1959年3月　天気　Vol. 6, No. 3.

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 (IV)

大気乱流研究への電子計算機の利用

竹内　清秀*

乱流の研究で，安定計算に電子計算機が利用されたことがあるが，大気乱流の研究にはまだ大型の電子計算機が使用されたことはないようである．ここでは，われわれの分野で計算機を利用して行きたいと思う方面を二三述べてみる．

1. 観測ならびに実験の整理

細かい風速及び温度の変動を観測するには，普通熱線を用い，オシログラフに記録させる．データはつぎつぎとできるが，その解析に手間どってしまう．その結果，十分な解析ができないきらいがある．

普通，解析する手段として用いられるものは次のようなものがある．問題を2次元として，水平方向の風速の乱れの成分を u，垂直方向のそれを w，温度の乱れを T とすれば，

乱れの強さ：$\sqrt{\overline{u^2}}$，$\sqrt{\overline{v^2}}$，$\sqrt{\overline{w^2}}$

各種の相関係数：例えば $\overline{u(t)\,u(t-\xi)}$，$\overline{uw}$，$\overline{wT}$

乱れのスペクトル：$\displaystyle\int_0^\infty \overline{u(t)u(t-\xi)} \times \cos 2\pi f\xi\, d\xi$

などである．今，もしアナログ・ディジタル変換器があって，アナログ量の記録を機械的に読み取ることができれば，直ちにこれを電子計算機に入れて結果が出ることとなる．読取を人間が行うとしても，その恩恵は大きい．

次に，風洞実験の整理にも利用される．われわれは，乱れた気流において，その平均風速のプロフィルが安定度にどのように影響されるかを実験している．これにおいて直接観測して得られる値は，温度，動圧と静圧との差などが高さの関数として得られる．これらより，平均風速，その高さに対する微分，あるいは各種の積分値，リチャードソン数などを出すのであるが，常に時間がかかる．これらは，電子計算機のよい問題と考えられる．

2. 測器の動特性の問題

変動する現象を正確に知るには，測器の動特性について調べておかねばならない．もし，測定系が線型であれば，その系の動特性を表現するには伝達関数を用いるのが便利である．（伝達関数については，例えば現代物理学講座，高橋秀俊著：振動と回路を参照）伝達関数を $Y(s)$ とすれば，入力および出力のスペクトルをそれぞれ $G_I(f)$，$G_O(f)$ とすれば次の式がなりたつ．

$$G_I(f)=G_O(f)/|Y(2\pi if)|^2$$

よって記録から実際の乱れのスペクトルを出すには，以上の補正が必要である．また，各種の相関係数を出すには $G_I(f)$ のフーリエ変換を行えばよい．これらは計算機の仕事としてよいものと考えられる．

次に，流線型の測定系では別に考えねばならない．例えば腕型風速計では，いわゆるまわりすぎの現象がある．この現象をよく知るには，非線型の微分方程式の正確な数値群と実験値との比較が大切である．こういう方面にも計算機は有能な働きをするであろう．

3. その外の問題

乱流による熱拡散，ふく射，熱伝導，水の相変化による地表面付近の熱経済の問題が論じられている．最近アナログ計算機で研究されたことがあるが，電子計算機によって解析すれば一層細かいことまで判るようになろう．

その外，大気汚染の研究につれ，煙などの拡散が盛んに取り上げられているが，理論の精密化を計るためにいろいろの数値計算が必要とされている．以上，大気乱流の研究で電子計算機を利用すべき問題をあげたが，電子計算機そのものについて少し述べる．

* 気象庁測器課

電子計算機を有効に使うためには，ただこれまで手で行なっていた計算を機械にやらせるというだけではなく，計算を含む全体の経過を合理的に行うことが大切である．計算機は万能でないという証明はないので，いかにすれば一番合理的かという問題にも計算機は有能な働きをするのであろう．

気象統計の立場から

藤　田　敏　夫*

は　し　が　き

気象現象は全く同じ条件ではないにしても，ある範囲の物理的条件の下に繰返す性質を持っている．このことから大量観察を通して未知の物理法則を帰納的に探求し，又既に理論的に導かれた法則を検定する方法として昔から気象統計なる分野が存在して来た．しかし統計法が記述時代から推測時代に発展するにつれて，かなり高度の数理を使うようになり，計算も複雑多岐に亘るようになった．これまで，わが国でも気象の研究に適するような統計法が数多く研究されて来たが，計算が困難なために例題的にしか取上げられていなかった．しかし 704 の時代には計算量は一応考える必要がないから，精密な統計法を充分に現場で生かすことが出来るだろう．むしろ考慮すべきは，目標とする物理法則を明瞭に抽出するにはどのような資料をそろえたらよいかを物理的に考察することであろう．そして困難なのは，かようにして純粋な（スケールに応じた，分類された，任意に撰ばれた）データを作ることにあるような気がする．

7月の例会のときは時間の関係で予報の話が主になったが，ここでは，はじめに気候統計について少し述べておきたい．

気候統計について

地上の気候要素については，最近出版された〝日本の気候〃が統計年数も1921～1950年に統一されて，新らしい統計値を集録しているから一応問題はないとしても，今後は，生活に結びついた，そして生産に直結したこまかい統計値を地方別に出すこと，そして各測候所で誰でも利用出来る型に編集して備え付けることを提唱したい．気象庁の基本資料を基にしてそれらは 704 で OUT PUT されるだろう．

次にわれわれが現在，最も知りたいのは，日本を囲む極東アジアの三次元的大気大循環の実相である．戦後13年を経た今日，特に2年前からは新中国の豊富な高層資料が提供されている．現に中国では，大循環グループによって確固たる立体的気候図が作製されつつある．日本の気候統計も二次元的，記録的段階から，三次元的，構造論的段階へ飛躍しなければ世界の大勢から取り残されるだけである．幸い季節予報グループ**で大循環の解析のために大循環の基礎資料を大量に計算するので，これらのデータを大いに活用することが望ましい．

次に気候区分の問題がある．純気候的立場からも，季節予報における予報地点の空間的代表性の立場からも，気候の客観的区分法が必要である．この問題を解決する一つの方法として判別函数法が用いられる可能性が大きい***．特に多くの地点に対して同じような計算を繰返す点で 704 を活用すれば，効果的であろう．

この計算の中心問題は多変数統計解析の共通点として判別要因間の分散，共分散 $E(X_iX_j)$ の計算とこれらを要素とする分散共分散行列の逆行列の計算である．そして要因の重要性を個別に検討したいときは，元の変数群（X_1, X_2, ……, X_p）を相互に独立な変数群（Y_1, Y_2……, Y_p）に変換しておくと簡単に判別関数の係数を求めることが出来るし，どの要因が重要であるかを知ることが出来る．この変換の式も FORTRAN を利用すれば極めて容易にプログラムすることが出来る．

確率的予報方式の実施

季節予報は現在では統計的方法に頼らざるを得ない段階である．そしてこの方法にも周期法，相関法，類似法などの多くの特徴ある方法が研究され，実際面である程度の成績を挙げているが，これらを統一的に取扱い，しかも予報精度を明記する方法として確率的予報方式が早くから小河原その他によって研究されて来た．この方式の最大の難点は，取扱ったことのある人のすべてが訴えている計算の複雑さと莫大さにある．ここでは計算の手順を図式に説明して将来，プログラムする時の参考としたい．

(1)　資料として n コづつ m 区間，合計 N コの観測系列が与えられているものとする．

(2)　平均値に関して定常か否か平均値の差の検定を先づ行う．このやり方は各区間の分散に差がない場合であるが，差があるときは分散のちがいを検定してから平均値の検定をすることになる．ここでは複雑になるので省

* 気象研究所予報研究部

** 詳しい内容は朝倉正氏の解説を参照されたい．

*** 気象と統計　8巻　3～4号　p. 11～12 に実際的方法の1例が報告されている．

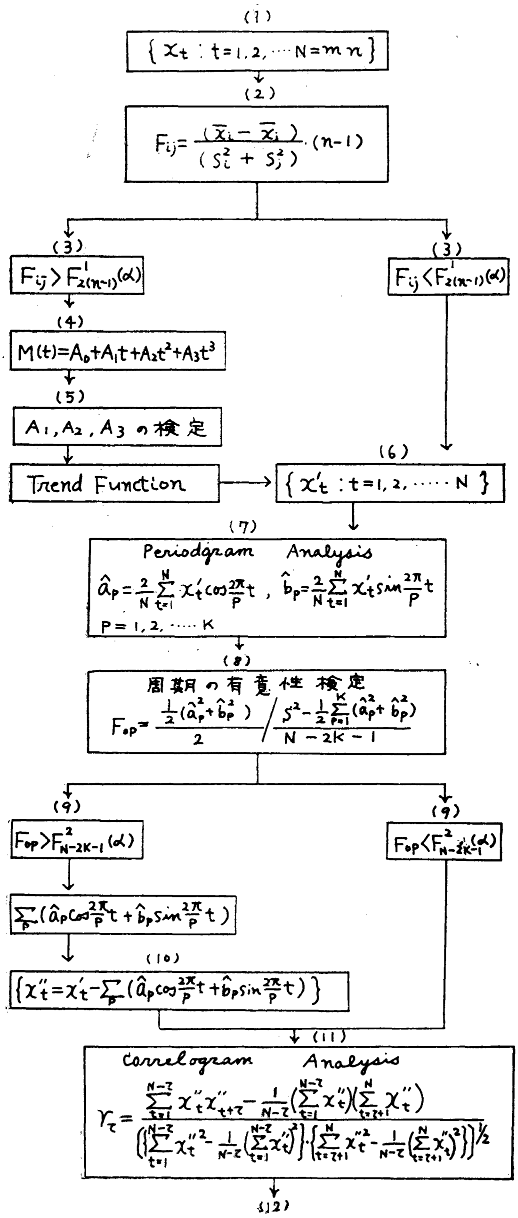
略して話を進める．

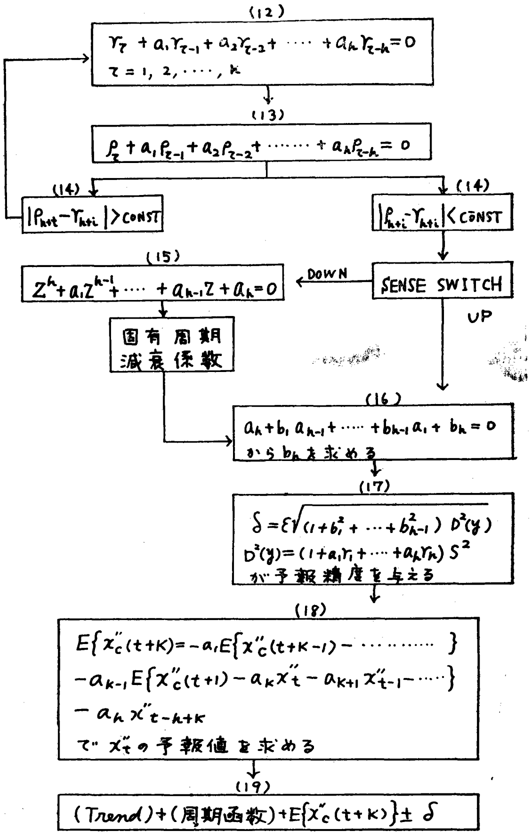
(3) F_{ij} の中，1つでも有意なものがあれば左を通って trend を解析させる．

(4) (2)で求めた $\bar{x}_i$，$\bar{x}_j$ の値を用いて直交多項式のあてはめを行う．多項式の次数は3次位までとっておけば充分であろう．

(5) 多項式の係数の中で有意と判定された部分については trend function として外挿してテープにしまっておく．

計　算　順　序





(6) $\{x_t\}$ からこの trend Function を差引いて定常系列 $\{x_t'\}$ を作る．(2)で各平均値に差が認められない場合は右側を通ってここへ到達する．

(7) 定常な時系列は連続スペクトルに相当する部分と，不連続スペクトル，即ち色々な周期から成立つと考えられるので，ここではペリオドグラム分析を行って周期を見出す．a_p，b_p の計算は手で行うと大変であるが，704 では p を1か K らまで適当に与えて自動的にスペクトラムを求めることが出来る．

(8) この式で各成分波の有意性検定を行い，有意と判定された周期だけをいくつか加え合わせて，再び外挿してテープに貯えておく．(9) そしてからこれらの周期関数を差引けばあとはコレログラム分析の対象となる連続スペクトル部分が残ることになる(10)．

(11) コレログラム分析の基本になる系列相関係数はこの式で計算する．τ は N に相対的に予め与えておく．

(12) γ_τ が求まったら，この連立方程式を解いて a_1, a ……，a_h を決める．h は2から与え始める．

(13) 今求めた $(a_1, a_2, \cdots\cdots, a_h)$ の値をこの式に代入して逆に ρ_{h+1}，$\rho_{h+2}, \cdots\cdots$ を求めて見る．これは h の与え方が適当なら γ_{h+1}，γ_{h+2} と余り変らない筈である．

(14) ρ_{h+i} がすべて予め定められた γ_{h+i} の信頼限界の範囲内にあれば右側を通って(15)へ行くが，1つでも範囲を超えれば(12)で h のとり方が不充分であったので，再び(12)へ戻って h を1つ増して同じ計算を繰返す．

(15) かくして $(a_1, a_2, \cdots\cdots, a_h)$ が最終的に決定されたら，この次の代数方程式の根を求める．定常であるから絶対値が1より大きい根はない筈である．実根は自己相関を指数関数的に減少させるような変動を表わし，虚根は減衰振動で，固有周期と減衰係数を与える．これらは参考のためテープに保存しておく．この段階はセンススイッチで必要に応じて通過すればよい．

(16) $(a_1, a_2 \cdots\cdots a_h)$ からこの式で逐次 $(b_1, b_2, \cdots\cdots, b_{h-1})$ を求める．

(17) $(a_1, a_2, \cdots\cdots a_h)$ からこの式で x''_t の予報値を求める．

(18) 一方 $\{x''t\}$ について分散 s^2 を計算しこれらの式で，誤差 δ を求める．E は必要な確率に応じて与えておく．

(19) 最後に既にテープに保存してあるtrend functionと周期関数の外挿値を加えて，確率を明示した誤差を持つ予報値をプリントさせればよい．

以上は気温などの予報を多くの地点で相互の関連性を無視して実施する方式であるが，相互の関連性を考慮すると問題は非常に複雑になる．これは最近発展して来た多次元時系列の解析になって上記の諸式がすべて行列の演算になるので704に頼るほかは一寸計算できない．

多重回帰方式による統計的予報

最近になって，アメリカでは704を使って色々な方法で等圧面高度を統計的に予報する試みが行われている．それはかなり長期間から at random にとられた多数の資料をもとに相関係数（経験的影響関数）を求め，多重回帰方式で予報する方法である．ソヴェットでは渦度保存の式を多くのデータでチェックし，その結果を使って統計的線型予報が研究されている．これらは，何れも影響関数を使って予報値を求めようとする考え方が基礎になり，実用面に主眼をおいているようだ．ここでは最も簡単な場合について計算の要点を説明しよう．今考える予報式を次のように書く．

$$Z_i(t+1) = A_0 + A_1 Z_1(t) + A_2 Z_2(t) + \cdots\cdots + A_i Z_i(t) + \cdots\cdots + A_p Z_p(t)$$

即ち i 番目の点の1単位先きの予報値はその点を含む周囲の今日の値に weight をつけて求めることになる．この weight を決めるのに，最も純粋なデータを使うように物理を考慮して要因を選ぶわけである．それが出来れば，多元一次連立方程式を解けばよいが要因の数 (p) が多くなるにつれて高速度計算機が必要となってくる．

(1) 先づ等圧面高度の読取値又は観測値の組が与えられる．

(2) この計算式で $i=j$ の場合が自己相関係数 $i \neq j$，の場合が相互相関係数である．更に，i, j のあらゆる組合せについて同時的相関係数を求める必要があるが，実際はこの計算がなかなかぼう大である．

(3) 同時相関を行列に並べると $(p \times p)$ の対称行列になる．この行列の逆行列を求めておく．

(4) 回帰係数は二段階に求める．S_1，$S_2, \cdots S_i, \cdots S_p$は

(1)

$$\{Z_i(t)\} \qquad \{Z_i(t-1)\}$$
$$i=1, 2, \cdots P \qquad t=1, 2, \cdots, N$$

↓

(2)

$$\gamma_1(ij)=\frac{\sum_1^{N-1} Z_i(t)Z_j(t+1)-\frac{1}{N-1}\left(\sum_1^{N-1}Z_i(t)\right)\left(\sum_2^{N}Z_j(t)\right)}{\left[\left\{\sum_1^{N-1}Z_i^2(t)-\frac{1}{N-1}\left(\sum_1^{N-1}Z_i(t)\right)^2\right\}\cdot\left\{\sum_2^{N}Z_j^2(t)-\frac{1}{N-1}\left(\sum_2^{N}Z_j(t)\right)^2\right\}\right]^{1/2}}$$

$\gamma_0(ij)$ は $Z_j(t+1)$ を $Z_j(t)$ において式中の和を1からNまでとり N−1 をNとおいたもの．

↓

(3)

$$\begin{bmatrix} \gamma_0(11) & \gamma_0(12) & \cdots & \gamma_0(1P) \\ & \gamma_0(22) & \cdots & \gamma_0(2P) \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & \gamma_0(PP) \end{bmatrix}^{-1}$$

↓

(4)

$$\begin{bmatrix} \gamma_0(11) & \gamma_0(12) & \cdots & \gamma_0(1P) \\ & \gamma_0(22) & \cdots & \gamma_0(2P) \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & \gamma_0(PP) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \gamma_1(1i) \\ \gamma_1(2i) \\ \vdots \\ \gamma_1(Pi) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A'_1 \\ A'_2 \\ \vdots \\ A'_P \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} A'_1 & & & O \\ & A'_2 & & \\ & & \ddots & \\ O & & & A'_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_i/S_1 \\ S_i/S_2 \\ \vdots \\ S_i/S_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_P \end{bmatrix}$$

各々 Z_1, Z_2, $\cdots Z_i$, $\cdots Z_p$ の標準偏差である．

この方式の利点は回帰係数がうまく決まれば予報値を求めるのが至って簡単なことである．

このほか，等圧面高度を直交関数（二重フーリェ，その他）に展開しておいてその係数を予報する方法も研究されているが，このときは，展開するのに又莫大な計算を必要とする．

最後に，数理統計学の問題であるが，われわれに関係のある部分について少し述べてみよう．

乱数表の作成

まともには解けそうもない微分方程式や積分方程式を解くのに，最近 Monte Carlo 法が使われるが，これには極めて多くの乱数が必要になる．これを作って，自分の使う分布法則に合うように変換するのには704を使うのが最も能率的である．勿論，乱数を作って微分方程式を解くまでをプログラムするのだが……この他に時系列の構造を実験的に研究するのに，パラメーターを与えて model seriesを作りたいことがある．計算は簡単であるが数が無暗に大いのでとても人間のやるようなものではない．

標本分布関数の数値積分

種々の統計量の中で，標本分布が解析的に積分出来ないものがある．重相関係数もその1つで，現在では母集団での重相関が0の場合だけが F- 分布することがわかっている．例えば母集団の値が 0.7 の場合の検定は一般にはできない．ところが0か否かより 0.7 か否かの方が遥かに利用度が多い．例えば重相関係数の標本値の分布法則は

$$f(R^2|\rho^2, n, p)=\frac{(1-R^2)^{\frac{1}{2}(n-p-1)}(1-\rho^2)^{\frac{n}{2}}}{\Gamma\left[\frac{1}{2}(n-p-1)\right]\Gamma\left[\frac{n}{2}\right]}$$

$$\sum_{\mu=0}^{\infty}\frac{(\rho^2)^{\mu}(R^2)^{\frac{1}{2}(p-1)+\mu-1}\Gamma^2\left(\frac{n}{2}+\mu\right)}{\mu\,!\,\Gamma\left[\frac{1}{2}(p-1)+\mu\right]}$$

ここで R は標本の重相関係数
ρ は母集団の 〃
n は標本の大きさ
p は変数の数

ρ, n, p, α に色々な値を与えて R^2 についてこの関数を数値積分して

$$\int_0^{R^2_0} f(R^2\,|\,\rho^2,\ n,\ \rho)\,dR^2=\alpha$$

なる R^2_0 を求めれば，任意の ρ に対する R^2 の有意点の表ができる．式中の級数の収束を早くする工夫が必要であるが，704にはこういう計算が最適ではないだろうか？

これが出来るとわれわれの間での利用価値が大きいことは確実である．

計算に関連した部分だけを書くべき所を余計な説明を大分書いてしまったが，終りに申し添えたいことは，704の桁外れの性能を充分に活用するためには官僚的運営を排し，民主的機構を確立して，ルーチン以外の時間は全国気象官署の誰でもが利用できる態勢を整えて欲しいことである．そしてこのことは704自身が最も望んでいるのではないだろうか？

I.B.M. 704 をめぐる長期予報

朝　倉　　正*

短期予報に用いられる5層モデルのプログラミングが無事テストを終ったことを聞いて何かほっとした明るい気持になった部外者は筆者ばかりではなかろう．世界一と称される FORTRAN のプログラマーさえ知らない方法を考え出した方々の努力とその成功に心からの讃辞と拍手を送りたいと思う．

さて，ふりかえって筆者の専門とする長期予報を考えると， 704を受入れる基本体制は短期予報の場合と本質的に違っているように思われる．それは長期の予報方式が確立されていないことや，北半球全域にわたる大規模な現象を適確に把握しなければならないという現状に由来している．したがって， 704 を使って物理的にプログノを予報できる段階にはもちろん到達していないのであるから，予報のために704 を積極的に使うまでに至っていない段階であるということもできよう．しかし，だからと云って長期予報の面から704 をつかってはいけないということにはならないように思う．

予報期間がながくなるにつれて処理すべき資料は空間的にもますます広く，時間的にもますます長い期間へと拡がってゆくので，とかく資料の整備＝研究（予報）という時代がつづいている．これは見方を変えれば機械のなすべき仕事で人間はそのさきを考えるべきである．資料の整理に忙殺される時代を克服したときに長期予報の中心課題が物理的な機構の解明へと向うのであろう．

そのためにも 704 の導入をめぐって長期予報全般が再検討すべき段階にあるように思われる．

長期予報にも解析センターが必要である

中央に短期予報の解析センターが必要であるように長期予報にも必要でなかろうか．もちろん権威あるプログノが確立されるまでは短期と長期とでは解析センターの

* 気象研究所　予報研究部第2研究室

主眼とする焦点はおのずから違って来よう．長期予報の場合には北半球全域にわたる解析資料をできるだけ正確にかつ速かに集めて地方に流してやる仕事が重要になろう．現在長期予報をだしている各管区や気象台では独立に少い人手を無理して同じ一般流や渦度，あるいは平均図などを計算しているのは人力の浪費ともいうべきでなかろうか．これらの計算に貴重な時間を費し，予報を考える時間が足りないという地方の方々の声を聞くとその感をさらに深めざるを得ない．このような仕事はむしろ中央の資料豊富な北半球天気図から，電子計算機を用いていろいろ必要な基礎的要素を計算し地方に流してやることが必要でなかろうか．人手がないために中央ではシックネス天気図が必要でも作れない状態にあるが，計算機を活用すれば人手の点はかなり緩和される．

このような仕事は一見平凡で価値がないように思われる方々も多いであろうが，実は重要な基礎的仕事で，現業にも研究にも共通した基礎資料は解析センターで作製し整理保存されることが望ましいのでなかろうか．

このような考えでわれわれ長期予報に関心をもっている人々が集り基礎的資料と思われるいろいろな要素を検討し，一応704による下記の要素のプログラミングを進めている．

読取：北半球 500mb 天気図（緯度5度，経度10度）と北半球地上天気図．

要素：(イ) 各格子点におけるζ_g, u_g, v_g, $\sqrt{u_g^2+v_g^2}$, ω_g

(ロ) 緯度毎（5度間隔）に平均した $\bar{u}_g$, $\overline{v_g^2}$, $\frac{\bar{u}_g}{|\bar{v}_g|}$, $\overline{u_g v_g}$, $\overline{u_g\zeta_g}$, $\overline{v_g\zeta_g}$, $\overline{\omega_g\zeta_g}$, $\overline{h'^2}$ など

(ハ) 平均天気図，北半球 500mb，地上および 1000～500mbの thichness chart で平均期間は5日（3日ずらし），10日，15日，30日（15日ずらし）で偏差も計算する．

(ニ) 各緯度圏毎に36項の調和解析

その他

このように書くと長期予報は資料ばかりに704を使うように思われるかも知れないが，もちろんプログノを作るためにも使う予定であるし，研究の面からも704は活用され，数値予報の焦点が長期予報にうつることはきわめて近い将来に実現するであろう．現に日本では10日さきまでの一般流の予報が岸保―荒川（昭）によって成功し，外国でもソヴィエトのBlinovaは70日さきの月平均の地上気温偏差の予報に成功し，Namias もいろいろ苦心しながら在来の統計法から脱却しようとしている．704 の導入は日本の長期予報の前途を一層輝いたものにするであろう．

気候学に対する電子計算機の応用

長　尾　　隆*

気候学の最終の目的は気候の力学的研究と，人文的な性質の説明にあるのであるから，計算機の導入は2つの面から考える必要がある．第1は問題を物理的な面――すなわち気候と人類乃至は動植物との間の弁証法的相互関係を無視する――から考察することである．これは気候学を気象学の一分野と考え大気の物理学として問題を処理するのであるから計算機と直結することは比較的容易である．しかし第2は人間乃至は動植物というものが入ってくるので，取扱いはどうしても統計的にならざるを得ない．

第1の問題に関連したものには気候状態の説明がある．すなわち地球上の気温も気圧の分布は地球上ではどうなっており，その変動の機構はどうであるかの研究である．このような目的に対しては地球上における気圧分布なり気温分布なりを式で表わす必要がある．今迄の多くの研究の例では球函数等によって展開されることが多かった．いずれにしても電子計算機によって実測値によく合うように，しかも比較的簡単な形で分布を求める必要のあるのは云うまでもない．

こうして球関数乃至は二重フーリエ級数等によって分布の表示が出来たならば，次の段階ではこれを力学的，熱力学的に説明することである．勿論そのためには基礎方程式がわかっていなくてはならないことは云うまでもない．

そして地球上の温度分布を求めるためには

$$\frac{\partial T}{\partial t}=K(\cdots\cdots\cdots\cdots)\nabla^2 T$$

の形が多くの人によって用いられた．この式に適当な項と定数を入れて計算し，これと実測値から求めた表示式を比較し，もし差があればパラメーターなり，基礎方程式なりの各項の有用性について反省すればよいのである．温度分布が求まれば，このような気温分布に対応する気圧配布を運動方程式を用いて計算すればよく，その計算は今迄の若干の例では実際と可成りよく一致することが知られている．

* 気象庁研修所

同様な取扱は水蒸気の輸送についても行う事ができるはずである．太洋の上で蒸発した水蒸気が輸送され上昇気流となって雨を降らせるのであるから，地球上での水蒸気の分布を支配する原因である風，温度，水温等の分布や拡散の大きさの分布がわかるならば，適当な仮定と境界条件の下に水蒸気の分布を計算することができる．恐らくこのような見地から地球上のどの辺に砂漠があり，その形はどうであるかや，水収支の分布を計算することが出来るであろう．

このような議論をもし計算機を用いるならば一歩前進さすことも出来る．たとえば地球上の温度分布を支配する方程式の中で南北両気団の混合を支配する交換係数 K の変化がおこると，それに従って温度分布のパターンも又変ってくる．もし太陽からの入射エネルギーが一定であるときには，K が大きければ赤道での温度は低下し極の気温は上昇して温度差が小さくなるのに反し，K が小さくなれば極の温度低下と赤道での温度上昇を来すことは明らかである．このような事はすでに古くより知られた事であるが，計算機を組織的に用いることによって気候変動の機構を知る事ができ，更には気候学を長期予報に応用することが可能になるであろう．

この他にもまた物理的な面での計算の問題はあるが，ここでは省略して第2の気候と人間との弁証法的相互関係についてのべる番である．この種の問題は明らかに気候災害，気候資源と関連した分野であり，ここでは問題を力学的に取扱うよりも，統計的，O.R. 的見地より述べる方が便利であり，従ってその手段にも力学や熱力学よりも，統計学とか，O.R. とか，モンテ・カルロ法とかの方が用いられる．こういった問題についても述べるべきであるが紙数の都合もあり，統計関係で取り上げられると思うので省略する．

降雨理論と計算機

駒　林　　誠*

雲の形成から始って雨が降り終るまでのすべての過程を現在知りうる知識を総動員して計算しようとするのが本稿の目的である．前半のごく一部だけは手で計算したのであるが殆んど大部分は残っているので計算機にかけたいものと思う．全く未完成であるがシンポジウムに話せとのことなので簡単に述べる．

雲物理の目ざましい進歩によって氷晶核，巨大凝結核，衝突係数，雲粒などに関する知識が蓄積して来た．計算のための初期条件や，採用する定数なども大体見当がつく段階になった．今迄得られた沢山の知識を綜合して互いの関連を調べること及び詳しさの程度の均一化をはかること，現在の知識でどこまで説明が可能であるかを知ることは，雲物理学が今後更に実測，実験を続けて行く上に必要であるばかりでなく造雲，上昇流系の力学，熱力学と雲物理学をつなげる点においても役に立つものと思われる．

計算は実際の天気図上の降雨についてもなさるべきであるが，現象の質的な違いのポイントをつかむためにはなるべく単純なモデルリサーチも必要である．モデルとしてはたとえば次にかかげるような諸性質の区別を入れて $2^9=512$ 個の雲が考えられる．この512個の中には地理的，力学的条件で事実上存在しえない雲もあろう．

1 上昇流速	10cm/sec,　1 m/sec
2 上昇継続時間	半日，20分
3 混合比	5g/kg,　15g/kg
4 雲厚	1000m,　4000m
5 巨大海塩核（$5\cdot10^{-11}$g 以上）	ナシ，10個/ℓ
6 氷晶核（$-15°$より高温）	ナシ，10個/ℓ
7 雲の中の乱流混合	ナシ　アリ
8 雲の内外の乱流混合	ナシ，アリ
9 衝突係数	Langmuir**(J. Met 1948)，Kinzer & Cobb (J. Met 1958)

雲のモデルの例．1～9の各項につき一つづつ拾って $2^9=512$ 通りのモデルが出来る。

ありそうな組み合わせから順次計算を進めたい．氷晶生成雲，熱帯層雲のような種まき雲，乱層雲，積雲シートのような水分供給専門の雲などの区別がこの512個のモデルの中に含れているかいないかは，より複雑な上昇流系で計算を行う場合に大変参考になるものと思われる．

使用する方程式は，(1)気塊が上昇して遊離する水分の量，(2)個々の凝結核の凝結による成長速度，(3)凝結，衝突，重力による垂直輸送の3項による粒度分布の変化，(4)潜熱の放出を現わす4つの連立方程式になる．雨滴や雪片がある程度以上大きくなった場合には分裂させて小径の方へ繰り入れる必要がある．

技術的問題としては(3)式の垂直輸送の項（着目している空間の中に上方から大きな滴がはいって来ること，及び自分の中から下へ落下して出て行くこと）の重要性を取り上げるために少なくとも雲は3層に分割しなければ

* 東京大学　地球物理学教室

** Pearcey & Hill は Langmuir と余り違わない．

ならない．又すべて滴の大きさは半径でなく体積で表現しないと不便である．又この体積の範囲は余程細かく分割しないと普通の雲粒はすべて事実上最小体積の区分の中にはいってしまう．時間を1ステップふむたびに水滴の存在する体積範囲の最大限が1区分づつ増大する．このところは波の計算などとちがってスペクトルの主要部分より最右翼がどう伸びるかの問題なのでカットするわけに行かない．一方これによる計算不安定を防ぐためにはタイムステップを60秒おき位でふまなければならない．凝結開始当初のタイムステップは5秒毎位にならなければ計算不安定をおこしそうであるが，この段階では現象が単調増加の状態にあるので時間を従属変数に取り，体積でステップをふむことによって一応さけることができる*．又衝突係数は水滴の体積分割が非常に大きいために，もし表にして記憶させると膨大な table-look-up を計算機に負わせることになるので，なるべく簡単な解析的関数で近似しておくことが好ましい．

降雨過程のモデル計算が簡単化された後には，現在の数値予報の雨量予報となめらかに接続することが出来るものと思われる．

水理気象と電子計算機

小　平　吉　男**

水理気象も一般の気象と同様に予報的色彩の濃い方面と，資料それ自身を問題にする方面とがある．これら二方面は勿論画然と区別することのむずかしいのは気象の他の部門と同じである．

予報というのは結局は流量の予報である．河川に水がどれ位流れるか何時でも予報することができれば主な目的は達せられたと考えてよかろう．流量の予報は洪水時がむずかしく，平水はそれに比較して容易であるとみてよい．今まで各国の研究の大部分は洪水の予報に集中されているといってさしつかえない．流量の予報は各河川毎に現地の機関が担当するのが建前であるから，その出し方は勢い簡単な方法によらざるをえない．すなわち半ば実験式，あるいは実験曲線を使うのが普通であって，手数のかかる計算は現地でしかも短時間になされなくてはならない関係上望み得ないのである．したがって今までは電子計算機を使うような計算は考えていなかったといってよいであろう．

しかし洪水予報の研究の中にはもっと理論的な式を立てて計算し，それを簡略化して実用に供する方法を取るべき時代になったのではないかと思う．現在日本においては洪水波の研究が十分になされていないが，これにはもっと流体力学の考えを導入した複雑な微分方程式の解を求めて，洪水波の実体を明瞭につかむことが大切であろう．今までその必要が無かった訳ではないが，計算の手数を考えて，とうてい手をつけ得られなかったのである．その他流出の問題にしても，もっと取り入れたい要素を十分に取り入れた研究を進めるべきであろう．

流量予報に関係してダム・コントロールが問題になるであろう．ダムが一つの場合には割合に簡単であるが，多数になるとその取扱が複雑になるので，この方面にも電子計算機を使う分野があるであろう．

資料を用いるときには，他の分野と同様にいろいろの問題がある訳で，一々述べる必要もないと思われるが，水理気象でよく用いられる return period の方面などは電子計算機の利用がかなりあろうと思う．return period 自身が大部問題があるから，この方面の理論を発展させれば益々複雑な式を解く必要が生じることと思われる．

これは少し本筋から離れるかも知れないが水を資源として最も効果的に利用しようと思えば，かなり複雑である．例えば電力を考えると，水力だけでは解決されずに火力及び原子力が同時に入ってくるので，非常に複雑になるであろう．気象としてはここまで行かなくてもよいようにも思われるが，真の気象の利用を考えると此処まで行くこともまた考えられるのではないだろうか．

われわれが水理気象を始めてから日が浅く，急場をしのぐために簡単な方法を採用して来た訳で，まだ理論的に発展させる段階に立ち至っていないので，以上単に思いつくままに電子計算機の利用をのべた．

潮汐の問題

宮　崎　正　衛***

潮汐の調和分析，および予報を704EDPMによって行うことが出来る．筆者はそのためのプログラム草稿を作製した．調和分析は必要な潮位のデータをあたえ，任意数の分潮の定数を計算しプリントさせる．予報は必要な分潮の定数をあたえて1カ年間の満干潮時，潮位，および毎時の潮位をプリントし，又はテープにとるものであ

* Howell (1949) は $\triangle r$ から $\triangle t$ を算出している．

** 気象研究所

*** 気象庁　統計課

る．704を使う全体の時間は1カ所の調和分析，及び1カ所，1カ年の予報につきそれぞれ2，3分とみられる．精度は満干潮の時間にして3分，潮位にして1cmの程度である．

海洋力学と電子計算機

南日俊夫*

現在の気象学と海洋学の立場のなによりの相異点は現象の観測の時間及び空間のスケールのちがいにあると考えられる．海洋に於ては過去3/4世紀というものは，いわば水温，塩分及び表面海流の気候学的な平均値を求めるのに費されて来たようなものである．海洋観測の現況は約1カ月をついやして5°×10°の範囲を観測し（同時観測ではない），これを或る月の実況とせざるを得ない．然もこれはほとんど表層近くの知識に限られ中層1000m以深については殆んどわからない．この実況は約3カ月ごとに得られるのが普通で，まれには二隻以上の共同観測によるやや広範囲な図が得られる事がある．従って普通気象に用いられるような数値予報法を通用するには疑問があって，約1カ月を費して得られた海洋図は何をあらわすのか，又それを問わずとも，観測範囲が狭く且つ次の海洋図迄の時間間隔が長くて数値予報ができない．更に困難な事には，海洋の表層が最もエネルギーを有し，これが最も観測し易く且つこれを取扱わざるを得ないのであるが，ここえ又おそらくは大部分はここを通じて，力学的，熱的な擾乱が入って来る．このようなエネルギーが大きな量であって，現象を複雑にしているだろう事は想像に難くない．

併し原理的には，海象にも気象と同じ渦度方程式が成立つ事が立証される．即ち Rossby number は $R=\frac{U}{fL}\sim\frac{10^{2\sim1}}{10^{-4}L}=\frac{1}{10}$ とすれば $L=10^{7\sim6}$cm 故に $L\geq10^{2\sim1}$km ならば $R\ll1$ でジェオストロフィック近似が成立する．又 Hidaka と Miyoshi (1950) は実際の観測値より，$\triangle S=1°$ 以上にとれば力学計算はジェオストロフィックフローで近似できると結論している．

次に Stommel (1953) は Florida current について高気圧性渦度が下流で増加するのを渦位保存を仮定して説明し，同じく (1955) Gulf stream について cross stream 方向の二つの等温線の伸縮を渦位の保存とジェオストロフィックフロー成立の仮定に基き説明した．Charney (1955) は慣性項，コリオリの力が圧力傾度と釣合い，且つ渦位が保存されると仮定してFlorida current の current depth と volume transport の分布を論じた．

Neumann (1955) は定常で摩擦のない地衡流が存在するための条件は D を無流面の深さとすると $D=D_0\cos\varphi$ となって，これは相対渦度が小さいとした時の絶対渦度保存則に等しいことを示した．Defant の大西洋における無流面の分布は赤道附近やGulf stream の所を除けば上述の式に近い形であると云う．

Nan'niti (1957) は日本近海（黒潮及び親潮）で海洋図を二乃至三カ月平均するとダイナミックメーターと絶対渦度がより平行する，従って渦度保存の式が成立つことを証明した．

以上の事柄からして，現行の観測から得られる海流図について渦度が保存されることが立証された．

現在の観測技術からすれば海況の数値予報は困難であって，やるとすればモデルリサーチ的な研究にならざるを得ない．

地震業務への利用

湯村哲男**

地震学の分野も他の分野と同様に大型電子計算機（以下704という）の恩恵を受ける面が山積している．従来人手ではとうていできなかったこと，理論はあっても人力では実用的でないと断ぜられていることなどが704によって次々と解明され，われわれの待望している地震予知への一手段を入手できたという点で，ひとり地震学ならびにその業務にたずさわる者のみならず，広く公共のためにこの上ない喜びである．

ところで地震予知を地震学，特に地震波の観測からおし進めるためには，地震に関する異常現象の空間的，時間的法則を発見しなければならないのであるが，そのためには震源の正確な決定が必要であり，その決定には地下構造に関する正しい資料と，地震波動を正確にとらえる精密な測器が必要になってくる．地下構造決定は爆破グループのめざましい活躍もあり，この面でも704の偉力を待望しているのであるが，また自然地震を利用して地下構造を研究することも努力されているのである．

さて地震関係の分野は大別して，上記のいわゆる研究面のほかに個々の地震の震源を決定する，いわゆる地震

* 気象研究所

** 気象庁　地震課

業務の面がある．後者は前者のための重要な資料を作製するものであってこの二者は密接不可分のものである．この震源決定作業には現在多くの人員と時間を消費しているが，この仕事に地震業務の大半の力を注いでいるので，事業としての前進をはばんでいる．この業務を迅速にかつ精確にするために，704の偉力を待つこと久しという状況である．

震源決定作業は，まず，各官署から集った資料を整理分類して地震別資料の作製，いわゆる調査原簿の作製にはじまり，それにもとづいて各地震資料が和達一益田の走時曲線に最もよく合致するように震源を決定することによって終る．このようにいえば非常に単純で簡単な作業のように思われるかもしれないが，報告される資料の精度は，地震の規模，震央距離により，また地震計の種類により一定していないのが現状であるから，そのような資料からもっともらしい震源を決定することは，さほど容易なことではない．特に二つ以上の地震が重ったもの，規定された走時曲線に合致しないもの（地下構造に関する未知の点があるため）などの地震を処理する時は，かなりの精神的，肉体的労力を要するのである．

このような作業を704によって行うとすれば，どのようにプログラムを組めばよいか．筆者の一案を次に述べてみよう．

調査原簿の作製は，報告の一番はじめの時刻が早いものの順に配列しなおすことは可能である．これを地震別の資料に分類するには相次ぐ官署間を地震波（P波）が通過するに必要な最大時間を計算し，その二官署の報告値の差が上記値より大きい場合は別の地震，小さいか等しい場合は同じ地震に入れてプリントするようにプログラムを組む．次に夫々の地震につき第一近似の震央を決定するには色々の方法が考えられるが，地震波速度を仮定して，各官署のPの観測値を最もよく満足する同心円の中心を求める．第一近似を求めれば，後は適当な方法により近似度を高め，それぞれによる標準走時曲線からの誤差を計算することにより適当な誤差範囲に入った場合，全資料による走時曲線を印刷させて計算を中止する．

もちろん，このような方法によっては処理しえない場合があるが，これは計算外におき，人力による判断を入れなければならないであろう．この点は704が選択と遂行の能力はあっても考察力のない点で，人力による作業範囲に未だ及ばないことを考慮すればやむをえないことであり，ただわれわれとしては704の作業可能範囲を人力による作業範囲に拡大することに努力しなければならない．前に述べた高性能地震計の設置もこの目的に沿うものである．

地球力学と計算機

竹　内　　均*

(1) 地球磁場の生因論と関係して，大規模な計算が電子計算機FERUT（Toronto大学にある）及びACE（イギリスの国立物理研究所にある）によって行われた[1]．問題をある種の固有値問題に帰することができるが，そのさいランクが100前後の永年方程式が解かれた．

(2) 地球の熱的な歴史の問題と関連して，放射性物質を熱源とする球の熱伝導の問題がFERUTによって解かれた[2]．これは解析的な解がわかっていて，ただ式中のパラメターをいろいろ変えて行う種類の計算である．

(3) Lambや中野にはじまる弾性波の発生に関する理論も，最近はこれを電子計算機にかけて計算させる傾向にある[3]．

(4) 表層があるときのRayleigh型表面波，すなわちいわゆる妹沢波の分散曲線の計算，その他一般に分散性表面波の分散曲線の計算を計算機にやらせようとする傾向がでてきた[4]．

(5) 地球の自由振動の問題と関係して，複雑な構造をもった球の自由振動の問題がとりあげられている[5]．

文　献

各分野で一つずつの文献をかかげる，これがその分野の代表的な論文というわけではない．各論文につけられたReferencesをたどってゆけば，まちがいのないみとおしがえられるだろう．

1) Bullard, E, C. and Gellman, H.: Phil. Trans. Roy. Soc. A 247 (1954), 213.
2) Jacobs, J.A. in Handbuch der Physik, Vol. 47, Chap. 12, 1956, Springer, Berlin.
3) Pekeris, C. L.: J. Geophys, Res., 61 (1956), 406.
4) Stoneley, R.: J. Geophys. Res., 61 (1956), 408.
5) Pekeris, C. L. in Contributions in Geophysics in honor of Beno Gutenberg, 1958, Pergamon Press, London.

（完）

* 東京大学