

お詫びと訂正

2003年12月号(第96巻12号)の記事『シミュレーションで探る惑星系形成』(井田, 小久保著)の図1と図2にミスがありました. ここに訂正したものを再掲載致します.

著者および読者の皆様にはご迷惑をおかけしたことを謹んでお詫び申し上げます.

天文月報編集委員会
株式会社 国際文献印刷社

編集委員 土橋一仁(編集長), 上田暁俊, 大石奈緒子, 太田耕司, 亀野誠二, 濤崎智佳, 藤田 裕, 洞口俊博, 増田 智
平成15年12月20日 発行人 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1 国立天文台内 社団法人 日本天文学会
印刷発行 印刷所 〒169-0075 東京都新宿区高田馬場3-8-8 株式会社 国際文献印刷社
定価700円(本体667円) 発行所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1 国立天文台内 社団法人 日本天文学会
Tel: 0422-31-1359(事務所) / 0422-31-5488(月報・欧文編集) Fax: 0422-31-5487 振替口座 00160-1-13595
日本天文学会のウェブサイト <http://www.asj.or.jp/> 月報編集 E-mail: toukou@geppou.asj.or.jp

シミュレーションで探る惑星系形成

井 田 茂

〈東京工業大学大学院理工学研究科 〒152-8551 東京都目黒区大岡山 2-12-1〉

e-mail: ida@geo.titech.ac.jp

小久保英一郎

〈国立天文台理論天文学研究系 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: kokubo@th.nao.ac.jp

惑星系形成論は惑星系や衛星-リング系の形成過程を理論的に明らかにすることを目標とする。複雑にさまざまな物理過程が入り組んだ形成過程を調べるのにはシミュレーションが強力な武器になる。ここでは、筆者らのグループが行ってきたシミュレーションを例に、これまで惑星系形成研究でどのようなシミュレーションが行われ、どのような成果が得られているのかを簡単に紹介する。

1. 日本のインフラの優位性

我々はこれまで日本の基礎科学における計算機環境の圧倒的優位性の恩恵を受けてきた。日本では、20年ほど前から、国立大学や国立研究機関に次々とスーパー・コンピュータが導入され、使用料金さえ払えば、大学院生以上なら誰でも自由に使えるようになっている。一方、欧米では軍事研究や応用分野優先という制度や日本製コンピュータに対する貿易障壁などの政治的問題で、基礎科学の研究者のスーパー・コンピュータの使用は極めて制限されてきた。

「欧米が追いついてくる前に、計算しまくって論文を書きまくれ！」というのが、日本の理論研究者の一つの戦略であった（もちろん計算は目的ではなく手段である）。スーパー・コンピュータのみならず、GRAPE¹⁾などの専用計算機という、モンスター・マシンも現れた。少し前までは、欧米の惑星系形成の研究者は貧弱なPCで細々と計算していたので、「日本人だけがそんなすごい計算機環境を持っているのは不公平だ」とも言われた。

しかし、（少なくとも惑星系形成の理論研究では）この優位性は現在かなり危うくなってきている。安価なPCクラスタが登場したり、ヨーロッパでは日本製スーパー・コンピュータやGRAPEの導入が進んでいる（アメリカでは依然、政治的問題で難しいが）。

だが、何と言っても、日本はスーパー・コンピュータや専用計算機に強い。これからも積極的に整備すれば、基礎科学分野でまだまだ世界最高の計算機環境を維持できる。地上望遠鏡、人工衛星、実験装置といったあたりは、日本のメーカーが世界を独占しているわけではないので、その整備は予算額の問題になり、アメリカや東になっているヨーロッパを相手にして、圧倒的優位性を得ることはやさしくない。日本が有利な条件にある、計算機環境を増強することは、日本が世界の科学をリードするために是非とも必要なことであろう。

本稿では、筆者らのグループが行ってきたシミュレーションを例に、これまで惑星系形成の研究でどのようなシミュレーションが行われ、どの

ような成果が得られているのかを紹介する。より詳しく知りたい方は文献 2, 3 などを参照してほしい。

2. シミュレーションの必要性

惑星系形成論の目的は、母体となる原始惑星系円盤からの惑星系の形成過程を物理的に明らかにすることにある。その対象は惑星系のみならず衛星系や惑星リングにまで及ぶ。太陽系や系外惑星の観測により惑星系形成の最終状態の情報、T タウリ型星の原始惑星系円盤の観測により惑星系形成の初期状態の情報を得ることができる。そして観測では知ることが難しいこの間の形成過程を明らかにするのが理論シミュレーションの役割である。

惑星系形成過程、衛星系形成過程はかなり複雑な過程である。太陽系の地球型惑星や木星型惑星の固体核は、「微惑星」が衝突・合体して形成されたと考えられている。この過程は惑星集積過程と呼ばれる。合体成長によって微惑星の質量分布関数は刻々と変化し、空間構造も形成され、それらに従って重力緩和の様子も変化する。また、この過程は、微惑星の総質量の 100 倍もの質量をもつガス円盤の中で進行するので、ガス抵抗、ガス円盤重力が大きく影響する。

衛星は、惑星の近傍のコンパクトな領域で、「微衛星」が集積して形成される。だが、惑星半径の数倍以内のロッシュ限界の内側では潮汐力が大きく、微衛星は衝突しても合体できず、はね返る。また、微衛星は密集しているため、衝突は頻繁で、この衝突の際のエネルギー散逸による構造形成が系の進化を支配する。

このような系の進化を調べるのに威力を発揮するのが、コンピュータを用いたシミュレーション(数値実験)である。それは文字どおりコンピュータの中に宇宙を再現し、そこで現象の基礎方程式を数値的に解くことによって何が起きるのかを調べることである。

シミュレーションの役割は二つある。一つは理論の実験的検証である。理論から予測される結果が正しいのか確かめるためにシミュレーションを行う。理論とシミュレーションが合えばそれはそれでうれしいし、予想外のことが起きればそれはそれで楽しい。もう一つの役割は未知の領域の実験的探査である。頭だけでは答が想像できない未知の領域でも、まず「実験」してみることで、現象を理解するための切口が見つかることが多い。答がわかった後でなら、物理過程が複雑に入り組んでいても、系の進化を整理するのも難しくはない。

3. シミュレーションの成果

では近年のシミュレーションの成果を簡単に紹介させてもらおう。ここでは粒子系の大規模シミュレーションを取り上げる。以下のシミュレーションはすべて重力多体問題専用計算機 GRAPE を用いて行った N 体シミュレーションである。当時はどれも GRAPE を用いて初めて可能になった誰にもまねできない最先端のシミュレーションだった。

粒子系のシミュレーション以外でも、惑星とガス円盤の重力相互作用や惑星へのガス降着の流体シミュレーション、原始地球と原始惑星の巨大衝突の SPH シミュレーションなどが日本で行われている。

3.1 惑星集積過程

微惑星の成長モードは暴走的、すなわち、大きい微惑星ほど速く成長することが知られている。我々は、 N 体シミュレーションにより、暴走成長天体(原始惑星)がその後どのように成長していくかを調べた^{4), 5)}。図 1 は初期に質量 1.5×10^{21} kg の 10,000 体の微惑星からなる系の N 体シミュレーションの結果である。約 400 万年の間に地球質量の 1/10 程度の原始惑星が 9 体形成されている。原始惑星の軌道は初期の微惑星分布の中心面上ではほぼ円軌道である。原始惑星の軌道間隔は惑

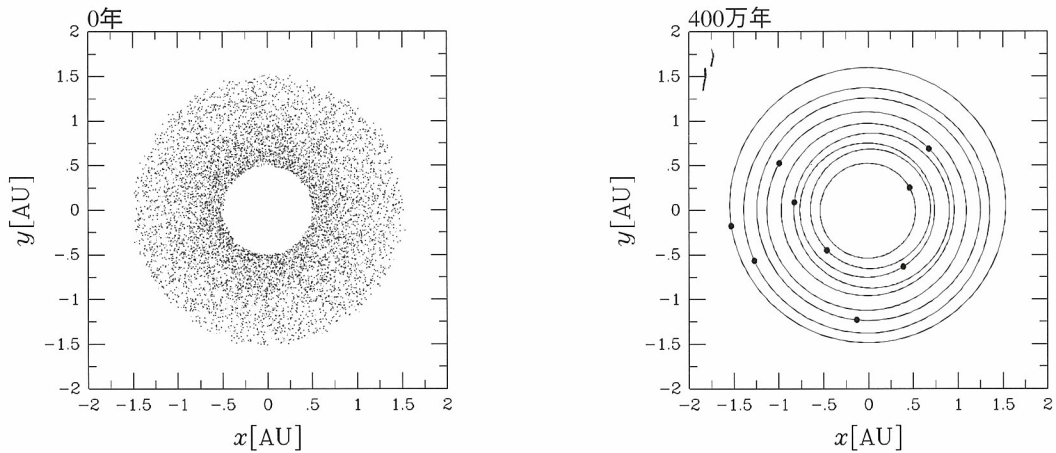


図1 惑星集積の N 体シミュレーションの例. 10,000 体の微惑星（左図）から、約 400 万年後に地球型惑星領域に 9 体の原始惑星（右図）が形成されている. 右図の線は原始惑星の軌道を表す.

星質量と軌道長半径の関数として与えられることがわかっている. このように同質量程度の原始惑星が一定軌道間隔を保ちながら成長するモードを寡占的成長と言う.

寡占的成長は N 体シミュレーションにより発見されたものだった. これは今では学界でも広く認められ、惑星系形成の最終段階を考える上での基礎となっている. 例えば、地球軌道付近で形成される原始惑星の質量は地球質量の $1/10$ 倍くらいで、これは地球の完成には原始惑星どうしの巨大衝突が必要だということを示唆している⁴⁾.

3.2 月集積過程

月の起源のシナリオとしては「巨大衝突説」が有力である. そこでは原始地球に火星サイズの原始惑星が衝突し、周地球軌道にばらまかれた破片群（原始月円盤）から月が形成されると考えられている. 図2は原始月円盤からの月集積の N 体シミュレーションの例である⁶⁾. 原始月円盤の質量のほとんどは初期にロッシュ限界の内側にある. 粒子の非弾性衝突により、粒子の速度分散が小さくなると、円盤は重力的に不安定になり、渦状腕が成長する（図2左）. この渦巻構造による重力ト

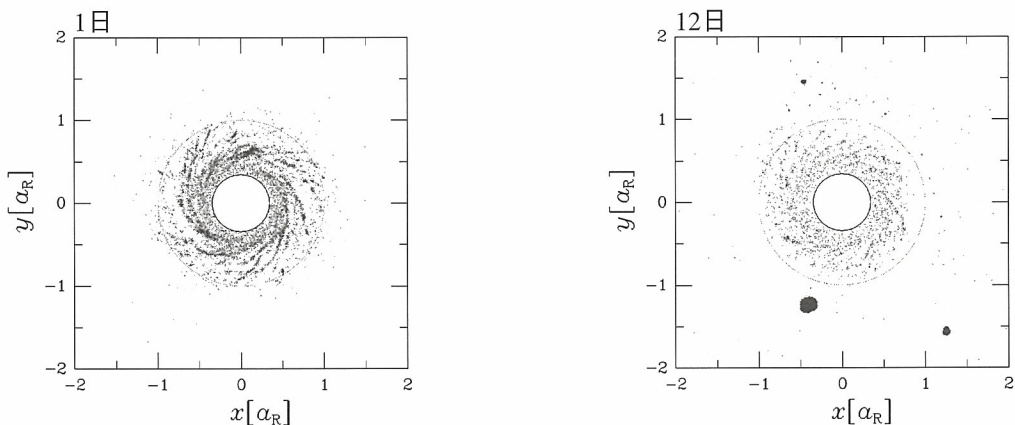


図2 月集積 N 体シミュレーションの例. 原始月円盤の約 1 日後（左）と約 12 日後（右）のスナップショット. 点線の円はロッシュ限界の位置、太線の円は地球を表す.

ルクで円盤の質量の多くは地球に落ち、一部がロッシュ限界の外側に運ばれ、そこで、月が集積する(図2右)。シミュレーションにより、原始月円盤の質量が月質量の数倍の場合、いつでも1個の月が形成されることがわかった。集積時間は1カ月程度であり、これは円盤内の角運動量輸送時間に等しい。このようなシミュレーションによって少なくとも巨大衝突説の後半のシナリオは現実的なものと考えられるようになった。

我々は、1,000体⁷⁾、10,000体⁶⁾、100,000体⁸⁾の計算を行った。渦巻による角運動量輸送は100,000体の計算により、詳細にわかった。結果として、原始月円盤の進化で本質的なものは渦巻構造であり、それを表現するには粒子は数千体以上あればよく、その粒子数以上では基本物理は変わらないということがはっきりした。このように現象を支配する物理がはっきりすると、その現象を表現するために必要な計算精度がわかる。この場合は、数千体の計算でよかったわけだが、それを知るためにはもっと多数粒子の計算が必要だった。

3.3 惑星リングの構造

惑星リングはm以下の小さな粒子の集まりである。土星のリングには成因のよくわかっていな

い細かい縞構造、つまり粒子分布の疎密がある。リングの10~100 km スケールの円環構造は有名である。しかしボイジャーを使ったリングによる星の掩蔽の観測から、リングには100 m スケールの微細構造もあることがわかっている。

リングはロッシュ限界の内側にあり、強い潮汐力のため、リング粒子は自己重力によって集積することができない。リングは粒子どうしの自己重力と非弾性衝突によって進化する。

図3は土星リングの一部を約80,000体の局所N体シミュレーションを用いて計算した例である⁹⁾。初期に一様分布だったリング粒子に縞状の構造が現れている。これは粒子円盤の重力不安定性に起因する構造で、N体シミュレーションによって発見されたものである。この構造は定常的なものではなく、時間とともに変化する。この縞状の構造の典型的な波長は、線形安定性解析から期待される重力不安定の波長の程度である。土星Bリングの場合、その波長は100 m のオーダーになり、微細構造のスケールと一致する。このようなN体シミュレーションで示された縞構造は、近い将来、Cassini 探査機によって直接検出される可能性がある。

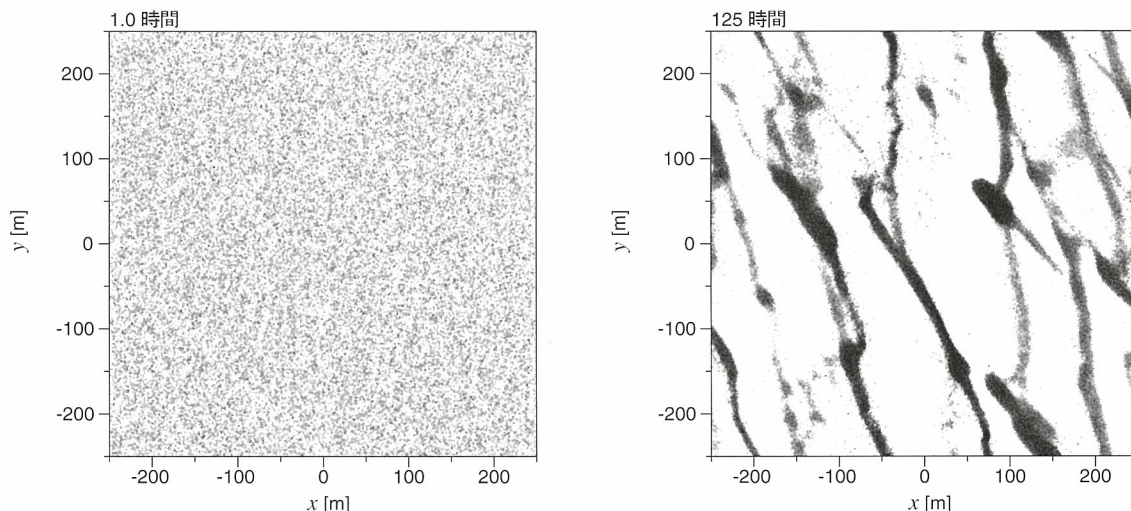


図3 土星リングの構造形成のN体シミュレーションの例。リングの約1時間後(左)と約125時間後(右)のx(動径方向)-y(角度方向)面のスナップショット。リング粒子半径は1 m。

4. 今後の展望

今後、シミュレーションで切り開いていかなくてはならない重要な課題は多い。例えば、惑星集積では、円盤との重力相互作用による軌道進化を入れた計算や連星系の計算がある。これまでの惑星系形成論は、簡単のため、太陽のような単一星を考えてきた。系外惑星観測も単一星を狙ってきた。しかし、銀河系の恒星は7割以上が連星系だと言われている。連星の重力場の中で微惑星や惑星はどのように形成されるのだろうか。連星系の惑星系の研究は理論も観測もまだ始まったばかりである。

衛星-リング系でも残っている課題は多い。惑星リングは原始衛星円盤の名残りと考えられ、衛星系形成とリング進化は共通した問題をもっている。衛星系形成では、近年、月に対してシミュレーションが行われたが、それ以外の一般の衛星系の集積についての研究は少ない。衛星の個数や衛星系の構造はどのような物理によって決まるのか、また、どのような条件のときにリングが残るのだろうか。また、これまでのリングの N 体シミュレーションは局所的な、つまり、リングの一部分だけの計算であった。しかし、リングの形などの大域的な構造や衛星との相互作用を見るためには、全リングを含んだような大域的なシミュレーションが必要である。天王星の楕円リングや海王星のリングのアーク構造の起源など調べなければいけない課題は多い。

これら以外にもシミュレーションをしてみないと現実的なことはわからない多くの問題が残されている。観測技術が進歩した現在でも、その空間・時間スケールから惑星系・衛星系形成を直接観測することは難しい。そこで何が起きているの

かを知るにはシミュレーションは不可欠である。今後も日本のお家芸であるシミュレーションを武器として、立ち足かかる問題に挑んでいきたい。

参考文献

- 1) 杉本大一郎, 専用計算機によるシミュレーション, 朝倉書店
- 2) 井田 茂, 小久保英一郎, 1999, 一億個の地球, 岩波書店
- 3) 井田 茂, 2003, 異形の惑星, NHK 出版
- 4) Kokubo E., Ida S., 2000, *Icarus* 143, 15
- 5) Kokubo E., Ida S., 2002, *ApJ* 581, 666
- 6) Kokubo E., et al., 2000, *Icarus* 148, 419
- 7) Ida S., et al., 1997, *Nature* 389, 353
- 8) Takeda T., Ida S., 2001, *ApJ* 560, 514
- 9) Daisaka H., et al., 2001, *Icarus* 154, 296

Exploring Planet Formation with Large-Scale Simulations

Shigeru Ida

*Department of Earth and Planetary Sciences,
Tokyo Institute of Technology, Ookayama 2-12-1,
Meguro-ku, Tokyo 152-8551, Japan*

Eiichiro Kokubo

*Division of Theoretical Astrophysics, National
Astronomical Observatory, Osawa 2-21-1, Mitaka,
Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: The central subject of the planet formation theory is to clarify the formation process of planetary systems and satellite-ring systems theoretically. Large-scale simulations play important roles in the investigation of the complex physical processes of planet formation. We briefly introduce the results of our recent simulations in this field.