コンピューターシミュレーションが切り拓く天文学——星から宇宙の果てへ——（3）

星の形成と平衡形状

観山正見*・江里口良治**

冬の夜空に燦然と輝くオリオン座．その真中に有名なオリオン大星雲(M42)がある．ここはまさに星間分子雲から星が作られている現場である．太陽質量の1万倍以上もある分子雲から，星が誕生するまでの物理過程は，最近のコンピューターシミュレーションによって急速に解明されつつある．また，誕生した星が回転しながらどのような平衡形状をとるかという長年の問題もスーパーコンピューターによる解析で解決の糸口が見えてきた．

I. 星の形成

1. Introduction

星形成過程のコンピューターシミュレーションは，約30年の歴史がある．星間のガス雲が収縮して，いかなる状態の星（原始星）を作るかを，様々な初期状態や物理状態の下に調べて，自己重力系の特質を明らかにする試みである．1960年代に入って，まず球対称のガス雲の収縮過程が調べられた．しかし，現実の星間ガス雲の形状は複雑であることや，磁場や回転の効果から非球対称性が発生することは十分予想されるから，球対称のみの計算では現象を深く把握できないことは明らかである．そこで1972年に Larson が，なんと動径方向に12個のグリッドで，しかし2次元計算を始めるに至って，星間ガス雲の収縮過程のシミュレーションは，多次元計算時代へ突入したのである．

1970年代や1980年代の初めは，圧倒的に諸外国の計算機環境がよく，わが国における計算はいつも遅れをとっている状態であったが，現在は全く異なる．特にスーパーコンピューターの日本における環境の優位さは明らかで，星形成問題に関するシミュレーションは，多くは日本の研究者が提供している状態である．その意味で，日本の研究者にとって，シミュレーションを活用して，物理や天文学の研究を遂行することは，今や最大のチャンスなのである．以下では簡単に，星形成領域におけるシミュレーションを2，3紹介する．

2. 雲の分裂

星の平均的質量は大体数太陽質量である．一方星の母体であるところの分子雲は大きなものは数千太陽質量あるから，星をつくる過程のどこかで，星間ガス雲は分裂する必要がある．これは重力作用による不安定性の結果起こると思われる．そこで，星間ガス雲の分裂のシミュレーションを実行した[1,2]．図1に示したのがその結果である．雲同士の衝突などで圧縮された平板状のガス雲が，自己の重力のため分裂する過程を示したもので，雲に密度の濃淡が現れている．分裂の特徴は細長い雲が形成されることである．このような細長い雲は，電波などの観測によって確かめられており，このため図1のような計算が，雲の分裂過程を再現していると考えられる．この細長い雲は，縦方向に再度分裂して，多数の密度の濃い分子雲（すなわち原始星の母体）を形成すると予想される[3]．

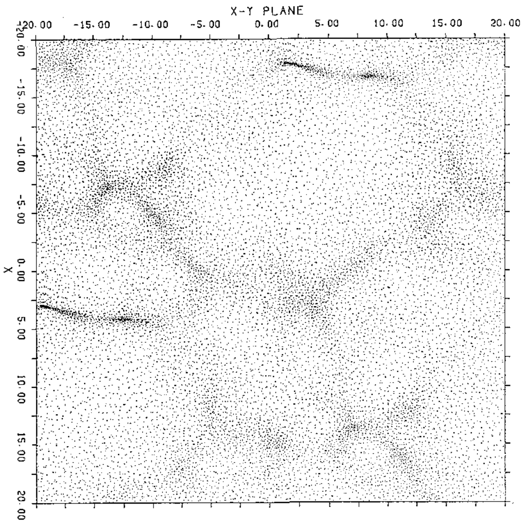


図1 平板状の星間ガス雲の分裂

3. 回転する雲の進化

さて，以上のように数太陽質量の濃い分子雲ができたが，これはいかに進化するであろうか．星の代表である太陽も回転している通り，星が回転していることは珍しくなく，従ってその母体である分子雲も回転していると予想される．そこで十分回転や温度が高くて，急速な収縮に至らない雲の進化を調べてみた[4]．すなわち，初期には遠心力と重力および圧力勾配が釣り合った雲がどう

* 国立天文台 Shoken Miyama, ** 東大教養 Yoshiharu Eriguchi: Formation and Equilibrium of Stars

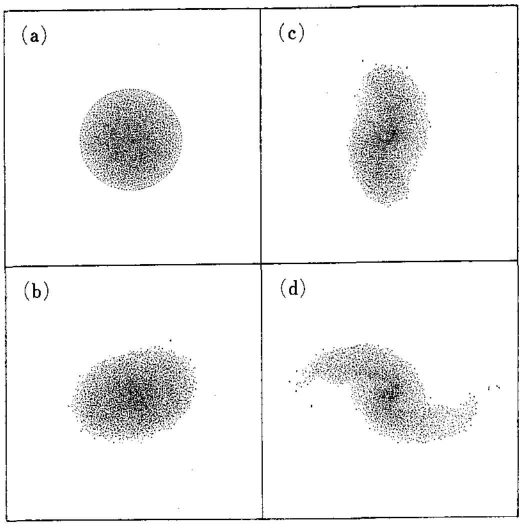


図 2　回転する平衡星間ガス雲の不安定性のシミュレーション．回転軸を上から見た図であり，雲は a, b, c, d の順に進化する．

進化するかという問題である．シミュレーションの結果，重要な因子は，回転のエネルギーと重力エネルギーの比であることがわかった．つまり，ある限界の値を越えてこの比が大きいと，回転する雲は，初め平衡であったにも係わらず，図 2 のようにスパイラル状の不安定性が発生することがわかった．この計算から，回転だけでは巨大な質量を支えることができないこともわかった．次に，初め雲を支えるだけの圧力や遠心力がない場合の雲の進化を調べた．雲は重力のため急激に収縮を開始する．以前に，密度の十分薄い場合の計算を実行したが[5]，今度は，密度が十分高く収縮が断熱的に進行する場合である．星が形成されるときの回転の程度や，内部エネルギーの大きさは，非常に多様であると予想される．このため，多数のシミュレーションを実行して，その結果から何らかの法則性を導き出すことを考えた．図 3 に示したのは，その一例で，初期のガス体の内部エネルギーの大きさの程度を縦軸に，回転の程度を横軸にとり，それぞれの位置に計算の最終結果を示した．この図から，ガス体の初期状態に対していかに最終結果が依存するか明

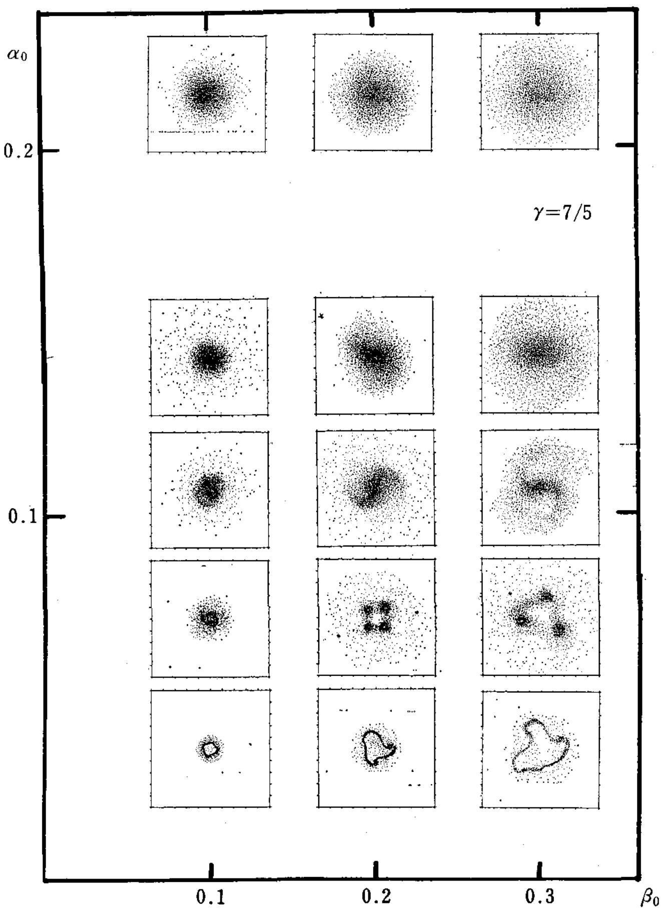


図 3　回転するガス体の進化のシミュレーション．初期のガス体の内部エネルギー（縦軸），回転の程度（横軸）の上に進化の最終ステージを示した．

白となる．これらのコンピューターシミュレーションによって，我々はあたかも天体現象を実験するような感じで調べることができ，分裂の理論をつくることが可能となった．

4. 終わりに

最初に述べたように，シミュレーション天文学における日本の現状は，諸外国に比較して全く優位にある．今後は，更に今の状況を推進する必要があると共に，若い研究者が出て来ることを期待したい．今なら，世界一のシミュレーションが確実に日本で可能である．

しかし，注意すべきはコンピューターシミュレーションは，天体現象を探る一つの道具であるということを強く認識すべきである．我々はいつも，シミュレーションの実行が重要なのではなくて，結果を支配する物理を追求することに重きを置くべきだと心に留め置く必要がある．（観山正見）

引 用 文 献

1) S. M. Miyama, S. Narita, C. Hayashi. 1987, Prog. Theor. Phys. **78**, 1051
2) S. M. Miyama, S. Narita, C. Hayashi. 1987, Prog. Theor. Phys. **78**, 1273
3) 観山正見．1986, 天文月報 **79**, 228
4) S. M. Miyama, S. Narita, C. Hayashi. 1988, Preprint.
5) S. M. Miyama, C. Hayashi, S. Narita. 1984, Astrophys. J. **279**, 621

II. 回転星の平衡形状

回転する天体の構造を求める問題は，ニュートンから始まって，マクローリン・ヤコビ・リーマン・デデキンド・ポアンカレなどなどといった数学者の取り組んできた「古色蒼然」たる問題である．したがって (?)，問題は単純であって，重力と圧力と遠心力が作用している場合のつりあい状態（存在すれば）を求めることである．これらの数学者の扱った問題は，非圧縮性の流体が一様回転ないし一定の渦度をもち，しかも形状が楕円体の場合に限られていた．つまり，楕円体関数を含めて「解析的」に解ける場合を扱っていたにすぎない．したがって，非圧縮性の流体に限っても，ほんの一部しか理解されていなくて残された問題が数多くある．そのことは，百年以上も前にさかのぼらなくても，20年ほど前にチャンドラセカールやレボビッツが，いわゆるテンソルビリアル技法を駆使して安定性を中心にした研究を 20 編以上の一連の論文として発表することが可能であったことからも窺い知ることができる．

このチャンドラセカール達の研究[1] にしても，非圧縮性流体の平衡形状を徹底的に追及したものではない．形状が楕円体から大きく離れた平衡状態は，数値的に求める以外にはなかったからである．しかも，問題は星の表面が未知の楕円型微分方程式の自由境界値問題であって，数値的な扱いも容易とはいえない．

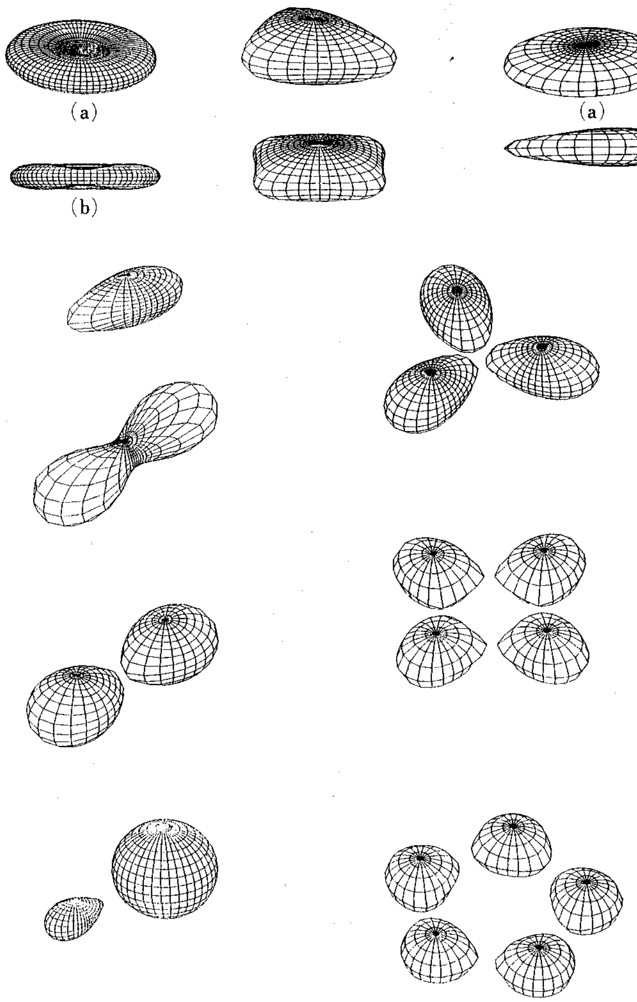
一方で，1960年代後半以降，計算機の性能も徐々に向上したため，現実的な時間内に回転星の構造を求めることのできる環境が生まれ，いくつかの研究グループが回転星の構造を数値的に求めた．特に，オストライカーを中心としたグループは力学平衡の式とポテンシャルの式を交互に解くという SCF (self-consistent-field) 法を開発して，回転ポリトロープの平衡状態を計算した．しかし，彼らの方法は万能ではなく，圧縮性の高いガスや変形が極めて大きくなってくると解が求められなくなってしまった．

このような状況で，筆者と京都大学の蜂巣氏は適用可能範囲の広い数値的解法を開発し，非圧縮性流体をはじめ圧縮性ガス（主としてポリトロープ）について，軸対称から非軸対称まで数多くの平衡形状系列を求めてきた．いくつかの形状を図1に示しておく．ここでは凹んだハンバーガー・三角おにぎり・四角座布団・アンモナイト・卵（西洋なし）・ダンベル・連星・3連星・4連星・5連星を示した．また図2（表紙）は回転速度が一定に近い回転則を持つポリトロープの形状と密度分布をあらわしている．

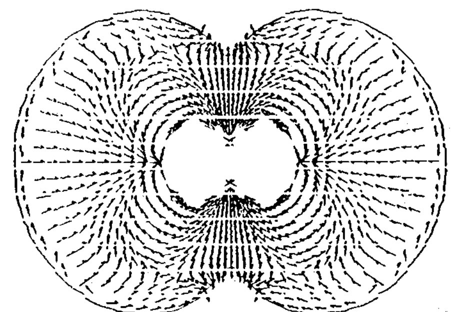
これらの計算では，研究のその時点時点での最高速度の計算機が使用されたが，そうした高性能の計算機にしても，メッシュ間隔を可能な限り「**大きく** (!)」とり，また数値解法に特別の工夫を凝らす必要があった．そうした工夫をしなければ，その時点での最高性能の計算機によっても現実的な経過時間内に解を求めることが難しかったからである．もちろん，現時点でポリトロープについて同じ計算をするとすると，計算機の進歩のおかげで，短時間で解を得ることが可能となっている．

しかし，現実的な状態方程式に従うガスからなる回転星や連星の構造を求めることは，内部運動が伴うこともあり，現在の最高速のスーパーコンピューターをもってして，ようやく可能になり始めたのである．それでも，軸対称性や面対称性を仮定したり，初期の非圧縮性流体の場合と同様に問題に応じた特別の工夫を凝らして，「やっと」計算できるという程度である．図3は，非一様回転している恒星の形状とその内部の流れのパターンを示したものである．

ところで，計算機の利用法からみたとき，平衡形状を扱う場合には境界値問題であることが，時間変化を追う計算と少し趣を異にする．つまり，時間変化を追う計算では，時間変化を追いかけるための長大な計算が必要になるが，境界値問題では，一般には境界条件を満足させるために特別の技法が必要で，その技法を開発するための try and error 的な計算に多大の計算時間をとられる．



◀ 図 1　種々の平衡形状の例．凹んだハンバーガー・三角おにぎり・四角座布団・アンモナイト・卵（別名西洋なし？）・ダンベル・3連星・4連星・5連星．



▲
図 3　回転軸上を除いて単位質量当たりの角運動量が一定になるような角速度分布を与えて，熱の流れを含めて構造を解いたモデルの子午面内の様子．矢印は流れのパターンをあらわしているのみで，速さに比例してはいない．

そして，一旦計算法が確立すれば，最終的な計算にはさほどの「長大な」計算は必要としない．したがって，一つの完成したモデルを計算するのに要する計算機時間のみから，計算の難易を推し量ることは必ずしも適当ではないのである．

いずれにせよ，軸対称2次元にしても，対称性のない3次元問題を扱うにしても，高速で容量の大きな計算機が不可欠であるのはいうまでもないが，そうした計算機にアクセスすることに経費・通信といった面の障害があってはならない．計算費用を心配することなく，大量のデータを短時間でやり取りでき，しかも可能なら最短の待ち時間で計算できる計算機環境が望まれるのである．

（江里口良治）

参考文献

1) S. Chandrasekhar: Ellipsoidal Figures of Equilibrium, 1969, Yale Univ. Press