# 衝撃波加熱コンドリュール形成モデル:コンドリュール形状再現の条件

三浦 均<sup>1,2</sup>, 中本 泰史<sup>3</sup>, 土居 政雄<sup>3,4</sup> <sup>1</sup>京都大学・天体核 (miurah@tap.scphys.kyoto-u.ac.jp), <sup>2</sup>日本学術振興会特別研究員, <sup>3</sup>東京工業大学・地惑, <sup>4</sup>筑波大学・数物,

ABSTRACT: 地球に最も多い頻度で落下する石質隕石(コンドライト)に含まれる直径1mm程度の球状珪酸塩鉱物(コンドリュール)は、かつて原始太陽系星雲内部において、mmサイズ珪酸塩ダス ト粒子がなんらかのメカニズムで加熱されて融解し、表面張力によって丸くなり、その後急冷してできたものだと考えられている、我々は、いくつかのコンドリュールに見られるラグビーボール状 の形状が、衝撃波加熱モデルにおいてある条件下で再現できることを示した、本研究では、それ以外の条件においてどのような形状が期待されるかについて調べた、その結果、条件次第では、オブ レート状の形状や南北非対称な形状といった多様な形状が再現できることが分かった。この結果と実際のコンドリュール形状を比較することによって、コンドリュールがどのような環境で形成され たのかについて推測し、原始太陽系星雲内部におけるコンドリュール形成の謎に迫ることが期待できる。

## 1 背몸

#### ---コンドリュールと、その三次元形状

コンドライトと呼ばれ る始源的隕石に含まれ mmサイズの球状珪 酸塩鉱物.原始太陽系 星雲内部において,mm サイズの珪酸塩ダスト が加熱されて融解し(液 滴),表面張力で丸くな ったあと、急冷・再固 化して形成されたもの だと考えられている[1].



しかし、その形成メカニズムは、100年以上も前に問題提起さ れて以来謎のまま[2]. コンドリュール形成を解明することは、 惑星形成が進行していた星雲内部の物理的・化学的情報を引き 出すことに繋がる





―衝撃波加熱モデル

現在,最も有力だと考えられているコンドリュール形成モデル のひとつである[4,5,6,7,8,9,10,11,12]. 星雲内部で衝撃波が 生じると、ガスは衝撃波面において瞬時に速度が変化するが. ダストは通過前の運動状態を維持しようとするため、両者の間 に大きな相対速度が生じ、ガス摩擦によってダストが加熱される。我々は昨年の惑星科学会において、ガスの動圧が回転して

#### 結果1: $\theta_{\rm g} = 90$ deg.の場合( $p_{\rm fm}, \omega$ 依存性) 3

変形した液滴の半径 $r_s(\theta)$ は、ふたつの無次元数 $W_e$ (表面張力に対するガス動圧の比)とR(ガス動圧に対する遠心力の比)によって以下のように表すことができる。

$$r_{s}(\theta) = r_{0} \left[ 1 + W_{e}(R_{cr} - R)P_{2}(\cos \theta)/12 \right],$$
 (6)

 $r_0$ は非摂動状態の液滴の半径,  $R_{cr}$ はRの臨界値 (= 19/20),  $P_n$ はLegendre 関数. また,  $W_e$ とR の定義は以下の通り、

 $W_e \equiv p_{fm} r_0 / \gamma_s$ ,  $R \equiv \rho \omega^2 r_0^2 / p_{fm}$ .

液滴形状のガス動圧依存性,回 転速度依存性を示す. R < R<sub>cr</sub>で は、ガス動圧によって液滴がプロ は、カス動圧にようで統領がノロ レート形状となり、 $R > R_{cr}$ で は逆に遠心力が卓越してオブレー トとなる。等高線は、液滴の軸比 (プロレート形状の場合はB/A)を 表す.Group-A,-Bに相当する領 域をそれぞれ青と赤で色塗りして ある. 灰色の領域は, 強い遠心力 によって液滴形状が不安定化する パラメータを示す[14]. 三次元数 値流体シミュレーション結果(青丸 =group-A に相当,赤四角=group-B に相当,十字=それ以外の定常 バツ=回転不安定、数値計 形状.



がか、しました。 算手法は[15]参照]は、今回の解析 解とよく一致、ただし、液滴変形のタイムスケールに対して回転が遅い場合は、ガス流の軸対称 近似が悪くなるため、解析解からずれる.

#### 議論 5

コンドリュール形状が融解時の形状を保存している場合,それが衝撃波加熱によるものだとする と,そのコンドリュールを作った衝撃波の条件(ガス密度,衝撃波速度,光学的性質)が推測できる。 しかし、コンドリュールには、隕石母天体において衝撃変成を受けた結果変形しているものもあ る。一般的には、衝撃はある特定の方向にのみ作用するため、衝撃変成を受けたコンドリュール は通常オブレート状の変形を受けることになる。我々の結果と比較するためには、コンドリュー ルの衝撃変成の程度をしっかりと議論する必要があるだろう。

衝撃波加熱モデル以外のモデルでも、コンドリュール形成時に強いガス動圧とダスト回転が説 国子さん加えて、「なく、レントン」、「シーン」、「レントン」、「レントン」、「レントン」、「レントン」、「リーン・シーン」、「リーン・シーンの変形を説明できる可能性がある。 ただし、例えばgroup-Bを形成するためには、我々が示した通り、ガス動圧の強さやダストの回転速度、また、回転軸とガス流との向きについて制限があることに注意しなくてはいけない。衝 撃波加熱モデルが有利な点は、ダストを融解するための熱力学的な条件[7]と、融解ダストの変形



### ---本研究の日的

前回考慮されていなかった条件下における融解ダスト形状を調 べ、その結果に基づいて、コンドリュール三次元形状を再現す るための条件を求める.

•ガス動圧 $p_{\mathrm{fm}}$ 依存性,回転角速度 $\omega$ 依存性 回転軸とガス流のなす角度θg依存性

2 モデルと手法

#### -二次元軸対称流体力学方程式の解析



よって軸対称近似できる 角速度ωで回転する液滴

 $(\partial/\partial t = 0)$ の流体方程式

 $r\frac{\partial v_r}{\partial r} + 2v_r + \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + v_\theta d\theta$ 

 $v_r \frac{\partial v_r}{\partial t_r} + \frac{v_\theta}{\partial t_r} \frac{\partial v_r}{\partial t_r} - \frac{v_\theta^2 + v_\phi^2}{\partial t_r} - 2v_{\phi}\omega\sin\theta - r\omega^2\sin^2\theta =$  $\frac{\partial r}{\partial \rho} + \frac{r}{r} \frac{\partial \rho}{\partial \rho} - \frac{r}{r} - 2v_{\phi\omega} \sin \theta - r\omega^{2} \sin^{2} \theta = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial r} + \frac{\mu}{\rho} \left[ \frac{\partial^{2} v_{r}}{\partial r^{2}} + \frac{4}{r} \frac{\partial v_{r}}{\partial r} + \frac{2v_{r}}{r^{2}} + \frac{1}{r^{2}} \left( \frac{\partial^{2} v_{r}}{\partial \theta^{2}} + \cot \theta \frac{\partial v_{r}}{\partial \theta} \right) \right] (2)$ dr  $\frac{\partial v_{\theta}}{\partial r} + \frac{v_{\theta}}{r} \frac{\partial v_{\theta}}{\partial \theta} + \frac{v_{r} v_{\theta}}{r} - \frac{v_{\phi}^{2} \cot \theta}{r}$  $\frac{1}{r} \frac{1}{r} - 2v_{\phi}\omega\cos\theta - r\omega^2\sin\theta\cos\theta = \frac{1}{r}$  $v_r$  $\frac{\partial r}{\partial r} + \frac{\partial r}{r} \frac{\partial \theta}{\partial \theta} + \frac{\partial r}{r} - \frac{\partial r}{r} - \frac{\partial v_{\phi}}{\partial r^2} - \frac{\partial v_{\phi}}{\partial r^2} - \frac{\partial v_{\phi}}{\partial r} - \frac{\partial^2 v_r}{\partial r \partial r \partial \theta} \right)$ (3)

vは速度, pは圧力, ρは液滴密度, μは粘性係数.

#### 液滴表面における力の釣り合い:

 $\langle \boldsymbol{F}_{g} \rangle = n_{r} \sigma_{rr} \boldsymbol{e}_{r} + n_{\theta} \sigma_{\theta r} \boldsymbol{e}_{r} + n_{r} \sigma_{r\theta} \boldsymbol{e}_{\theta} + n_{\theta} \sigma_{\theta \theta} \boldsymbol{e}_{\theta}$ +  $n_r \sigma_{r\phi} \boldsymbol{e_\phi} + n_\theta \sigma_{\theta\phi} \boldsymbol{e_\phi} + \gamma_{\rm s} (R_{\theta}^{-1} + R_{\phi}^{-1}) \boldsymbol{n},$ (4)

 $\langle F_{a} \rangle$ は時間平均されたガス動圧, nは液滴表面における法線方 向単位ベクトル、 $\sigma$ は表面張力、 $R_{\phi}$ Ra(maxim)な話におり なな続け の単位ベクトル、 $\sigma$ は表面張力、 $R_{\phi}$ Ra(曲率.

 $\boldsymbol{v}\cdot\boldsymbol{n}=0$ 

#### 液滴表面における法線方向の速度成分はゼロ:

#### ―ガス動圧のLegendre展開

0.2

0.1

 $\theta_{g} = 0 \deg. \mathcal{O} \wr \mathfrak{sl}[13]$ 。 の場合に相当し(ガス流 が常に同じ面に作用す る),  $\theta_{\sigma} = 90 \deg. \mathcal{O}$ とき は我々の前回までの解 析に相当する。今回は 0 deg.  $< \theta_g < 90$  deg. の 場合も考えるので, 改め てガス動圧の表式を求 め,それを Legendre 展 開したときの係数を求 めた



0.2

0.1

-03

-0.1

## 4 結果 $2: \theta_g \neq 90 \deg. \sigma$ 場合( $\theta_g$ 依存性)

時間平均したガス動圧を、時間平均をとる

$$f_r \equiv \langle F_{\mathrm{g},r} \rangle / p_{\mathrm{fm}}, \quad f_{\theta} \equiv \int_0^{\theta} \langle F_{\mathrm{g},\theta} \rangle d\theta / p_{\mathrm{fm}}.$$

これをLegendre展開し, 各モードnの係数 を求めた.図は、 $\theta_g = 90, 60, 30, 0 \text{ deg.}$ の場合の結果を示す. $\theta_g = 90 \text{ deg.}$ (垂直) な場合は、ガス動圧はn = 20モードの みで表されるが(南北対称),回転軸が傾く ストレーン・ション(IFHUA197), 回転軸が限くと、南北非対称モード(e.g., n = 3)が現れる.これが、液滴形状の南北非対称性を生み出す.

回転軸がガス流に対して傾いて いる場合の液滴形状断面図を示 す 回転軸とガス流の向きが垂直 な場合( $\theta_g = 90 \text{ deg.}$ )は南北対称な プロレート形状となるが、回転軸 が傾くにつれて ( $\theta_g < 90$  deg.) 南 北非対称性が現れていく様子が分 かる. これが, 実際のプロレート 形状のコンドリュールに見られる 南北非対称性の起源かも知れない (写真参照).



によってgroup-Bの形状を再現するための力学的な条件(我々の成果)が重なっている条件が存在 するという点である。これら変形コンドリュールは、衝撃波加熱によって加熱・融解されたと同 時に、その三次元形状が形成されたのかも知れない。

#### 6 まとめ

- 衝撃波加熱モデルにおいて、融解したコンドリュール前駆体ダストの変形について調べた.
- 1. 融解ダスト形状は、ガス動圧の強さやダスト自身の回転速度に依存する.
- 実際のコンドリュールが再固化直前の形状を記憶しているのであれば、その形状分布を調べる ことで、コンドリュールを形成した衝撃波のモデルについて制限が与えられる。
- 3. ガス流と回転軸の向き関係に応じて、多様な形状が説明できる(南北非対称プロレート、大変 形オブレート,…)

References: [1] Jones et al. (2000), in Protostars and Planets IV (eds Mannings, V., Boss, A. P. & Russell, S. S.), 927-962 (Univ. of Arizona Press, Tucson, 2000). [2] Sorby (1877), Nature 15, 495-498. [3] Tsuchiyama et al. (2003), Lawar Planet. Sci. Conf. XXXIV, abstr. 1271 [CD-ROM]. [4] Hood & Horanyi (1991), Lorura 93, 259-269. [5] Hood & K Incarnyi (1993), Lorura 164, 937 [19] Carbon 125, 349-449. [3] Tsuchiyama et al. (2003), Lawar 164, 817 [19] Linumakina & Ip (1994), Lorura 112, 430. [7] Inda et al. (2001), Lorura 153, 349-449. [3] Bosch & Commit (2002), Lorura 176, 250. [10] Minura et al. (2002), Lorura 160, 251. [11] Minura & Nakamoto (2005), Lorura 176, 254. [12] Minura & Nakamoto (2005), Lorura 176, 254. [10] Minura et al. (2002), Lorura 160, 251. [11] Minura & Nakamoto (2005), Lorura 176, 254. [12] Minura & Nakamoto (2005), Lorura 176, 254. [13] Minura & Nakamoto (2005), Lorura 176, 254. [14] Minura & Nakamoto (2005), Lorura 176, 254. [15] Minura & Nakamoto (2005) 日本地球惑星科学連合2007年大会、2007年5月19日-24日、幕張メッセ国際会議場、千葉

前のガス動圧pfmで無次元化.

と共に回転する座標系における定常  
:  
ot 
$$heta=0,$$
 (1)

z-axis (rotation axis)

 $\ominus$