

●●●●あの論争は…いま？ (9) ●●●●

## 月の起源—本当に巨大衝突で形成されたのか？—

### *Origin of the Moon: Is the Giant Impact Hypothesis True?*

和田 桂 一

〈国立天文台理論研究部 〒181-0015 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: wada.keiichi@nao.ac.jp

論争の種: われわれの月の形成過程

論争のはじまり: 19世紀後半頃から?

主な対立説: 古典的シナリオ(親子説, 兄弟説, 他人説), 巨大衝突説

現在有力な説: 1975年頃に提唱された巨大衝突仮説, 数値実験結果を受け, 1984年頃から有力な説として学界で認識される. しかし, それらの数値実験には多くの問題が……

われわれの月は, 他の惑星の衛星に比べて極端に大きいことはよく知られています. たとえば, 木星最大の衛星であるガニメデは, 月よりも少し大きいくらいですが, 木星質量の約1万分の1なのに, 対し, 月は地球質量の1.2%もあります. 太陽系内ではほかにこのような巨大な衛星をもつ天体は, 冥王星に対するカロン(質量比1:0.08)だけです. また, 地球-月系の角運動量は非常に大きく, その角運動量を地球の自転だけで置き換えようとするれば, 地球が5時間程度で自転するほどです. また, 月は鉄のコアがなく, 揮発性物質(カリウムなど)が少ないという特徴もあります. このような不思議な特徴をもつ月の起源については昔から多くの仮説が提唱されてきました. 「親子説」(高速で回転する原始地球からちぎれてできた. 太平洋がその跡だ, と私が子供の頃聞いたような気がします), 「兄弟説」(地球と月が同時に微惑星の集積によって成長した), 他人説(地球軌道に原始惑星が地球の重力圏にとらえられ月となった). これらの「古典的」シナリオは, 結局どれも上記の地球-月系の特徴をうまく説明できずに, 否定されました. 最後に生き残ったシナリオは,

ハートマン(W. Hartman)とデイビス(D. Davis)が1975年に提唱した, 「巨大衝突仮説」です. 原始地球に火星程度の大きさの原始惑星が衝突し, その残骸は, 地球周囲に円盤をつくります. やがて円盤内の残骸が, 重力により再び集積し, 月が形成されたという仮説です. 地球型惑星は, 微惑星どうしの衝突合体により成長してきたと考えられています. そのプロセスの最後には, 火星程度の大きさの原始惑星どうしの激しい衝突=巨大衝突が起こります. この巨大衝突のエネルギーは膨大なので, 残骸は一度かなり高温になり, そのため揮発性元素が地球本体に比べ減少することが予想されます. また, 衝突の際に原始惑星内の重い鉄のコアが, 原始地球に落ち, その結果残骸は, マントル部分で構成されると考えられます. 原始惑星の衝突が原始地球に対して斜めに起こる(つまり, 正面衝突ではない)と, 原始惑星のもつ軌道角運動量の多くの部分が残骸に移ります. つまり, 大きな角運動量を持ち, かつ揮発性物質と鉄の少ない周地球円盤が形成されるわけです. この周地球円盤が十分な質量(つまり, 現在の月と同程度以上)をもっていて, さらに, そこから一つ

の衛星が形成されるなら、それは月の組成と地球-月系の運動をうまく説明することになります。

この「巨大衝突仮説」は、今では多くの研究者が支持しています。その拠り所の一つは、コンピュータを用いた2種類の数値実験です。一つは、キャメロン (A. Cameron) のグループによって、1970年代から行われてきた、巨大衝突と、その後の周地球円盤が形成されるまでを追った流体シミュレーションです<sup>2)</sup>。彼らのシミュレーションによれば、原始地球に斜めに衝突した原始惑星は、地球のマントルをはぎとり、数時間後にはほとんど破壊され、原始地球の周りに散らばります。キャメロンらは、衝突させる惑星の質量や軌道を変えて、たくさんの数値実験を行いました。その結果、地球マントル物質と破壊された原始惑星が原始地球の周りに円盤状を形成すること（周地球円盤の形成）、原始惑星の鉄コアが衝突の際に、大部分原始地球に落ちてしまい、結果として、周地球円盤は鉄が少ない組成になるということがわかりました。キャメロンは、2000年頃まで、計算の精度を上げながら論文を発表してきましたが<sup>3)</sup>、その後カヌープ (R. Canup) がキャメロンらと同様の手法（後述）を使って、より高精度の数値実験結果を2001年に発表し<sup>4)</sup>、その後も改良版の論文を発表しています。現在では、キャメロンの一連の計算結果よりも、カヌープの結果がより広く受け入れられていると言ってよいでしょう。一方、1997年に井田 茂（東京工業大学）らは、巨大衝突の結果形成された周地球円盤から、再集積して、月が衝突後1年以内に形成されることを重力多体計算（N体計算ともいう）によって初めて示しました<sup>5)</sup>。その後、小久保英一郎（当時東京大学、現 国立天文台）らは、さらに精密な数値実験を行い、1個の「月」が原始地球のロッシュ半径（地球半径の3倍程度、現在の月は地球半径の約60倍のところを回っている）のすぐ外側に、最短で1カ月から1年程度で形成されることを示しました<sup>6)</sup>。これらの一連の研究から、「巨大衝突

→月形成」のシナリオが数値シミュレーションによって確かめられたことになり、「巨大衝突仮説」はますます強固になったと認識されました。しかし、これでメダタシメダタシ、とはいかないところがこの問題の難しいところなのです。

これまで行われた巨大衝突の数値実験はほとんどすべて、SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法という計算手法を用いています。SPH法はその名が示すように、粒子を用いて物理量（密度、圧力など）を表します。計算の解像度（分解能）は、粒子の数が増えるほど良くなります。また、物理量の時間変化は、粒子の軌道を追うことで得られます。密度の高い部分（たとえば、惑星や原始惑星とその衝突部分）には、自然に粒子が集まるようになっています。たいいていの天体シミュレーション（たとえば、星形成や銀河形成）では、密度の高い領域をより細かく分解することが要求されます。それが自然に実現できるSPH法は便利で、さまざまな問題に広く使われています。しかし、巨大衝突の数値シミュレーションでは、この利点があだになります。なぜなら、衝突する惑星、原始惑星に対して、形成される周地球円盤の質量が非常に小さい（約1/100）だからです。つまり、たくさんの粒子をつぎこんで計算の分解能を上げようとしても、衝突によって形成される周地球円盤には、全粒子数の1/100程度しか分布しないことになります。たとえば、全部で1万粒子の計算だと、衝突したデブリとそれからできる円盤には、わずかに100個程度の粒子しか分布しません。SPH法では、空間分解能は、平均的な粒子間隔の数倍なので、100個だとその空間分解能は、円盤半径とあまり変わりません。つまり、円盤の内部構造は正しく計算できていないことになります。巨大衝突仮説では、月は周地球円盤からできるとされているわけですから、その質量や組成を議論するためには、周地球円盤の形成過程と構造が正しく追えていないと意味がありません。カヌープらの計算は、年々粒子数が増えています

が、最近でも 10 万程度にとどまっています（つまり、円盤は 1,000 程度で表される）。

これまでの一連の SPH による巨大衝突数値実験の結果が「あまり信用できない」理由はほかにもあります。SPH 法は、速度場にシア（ずれ）がある場合や、強い衝撃波がある場合には必ずしも良い数値計算手法ではありません。しかし、惑星と原始惑星の衝突では、強い衝撃波が発生し、しかも「斜めに」に衝突することが十分な質量をもった周地球円盤をつくるために不可欠なので、シアも避けられません。

さらに深刻かつ根本的な問題が、「状態方程式」です。巨大衝突のシミュレーションでは、惑星、原始惑星を構成する物質（鉄や岩石）の 3 相（液相、気相、固相）を表現し、それらの温度、密度、圧力の空間分布、時間変化を計算する必要があります。しかし、現実には、巨大衝突のようなスケールの計算で、これらを矛盾なく計算する方法はいまのところ存在していません。代わりに、密度と圧力の間、「状態方程式」を仮定します。理想気体の場合は単純ですが、惑星と惑星の衝突の際に用いるべき状態方程式は全く自明ではありません。衝突した結果、どれくらいの岩石が蒸発するのか、液体もしくは固体のままなのか、あるいは蒸発せずに固体のままなのか、どれくらいのサイズの岩石に分裂するのか、相転移がどのように起こるのか、といった基本的なことが全くわからないからです。実験で確かめるわけにもいきません（岩石に高速でターゲットを衝突させる実験やレーザーを照射する実験、あるいは核爆発実験のデータを使うことは考えられますが、実際に起こる現象とはかけ離れています）。

こういう状況を踏まえ、われわれはまず、SPH とは別の高精度の数値流体手法を用いた数値実験によって巨大衝突仮説の再検証を行いました<sup>7)</sup>。そのシミュレーションコードの元となったのは、私がこれまで使ってきた銀河の中の星間ガスのシミュレーションコードです。原始惑星どうしの巨

大衝突と星間ガスではスケールも物理も違うのですが、状態方程式やエネルギー方程式を工夫し、空間、時間スケールを変えることで、それほど計算コードを大幅に書き換えなくてもシミュレーションができることがわかりました。

ここで用いた数値流体手法は、Euler 法と呼ばれる計算格子を用いたものです (AUSM: Advection Upstream Splitting Method)。この手法では、強い衝撃波の伝播も安定に解くことができます。また、 $512 \times 512 \times 124 = 3,355$  万格子点を用いることによって、衝突後形成される低密度のガス円盤部分を約 1,000 万の格子点で表現することができ、細かい内部構造をとらえることが初めて可能になりました。

一方、状態方程式の問題はすぐには解決しませんから、われわれは、低温極限でポリトロップ、高温極限で理想気体になるような単純な状態方程式を与え、少数のパラメーター（たとえば、状態方程式の「硬さ」を表すパラメーター）を変化させ、結果の違いを見ることで、巨大衝突現象における本質的な物理を明らかにする、という戦略をとりました。ここで、二つの状態方程式、EOS-1 と EOS-2 を用意します。EOS-1 は、衝突する原始惑星がほとんど蒸発し、気体として振舞うことを表現し、EOS-2 は、ある密度以下では圧力が効かない、つまり衝突物質は液滴または固体粒子として、地球周囲に分布することを疑似的に表現します。

図 1 (表紙カラー) に、EOS-1 の場合の衝突の時間進化を示します。これは、地球の 1/5 の質量（火星の 2 倍）の原始惑星が、原始地球に斜めに衝突するモデルで、従来の SPH シミュレーションで最も重い月ができることとされたパラメーターです。原始惑星は最初の衝突により大きく破壊され、何度かの衝突を繰り返して、24 時間以内に原始地球の周りに円盤を形成します。再集積過程はこの円盤状に広がったデブリ物質を初期条件にして始まったと仮定します。すると、小久保らの再

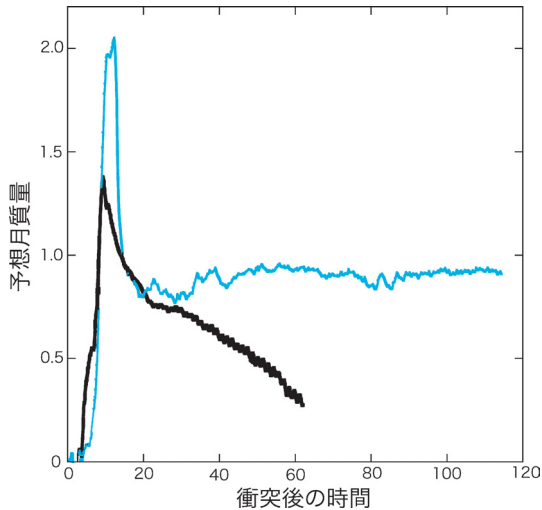


図2 巨大衝突の際に形成された周地球円盤から再集積過程により形成される「月」の予想質量の時間変化（現在の月質量を1とする）。実線（黒）が、衝突物質がほとんど蒸発する場合の状態方程式（EOS-1）、実線（青）が蒸発せずに固体もしくは液体のまままで圧力が効かない状態方程式（EOS-2）を仮定。

集積過程のN体実験の結果<sup>6)</sup>を用いて、最終的にどれくらいの質量の月が形成されるかを評価することができます。それを時間に対してプロットしたのが、図2です。図の実線（黒）が、図1に示したEOS-1の結果からの月質量の推定値です。予想される月質量は、衝突後10時間あたりで、現在の月質量の1.5倍近くになりますが、その後減少し、60時間後には現在の1/3程度にまでなってしまいます。N体実験によれば再集積による月形成には少なくとも1カ月程度の時間が必要だとされていますので、図2の実線（黒）のように数日のタイムスケールで予想される月質量が現在の月よりも大きく減少するという事は、再集積が始まるまでに周地球円盤の構造が変わり、月形成の条件を満足さなくなることを示唆しています。これでは困ります。現実には月があるわけですから、

次にEOS-2の同様の結果をみてみます。図2の実線（青）がそれです。今度は予想される月質量

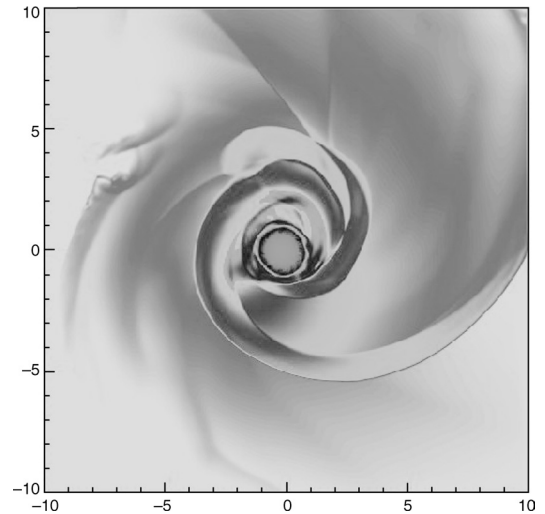


図3 原始惑星どうしの巨大衝突の結果形成された円盤物質の密度構造。渦状の衝撃波が何本も存在している。

は衝突後10時間後には、現在の約2倍になり、その後急減少しますが、20時間後から110時間過ぎまで一定値（現在の月質量の0.8-0.9倍程度）をとり、EOS-1の結果とは大きく異なります。これならば月ができてよさそうです。

では、EOS-1とEOS-2の違いを生んだのは何でしょうか。図3は、EOS-1の場合の衝突後12時間後の密度分布です。渦巻状の密度のジャンプ＝衝撃波が何本も円盤中にあることがわかります。このような衝撃波が回転する流体中に存在すると、衝撃波で速度が急激に変化するために、円盤を構成する物質の運動が大きく影響を受けます。つまり、多くの円盤物質が回転のタイムスケール（数時間）で地球に落ち、また一部の円盤物質が角運動量を外向きに運びます。そのため、もし、この円盤から直ちに再集積が始まったとしても、再集積の開始が遅れるほど、最終的な月質量が小さくなってしまいます。一方、EOS-2では、周地球円盤物質程度の密度ではほとんど圧力が効かないと仮定しています。そのため、衝撃波が形成されないで、いったん形成された周地球円盤の寿命



は EOS-1 の場合に比べてずっと長くなります。

結局、今回の数値実験からわかったことは、巨大衝突により月が形成されるためには、「衝突物質内で圧力が効かないこと」が「必要条件」であるということです。衝突によって、原始惑星が破壊され、高温の気体のままでは、惑星どうしの斜め衝突の結果、渦状の強い衝撃波が形成されることは避けられません。これまでの SPH によるシミュレーションでは、分解能があまりに低いために、このように周地球円盤内に衝撃波が形成されるかどうかはわかりませんでした。EOS-2 のような状態方程式が成り立つためには、衝突によって破壊された原始惑星が蒸発しないか、あるいは蒸発してもすぐに冷えて固体粒子あるいは液体になってくれればよいはずですが、しかし、冷却時間を計算すると、いったん数千度に上がった衝突物質の温度が下がるには少なくとも数十年はかかることが見積もられます。したがって、巨大衝突によって原始惑星が蒸発せずに固体のまま破壊されるか、液滴のような状態になることが必要です。これには、衝突のエネルギーが小さい、言い換えると原始惑星の質量と衝突速度が小さくなくてはならず、結局、衝突する二つの原始惑星の大きさは、現在の地球程度と火星程度というのがぎりぎりであることがわかります。衝突する原始惑星が大きいほど、周地球物質の質量が増えると単純には考えられますが、あまり大きいと周地球物質が蒸発し、渦状衝撃波が形成されることによって、かえって巨大な月が形成されにくいわけです。

まとめると、もし巨大衝突仮説が正しいなら

ば、地球が月のような大きな衛星をもつことができたのは、1) 地球の質量が適当であった (1-3 倍の地球質量以内)、2) 衝突する原始惑星の質量が適当であった (0.1-0.2 地球質量)、3) 衝突する原始惑星の軌道が適当であった (斜め衝突)、という三つの条件が満たされた、ということです。

これらの条件を満たす確率が非現実的に小さいならば、巨大衝突仮説の見直しが必要です。そのためにも、たとえば、巨大衝突によって、どれくらい物質が蒸発し、相転移が起こるのか？ 惑星形成過程で、どのような衝突がどれくらいの確率で起こるのか、といった難しい問題を一つ一つ検証していかなければなりません。それらを経て、「巨大衝突仮説」が過去否定された「古典的シナリオ」の仲間入りをして、別のシナリオを考える必要があるのか、あるいは確固たる「定説」となるのか、がわかることでしょう。われわれの研究結果が今後さらなる科学論争を巻き起こすことを期待しています。

## 参考文献

- 1) Hartman W. K., Davis D. R., 1975, *Icarus* 24, 504
- 2) Cameron A. G. W., Ward W. R., 1976, *Proc. 7th Lunar Planet. Sci. Conf.* p. 120
- 3) Cameron A. G. W., 2000, *Origin of the Earth and Moon* p. 133
- 4) Canup R. M., Asphaug E., 2001, *Nature* 412, 708
- 5) Ida S., Canup R. M., Stewart G. R., 1997, *Nature* 389, 353
- 6) Kokubo E., Ida S., Makino J., 1998, *Icarus* 148, 419
- 7) Wada K., Kokubo E., Makino J., 2006, *ApJ* 638, 1180