

# 名残の月

## — 巨大衝突により形成された周地球円盤から —

小久保 英一郎

〈東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: kokubo@grape.astron.s.u-tokyo.ac.jp

月の起源のシナリオとして近年有力視されているのは巨大衝突（ジャイアント・インパクト）説である。巨大衝突説では、火星くらいの大きさの天体が原始地球に衝突し、その衝突により形成された周地球円盤から月が集積される。この周地球円盤からの月の集積の大規模  $N$  体シミュレーションを行ない、周地球円盤がどのように進化するのかを調べた。その結果、ほとんどの場合1つの大きな月が1月という時間スケールで形成されることがわかった。なぜ1月で1月が？ 今その謎が解き明かされる。

### 1. はじめに

見上げればあたりまえのように空に浮かんでいる月。月は地球に一番近い天体である。しかし、この一番身近な天体はまだ謎に満ちている。実はその起源さえ解明されていないのである。

月とはどのような天体なのだろうか。地球-月系の力学的な特徴は他の衛星系に比べ衛星の惑星に対する質量比が大きいこと（月の質量は地球の質量の約 1/80）と、角運動量が大きいこと（地球が約 4 時間で自転する場合の角運動量に相当）である。月の地球周りの軌道はほぼ円軌道である。軌道長半径は  $3.8 \times 10^8$  m（約 60 地球半径）である。月の化学的な特徴は地球に比べて鉄分が少ないことである。地球では質量の約 30% が金属鉄と見積もられているが、月では 4% 以下と推定されている。これは月の材料物質が地球マントルのような鉄分の少ない物質であったことを示唆している。また、月には揮発性元素（例えば K, Pb）が少ない。これは月の形成過程でなんらかの高温過程があつて、揮発性元素が月から抜けてしまったことを示唆している。

このような特徴を持った月はどのようにして形成

されたのだろうか。現在の惑星形成の標準モデルでは、惑星は微惑星と呼ばれる小天体が衝突合体して形成されたと考えられている。衛星形成についても標準モデルの枠組の中でいろいろ考えられているが、月のような大きな衛星の起源については未だにわからないことが多い。

ここでは、月の起源の説の中で最近有力になりつつある巨大衝突（ジャイアント・インパクト）説を採用する<sup>1)</sup>。そして巨大衝突により形成される岩石破片からなる周地球円盤からどのように月が集積していくかを  $N$  体シミュレーションを用いて調べた結果を紹介する。

### 2. 巨大衝突説

現在まで月の起源についていろいろな説が考えられてきた。大きく分けると、分裂（親子）説、捕獲（他人）説、共成長（姉妹）説、巨大衝突説の4つになる。分裂説では地球が高速で自転し、地球から月が分裂する。捕獲説では地球がどこか他のところで形成された月を潮汐摩擦や原始地球大気ガス抵抗により捕獲する。共成長説では地球と月がはじめから連星として微惑星集積により形成される。この3つの説のうち分裂説・捕獲説

は力学的に難しいと考えられている。また、共成長説・捕獲説では地球と月の組成が化学的に同じになってしまい、月の化学的特徴を説明しがたい。そこで力学的に無理がなく化学的特徴も説明できる説として1970年代に提案されたのが巨大衝突説である<sup>1)</sup>。

巨大衝突説では、(1) まず火星くらいの大きさの原始惑星が原始地球に衝突する。(2) 衝突により地球の周りに主に岩石(マントル)成分からなる月材料物質が供給される。(3) 材料物質が冷えるにつれて粒子でできた周地球円盤が形成される。(4) この周地球円盤から粒子の集積により月が形成される。月は地球に近いところで形成されて、その後地球との潮汐相互作用によって地球から離れていったと考えられている。巨大衝突説の長所は、大きな地球-月系の角運動量を説明できることと、月の鉄と揮発性元素の欠損を説明できることである。衝突によって地球の周りには主に原始惑星のマントル成分が残り、コア(鉄分)は地球に落ちてしまう。衝突と月集積により月物質は高温になり、そのさいに揮発性元素が抜けるのである。

さらに、最近の惑星形成の研究<sup>2), 3)</sup>によると、地球型惑星形成の最終段階は大きな原始惑星どうしの衝突合体である、ということがわかってきた。巨大衝突は決して稀なものではなく、惑星形成の中で普通に起きるものと考えられるようになりつつあるのである。

最近の研究により、巨大衝突説で形成されると考えられる周地球円盤から1つの月を集積させることが可能であることがわかってきた<sup>4), 5)</sup>。ここでは(3)の周地球円盤を初期条件として円盤の進化を大規模 $N$ 体シミュレーションにより調べる。

### 3. $N$ 体シミュレーション

#### 3.1 運動方程式

周地球円盤の粒子の運動方程式は

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = -GM_{\oplus} \frac{x_i}{|x_i|^3} - \sum_{j \neq i}^N Gm_j \frac{x_i - x_j}{|x_i - x_j|^3} \quad (1)$$

となる。ここで $G$ は重力定数、 $m_j$ 、 $x_j$ は粒子の質量と位置、 $M_{\oplus}$ は地球質量である。右辺の第1項は地球の重力、第2項は粒子間の相互重力である。

$N$ 体シミュレーションでは粒子間の相互重力を直接計算し、運動方程式を数値的に積分することによって粒子の位置と速度の時間進化を計算する。粒子間の相互重力は粒子数の自乗に比例する。そのため粒子数を多くすると実際の時間での計算ができなくなってしまう。ここでは重力多体問題専用計算機GRAPE<sup>6)</sup>を用いることによりその問題を解決する。数値積分法はディスク系を精度良く計算できるように工夫されたエルミート積分法を使う<sup>7)</sup>。

粒子の軌道を計算していて、粒子間の距離が2粒子の半径の和より小さくなった場合は衝突したとする。衝突したときは粒子間の相対速度にある反発係数をかけた反発速度で粒子どうしを反発させる。

#### 3.2 集積モデル

衝突した2粒子が重力的に束縛された場合は合体(集積)させる。地球重力場で2粒子が重力的に束縛されているための必要十分条件はヒル座標系で考えると使いやすい。地球から距離 $a$ のところでケプラー角速度 $\Omega$ で回転するヒル座標系を考える。ヒル座標系上の2粒子の相対運動にはヤコビ積分 $E_J$ が存在し、衝突後に2粒子が重力的に束縛されているための必要十分条件は(1)  $E_J < 0$ かつ(2)  $r_1 + r_2 < r_H$ である。ここで、 $r_1$ 、 $r_2$ は2粒子の半径であり、 $r_H$ はヒル(ロッシュ)半径と呼ばれ、2粒子の重力圏の大きさを示し、

$$r_H = \left( \frac{m_1 + m_2}{3M_{\oplus}} \right)^{1/3} a \quad (2)$$

で与えられる。 $m_1$ 、 $m_2$ は2粒子の質量である。この重力束縛の条件は、地球に近いところでは潮汐力(地球重力と遠心力の差)が強いので重力的に束縛されにくい、ということになっている。つまり、

おおまかに言えば、2粒子がロッシュ限界の外側にいる、ということに対応する<sup>5)</sup>。ロッシュ限界の半径  $a_R$  は潮汐力と自己重力が等しいところで、

$$a_R = 2.46 \left( \frac{\rho_{\oplus}}{\rho} \right)^{1/3} R_{\oplus} \quad (3)$$

で与えられる。 $R_{\oplus}$  は地球半径である。ロッシュ限界の内側では潮汐力が自己重力を上回り、粒子は重力的に束縛されない（土星のリングから衛星が集積されないのはこのためである）。地球（ $\rho_{\oplus} = 5.5 \text{gcm}^{-3}$ ）と月材料物質（ $\rho = 3.3 \text{gcm}^{-3}$ ）の場合、 $a_R = 2.9 R_{\oplus}$  である。

重力的に束縛された2粒子をどう扱うかで3種類のモデルを考える。(1) 粉体モデル: 重力的に束縛されてもそのまま2粒子にしておく。(2) 完全集積モデル: 重力的に束縛された2粒子は合体させて1粒子とする。(1) は物質の結合力が無い場合、(2) は物質の結合力が無限大の場合に対応する。現実には(1)と(2)の間と考えられる。そこで(3) 部分集積モデル:  $r_1 + r_2 < 0.7 r_H$  の場合、重力的に束縛された2粒子を合体させる、も考える。(3) は簡単に言えば、円盤の内側では粉体モデル、外側では完全集積モデルという折衷モデルである。

### 3.3 初期条件

周地球円盤の初期条件は不明な点が多い。巨大衝突のSPHシミュレーション<sup>8)</sup>からわかっているのは、数倍の月質量で比較的小さな（質量のほとんどがロッシュ限界の中にあるような）円盤が形成されるだろう、ということである。そこでなるべくいろいろな初期条件を考えることにする。ここでは粒子数は10000とする。円盤の質量は  $M_{\text{disk}} = 2 - 4 M_L$  とする。 $M_L$  は現在の月質量である。粒子の質量分布はべき分布  $n \propto m^{-\alpha}$  で与え、ダイナミックレンジは  $m_{\text{max}} / m_{\text{min}} = 1000$  とする。粒子の表面密度分布もべき分布  $\Sigma \propto a^{-\beta}$  で与え、内側のカットオフを  $a_{\text{min}} = R_{\oplus}$ 、外側のカットオフを  $a_{\text{max}} = 1 - 2 a_R$  とする。初期の粒子の離心率、軌道傾斜角分布はレイリー分布で与え、 $\langle e^2 \rangle^{1/2} = 2 \langle i^2 \rangle^{1/2}$  とす

る。粒子の反発係数は粒子どうしの相対速度の方向成分は  $\epsilon_n = 0.1, 0.01$  とする。簡単のために接線方向成分は  $\epsilon_t = 1$  とする。

現在までに  $M_{\text{disk}}, \alpha, \beta, a_{\text{max}}, \epsilon_n$ 、集積モデルを変えて約60例の計算を行なっている。

## 4. 周地球円盤の進化

計算はロッシュ限界のところでケプラー周期で1000周期まで行なった。ロッシュ限界でのケプラー周期は約7時間である。1000周期は約10ヶ月になる。ほとんどすべての計算で周地球円盤の進化は基本的に同じであった。すなわち、ほぼ円盤の赤道面上ではほぼ円軌道上の1つの大きな月がロッシュ限界のすぐ外側に形成される。

図1に計算例を示す。この計算の初期条件は  $M_{\text{disk}} = 4 M_L, \alpha = 1.5, \beta = 3, a_{\text{max}} = a_R, \langle e^2 \rangle^{1/2} = 2 \langle i^2 \rangle^{1/2} = 0.3$  である。反発係数は  $\epsilon_n = 0.1$  で、部分集積モデルを使っている。図1は地球からの距離  $R-z$  面上での周地球円盤の進化を示したものである。最大粒子（月）の質量  $M$  と地球に落ちた粒子の質量  $M_{\text{fall}}$  を図2に示す。1つの大きな月が  $R \approx 1.3 a_R$  のところに質量  $0.9 M_L$  で形成されているのがわかる（2番目に大きい粒子の質量は月の9%しかない）。軌道はほぼ円盤の赤道面上ではほぼ円軌道である。

それではどのように1つの月が形成されるか見ていこう。図2に見られるように周地球円盤の進化は大きく分けて2つの段階に分けられる。100  $T_k$ （1月）くらいまでの初期の月の急成長段階とその後の月のゆっくり成長する段階である。急成長段階では、円盤の角運動量の再分配により月材料物質がロッシュ限界の外側に供給される。すなわち、多くの物質が地球に落ちることにより、月材料物質を円盤の外側に運ぶ。つまり、周地球円盤は1種の降着円盤なのである。月の形成はこの急成長段階ではほぼ完成している。緩成長段階では月はゆっくりと成長しながら、重力散乱により内側の円盤を地球に落す。

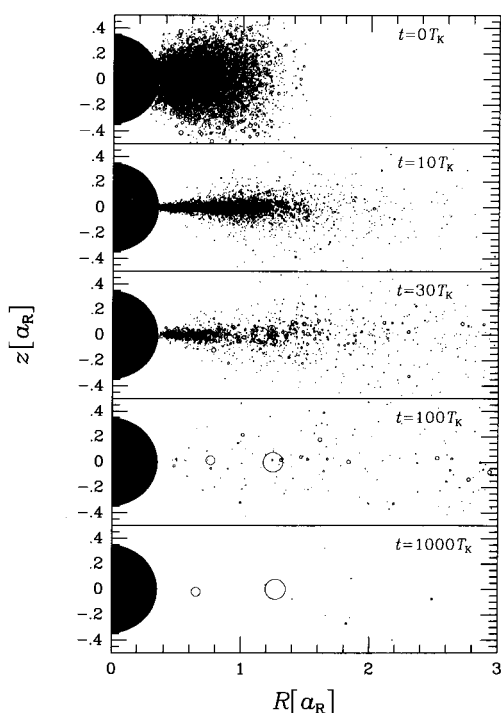


図1  $R$ - $z$  面上の  $t = 0, 10, 30, 100, 1000T_K$  での周地球円盤のスナップショット。左の半円は地球を表す。円は円盤粒子を表し、円の大きさは粒子の大きさに比例している。

#### 4.1 なぜ1月？ — 個数編

月は初期の急成長段階ではほぼ完成する。急成長段階を詳しく見ていこう。ここでは空間構造の見やすい粉体モデルの計算を示す。初期条件は簡単のため  $\alpha = 0$  (等質量粒子) とした以外上の計算例と同じである。図3は  $x$ - $y$  面上での  $t = 0, 1, 5, 10, 20, 40T_K$  における周地球円盤のスナップショットである。

周地球円盤の進化を理解するために円盤の安定性の指標、Toomre の  $Q$  値

$$Q = \frac{v_R \Omega}{\pi G \Sigma} \quad (4)$$

を導入する<sup>9)</sup>。ここで  $v_R$  は粒子の動径方向の速度分散である。円盤は速度分散  $v_R \cdot$  回転角速度  $\Sigma$  が大きい ( $Q > 1$ ) とき重力的に安定で、面密度  $\Sigma$  が

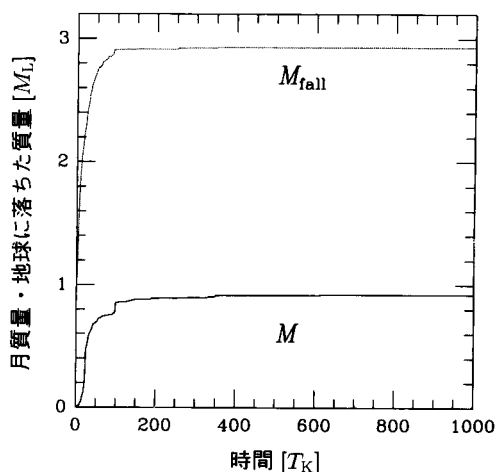


図2 月(最大粒子)の質量  $M$  (実線) と地球に落ちた質量  $M_{\text{fall}}$  (点線) の時間変化。

大きい ( $Q < 1$ ) ときは重力的に不安定になる。

急成長段階での周地球円盤の進化は以下のようにとまとめられる。

##### 〈円盤の収縮〉

初期円盤の粒子の速度分散は大きく ( $Q \gg 1$ ) 円盤は重力的に安定である。円盤は粒子どうしの衝突により、動径方向、垂直方向に収縮する。収縮の時間スケールはケプラー周期である。これは粒子の反発係数が小さく、衝突時間がケプラー周期ぐらいだからである。

##### 〈重力不安定〉

円盤粒子の速度分散が小さくなると  $Q$  値は減少し1に近づく。 $Q$  値が最小となる  $R \simeq 0.5 a_R$  のところで円盤は重力的に不安定になり、かたまりに分裂する ( $t = 1T_K$ )。このかたまりのサイズは線形安定性解析から期待される臨界波長の長さ

$$\lambda_c = \frac{2 \pi^2 G \Sigma}{\Omega^2} \quad (5)$$

にはほぼ等しい。 $R = 0.5 a_R$ ,  $\Sigma = 0.03 M_{\oplus} a_R^{-2}$  では  $\lambda_c \sim 0.1 a_R$  となり、これは計算結果と合っている。

##### 〈渦状腕の形成〉

かたまりはロッシュ限界の中にあるので安定には

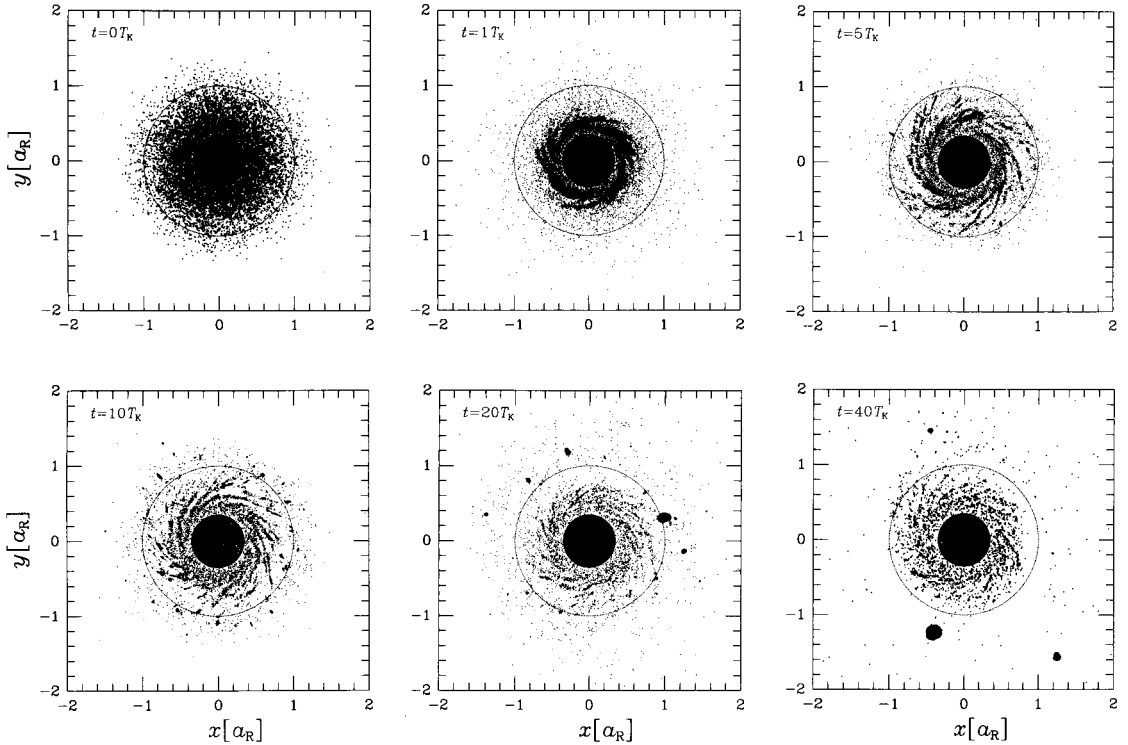


図3  $x$ - $y$  面上の  $t = 0, 1, 5, 10, 20, 40T_k$  での周地球円盤のスナップショット. 中央の太い円は地球を表し, 点線の円はロッシュ限界を示している.

存在できない. すぐに, 差動回転により伸ばされてしまい, 渦状腕状になる ( $t = 5T_k$ ). 腕の数は10-20である. この渦状腕はパターン波ではなく物質波である. 渦状腕はきつく巻き付くことによって壊されるが, またすぐに次の渦状腕が形成される.

#### 〈渦状腕による物質輸送〉

渦状腕の重力トルクによって月材料物質がロッシュ限界外に運ばれる. 同時に地球に多くの粒子が落ちる. 円盤の面密度は減少する. 一方, ロッシュ限界外の面密度は内側からの供給を受けて上昇する.

#### 〈アグリゲイトの形成〉

渦状腕の先端部がロッシュ限界外に達すると, 先端部の粒子は重力的に束縛し, アグリゲイト (粒子集団) を形成する ( $t = 10T_k$ ). ロッシュ限界外では粒子の自己重力が潮汐力を上回るからであ

る. アグリゲイトの質量はほぼ  $m \sim \Sigma \lambda_c^2$  で与えられる.

#### 〈月の“種”の形成〉

同じような地球からの距離にできるアグリゲイトは散乱しあいながら次々と合体し, 1つの大きなアグリゲイト, 月の“種”がロッシュ限界の外側に形成される ( $t = 20T_k$ ). その軌道はほぼ円盤赤道面上で円軌道である ( $t = 40T_k$ ). 月の種は形成後, ロッシュ限界内から運ばれてくる粒子を独占的に集積しながら成長する. 同時に円盤との相互作用によって少し外側に移動する.

なぜ1つの月が形成されるのかは明らかにならなかった. 巨大衝突で形成されるだろう重くて ( $M_{\text{disk}} \geq M_L$ ) 小さな ( $a_{\text{max}} \leq a_R$ ) 周地球円盤は上記のように進化するので必然的に1つの大きな月が

形成されるのである。つまり、月を形成するためにはロッシュ限界の内側から粒子の集積可能な外側に粒子を運ばなくてはならない。初期にロッシュ限界の外側に運ばれた粒子は月の種を形成する。月の種はロッシュ限界のすぐ外側に居座り続け、ロッシュ限界の内側から運ばれてくる粒子を独占的に集積しながら成長する。このために1つの月が形成されることになるのである。

## 4.2 なぜ1月？ —— 時間編

次に円盤からの月形成の時間スケールについて考えよう。計算結果によると月形成の時間スケールは  $100T_K$  (1月) であった。そして、この時間スケールは細かい円盤の初期条件にはほとんどよらない。月は主にロッシュ限界外に運ばれた粒子によって形成される。ロッシュ限界外に運ばれた粒子はすぐに大きなアグリゲイトに吸収される。すなわち、月形成の時間スケールは物質輸送の時間スケールで決まっている。そして、物質輸送の時間スケールは角運動量輸送の時間スケールと同等である。

周地球円盤では衝突による粒子拡散による角運動量輸送より渦状腕の重力トルクによる角運動量輸送が支配的である。この場合角運動量輸送の時間スケールは

$$T_g \sim 10^2 \left( \frac{\Sigma}{0.01 M_{\oplus} a_R^{-2}} \right)^{-2} \left( \frac{\Delta R}{0.5 a_R} \right)^2 \left( \frac{R}{a_R} \right)^{-9/2} T_K \quad (6)$$

となる<sup>9)</sup>。ここで  $R$  は地球からの距離、 $\Delta R$  は物質の移動幅である。この時間スケールは  $N$  体シミュレーションの結果と良くあっている。時間スケールを見てわかるように、角運動量輸送は個々の粒子の質量ではなく、円盤の面密度によって決まっている。1月という月形成の時間スケールは周地球円盤の角運動量輸送の時間スケールだったのである。

月形成で重要なのは重力不安定によるかたまりの形成、そしてその後の渦状腕の形成とそれによ

る角運動量輸送、アグリゲイトの形成と合体といった粒子の集積的なふるまいであった。かたまり、そして渦状腕のサイズは重力不安定の臨界波長  $\lambda_c$  で決まっている。そして、臨界波長は円盤の面密度で決まるのである。 $N$  体シミュレーションの結果が円盤粒子の細かい初期条件にはほとんどよらなかったのはこのためなのである。

## 5. 月の力学的特徴

円盤の定性的な進化と進化の時間スケールはわかった。次は周地球円盤とそこから集積される月の特徴の関係を定量的に見てみよう。ここでは部分集積モデルの30種の周地球円盤の計算結果を使う。

最大の月はいつでもロッシュ限界外に形成されている。30例中26例で1つの月が形成されている(2番目に大きな粒子は月質量の20%以下)。集積した月(最大粒子)の軌道の軌道長半径はほぼ  $1.1 a_R$  と  $1.5 a_R$  の間にある。軌道長半径は月の種の形成場所とその後の円盤との相互作用によって決まる。月の種はロッシュ限界の外側に形成される。そして内側の円盤を地球に落すことの反作用として少し外側に移動する。離心率と軌道傾斜角は力学的摩擦と衝突によるエネルギー散逸により小さくなっている。ほとんどの場合、 $e, i < 0.1$  である。つまり、月の軌道はほぼ円盤の赤道面上でほぼ円軌道なのである。これらの月の軌道要素は今考えている範囲の円盤の初期状態にはほとんどよらない。月の軌道長半径は現在のそれと比べて約  $1/16$  である。月はこの後、地球との潮汐相互作用によって外側にある円盤の残りを集積しながらゆっくりと外側に移動して行くのである<sup>10)</sup>。

初期円盤の単位質量当たりの角運動量  $J_{\text{disk}} / M_{\text{disk}}$  と初期円盤質量で割った集積した月の質量  $M/M_{\text{disk}}$  の関係を図4に示す(2つの月が形成された場合は2つの月の質量の和を使っている)。月の質量は初期円盤質量の10–55%であり、これは  $J_{\text{disk}} / M_{\text{disk}}$  に比例している。これは  $J_{\text{disk}} / M_{\text{disk}}$  が小さな円盤で

は、ロッシュ限界の外側に月材料物質を持ち上げるのに、多くの質量が地球に落ちる必要があるので小さな月ができる、ということの意味している。地球重力場から脱出する質量の割合も  $J_{\text{disk}} / M_{\text{disk}}$  に比例する。しかし、この割合は普通 5% 以下なので集積される月の質量にはあまり影響しない。

$J_{\text{disk}} / M_{\text{disk}} - M_{\text{disk}} / M_{\text{disk}}$  関係は周地球円盤の角運動量保存から説明することができる。周地球円盤の角運動量保存は、

$$J_{\text{disk}} \simeq M \sqrt{GM_{\oplus}(1 - e^2)} a + (M_{\text{disk}} - M - M_{\text{esc}}) \sqrt{GM_{\oplus}(1 + e_{\text{fall}})} q_{\text{fall}} + M_{\text{esc}} \sqrt{GM_{\oplus}(1 + e_{\text{esc}})} q_{\text{esc}} \quad (7)$$

となる。左辺は上から月、地球に落ちた粒子、地球重力場から脱出した粒子の角運動量を示し、 $a$ ,  $e$ ,  $q_{\text{fall}}$ ,  $e_{\text{fall}}$ ,  $q_{\text{esc}}$ ,  $e_{\text{esc}}$  はそれぞれの典型的な軌道長半径もしくは近地点距離と離心率である。ここでは周地球円盤は薄く、月集積は完了しているとしている。 $N$  体シミュレーションで得られた平均値は  $\bar{a} = 1.3 a_{\text{R}}$ ,  $\bar{e} = 0.04$ ,  $\bar{q}_{\text{fall}} = 0.3 a_{\text{R}}$ ,  $\bar{e}_{\text{fall}} = 0.2$ ,  $\bar{q}_{\text{esc}} = 1.3$ ,  $\bar{e}_{\text{esc}} = 1.1$  である。 $\bar{q}_{\text{esc}} = \bar{a}$  という関係は主に月の散乱によって粒子が地球重力場から脱出していることを示している。これらの値を使うと、

$$M \simeq \frac{1.9 J_{\text{disk}}}{\sqrt{GM_{\oplus}} a_{\text{R}}} - 1.1 M_{\text{disk}} - 1.9 M_{\text{esc}} \quad (8)$$

となる。図 4 の直線がこの関係を示している。 $N$  体シミュレーションの結果と良く合っているのがわかる。つまり、集積される月の質量は基本的には円盤の角運動量保存によって決まっているのである。

$N$  体シミュレーションの結果は、 $J_{\text{disk}} / M_{\text{disk}}$  が小さいところ ( $\sim 0.6$ ) と大きなところ ( $\sim 1.0$ ) で少し上記の見積りよりずれている。小さなところでは  $N$  体シミュレーションの結果は見積りよりも大きい。これはこの場合、月の軌道長半径が平均の値よりも小さいためである。これは小さな円盤の特徴である。また、大きなところでは  $N$  体シミュレーション

の結果は見積りよりも小さい。この場合は、まだ 1000 体ぐらいの粒子が残っている。つまり、まだ集積が完全には終わっていないのである。そのため  $N$  体シミュレーションの結果が小さいのである。

求められた  $J_{\text{disk}} / M_{\text{disk}} - M_{\text{disk}} / M_{\text{disk}}$  関係から、現在の質量の月を形成するためには、例えば、 $M_{\text{disk}} = 2M_{\text{L}}$  で  $J_{\text{disk}} / M_{\text{disk}} \simeq 0.9 \sqrt{GM_{\oplus}} a_{\text{R}}$  もしくは  $M_{\text{disk}} = 4M_{\text{L}}$  で  $J_{\text{disk}} / M_{\text{disk}} \simeq 0.75 \sqrt{GM_{\oplus}} a_{\text{R}}$  の周地球円盤が必要であることがわかる。

## 6. おわりに

月の起源のシナリオとして近年有力視されている巨大衝突説にもとづき、巨大衝突により形成される周地球円盤からの月の集積の大規模  $N$  体シミュレーションを行なった。その結果、質量が数倍の月質量程度でロッシュ限界内にほとんどの質量があるような小さな周地球円盤からは、ロッシュ限界のすぐ外側にほぼ円軌道を持つ 1 つの月が 1 月という時間スケールで形成されることがわかった。周地球円盤の進化を詳しく調べ、必然的に 1 つの大きな月が形成されることがわかった。また、形成の時間スケールは周地球円盤に発達する渦状腕による角運動量輸送の時間スケールにより決まっている。月の質量は初期の周地球円盤質量の 10-55% になり、これは初期円盤の単位質量当りの角運動量に比例する。

現在の  $N$  体シミュレーションでは月の温度は計算に入っていない。今後は粒子の衝突・合体による熱エネルギーの発生も考慮して計算を行なえば、形成された月の温度など、現在の月の化学的特徴を説明するのに必要な情報が手に入れられるだろう。

ルナー・プロスペクターやルナー A の活躍によって月の観測は新しい時代に入っていきだろう。そして月の起源を考える上で重要な情報もたらされるだろう。これからはますます月から目が離せない。

巨大衝突という破滅的な宴の後に月が残される。今の冷えて白けた月とは違い、集積で解放される

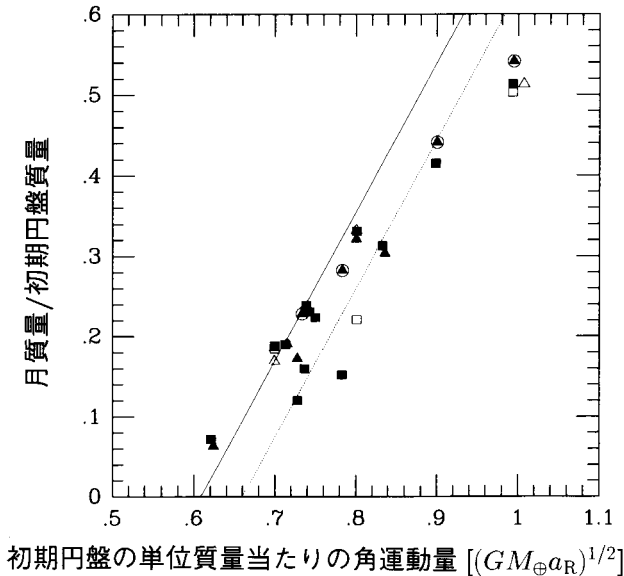


図4

周地球円盤の単位質量当たりの角運動量  $J_{\text{disk}} / M_{\text{disk}}$  と集積された月の質量の関係。月の質量は初期円盤質量で規格化してある。3 角形は初期円盤質量  $M_{\text{disk}} = 2M_{\text{L}}$ 、4 角形は  $M_{\text{disk}} = 4M_{\text{L}}$  であることを示す。黒塗りは反発係数  $\epsilon_n = 0.1$ 、白抜きは  $\epsilon_n = 0.01$  であることを示す。丸は 2 番目に大きい粒子が月の質量の 20% より大きな場合を示す (2 つの月ができた場合はそれらの和を月の質量として使っている)。円盤の角運動量保存から見積られる値を地球重力場から脱出した粒子の質量  $M_{\text{esc}} = 0$  の場合 (実線) と  $M_{\text{esc}} = 0.05M_{\text{disk}}$  の場合 (点線) について示してある。

エネルギーのために熱くなっている月が。そんなことを思いながら月を見てもまた楽しい。

この研究は東京工業大学の井田 茂さんとの議論の中から形を得てきました。また、東京大学の牧野淳一郎さんとの計算コードの開発が計算を可能にしました。ここに謝意を表します。また、計算結果を CG・映画にするのに共同で作業した武蔵野美術大学の三浦 均さん、作曲家の一ノ瀬 響さんに感謝します。CG・映画のヴィジュアル・インパクトのおかげでどれほどこの研究が楽しくわかりやすくなったかしれません。

### 参考文献

- 1) Stevenson D. J., 1987, Ann. Rev. Earth Plant. Sci., 15, 271
- 2) Kokubo E., Ida S., 1998, Icarus, 131, 171
- 3) Chambers J. E., Wetherill G. W., 1998, Icarus, 136, 304
- 4) Ida S., Canup R. M., Stewart G. R., 1997, Nature, 389, 353
- 5) Kokubo E., Makino J., Ida S., 1999, submitted to Icarus

- 6) Makino J., Taiji M., Ebisuzaki T., Sugimoto D., 1997, ApJ, 480, 432
- 7) Kokubo E., Yoshinaga K., Makino J., 1998, MNRAS, 297, 1067
- 8) Cameron A. G. W., 1997, Icarus, 126, 126
- 9) Toomre A., 1964, ApJ, 139, 1217
- 10) Canup R. M., Levison H. F., Stewart G. R., 1999, AJ, 117, 603

### From a Circumterrestrial Disk to a Single Moon

Eiichiro KOKUBO

Department of Astronomy, University of Tokyo,  
Hongo 7-3-1, Bunkyo-Ku, Tokyo 113-0033

Abstract: We investigate the evolution of a circumterrestrial disk of debris generated by a giant impact on the earth and the characteristics of the moon accreted from the disk by using high-resolution  $N$ -body simulations. We find that in most cases the disk evolution results in the formation of a single large moon on a nearly non-inclined circular orbit outside the Roche limit. These results hardly depend on the initial condition of the disk as long as the mass of the disk is 2 to 4 times the present lunar mass and most mass of the disk exists inside the Roche limit. The formation time scale of the moon is of the order of a month.