

## FGGE III b データの問題点

—ECMWF と GFDL の「main III b」データについて\*—

増 田 耕 一\*\*

FGGE (第1回 GARP 全球実験, または GWE, 全球気象実験) の1年間の観測データを用いて, FGGE III b データと呼ばれる格子点データセットが, ECMWF (ヨーロッパ中期天気予報センター) と GFDL (地球流体力学研究所) の2か所で作られた。このうち, 1981~83年に作られた1年分のデータセットは「main III b」, 最近作り直されているデータセットを「final III b」と呼んでいる。「final」は「main」よりも改良された同化方式によってつくられたものだが, 強化観測期間に限られているので, 1年の期間の全球気象データとしては, いまだに「main」III b が最も質のよいものと考えられる。

「main III b」については, 次のような問題点がわかっているので, 利用するときには注意が必要である。

(a) 風の発散成分が両者では非常に違う。主観的な評価であるが, ECMWF では弱すぎ, GFDL では強すぎるようである。(b) 質量保存が完全には満たされていない。質量の誤差は陸上のほうが海上よりも大きい。(c) 水蒸気値は予報モデルへの依存性が大きい。しかも, ECMWF のデータの最下層の相対湿度は, 系統的に小さくなっている。(d) 温帯低気圧の地表面気圧は GFDL のほうが ECMWF よりも浅い。GFDL の同化方式で孤立した地表の観測値をうまく取り入れていないためだと考えられている。

これらの多くはすでに「final」III b の作成の際に改善されているが, 風の発散成分, 水蒸気, および山の存在するところでのいろいろな気象要素の同化についての根本的な解決は今後に残されている。

### 1. 序 論

「FGGE III b」と呼ばれるデータセットは, 最近5年間に世界で最も広く使われた気象データだろう。これの登場以前には, 大気大循環の診断的研究には二つの方法があった。一つは観測点データから共分散などの統計量を計算する方法 (1950年代に Starr とその協力者たちが始めた) であり, もう一つは数値天気予報の初期値のために用意された格子点解析値を使う方法である。FGGE III b データは後の流れをくむものであり, この登場で Starr 型の解析の役割りは少なくなったといえよう (Holopainen, 1986)。

FGGE データについてはたくさんの注意や問題点の報告がなされている。それはこのデータの質がこれまでの数値予報の初期値として作られた (GARP の用語で

言えば III a) 格子点データよりも悪いことを意味するわけではなく, ずっと多くの人に利用された結果である。III b データについて表面化した問題点の大部分は数値予報の格子点データにもあてはまる。

FGGE (第1回 GARP 全球実験) の観測段階は1978年12月から1979年11月までの1年間にわたって行われた。「第2回」がなくなったためか, この実験の正式の名前は GWE (全球気象実験) と変わったが, この期間の観測をもとに作られたデータセットは一般に「FGGE データ」と呼ばれている。この報告では, 実験とデータの両方にわたって, 一貫して FGGE と呼ぶことにする。FGGE の特長の第1は, 熱帯と南半球中緯度に観測網を強化したことであり, 第2は, 天気予報のための即時の報告のほかに, 遅れて集められた報告も使って, 質のよい格子点データセットを作ったことである。

FGGE の実施に先立って, 「データのレベル」という概念が定義された (ICSU-WMO JOC, 1973)。観測の現場で得られる物理量の値に対応する数値の集まりがレ

\* Problem notes about FGGE "main" III b datasets of ECMWF and GFDL.

\*\* Kooiti Masuda, 東京大学理学部地球物理学教室。

ベル I データ, それを加工して得られた気象要素の値の集まり (気象電報で送られているようなもの) がレベル II データ, 数値モデルの初期値として使えるような物理的につつまの合った場の量がレベル III データである。なお, レベルの番号につけられた「a」は即時型のデータ, 「b」は遅れて来た報告を含めたデータ, 「c」は気候研究のために特に編集されたデータをさす。「レベル II a」と「III a」は現業の数値予報センターで作られたものである。

FGGE の「II b」データはスウェーデンの気象水文研究所 (SMHI) で編集された。SMHI では, SMHI に集められた衛星や新しい測器による観測データ, ソ連の水文気象センターに集められた地表観測やラジオゾンデのデータとアメリカ合衆国の NMC からの「II a」データとをまぜて, 1980 年に II b データを編集した。これはあとの final II b と区別して, main II b と呼ばれることがある。この main II b を主な材料として, ECMWF (ヨーロッパ中期天気予報センター, イギリスのレディングにある) と GFDL (地球流体力学研究所, アメリカ合衆国のプリンストンにある) が FGGE の全期間について III b データセットを作った。これは main III b と呼ばれることがある。この 2 か所が正式の III b データ作成者だが, このほかにも III b 格子点データを作ったところはいくつかある (Daley ら, 1985)。なかでも GLA (NASA ゴッダード宇宙航空センター大気研究所) は  $4^{\circ} \times 5^{\circ}$  の格子で 1 年分のデータセットを作っており, さらに高い分解能でのデータ同化を計画中だということである (Susskind ら, 1987)。

II b データセットは, ECMWF で III b データを作る過程で行なわれたチェックをはじめとして, いろいろな利用者によって調べられ, 多くの問題点が見つかった (Julian, 1985 a)。また, FGGE の期間中に行なわれた MONEX などの実験観測のデータや, 一部の衛星データは main II b の編集に間に合わなかった。そこで, SMHI では II b を改訂して「final II b」を作ることになった。その最初の版は 1983 年にできた (Kaneshige, 1984 a) が, さらに修正 (Kaneshige, 1984 b) を加えて, 1984 年末に完成した。この新しい II b データセットを使って, ECMWF と GFDL では FGGE の強化観測期間 (1・2・5・6 月) について新しい格子点データ「final III b」を作ることになった。(Källberg・Uppala, 1985; Stern・Ploshay, 1987)。

この報告では ECMWF と GFDL の main III b デー

タに限って, 利用者が注意すべき問題点を述べる。(Final III b については, 8 節で簡単にふれる。) 情報の一部は, 筆者の南北熱輸送 (Masuda, 1987), 水収支および熱源 (執筆準備中) の解析過程で得られたものであり, そのほかは, アメリカ合衆国 GARP 委員会 FGGE 顧問部会 (USA 科学アカデミー気付) から発行されている「GWE Newsletter」など, いろいろな技術報告類から得たものである。

## 2. Main III b データセットを作った 4 次元同化の方法: ECMWF と GFDL の違い

二つの III b データはいずれも「4 次元同化」と呼ばれる技術によって作られたものである。4 次元同化は, 二つの意味で数値予報モデルを使っている。一つは, 限られたデータを空間方向とともに時間方向にも内外挿するために, 運動方程式による予報 (時間的補外) を使うことであり, もう一つは物理的につつまの合った気象要素の場が得られるようにすることである。4 次元同化には大きく分けて二つの方法, 断続的方法と連続的方法がある (Bourke ら, 1985; Miyakoda, 1986)。

### 2.1 ECMWF の方式

ECMWF では断続的方法をとっている。つまり, 内挿, Initialization, 予報の三つの過程がはっきり区別されて順に行なわれる。空間的内挿は 6 時間に 1 回, 「最適内挿法」(OI) を使って行われる。これは, 格子点解析値として, 観測値と初期推定値 (ここでは 6 時間予報値) との線形結合のうちで推定誤差が最小になるものを採用するものである。ECMWF では, 質量 (等圧面高度) と風との相関を考慮した多変量の OI を使っている。水蒸気はこれらとは別に, OI ではなく一種の繰り返し修正法で内挿している。内挿の次に, non-linear normal mode initialization (NLNMI; たとえば Daley, 1981 参照) という手続きをして短周期の変動 (ここでは重力波モード) を落とす。この initialize された場を初期値として 6 時間予報を行ない, 次の内挿過程のための初期推定値を得る。

“Main III b”を作ったときの ECMWF での同化システムについては Bengtsson ら (1982) の解説がある。内挿過程については, Lorenc (1981) が質量と風について, Lorenc・Tibaldi (1980) が水蒸気について詳しく述べている。予報モデルは, 15 層,  $1.875^{\circ} \times 1.875^{\circ}$  (いわゆる N48) の格子点モデルであり, Bengtsson (1980) の記述がある。III b データセットの特徴と主な

問題点は Bengtsson (1983) が報告している。

## 2.2 GFDL の方式

GFDL では連続的方法をとった。大まかにいえば、観測データをさしこみながらモデルを走らせ続ける方法である。まず、観測値を格子点に内挿する。こうして求められた格子点値が「観測された場」とみなされる。ある程度以上確かな「観測値」が得られた格子点ではモデルの予報値を常に「観測値」に置きかえながらモデルを走らせる。

格子点の「観測値」は3時間ごとに更新する。この内挿過程では1変量のOIを使い、質量と風とはそれぞれ独立に格子点値を計算している。OIは観測値と初期推定値(背景値)との線形結合で格子点値を求めるものだが、その背景値としてはある時間前の同化結果を使う。背景値の更新は12時間ごとである。なおNLNMIを6時間ごとに行なっているが、ここでは、固有周期が6時間以下のモードだけの振幅を調節し、周期の長いモードには手を加えない。(NLNMIは絶対に必要なものではなく、連続型ではUKMO(Lorenc, 1985)、断続型ではGLA(Baker, 1983)はNLNMIを含まない同化方式をとっている。いずれも時間積分の過程で連続的に重力波型のノイズを落とす手段を用いている。)

“Main Ⅲb”のための同化システムはSternら(1985)が解説している。GATEデータによる同化実験の報告(Miyakodaら, 1982)も参考になる。予報モデルはGordon・Stern(1982)に述べられているスペクトルモデルの、18層、波数30のひし形切断のものである。Ⅲbデータの特徴と注意点はMiyakodaら(1983)が報告している。

## 3. 風の発散成分の問題

ECMWFとGFDLの格子点データは、風の(各等圧面でも)回転成分についてはよく合っているが、発散成分は非常に違う。GFDLのほうが発散が大きい。このことは運動エネルギースペクトル(3.1.1節)やハドレー循環(3.1.2節)のような大気全体としての性質にも現われてくる。ECMWFの方式にはこのほかにも問題があって、発散の分散の水平分布に奇妙なパタンが現われる(3.1.3節)。

Julian(1985b)は、格子点値の風を近くの観測値と比べるなどいろいろな比較を行い、次のような主観的評価を下している。「ECMWFⅢbの熱帯の流れの場は弱すぎるけれども、GFDLⅢbの全球規模より小さいス

ケールの場合は活発すぎるし観測値を無視していることがよくある。」

発散成分について大きな違いが出る原因の候補としては、4次元同化に対する態度の違い(3.2.1節)、NLNMI(3.2.2)、OIの方式、特に共分散行列を導くのに使われた仮定(3.2.3)、観測値の品質管理の問題(3.2.4)、積雲のパラメタリゼーション(3.2.5)などが考えられる。どの理由がどれだけきいているか(あるいはきいていないか)はよくわからない。

なお、ECMWFⅢbでNLNMIのあとで記録された一部の量についての注意を3.3節で述べる。また、発散成分に見られる見かけの日変化について3.4節でふれる。

### 3.1 問題の現われ方

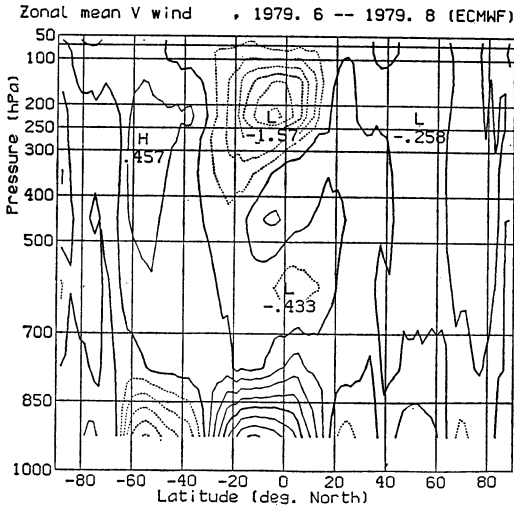
#### 3.1.1 エネルギースペクトルの違い

Julian(1985b)は熱帯(南緯25°、北緯25°の間)の200hPaレベルの風の発散成分のもつ運動エネルギーの東西波数に対するスペクトルを、ECMWFとGFDLのⅢbについて調べた。2回の強化観測期間からそれぞれ3回、合計6回の時刻をサンプルとしてとったものである。その報告の第1図によると、GFDLデータのパワーは東西波数の小さいところ(1から8)でECMWFデータの約2倍である。また東西波数の大きいところ(8から20)では、ますます違いが大きくなっている。(GFDLデータのパワーがほぼ波数の-1乗に比例するのに対して、ECMWFデータのほうはほぼ-2乗に比例する。)

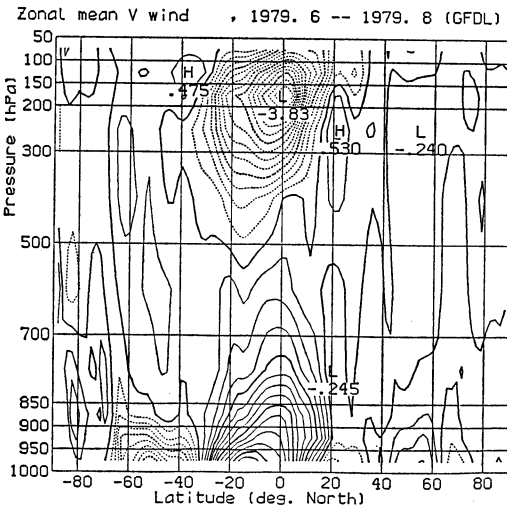
#### 3.1.2 ハドレー循環の違い

風の回転成分を東西に一周平均すれば0になるから、平均子午面循環はそれぞれの面での発散成分からなっている。したがって、データセットの間の発散成分の違いは、平均子午面循環の違いとしても現われてくる(Kung・Tanaka, 1983; Lau, 1984b, 1985など)。

ここでは第1図にECMWF、第2図にGFDLのデータの風の場合から計算した1979年6・7・8月の3か月平均、東西平均の風の南北成分(南風が正)を示す。質量の重みをかけて標準気圧面の間の層の平均の風を計算してプロットした。赤道を横切る、地面付近の南風と圏界面付近の北風は冬(南)半球のハドレー循環の一部である。これの強さが、GFDLデータではECMWFデータの2倍になっている。ほかの季節では、データの間の違いはこれより小さいが、無視はできない大きさである。参考として、Oort(1983)が10年間(1963~1973)の

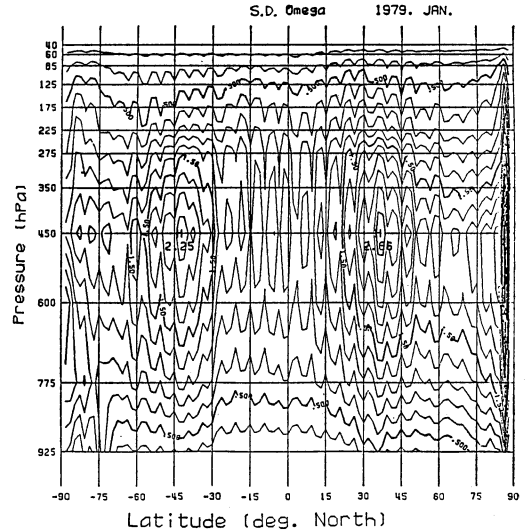


第1図 1979年6・7・8月の期間平均の、東西平均した南北風(南風が正, 単位  $\text{m s}^{-1}$ , 等値線間隔は0.25), ECMWF Ⅲb による。



第2図 1979年6・7・8月の期間平均の、東西平均した南北風(南風が正, 単位  $\text{m s}^{-1}$ , 等値線間隔は0.25), GFDL Ⅲb による。

ラジオゾンデ観測点データを解析して求めた同じ季節の平均子午面循環の風速を見ると, 200 hPa で  $-3.0 \text{ m s}^{-1}$ , 1000 hPa で  $+2.8 \text{ m s}^{-1}$  であり, ちょうど二つの Ⅲb データの間にくる。もちろん Oort の使うことのできた赤道付近の観測点はごく少なく, これを基準として FGGE データを評価するわけにはいかない。



第3図 1979年1月の鉛直P速度( $\omega$ )の標準偏差(1日2回の62回の時刻と東西方向192の格子点をサンプルとみなして計算した分散の平方根)。単位は  $10^{-3} \text{ hPa s}^{-1}$ , 等値線間隔は0.2, ECMWF Ⅲb の水平の風から質量保存の式で計算したもの。(上川, 角間による)

### 3.1.3 ECMWF データの発散の水平分布

第3図に示すのは, ECMWF の水平の風のデータから質量保存の式によって計算した1979年1月の鉛直P速度( $\omega$ )の標準偏差(経度方向192の格子点の32回の時刻をサンプルと見なして計算した分散の平方根)である。 $\omega$ の計算では, 境界条件として ECMWF Ⅲb の同化で使われたモデルの地表面の高さと 40 hPa 面とでいずれも質量の出入りがないことを仮定し, 鉛直に積分した発散を誤差が高さによらないと仮定して補正した。この結果を見ると, ある緯度ではまわりよりも発散の変動が小さい。そういう緯度はほぼ周期的に現われていることがわかる。

## 3.2 考えられる原因

### 3.2.1 4次元同化の思想の違い

発散にみられるこのような違いは, ある意味では, 両者の4次元同化の思想の違いから当然出てくるものである。ECMWF の同化はおもに中・高緯度の中期(約1週間)予報をねらっている。そこで, ノーマルモードの用語を使えば, ロスビーモードに着目している。重力波モードは, 多くの場合「気象シグナル」をぼかし, ときにはだめにするノイズと考えられ, 抑制される。

一方 GFDL の同化はなめらかな場だけでなくより細かい現象の活動度もなるべく正しく再現しようとするより野心的な実験である。GATE データによる実験 (Miyakoda ら, 1976, 1982) 以来、ハドレー循環と熱帯擾乱の再現も重要な目的である。そこでは重力波の抑制はほんとうに必要な場合に限って行なわれる。

### 3.2.2 NLNMI の方式の違い

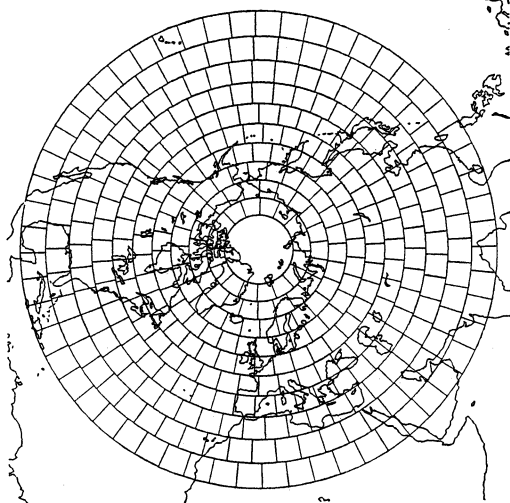
このような思想の違いは、NLNMI の適用のしかたにも現われている。ECMWF では、鉛直構造が低次から5番目までの重力波モードはすべて振幅の時間変化率が初期にゼロになるように調節された。変化率の計算の際には、運動は断熱的だと仮定された。現実の熱帯では、熱力学の方程式の主要なつりあいは加熱と温位の鉛直移流とのつりあいであり、ハドレー循環は ITCZ の積雲の中での加熱によって維持されている。断熱の仮定は、加熱につりあった鉛直運動、それにともなった水平発散を無視することになる。その結果、断熱の NLNMI はハドレー循環の強さを半分にしてしまう (Temperton, 1981)。ECMWF III b データの水平の風は内挿のあと、NLNMI の前のものだけれども、かなりの情報は初期推定値である6時間予報値からきている。モデルの中での熱帯の風の発散成分の回復にはおよそ1日の時間がかかるから (Bengtsson, 1981)、NLNMI が発散をつぶす効果は III b データにも相当大きく現われていると思われる。

GFDL のほうは、固有周期が6時間より短いモードだけを調節した。これより短い変動は3時間ごとにまとめられた観測データで表現できないからである (Stern ら, 1985)。長い周期のモードには手をつけない。

なお、鉛直構造は7番目のモードまで調節の対象としたが、モードの振幅を決める繰り返し計算が収束しないことがあった。そこで、7月21日以後のデータでは4番目以上のモードについてはこの繰り返し計算を省略することにした (Miyakoda ら, 1983)。

### 3.2.3 ECMWF の OI の共分散行列

ECMWF の内挿過程では、風と等圧面高度の観測誤差の共分散を考慮した多変量の OI を採用している。共分散行列は、風の場合が基本的に発散なしであるという仮定をおいた理論的考察から決められている (Lorenz, 1981)。風と等圧面の相関は熱帯ではゆるめられるけれども、発散なしに代わった別の構造が導入されるわけではない。Ikawa (1984)、Daley (1985) によれば、OI の共分散行列はフィルターの働きをし、発散なしの共分



第4図 ECMWF の内挿で使っている箱の配置。箱は北緯18°と78°の間だけ示してある。Lönnerberg, 1983に基づき筆者が作図。

散行列を使えば風の発散成分は観測値からは取り込まれない (初期推定値からくる分は別である)。ただしそれは任意の格子点の値の推定にすべての観測値を使うような理想的な場合の話である。実際の ECMWF の方式では、660 km × 660 km の箱ごとに格子点への内挿が行なわれる。第4図に箱の配置を北緯18°から78°の範囲について示した (Lönnerberg, 1983の第7図に基づき、経度範囲を全周に広げたもの)。一つの箱に限れば、状況は Ikawa の理想的な場合と同様であり、発散はほとんど初期推定値からしかこないと考えられる。ところが初期推定値は6時間予報値であり、発散成分はさきに述べた NLNMI による抑制からあまり回復していない。一方、違う箱の風は独立に (使われる観測値の一部は共通だけれども) 内挿されるから、複数の箱にまたがって計算した発散は現実的な大きさになると考えられる。このようにして、第3図のような発散の振幅の奇妙な分布は説明がつく。

T. Murakami ら (1984) のように、格子点を一つおきに間引いて 3.75° × 3.75° にしてから中央差分で発散を計算すると、差分はすべて箱をまたがって取ることになるから、発散の場合には場所によるくせはなくわりあいなめらかになる。Kung・Tanaka (1983) のように緯度 4° × 経度 5° に補間したり、Kasahara・Mizzi (1983 b, 1985) のように球関数展開して求めた場合も同様であ

る。しかし、発散なしの共分散行列のために、そのような平均化された発散も大きさは小さくなっているはずである。

### 3.2.4 観測値の品質管理の問題

観測値の報告、伝達、解説の過程でまちがいがはいろいろと、非現実的な値が起こりうる。まちがった観測値を捨て、あやしい値に低い重みを与えるような品質管理が必要である。

ECMWF の方式 (Lönnerberg・Shaw, 1984) では、同じ箱の内挿に使うすべての観測値を使って連立方程式を解くことによって、それぞれの観測値をまわりのすべての観測値を参照してチェックする。したがって、近くに観測があれば最終的に内挿に使われる観測値はよく品質管理されたものだといえることができるだろう。

GFDL など多くの連続型 4 次元同化では、まちがった観測報告の影響は深刻なものになりうる。1 変数の OI を使っているので、風と質量のつりあわない観測がそのまま同化に取りこまれ、モデルのなかで内部重力波や外部重力波を起こし、その結果発散の振幅が大きくなる。

### 3.2.5 積雲のパラメタリゼーション

ECMWF の同化で使われた予報モデルの積雲対流の表現は Kuo (1974) のスキームの変形 (Tiedtke ら, 1979) である。パラメタの調節で変えられるものであるが、多くの場合 Kuo 型のパラメタリゼーションは熱帯の積雲による加熱を低めに見積る傾向がある (時岡達志, 個人的な話)。

GFDL のモデルは Manabe ら (1965) の対流調節を採用していた。対流不安定な成層を調節したとき、温度や水蒸気場が急に変えられるので、これが重力波型のノイズのもとになる可能性がある (栗原宜夫, 個人的な話)。

### 3.3 ECMWF III b の Initialize された場について

ECMWF の同化の内挿過程で計算される基本的変量は標準気圧面の等圧面高度 ( $z$ )、風の東西成分と南北成分 ( $u, v$ ) と海面気圧 ( $p_s$ )、それに水蒸気については二つの標準気圧面ではさまれた層の鉛直に積分した水蒸気含有量である。これらの量が OI のあと、NLNMI の前で記録される。層の水蒸気量は公式に発表された III b データには含まれていない。公式の III b データの気温、相対湿度と鉛直 P 速度 ( $\omega$ ) はこの基本的変量を入力とした NLNMI ルーチンの計算結果であり、Initialize された場である。NLNMI が断熱のものなので、特に熱帯

の  $\omega$  の大きさは非現実的に小さい。温度も NLNMI の影響を受けていると考えられるので (直接見てもわからないが)、Bengtsson (1983) は、等圧面高度から静水圧の関係で導いて水蒸気の浮力の補正をした温度を使うことを利用者に勧めている。

GFDL の III b データは NLNMI の前に記録したものである。ただし  $\omega$  は NLNMI のあとのものである (都田菊郎, 私信)。

### 3.4 風の発散成分の日変化についての疑問点

Kasahara・Mizzi (1983 a) は ECMWF の III b データの強化観測期間の 1 日 4 回の風の場から速度ポテンシャルを計算した。1 日周期と半日周期の変動が見られた。1 日周期は積雲活動の日変化 (M. Murakami, 1983; Albright ら, 1985) で説明されるかもしれないが、半日周期は観測報告が 00 GMT と 12 GMT に比べて 06 GMT と 18 GMT に少ないための人工的なものではないかというのが Kasahara らの推測である。

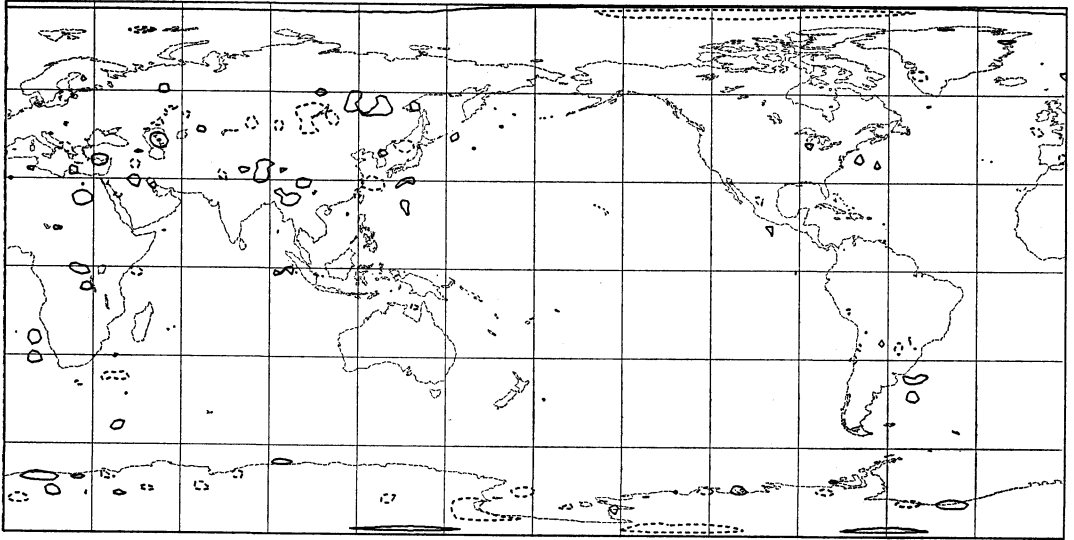
GFDL のデータの発散の日変化については筆者は情報をもっていない。

## 4. 質量の保存しないこと

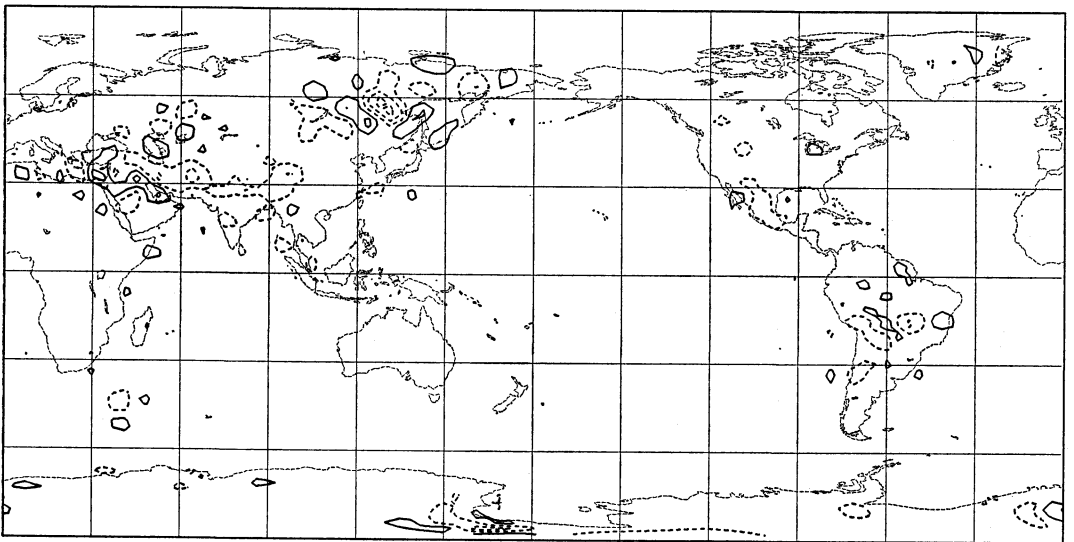
FGGE で 4 次元同化が行なわれた目的に、予報実験の初期値を得ることとともに、エネルギー収支解析や物質輸送の研究に適した、物理的につじつまの合った気象要素の場を得ることがあった。たとえば全エネルギーの収支を論じようとすれば、質量保存が前提となる。ところが、実際の III b データでは、質量保存は完全に満たされてはいない。特に山のところで誤差が大きい。この問題の議論にはいる前に、山のあるところでのエネルギーなどのフラックスの収束量の計算についての注意を 4.1 節で述べる。

### 4.1 地面より下の格子点の値の解釈の問題点

FGGE III b データは標準気圧面と与えられている。鉛直速度を計算するときには、各気圧面で風の水平発散を計算し、それを鉛直に積み上げるのがふつうである。ECMWF の III b データでそのようなことをすると、大きな山脈 (ヒマラヤ、アンデスなど) に平行な非現実的な正と負のパタンが現われる (たとえば Kasahara・Mizzi, 1983 b の加熱率の分布に見られる)。Masuda (1984) の計算でも同様な模様が出たので、空間フィルターを使ってぼかした。このような困難は、山の地表面より上のデータだけを使って計算する (Kasahara・Mizzi, 1984 b) か、 $\sigma$  座標に補間して計算すれば (Ka-



第5図 FGGE の1年間の鉛直積分した見かけの質量フラックスの発散。ECMWF Ⅲb による。単位は  $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、等値線間隔は 0.02。太い実線は 0.01, 0.03, ... 単位, 破線は -0.01, -0.03... 単位の発散を示す。



第6図 FGGE の1年間の鉛直積分した見かけの質量フラックスの発散。GFDL Ⅲb による。単位は  $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、等値線間隔は 0.02。太い実線は 0.01, 0.03, ... 単位, 破線は -0.01, -0.03, ... 単位の発散を示す。

sahara・Mizzi, 1985) 避けられる。

4.2 年平均の質量収支の誤差

ECMWF と GFDL の Ⅲb データはいずれも質量保存を完全には満たしていない。鉛直に積分した質量フラ

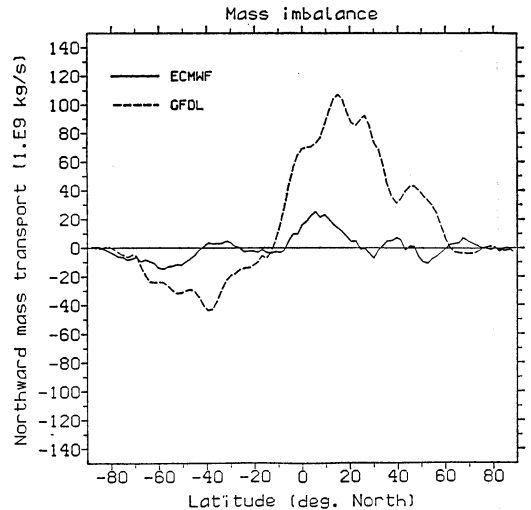
ックスの発散はその場の地表面気圧の時間変化に対応する。たとえば年平均で  $3 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  の質量発散は 1000 hPa/年の気圧変化に対応し、現実のものとは考えられない。しかし、ECMWF (第5図) および GFDL

(第6図)の III b データから計算した質量発散はもっと大きい。計算の詳しい方法は Masuda (1987) の論文に記述してある。各格子点で、領域をデータの与えられた等圧面で層に分割し、それぞれの層の質量発散を求めて合計した。上節で述べた議論に従って、下の境界として ECMWF と GFDL でそれぞれ4次元同化のときに使われた数値モデルの地表面を採用し、気圧は、地表面の高さと等圧面高度から、地表面を含む層で仮温度が一定と仮定して補間して求めた。ただし ECMWF データについては1日2回の値をそのまま使い、GFDL データについては月平均の値を使っている。地表面を含む層および地表面気圧が 1000 hPa を越える場合の最下層は、下の端が地表面になるように変形した。また、領域の上の境界は 50 hPa にとった。それより上の層は観測および同化の誤差が大きいと考えられるので(7.1節)省いたのだが、入れたとしてもあまり大きな違いはない。なお ECMWF データについては、7.4 節の議論に従って 150 hPa の値を使わなかった。

第5・6図によれば質量の誤差が大きいところは大陸上に見られる。東シベリア、チベット高原、西アジア(カスピ海付近)などは ECMWF と GFDL のいずれでも大きく、メキシコと南アメリカ中部には GFDL データの誤差の大きいところがある。誤差の大きいところは極地方にも見られるが、これは発散を計算するとき緯度・経度格子での単純な差分を使ったための誤差かもしれない。海上では一般に誤差が小さい。

Boer・Sargent (1985) と Boer (1986) も同様な計算をしているが、質量の誤差の全球スケールの特徴だけに注目し、見かけの質量フラックスのポテンシャル関数の場を1979年1月と7月について示している。筆者も同じ計算をしてみて、完全に同じではないが(発散の計算、鉛直積分などの方式が違うためか)、空間パターン、量の大きさの程度ともによく似た結果を得た。Boer (1986) は GFDL データについても1日2回の値を使って計算しているので、増田が月平均の値を使って計算したことによる誤差は GFDL の格子点データ自体に含まれる質量発散の誤差とたかだか同じ程度、たぶんそれ以下だと思われる。

第7図には、年平均の、鉛直と経度方向に積分した、見かけの南北の質量輸送を示す。実線が ECMWF データ、破線が GFDL データによるものである。この図から、GFDL データは ECMWF データの約4倍の見かけの両半球間の質量輸送があることがわかる。



第7図 FGGE の1年間の鉛直積分、全経度積分した見かけの質量南北輸送量。実線は ECMWF III b、破線は GFDL III b による。単位は  $10^9 \text{ kg s}^{-1}$ 。

#### 4.3 質量収支の誤差の原因として考えられること

質量収支の誤差が山地で大きいことから、観測値や格子点データの、予報モデルの  $\sigma$  座標から気圧 (P) 座標への変換(補間、補外)が原因ではないかと推測される。ECMWF では内挿過程は P 面で行われており、格子点が地表面より下にあっても、もしそこに空気があったら気象要素がどうなるかという意味での値が計算される。ここでは質量保存の条件をつけていないので、この点で誤差があるのはむしろ当然である。初期推定値として使われる予報値は内挿過程にはいる前に  $\sigma$  座標から補間されてくる。そこでは  $\log(p)$  についての3次のスプラインを使っている (Lönnerberg, 1983)。

なお、NLNMI のあとの場を  $\sigma$  座標で見れば質量保存を満たしているはずである。しかし、Burrige (1985) の報告によれば、FGGE の年の1日4回の Initialize された ECMWF III b データを使って計算してもある程度見かけの質量発散がある。その北半球での最大値は中央アジアで  $7 \times 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  であり、Initialize しないデータで計算したばあいに比べて2けた小さいが、各大陸と海洋のエネルギー収支を計算する場合には無視できない。この程度の誤差は数値の有限けた数での表現のための打ち切り誤差かもしれない。

GFDL では、内挿過程は鉛直方向には  $\sigma$  座標、南北方向は極・赤道間40のガウス緯度(ルジャンドル関数のゼ



口点)で行なわれ、水平には球関数展開された。この形( $\sigma$ , 球関数)では質量保存を満たしていた。保存と公開のために、値は鉛直に $\sigma$ 座標から気圧座標に、また水平に緯度・経度格子(南北には等間隔の極・赤道間48の緯度)に補間された。誤差の原因はこれらの補間としか考えられない。

この経験から考えて、エネルギーなどの収支解析を行なうには、4次元同化の全部の過程もまた収支解析も $\sigma$ 座標面で行なうのがよさそうに思われる。しかし、多変量の内挿をしようとする、山のために水平からはずれた $\sigma$ 面での等圧面高度と風との共分散行列をどう与えるかという困難がある。

## 5. 水蒸気データの問題点

水蒸気データの同化にはたくさん問題がある。水蒸気のゾンデ観測の分布は非常に偏っており、リモートセンシングはまだ発展途上である。したがって同化で作られた水蒸気のはかなり予報モデル、ことにその降水と蒸発のパラメタリゼーションに依存していると考えられる。

この節では ECMWF データについて論じる。なお、GFDL データの水蒸気場は、全体的にでこぼこが大きいと言われている。しかし、筆者はじゅうぶんな例を見ていないので評価はできないが、試みにある日の 1000 hPa の相対湿度の分布を作図してみたところでは、少なくとも熱帯の海上では場はかなりなめらかであるように思われた。

### 5.1 データ源

Main Ⅱb データセットに含まれた主な水蒸気の情報、ラジオゾンデ観測、地表観測および TIROS-N、NOAA 衛星からの観測である。ECMWF main Ⅲb のデータ源はこのⅡbであるが、衛星データは実際には使われていない(水蒸気の変数として層の水蒸気含有量を採用したのは衛星データを取り込む便宜からきているが、観測誤差などの見積もりが間に合わなかったらしい)。一方、GFDL のⅢbは main Ⅱbのほかに Nimbus 7衛星のデータも利用している(Daley ら, 1985; Julian, 1985 a)。

### 5.2 ECMWF での同化システム実現に含まれていた誤り

FGGE 年の早い時期の ECMWF の同化の計算機プログラムに与えたパラメタの一部が不適当だったために、水蒸気データの質が低いものになった(Bengtsson,

1983)。FGGE の初めから1979年3月4日までは、地表観測の雲量からの推定値などの精度の低いデータに大きい重みを与えたために、水蒸気の場合はガタガタしたものになった。3月5日から5月4日までは、今度は観測すべての重みを小さくしすぎて、同化の結果の場はほとんど予報場そのものである。

### 5.3 ECMWF の相対湿度の補外からくる偏り

Lambert (1983) は ECMWF Ⅲb の相対湿度がいちばん下のレベル(1000 hPa)で低すぎると言っている(何と比較したかは述べていない)。Lau (1984 b)は GFDL Ⅲb と比較して、ECMWF Ⅲb の 1000 hPa の湿度が低いと述べている(なお 850 hPa から上では逆になる)。

3.3節で述べたように、ECMWF Ⅲb の相対湿度は、まず内挿過程で標準気圧面ではさまれた層ごとに積分した水蒸気含有量を求め、それを NLNMI ルーチンを通して変換したものである。この変換の中の補間・補外の方法に問題があって上に述べたような偏りが生じるらしい。湿度が NLNMI を受けた場であることによる問題があるかどうかは、この補間・補外の問題に隠れてよくわからない。Masuda (1986) は、正式Ⅲbの相対湿度および気温から層の水蒸気含有量を復元したものと、ECMWF の FGGE Ⅲb 同化の基本内挿変量である層の水蒸気量のデータ(金光正郎氏のご好意による)とを比較した。使ったデータの期間は1979年8月16日から31日まで毎日 00 GMT と 12 GMT の 32 回の時刻である。Ⅲb の相対湿度から層の水蒸気量への変換は次のようにした。各標準気圧面で相対湿度と気温(NLNMI 後のもの)から比湿を計算した。比湿を、各区間で、上のほうが小さい場合(ほとんどの場合)気圧のべきに比例する( $q=q_0 p^r$  の形)、上のほうが大きい場合は気圧の1次関数である( $q=Ap+b$  の形)と仮定し、気圧について積分する。このようにして得られた値をもとの水蒸気量と比較した。第1表に、直線を最小2乗であてはめたときの係数を示す。明らかに、最下層(850~1000 hPa)の相対湿度から再現された水蒸気量はもとのものの90%しかない。おそらく、相対湿度を計算するさいに、比湿を各層の中央から標準気圧面に補間(最下層では補外)するとき、比湿の分布が上に凹であることをじゅうぶん考慮に入れていなかったのではないかと思われる。

## 6. 地表面気圧の観測値に関する問題点

### 6.1 GFDL データの温帯低気圧の浅いこと

FGGE では、南半球中緯度の海上の地表気象要素を

第1表 ECMWF のもとの層の水蒸気含有量と相対温度から再現された水蒸気含有量との線形回帰係数

$x$  を ECMWF 同化システムの基本内挿変量である各層の水蒸気含有量

$y$  を正式 III b の相対温度と温度から計算された各層の水蒸気含有量としたとき

$y=c_1x$  の係数  $c_1$  と,  $x=c_2y$  の係数の逆数  $1/c_2$  を示す.

期間: 1979年8月16日 00 GMT から1979年8月31日 12 GMT まで

使った格子点:  $1.875^\circ \times 1.875^\circ$  のすべての格子点. ただし問題の層が完全に地表面より上にあるものに限る.

層 hPa	300	400	500	700	850
	-400	-500	-700	-850	-1000
$c_1$	0.997	1.009	1.041	0.982	0.901
$1/c_2$	1.008	1.012	1.044	0.985	0.902

観測するために漂流ブイが使われた。ブイ観測の結果、海上の温帯低気圧の地表面気圧はそれまで考えられていたよりも低いことがわかった (Guymer・Le Marshall, 1980)。しかし、GFDL データでは、ブイ観測があっても、低気圧は浅めに表現されていることが多い。また、北半球でも、GFDL では温帯低気圧の急激な発達を表現しそこなうことがときどきある。たとえば、1979年2月19~20日の「大統領の日」の低気圧は ECMWF の解析よりも 6 hPa 浅く出ている (Miyakoda ら, 1983)。

## 6.2 GFDL の同化での品質管理の問題

GFDL の4次元同化でブイや船舶による地表気圧の観測値をうまく取り入れることができなかった理由としては次のようなことが考えられている (a から c は Stern ら, 1985, d は Puri・Stern, 1985による)。(a) 単変量の OI が使われており、しかもそれぞれの観測値の影響しうる範囲の半径が 250 km と、ECMWF の方式 (約 2000 km) に比べて小さい。その結果、孤立した気圧の観測値の影響が現われる格子点の数および変数の数が少ない。(b) OI の初期推定値 (背景値) としては同化結果の場を使っているが、その更新間隔は12時間となっていた。つまり最大12時間たった場を使っていた。(更新間隔をあまり短くしないのは計算量の節約のためと思われる。) その結果、低気圧が急に発達するような時には、正しい気圧の観測をはね出してしまったようになった。(c) OI の格子は経度  $3.75^\circ \times$  緯度約  $2.2^\circ$

であり、ECMWF の  $1.875^\circ \times 1.875^\circ$  よりも粗い。しかも得られた場合は波数30のひし形切断で球関数展開されるので、細かい特徴は表現できない。(d) 初期推定場に重力波型のノイズをたくさん含んでいるために、正しい観測値が初期推定場からの偏差が大きすぎるとしてはね出されることがある。

## 6.3 FGGE の年の代表性についての議論

南半球温帯の海上の気圧が低かったことは FGGE の年については事実であるが、それが気候を代表するものであるかについては論争がある。Trenberth (1984) は1979年の特殊性を強調し、一方 Karoly (1985) は観測網の効果のほうが重要だと考えている。確かなことは、1979年6・7・8月の南極大陸周辺海面気圧が、FGGE 以前あるいは以後を含めた平年値にくらべて 5 hPa くらい低かったことである (van Loon・Mo, 1985; Karoly, 1985)。Trenberth (1984) はこの季節には北半球の海面気圧が高かったことから、これは確かに両半球の間に質量の交換があったことを示し、南半球のデータ密度による見かけのものではないと述べている。また、1972年から1980年のオーストラリアの予報モデルのための客観解析データに基づいて、500 hPa の等圧面高度の分散の極大の緯度が1979年には極側にずれていたと言っている。一方 Karoly (1985) は、FGGE 以後オーストラリアの客観解析の海面気圧は引き続き低いことを示し、またいくつかの観測点での等圧面高度や温度の分散は1977年以後目立って変化はないことも述べている。

## 7. そのほかの問題点

### 7.1 成層圏のデータの問題点

FGGE III b の成層圏のデータは満足のいくものではない。一つの理由は、予報モデルの鉛直レベルの数が成層圏を表現するには少なすぎることである。もう一つは、FGGE でもなお、観測の数が少ないことである。

ECMWF では、熱帯では同化の結果の場は OI の構造関数 (誤差共分散関数) の構造を強く反映しすぎたものになった。FGGE 年の前半の期間、50 hPa から上の初期推定値は予報値と気候 (平年) 値とを混ぜたものであった。また、1978年12月の同化はそれ以後の月に比べていくらか欠点の多い方式で行われていた。(以上、Julian, 1983による。)

GFDL では、上の二つのレベル ( $\sigma=0.002$  と  $0.019$ ) には観測値をさしこまなかった。また、南極付近でこの

二つのレベルの風速がときどき（特に1979年6月10日と10月10日）Courant・Friedrichs・Lewy 条件を越えるほど強くなった。これらの結果、10 hPa から上のレベルの値は不正確と思われる（Miyakoda ら, 1983）。

## 7.2 南西インド洋のまちがった風向

ECMWF で、FGGE main Ⅲb の同化よりあと、現業の同化の系統的誤差を検討した結果（Hollingsworth ら, 1986）インド洋南西部（南緯45°，東経38°）にある島の観測点の基準線の方位が12°以上ずれていたことがわかった。これは孤立した観測点なので、まちがった方位の影響はかなり広い範囲に及んでいると思われる。Kasahara・Mizzi (1984 a) もこの問題にふれている。

## 7.3 そのほかのまちがった観測報告からくる問題点

FGGE (main) Ⅱb データ（観測報告）のさまざまな検討の結果わかった問題点を Julian (1985 a) は5ページにわたって述べている。

そのうちで、シベリアの山地の一部の地表観測点では気圧の海面更正の計算を WMO の観測点カタログの記述と違った方式でしていたらしいことがある。4.2節で述べた質量収支の誤差は特に冬のシベリア東部で大きい。これは観測報告に問題があるのかもしれない。また ECMWF Ⅲb あるいは NMC Ⅲa から計算した加熱率の場に見られる、シベリアの冬の奇妙な熱源、冷源のパタン（Wei ら, 1984; Johnson・Wei, 1985; Masuda, 準備中）もこのせいかもしれない。

## 7.4 ECMWF での、衛星による層厚の扱いについて の問題点

衛星（TIROS-N, NOAA の TOVS）による気温のデータには100 hPa—200 hPa の層厚が含まれているが、ECMWF の OI ではこれを100—150 hPa と150—200 hPa の層厚に分ける必要があった。Julian (1983) によると、FGGE の初めの5～6か月の間、この分割の計算プログラムにまちがいがあった。Lambert (1983) によれば、この結果150 hPa の高度は高くなりすぎ、100 hPa と200 hPa の気温の質が悪いものになっている。Lorenç・Swinbank (1984) は1月の南緯55°の東西平均の気温の、ECMWF データと UKMO データの間の違い（130 hPa で-7.6 K, 200 hPa で+7.7 K）をこのせいだと考えている。（ただし彼らは200—300 hPa の層厚の分割が悪いと言っているが、たぶん100—200 hPa のことだろう。）

ECMWF の同化方式は、衛星による500—700 hPa の層厚観測値の扱いにも、1979年5月4日の分までは問

題があった（Hollingsworth ら, 1985）。

## 7.5 データの圧縮に関する問題

FGGE レベルⅢ データの形式の記述の最新版は WCRP (1986) にある。これは基本的には NMC (1975) の圧縮した2進データの形式を採用したものである。ある変数のある気圧レベルのある半球の値を16ビットの精度にスケールリングして詰め合わせる。GFDL と ECMWF のⅢb データの形式には細かい違いがある。ECMWF は両極についてそれぞれ1行の格子点を与えているが、GFDL は極に格子点を置いていない。したがって ECMWF の格子は192×97, GFDL のは192×95である。また、ECMWF は各格子点の値を全球平均値を基準にスケールリングしているが、GFDL では（NMC Ⅲa と同様に）半球ごとにスケールリングしている。

気象研究所にある ECMWF Ⅲb (WDC-A から取り寄せたもの) を調べてみると、一部の記録の見出し部がまちがっていることがわかった。その大部分は、両半球の見出し部を読んで形式の正しいほうを選ぶことによって対策できる。ただし一つの場合（1979年5月7日12 GMT の気温と相対湿度）はデータ全体が無意味なものになっていた（等圧面高度、風は正しい）。

## 8. ECMWF と GFDL での新しい同化について

### 8.1 ECMWF での“final”Ⅲb の作成

ECMWF では、“final”Ⅱbを材料として、FGGE の強化観測期間（1～2月，5～6月）および12月と7月のデータの同化をやりなおし、“final”Ⅲb を作ることになった。ただし12月の同化は方式の試験としてのものである。同化方式の改良された点は次のようである（Källberg・Uppala, 1985）。（a）OI の共分散行列を改訂した。（b）増分（初期推定値からの差）を補間することによりPから予報モデルのσへの補間の誤差を減らした。（初期推定値のσからPへの補間では量全体を補間するままのようである。）（c）水蒸気の内挿を改善し、極軌道衛星の観測を取り込むようにした。（d）NLNMI に非断熱過程を取り込んだ。（e）海面水温として、(main Ⅲb では気候値だったが) 観測データを解析したものを採用した。（f）予報モデルが改良された。スペクトルモデル（波数63の三角形切断）を採用した。物理過程も改善された。（g）より現実的な地形を組み込んだ。

Uppala (1986) は速報として1979年5月1日—20日の統計量を示し、熱帯のハドレー循環や東西循環にとも

なう大規模な発散が強くなるようになったこと、偏西風ジェットの風速のゾンデ観測とのずれが小さくなったことなどを指摘している。

## 8.2 GFDL での“final”Ⅲb の作成

GFDL でも final Ⅲb を材料として強化観測期間の同化をやりなおすことになった (Stern・Ploshay, 1987)。同化方式の変更点は、(a) ある格子点の内挿に使う観測データを集める範囲を半径250 kmから500 kmに、また観測値の個数を8個から12個にふやした。(b) OIの初期推定値として、最大12時間前の同化値の持続に代わって、6時間予報値を採用した。(c) モデル上部の二つの層にも観測値を内挿したものをさしこむようにした。(d) 予報モデルの水平分解能を波数42のひし形切断に上げた。また物理過程を Gordon・Sterr. (1982) でいう「E4」に変えるとともに、内部重力波による風の減速効果も導入した。(e) ノイズを減らすために、6時間ごとの NLNMI のほかに、毎ステップ Incremental linear normal mode initialization (Puri ら, 1982) を行うことにした。(f) 質量保存の誤差を避けるために、 $\sigma$ 面の値をデータとして残すようにした。

結果の例として「大統領の日」の低気圧の表現が改善されたこと、いろいろな地点での鉛直温度・水蒸気分布が観測値とよく合っていることが示されている。

## 9. まとめ

FGGE では、基本的に同じ観測を使って ECMWF と GFDL が違った態度で同化を行ない、その産物は多くのデータ解析や予報実験に使われた。その結果同化の技法に関するいろいろな問題点が明らかになった。残念ながら今のところ、風の発散成分、水蒸気、および大きな山地のあるところでの気象要素の場の同化については、方法が確立しているとは言えない。しかしこれらに関する部分を含めて同化方式のいくつかの欠点が同定され、同化技術の精度は着実に向上している。

したがって、現時点での同化技術の成果である“final”Ⅲb には“main”よりも相対的には高い精度が期待できる。なまのデータを扱うのは人手のかかる仕事であり、数値予報関係の研究には強化観測期間だけでじゅうぶんということになってしまうのも当然だろう。しかし、気候系の部分システムとしての大気の働きを定量的によりよくつかむためには、FGGE の年全部、改善された技術水準による同化をやりなおすことができれば、また可能なら期間を FGGE 以後に延長することもでき

ればたいへん有効だろうと思う。

## 謝 辞

金光正郎さんには ECMWF Ⅲb のもとの同化変量のデータ、ECMWF モデルの地表面のデータ、そのほか有用な情報をいただいた。千葉長さん、久保田効さん、山崎孝治さん、住明正さん、佐藤信夫さん、岩嶋樹さんには FGGE Ⅲb データの利用の上でお世話になった。Ngar-Cheung Lau さんには GFDL Ⅲb データの月別統計値データを、Jeffrey Ploshay さんには GFDL モデルの地表面データを送っていただいた。GWE Newsletter の前の編集長(故) Thomas O'Neill さんにはニュースレターや NAS のワークショップの報告集を送っていただいた。都田菊郎さん、田中博さん、Kevin Trenberth さん、猪川元興さん、笠原彰さんには役にたつコメントをいただいた。第3図の鉛直速度の計算は上川俊一さんと角間和男さんによるものである。みなさんに感謝する。さらに、1960年代初期の発案の段階 (Smagorinsky, 1986) から、GARP の国際事業を組織し、FGGE を可能にくださった多くの人々にも感謝をさげたい。なお、図には NCAR グラフィックス (東京大学で HITAC 計算機に適合させたもの) を使った。

## 略語一覧

ECMWF: ヨーロッパ中期天気予報センター

FGGE: 第1回 GARP 全球実験

GARP: 全球大気研究計画 (定訳は、「地球大気開発計画」)

GATE: GARP 大西大洋熱帯実験

GFDL: 地球流体力学研究所 (USA の NOAA の一機関)

GLA: ゴッダード宇宙航空センター大気研究所 (USA の NASA の一機関)

GWE: 全球気象実験 (FGGE と同じ)

ICSU: 国際学術連合会議

ITCZ: 熱帯収束帯

JOC: (GARP のための ICSU と WMO の) 共同組織委員会

JSC: (WCRP のための ICSU と WMO の) 共同科学委員会

MONEX: モンスーン実験 (GARP の一部)

NAS: (USA の) 国立科学アカデミー

NASA: (USA の) 航空宇宙局

NCAR : (USA の) 国立大気研究センター  
 NLNMI : Non-linear normal mode initializer  
 NMC : (ここでは USA の) 全国天気予報センター  
 (NOAA の一機関)  
 NOAA : (USA の) 海洋大気局, またはその極軌道衛星  
 OI : 最適内挿法  
 SMHI : スウェーデン気象水文研究所  
 UKMO : イギリス気象局  
 USA : アメリカ合衆国  
 WCRP : 世界気候研究計画 (定訳は「気候変動国際協  
 同研究計画」)  
 WDC-A : 世界データセンターA (気象についてのセン  
 ターは USA の NOAA の National Climatic  
 Data Center)  
 WMO : 世界気象機関

### 参考文献

(Masuda, 1987は筆者までご請求があればお送り  
 します。また、一般に出版されていない引用文献を  
 読みたいかたも筆者までお問い合わせください)

Albright, M., Recker, E.E., Reed, R. J. and Dang,  
 R., 1985: The diurnal variation of deep con-  
 vection and inferred precipitation in the central  
 tropical Pacific during January-February 1979.  
**Mon. Wea. Rev.**, 113, 1663-1680.

Baker, W.E., 1983: Objective analysis and assim-  
 ilation of observational data from FGGE.  
**Mon. Wea. Rev.**, 111, 328-342.

Bengtsson, L., 1980: European Centre for Me-  
 dium-Range Weather Forecasts. "Catalogue of  
 numerical atmospheric models for the First  
 GARP Global Experiment. Part I. Analysis  
 and forecast systems", 287-340. JSC c/o WMO.

Bengtsson, L., 1981: Current problems in four-  
 dimensional data assimilation. "Seminar 1980:  
 Data assimilation methods", 195-217. ECMWF.

Bengtsson, L., 1983: The ECMWF level III-b  
 data set. **GWE Newsletter**, No. 1, 1-7 [FGGE  
 Advisory Panel, U.S. Committee for GARP,  
 National Academy of Sciences (NAS), Wash-  
 ington D.C.],

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

Boer, G. J. and Sargent, N.E., 1985: Vertically  
 integrated budgets of mass and energy for the  
 globe. **J. Atmos. Sci.**, 42, 1592-1613.

Boer, G. J., 1986: A comparison of mass and  
 energy budgets from two FGGE datasets and

a GCM. **Mon. Wea. Rev.**, 114, 885-902.

Bourke, W., Seaman, R. and Puri, K., 1985:  
 Data assimilation. **Adv. Geophys.**, 28 B, 123-  
 155.

Burridge, D., 1985: Energy flux divergence cal-  
 culation from ECMWF analyses for the FGGE  
 year. **GARP Special Report** No. 42 (Report  
 of the seminar on progress in diagnostic studies  
 of the global atmospheric circulation as a  
 result of the Global Weather Experiment, Hel-  
 sinki, August 1984), II-1-14. JSC c/o WMO.  
 Daley, R., 1981: Normal mode initialization.  
**Rev. Geophys. Space Phys.**, 19, 450-468.

Daley, R., 1985: The analysis of synoptic scale  
 divergence by a statistical interpolation pro-  
 cedure. **Mon. Wea. Rev.**, 113, 1066-1079.

Daley, R., Hollingsworth, A., Ploshay, J., Miya-  
 koda, K., Baker, W., Kalnay, E., Day, C.,  
 Krishnamurti, T. and Barker, E., 1985: Objec-  
 tive analysis and assimilation techniques used  
 for the production of FGGE IIIb analyses.  
**Bull. Amer. Meteor. Soc.**, 77, 532-538.

Gordon, C.T. and Stern, W.F., 1982: A descrip-  
 tion of the GFDL global spectral model. **Mon.  
 Wea. Rev.**, 110, 625-644.

Guymmer, L.B. and Le Marshall, J.F., 1980:  
 Impact of FGGE buoy data on southern hemi-  
 sphere analyses. **Australian Meteorol. Mag.**,  
 28, 19-42 [reproduced in **Bull. Amer. Me-  
 teor. Soc.**, 62, 38-47.]

Hollingsworth, A., Lorenc, A.C., Tracton, M.S.,  
 Arpe, K., Cats, G., Uppala, S. and Källberg,  
 P., 1985: The response of numerical weather  
 prediction systems to FGGE level IIIb data.  
 Part I: Analyses. **Quart. J. Roy. Meteor.  
 Soc.**, 111, 1-66.

Hollingsworth, A., Shaw, D.B., Lönnberg, P.,  
 Illari, L., Arpe, K. and Simmons, A. J., 1986:  
 Monitoring of observation and analysis quality  
 by a data assimilation system. **Mon. Wea.  
 Rev.**, 114, 861-879.

Holopainen, E., 1986: Global diagnostic studies  
 based on data collected during the global ex-  
 periment. **GARP Publication Series** No. 26  
 (International conference on the results of the  
 Global Weather Experiment and their implica-  
 tions for the World Weather Watch), Vol. 1,  
 255-275. JSC c/o WMO.

ICSU-WMO JOC, 1973: The First GARP Global  
 Experiment: Objectives and Plans. **GARP Pub-  
 lication Series**, No. 11, 107 pp. JOC c/o  
 WMO.

Ikawa, M., 1984: Generalization of multivariate  
 optimum interpolation method and the roles of

- linear constraint and covariance matrix in the method. Part 1: in discrete form. **Papers in Meteorology and Geophysics**, 35, 81-102.
- Johnson, D.R. and Wei, M.-Y., 1985: The planetary distribution of heat sources and sinks during FGGE. "Proceeding of the First National Workshop on the Global Weather Experiment", Vol. 2, Part 1, 299-316. NAS.
- Julian, P.R., 1983: Comments on the ECMWF IIIb analysis data set. **GWE Newsletter**, No. 1, 15-17.
- Julian, P.R., 1985 a: Tropical data sets: Archives, inventories and usage. **GARP Special Report** No. 44 (Report of the Seminar on Progress in Tropical Meteorology as a Result of the Global Weather Experiment, Tallahassee, October 1984), I-1-14. JSC c/o WMO.
- Julian, P.R., 1985 b: Some comparison of ECMWF IIIb and GFDL IIIb analyses in the tropics. "Proceeding of the First National Workshop on the Global Weather Experiment", Vol. 2, Part 1, 211-216. NAS.
- Källberg, P. and Uppala, S., 1985: Reprocessing of the final FGGE level II-b data at ECMWF. **GWE Newsletter**, No. 11, 1-12.
- Kaneshige, T., 1984 a: Report on an assessment of the quality of the FGGE Final II-b data set and actions to be taken to correct some of the discrepancies uncovered. **GWE Newsletter**, No. 4, 2-4.
- Kaneshige, T., 1984 b: Report of a meeting of experts to formulate a strategy for the reproduction of the Final FGGE Level II-b data set. **GWE Newsletter**, No. 5, 6-11.
- Karoly, D.J., 1985: The typicalness of the FGGE year in the southern hemisphere: A southern perspective. **GARP Special Report**, No. 42, I-29-43. JSC c/o WMO.
- Kasahara, A. and Mizzi, A.P. 1983 a: Diurnal variation of the divergence field in the ECMWF level III-b analysis data. **GWE Newsletter**, No. 2, 5-11.
- Kasahara, A. and Mizzi, A.P. 1983 b: On the evaluation of the heating/cooling rate from the ECMWF level III-b analysis data. **GWE Newsletter**, No. 2, 12-17.
- Kasahara, A. and Mizzi, A., 1984 a: Temporal variations of the divergence field in the ECMWF level III-b analysis data. **GWE Newsletter**, No. 7, 15-21.
- Kasahara, A. and Mizzi, A., 1984 b: Calculation of vertical velocity from the FGGE level III analysis data. **GWE Newsletter**, No. 7, 22-27.
- Kasahara, A. and Mizzi, A.P., 1985: Preliminary evaluation of diabatic heating distribution from FGGE level IIIb analysis data. "Proceeding of the First National Workshop on the Global Weather Experiment", Vol. 2, Part 1, 317-329. NAS.
- Kung, E.C. and Tanaka, H., 1983: Energetics analysis of the global circulation during the special observation periods of FGGE. **J. Atmos. Sci.**, 40, 2575-2592.
- Kuo, H.L., 1974: Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large-scale flow. **J. Atmos. Sci.**, 31, 1232-1240.
- Lambert, S.J., 1983: List of known or suspected problems with the ECMWF analyses of FGGE data. **GWE Newsletter**, No. 1, 25.
- Lau, N.-C., 1984 a: Circulation statistics based on FGGE level III-b analyses produced by GFDL. **NOAA Data Report ERL GFDL-5**, 427 pp.
- Lau, N.-C., 1984 b: A comparison of circulation statistics based on FGGE level III-b analyses produced by GFDL and ECMWF for the special observing periods. **NOAA Data Report ERL GFDL-6**, 237 pp.
- Lau, N.-C., 1985: Publication of circulation statistics based on FGGE level III-b analyses produced by GFDL and ECMWF. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, 66, 1293-1301.
- Lönnerberg, P., 1983: The ECMWF analysis system. "Seminar/ Workshop 1982: Interpretation of numerical weather prediction products", 1-30. ECMWF.
- Lönnerberg, P. and Shaw, D., 1984: Data selection and quality control in the ECMWF analysis system. "Workshop on the use and quality control of meteorological observations", 225-254. ECMWF.
- Lorenc, A., 1981: A global three-dimensional multivariate statistical interpolation scheme. **Mon. Wea. Rev.**, 109, 721-791.
- Lorenc, A.C., 1985: Data assimilation by repeated insertion into a forecast model: Principles, practice, problems and plans. "Seminar/Workshop 1984, Data assimilation systems and observing system experiments with particular emphasis on FGGE", Vol. 2, 191-214. ECMWF.
- Lorenc, A. and Tibaldi, S., 1980: The treatment of humidity in ECMWF's data assimilation scheme. "Atmospheric water vapor" (ed. Deepak, A., Wilkerson, T.D. and Ruhnke, L.H.), Academic Press, New York, 497-511.
- Lorenc, A.C. and Swinbank, R., 1984: On the accuracy of general circulation statistics calculated from FGGE data: A comparison of results

- from two sets of analyses. **Quart. J. Roy. Meteor. Soc.**, 110, 915-942.
- Manabe, S., Smagorinsky, J. and Strickler, R.F., 1965: Simulated climatology of a general circulation model with a hydrologic cycle. **Mon. Wea. Rev.**, 93, 769-798.
- Masuda, K., 1984: Diabatic heating during the FGGE: A preliminary report. **J. Meteor. Soc. Japan**, 62, 702-708.
- Masuda, K., 1986: Interpolation bias of moisture in ECMWF "main" IIIb data. **GWE Newsletter**, No. 15, 6-7.
- Masuda, K., 1987: Meridional heat transport by the atmosphere and the ocean: Analysis of FGGE data. **Meteorological Research Report 87-02**, Division of Meteorology, Geophysical Institute, University of Tokyo. (Substantial part of the paper is submitted to **Tellus**, Ser. A, under the same title.)
- Miyakoda, K., 1986: Assessment of results from different analysis schemes. **GARP Publication Series**, No. 26, Vol. 1, 217-253. JSC c/o WMO.
- Miyakoda, K., Umscheid, L., Lee, D.H., Sirutis, J., Lusen, R. and Pratt, F., 1976: The near-real-time, global, four-dimensional analysis experiment during the GATE period: Part I. **J. Atmos. Sci.**, 33, 561-591.
- Miyakoda, K., Sheldon, J. and Sirutis, J., 1982: Four-dimensional analysis experiment during the GATE period: Part II. **J. Atmos. Sci.**, 36, 486-506.
- Miyakoda, K., Ploshay, J. and Stern, W., 1983: Guide and caution on the GFDL/FGGE data set. **GWE Newsletter**, No. 1, 8-14.
- Murakami, M., 1983: Analysis of the deep convective activity over the western Pacific and Southeast Asia. Part I. Diurnal variation. **J. Meteor. Soc. Japan**, 61, 60-76.
- Murakami, T., Nakazawa, T. and He, J., 1984: On the 40-50 day oscillations during the 1979 northern hemisphere summer, Part II: Heat and moisture budget. **J. Meteor. Soc. Japan**, 62, 469-484.
- NMC (National Meteorological Center), 1975: NMC 360/195 packed data fields. **Office Note 84**, June 1975, revised Nov. 1979. 28 pp. NMC/NOAA, Washington D.C.
- Oort, A.H., 1983: Global atmospheric circulation statistics, 1958-1973. **NOAA Professional Paper**, No. 14, 180 pp. + microfiches.
- Puri, K., Bourke, W. and Seaman, R., 1982: Incremental linear normal mode initialization in four dimensional assimilation. **Mon. Wea. Rev.**, 110, 1773-1785.
- Puri, K. and Stern, W., 1985: Investigations to reduce noise and improve data acceptance in the GFDL 4-dimensional analysis system. "Seminar/Workshop 1984, Data assimilation systems and observing system experiments with particular emphasis on FGGE", Vol. 2, 157-190. ECMWF.
- Smagorinsky, J., 1986: GARP's objectives in weather prediction: Expectations and realizations. **GARP Publication Series**, No. 26, Vol. 1, 19-34. JSC c/o WMO.
- Stern, W.F. and Ploshay, J.J., 1987: The post-FGGE assimilation at GFDL. **GWE Newsletter**, No. 17, 5-13.
- Stern, W.F., Ploshay, J.J. and Miyakoda, K., 1985: Continuous data assimilation at GFDL during FGGE. "Seminar/Workshop 1984, Data assimilation systems and observing system experiments with particular emphasis on FGGE", Vol. 2, 125-156. ECMWF.
- Susskind, J., Reuter, D., Baker, W. and Pfendtner, J., 1987: The GLA interactive forecast-retrieval-analysis cycle for the FGGE year. **GWE Newsletter**, No. 17, 4.
- Temperton, C., 1981: Design of the ECMWF normal mode initialization procedures. "Seminar 1980: Data assimilation methods", 159-193. ECMWF.
- Tiedtke, M., Geleyn, J.-F., Hollingsworth, A. and Louis, J.-F., 1979: ECMWF Model: Parameterization of sub-grid scale processes. **ECMWF Tech. Rep.**, No. 10, 46 pp.
- Trenberth, K.E., 1984: Interannual variability of the southern hemisphere circulation: Representativeness of the year of Global Weather Experiment. **Mon. Wea. Rev.**, 112, 108-123.
- Uppala, S., 1986: Reassimilation of the final FGGE level IIIb dataset at ECMWF. **GWE Newsletter**, No. 14, 1-12.
- van Loon, H., and Mo, K.C., 1985: The representativeness of the zonal harmonic, the yearly, and the half-yearly waves on the southern hemisphere during the Global Weather Experiment. **GARP Special Report**, No. 42, 1-16-28. WMO.
- WCRP, 1986: Formats for international exchange of FGGE level III data sets (Revised, March 1986). WMO/TD-No. 101, 25 pp.
- Wei, M.-Y., Johnson, D.R., Schaack, T.K. and Selin, R.D., 1984: A quick comparison of diabatic heating rates between NMC IIIa and ECMWF IIIb data sets for January 1979. **GWE Newsletter**, No. 4, 11-20.