

電子計算機の発達と数値実験——海洋物理学の場合——

水産学部 松野 健

1. はじめに

冒頭からいささか唐突ではあるが…、電子計算機（コンピューター）の発達については、いまさら素人がどうこう言うような性質のものではなくなってしまった。そして、少しばかり計算機を使っている者が、その功罪についてささやかなコメントを書くことさえはばかれるほど、巷にコンピューターが普及してしまった。海洋物理学の分野でもコンピューターは広く用いられており、今やパソコンや制御用のものも含めれば、コンピューターと無縁で仕事をしている人は殆どいないといってもよいと思う。10数年前にはまだコンピューターを使う人は少なく、一部の理論屋さんで大型計算機を使う程度であったのが、今では、海洋観測や水槽実験の制御および結果の整理解析に、コンピューターは欠かせないものになっている。これは様々な種類のデータを大量に処理することが日常茶飯事になったことを意味する。観測機器の発達によって、海洋観測でも1回の観測航海で得られるデータの量は非常に多くなっている。もちろん質的にも向上している面が多く、向上と言うべきかどうかは別として、塩分などのように定義自体が変わってしまったものさえある。

さて、そのようにコンピューターが紙と鉛筆程度に普及してしまっただ中で、いまだパソコンではほとんど仕事にならないようなコンピューターの使い方をする分野の一つについて紹介したいと思う。言ってみれば最も古典的な計算機の使用例のひとつで、表題にもある“数値実験”という手法である。“実験”と呼ばれるものにもいろいろ種類があって、思考実験という、道具もなにもいらぬ、明晰な頭脳さえ有れば…これが問題ではありますが…どこでもできるものから、国家予算にも響くほどの実験装置が必要なものまで多様である。で、数値実験とはどういうものか、その字の通りで、数値だけを使って実験するということである。つまり、基本的に加減乗除の繰り返しだけなので、原理的には紙と鉛筆で可能な実験である。ただ計算量が膨大なだけである。情報処理センターのレポートであるから、そんなことくらい読者は誰でも知っていると考えた方が、文章を書く手間は省けるし、まわりくどくなくていろいろ都合がよいが、ここではやはり全く分野の異なる読者が大半であるという前提で話を進めたいと思う。

以下では、海洋物理学で使われる数値実験のなかから一般的なものの基本概念を紹介するとともに、数値実験をやってきたものとコンピューターの発達との関わりについて書いてみようと思う。

2. 海洋物理学における数値実験

海洋物理学で用いられる数値実験についてイメージしてもらうためには、それに類似した身近な(?)例として、天気予報に用いられている数値予報をあげれば分かりやすいかもしれない。簡単に言えば、水の運動および水質に関する方程式を、数値的に解くわけである。もう少し具体的に言うと、運動量や水温・塩分などの物理量の時間変化を記述する連立微分方程式を、差分式に直して近似解を求めるということになる。しかしこう書いても、もし私がこのようなことをやっていなくて、また周辺にも数値実験の切れっ端や、残骸などが転がっていなかったら、どういうことをやるのかよくわからないだろうし、とても具体的とは言えない。

少し硬くなるが、数式を使わせていただくことにする。なお数値実験にもいろいろな手法があるが、ここでは最も一般的な差分法を少し単純化して紹介する。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - f v = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + A_h \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + A_h \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + A_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + F$$

① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧ ⑨ ⑩

これは運動量のバランスを記述する運動方程式の一つである。ここで、 x, y, z は座標軸を表し、 t は時間を表す。 u, v, w はそれぞれの方向の流速、 p は圧力、 f はコリオリのパラメーター（地球が自転しているため、動く物体にはコリオリ力が働く）、 ρ_0 は平均密度、 A_h, A_v はそれぞれ水平および鉛直方向の渦動粘性係数（流体中の渦と渦との間の摩擦係数のようなもの）、 F は外力である。①項は u の時間変化、②,③,④は鉛直方向も含めて隣から運ばれて来る分、⑤はコリオリ力、⑥は水平的な圧力勾配によって加えられる力、⑦,⑧は水平方向のまた⑨は鉛直方向の摩擦力、⑩はたとえば風のような外力を表す。この式を差分式に直して、さらに u を予報する式に整理すると

$$u_{n+1} = u_n + \Delta t * \{ - (②' + ③' + ④' + ⑤) + ⑥' + ⑦' + ⑧' + ⑨' + ⑩ \}_n$$

となる。ここで Δt は時間ステップ、添字 n はステップ数を表し、' は微分を差分に直したものであることを表す。{} 内を計算するため、直方体（2次元の場合は長方形）を積み重ねた海を考える。浴槽の中に煉瓦を積み重ねてその形を型どるというようなことをイメージすればよい。どの程度不規則な形まで許容できるかは、モデルの質または“でき”による。そしてそれぞれの煉瓦（もちろんこの煉瓦は水で

満たされていて、それぞれの煉瓦についてそこでの物理量…流速や水温など…が定義されている)に番地をつけておいて、各番地での物理量を計算するわけである。微分すなわち差分は、隣の煉瓦の物理量との差(煉瓦の長さで割る必要があるが)を計算することになる。

たとえば初期条件として海が静止していて、そこに風が吹き始める場合を考えよう。初め($n=0$)運動はないわけだから u, v, w は 0、すなわち上式の右辺のうち Δt と ⑩ 以外はすべて 0 である。すると

$$u_1 = \Delta t * \text{⑩} \neq 0$$

となる。先に示した式は x 方向の運動量に関する方程式であるが、 y, z 方向についても同様の式が立てられ (z (鉛直) 方向については少し異なる)、それに連続の方程式を加え、また水温や塩分に関する式から水の密度も計算できるので、圧力も計算される。詳しいことは省略するが、要するに変数の数だけ方程式があって、すべての煉瓦について 1 ステップ後の u, v, w, p が計算されるわけである。初めは ⑩ を除いて全部 0 であった右辺の各項が値を持って来ることになる。これを n 回繰り返して n ステップ後すなわち $n * \Delta t$ 時間 (秒) 後の u, v, w などが計算できるという段取りになる。

この煉瓦の数は、モデルによって様々であるが、3次元のモデルでは数千から数万くらいが普通である。また、実際には海は鉛直方向に比べて水平方向の方が 1000 倍程度のスケールを持っているので、煉瓦の形もいわゆる普通の煉瓦というより、薄いプレートの様な形状と考えた方がよい。

3. 数値実験の普及

数値実験とはどういうものかということを紹介したので、次に数値実験はどの様に実行され、どう使われているかということに話を進めたい。海ではどうだろうというように話を進めてきたが、実は数値実験は海洋よりも気象の方がはるかに先輩格であり、その基本的な部分のほとんどは気象学の方で先行的に発展してきたといってもよい。初めにも触れたように、気象ではすでに天気予報という実用面に応用されている。食中毒が心配だったら、“気象庁・気象庁・気象庁”と 3 回唱えればよいといわれた時代に比べれば、天気予報は非常によく当たるようになった。少なくとも 2 日先くらいまでなら。これにはやはり数値予報の寄与が大きいと言いきらる。

よそのことはさておき、海洋でも現実的な面に数値実験が用いられている場合がある。その中で最も一般的なものは、海岸にプラントや構築物が建設されるときに

実施される環境影響評価に際しての利用である。たとえば、海岸に原子力発電所が建設されるとき、そこから放出される温排水がどの様に広がるか、数値実験によって予測する。そのとき、対象となっている海域の様々な条件を現場観測などから求めて（“など”と言うのは、観測だけからすべての条件が得られるわけではなく、適当に仮定するところもあるからだが）、それを境界条件あるいは初期条件として与えることになる。一般にこれはシミュレーションと呼ばれている。かつて計算機の中につくられた海が“マイ・オーシャン”と呼ばれ、そこで水の運動などを模擬実験することが“シュミ（趣味）レーション”と揶揄された（もっともそういう悪口のつもりではなくて、シミュレーションと言えずにシュミレーションと言っていた人もあった）こともあったが、最近数値実験が頻繁に行われるようになって、そういう声はあまり聞こえなくなってきた。だからといってそう言った面がなくなったわけではない。実際計算機の中の海は、作成者の都合でかなり自由にディフォルメできる。計算機の中の海には普通船なんて浮かんでいないから、どんな大風を吹かせたって平気だし、多くの場合波さえ立たないのである。ただ、結果まで作成者の意のままになるかと言うと、そういうものでもない。

さて話が横道にそれてきたが、では、現実を忠実にシミュレートしていないシミュレーションは無意味か、というのももちろんそうではない。ここで、数値実験にも大きく分けて2通りあることをはっきりさせておいた方がよいようである。ひとつはいわゆるシミュレーションで、これはできるだけ忠実に現実の現象を再現しようとするものである。もう一つは、ある特別な条件でどのような現象が起こるか、極端に言えば、それが現実に起こるかどうかということとは2の次にして、特定の物理過程に注目した実験を行うものである。これらは数値実験の持っている2つの性格を示すもので、個々の実験としては両者の性格を合わせ持つものも多い。しかし現時点では、むしろほとんどの数値実験が後者に分類されるといってよい。

さて、このような数値実験が、膨大な量の繰り返し計算によって構成されていることから、それが計算機向きの仕事であることは明らかである。そして、それはコンピューターのもついろいろな特質の中で、特にその計算処理の高速性が生かされることになる。パソコンの発達によって、こうした流体のシミュレーションもパソコンで不可能ではなくなっている。実際10数年前に大型計算機をちょっと動かしてやったような計算は、パソコンでもより手軽に実行できるようになっている。しかし、数値実験を研究手段として用いるには、要求される計算量もまた、10数年前とは比べものにならないほど増大しているのである。きちんと比較したわけではないが、計算コストからみても、10年前と比べれば、1桁以上安くなっているのは確

かである。長崎大学のセンターでも、1年半前と比べて、同じ計算が10分の1の予算で実行できる。これは大変ありがたい。しかし昔何十万もかけて計算したときには、一つの仕事と認められたのに、いま類似の規模のことを数千円でやっても、同じ評価が得られないという面はある。厳密な言い方ではないので誤解を招く表現ではあるが。

4. 数値実験結果の表現

数値実験の結果は、当り前のことだが数値で得られる。その数値を見て計算結果が妥当なものであるか、不自然なものではないかということ判断するわけであるが、その判断をするとき数字の一覧表でみるより、図示した方が分かりやすい。もちろん正しい答えとして計算結果を検討するときも、図示することが重要であることは言うまでもない。また結果をまとめて、人に見せるのも重要なプロセスであることを考えると、結果のデモンストレーションは数値実験全体の中でも大きな部分を占めることがわかる。

たとえば流れの計算結果は普通、流速ベクトルの分布で表現される。そして流れの時間変化を示したい場合には、時間ステップの異なるいくつかのベクトル分布図を並べることになる。研究レベルではこれでだいたいの要求は満たされる。そしてこのような図を計算機に描かせることは、現在では容易である。後でベクトル分布の1例を示すが、ボールペンのプロッターで描いたら1時間もかかるような図が数秒で出て来る。経費もほとんどかからない。非常にありがたいことである。

ところがこの流れの計算結果も、研究レベルを越えて、より広い範囲の人々にアピールするように表現しようとすると厄介なことになる。色付きの粒子を計算領域にばらまいておいて、それを計算結果の流速値にしたがって動かす、という方法で流れを可視化しようとすることもあるが、それにもいろいろ問題があり、3次元ともなればなかなか難しい。コンピューター・グラフィックスの発達で、計算機のグラフィック機能は急速に高まりつつあるが、流れの可視化については、計算量の問題だけではないだけにまだ旧来の方法に留まっているようである。

5. 数値実験の1例

ここで、総合情報処理センターのM760を用いて行った数値実験の結果の1例を紹介しようと思う。

テーマは東シナ海で内部潮汐がどのように起こるかということである。きちんと書こうとすると長くなるので、できるだけ簡単に、よって正確さにはあまり気を使わ

ないで、話を進めることにする。

まず内部潮汐という現象であるが、これは海面の昇降に現れない潮汐のことである。海面から海底まで積分すると0になるような流れが、潮汐周期で往復運動をしていると考えていただければよい。つまり、海面近くで北向きの流れがあれば、どこか深いところで南向きになっているわけである。こういう現象は普通の潮汐（これは海面から海底まで一様と考えてよい）が、急な海底斜面にぶつかって、特定の条件が満たされたとき発達すると考えられている。

東シナ海では、潮汐は太平洋側からやって来る。そして大陸斜面にぶつかるわけであるが、様々な水温構造の違いなどによって、内部潮汐の発達ほどの様に違ってくるかということを、数値実験によって調べたものである。

モデルは水深100m程度の大陸棚と、大陸斜面、それに水深1000mくらいの外洋域を持った鉛直2次元の海である。鉛直2次元ということは、ここでは等深線に沿う方向に変化がないと仮定することになる。そしてさきに述べた煉瓦の代わりに、長方形の板をタイルを壁に貼るような格好で積み重ねたものと考えればよい。実際にはその板は細長い短冊型で、水平方向は鉛直方向の数百倍である。この“板”や先の“煉瓦”を格子 (grid) と呼ぶ。初め、海面近くほど水温が高いという現実の海に近い水温構造を与え、最初は流れはないものとしておく。そしてずっと沖合いの境界で普通の潮汐を与える。つまり海面を潮汐周期で振動させるわけである。その波すなわち潮汐は大陸斜面の方に伝わってきて、斜面にぶつかる。そこで内部潮汐が生じるということになる。

結果の1例を図1に示す。これは、鉛直方向に積分すると0になる成分のみを取り出した、内部運動の流速ベクトルの分布である。計算を開始してから1時間毎に8時間目までを示している。大陸斜面のところで鉛直循環すなわち内部潮汐が発達していく様子がよくわかる。この渦がさらに発達して伝播していく様子も計算されており、興味あるところであるが、ここでは省略する。なお、南西諸島はこのモデルには入っていない。こういう勝手なことができるのも数値実験のよいところである。もっともいれたくてもプログラムの大幅な修正が必要で、難儀なところでもある。

この計算では、計算する格子の数はおよそ1000個、1時間分計算するのに300ステップを要している。そしてそのために要した計算機の実行時間 (cpu) はおよそ1分であった。1ケースは36時間分位まで計算するので、それに要する計算時間はおよそ40分、課金が約1200円である。

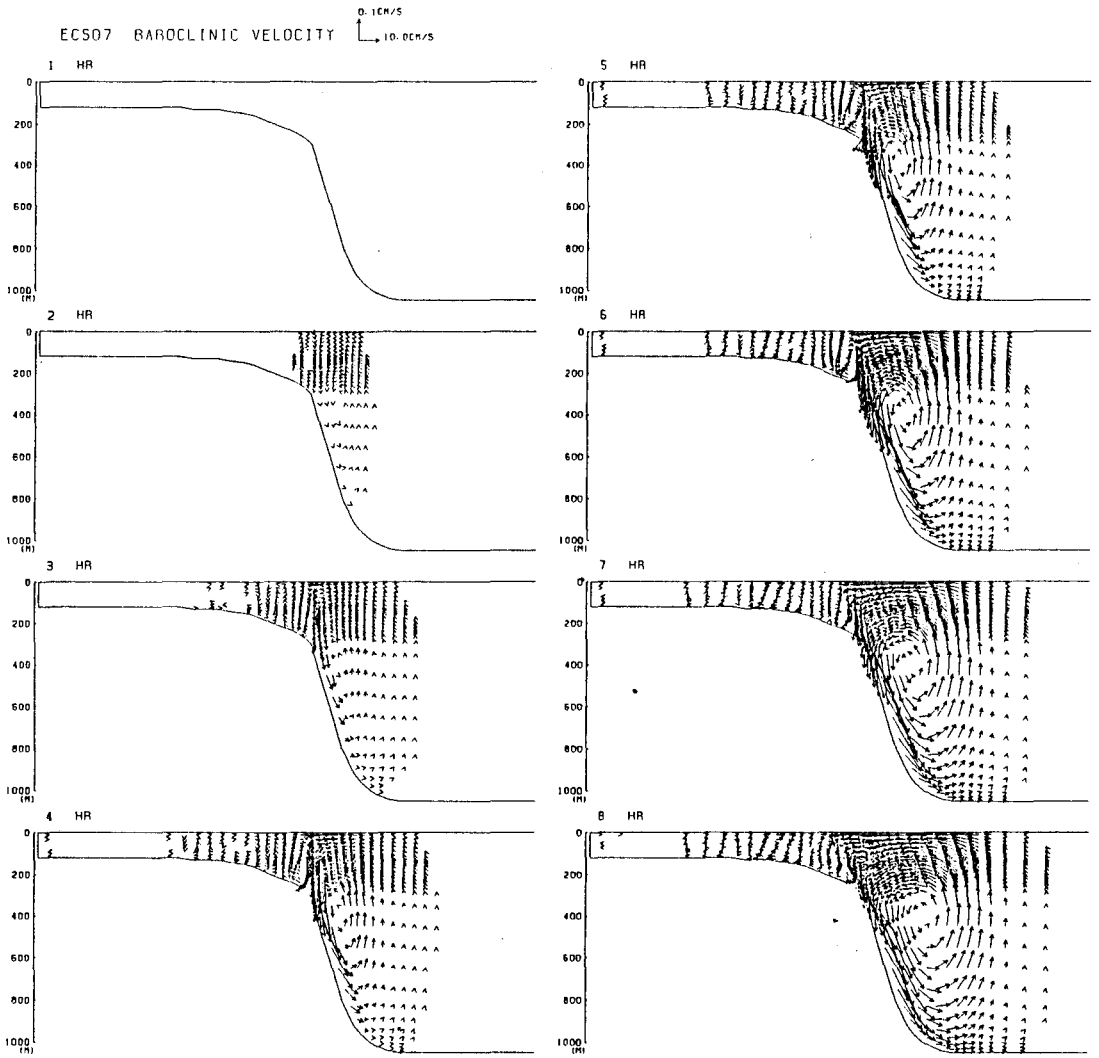


図1 数値実験結果の1例：大陸斜面付近に生起する内部潮汐による運動の発達（計算開始後1時間毎の流速ベクトル分布）

6. 計算機の発達と数値実験

コンピューターの進歩は数値実験をやってきたものにも多くの恩恵を与えている。最も大きな点のひとつは、特に結果の出力に際して、プログラムを綿密にチェックしてから実行する必要がなくなったことではないかと思う。グラフを描くにしても適当にプログラムを作っておいて、出てきたおかしな図を見ながら不都合なところを修正した方がはるかに効率的だからである。もちろん、上で触れたように、非常に速くしかも安価に図が出力されるようになったからである。また、具体的な数値を見てみたいときもあるが、データ量が膨大であるから、全部を見ることは当然できない。以前はどの部分が見たいかを慎重に検討して、できるだけ紙の無駄がないように出力したものである。あまり紙をケチり過ぎて、見たいところがちょっと外れてしまい、かえって無駄をするということもままあった。今では紙にプリントする前に端末の画面でみることができるので、紙の無駄を気にしないで、適当に出力部分を指定すればよい。見たいところが外れていれば、もう一度やり直せばいいのだから。このような点で、数値計算をするときによけいなところに神経を使わないで済むようになったのは、喜ばしいことである。こちらの言うことが機械に通じなくて、人間の方が一方的に責められることが減ったのであるから。

ところが多少問題がなくもない。と言うのは、このような人間の対応の仕方は、決して結果の出力部分だけに留まらず、本計算自体に対しても同様の姿勢になるくらいがあるわけである。私のような横着な性格の人は少ないのかも知れないが、よくわからないところはまあやってみて、結果がおかしくなければいいではないか、結果がおかしければ没にすればよい、ということになる。1ケースの計算に何万円もかかるようでは、そういうわけにも行かなかったのである。だからもちろん今でも大きな計算の前には慎重にならざるを得ないわけだが、その大きな計算の規模が、何年前に比べて何十倍にもなっているということである。

別の観点からみると、計算時間を短縮することは、より大きな規模の計算を同じ予算で実行するということなので、計算屋にとって重要なことではある。ところが苦勞して計算時間を短縮するようにプログラムを作り替えると、コンピューターのレベルアップの方が速くて、苦勞の意義は電子技術の進歩の前に霞んでしまうということになる。もちろん苦勞した分だけ速くはなるので、その分はコンピューターの進歩の分に上乘せされるわけだけれど、いかに安上がりにするかということは電子技術の方に任せておいて、自然現象を扱っている人間のやることはもっと別の所にあるのではないかという気になるのも人情である。

思いつきだけを並べてきて、最後にまとめるような内容のものではないので、尻

切れとんぼで終わらざるを得ないが、コンピュータの能力のほんの一部だけにかかわってきた利用者としては、やはりコンピュータはバカチョンに限ると思っている。それでグラフィック制御などの様々なソフト関係を最初から自分で勉強しようとしなくて、自分の必要なところだけもらってしまおうという虫の良さで、いつもセンターの方を煩わせている。最後になってしまったが、この場を借りて御礼申し上げたい。