

コンドリュール? ショック!

～衝撃波加熱コンドリュール形成モデル～

三浦 均¹, 中本 泰史²

1. コンドリュールとは?

みなさんは、隕石をじっくりと見たことがあるでしょうか? 隕石の内部には、地球上の岩石には見られない特別な組織が含まれています。今回は、その特別な組織のひとつ、「コンドリュール」について紹介します。

地球に降ってくる隕石の大半(落下数では80%以上)が、“コンドライト”という分類に所属する隕石です。この隕石の断面図をよく観察してみると、大きく分けて4つの組織から成っていることが分かります。これらはそれぞれ、マトリックス、金属・硫化物、refractory inclusion (カルシウム・マグネシウム・リッチ・インクルージョン(CAI)を含む)、そしてコンドリュールと呼ばれます。マトリックスとはミクロンサイズの微粒子の集まりで、コンドライトの基盤を成しています。Refractory inclusionはその名の通り、難揮発性物質を主な組成としています。そして、mmサイズの球形の組織がコンドリュールです。

このような球形の組織はどのようにして作られるのでしょうか。考えられるのは、これは一度融解を経験したということです。つまり、コンドリュールの元となった前駆体(原始太陽系星雲内に存在していたmmサイズのダスト)が一度融解し、表面張力のために表面積が最小になるような形(つまり球)を保ったまま再び冷却して固体になったのではないかと、いうことです。実際に、コンドリュールと同じ組成のモデル前駆体を融解し、急速に冷却させるという実験が行なわれていますが、コンドリュールに似た組織

が再現できています。従って、前駆体は原始太陽系星雲内部で何らかの加熱を受けて融解して液滴(メルト)になり、その後急激に冷やされてコンドリュールになったと考えられています。

では、この加熱メカニズムはどのようなものなのでしょうか。コンドリュールは主に珪酸塩(カンラン石、輝石など)からできていて、メルトにするにはおよそ2000Kまで加熱しなければいけません。また、その形成時期は放射性同位体元素の分析から見積もられていて、今からおよそ45.6億年前、原始太陽系星雲がまだ存在していた頃であることが分かっています。しかし、原始惑星系円盤の標準モデルである最小質量モデル[1]によると、原始太陽から1天文単位の距離におけるガスと前駆体の温度はおよそ300Kです。とても2000Kには及びません。つまり、標準円盤モデルだけを考えていたのでは、普遍的に存在するコンドリュールの形成を説明できないのです。

従って、原始太陽系星雲の内部では標準円盤モデルでは考慮されていない何か特別な前駆体加熱メカニズムが生じていたと考えなければいけません。そして、それは最低限、前駆体を2000K付近まで加熱できるものであるはずで、そのような物理メカニズムは一体なんなのか。これを説明できるものとして我々が注目しているのが、「衝撃波加熱モデル」です。

2. 加熱のメカニズム「衝撃波加熱モデル」

ここで我々が衝撃波と呼ぶのは、原始太陽系星雲

¹ 筑波大学数理物質科学研究科

² 筑波大学計算物理学研究センター

中に発生し、星雲ガス中を伝播する衝撃波のことで、星雲ガス内部にはmmサイズのダスト粒子(コンドリュール前駆体)が含まれていて、ガスとほぼ同じ速度(ケプラー回転速度程度)で原始太陽のまわりを回転しています。つまり、もともと前駆体はガスに対して静止していました。

その領域を、超音速で伝播する衝撃波が駆け抜けたとします(図1)。衝撃波面の静止系で見ると、ガスと前駆体が同じ速度(衝撃波の伝播速度、以下衝撃波速度)で衝撃波面に突入してくるようになります。ガスは衝撃波面を通過するときに超音速から亜音速へと減速し、同時に密度と温度は瞬間的に増加します。しかし、前駆体は流体ではないために圧力を感じないので、衝撃波面を通過するときに瞬間的に減速はされません。そのため、衝撃波後面でガスと前駆体の間に相対速度が生じます。このときの相対速度はほぼ衝撃波速度と同じ程度(数km/s)です。そして、ガスとの摩擦によって、前駆体は減速されると同時に加熱されます。摩擦による加熱(ドラッグ加熱)量は、ガスの相対運動エネルギーのフラックス、すなわち、相対速度の3乗とガス密度の積に比例します。よって、定性的には衝撃波速度とガス密度が十分大きければ、前駆体は融点まで加熱されます。

このように、衝撃波によって引き起こされるガスと前駆体の相対速度によるドラッグ加熱で前駆体が加熱されるモデルを、衝撃波加熱モデルと呼びます。

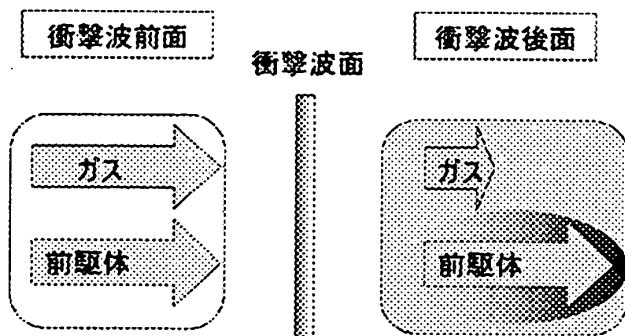


図1: 衝撃波面の静止系で見たときの、衝撃波前・後面のガスと前駆体の振る舞い。前面ではガスと同じ速度で運動していた前駆体が、後面の高温・高密度なガス中で摩擦により加熱されている様子を表す。

3. 形成モデルに対する「観測的制約条件」

しかしながら、コンドリュールは、前駆体をただ溶かして冷却すればできるような単純なものではありません。コンドリュールの観測や再現実験からは、コンドリュールができるためには様々な条件をクリアしなければいけない、ということが明らかになってきています。このように、観測の立場から示された理論モデルがクリアしなければいけない条件を、理論モデルに対する「観測的制約条件」と呼びます。それらは例えば、[2]にまとめられています。そこには多くの条件が挙げられていますが、それら全てを説明できている理論モデルは未だありません([3], [4]も参照のこと)。衝撃波加熱モデルについては研究の進展段階がまだ浅く、いくつかの「観測的制約条件」についてしか調べられていない、というのが現状です。本節では、それらの条件について簡単に説明します。

(条件1) 最高温度の下限・上限, 短い加熱時間

ここでいう最高温度とは、コンドリュール形成の間に前駆体を経験する最高温度のことであり、コンドリュール形成に適した温度はおよそ1800-2200Kだと考えられています[2]。前駆体は融解しなければいけないため、下限は前駆体の融点で決まります。しかし逆に高温になりすぎると、別の問題が生じます。コンドリュール内部にはFeSなどの揮発性物質が残っていますが、FeSの蒸発温度は約650Kです。この低い蒸発温度のため、FeSをコンドリュール内に保持するには、熔融継続時間は数分(あるいはそれ以下)の短いタイムスケールでなくてはなりません[4]。また加熱後は、コンドリュールの温度を約650K以下に維持しなくてはなりません。従って、数時間以上も熔融状態が続くような環境では、揮発性物質を含むような化学組成のコンドリュールは得られないだろうと考えられています。

(条件2) 高い圧力の環境

水は、それと接する気相の全圧が611Pa以下になると、平衡状態としては液相が存在しなくなります。これは、水に接する気相の全圧が、融点における水の平衡蒸気圧より小さくなったからだとして理解できます。これと同じことが、コンドリュール前駆体のメルトにも当てはまります。前駆体が加熱されてメルトになったとき、周囲の気相の全圧が融点におけるメルトの平衡蒸気圧より低い場合、メルトの内部から沸騰が始まってしまう、メルトは力学的に安定して存在できなくなってしまうでしょう。よって、コンドリュール形成領域のガスの全圧は、メルトが安定に存在できるほど高くなければいけません。

(条件3) 特徴的なサイズ分布

コンドリュールは特徴的なサイズ分布をしていて、その直径はおよそ0.1-1.0mmの間に分布しています。これよりもずっと小さい、もしくはずっと大きいコンドリュールは、現在のところ確認されていません。コンドリュール形成理論は、このような特徴的なサイズ分布の起源も説明する必要があります。

(条件4) 回転の形跡

コンドリュールは完全な球形ではなく、回転楕円体も普遍的に存在することが分かっています。普通、液滴を自由空間に放置すると、表面張力の影響で完全な球形になります。しかし、もし液滴が回転していた場合は、回転軸に対して垂直な方向に遠心力が働き、その方向に液滴は伸ばされて回転楕円体になります。このまま冷却して固化すれば、回転楕円体のコンドリュールが得られるでしょう。このとき、どの程度完全な球形からずれるのかについては、回転数と表面張力、液滴のサイズから理論的に求めることができます。それによると、メルトは約300-1300rad/sも

の高速回転をしていたと推測されています。真球からのズレを回転によって説明するならば、回転が発生するメカニズムを明らかにする必要があります。

4. 「衝撃波加熱モデル」の性質

衝撃波加熱モデルでは、観測的制約条件をどれくらい説明できているのでしょうか。本節では、前節で取り上げた観測的制約条件に関わる衝撃波加熱モデルの特徴について見ていきます。

4.1 前駆体の最高温度、短い加熱時間

(1) 衝撃波に対する条件

ドラッグ加熱によって前駆体は加熱されます。衝撃波速度とガス密度が十分であれば前駆体は融点まで加熱されるでしょう。しかし、それよりさらに大きな衝撃波速度とガス密度を与えた場合、前駆体の温度は融点を遥かに越えてしまい、揮発性物質が生き残れるような環境ではなくなってしまうでしょう。従って衝撃波モデルの場合、コンドリュールを形成するためには、適切な衝撃波速度とガス密度が必要であることが分かります。

また、ドラッグ加熱がよく効くのは、前駆体がガスの摩擦で顕著に減速されるときです。従って、加熱のタイムスケールは減速のタイムスケールとほぼ同じになります。すると、前駆体が減速されるまでの時間から加熱時間を評価することができます。前駆体が初期の速度の半分の速度まで減速されるのにかかる時間 τ_{stop} は、以下の式で見積もることができます。

$$\tau_{\text{stop}} = 120\text{s} \left(\frac{a_{\text{gr}}}{0.1\text{cm}} \right) \left(\frac{n_{\text{post}}}{10^{15}\text{cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{v_s}{10\text{km/s}} \right)^{-1} \quad (1)$$

ここで a_{gr} は前駆体半径、 n_{post} は衝撃波後面のガスの

数密度, ρ_{gr} は前駆体の密度, v_s は衝撃波速度です。また強い衝撃波の極限では, $n_{post} \sim 10(v_s/10\text{km/s})^2 (T_{post}/2000\text{K}) \cdot n_{pre}$ (T_{post} は衝撃波後面のガスの温度, n_{pre} は衝撃波前面のガスの数密度) で与えられます。ここで用いた値は, 前駆体溶融の典型的な条件です。このように衝撃波加熱モデルでは, 加熱のタイムスケールは数10秒~数分程度の短時間となります。

[5]では, 衝撃波後面のガス中でのガスの加熱・冷却, 化学反応, 前駆体の加熱・冷却, 気化などを詳細に計算し, 上記の議論が正しいことを示しました。すなわち, 前駆体の溶融に適切な衝撃波の密度と速度の関係を明らかにしました。また, 加熱時間が長くても 10^3 秒程度以下であることを確認しました。

(2) 最高温度に対する蒸発の効果

衝撃波加熱モデルにおいてコンドリュールが形成されるためには, 衝撃波速度 v_s と衝撃波前面のガスの数密度 n_{pre} が適切な範囲にないといけません。しかし, もし適切な v_s や n_{pre} の範囲が狭いと, 衝撃波加熱によるコンドリュール形成モデルは現実味の薄いものになってしまいます。一方, もし前駆体の最高温度を低く抑えるメカニズムがあれば, かなり広い幅の範囲内の衝撃波パラメータに対しても現在見られるようなコンドリュールが得られるでしょう。

そこで我々が注目したのが, 前駆体表面から前駆体構成物質が蒸発することによる気化熱冷却です。

表1: 前駆体の最高温度 [K]

n_s [1/cm ³]	v_s [km/s]	蒸発あり T_{peak}^{with}	蒸発なし $T_{peak}^{without}$	差 $T_{peak}^{with} - T_{peak}^{without}$
10^{12}	18	1854	1873	-19
10^{12}	20	2048	2133	-85
10^{14}	8	1882	1913	-31
10^{14}	10	2171	2329	-158
10^{16}	8	2451	2700	-249
10^{16}	10	2699	2820	-121

前駆体の温度上昇に伴い, この蒸発速度は指数関数的に大きくなります。つまり, 気化熱冷却も, 前駆体の温度が上がれば急激に大きくなっていくわけです。この効果は, 前駆体の最高温度を低くする効果があると予想されます。

私達は, 前駆体がどれくらいの温度になれば赤外放射冷却と比較して気化熱冷却の効果が効くのか, その結果最高温度はどれくらい下がるのかを定量的に調べるために, 前駆体の気化熱冷却を考慮した数値計算を行いました。いくつかの衝撃波パラメータ v_s , n_{pre} に対して, 蒸発を考慮した場合としない場合で前駆体の最高温度 T_{peak} を計算した結果が表1です。

表1を見ると, 全ての衝撃波パラメータにおいて, 気化熱冷却を考慮したことで前駆体の最高温度が下がる傾向が見られます。また, 大雑把には, 前駆体の最高温度が2000Kを越えるような場合には, 数100Kもの違いが見られます。我々の解析から, 前駆体の温度が約2000Kになったときに, 気化熱冷却が赤外放射冷却を卓越することが分かりました[6]。

4.2 衝撃波後面における高い圧力の環境

衝撃波後面のガスは高密度・高温であり, 高い静水圧の環境が生み出されます。さらに, 前駆体はこの中を大きな相対速度(数km/sec)で通り抜けるために, 前駆体表面には大きな動圧が作用します。このように, 衝撃波加熱モデルでは自然に高い圧力の環境が実現されます。私達は, この高い圧力の環境がメルトを安定に存在させるのに十分かどうかを調べました[6]。

前駆体をメルトにするには, 適切な v_s , n_{pre} を選ばなければいけないことは前節で述べた通りです。また, 衝撃波後面の静水圧や動圧は, v_s と n_{pre} によってほぼ決まります。従って, v_s - n_{pre} パラメータ空間上に, コンドリュール形成のための条件とメルトを安定に存在させるのに必要な条件を重ねてプロットすれば, 問題は明らかになるでしょう。我々の計算結果

が、図2になります¹。

衝撃波後面の静水圧のみを考慮した場合では、全てのコンドリュール形成条件において圧力条件を満たすわけではないことが分かります。ガス密度が小さい(約 10^{13}cm^{-3} 以下)と、前駆体を融点以上に加熱することはできても、周囲の圧力が小さいためにメルトは安定に存在できません。

ところが、静水圧に加えて動圧を考慮すると、前駆体を融解するような衝撃波パラメータのほぼ全ての領域で圧力条件が満たされていることが分かります。これは、動圧が十分大きいため、メルトが沸騰してしまっただけで破壊されることを防ぐことができることを意味しています。以上の結果から、動圧はメルトを安定に存在させるために重要な役割を果たしていると考えられます。

最後に、衝撃波が発生しなかった場合について補足しておきます。最小質量原始太陽系星雲モデルによると、1AUにおけるガスの温度は約300Kです。このときメルトを安定に存在させるために必要とされるガスの密度はおおよそ $3 \times 10^{13}\text{cm}^{-3}$ となります。しかしこの値は、最小質量モデルで与えられている値

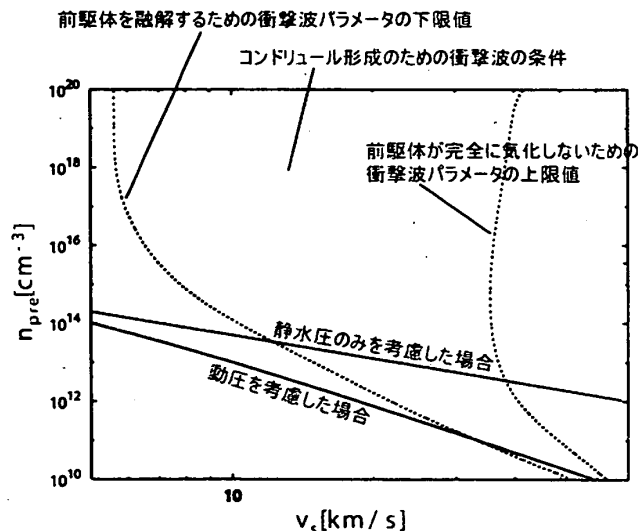


図2：コンドリュールを形成するための衝撃波の条件（前駆体を融解するための下限値と、前駆体が完全に気化しないための上限値に挟まれた衝撃波パラメータ）と、メルトを安定に存在させるだけの高圧環境を作り出す衝撃波パラメータの下限値。動圧を考慮することで、ほぼ全てのコンドリュール形成の条件においてメルトが安定に存在できることを示す。（[6]に基づいて作成）

(1AU, 赤道面で約 $3 \times 10^{14}\text{cm}^{-3}$)よりも約1桁大きいです。これは、衝撃波が発生しない環境では、メルトが安定に存在するのが難しいことを意味しています。

従って、衝撃波は前駆体を加熱するだけでなく、メルトを安定に存在させるのに重要な役割を果たしていると言えます。

4.3 コンドリュールサイズの上限值

4.2節で説明した動圧は、ガスが前駆体に向かってくる方向が一番大きくその背面が一番小さい、というように、非対称的な圧力として作用します。前駆体が溶融したメルトは表面張力によって球の形を保とうとしますが、動圧の非対称性のために、完全な球ではいられません。この状態よりさらに大きな動圧が作用すると、メルトは球形を保てないばかりか、破壊が生じてより小さなメルトに分解してしまうでしょう。表面張力はメルトの半径に反比例するので、ある特徴的な半径 a_{crit} より大きなメルトは存在できなくなることが分かります。[7]は、メルトの表面張力とガスの動圧との釣合を考慮して a_{crit} を見積もり、

$$a_{\text{crit}} = 1.2\text{mm} \left(\frac{n_{\text{pre}}}{1.2 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}} \right)^{-1} \left(\frac{v_s}{1.0\text{km/s}} \right)^{-4} \left(\frac{T_{\text{post}}}{2000\text{K}} \right) \quad (2)$$

という結果を得ました。この結果を図2と同様にコンドリュール形成の条件と比較したものが、図3になります²。

これを見ると、1cm以上のメルトが安定に存在できる条件はごく限られていることが分かります。従って、その結果できるコンドリュールのサイズの上限值は1cm程度だと言えるでしょう。これは、現在得られているコンドリュールの典型的なサイズと矛盾していません。これがコンドリュールサイズの上限を決めたメカニズムだとすると、衝撃波加熱モデルは自然にコンドリュールの典型的なサイズの上限值を説明することができます。

1 3節の(条件1)のように、図2においては、前駆体本体が完全に気化しないという条件で衝撃波パラメータの上限値を定義しています。実際には揮発性物質が完全に蒸発しないという条件を考えるべきですが、図2でこのような条件を採用した理由は、揮発性物質に関する条件がまだ定量的に分かっていない(おそらくは、前駆体最高温度とその継続時間の関数となるだろう)ためです。

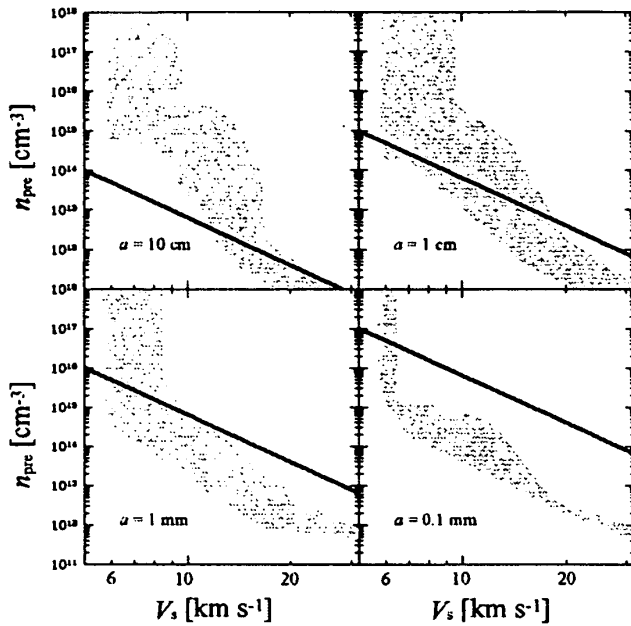


図3: 前駆体の様々な初期半径 a に対するコンドリュール形成の条件(灰色領域; [5])と、それぞれの半径のメルトが安定に存在できる衝撃波パラメータの上限値[7]. 衝撃波パラメータの上限値は実線で示されている。おおよそ1cm以下のメルトであれば、広い範囲のコンドリュール形成の条件内で安定に存在できることが分かる([7]に基づいて作成)。

4.4 コンドリュール回転の起源

メルト表面に働く動圧は、メルト表面の位置によって異なります。従って、メルトが分解するときには動圧の強さの違いによるトルクが働き、分解したメルトが角運動量を持つことになるでしょう。

[7]は、ガスの動圧によってメルトが破壊されるときに働くトルクによって、メルトがどの程度の角運動量を得るかを評価しました。メルトに働く力のモーメントは $\rho_{\text{gas}} v_{\text{gr}}^2 a^3$ に比例するでしょう。モーメントはダストが分裂する時間だけ働きますが、これは、メルトの自由振動の周期と同じ程度のオーダーだと考えられます。これらを考慮してメルトが得る角運動量を評価すると、それは

$$\omega \sim 1.1 \times 10^3 \text{ rad/s} \left(\frac{a_{\text{crit}}}{1 \text{ mm}} \right)^{-1.5} \quad (3)$$

という回転角速度に対応します。これは観測から示唆される値と非常によく一致しています。従っ

て、動圧によるトルクがコンドリュールのスピンの起源ではないかと考えられます。

以上の結果は、衝撃波加熱モデルが多くの観測的制約条件を満たしていることを示しています。従って我々は、コンドリュール形成モデルとして、衝撃波加熱モデルが非常に有力であると考えています。

4.5 見かけの重力

衝撃波加熱モデルでは、メルトに見かけの重力が作用します。衝撃波後面において前駆体がガス抵抗によって減速されることはすでに述べましたが、このときの加速度は数10G(1Gは地球表面における重力加速度)にも達します。そのため、メルト中においても、重い組織(金属など)と軽い組織の分別や分離などの現象が生じる可能性があります。これは3節で挙げた観測的制約条件に入ってはいませんが、衝撃波加熱モデルの大きな特徴のひとつです。

5. 「衝撃波加熱モデル」の今後の発展は?

3節で紹介したような観測的制約条件は、4節で説明を試みた4つ以外にも数多くあります。それらの条件が衝撃波加熱モデルで説明できるかどうかについては、まだ十分な検討がなされていません。今後、衝撃波加熱モデルでそれらの条件が満たされるかどうかを明らかにしていくことは、モデルの妥当性を確かめる上で重要な作業であると思っています。

以下では私達が現在計画している研究を中心に、いくつかの課題について簡単に紹介したいと思います。もちろんこれら以外にも多くの重要な課題がありますし、それらについて熱心に研究されている方々もおられるわけですが、紙数の関係で割愛させていただきます。

2 ここで、図2と図3におけるコンドリュール形成条件が少し違いますが、その違いは、[6]と[7]が採用した衝撃波加熱モデルの違いに起因しています。[7]では衝撃波後面におけるガスの非平衡化学反応を考慮し、ガスに関して詳細な解析を行ないました。これに対し[6]では、前駆体の物性を正確に考慮し、前駆体に関して精密化されたモデルを用いています。定性的な振る舞いは同じです。

5.1 コンドリュールの形と大きさ

コンドリュールの3次元形状はおおよそ回転楕円体ですが、それにもプロレートなものとおブレートなものがあるようです。このような形状が回転やガスの動圧などの物理的な要因に起因するものか、あるいは結晶成長に伴う結晶学的な要因に起因するものかは未だ明らかになっていません。私達はそれが物理的な要因によるものかとして理解できるかどうかを明らかにしたいと考えています。そのために、高速回転するメルトの力学的平衡形状を解析的・数値的に調べてみたいと思っています。

コンドリュールは極めて特徴的なサイズ分布を持っていますが、そのサイズの上限については前述(4.3節)の通り、衝撃波加熱モデルで自然に理解できる可能性が示されました。しかしそこでの議論はあくまでもオーダーの評価であり、定量的に詳細な議論は不十分です。また、加熱前の前駆体のサイズ分布と加熱後のコンドリュールのサイズ分布との間の関係も不明です。メルトの分裂モードや分裂片のサイズ分布などを明らかにするためには、メルトを3次元流体として扱った数値シミュレーションや、モデル物質を用いた衝突・破壊実験などが有効だろうと考えています。

5.2 衝撃波の発生源は何か？ 衝撃波加熱はどこで起こったか？

私達は衝撃波加熱でコンドリュールが形成されたと考えていますが、隕石中に普遍的に存在するコンドリュールを作るためには、衝撃波加熱も普遍的な現象であったはずで、原始太陽系星雲の中で、そのように頻繁に衝撃波を発生させる機構が本当にあったのでしょうか？これまでのところ、そのような衝撃波の発生源として主に次の二つが考えられています。一つは、星雲ガス中の渦状衝撃波です。星雲の質量が大きくて自己重力不安定になっている場合

や、他の恒星などが太陽の近傍を通過した時に渦状衝撃波が発生する可能性があります。ただしこれらはいずれも、実際の太陽系では実現が難しかったかも知れないと考えられています。二つ目は、楕円軌道を描いている微惑星前面に生じるbow shockです。[8]は、誕生した原始木星の摂動によって小惑星帯にあった微惑星の軌道離心率や軌道傾斜角が大きくなり、その結果、コンドリュール形成に十分な速度を持つbow shockが発生すると見積もっています。しかし、定量的な議論はまだ不十分のようです。

ところで、これら以外にコンドリュール形成に寄与するような衝撃波の発生はあり得ないのでしょうか？おそらく、私達がまだ知らないメカニズムが存在する可能性は大きいだろうと思われます。衝撃波の起源を明らかにするために、より広い視点からの検討が必要のようです。一方、コンドリュール形成環境の酸化・還元状態についての研究から、コンドリュール形成はダスト・ガス質量比が大きい場所で起こったのではないかと考えられています。また、コンドリュールの形成年代の研究からは、コンドリュール形成過程は数百万年存在していたことが示唆されています。しかし、原始太陽系星雲中で数mm程度の前駆体が数百万年存在し続けていたということは難しいようにも思われます。これらの条件を満たすような形成過程や形成場所を明らかにすることも、今後の重要な課題です。

5.3 衝撃波通過ガスの化学組成

私達はこれまで、衝撃波加熱によって加熱・変性されるダスト粒子の方に注目してきましたが、一方で、衝撃波はガスにも影響を及ぼします。一時的にせよ高温・高密度になるために、化学反応が促進されてガスの化学組成が変化するのです。これは、原始太陽系星雲のガス組成をある程度変えることにつながるかも知れません。もしかしたらその痕跡が、彗星などに残っているかも知れません。あるいは、衝撃

波の存在が原始太陽系に限らず星・惑星系形成過程に一般的なものならば、現在見えている原始太陽系円盤でも衝撃波を通過したガス組成が観測されるかも知れません。そして逆に、もしそのような衝撃波通過ガスの証拠が見つければ、衝撃波の存在および衝撃波加熱によるコンドリュール形成過程の存在を、確かめることが出来るかも知れません。このような視点での研究も、今後は重要になるだろうと考えています。

6. そして、比較惑星系形成論へ

本稿では私達のこれまでの研究を中心にして、コンドリュール形成についての衝撃波加熱モデルを紹介してきました。そこでの主な目標は、衝撃波を通過したときダスト粒子には何が起こるのか、それがコンドリュールになるのかどうか、を明らかにすることでした。それらの研究は一定の成果を収め、「適切な条件の衝撃波が存在すればコンドリュールは形成されそうだ」という認識が得られたように思います。もちろん、今後もより詳細な検討を進め、コンドリュールの持つ多くの特徴が衝撃波加熱モデルで説明できることを確かめていく必要があると思っています。

その一方で、衝撃波の発生源が何なのかは常に問題になってきました。しかし、コンドリュール形成に必要な衝撃波の条件が定量的に明らかになるにつれて、衝撃波の発生源や発生条件も次第にその輪郭が見えてきつつあるように思われます。もっともらしい衝撃波発生環境は、当然、太陽系形成シナリオに則して自然な解であることが必要となるでしょう。が、同時にそれは、太陽系形成シナリオにもインパクトを与えるはずで、すなわち、コンドリュールが形成されたからには、コンドリュール形成期の原始太陽系はこれこれの状況にあったはずである、と。そのようなフィードバックの反復により、やがて整合的な太陽系形成シナリオが得られることを期待しています。

さらに視野を広げれば、衝撃波加熱現象は条件さえ満たされれば、星・惑星系形成過程の中で一般的に起こる現象であろうことも容易に想像することが出来ます。原始太陽系円盤内での衝撃波の存在(化学組成の観測)や衝撃波加熱を受けたダスト粒子の存在(光学的特性の観測)が天文学的に観測されたとすれば、その原始惑星系円盤はコンドリュール形成期の原始太陽系星雲と近い状態にあることを意味しているのかも知れません。そのような原始惑星系円盤がいくつも観測されれば、原始惑星系形成の直前段階について、比較惑星系形成論的に議論することが出来ることを意味しています。近い将来、そのような状況になることを楽しみにしています。

7. 謝辞

本稿は、須佐元さん(立教大)と飯田彰さん(CrayJapan, Inc.), そして中川義次さん(神戸大)との共同研究に基づいています。梅村雅之さん(筑波大), 塚本尚義さん(東工大)には議論を通じて有益なご意見をいただきました。また、匿名の査読者の方には、初稿に対して的確なコメントを頂きました。これらの方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] Hayashi, C. et al., 1985, In *Protostars and Planets II*. 1100.
- [2] Jones, R. H. et al., 2000, In *Protostars and Planets IV*. 927.
- [3] Boss, A. P., 1996, In *Chondrules and the protoplanetary disk*. 257.
- [4] Connolly, H. C., and S. G. Love, 1998, *Science* **280**, 62.
- [5] Iida, A. et al., 2001, *Icarus* **153**, 430.
- [6] Miura, H. et al., *Icarus*, in press.
- [7] Susa, H., and T. Nakamoto, 2002, *Astrophys. J.* **564**, L57.
- [8] Weidenschilling, S. J. et al, 1998, *Science* **279**, 681.