

## ダスト・ガス比の高い場合の衝撃波シミュレーション： コンドリュール形成モデルへの応用に向けて

勝田 祐哉 (東京工業大学大学院 理工学研究科)

### Abstract

コンドリュールは隕石の主成分で、ケイ酸塩鉱物を主成分とする球状組織である。コンドリュールは原始太陽系星雲内で形成されたと考えられており、コンドリュールの形成過程を解明することは、原始太陽系星雲内での物理過程の解明につながるため、非常に重要である。岩石学的な特徴から、コンドリュールはダストの急激な加熱と冷却によってできたことが分かっており、周囲の環境についても様々な示唆が得られている。しかし、具体的な形成プロセスについては未だに議論がなされているところである。

コンドリュール形成の有力なモデルとして我々が注目しているのが衝撃波加熱モデルである。これは衝撃波後面でダストとガス間に相対速度が生じ、ダストがガス摩擦を受けて加熱されるというモデルである。衝撃波の発生源としては、楕円軌道をまわる微惑星に注目している。このモデルの問題点として、コンドリュール形成時の酸素分圧が挙げられる。再現実験から、コンドリュールは太陽系元素組成よりも酸素分圧が高い状況で形成されたことが示唆されているのだが、このことは微惑星周りの弧状衝撃波モデルではまだ十分に説明されていない。そこで、我々はダストの割合が高い場合についての衝撃波の振る舞いについて調べることとした。ダストが十分存在する場合、ダストが蒸発することで気相に酸素原子が供給され、コンドリュール形成時の酸素分圧が高くなることができる為である。この場合のダスト・ガス比は 1 : 1 程度であると見積もられており、衝撃波の振る舞いに対するダストの影響は無視できない。

今回、我々はダストの多い場合の 1 次元平行平板での衝撃波について、ランキン-ユゴニオの関係式と同様の解析を行い、同時にそれを再現する数値計算コード開発も行った。数値計算コード開発は、コンドリュール形成について詳細に議論する為のステップとして行っている。

解析により、衝撃波後面の温度はダストの割合が高いほど上昇するという結果が得られた。この結果からは、ダストは蒸発しやすく、酸素分圧の高い状況は達成しやすいといえるだろう。また、数値計算の結果も一致し、数値計算コード開発にも成功したといえる。

## 1 Introduction

本研究は 1 次元平行平板で衝撃波後面の物理量を計算したものであるが、最終的には 2 次元で微惑星周りの弧状衝撃波でのコンドリュール形成について議論を行うことを目標としている。

コンドリュールは mm サイズで、ケイ酸塩鉱物を主成分とする球状組織であり、コンドライト隕石の約 80vol% を占める主要な構成要素である。コンドリュールが形成されたのは太陽系形成初期であると推定されており、最も始原的な物質のひとつである。コンドリュールの形成過程を読み解くことは、原始太陽系星雲内での物理過程の理解につながるため、コン

ドリュールの形成プロセスの決定というのは重要な課題である。しかし、具体的な形成プロセスについては未だに議論がなされている。

岩石学的検証から、コンドリュールの形成過程についてある程度の推定がなされており、コンドリュールはダストが数分で 2000 K 程度まで加熱されて溶け、数時間以内で冷却して固まることでできたと考えられている。また、周囲の酸素分圧は高く、ダスト・ガス比になおせば 1 : 1 程度であったことが示唆されている。

コンドリュール形成モデルとして我々が注目しているのは衝撃波加熱モデルである。このモデルでは、ダストは衝撃波後面でガス摩擦を受けて加熱される。

衝撃波面に沿ってみた場合、衝撃波後面でガスが急速に減速するが、ダストは圧力を感じない為に速度を変えない。一方、衝撃波前面ではダストとガスは同じ動きをしていると考えられるため、衝撃波後面では相対速度が生じてダストはガス摩擦を受けるのである。ここで問題となるのが衝撃波の発生源であるが、我々は楕円軌道をまわる微惑星に注目している。

微惑星まわりの弧状衝撃波について、いくつか計算が行われている。これらの計算では、太陽元素組成から見積もられるダスト・ガス比である 1 : 100 程度で計算が行われており、前述した酸素分圧の高い状態は考えられてこなかった。そこで、本研究ではダスト・ガス比 1 : 1 程度のダストが従来よりも非常に多い場合について衝撃波の振る舞いについて調べることとした。ダストは完全にガスとカップルしているものとして扱い、これに当てはまらない大きいサイズのものについてはコンドリュールの前駆体として別に扱う。サイズは大きいほど数が少なくなるはずであり、大きな影響は出ないと考えられる。

## 2 Methods

本研究で使用した式は、流体の基礎方程式である連続の式、運動方程式、エネルギー保存の式、状態方程式である。ただし、ダストは圧力を感じない流体として振る舞うため、エネルギーと温度の関係式と、圧力と温度の関係式が少し異なる。以下に、今回用いた方程式を示す。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\nabla p \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( E + \frac{1}{2} \rho v^2 \right) + \nabla \cdot \left( \frac{1}{2} \rho v^2 \mathbf{v} + E \mathbf{v} + p \mathbf{v} \right) = 0 \quad (3)$$

$$E = \left( \frac{\alpha \rho k_B}{(\gamma - 1) m_{\text{H}_2}} + (1 - \alpha) \rho c \right) T \quad (4)$$

$$p = \frac{\alpha \rho k_B T}{m_{\text{H}_2}} \quad (5)$$

ただし、 $\alpha, c, m_{\text{H}_2}$  はそれぞれ、全体に対するガスの割合、ダストの比熱、水素分子の質量を表す。 $\alpha$  は

ダストの密度とガスの密度をそれぞれ  $\rho_d, \rho_g$  として、 $\alpha \equiv \rho_g / (\rho_d + \rho_g)$  と定義する。また、ガスは水素分子のみで構成された、2 原子分子理想気体として扱う。

以上の式はダストの蒸発を考慮していないが、2000 K を超えればダストは蒸発して圧力を感じるようになって振る舞いに変化する。

今回、簡単の為にダストは  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$  のみで構成されており、蒸発時には単原子分子の理想気体として振る舞うものとした。この場合、ダストの蒸発時には圧力と内部エネルギーは以下のように表すことができる。

$$p = \frac{\rho k_B T}{m_g} \quad (6)$$

$$E = \frac{p}{\gamma_2 - 1} \quad (7)$$

ただし、 $m_g, \gamma_2$  はそれぞれ気体分子の平均質量と、ダスト蒸発時のガスの比熱比を表し、

$$m_g = \frac{m_{\text{H}_2} m_{\text{dust}}}{\alpha m_{\text{dust}} + 7(1 - \alpha) m_{\text{H}_2}} \quad (8)$$

$$\gamma_2 = 1 + \frac{\alpha m_{\text{dust}} + 7(1 - \alpha) m_{\text{H}_2}}{\frac{5}{2} \alpha m_{\text{dust}} + 7 \cdot \frac{3}{2} (1 - \alpha) m_{\text{H}_2}} \quad (9)$$

である。

以上の式に対して、ランキン-ユゴニオ的解析と数値計算シミュレーションを行った。解析の際には、衝撃波後面でダストが蒸発している場合と蒸発していない場合を仮定して計算を行った。また、数値計算は ZEUS-2D (Stone & Norman (1992)) を改良することで行った。

## 3 Results

### 3.1 ランキン-ユゴニオ的解析結果

衝撃波前面の値を固定し、ダスト・ガス比と衝撃波前面の速度を変えて計算を行った結果を Fig.1, 2 に示す。衝撃波前面で密度  $\rho = 1.0 \times 10^{-10} \text{g/cm}^3$ 、温度  $T = 300 \text{K}$  としている。赤い線はダスト・ガス比 1 : 3 を示し、濃い赤の線はダスト・ガス比 1 : 1、黄色の線がダスト・ガス比 1 : 3、青の線がガスのみの場合を示している。

この図から、衝撃波前面の速度が速いほど、衝撃波後面の温度が上昇することが分かる。これは、衝撃

波前面の速度が速いほど高い動圧がかかるため、衝撃波後面は強い圧縮を受けて温度が上昇すると理解することができる。

また、ダストが多く混ざりようになることでも衝撃波後面の温度が上昇している。このことは、状態方程式から理解することができる。ダストの割合が高いほど、同じ密度に対してガスの分子数は少なくなる。一方で、衝撃波後面の圧力は動圧でほとんど決まってしまう、ダストの割合によらない。結果として密度か温度が上昇することが予測できる。しかし、密度は質量保存の為に大きく上昇することはできず、結果として温度が大きな上昇を見せることとなる。

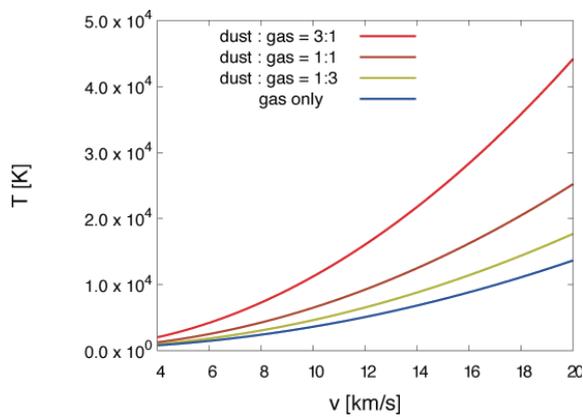


Fig. 1: ダストが蒸発しない場合の衝撃波後面の温度を示す。縦軸が衝撃波後面の温度、横軸は衝撃波前面の速度である。前面で密度  $\rho = 1.0 \times 10^{-10} \text{g/cm}^3$ 、温度  $T = 300\text{K}$ 。

### 3.2 数値計算結果

数値計算結果の典型例と解析結果との比較を Fig.3 に示す。この計算の初期条件は、密度  $\rho = 1.0 \times 10^{-10} \text{g/cm}^3$ 、温度  $T = 300\text{K}$  で、速度  $v$  が位置  $x \leq 100\text{km}$  で、 $v = 20\text{km/s}$  で、 $x \geq 100\text{km}$  で、 $v = 0\text{km/s}$  である。また、衝撃波が計算領域から出ないように座標を動かしている。また、線の色はダスト・ガス比に対応し、Fig.1, 2 と同様である。グラフは計算開始から 50 s 後の温度のスナップショットである。赤くハイライトされている部分は圧縮され

て温度が上昇している部分であり、この部分の温度を解析的に求め、破線で示した。

数値計算の結果からも、ダストが多いほど衝撃波後面での温度が高くなるという結果が得られた。これは、解析的な結果と同様である。また、密度や速度の初期値をいくつか変えて行った計算についても、数値計算結果と解析結果の相対誤差も数パーセント以内に収まり、数値計算コード開発に成功したといえるだろう。

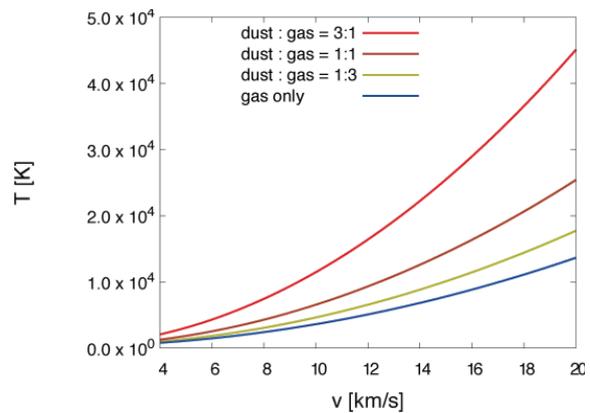


Fig. 2: ダストが蒸発した場合の衝撃波後面の温度を示す。軸や前面の物理量は Fig.1 と同じ。

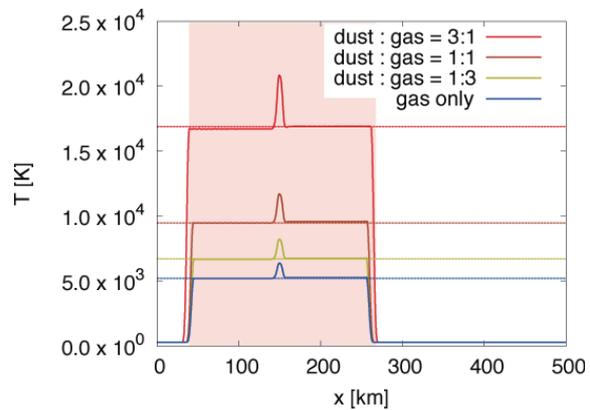


Fig. 3: 数値計算  $t = 50\text{s}$  でのスナップショットと、解析結果との比較。解析では赤くハイライトした圧縮を受けた領域の温度を求めている。

## 4 Discussion

ダストが蒸発しない場合、衝撃波後面の温度が上がるかどうかは、ダストの比熱が深く関係している。もし、ダストの比熱が大きければ、圧縮によって発生した熱はどんどんダストに吸われてしまい、圧力が上がらないことが想像される。結果としてその分だけ圧縮が進み、密度が大きくなることで動圧と釣り合う圧力が達成され、ダストが混ざるほど温度が低くなることが考えられる。しかし、実際にそうならないのは、ダストが十分小さな比熱を持っている為である。

コンドリュールの形成について、今回の研究から直接は議論することはできない。ただ、酸素分圧の高い状況というのは、ダストの多い場合に温度が高くなりやすいことから、達成しやすいと考えられる。コンドリュール形成に関する直接の議論は、ダストの運動方程式を解くことで行うことができるが、これは今後の課題である。

また、この計算は断熱の場合について行っている。そのため、より詳細な計算を今後行う為には、輻射輸送などのエネルギー輸送を導入する必要がある。これも今後の課題である。

## 5 Conclusion

今回、我々はダストの多い場合について 1 次元平行平板で流体計算を行った。解析的な結果から、ダストの割合が高いほど衝撃波後面の温度が上がる事が分かった。

また、今後の為に数値計算コード開発も行い、解析結果と相対誤差数パーセントに収めることができた。これにより、計算コード開発にも成功し、微惑星周りの弧状衝撃波モデルへ今回の計算を応用する見通しをたてることができた。

## Acknowledgement

今回、夏の学校という形で発表の場を頂くことができましたことを、ご支援いただいた基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台などの研究機関、および皆様に感謝いたします。

また、今回の研究では、ご多忙の中にもかかわらず格別の指導を賜り、中本泰史先生には大変お世話になりました。この場を借りて御礼申し上げたいと思います。ありがとうございました。

## Reference

- J. M. Stone & M. L. Norman 1992, *The Astrophysical Journal Supplement Series* 80 753-790
- F. J. Ciesla, L. L. Hood & S. J. Weidenschilling 2004, *Meteoritics & Planetary Science* 39 1809-1821