

衝撃波加熱によるコンドリュール形成 Iida et al.2001 レビュー

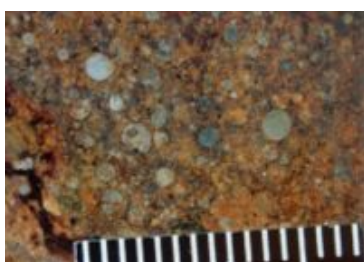
東京工業大学中本研究室

修士1年 渡辺圭亮

背景

1.コンドリュールとは

隕石中に含まれる粒状組織であり、以下のような特徴がある。コンドリュールを含む隕石をコンドライト隕石と呼ぶ。



- 大きさ0.1～1.0 mm 程度
- 固化年代：45.6億年前
- 隕石中の体積の約半分を占める

コンドリュール¹

2.コンドリュールから分かること

岩石学実験から

- 形成年代は太陽系初期
コンドリュールを理解することは太陽系初期を理解することにつながる
- 原料のダストはガス中で作られた
固体岩石天体の表面などでなく、原始太陽系星雲のガス内で形成された
- 短時間の急激な加熱を受けた
丸い形状から、原料の固体岩石成分が熔融し再度固化したことがわかる。融点はおおよそ2000Kであることからそれを上回る温度まで加熱されることが必要。また、成分中に揮発性成分が含まれていることから、加熱は数分程度の短時間に急激に起こったものであると考えられる。

¹ <http://en.wikipedia.org/wiki/Chondrule>

- 隕石中に多量に含まれている

地球上にやってきた隕石の体積中の約半分はコンドリュールからなる。これらを考えあわせると原始太陽系星雲ガス中で短時間に高温を発生させる現象が繰り返し起こっていたことがわかる。その高温現象の正体は明らかではないが、惑星系の進化に関連があることが期待できることから、コンドリュール形成を理解することは重要である。

Iida et al.2001 では特にコンドリュール形成過程の候補として有力な衝撃波加熱モデルについて考察した。

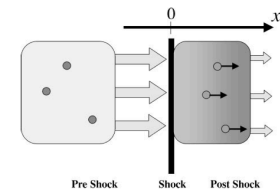
計算モデル

一次元ガス流体の中にダストが含まれている系を考える。ガス・ダスト比は100:1 とする。これは原始太陽系星雲中で妥当と考えられている値である。

発生要因は問わず、仮想的にガス流体にショックが発生したとする。

ショックに突入するガスの密度、およびショック面に対する速度をパラメーターとして与える。

質量保存、運動量保存、詳細な化学反応を考慮したエネルギー保存を解くことで、ショック後面でのガスの流速、密度、温度変化を求め



モデル²

ショック後面でのガスの性質がダストの過熱温度を決める。

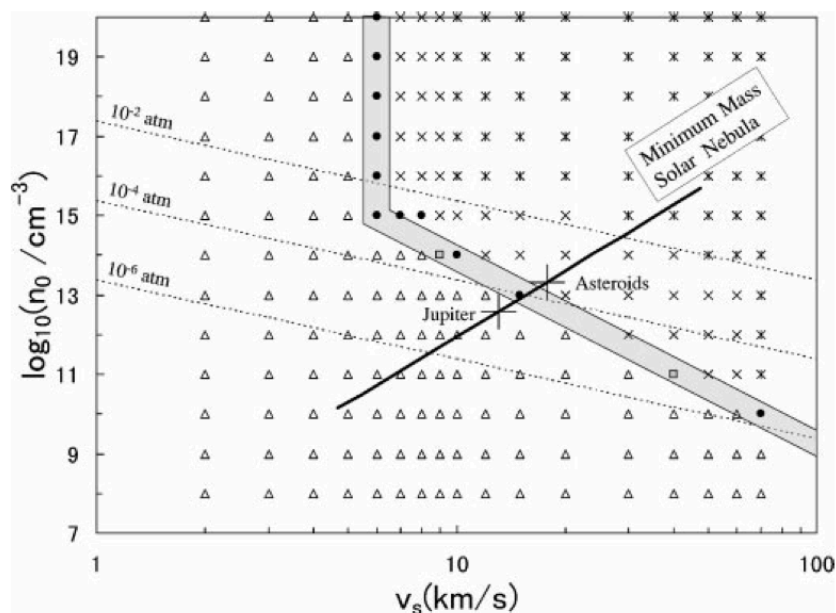
$$\frac{4}{3}\pi a^3 \rho_d C \frac{dT_d}{dt} = 4\pi a^2 (\rho_g |\mathbf{V}_d| T_{\text{rec}} C_H - \rho_g |\mathbf{V}_d| T_d C_H - \epsilon_{em} \sigma T_d^4)$$

右辺第一項はガス抵抗過熱、第二項はガス衝突冷却、第三項は放射冷却であり、これらの効果がダストの温度変化を決める。

² Iida et al.2001 より

ショック後面でのガス密度、ガス・ダスト間の相対速度がダストの温度変化を決める上で重要である。

結果³



縦軸にショック前面でのガス密度、横軸にショック速度をとった図である。各点ごとにダストの最高到達温度が与えられる。示された灰色の領域がコンドリュール形成に適していると考えられる領域、すなわちダストの融点を越えるが蒸発してなくなってしまうことのない領域である。灰色領域の低速側の境界が融点に達する線、高速側の境界はダストが完全に蒸発し飛散してしまう線である。

ショック前面でのガス密度が小さい場合と大きい極限では傾向の違いが見られる。この傾向はダストのサイズを $0.1 \mu\text{m} \sim 1.0\text{cm}$ まで変化させてもサイズ依存性は見られなかった。

図上の太い直線は林モデルで与えられるガス密度、ケプラー速度の関係をプロ

³ Iida et al 2001

ットしたものである。二つの大きなクロスの間領域は木星と小惑星帯の間領域を表している。例えば微惑星が作るバウショックのショック速度がケプラー速度のオーダーだとすれば。衝撃は加熱によるコンドリュール形成プロセスは妥当であるといえる。

ダストの溶融条件⁴

$$v_s \geq v_{s,\text{melt}} = \begin{cases} 7.5 \text{ km s}^{-1} & \text{for } n_0 \gg n_{0,\text{crit}}, \\ 7.9 \times \left(\frac{n_0}{7.4 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1/5} \\ \quad \times \left(\frac{T}{2000 \text{ K}} \right)^{1/5} \text{ km s}^{-1} & \text{for } n_0 \ll n_{0,\text{crit}}. \end{cases}$$

ダストが融点に達するためのショック速度の下限（灰色領域の低速側の境界）を見積もったものである。

ダストが溶融するためのショック速度はガス密度の大きい極限、小さい極限で性質が変わる。

ダストの最高温度は、加熱と冷却の釣り合いによって決まる。

ガスの抵抗加熱、ガスの衝突冷却はともにガス密度に比例するが、放射冷却はガス密度によらない。ゆえにガス低密度の領域では冷却源として放射冷却が卓越し、ガスの高密度領域ではガスの衝突冷却が卓越するようになる。

ガスの高密度領域：加熱、冷却がともにガス密度に比例するため、ダストの実効的な加熱はガスとダストの相対速度のみで決まる。

ガスの低密度領域：ガス密度に比例して加熱が増加するため、溶融に必要なガス速度はガス密度の負のべき乗で与えられる。冷却はショック後面でのガス温度の4乗で増加するため、溶融に必要なガス速度はガス温度の正のべき乗で与えられる。

⁴ Iida et al.2001

フューチャーワークとして

- 現実的なショック発生メカニズムを探る（微惑星の作るバウショックなど）
- ダストの溶融、蒸発モデルの詳細化
- より詳細な化学反応の考慮がショック後面のガスの性質に与える影響
- ガス・ダスト比が1：1に近い状況ではどうなるか