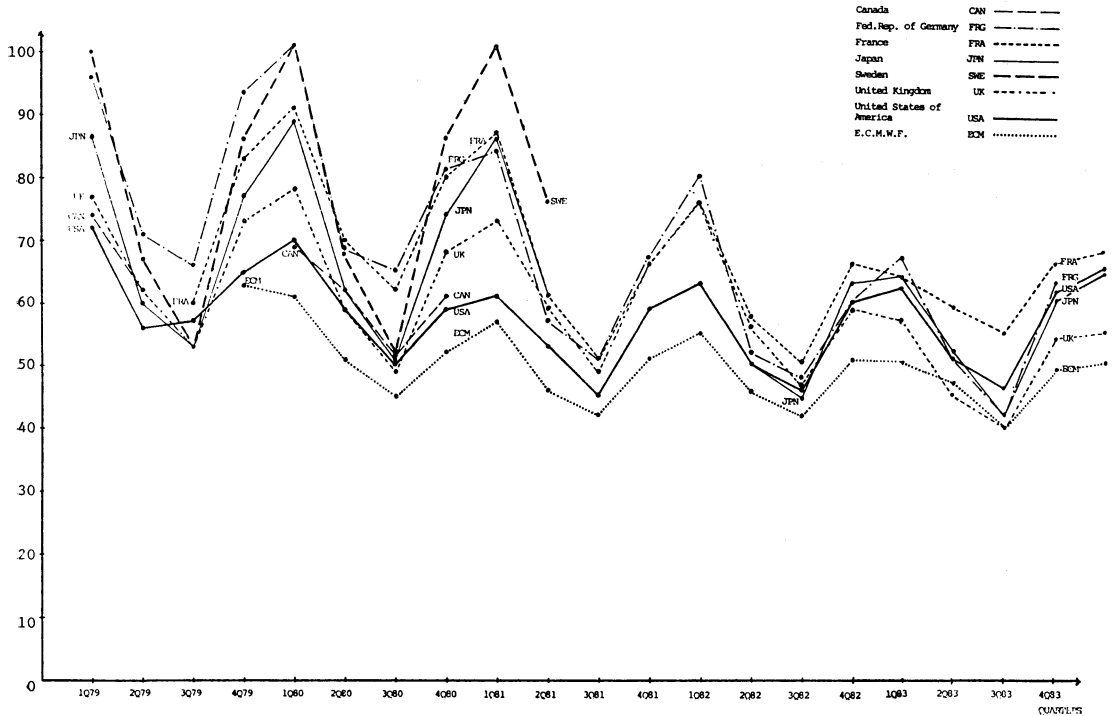
ECMWF はヨーロッパの国々が資金・人材を出しあって成り立っている国際機関である。1983年における参

第1表 ECMWF の1983年における参加国・資金の負担率及び職員数 (ECMWF 1983年年次報告より)。

	資金の負担率	職員数
1. 西ドイツ	24.8%	23
2. フランス	18.5	10
3. 英国	12.4	62
4. イタリア	10.3	6
5. スペイン	6.0	1
6. オランダ	5.0	6
7. ベルギー	3.6	2
8. スウェーデン	3.6	3
9. スイス	3.2	1
10. ユーゴスラビア	2.3	3
11. オーストリア	2.2	3
12. トルコ	2.2	1
13. デンマーク	2.2	4
14. フィンランド	1.4	6
15. ギリシャ	1.3	1
16. ポルトガル	0.7	0
17. アイルランド	0.5	5

\* European Centre for Medium Range Weather Forecasts. —Organization and activity—

\*\* Masao Kanamitsu, 気象庁予報部数値予報課。

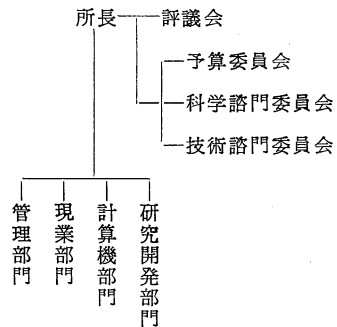


第1図 1979年から83年までの各国の3日予報の500 mb高度の時間に関する平均2乗平方根誤差の北半球における領域に関する平均2乗平方根差。値が小さい方が予報の精度が良いことを表し、予報時間に換算すると15 mが約1日予報の精度の低下に対応する。一般場の変化のため夏には小さく、冬には大きくする傾向がある (Lange and Hellsten, 1985より)。

加国・資金の負担率・及び職員数を第1表に示した。この表から分かるように、参加国はEC加盟国に限られているわけではない。資金の振り分けと諸事決定の際の投票権はGNPに比例させているが、職員数はセンターの所在地やメンバー国の事情によって多少偏っている。なお1983年の予算は860万英ポンド(約28億円)であった。

センターの運営は各メンバー国の代表からなる評議会(Council)によって管理されているが、この他に予算委員会(Finance Committee)、科学諮問委員会(Scientific Advisory Committee)、技術諮問委員会(Technical Advisory Committee)などがある分野での方策の決定・計画の監査などにあたっている。

センター自身の機構は、第2図に示したように管理部門・現業部門・計算機部門・研究開発部門の4部門に分かれている。現業部門は毎日の数値予報の結果のチェック、データの管理、各メンバー国の数値予報プロダクトに対する要求への対処、データ処理等の多彩な役割を



第2図 ECMWFの機構図。

受け持っている。計算機部門はセンターにある多数の計算機のソフトウェアの開発・テスト・保守と計算機のオペレーションを行っている。研究開発部門は予報モデル・解析システムの開発・改良が主務であり、研究者の大部分はここに属している。この部門については後に詳しく紹介する。

### 3. 施設

ECMWF は英国バークシャー (Berkshire) 州レディング (Reading) 市の郊外にある英国気象局気象大学校 (Meteorological college) の敷地の一部をもらい受けて建てられている。ここは英国気象局のあるブラックネル (Bracknell) 市の北約 20 km にあり、データ回線や人的交流の点で便利なところである。またレディング市にあるレディング大学には力学の大家 Hoskins (ホスキンス) の居る気象学科があり、約 50 km 北には Oxford, 種々の大学のあるロンドンへは東に約 50 km と学問的な環境も良い。

建物は 4 階建てで、オフィス数が約 100, 大きな体育館ほどもある 計算機ホール, カフェテリア, 国際会議室, 講堂からなる英国としては比較的近代的なものである。職員数は約 130 名でそのうち約 70 名が高度の技術を持った専門職員である (第 1 表参考)。

計算機には、スーパーコンピュータとして CRAY XMP/22 があるが、今年 (1985年) 11月に CRAY XMP/48 に更新される。この計算機は 4 つのプロセッサと 800 万語 (1 語 = 64 bit) のメモリーを持ち、演算速度は 800 MFLOPS と云われている。スーパーコンピュータの前置き計算機として CYBER 855 と 835 (演算速度 8 及び 3 MILOPS) の 2 台がある。また高解像力モデルから作り出される大量のデータの処理のために IBM 4341 が置かれ、MARS と呼ばれる Mass Storage System がまもなく動き出そうとしている。

以上の他に、通信用計算機 RC 8000 が 2 台、画像専用の VAX 計算機などがある。センターの計算機部門は計算機メーカーにとっても新しい技術をテストする場になっており、断えず新しい機械が出入りしている。センターには高度の知識を持った計算機の専門家もおり、ここで開発されたソフトウェアが逆にメーカー側に取り込まれることも良くあると聞いている。

スーパーコンピュータはメンバー国と専用回線で結ばれており、各国からリモートターミナルを通じて自由に使うことができる。使用量は、これも GNP に比例して定められており、また英・独・仏などでは大学や研究所も使用できるようである。この点ではセンターはメンバー国の計算センターとしての役割も果している。

計算機以外の施設としては講堂・会議場・クラスルームなどがメンバー国の職員の研修や学術的な国際会議に使えるよう整っている。

### 4. センターの役割

センターの最も重要な役割はその名の示すように中期の予報を行うことである。ここで中期とは 10 日までの時間スケールを意味し、その方法は数値予報モデルに依るものに限られている。毎日 1 回行われる 12Z を初期値とした 10 日予報の結果は専用回線を使って各メンバー国に送られる。その形式は格子点値 (デジタルデータ) であり、各受信国の計算機で処理され予報に使われる。送られる要素は 10 mb までの標準気圧面における風・高度・温度・湿度の他に地面付近の風・温度や雲量・雨量等で、全球の値を約 100 km の格子で 12~24 時間毎に 10 日予報まで得ることができる。メンバー国に送られる予報プロダクトはこれのみであって、これ等を加工した具体的な予報はセンターでは出すことができない取決めになっている。要するにセンターは中期予報の為の基礎資料を各メンバー国に提供するのが役割であり、その資料を使って具体的な予報を出すのは各メンバー国の責任に任されているのである。

なお、センターの予報プロダクトのうち、中緯度の 7 日までの地上気圧と 500 mb 高度並びに熱帯の 3 日までの 850 mb と 200 mb の風の予報値が全球気象通信システム (GTS) を通じて世界に配信されており、これはメンバーとは関係なく世界各国で自由に受けることができる。この情報は中国・日本・米国・オーストラリア・香港・マレーシア・インドなどで現業的に使われ、非常に役立っている。このような情報を無料で非メンバー国に提供することに関しては多少問題もあったと聞いている。しかし予報の公共性、気象データを使用していること、ある非メンバー国からの強い要望などから GTS に配信されることが決定された。現在 GTS で数値予報の結果を世界に提供することはかなり一般的になってきており、米国・英国・日本などの予報は世界でどこでも使えるようになっている。

センターの次に重要な役割は数値予報一般の技術の開発・改良とその技術のメンバー国への供与である。この役割のため、センターでは狭域モデルの開発や長期予報の研究、データインパクトスタディーなどが行われており、中期の数値予報に限られない幅広い研究活動ができるようになっている。

研修も重要な役割のひとつである。これは毎年 5 月に 2 カ月間行われている。メンバー国からの参加が主であったが、最近では WMO の援助もあって他の国々からの研修生も多く、20~30 人程度は集まるようである。そ

の内容は数値予報の基礎から予報プロダクトの利用法までであり、計算機を充分に使った実習もあって、なかなか評判も良い。参加資格は特になので、旅費・滞在費を負担すれば日本からの参加も可能である。

以上の他には前に述べた計算センターとしての役割が大きい。また最近では精度の高い解析が評判となりデータセンターとしても注目をあびてきている。

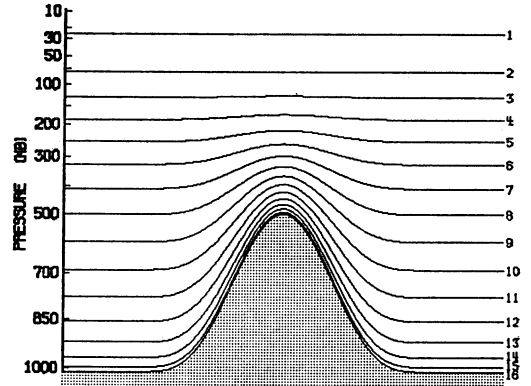
なお、ECMWF からデータや出版物を入手したい方は、文末の付録を参考していただきたい。

## 5. 予報解析システム

センターの活動に最も重要なものは予報を行うための数値モデルであろう。ここでは詳しくこのシステムについて述べてみたい。数値モデルシステムは気象回線を通して入ってくるコード化されたデータの解読から始まって→データのチェック→等圧面での解析→モデル面への内挿→初期値化→予報→標準気圧面への内挿→グラフィックスへの出力からなるが、これに加えて種々のデータ保持が各ステップで要求されるばかりでなく、計算機の故障に対するバックアップまで入れると全体では巨大なシステムとなる。これらのステップはどれも予報の精度に密接に関係しており、どのステップにも独自の考え方が生かされている。ここではこれらのステップのうち重要なものについて解説してみよう。なお、センターのシステムは人の手が可能な限り入らないように作られている。これは熟練した予報官が解析などのステップで介入する方が良くとするいわゆるマン・マシーン・インタラクシヨ的な考え方とは全く対立するものである。

### 5.1. 予報モデル

予報モデルは全球モデルであるが、過去6年間に既に3回更新された。最初のモデルは格子点モデルで、1.875度の緯度経度座標、鉛直に15層の $\sigma$ 系座標を用いていた (Burrige and Hasler, 1977)。このモデルはほぼ同時に開発が進んだスペクトルモデルとの1年間の比較 (Girard and Jarraud, 1982) の後に、1981年春より新しいスペクトルモデルに切り換えられた (Simmons and Jarraud, 1985)。このモデルは Simmons・Strüfing (1981) の開発したハイブリッド座標を用い、地面近くでは $\sigma$ 系、上層にいく程 $p$ 系になる。モデルの水平分解能は波数63 (T 63) の三角形切断 (1.875度緯度経度座標の解像力にはほぼ相当)、鉛直には16層である。第3図に層の配置を示した。このモデルはさらに、つい最近 (1985年5月) 水平解像力を波数106切断 (T 106) まで



第3図 予報モデルの層の配分 (Simmons and Jarraud, 1985による)。

あげた新モデルと交換された。新モデルは T 63 モデルと本質的な差はないが、計算速度をあげるために、移流項の一部のセミインプリシット化 (Simmons and Jarraud, 1984) や最大風速に依存する水平拡散係数の導入などが行われている。ちなみに、このモデルで使われているタイムステップは900秒である。また、スペクトルモデルの経済性を定めるフーリエ変換には、Temperton (テンパートン) が CRAY 系の計算機に則した極めて効率の高いプログラムを作成しモデルの高速化に大きく貢献した。現在の T 106 モデルは約 100 km 格子の格子点モデルに相当するが、CRAY/22 を用いて10日予報に約5時間弱かかっている (CRAY/48 では約1.5時間の予定)。このスピードは計算機の性能を考慮しても極めて速く、プログラムなどの技術的な面でも相当な努力が払われていることを示している。

モデルの物理過程は最初のモデルのものと同程度大きくは変わっていない。研究調査のため色々なものが用意されているが、毎日の予報に使われているのは以下である。

- 1) Kuo 方式の積雲対流と浅い対流
- 2) 蒸発も考慮した大規模凝結
- 3) 雲と日変化を考慮した放射
- 4) 安定度等に依存する鉛直拡散
- 5) バルク法による接地境界層
- 6) 陸面の温度・湿度・雪等の予報
- 7) 形状を考慮して強調した山

各部から与えられるパラメーターとしては、

- 1) 海面水温
- 2) 氷の分布

- 3) アルベド
- 4) 地面粗度
- 5) オゾン分布
- 6) 地中の温度と湿り

があり、1) は毎日の解析値、他は気候値を用いている。

このように、用いられている物理過程は相当に高度なものであり、大循環モデルと比較しても劣るものはない。

上記の物理過程のうち形状によって強調した山岳は ECMWF 独自のものである。これは冬期の予報に顕著にあらわれる予報の季節平均誤差の研究から Wallace *et al.* (1983) によって考えだされたものである。彼等は予報誤差のパターンが山岳にあたる流れの方向によって大きく異なることに注目し、モデルの中での山の効果が過少であると考えた。そこで山の形状、特にモデルの格子スケール内での山の偏差を使って山岳を強調したところ、平均誤差をかなりの程度減らすことができがものである。この強調した山岳は山の頂上をつらねたようなものを考えたことに対応し、envelope mountain(包絡山岳)と呼ばれている。この方法は多少経験的なところがある為に批判も受けているが、その実際的な効果は注目にあたいする。

## 5.2. 解析システム

ECMWF が他の気象局より特に力を入れているのは客観解析である。その方法は3次元最適内挿法であり、観測データの誤差ばかりでなく、その空間的な相関(すなわち空間的にゆっくり変化するバイアスの誤差)、観測要素間の関係(地衡風や静力学など)、解析推定値の誤差とその空間的相関を統計的に考慮するもので、現在考える中でも最も高度な方法である(Lorenc, 1981)。この方法はこれまで使われてきた修正法や変分法より一般的であり、世界の殆んど全ての気象局はこの方法を採用している。しかしその適用にあたっては計算量等の制限から何らかの単純化が行われており、ECMWF ほど単純化の少ない方式を取っているところはない。

解析はまず全球をほぼ  $660 \times 660 \text{ km}^2$  の等面積の箱に分け、その中にある格子点 ( $1.875 \times 1.875$  度格子) の解析に使う観測点を3次元的に2-300個選ぶ。次にこの観測値と第1推定値(6時間予報値)との差を求め、その差にある重みをかけて全ての観測点で和したものを格子点での推定値からの差の解析値とする。この重みは誤差が最小になるように最小2乗法を使って求めるのである

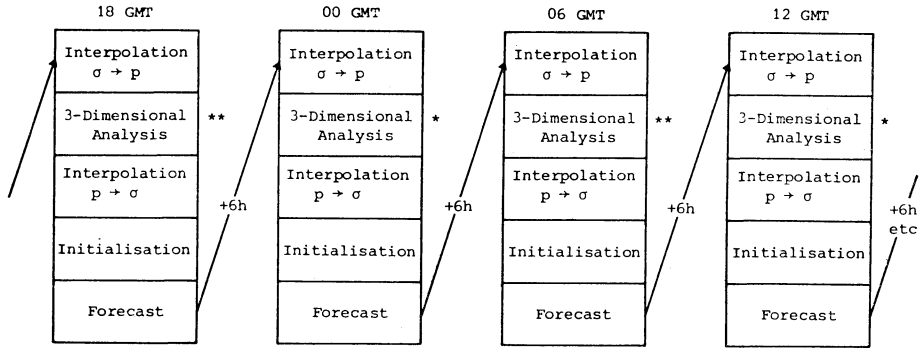
が、ここに観測誤差、推定値の誤差、その空間的相関などが関係してくる。最初の箱に分ける方法はボックス法と呼ばれ ECMWF 独特の方法である。他の気象局では各格子点毎に観測点を選ぶかわりに、最大40-50の観測点しか使わない。前記の重みを求める為には観測点個数  $\times$  観測点個数の正行列の逆行列を求める必要がある。ボックス法では計算量が多くなる傾向があるが、解析のためにどのデータを選び、どのデータを捨てるかを考慮する必要がない。その反面後者の方法では行列演算は少ないが、データの選択法に注意が必要となる。現在のところどちらの方が良いか、研究が始まったばかりであるが、データの選択法に論理的な方法がまだ確立されていないので、ボックス法が有利と云えるであろう。

次に3次元解析の方法であるが、ECMWF を除く気象局では、どのようなデータ(たとえば航空機からの1レベルのみのデータ)からも統計によって鉛直プロファイルを作り出し、その後各レベルで2次元解析を行う方法をとっている。これに対して ECMWF では真の意味で3次元的にデータを捜し集め、3次元的な内挿を行う方法を用いている(ただし誤差相関等の統計量は水平と鉛直には積の形で分離できると仮定している)。前者の方法では統計から鉛直分布を定める部分に無理があるが、後に2次元の解析となるのでデータの選ぶ量が少なくてすむ実際的な利点がある。後者は使用するデータ量がきわめて多くなる不利があるが、衛星データのレファレンスの決定にはより論理的な取扱いをしていることになり、より一般的であると云えよう。

ECMWF では CRAY 計算機のベクトル計算の能力を生かし、 $300 \times 300$  程度の大きな行列をいくつも並列に解くアルゴリズムを開発し、ボックス法3次元解析の計算速度の短縮を達成している。

解析法の他には、観測データの良否の判定の問題がある。これは主観解析についても云えるが、解析法の違い以上に解析の結果に差を与えるものである。ECMWF の方法は、格子点への解析の前に、チェックする観測点へ、その観測がないと仮定したうえで、まわりの観測から前に述べた解析法で内挿し、その内挿値と観測値を比較する方法をとっている。また、良否の判断は解析誤差や観測誤差を加味してなされる。データのチェックはこの他にも気候値や第1推定値に対しても行われ、1種類のチェックで良否を判定するのではなく、他のチェックとの比較判定も行われる(Lorenc, 1981参考)。

解析は CRAY XMP/22 で1回につき約15分の計算時



第4図 4次元データ同化の方法 (Bengtsson *et al.*, 1982による).

間を要している。

### 5.3. イニシャルゼーション

解析値から直接予報を始めると、風と高度の場の間にはバランスが成り立っていない為に予報には不要な重力波振動がおきる。この振動は数値モデルに使われている差分法などによって長時間積分すると消えてしまうので、2～3日以上の子報ではあまり問題にはならない。しかし6時間予報を解析の推定値として使う為には、これらの振動が初めから抑えられている必要がある。この目的でECMWFでは非線型ノーマルモードイニシャルゼーションが世界に先駆けて応用された。この方法の説明はDaley (1981)などにゆずるとして、最近導入された物理過程を含むイニシャルゼーションについて簡単に述べる。これにはいくつかの方式があるが(Kitade, 1983; 数値予報課, 1984など)、センターでは、まずイニシャルゼーションなしで6時間予報を行い、その間の物理過程による時間傾向(たとえば積雲対流による温度の上昇率)を積算し、これをイニシャルゼーションの過程で一定の強制項として与える方式を取っている。このようにして組み入れた物理過程の効果は熱帯で大きく、これまで(例えばFGGE III-b解析)過小に見積もられていた熱帯の発散場が大きく改善された。ただし予報への影響は雨の予報の立ち上りの悪さの改善に多少影響を与えた程度で、それ程顕著なものではなかった。

### 5.4. 4次元データ同化法

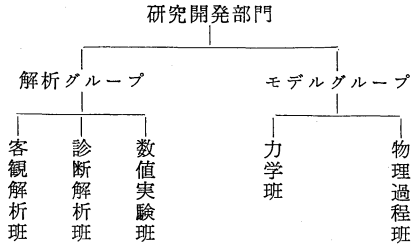
ECMWFでは1日4回、6時間予報を第1推定値とした解析を行っている(第4図)。これは6時間前の観測を最も確からしい方法で時間外挿して使っていることに対応し、間欠的4次元データ同化法と呼ばれる。解析システムのところで述べたように1回の解析には約15分

の計算時間が掛っているが、10日子報の初期値を作るには4回の解析と4回の6時間予報が行われているので、全体では約1時間半もの計算時間が必要である。なお、間欠的同化法に対比して、予報モデルを連続的にはしらせ、データを観測時に対応して連続的に予報場の中に入れていく、連続的同化法もある。前者はECMWFの他に米・仏・日・豪・加などで、後者は英国とプリンストン大学のFGGE III-b解析に使われている。

いずれの方法も一長一短があるが、予報が解析の推定値となり、その解析が予報の初期値となることは同様である。このことは良い予報は良い解析を作り、良い解析はさらに良い予報を作り出す可能性を示しており、この意味では予報と解析とはもはや切り離して考えることはできない。この為最近では予報モデルと解析をひとつにした予報解析システムという名前が一般的に使われるようになってきている。この予報と解析の一体化の重要性を最初に示したのはECMWFであり、これも予報精度の向上に大いに関係している(Bengtsson, 1981)。

この章で紹介してきたように、ECMWFの予報解析システムは、どのステップをとっていても最も高度な知識を導入した、現在考え得る最良のものである。このシステムが世界で一番精度の高い予報を生み出すのは当然ともいえよう。

予報の精度を現在よりもさらに上げるためには、このようなシステムをさらに改良していく必要がある。これを行っているのは研究開発部門であるが、云い換えると、この部門は数値予報研究の最先端をいっていることにもなる。次の章ではこの部門の最近の活動について紹介し、最近の数値予報研究の動向をさぐってみよう。



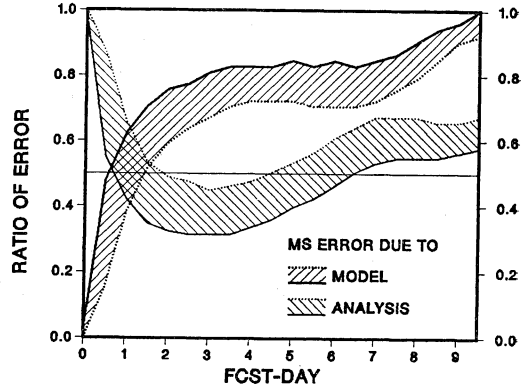
第5図 研究開発班の組織。

6. センターで行われている最近の研究

この部門は Burridge (パリッジ・英)を長とし、その下に Hollingsworth (ホリングスウォース・アイルランド)が率いる解析グループと Sommeria(ソメリア・仏)の率いる予報モデルグループがある。これらのグループは更に、解析グループは客観解析班 (班長, Pailleux, (パイユ・仏)), 診断解析班 (班長, Arpe, (アーベ・独)), 数値実験班 (班長, Tibaldi(ティバルディ・伊))にわかれ、予報モデルグループは力学班 (班長, Simmons (シモンズ・英))と物理過程班 (班長, Tiedtke (テードケ・独))に分かれている (第5図)。各グループは共に約20名の研究者から構成され、センターの頭脳中心である。この部門の役割は予報解析システムの改良・評価、新システムの開発・テスト・評価と現業モデルへの導入であり、センターの予報精度、すなわちセンターの将来はこの部門に掛っていると云える。

6.1. 客観解析班

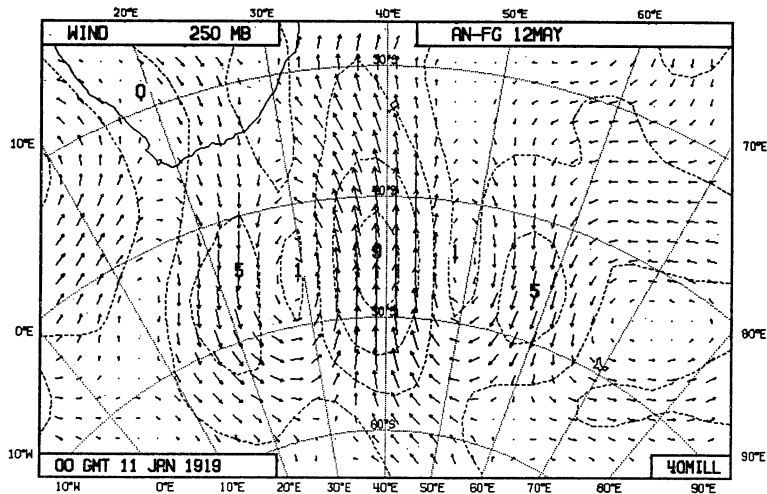
最近の Arpe *et al.* (1985) によると、初期値の誤差が予報の誤差におよぼす割合は、12時間予報まではモデルの誤差より大きく、それ以降でも3~6割を占めることが示されている (第6図)。これは解析の精度の向上が予報精度の向上に極めて重要であることを意味していると同時に、6時間予報が解析の推定値となっていることを考えると、予報解析システム全体への効果も極めて大きいことが期待される。解析班で行われていることは、現在の解析システムをいかに改良するかにつぎる。最適内挿法の枠組みは変わらないが、今のシステムでなされている数々の仮定・簡単化を取除くことに最大の努力が払われている。その主なものとしては、解析結果を左右する予報誤差構造関数の決定がある。Hollingsworth・Lönberg(1985)は、最適内挿法による解析は、観測値の単なる内挿を行うのみではなく、観測値に構造関数で定められるフィルターをかけていることになることを示し、構造関数の重要性を明確にした。この研究に基づ



第6図 予報誤差のうちモデルの誤差と初期値の誤差が占める割合の予報時間による変化。予報時間ゼロで1.0から始まるのが初期値による誤差、0から始まるのがモデルによる誤差。初期値の誤差とモデルの誤差の間に相関があるので両者の和は1より大きくなる(Arpe *et al.*, 1985 による)。

き、サンプル量を増して統計量の信頼性を高めるばかりでなく、これまで全く考慮されていなかった渦度と発散場の相関や、真に3次元的な相関を取り入れることが計画されている。これによって発散場の解析の向上がはかれ、航空機のような1層のデータがより合理的に使われるようになることが期待される。また統計値にしても、層別化を行って低気圧や高気圧で構造関数を変えるような事も考えられている。観測の良否の判定では、その閾値の設定に任意性が残されているが、今のシステムで捨てられたデータの統計的性質を調べ、閾値をより論理的に定める研究が進んでいる (Delsol, 1985)。

解析に関して最近世界的に問題となっていることに衛星の層厚データの見直しがある。現在の衛星による層厚データは、例えば青木他 (1981)の解説にあるように、放射強度と層厚との統計的関係から求められている。このように求められた層厚を最適内挿法の解析で使っているが、客観解析自体が観測値の統計的性質を用いているのであるから、衛星データに関しては統計的な処理が2重に施されていることになり、好ましいことではない。これを避ける為には、放射強度そのものを客観解析で使えば良いのであるが、データの性質が他の観測と非常に異なるためそれ程簡単ではない。原理的には推定値(予報値)の温度・湿度から放射強度を求め、衛星データと比較することによって予報誤差の構造関数を決めるわけであるが、衛星データの、水平には解像力が良いが



第7図 1981年5月平均の200 mbの風。第1推定値と解析値の差。領域は南アフリカの南東（図の左上に南アフリカの一部がある）(Hollingsworth *et al.*, 1985 より)。

鉛直には悪い、という性質などが関係して、実際的な応用までにはまだ時間が必要である。ECMWFではオーストラリアから衛星の専門家 Kelly (ケリー) を招き、基礎的な資料の収集を始めている。

解析班の活動の最後として、第1推定値(6時間予報)を使ったゾンデ観測の系統的誤差の検出について述べよう。最近の統計によると、第1推定値の誤差はゾンデデータの密なところの近くではゾンデ観測より小さいことが判っている (Hollingsworth and Lönnbeg, 1985)。

この結果は奇妙に思われるかもしれないが、解析が多数のゾンデデータから求められている時には、解析誤差は各ゾンデデータの観測誤差より小さくなり、6時間予報の誤差が十分に小さければ予報誤差は観測誤差より小さくおさえられるので、矛盾したところはない。このように精度の良い推定値があれば当然ゾンデ観測の誤りの検出も可能になる。さらに、第1推定値と解析値の差の1カ月平均と季節平均をとれば、系統的な誤りのあるゾンデデータを検出できる。第7図は1981年5月平均の200 mbの風の第1推定値と解析値の差である (Hollingsworth *et al.*, 1985)。領域は南アフリカの南東領域であるが、特徴的な時計廻りと反時計廻りの対のパターンは、南緯45度・東経40度付近の観測データが系統的に誤っていることを示唆している。ECMWFはこの孤島の観測担当国に調査を依頼し、その結果風観測の為の基線の設定に10数度の誤りがあることが判明した。最近

では同様な方法を観測点の高度の測量による誤りの検出に応用するべく調査が行われている。このようなモデルを用いたゾンデ観測のチェックはWMOの援助を受けて進んでおり、その結果は再びWMOを通じて各国に通知され、世界のゾンデ観測の精度の向上に役立っている。なお、私が非公式に見せていただいた資料では、日本のゾンデ観測の精度は世界で1・2位を争うものであるとのことであった。

## 6.2. 診断解析班

この班の目的は予報モデルの誤差を解析し、誤差の原因を探り、予報精度の向上に役立てることである。主として中緯度や熱帯の系統的誤差の解析が行われているが (Hollingsworth *et al.*, 1980; Heckley, 1985)、中緯度じょう乱の予報誤差についてもタイムフィルター等の手法を用いて調べられている (Klinker and Capaldo, 1985)。また他の気象局の解析との違い、予報の差などの解析も行い、その結果としての実際的な予報可能性限界に関する研究も行われている。(Arpe *et al.*, 1985; Hollingsworth, 1985)。この班のように、予報モデルや客観解析に全く関係せず、第3者的立場で予報解析システムを評価する人々が居るのはECMWFの強みであろう。

## 6.3. 数値実験班

この班は以前FGGE III-b解析を行っていたが、解析終了後には名前も変更し、今は予報解析システムを用い



た各種の実験を行っている。その主なものとしては、30日予報実験、データインパクト実験、FGGE III-bの再解析がある。

30日予報の実験は T21 と T42 のモデルを用いて行われている。結果はまだ論文になっていないので詳しいことは分らないが、有望な面もあるということである。予報は Lag averaging forecast (Hoffman and Kalnay, 1983) と呼ばれる、6時間おきの一連の初期値から、一連の予報を行い、平均や分散をとることによって予報の精度をあげ且つ情報量も増やす試みがなされている。30日もの長時間の積分を行うと、モデルに大きな系統的誤差(モデルの気候値のドリフトと呼ばれる)があるので、それを除く試みもなされている。この分野は今世界で最も注目をあびており、ECMWF のこれからの研究の成果が待たれる。

次にデータインパクトの研究は、予報解析システムを用いて各種の観測システムの有効性を調べるのが目的である。通常は注目する観測システムを取り去った場合と取り去らない場合の2通りの予報解析サイクルを行い、それ等を比較(予報することも含めて)するのが主な方法である。これには FGGE の観測が使われ、衛星データ、航空機データ・ブイデータ等のインパクト実験が行われてきた。実験は各々2~3週間の予報解析サイクルと、各々約10例の10日予報からなり、そのための計算量は膨大なものである。これらの計算は最近ようやく終了し、これから結果の整理が始まるころである。予備的な結果によると (Uppala *et al.*, 1985)、データのインパクトはじょう乱の活動度に強く依存することが示されており、この種の実験のむずかしさを示している。

FGGE III-bの再解析は、前回の解析以降、予報解析システムが非常に改善されたこと、質のあまり良くなかった衛星データが再処理されたこと、そしてその後、船などのデータが追加されたことなどから、計画された。この解析は今年中には終了し、その結果は前のように米国のデータセンターに送られ、各国で利用できるようになる。今回の特色としては、以前と同じ形式の資料の他に、950 mb と 900 mb 面の解析と、モデルでの非断熱過程による時間傾向データが追加される予定である。

#### 6.4. 力学班

Simmons をヘッドとするこの班は予報モデルの力学部分を担当している。過去1~2年間、この班は今年5月1日にルーチン化された T106 モデルの完成に取り組んできた。T63 から T106 への解像度の増加はあまり

力学には関係せず、どちらかという計算技術的な問題が多い。従って数値計算法に関しては、移流項の一部のセミインプリシット化と最大風速に依存する拡散係数の導入くらいしかない。云い換えれば、最近数値計算法はほぼ完成状態に近づき、新しい発展がむずかしくなっているのかもしれない。

さて T106 モデルの最大の興味は、その予報精度であろう。まだ十分な資料が蓄積されていないので、決定的なことは云えないが、ルーチン化前の10数例のテストでは2~3日の予報の低気圧示度・進路・降水量とその分布にかなりの改善がみられた。しかし5~10日の予報にはそれ程大きな影響はなく、少なくとも中期の予報には解像度よりも物理過程や初期値の影響の方が大きいという結果が得られている。さらに、同時に行われた T21, T42, T63 モデルとの比較によると、T42 以上の解像度では中期予報はあまり変らないが、T21 のように粗いモデルでは、他のモデルとは異なった予報となり、予報精度も非常に悪いことが示されている。このことは、10~30日を目的とした中長期の予報にはあまり粗い解像度のモデルを使うことは好ましくないことを意味しており、これからこの方面の研究を行うには留意すべきことと思われる。

なお、T106 モデルの初期値には過去と同じに T63 に相当する解像度で解析が行われているので、モデルの性能が十分に生かされているとは云えない。高解像力の解析のルーチン化は1986~7年に予定されており、モデルの公正な評価はそれからとなろう。

この班にとっては T106 モデルのルーチン化が最大目標であったため、他の活動はあまり盛んではないが、鉛直差分を有限要素法で行う試みや、スペクトル狭域モデルのプロジェクトなどが徐々に進行しつつある。この班のこれからの焦点は T106 モデルの評価、物理過程の改良と鉛直分解能の増大などに向けられていくようである。

#### 6.5. 物理過程班

予報モデルの物理過程はこの班で開発・改良されている。最近の話題は新しい積雲対流のパラメタリゼーション (Miller and Moncrieff, 1984)・浅い対流のパラメタリゼーション (Tiedtke, 1984)・放射のための雲の計算法 (Slingo and Ritter, 1985) そして重力波による抵抗のパラメタリゼーションである。

Miller and Moncrieff のパラメタリゼーションは気候的な温度・湿度のプロファイルを使った対流調節方式

で、熱帯の気候値的な場を維持する点で優れている。現在のモデルは熱帯の気候場の維持に問題があり (Kanamitsu, 1985), その改善に有効であるという結果が得られているが、じょう乱の予報に適しているか否かが現在検討されている。

浅い対流は、境界層内の熱・水蒸気・運動量を自由大気に輸送する新しいメカニズムとして導入されたもので、深い対流との相互作用が強く、熱帯の雨の分布が大きく改善された。この過程は5月1日からの T106 モデルに導入された。

雲の計算法は、これまでの相対湿度のみに依存する経験式が使われてきたが、衛星写真や気候値との対応が良くないことから改良が進み、モデルの雨・上昇流・安定度なども考慮した新しい経験式を導入した。この改良により雲を予報の有用なプロダクトとすることが可能となり、また放射の見積りの精度向上に大きく寄与している。

重力波による抵抗のパラメタリゼーションは、山岳等によって励起された重力波が上方に伝播する過程で非線型効果等により一般場と相互作用をおこし、その結果一般流を減速する過程を取り扱ったものである。線型理論による裏づけと少数の観測があるが、その全球的な重要性についてはあまり重要視されたことはなかった。最近カナダの大循環モデルで初めて導入され (Boer *et al.*, 1984), 英国気象局のモデルでもテストが進んでおり、それらの結果によるとその影響はかなり大きなものである。しかしパラメタリゼーションをするにあたって使われた仮定には疑問も多く提出されている。ECMWF では、現在使われている強調された山岳 (envelope mountain) との関係を目眼として研究が進められる予定である。

## 7. さいごに

ヨーロッパ中期予報センターが数値予報の発展に果たした役割はきわめて大きい。第1図で示されているように、世界各国のモデルの性能はセンターに追いつくべく毎年向上しており、どの国の予報も現在ではセンターの予報開始時の精度を越えている。

センターは今年で創立10周年を迎える。所長も初代の Winn-Nielsen (ウィン・ニールセン, デンマーク) から Labrousse (ラブルース, 仏), そして現在の Bengtsson (ベングツォン, スウェーデン) に代わり、オリジナルの解析システムを作った Lorenc (ロレンツ, 英) や非

線型ノーマルモードイニシャリゼーションを担当した Temperton (テンパートン, 英) も英国気象局に帰ったり、カナダに移住したりで、主要なスタッフの出入りも激しい。しかし世界で最高の精度を誇る予報を出し続けているプライドは極めて高く、新しいスタッフの意気も高い。センターのメンバー国の中には英国のように全球モデルによる中期予報を行いセンターと競っているような国もあり、センターは、生き残る為には常に世界一の予報を出し続けなければならない宿命を負っている。このこともセンターのスタッフが研究を進めていく為の重要な原動力となっているように思われる。このように、メンバー国の中にも ECMWF と重複して全(半)球モデルを動かしている国があることに疑問を持たれるかもしれないが、これに対してはいくつかの理由がある。予報業務的には、特に2~3日の予報に関しては速報性 (ECMWF は観測時より12時間近く遅れ、1日1回しか予報を行わない) が重要視される為、たとえ精度が多少悪くても自国でモデルを動かす方が有利である。また狭域モデルの境界値を供給する為にも同様なことが云える。しかしもっと重要な理由は、数値予報モデルが気象学にはたしてきた役割にある。数値予報モデルはこれまでに、気象学はいうにおよばず、総観気象・観測技術・情報伝達などの気象学全般の発展に密接に関わってきた。すなわち数値予報モデルは、その国の気象学ならびに気象技術の向上に欠かすことのできない、例えていえば素粒子の研究における巨大加速器施設に対応するものとも云えよう。

この2~3年の数値予報の精度は、進歩はしているが最初のモデルによる飛躍的な進歩からみるとそれ程目立つ程のものではない。この意味では、近い将来に飛躍的進歩をもたらすような研究結果がない現在、センターもこれからはかなりむずかしい立場に立つことになると思われる。これをどのように打開していくのか、興味深いところであろう。

## 付録 保持データと出版物について

### 1. データ

ECMWF では過去の解析や予報を磁気テープに保持しており、予報結果の解析やモデルのテスト等に役立てている。センター内で保持されているものは、

1. 解析に使われた観測値 (誤りとして捨てられたものも含む)。
2. 1日4回の解析値。

3. 1日4回の初期値化された解析値。
  4. 1日4回の解析第一推定値（6時間前の解析からの6時間予報値）。
  5. 1日1回の12~24時間おきの10日までの予報値。
- などであり、 $1.875 \times 1.875$ 度の緯度経度（又は T 63の球関数の係数）、12~15層の標準気圧面の値が圧縮された形でテープに収められている。要素は予報変数である風・温度・高度・水蒸気量の他に、渦度・発散・上昇流や予報された雨・各物理過程によるフラックスなどがある。

このデータの一部である解析値は WMO の協力で有料ではあるが誰でも入手することができる。詳しくは WMO から出版されている次の文献を参照していただきたい。

“The description of the ECMWF/WMO global data sets.” Program on Short- and Medium-Range Weather Prediction Research (PSMT).

現在のところテープ1巻40米ドルである。その他のデータについては、目的がはっきりしていれば、センターの所長に直接手紙を書くことによって入手可能な場合もある。

## 2. 出版物

ECMWF の出版物には以下のものがある。

### 1. Seminar Report (年1回)

これは年1回秋に行われるセンターでは一番大きな催しであるセミナーの報告である。通例毎年異なるあるテーマの分野に関して世界的に著名な人々を招いて講師とするため、最近のその分野の知識を得るには好適である。

### 2. Workshop Report (年1~2回)

年に1~2回行われる workshop のレポートである。予報解析システムに直接的に関係したテーマを取り上げ、システムの問題点と改善のための具体的な手段を得ることに主眼をおいている。

### 3. Technical Report (不定期)

センターの科学者、ビジター等の研究の報告であり、学会誌に投稿する以前にその研究の詳しい内容を報告するもの。

### 4. ECMWF global daily analysis

毎日の解析図を集めたもの。南北両半球の地上気圧・500 mb 高度・300 mb 高度、熱帯の 850 mb と 200 mb の風の場合などの図がある。

### 5. 年次報告書 (Annual Report) (年1回)

1年間の総合報告書。会計報告、予報成績、研究成果等を含む。これらの出版物は ECMWF へ請求すれば入手できる。請求先は以下の通り。

Dr. L. Bengtsson, Director, ECMWF Shinfield Park Reading, Berkshire, RG 2 9 AX, United Kingdom,

以上の出版物の他に定期的なものとしては ECMWF News, Internal report (簡単な研究の報告) などがあり、不定期なものとしては予報解析システムのマニュアルや研修のテキストなどがあるが、印刷部数が多くないので入手はむずかしいかもしれない。

## 文 献

青木忠生, 中島 忍, 加藤一靖, 1981: 極軌道気象衛星 (TIROS-N) データ処理システム。天気, 28, 531-542.

Arpe, K., A. Hollingsworth, A.C. Lorenc, M.S. Tracton, S. Uppala and P. Kallberg, 1985: The response of numerical weather prediction systems to FGGE II-b data, Part II: Forecast verifications and implication for predictability, Quart. J. Roy. Met. Soc., 111, 67-102.

Bengtsson, L., 1981: In proceedings of the Symposium on current problems of weather prediction, Vienna, June 1981, Extended Abstract.

Bengtsson, L., M. Kanamitsu, P. Kallberg and S. Uppala, 1982: FGGE 4-dimensional assimilation at ECMWF, Bull. Amer. Met. Soc., 63, 29-43.

Boer, G.J., N.A. McFarlane, R. Laprise, J.D. Henderson and J.P. Blanchet, 1984: The Canadian Climate Center spectral atmospheric general circulation model, Atmosphere-Ocean, 22, 397-429.

Burridge, D.M. and J. Hasler, 1977: A model for medium range weather forecasting-Adiabatic formulation, Tech. Rept. No. 4, ECMWF, Reading U.K..

Daley, R., 1981: Normal mode initialization, Dynamic Meteorology, Data Assimilation Methods, Applied Mathematical Sciences 36, L. Bengtsson, M. Ghil and E. Kallen Editors, 77-110, Springer-Verlag, New York, Heidelberg, Berlin.

Delsol, F., 1985: Monitoring the availability and the quality of observations at ECMWF, In proceedings of ECMWF Workshop on the use and quality control of meteorological observations, ECMWF, Reading, U.K..

電子計算室, 1984: ノーマル・モード・イニシャリゼーション, 気象庁予報部電子計算室報告, 別冊第30号, pp. 92.

Girard, C. and M. Jarraud, 1982: Short and medium range forecast differences between a spec-

- tral and a grid-point model, An extensive quasi-operational comparison, Tech. Rept. No. 32, ECMWF Reading, U.K..
- Heckley, W.A., 1985: Systematic errors of the ECMWF operational forecasting model in tropical regions, To appear in Quart. J. Roy. Met. Soc..
- Hoffman, R.N. and E. Kalnay, 1983: Lagged average forecasting, an alternative to Monte Carlo forecasting, *Tellus*, **35A**, 100-118.
- Hollingsworth, A., K. Arpe, M. Tiedtke, M. Capaldo and R.H. Savijarvi, 1980: The performance of a medium range forecast model in winter-impact of physical parameterizations, *Mon. Wea. Rev.*, 1736-1773.
- Hollingsworth, A. and P. Lönnberg, 1985: The statistical structure of short range forecast errors as determined from radiosonde data, Part I: The wind field, Seminar/Workshop 1984, Data assimilation systems and observing system experiments with particular emphasis on FGGE. Vol. 2, 7-70, ECMWF, Reading, U.K.
- Hollingsworth, A., A.C. Lorenc, M.S. Tracton, K. Arpe, C.G. Cats, S. Uppala and P. Kallberg, 1985: The response of numerical weather prediction system to FGGE II-b data Part I: Analyses, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **111**, 1-66.
- Hollingsworth, A., D.B. Shaw, P. Lönnberg, L. Illari, K. Arpe and A.J. Simmons, 1985: Monitoring of observations and analysis quality by a data assimilation system, Seminar/Workshop 1984, Data assimilation systems and observing system experiments with particular emphasis on FGGE, Vol. 2, 293-347, ECMWF, Reading, U.K..
- Kanamitsu, M., 1985: A study of the predictability of the ECMWF operational forecast model in the tropics, to appear in *J. Met. Soc. Japan*.
- Kitade, T., 1983: Nonlinear normal mode initialization with physics, *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 2194-2213.
- Klinker, E. and M. Capaldo, 1984: Systematic errors in the baroclinic waves of the ECMWF model, Tech. Rept., No. 41, ECMWF, Reading, U.K.
- Lange, A. and E. Hellsten, 1985: Results of the WMO/CAS NWP data study and inter comparison project for forecasts for the northern hemisphere in 1983, Programme on short- and medium-range Weather Prediction Research (PSMP), WMO.
- Lorenc, A.C., 1981: A global three-dimensional multivariate statistical interpolation scheme, *Mon. Wea. Rev.*, 701-721.
- Miller, M.J. and M.W. Moncrieff, 1984: The use and implementation of dynamical cloud model in a parameterization scheme for deep convection, Workshop on convection in large scale numerical models, 33-68, ECMWF, Reading, U.K.
- Simmons, A.J. and R. Strufing, 1981: An energy and angular-momentum conserving finite-difference scheme, hybrid coordinate, and medium-range weather prediction, Tech. Rept., No. 28, ECMWF, Reading, U.K.
- Simmons, A.J. and M. Jarraud, 1984: The design and performance of the new ECMWF operational model, Seminar on numerical methods for weather prediction 1983, ECMWF, Reading, U.K.
- Slingo, J. and B. Ritter, 1985: Cloud prediction in the ECMWF model, Tech. Rept., No. 46, ECMWF, Reading, U.K..
- Tiedtke, M., 1984: The sensitivity of the time-mean large-scale flow to cumulus convection in the ECMWF model, Workshop on convection in large-scale numerical models, 1983, 297-316, ECMWF, Reading, U.K..
- Uppala, S., A. Hollingsworth, S. Tibaldi and P. Kallberg, 1985: Results from two recent observing system experiments at ECMWF, Seminar/Workshop 1984, Data assimilation systems and observing system experiments with particular emphasis on FGGE, Vol. 1, 165-202, ECMWF, Reading, U.K..
- Wallace, J.M., S. Tibaldi and A.J. Simmons, 1983: Reduction of systematic forecast errors in the ECMWF model through the introduction of an envelope orography, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **109**, 683-717.

### “身近な環境を見つめよう”のお知らせ

トヨタ財団第4回研究公募

公募期間 1985年11月1日～1986年1月15日。予備研究助成金(最高50万円)20件。この中から長期研究に選ばれれば、さらに助成金等があります。

詳しくは〒163 新宿区西新宿2-1-1 三井ビル37階  
財団法人トヨタ財団研究コンクール係(03-344-1701)  
へハガキで応募資料を請求のこと。