

## 電子計算機の気象学ならびに地球物理学への 応用についてのシンポジウム (II)

正野: 上のような方法を用いて既に作られたプログラムがあります。最初にその話を東大の都田さん、気象研究所の増田さんからして頂きます。お二人の話は明春から始まる現業用数値予報のプログラムについてであります。現在、気象庁予報課では作業班 (Working Group) を作りまして、そのプログラムの作製など活潑に準備を進めているところであります。更にアメリカのワシントンには岸保・大山両氏が行っており日本で作製したプログラムをアメリカに送り、ワシントンにあります Vanguard Centre の IBM 704 にかけてプログラムのテストを行っております。聞くところによりますと、既にテストを終ったものもあるようであります。その話をこのシンポジウムで伺うのも、有意義かと思ひます。

### 数値予報プログラム JM S001 について

都 田 菊 郎\*

#### は し が き

数値予報の現業化が1959年春から日本でも実現することになった。これはアメリカ、ソ連に次いで世界で3番目で計算機も現在最高の演算速度をもつ IBM 704 型が入ることになっている。演算速度が早いということは、予報作業がスピード・アップされ、それにより、従来諦めていたことも予報現業に次々と組み込んで行ける可能性を与えるということであろう。

しかし、これを行うにはそれだけの準備が必要である。大体数値予報の現業化ということとは並大抵のことではないと思う。本当を云えば、アメリカその他の国のように、研究所あるいは大学で相当の期間にわたって準備がなされることが望ましい。しかし、現状はそうも云ってはおれず、いきなり本番に入ることになった。そこで、現在はいわば挙国一致の体制をとることにして、予報課は勿論、研究所、大学からも人を出して3種の作業班 (Working Group) を組織し、目下準備のため盛んに活動を行っているところである。ここには、その中のバロクリニク予報班\*\*の仕事の一つについて述べるこ

にする。

先づ標題の JM S001 の意味であるが、JM とは Japan Meteorological Agency (気象庁)、S は Short Range Forecast (短期予報)、001 は通し番号で、全体として数値予報のプログラムにつける標示番号である。したがって、今後、短期予報プログラムには、すべてこのような番号がつくことになっている。たとえばすでに作製されたプログラムとして、外に、JM S002, JM S003, JM S004, JM S005, JM S006 がある。

さてプログラム JM S001 の内容について述べる。これは一口で云えば「山の効果を簡略な形で入れた5層モデル予報」で、我々はこれを略号で 5LVBC (5-Level Baroclinic Forecast Program) と呼んでいる。この他のプログラムについては別表に示した

#### 計 算 内 容

このプログラムは大気気圧図 (実際には等圧面高度図) 及び上昇流の立体的予報を目的にしており、標準高度、1000, 850, 700, 500 及び 300mb (ほぼ地上100, 1500, 3000, 6000, 8000mの高度) の等圧面高度の分布を予報対象にしている。その意味でこれを5層モデル予報と呼んでいる。

予報原理は、要するに流体力学方程式を解くことで、したがって説明もそこから始めるのが本当であるが、本稿の目的から考えてこの辺は手短かに説明することにする。

先づ我々の予報したいものは等圧面高度  $z$  の分布、あるいは風の分布である。というのは  $z$  と風との間には地衡風の関係 ( $z$  をあたかも流線関数のように考える) が成り立つことが知られているからである。即ち、

\* 東京大学地球物理学教室

\*\* 鍋島泰夫 (予報課) 在ワシントン、藤原滋水 (予報課)、齋藤直輔 (予報課)、岸保勤三郎 (気研) 在ワシントン、荒川昭夫 (気研)、大山勝通 (予報課) 在ワシントン、千葉勝胤 (IBM)、岡崎司 (IBM)、酒井一義 (IBM)

第 1 表

	内容	略号	略号の意味	備考
JM S 001	5 層モデル予報	5 LVBC	5-level Baroclinic Forecast	山の効果を簡略な形で入れてある。
JM S 002	バロトロピック予報 (地衡風近似)	BT	Barotropic Forecast	
JM S 003	2 層モデル予報	2 LVBC	2-level Baroclinic Forecast	非発散地衡風使用, 山の効果を含む 500 & 850mb
JM S 004	広域バロトロピック予報 (バランス流線使用)	BBTW	Balanced Barotropic Forecast for Wider Domain	アジア, 太平洋を含み, アメリカまで達する(航空用)
JM S 005	バロトロピック予報 (バランス流線使用)	BBT	Balanced Barotropic Forecast	
JM S 006	改良された 5 層モデル予報	5 LBCZ	5-level Baroclinic Forecast II	計算安定度を考慮し, 微小時間間隔を自動的に調節する。

(註) すべてのバロトロピック予報は 500mb level に適用している。

$$\left. \begin{aligned} u &= -\frac{g}{f} \frac{\partial z}{\partial y}, \\ v &= \frac{g}{f} \frac{\partial z}{\partial x}, \end{aligned} \right\}$$

ここに  $u, v$  はそれぞれ風速の東向き, 北向きの成分,  $g$  は重力加速度,  $f$  はコリオリ・パラメーターである。

次に風の変化に関する法則であるが, それは流体力学の方程式が表わしている。しかし, それをそのまま使ったのでは精度が悪いと思われるので, 次の点に着目する。すなわち, 大規模な大気の運動では, 風速ベクトルの二つの成分, 即ち渦動性成分及び発散性成分の中の, 前者の方が大きいということである。これは, つまり渦度方程式 (vorticity equation) を考えるということで, その意味することは風速の渦度  $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{g}{f} \nabla^2 z$  (地衡風近似を用う) はその強さを保存しながら流れる。しかし, 渦がその軸の方向に伸びたり縮んだりすれば渦の強さが変化するという関係である。それを数式で示すと

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \zeta + \zeta D = 0$$

ここで第一項は渦度の時間変化, 第二項で  $\mathbf{V}$  は水平方向の二次元風速ベクトル,  $\nabla$  は二次元ナブラ・オペレーター (空間一次微分) で,  $\mathbf{V} \cdot \nabla \zeta$  としては考える小さな領域から出て行く渦度と入ってくる渦度との差し引きで, 普通, 渦度の移流項と呼ばれている。したがって, もし方程式が第二項までで, 第三項がなければ, 渦はその強さを保存しながら単に流れていくことを示す。ところが, 第三項があると, 渦度は実質的に変化する。第三項で  $D$  は風の発散 (divergence)  $D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$  で, 取

束しつつあるとき ( $D < 0$ ) は流体は鉛直方向に伸びつつあることになり, それに伴って渦度は強くなり, 逆の場合は弱くなる。この第三項はバロクリニック方程式の特徴で, このために水平方向だけでなく, 鉛直方向の考慮をも必要としてくる。

しかし, 以上は絶対静止座標系での話で, これを廻転地球上の流体に適用するときは少しばかり変更しなければならない。即ち, 地球の廻転分だけを附加して渦度は  $\zeta + f$  とする。 ( $f$  はコリオリ・パラメーター) しかも実際には  $f > \zeta$  の場合を取扱うことにして, 我々の式は

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla (\zeta + f) + f D = 0$$

とする。

さて, 次は  $D$  についてであるが, 流体の連続式

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0$$

を通して,  $D$  は鉛直  $p$ -速度  $\omega$  と関係がある。ここに  $p$  は鉛直坐標と考えてよく, 普通の  $z$  の代りに  $p$  を使ったものである。そのために又, 普通の鉛直速度  $w = \frac{dz}{dt}$  の代

りに, 鉛直  $p$ -速度  $\omega = \frac{dp}{dt}$  を使用している。

次は  $\omega$  に関する方程式であるが, この方程式は渦度方程式と気温の変化に関するエネルギー方程式を併用して求められる。そしてその関係は

$$\nabla^2 \omega + \alpha \frac{\partial^2 \omega}{\partial p^2} = F$$

で与えられる。ここで右辺の強制関数  $F$  は

$$F = \frac{1}{S} \left( f \frac{\partial}{\partial p} \mathbf{V} \cdot \nabla \left( -\frac{g}{f} \nabla^2 z + f \right) - g \nabla^2 \mathbf{V} \cdot \nabla \frac{\partial z}{\partial p} \right)$$

ここに  $S$  は大気の静力学的安定度,  $\alpha$  は  $f^2/S$  で, この

量は下層ほど大きい。

計算方式

以上をも一度まとめて書下すと次のようになる。

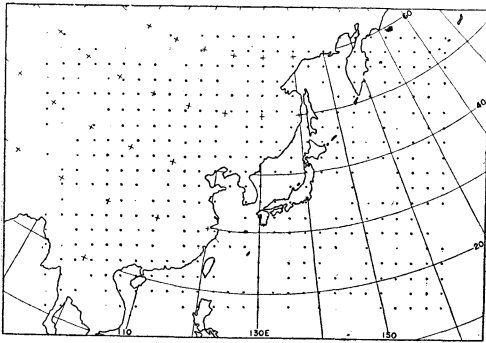
$$(I) \quad \nabla^2 \omega + \alpha \frac{\partial^2 \omega}{\partial p^2} = F$$

$$F = \frac{1}{S} \left( f \frac{\partial}{\partial p} \mathbf{V} \cdot \nabla \left( -\frac{g}{f} \nabla^2 z + f \right) - g \nabla^2 \mathbf{V} \cdot \nabla \frac{\partial z}{\partial p} \right)$$

$$(II) \quad \nabla^2 \frac{\partial z}{\partial t} = \sigma$$

$$\sigma = -\frac{f}{g} \left( \mathbf{V} \cdot \nabla \left( -\frac{g}{f} \nabla^2 z + f \right) - f \frac{\partial \omega}{\partial p} \right)$$

これら数式の計算は空間・時間について差分方程式に書き直して用いられる。そのとき、実際には 300km の格子間隔をもつ、縦20横28の網 (第1図) をあてがい、その格子点について計算を行う。



第1図

さて、再び数式に戻って説明を進める。(I)は数学的には境界値問題で、境界条件さえ与えれば解ける。このとき、境界条件としては、地上で風の山の斜面に沿う滑走を考慮して、 $\omega = -\mathbf{V} \cdot \nabla H$  ( $H$ は山の高さ)とし、大気の上端 100mb で  $\omega = 0$ 、水平の境界でも  $\omega = 0$  を与えている。次に (II) は境界値問題でもあり、又初期値問題でもある。境界条件としては  $\frac{\partial z}{\partial t} = 0$  を仮定している。又、初期値問題としては、time step をのぼして行くのに、中央差分方式 (centered difference method) を用いる。即ち

$$z(t+\Delta t) = z(t-\Delta t) + \left( \frac{\partial z}{\partial t} \right)_t \cdot 2\Delta t$$

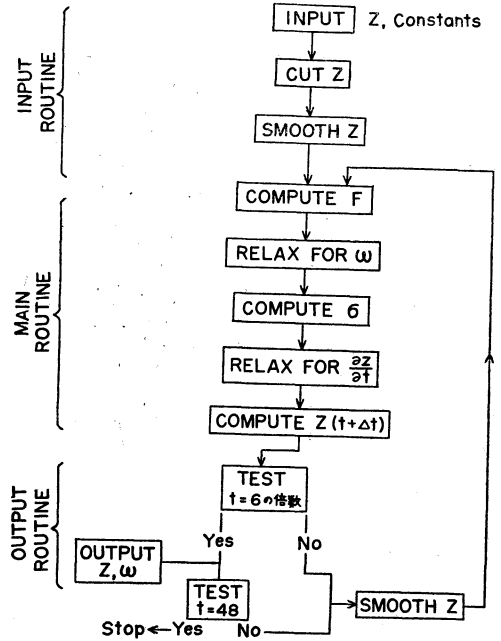
ここに  $\Delta t$  は marching calculation の微小時間間隔で、実際には1時間をとっている。

ところが、ここに別の問題が生じる。それは time step が一つ進行する毎に、情報は境界から一つづつ内側に失われてく。このために、境界のところの  $\nabla^2 z$  を各 time step 毎に推定して行かなければならない。しかし、この推定に普通、境界の内側から外挿する方法がと

られるが、これは気をつけて行わないと、計算上の不安定を起すことが知られている。

Flow Diagram

上の計算の順序を大雑把に示したのが flow diagram である。JM S001 の flow diagram を第2図に示す。



第2図

この図に示したように、計算は大きく分けて、INPUT、MAIN 及び OUTPUT の3つの部分からできている。最初の INPUT では  $Z$  及び計算に必要な常数のカードから機械への読み込み (loading)、及び CUT  $Z$  及び SMOOTH  $Z$  の操作を行う。CUT  $Z$  とは、渦度の強さが余り大き過ぎると、現在用いている予報方程式が成り立たなくなるので、予め渦度の大きい部分を切り捨て (cutting) ておくことであり、SMOOTH  $Z$  とは、元の資料にはいわゆる非系統誤差 (non-systematic error) が含まれているため、これを除去する平滑化 (smoothing) である。次に MAIN ROUTINE であるが、これは前節に述べた計算を順を追って遂行する部分である。最後に OUTPUT では6時間毎に  $z$  と  $\omega$  をプリントをするための time step の判定テスト、48時間目に計算を止めるためのテスト、それにプリント、更には次の time step に行く前の平滑化が含まれている。

FORTRAN による coding

上の計算を計算機にかけるために coding するのであ

るが、我々はこれを FORTRAN 方式で行った。FORTRAN については、それに関する本を参照していただくことにして話を進める(磯部, 参照)。

さて、組んだプログラムはアメリカのワシントンにある人工衛星の軌道の計算で有名な Vanguard Center に送り、そこで編集 (compile) 及び計算テストをしたわけである。coding に要した日数は 20 日間、それも殆んど連日のように夜 12 時近くまでかけて行なった。というのは、Vanguard Center で実際に計算機の操作にあたる大山氏の時間的都合があったからである。この 20 日間の中、かなりの時間は coding のチェックに費している。何しろ、FORTRAN による coding はアメリカにおいてすら、まだそれほど普及しているわけではなく、まして計算機の手許にない日本でそれを組むのであるから途惑うことが少なかった。しかも、5 層モデル予報をルーチンに組むのは世界でも初めての試みであり、その計算量の莫大なことは、これからも述べるように想像を絶する程である。しかし、これ程大きな coding が比較的短時間で出来上ったのは FORTRAN のお蔭だと思っている。もしこれを普通の機械用言語 (machine language) で書き下す coding とか、あるいはそれ程でなくとも SAP (Symbolic Assembly Program) のような標意言語 (symbolic language) の coding でやっていたならば何時出来上ったか判らない。更に、比較的 coding の誤りが少なかったのも FORTRAN があったからである。

さて、その FORTRAN による JM S001 の coding のあらましを述べよう。先ず STATEMENT (命令文章) の数は 415 であった。data field (データ空間) は  $20 \times 28 = 560$  コのものを 5 fields、定数用としてコア記憶装置 (core storage) 73 コを用いている。ところが編集した後には使用しなかったコア記憶装置は 300 コであったから IBM 704 のコア記憶装置が総数 8196 コとして、JMS 001 の命令 (instruction) の数は大体 4980 コになる勘定である。これからみると、命令文章 (statement) の数を 12 倍したものが命令の数になるようである。

ところで一番 coding で問題になったことは、 $\bar{D}O$  という命令文章の数が編集のときに 150 コを超過してはならないことであった。しかも、この  $\bar{D}O$  というのは、明らかに  $\bar{D}O$  となっているものは勿論のこと、磁気テープ (magnetic tape) 及び磁気ドラム (magnetic drum) への input 及び output にも subscripted variable のときには暗々裡に  $\bar{D}O$  が入ってくるのである。いま、

JM S001 の  $\bar{D}O$  の数を示すと第 2 表の如くなる。

第 2 表

	$\bar{D}O$	TAPE	DRUM	計
Input	11	27	4	42
Main	64	70	13	147
Output	5	34	0	39
計	80	137	17	228

したがって、総計では明らかに 150 を超えており、これを INPUT, MAIN, OUTPUT の 3 部分に分割して編集し、その後で再び 1 つのプログラムに統合することにした。この分割編集 (block compilation) のとき注意すべきことは、分割した各部分の頭には必ず、DIMENSION, EQUIVALENCE, FUNCTION, STATEMENT を同じようにそれぞれに付けること、又後尾には STOP をつけ、統合のときに次の部分の頭と連るように細工するわけである。いま一つ忘れてはならないことは、SUBSCRIPT をもたない常数も、この分割編集のときには、DIMENSION が 1 をもっているとして、各部分の頭に全部付けることである。

この他、我々が経験した失敗、それから得た注意事項を参考のために掲げておく。

1.  $\bar{D}O$  STATEMENT が 150 コを超してはならない。
2. くり返ししの計算で、元へ帰ってきたとき、コアの中の状態が前と同じかどうかを確める。
3. SUBROUTINE (PRINT も含む) から帰ってきたとき、コアの内容に注意する。
4. 例えば

$$z_i = z_{i+1} + z_{i-1} - 2z_i$$

の計算のとき、 $z$  と  $z$  を同じ data field にしてはならない。

#### 編集及び計算テスト

Vanguard Center での編集及び計算テストは、最初は大山氏、次は岸保氏、その次は鍋島氏によって行われている。JM S001 の編集は 27 分で完了した。しかし、完成までには 3 コの誤りがあった。誤りがあると計算機は "I am sorry" と標示して、何処が悪いかを知らせてくれるそうである。しかし、これで見つかる誤りは coding 上の非論理的誤りで、論理的誤りは人間が見つけるより外にない。それにしても、この誤り発見 (debugging) が容易であることは、これもまた FORTRAN の特徴であろう。

さて、JM S001 による計算時間は次の通りであった。

Card Loading	3 min	計 2min 30sec/step
Smooth Z	20 sec	
Compute F	30 sec	
Relax for $\omega$	20 sec	
Relax for $\frac{\partial z}{\partial t}$	1min 10sec	
Prepare for next time step	20 sec	
Output Z & $\omega$	30 sec	

計 算 量

JM S001 で行う計算量は莫大なものである。仮に各 time step で繰返えしの部分だけについて評価を行ってみると次のようになる。( $\omega$  の relaxation は 7 回,  $\frac{\partial z}{\partial t}$  は 10 回の繰返し計算 (iteration) を行うものと仮定)

計 算 個 数

	×	÷	±
Compute F	21,099	0	48,135
Relax for $\omega$	69,496	13,103	131,040
Relax for $\frac{\partial z}{\partial t}$	45,764	18,720	230,680
Prepare	4,680	560	11,701
計	141,039	32,384	421,556

そこで、この計算を IBM 704 と人間が卓上計算器で

やったものとを比較してみる。先ず演算 1 コについての計算時間は

	×	+	±
IBM 704	408 $\mu$ s	432 $\mu$ s	98 $\mu$ s
HAND	20sec	30sec	4sec

であるから、IBM 704 ならば全部で 2 分 22 秒かかることになる。ところが人間が手廻し計算器を使って計算すると (hand) 63 日 9 時間 48 分 44 秒かかることになる。今ここで推定した 2 分 22 秒は実測の 2 分 30 秒と非常によく一致している。したがってこの推定が大体正しいことを示すわけである。実に人間が日夜ぶっ通して計算して 2 カ月かかる計算を IBM 704 は 2 分 22 秒でやってくれるのである。

あ と が き

ともかく、1 サイクルの計算が 2 分 30 秒として、我々の目標とする 48 時間予報は 2 時間 7 分 50 秒のできるようになる。しかし、これでもまだ時間が少しかかり過ぎるように思える。しかも、最も問題になることは、果してこのプログラムで予定した計算をチャンとやってくれているかどうかである。実際には計算上の困難がかなりあって我々をなやませている。そしてこれを除去し、更にはスピードを上げるためのプログラムが組まれつつある。

日本気象学会昭和 34 年度大会および例会(第 2 部)予定

昭和34年

- 4 月 休み
- 5 月 20~22日, 気象庁において: 総会および大会 (会期中に超高層大気の特別講演) 講演申込締切は 3 月末日の予定.
- 6 月 山岳気象, 乱流
- 7 月 数値予報, 降水機構
- 8 月 気象学史と気象教育
- 9 月 生気候
- 10 月 気象災害, 気象統計, 大気汚染

- 11 月 大会 (会期中にレーダー気象, 数値予報のシンポジウム), 風のシンポジウム (気象学会が当番)
- 12 月 気象電気, I G Y シンポジウム

昭和35年

- 1 月 太陽活動と気象, 観測と測器
- 2 月 長期予報と気候
- 3 月 航空気象, 綜観気象