

液滴の衝突による合体と分離:

溶融したコンドリュールの衝突による複合コンドリュール形成シナリオの検証

荒川 創太 (東京工業大学大学院 理工学研究科 地球惑星科学専攻)

Abstract

コンドリュール全体の 5% 程度は複合コンドリュールである。現在、複合コンドリュールは、溶融したコンドリュールが衝突することで形成されたと考えられている。我々は、複合コンドリュール形成について理解を深めることを目的として、液滴の衝突に関する実験および理論的考察を行った Ashgriz & Poo (1990) と、衝撃波加熱による複合コンドリュール形成について 3次元流体シミュレーションを行った Yasuda et al. (2009) をレビューした。

1 Introduction

コンドリュールはコンドライト隕石に多量に含まれる 1 mm 程度の球形のシリケート構成物であり、コンドリュール全体の 5% 程度は 2 つ以上のコンドリュールが付着合体したかたち (複合コンドリュール) で隕石中に取り込まれている (Gooding & Keil, 1981; Ciesla et al., 2004)。複合コンドリュールは、加熱され溶融したコンドリュールが、冷却中に衝突することで形成されたのではないかと考えられている (Ciesla et al., 2006; Yasuda et al., 2009)。そのため、複合コンドリュールの形成過程を理解することは、コンドリュールの形成条件、ひいては微惑星形成期の原始太陽系の状況を明らかにすることにつながると思われる。

2 Collision of liquid drops

複合コンドリュールが溶融したコンドリュールの衝突によって形成されると考えるならば、形成過程を理解する上で液滴 (非圧縮性流体) の衝突に関する物理的理解は不可欠である。水の液滴に関しては Ashgriz & Poo (1990) によって実験的および理論的な研究が行われ、衝突の性質は 2 つの液滴のサイズ比、インパクトパラメータ、そしてウェーバー数 (慣性力と表面張力の比を表す無次元数) によって決まり、反射的分離、伸張的分離、合体などのいくつかのパターンに分

けられることが明らかになった。このセクションでは Ashgriz & Poo (1990) のレビューを行う。

2.1 Description of the binary drop collision phenomenon

2 つの液滴の衝突に関する物理パラメータは、大きい液滴の直径 d_l 、小さい液滴の直径 d_s 、インパクトパラメータ X 、相対速度 u 、液滴の密度 ρ 、粘性係数 μ 、表面張力 σ の 7 つであり、独立な次元は、長さ L 、質量 M 、時間 T の 3 つであるから、Buckingham Π theorem より、この問題は 4 つの無次元パラメータによって記述することができる。物理的な意味を持つ 4 つの無次元パラメータは、液滴のサイズ比 Δ 、規格化されたインパクトパラメータ x 、慣性力と表面張力の比を表す Weber 数 We 、慣性力と粘性力の比を表す Reynolds 数 Re である。

$$\Delta = \frac{d_s}{d_l}, \quad (1)$$

$$x = \frac{2X}{d_l + d_s}, \quad (2)$$

$$We = \frac{\rho d_s u^2}{\sigma}, \quad (3)$$

$$Re = \frac{\rho d_l u}{\mu}. \quad (4)$$

この実験における Reynolds 数の範囲は 500 から 4000 であり、実験結果からは Reynolds 数の衝突結果への強い影響は見られなかった。

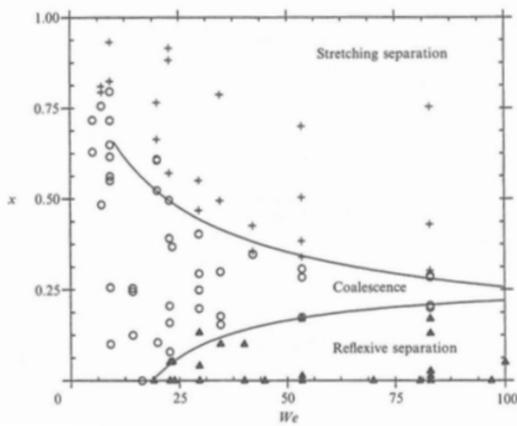


図 1: Ashgriz & Poo (1990) figure 2 を引用. サイズ比 $\Delta = 1.0$ における, 衝突実験の結果 (+ が伸張的分離, O が合体, ▲ が反射的分離). 解析的に得られる境界線も描かれている (2 本の実線).

図 1 は, サイズ比 $\Delta = 1.0$ における衝突実験の結果である. Weber 数が小さい, すなわち, 相対速度が小さいときは広いインパクトパラメータ領域において液滴は合体する一方, Weber 数が大きくなるとインパクトパラメータが小さい場合には反射的分離, 大きい場合には伸張的分離となり, 合体するパラメータ領域が減少することが示された. 解析的に得られる境界線は, 実験結果とよく一致している.

図 2 は, サイズ比 $\Delta = 0.5$ における衝突実験の結果である. $\Delta = 1.0$ の場合と同様の傾向を示し, $\Delta = 1.0$ の場合と比較して同じ Weber 数のときにより広いインパクトパラメータ領域において合体することが明らかになった.

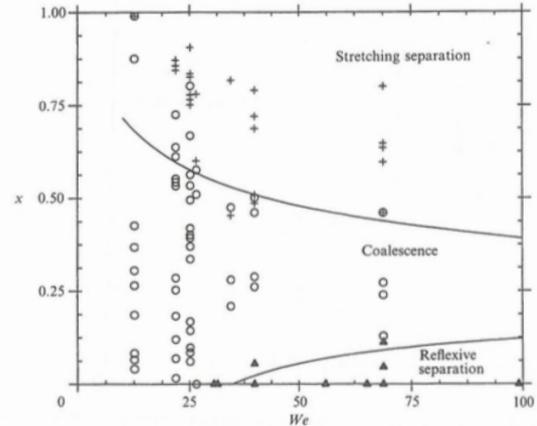


図 2: Ashgriz & Poo (1990) figure 19 を引用. サイズ比 $\Delta = 0.5$ における, 衝突実験の結果 (+ が伸張的分離, O が合体, ▲ が反射的分離). 解析的に得られる境界線も描かれている (2 本の実線).

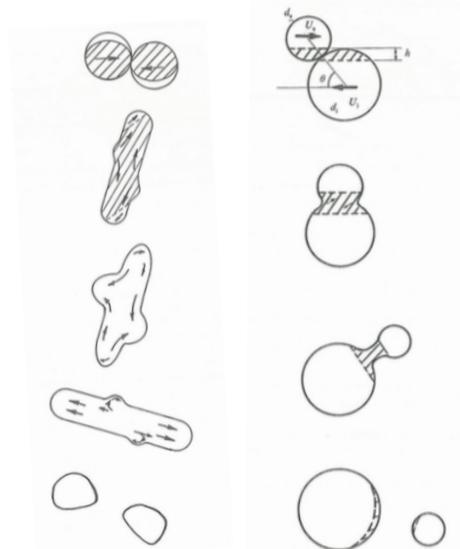


図 3: 液滴の衝突による変形.

左図: Ashgriz & Poo (1990) figure 8 を引用. 反射的分離における液滴の変形する様子. 衝突時に反射的に運動する領域を斜線で示している.

右図: Ashgriz & Poo (1990) figure 11 を引用. 伸張的分離における液滴の形状の時間変化. 衝突時に合体する領域を斜線で示している.

2.2 Theoretical prediction of reflexive and stretching separation

液滴の衝突について詳細を明らかにするためには, 自由表面における 3 次元の Navier-Stokes 方程式を解く必要がある. しかし, エネルギーバランスの解析から境界線を概算することが可能である. ここでは特に反射的分離と合体の境界について考える.

2.2.1 Effective reflexive energy

図 3 左図は, 反射的分離における液滴の形状変化および内部の流体の運動を図式的に表したものである.

今回の設定においては、粘性散逸と表面エネルギーの比を表す無次元数である Laplace 数 $Lp = We/Re^2$ が 10^{-4} 程度と十分に小さいため、液滴が変形中に粘性によって失うエネルギーを無視することができる。以下では、衝突した瞬間、および、仮想的にひとつの球形になった液滴 (図 4) について、運動エネルギーと表面エネルギーを計算することで、反射的分離と合体の境界条件を求める。

まず、インパクトパラメータの小さな衝突において、反射的に振る舞う領域の体積をインパクトパラメータの中心を軸とする扁長楕円体 (prolate) で近似する。このとき、大きな液滴の反射的領域 V_{ip} および小さな液滴の反射的領域 V_{sp} は

$$V_{ip} = \frac{1}{6}\pi d_1^3(1-\xi)^2(1-\xi^2)^{1/2}, \quad (5)$$

$$V_{sp} = \frac{1}{6}\pi d_1^3(\Delta-\xi)^2(\Delta^2-\xi^2)^{1/2}, \quad (6)$$

$$\xi = \frac{1}{2}x(1+\Delta), \quad (7)$$

と求まる。よって、反射的に運動する領域の運動エネルギー K_c は

$$K_c = \frac{1}{2}\rho(V_{ip}U_1^2 + V_{sp}U_s^2), \quad (8)$$

$$U_1 = \frac{\Delta^3 u}{1+\Delta^3}, \quad (9)$$

$$U_s = \frac{u}{1+\Delta^3}, \quad (10)$$

となる。同様に、伸張的に運動する領域の運動エネルギー K_s は

$$K_s = \frac{1}{2}\rho[(V_1 - V_{ip})U_1^2 + (V_s - V_{sp})U_s^2], \quad (11)$$

と計算できる。

2つの液滴が1つの液滴になると、表面エネルギーが減少する。仮想的に1つの球形の液滴になったとき、表面エネルギーの減少量は内部の運動エネルギーの増加量 K_e と等しく、

$$K_e = \sigma\pi d_1^2 \left[(1+\Delta^2) - (1+\Delta^3)^{2/3} \right], \quad (12)$$

である。ゆえに、1つの球形の液滴になったときの実効的な反射的運動エネルギー K_r は

$$K_r = K_e + K_c - K_s, \quad (13)$$

となる。

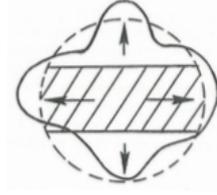


図 4: Ashgriz & Poo (1990) figure 25 を引用. 図 3 左図の 2, 3, 4 番目の状態において、仮想的に同じ体積の球形になった状態を考える。液滴内部の運動エネルギーと表面エネルギーの和が保存すると仮定している。

2.2.2 Reflexive separation criterion

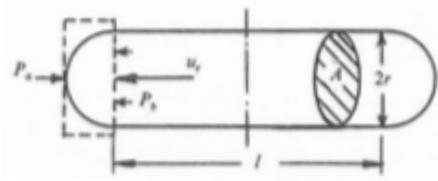


図 5: Ashgriz & Poo (1990) figure 26 を引用. 反射的分離において液滴が運動方向に伸びたときの流れの様子。

図 5 は図 3 左図の 4 番目の状態を表している。ここでは、この状態における反射的な運動エネルギーと表面エネルギーの比から分離する条件を求める。まず、図 5 において、圧力と動圧を考えることにより、内部の典型的な速度 u_r は

$$u_r = \left(\frac{2\sigma}{\rho r} \right)^{1/2}, \quad (14)$$

となり、反射的な運動エネルギー K_m は

$$K_m = 4\pi r^2 \sigma \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{4} \frac{l}{r} \right), \quad (15)$$

と求まる。また、この状態における表面エネルギー S_m は

$$S_m = 4\pi r^2 \sigma \left(1 + \frac{l}{4r} \right), \quad (16)$$

である。

ここで、エネルギー保存から、仮想的に1つの球形の液滴になった場合の運動エネルギー K_r^* と表面エ

エネルギー S_n^* を求めることができる. この 2 つのエネルギーの比 $\Gamma = K_r^*/S_n^*$ を計算すると,

$$\Gamma = \left(1 + \frac{3l}{4r}\right)^{-2/3} \left(\frac{4}{3} + \frac{3l}{4r}\right) - 1, \quad (17)$$

となる. ここで, $l/r = 2\pi - 2$ が分離と合体の境界である (Rayleigh, 1945) ことを用いると, $\Gamma \simeq 0.75$ が境界と求まる. よって,

$$K_r = 0.75\sigma\pi(d_1^3 + d_s^3)^{2/3}, \quad (18)$$

が境界線の方程式である.

3 Fragment-collision model

複合コンドリュールが 5% 程度も存在するためには, 溶融したコンドリュールの衝突が少なくとも 5% 以上の確率で発生する必要がある. コンドリュールの衝突確率 f は, 数密度 n , 衝突断面積 σ , 相対速度 u , 溶融している時間 t を用いて,

$$f \sim n\sigma ut, \quad (19)$$

と見積もることができる. 最小質量円盤モデルから見積もられるダストの数密度は非常に小さく, 衝突確率は 5% に全く及ばない. そのため, この高い存在確率を説明するために様々なメカニズムが考えられてきた (Wasson, 1995; Miura et al., 2008). Miura et al. (2008) は cm サイズの大きなコンドリュールメルトの分裂片が衝突するという形成モデルを考えた. Yasuda et al. (2009) では, このモデルを 3次元の数値流体計算を行うことで, 実際に衝突し, 合体する確率を求めた. このセクションでは Yasuda et al. (2009) のレビューを行う.

3.1 Model

衝撃波の通過した領域では, ダストはガス摩擦によって加熱される. 粒子は表面が熱く中心は冷えており, 100 μm 程度のダストにおける温度差は 5 K 程度であるが, cm サイズのダストでは数百度の違いがある. そして, 大きなダストの表面が溶け, 大きなダストから分裂し, 分裂片同士が衝突することで複合コンドリュールが形成される.

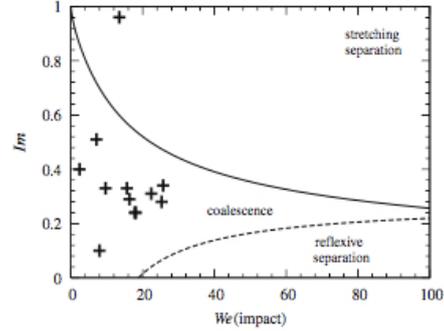


図 6: Yasuda et al. (2009) figure 12 を引用. 彼らの計算において 12 回発生した分裂片の衝突の結果 (+).

3.2 Numerical calculation results

数値計算の結果, もともとの cm サイズのダストから 32 個の分裂片が飛び出し, 12 回の衝突が発生した. 12 回の衝突のうち 11 回は合体条件を満たした (図 6). これはこのダストの分裂片における複合コンドリュールの割合 R_{coa} が $R_{\text{coa}} = 11/(32 - 11) = 0.52$ であることを表しており, 十分に存在割合を説明することができる.

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします.

Reference

- N. Ashgriz & J. Y. Poo 1990, *J. Fluid Mech.*, 221, 183-204.
- F. J. Ciesla 2006, *Meteor. Planet. Sci.*, 41, 1347-1359.
- F. J. Ciesla, D. S. Lauretta & L. L. Hood 2004, *Meteor. Planet. Sci.*, 39, 531-544.
- J. L. Gooding & K. Keil 1981, *Meteoritics*, 16, 17-43.
- H. Miura, S. Yasuda & T. Nakamoto 2008, *Icarus*, 194, 811-821.
- Lord Rayleigh 1945, *The Theory of Sound*, Vol. 2, Dover.
- J. T. Wasson, A. N. Krot, M. S. Lee, et al. 1995, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59, 1847-1869.
- S. Yasuda, H. Miura & T. Nakamoto 2009, *Icarus*, 204, 303-315.