

周地球円盤内での月集積過程

田中 秀和¹

月の起源として現在最有力視されている「巨大衝突説」では、まず衝突直後にまき散らされた破片が地球まわる円盤を形成し、その円盤内の集積過程を通して月がつくられたとされている。しかし、周地球円盤における月集積過程についてはこれまで詳しく調べられておらず、不明な点が幾つか残されている。本稿では、惑星集積理論の手法を用いて、「集積過程の結果1個の月が形成されるか」などの点について検証する。また、最近井田ら[1]が行った月集積過程のN体シミュレーションの結果も紹介しよう。

1. 巨大衝突による月起源説

地球をまわる我々の月の最大の特徴は、その巨大にある。外惑星のまわりには月より重い衛星が幾つか存在するが、母惑星に対する質量比で見れば、月(約1/80)の巨大さがわかるであろう。また物質化学的には、アルカリ金属などの揮発性元素や鉄が大幅に欠損しているという性質を持っている。

このような性質を持つ月の起源については数多くの説が唱えられてきたが、未だ明確な答は出されていない。現在、最も有力だとされている説が、Hartmann and Davis[2]によって提唱された「巨大衝突説」、すなわち、火星サイズの天体が地球に衝突し、その破片から地球をまわる月が形成されたとする説である。これを受けて、CameronやBenz

は、1980年代後半より SPH法という流体数値計算法を用いて巨大衝突の数値シミュレーションを数多く行い、実際に巨大衝突による月形成が可能であるかを詳しく調べてきた[3,4,5]。彼らの結果は次のようにまとめられる。

- (a) 衝突の結果、直接月サイズの破片が安定な軌道を周回するようになるのは極めて希で、ほとんどの場合小さな破片からなる円盤がつくられる。
- (b) 全質量が月質量以上である円盤をつくるのが可能である。
- (c) 地球と衝突天体が共に鉄のコアを持っているとすれば、衝突天体のコアは地球に落ちて、円盤に鉄がほとんど含まれないようにすることが可能である。
- (d) 衝突時の加熱により円盤は数千度という高温になる。
- (a)の結果より、巨大衝突で月をつくるためには、周地球円盤内での集積というプロセスが必要となる。集積過程の結果1個の月が形成されるならば、鉄の欠損、加熱による揮発性元素の欠損を説明しうることから、巨大衝突説は有力な説となっている。

しかしながら、巨大衝突説は以下のような3つの問題を抱えている。

第1の問題は、「巨大衝突で十分な質量を持つ円盤を形成できるか」という問題である。集積過程で月をつくるには、「ロッシュ半径」より外側にあ

¹東京工業大学理学部地球惑星科学科

る円盤の質量が重要である。ロッシュ半径とは、連星系で伴星が主星の潮汐力で破壊されないための最小軌道半径である。これより内側では、天体同士が衝突しても合体せず、成長できない。従って、ロッシュ半径の外側部分だけで少なくとも月質量をもつ、円盤が形成されなければならないと考えられる。これに対し、Cameronらの最新の巨大衝突のシミュレーションでは、現在の月-地球系の角運動量で衝突させて、ロッシュ半径より外側に1月質量を持つ円盤をつくるのは困難であるという結果となっている。巨大衝突でより重い円盤をつくるには、衝突天体の角運動量を大きくしてやれば良いであろう。しかし、衝突天体の角運動量を現在の月-地球系の角運動量に比べずっと大きい値とすると、今度はその過剰の角運動量をどう捨てるかという問題が生まれてしまう。

第2の問題は、「周地球円盤は実際1つの月に集積するのか」が明らかになっていない点である。周地球円盤での集積過程についてはこれまであまり調べられておらず、Canupらによる研究[6]が唯一のものである。彼らは、成長方程式(決まった確率で衝突・合体する粒子集団の質量分布の進化を決定する方程式)を用いて集積過程を計算を行った。その結果、円盤は1箇の月に集積せず、地球をまわる数十個の塊がつけられると結論した。しかし、彼らの計算は各粒子の軌道進化を追っていないので、集積最終状態に対する彼らの結果は信頼性の高いものではない。

第3の問題は「揮発性元素を十分減少させることは可能なのか」という問題である。衝突時の加熱で確かに揮発性元素は蒸発するかも知れないが、それらが冷えてそのまま再凝結しては意味がない。再凝結の前に、他の元素と分離することが必要である。地球重力場から熱的に脱出させることは容易ではないと考えられる。カリウムなど比較的重い元素は地球重力場から脱出させるのに数万度と

いう非現実的な温度が必要となってしまうからである。

月の起源を解明するためには、まず、有力な説とされている巨大衝突説がこれら3つの問題を解決できるかどうかを見極めることが必要であろう。本稿では、惑星形成過程で用いられてきた手法を月集積過程に応用し、集積がどのように進行していくかを議論することで、これらの問題について検討していく。

2. 周地球円盤での月集積過程

巨大衝突によって形成される円盤として、半径がロッシュ半径の1.5倍(地球半径の約5倍)で、ロッシュ半径外側に月質量を持つ円盤を考えよう。円盤の面密度を一様とすると、面密度は $3.2 \times 10^6 \text{g/cm}^2$ と得られる。原始太陽系星雲の面密度(固体成分が約 10g/cm^2 、ガス成分が 2000g/cm^2)と比べれば、これがいかに大きい値であるかがわかるであろう。この大きい面密度が、周地球円盤の最も特異で、重要な性質である。

周地球円盤のモデルを決めれば、そこで進行する集積過程の様子は、惑星形成論で行われたのと同様な方法を用いて調べることができる。表1には、周地球円盤に対して求められた集積過程を特徴づける各量の典型的な値を示した(計算方法の詳細については、渡邊, 井田[7]を参照)。

集積過程は天体同士の衝突・合体により進行するので、1つの天体がどの位の時間間隔で他と衝突するかを示す「衝突時間」が重要となる。周地球円盤の面密度が非常に大きいため(月サイズの天体の衝突時間は約10日と非常に短い。天体の成長時間はおよそこの衝突時間で与えられる。但し、衝突時における破壊の効果を考慮すると成長時間はもう少し長くなるであろう。地球中心からロッシュ半径だけ離れた地点で、天体の(物理)半径と、そ

表1. 周地球円盤内の集積を特徴づける量

円盤の質量 (ロッシュ半径外)	$M_L = 7.4 \times 10^{25} \text{g}$
円盤の半径	$5R_E = 3.2 \times 10^4 \text{km}$
円盤の面密度	$3.5 \times 10^6 \text{g/cm}^2$
周回周期 ($a = 4R_E$)	11 時間
周回速度 ($a = 4R_E$)	3.9km/s
ロッシュ半径	$2.9R_E$
重力圏半径/天体半径	$1.6(a/3R_E)^{-1}$
相対速度 (= 脱出速度)	$2.0(m/M_L)^{1/3} \text{km/s}$
天体軌道の離心率	$0.51(m/M_L)^{1/3}$
衝突時間 ($a = 4R_E$)	$13(m/M_L)^{1/3} \text{日}$
衝突領域の幅	$1.0(m/M_L)^{1/3} a$

M_L : 月質量, R_E : 地球半径, a : 軌道半径,
 m : 天体質量

の重力圏の半径(Hill 半径)はほぼ同じになる。そのため、ロッシュ半径より内側では重力圏が小さく、衝突してもほとんど合体できない。また、ロッシュ半径の外側でも、ロッシュ半径の2倍程度を考えるならば天体の重力圏はそれほど大きくなく、衝突時に破片は比較的容易にその重力圏から飛び出す。従って、ロッシュ半径の2倍程度以下の円盤を考える限り、そこでの成長時間は衝突時間より長くなり、数ヶ月のオーダーになるであろう。

この様な見積りにより、前説で挙げた問題について議論することができる。まず、「円盤は1つの月に集積するか」について考えてみよう。そのためには、1つの天体がどの位の範囲の天体と衝突するかを考えるとよい。各天体の軌道は僅かに楕円であるため、1つの天体は動径方向にある幅を持ったリング状の領域内にある天体と衝突することができる。衝突領域の幅は、軌道半径と離心率の積の2倍で与えられる。この様に得られる衝突領域の幅は、天体が月質量程になると円盤半径とはほぼ等しくなる(表1参照)。すなわち、その天体の衝突領域はほぼ円盤全体をカバーするようになる。従

って、「円盤が月ができる位の十分な質量を持っていれば、円盤全体は1つ(または2つ)の天体に集積する」と結論される。

次は、「周地球円盤の質量」の問題について考える。ここでは「どの位の質量の円盤が形成されるか」ではなく、「月をつくるのにどの位の円盤質量が必要か」について考えよう。Cameron らは「ロッシュ半径の外側に1月質量が必要」としてきたが[3, 4, 5], 円盤の進化を考えると話は変わってくる。周地球円盤は非常に大きな面密度を持っているので、円盤の自己重力は強力である。そのため、円盤は重力不安定になり、円盤に「銀河の腕」のような波(密度波)が立つと予想される。密度波は円盤の内側から外側へ角運動量を運び、円盤内で動径方向に物質拡散が起こる。物質拡散により、円盤の一部が地球に落ちる一方、ロッシュ半径の内側から外側に物質が供給される。従って、巨大衝突直後にロッシュ半径外側に1月質量がある必要はなく、拡散の結果、最終的に1月質量が供給されればよいことになる。

拡散時間は、原始太陽系円盤と同様な方法[8]で求めることができ、その値はロッシュ半径内で数ヶ月と見積もられる。これは月サイズの天体の成長時間と大体等しい。従って、ロッシュ半径内の拡散により物質が供給されながら、月集積は進行していく。

ロッシュ半径内の物質が、外側の月に供給される分と地球に落ちる分とにどのくらいの割合で分配されるかは、角運動量保存から簡単に見積もることができる[1]。例えば、円盤の面密度が一様な場合には、初期にロッシュ半径内にあったものの約4割がロッシュ半径外に供給され、残りは地球に落ちると見積もられる。但し、一様ではなく中心集中した角運動量の小さい円盤の場合には、ロッシュ半径外に供給される割合は一様な円盤に比べ減少する。以上のように、円盤の進化の結果口

ッシェ半径の内側から外側へかなりの量の物質が供給されるので、従来必要と考えられていたよりも小さな質量の円盤から月をつくることできる。この節では、およその見積りによって月集積過程の様子を予想してきた。次節では、これらの結果の妥当性を確かめるため、月集積過程を実際にN体シミュレーションで計算した結果を見てみよう。

3. 月集積過程のN体シミュレーション

ここでは、井田ら[1]によって最近行われた月集積過程のN体シミュレーションの結果を紹介する。

彼らは、衝突した天体は常に合体するとはせず、次のような合体条件を用いた。衝突時に、破壊などのエネルギー散逸の効果として、衝突速度の法線成分をある反発係数(0.01)で減衰させて接線成分はそのまま跳ね返らせる。この衝突後の相対速度が、天体の脱出速度以下である場合には合体するとした。この様な合体条件を採用したことにより、ロッシュ半径内で成長できないという性質が再現されている。

紹介するシミュレーションでは、初期円盤質量は2.4月質量、半径はロッシュ半径の1.5倍とした。ロッシュ半径外の質量は0.4月質量となっている。円盤の面密度、天体の質量分布などその他のパラ

表2. N体シミュレーションの初期条件

天体数	1000 体
円盤質量	2.4 月質量
円盤半径	1.5 ロッシュ半径
面密度	$\Sigma \propto a^{-3}$
質量分布	$n(m) \propto m^{-1.5}$
離心率	0.3
傾斜角	0.3

メータについては表2にまとめておいた。図1にN体シミュレーションの結果を示した。それぞれは、各時間の天体の分布(r-z平面)を表している。原点にある円(破線)は地球を表している。一番上の図は初期分布である。14日経過した時点では、円盤は初期に比べかなり広がっている。また、衝突で相対速度が減衰するため、円盤の厚みは小さくなっている。この時点で、ロッシュ半径付近に0.3月質量の天体ができている。

288日経過した時点では、1.5倍のロッシュ半径の所に1つの「月」(大きい天体)が形成されている。その質量は0.64月質量とやや小さいが、初期にロッシュ半径外にあった質量よりは重い。その近くにある2つの天体はやがて月に捕獲されるであろう。また、0.4ロッシュ半径に残っている天体は、地球との潮汐相互作用による軌道進化を考慮すれば、地球に落ちるであろう。このようにして、地

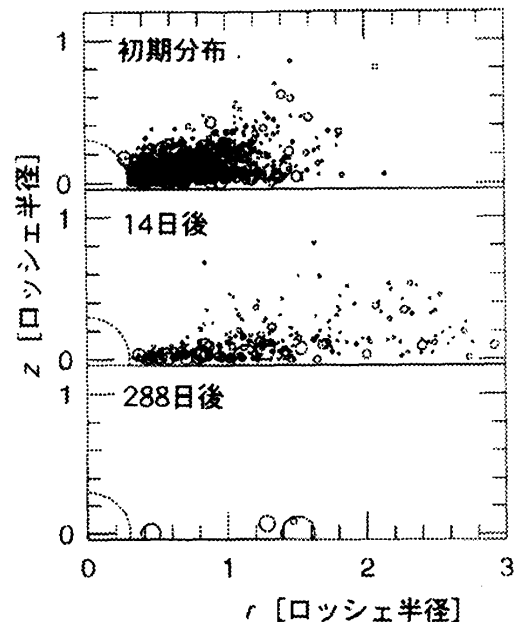


図1. 月集積過程のN体シミュレーション。各時間での円盤天体の(r-z面における)分布を示した。長さはロッシュ半径で規格化してある。原点の円(点線)は地球、他の円(実線)は周地球円盤の各天体を表す。天体の大きさは1.5倍にしてある。

球をまわる1つの月が形成されることになる。円盤物質の残りの大部分は、地球に落ちてしまっている。一部は、「月」の重力により地球の重力圏外に飛ばされた。

井田らは、他にも円盤の質量などのパラメータを変えて数多くのシミュレーションを行っている。初期に半径の大きい円盤では2つの同程度の質量を持つ「月」がつくられやすい傾向があったが、大部分では1個の「月」がつくられるという結果であった。また、つくられた月の質量は、どの場合も初期円盤質量の1/5から1/3程度であった。これより、現実の月をつくるためには、初期に3~5月質量をもつ円盤が必要であると結論される。

4. 巨大衝突説の問題は解決されたか？

前節までの議論から得られた結果は、以下の様にまとめられる。

- ・ 集積過程の結果、多くの場合地球をまわる1個の「月」がロッシュ半径のすぐ外に形成される。
- ・ 形成時間は(反発係数に依存するか)およそ数カ月である。
- ・ 円盤の拡散により、ロッシュ半径内から外へ物質が供給されるので、初期にロッシュ半径外側に1月質量がある必要はない。しかし、円盤のかなりの部分は地球に落ち、最終的に月になるのは初期円盤質量の1/5~1/3程度である。

これより、「1個の月ができるか」という問題は解決されたといってよいだろう。一方、「十分な円盤がつくられるか」という問題は微妙である。ロッシュ半径より内側を含めてといえども、地球-月系の角運動量の巨大衝突で3月質量以上の円盤を形成するのは困難であるかも知れない。この問

題を決着させるためには、最近、Cameronが行った様な精密な巨大衝突シミュレーション[5]をさらに行い、どの程度の確率で3月質量以上の円盤が形成されるかを明らかにする必要がある。

では、「揮発性元素の欠損」の問題はどうであろうか。これに対しては次のような解決法が考えられる。巨大衝突時に揮発性元素が蒸発したとし、ガス円盤を形成したとする。ガス円盤の密度は小さくで重力が弱いため、ガス円盤は広がることはない。よって、初期の円盤がロッシュ半径程度の大きさであったとすると、揮発性元素の再凝結はほとんどロッシュ半径内で起こる。

一方、より難揮発性の他の元素は揮発性元素が蒸発している間に集積を開始するであろう。ガスの冷却時間は数年と長いので、揮発性元素が再凝結する以前に、他の元素からなる月が形成されると考えられる。ここで、それぞれはロッシュ半径の内外に分離される。その後、ロッシュ半径内で再凝結した揮発性元素は、月の強い重力ではね飛ばされて、地球に落ちると予想される。このように、初期の円盤としてロッシュ半径に比べてあまり大きくないものを考えれば、「揮発性元素の欠損」は説明可能となる。

最後に、集積時の加熱について述べておこう。集積時には、1.5 km/s程度の速度の衝突を繰り返すのでかなり加熱される。それに対し冷却時間は数年以上と長いので、その間発熱した分のほとんどは円盤内に蓄積されることになる。運動エネルギーが全て熱に変わったとすると、1回当たりの発熱量は1g当たり200Jと、かなりの加熱になる。これにより、天体は融解すると考えてよいであろう。更に、衝突してもなかなか合体できず集積時間が長くなる場合には、その間の衝突回数とともに発熱量は増加するので、円盤のかなりの部分が蒸発する可能性もある。大規模な蒸発は、集積過程を極端に遅らせ月集積を定性的に変えるかもしれない。

集積過程がどれだけ長引くかは、井田らのシミュレーションでは「反発係数」に依存しており、明かではない。これを明らかにするためには、衝突時の破壊・合体の詳細を考慮し、それを集積のシミュレーションに組み入れることが今後必要であろう。

謝辞

本稿を作成するにあたり、井田氏の最新のシミュレーション結果を参考にさせて頂いた。また、阿部氏、中澤氏、榎森氏、倉本氏には、多くの貴重なコメントを頂いた。

参考文献

- 第3章.
- [8] Larson, R.B., 1984: Gravitational torques and star formation. *Mon. Not. R.Astron. Soc.* **206**, 197-207.
- [1] Ida, S, Canup R. M., and Stewart G. R., 1997: Lunar Accretion from an Impact-Generated Disc. submitted to *Nature*.
- [2] Hartmann, W. K. and Davis, D. R., 1975: Satellite-sized planetesimals and lunar origin. *Icarus* **24**, 504-515.
- [3] Benz, W., Slattery, W. L., and Cameron, A. G. W., 1986: The origin of the Moon and the single impact hypothesis I. *Icarus* **66**, 515-535.
- [4] Cameron, A.G.W. and Benz, W., 1991: The origin of the Moon and the single impact hypothesis IV. *Icarus* **92**, 204-216.
- [5] Cameron, A.G.W., 1997: The origin of the Moon and the single impact hypothesis V. *Icarus* **126**, 126-137.
- [6] Canup, R.M. and Esposito, L.W., 1996: Accretion of the Moon from an Impact-Generated Disk. *Icarus* **119**, 427-446.
- [7] 渡邊誠一郎, 井田茂, 1997: 比較惑星系形成論. 「比較惑星学」(松井孝典編), 岩波書店,