

# 天文学における数値シミュレーション

杉本 大 一 郎\*

## 1. 数値計算の研究会

昭和 53 年 10 月 16・17 の両日、東京大学教養学部において表題の研究会を行なった。研究会の目的は計算法の利害得失、特にその限界を論ずることであり、数値計算によって分かった結果を論ずることではない。世話人は私と松田卓也（京大）になっていたが、主として松田さんが研究会を組織した。私がやったのは、何人かの人に無理に話をお願いしたこと、場所を提供したこと、それにこの報告書を書いていることくらいである。

天体物理学に電子計算機が利用され始めた 15 年位前には、計算法の研究会などという次元が低いものと思われ、せいぜい大きい研究会に便乗して、夜になってからわずかな人数が集まるくらいのものであった。今回の研究会については予算が少ないことその他に、そのような既成概念もあって、小さい部屋しか用意しなかった。ところが、ふたを開けてみて驚いた。なんと 40 人近くの出席者で、あわてて他の教室を探さなければならなかったのである。しかも平均年齢はわずか 31 歳、最高齢者でも 40 台前半であった。

天文学における数値シミュレーションもこのように盛んになったから、提供された話題も多岐を極めた。参考になりそうだから、その内容を簡単に紹介してみよう。詳しいことを知りたい人は、それぞれの発表者に連絡してみるとよい。なお、以下では発表者の名前だけを引用するが、必ずしもその人一人だけで取組んでいる訳ではない。

## 2. 2次元流体力学の初期値問題

まず最初は流体動学的シミュレーションである。中村（東北大）は近接連星系におけるガスの流れを初期値問題として、Lax-Wendroff 法で解いている。池内（北大）は円柱座標で同じ方法を使い、2 個の超新星が続いて爆発し、お互いの衝撃波面がぶつかり合う現象を解いている。この方法は精度はよいが、物理の問題ならびにパラメーターの値によっては、数値的に不安定になることがあり、その様子が論じられた。

2次元の流体動学的計算では、空間座標を独立変数にしたオイラー・メッシュが都合がよい。系が大きく歪んでも計算が続行できるからである。よくやられるのは

FLIC (fluid in cell) 法である。うまくやれば数値不安定は避けられるが、逆に角運動量など物理量のにせの（スプリアスな）輸送がおこる。成田（同志社大）は回転流体の重力による崩壊について、この問題を調べ、崩壊中にリングが形成されるという今迄の結果は、にせの輸送によるものであることをつきとめた。梅林（京大）は FLIC に近い方法で、磁場のある場合の星の崩壊を解きはじめている。

流体の方程式がボルツマン方程式のモーメント式として得られることはよく知られている。そこでボルツマン方程式にまで戻って流体を解くという方法がある。分布関数としてはマックスウェル分布を考えるが、空間の各方向について流体としての平均の速度を持つビーム、熱運動に相当する分だけ平均より速いビームと遅いビームの 3 本に分けて分布関数を代表させる。これはビーム・スキームと呼ばれるもので、ビームの運動は粒子的に取扱われる。この方法には、質量、運動量、エネルギーが厳密に保存されるだけでなく、数値的安定性が極めて良いという特徴がある。そこで衝撃波の伝播の問題などに向いている。しかしながら、この方法でも物理量のにせの輸送は大きく、そのようなことが影響する問題には適さない。この方法は拡張が容易であるにもかかわらず、まだ（特に日本では）なじみが浅く、十分に開拓されてはいない。将来に向かっていろいろと可能性を残しているとさえよう。平山（北大）がこの方法の開発をし、点源で起った強い爆発から発生する衝撃波の問題に適用を進めている。

## 3. 一般相対論的問題

一般相対論的な問題の数値計算も始められている。中村（京大）は微分回転をしているダスト（圧力を無視したガス）の一般相対論的重力崩壊を計算している。観山（京大）は有限振幅の重力波を解いている。弱い重力波ならば伝播し、強い波ならば波束はブラック・ホールになると考えられる。一般相対論の場合には座標の取り方に任意性があるので、アインシュタイン方程式は制限方程式と発展方程式に分けて扱うのが便利である。時間発展には時間座標の定め方が直接に影響するが、その一つとして具合のよいのが、時空のマキシマル・スライシングである。この方法で重力崩壊を計算すると、固有時間で計算したのと異って、中心部が先に特異点に到達して、計算がその先へ進まなくなるなどということは起こら

\* 東京大学教養学部 D. Sugimoto: Numerical Simulations in Astronomy

ない。中心部が特異点に近づくと、そこでの固有時間で測った時間ステップは短くなり、逆に遠方での固有時間のステップはふつうに進行する。こうして重力崩壊の影響が遠くに到達する様子が解けるのである。

#### 4. 境界値問題と進化の計算

以上に述べたのは流体力学の初期値問題であったが、定常状態や準定常状態を解くという問題も多い。数学的に言えば、これらは境界値問題となる。初期値問題に比べると、一見、境界値問題はやさしそうに見えるが、数値解析的には必ずしもそうではない。初期値問題なら、数値的安定性や輸送の精度の問題はあるにしても、計算機にかければ何らかの解らしきものが出来る。ところが境界値問題については、適切な数値解析法が見つかるまでは、答が求まらないと言って、何も出て来ない場合が多いのである。(ただし、解くべき式のたちの悪さによる。)

中野(京大)は磁場を考慮に入れた場合の星間ガス雲の進化を解いている。ガス雲とその周囲の媒質は力学平衡にあるが、磁場の両極性拡散のために、準定常的に進化するというものである。

星の内部構造と進化を数値的に安定に解く一般プログラムについては、天文月報の1975年12月号で一部紹介した。密度比が場所によって何桁も変る流体静力学平衡の星の内部で、熱が流れている状況を初期・値境界値問題として解こうというものである。この問題の数値的安定性は、1969年に杉本が解決したが、そのプログラムは2つの方向に拡張されている。一つは星への物質の流入がある場合でも取扱えるようにしたものであり、連星間の質量交換、白色矮星への物質降着と新星爆発の計算などで威力を発揮している。もう一つの拡張は、熱の流れという初期値問題だけでなく、流体動力学の問題にまで安定性の理論を拡張したことである。こうして、この一般プログラムは、星のゆっくりした進化から星の爆発の問題までを安定に計算することが出来るようになっていく。そのために、ゆっくりした進化から爆発への遷移過程をも計算できるということで、その効能を発揮する。これらの事柄については野本(茨城大)が報告した。

この数値安定性の理論は、もともと双曲型の偏微分方程式に対するものである。しかし、楕円型の偏微分方程式でも、複素平面に解析接続をして双曲型に変えれば、安定性の理論を適用することができる。江里口(東大)はこの方法によって任意の自転星について、その平衡形状を数値的に安定に解く方法を見つけたが、目下はこれを一般相対論的自転星の問題に拡張中である。

自転星の問題は2次元問題である。これを複素平面に解析接続するとき、独立変数は実変数で2個にとどめら

れるが、パラメーターが1個導入されることになる。これによる計算量の増大を克服する手法を展開し、さらにLax-Wendroff法を用いることによって、計算精度と能率を上げる方法が、福島(東大)によって報告された。こうして非相対論的自転星の平衡形状は、任意の状態方程式、任意の微分自転に対して数値的に安定に解けるようになった。

#### 5. その他の問題

回転している系のもう一つの大きい問題として、銀河の渦状腕がある。家と野口(東大)は回転ガス円盤の問題と関連して、大規模実行列の固有値を求める方法、特にHessenberg-QR法について論じた。

以上の問題はガス系の問題であったが、天文学におけるもう一つの問題として、無衝突恒星系がある。恒星を質点と考え、自己重力多体問題として、系の進化を追うものである。多体の運動方程式を直接に積分して行くというのが普通の発想法であるが、計算はなかなか先へ進まない。そこで空間をメッシュに切って重力ポテンシャルを滑らかにしてやるとか、モンテカルロ法による計算なども試みられている。土佐(名大)が重力多体問題を計算しており、それらの問題点について報告した。この種の計算は、計算しただけ、それに比例して答の数値が出る。しかし、それから物理的な意味を持つ結論をひき出すという点では、まだまだ手探りの状態と言える。

少し変わった話題であるが、松田(京大)は、天体物理におけるマイコンの応用と題して話した。彼は自宅にポケットマネーで買ったマイコンを持ち込み、就寝中の時間を利用して、銀河の形に対する原始重力波の影響を計算した。結果はCRTに銀河の像として現われるが、それを多くのスライドに撮って見せたのである。同じことを大型計算機でやるのに比べると、マイコンにはどのような利害得失があるかという疑問が当然生じるであろう。これについては松田氏自身に語ってもらおう方がよいだろう。

#### 6. 研究会の感想

これだけ多くの話があったので、第2日が終わった時には、そろそろ日も暮れ始めていた。数値計算ということに話題を絞ったので、討論も盛んで、楽しく、かつ今後の役に立ちそうな研究会であったという印象を持った。

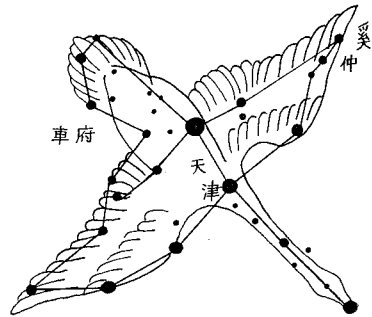
この研究会での話題の選択基準は、一応は流体力学的シミュレーションということであったが、多分に私や松田氏の趣味が影響している。だから、ここで話題になったものの他にも、日本でも多くの人々がいろいろな手法で問題に取り組んでいる。例えば、天体物理学における有限要素法の応用についても話をお願いしたが、講演者の

都合で実現しなかった。電磁流体や天体力学の方面には、私の知らない方法がまだまだあると思われる。日本でやっているものを総ざらいして、集録にまとめるようなことを企画してみると、役に立つかもしれない。

それにしても驚いたのは、数値計算に取組み、興味を持っている人が急に増えたことである。小生はかつて天文月報（1977年12月号）に、現在の日本における電子計算機利用の容易さは（特別に大きい計算を除けば）アメリカの水準と本質的に差異はないと述べた。日本で計算機が使いにくかった10年程以前には、外国と勝負するためには、外国人では解けない問題に取組み、独自の方法を編み出して立ち向かうしかなかった。これに対し、現在では、どこそこの、誰それさんと基本的には同じ方法で、似たような問題をやっていても、日本人の器用さと勤勉さでもって外国人に立ち向うことが出来るようになった。だがしかし、ガンバッテ勝つのもよいが、新しい計算方法の開拓という面でも、もう一歩進むべき時期に日本は到達している気もする。その方法の一つは、豊富な計算機時間をバックにしながらも、10年前にやったような姿勢で問題に対処することだと思われる

が、これは一昔前に計算機を使った者の繰り言なのであるうか。

はくちょう



わが国唯一の天体観測雑誌

# 天文ガイド

定価280円(〒45円) 79-5月号・4月5日発売!

●5月号のおもな内容

- ★最近ちょっと話題をまいた冥王星が観測にいい位置にきています。300ミリくらいの望遠レンズで写真にとれそうです。撮影ガイドは藤井旭さんです。
- ★春の流星群を代表する“みずがめ座流星群”が、今年は月もなく好条件で観測できます。東南の空にとびます。
- ★工作ページは「冷却カメラの作り方」、大島鴻さんです
- ★アメリカの打ち上げスカイラブの動きが注目されています。落下が近づいているようです。加茂昭さんです。
- ★フィルムとフィルター第2回は、フィルターの種類、塩田和生さんです。
- ★天文計算用と銘うった卓上電卓ができました。…ほか

## 写真で見る銀河系の星雲・星団Ⅱ 球状星団・惑星状星雲 散光星雲・暗黒星雲

我われの住む太陽系を含む銀河系には、多くの星雲・星団があります。この本は、アマチュア天文写真家No.1といわれる古田俊正氏の31cm反射鏡による美しい天体写真集です。昨年7月に刊行された第1巻散光星雲に続いてこの巻では、球状星団、惑星状星雲、散光星雲、暗黒星雲を105枚の写真で紹介し、特に、暗黒星雲をまとめて取りあげた本は、これがはじめてです。

●古田俊正著/B6判・118ページ・700円発売中

## 写真で見る銀河系の星雲・星団Ⅰ 散開星団

●古田俊正著/B6判・122ページ・700円発売中

## 写真で見る自作天体望遠鏡

●天文ガイド編/136ページ・700円発売中