

衝撃波加熱コンドリユール形成モデル： 希薄な高速ガス流にさらされた液滴のダイナミクス

三浦 均^{1,2}，中本 泰史³

¹ 筑波大学数理物質科学研究科，² 日本学術振興会特別研究員，³ 筑波大学計算科学研究センター

¹miurah@ccs.tsukuba.ac.jp

コンドリユールとは、地球に落下する隕石の大半を占めるコンドライト隕石に普遍的に含まれる球状の珪酸塩鉱物で、原始太陽系星雲でダスト融解現象が頻繁に生じていた証拠だと考えられている。有力な形成モデルに衝撃波加熱モデルがあり (e.g., Iida et al. 2001)，その特徴は加熱されて融解したダストが高速ガス流にさらされることである。その結果、ガス動圧によって液滴が変形することが分かっている (Sekiya et al. 2003)。実際のコンドリユールにも、真球からずれた形状のものが多い (Tsuchiyama et al. 2003)。彼らはコンドリユール形状を三軸 A, B, C ($A \geq B \geq C$) の楕円体で近似し、 B/A - C/B ダイアグラムにプロットした結果、比較的球に近い形状の group-A とプロレート ($C/B=1$) に近い group-B に分類できることを発見した (図 1 の中抜き丸)。Tsuchiyama らは、回転する液滴の平衡形状 (Chandrasekhar 1964) を考慮し、コンドリユール形状の説明を試みた。しかし、ガス動圧で変形する場合も、回転で変形する場合も、いずれの場合もオブレート ($B/A=1$) な形状しか説明できない。今回我々は、これらの効果を同時に考慮した場合の液滴のダイナミクスを解明することを目的に、3 次元数値流体シミュレーションを行った。

計算手法だが、非圧縮流体の数値スキームとして R-CIP-CSL2 (Nakamura et al. 2001) を採用した。液滴表面のシャープなプロファイルを高精度で記述し、かつ液滴の質量を高精度で保存するためである。また、圧力に関する項を陰的に解き、音速による CFL 条件に縛られないスキームを採用した (Yabe and Wang 1991)。計算格子は等間隔直交格子を採用し、格子数は 60^3 、計算領域の物理サイズは初期液滴半径 r_0 の 4 倍とした。

数値計算の結果、液滴形状が実際にプロレートになることを確認した。また、ガス動圧を固定した場合、回転速度が遅ければオブレート、回転速度を上げるにつれて三軸不等 ($C/B < 1$ ，かつ、 $B/A < 1$)，そしてプロレートと形状が変化することも分かった。形状がプロレートになったあとさらに回転速度を上げると、形状はプロレートのままで、長軸が他の 2 軸に対してさらに長くなる (変形度が大きくなる) ことも分かった。

さらに我々は、液滴形状の解析的導出を試みた。ガス動圧による変形 (Sekiya et al. 2003) と回転による変形 (Chandrasekhar 1964) が独立であるという仮定のもとに得られた解析解が、図 1 の実線である。各実線の横に書かれた数値は初期液滴回転角速度 Ω を無次元化した値を表し、ガス動圧を衝撃波加熱モデルで予想される値である $4000 \text{ dyne cm}^{-2}$ と仮定した場合、角速度は $\Omega = 560 (f/0.1)^{1/2} (r_0/500 \mu\text{m})^{-1} \text{ s}^{-1}$ で与えられる。解析解は、回転がゼロの場合は Sekiya et al. (2003) の解と一致し (オブレート)、回転が速くなる (f が大きくなる) につれて三軸不等、そしてプロレートになることを示す。液滴形状がプロレートになるまでの比較的小さい回転速度においては、我々の計算結果と解析解はよく一致した。しかし、さらに回転速度を大きくした場合の振る舞いは、解析解と計算結果で異なる。こ

れは、これ以上の回転速度を与えた場合は、回転による変形がガス動圧による変形を卓越するために、解析解を得るための近似が悪くなると考えられるのが原因だと考えられる。

最後に、我々のシミュレーション結果及び解析結果と、実際のコンドリユール形状を比較した結果について議論する。図 1 には、コンドリユールのデータ (Tsuchiyama et al. 2003) が中抜きの丸で表されており、シンボルのサイズは実際のコンドリユールサイズに比例させてある。回転が比較的遅い場合には、シミュレーション結果は解析解とよく一致するため、解析解のみを描いてある (液滴半径 r_0 は $200 \mu\text{m}$ と $500 \mu\text{m}$ を仮定)。これを見ると、group-A の小さいコンドリユール ($r_0 \sim 200 \mu\text{m}$) は比較的変形度が小さいほうに分布しており、大きいコンドリユール ($r_0 \geq 500 \mu\text{m}$) は $r_0 = 500 \mu\text{m}$ の解析解に沿った形で分布しているように見える。次に回転速度をより大きくした場合だが、 $r_0 = 500 \mu\text{m}$ 、 $\Omega = 1291 \text{ s}^{-1}$ の場合の計算結果を filled circle で示してある。シンボルの色が濃いほど、より時間が経過したときの値を意味する。これは、group-B のコンドリユールとよく一致する。

本研究では、ガス流にさらされた回転する液滴のダイナミクスを数値流体シミュレーションによって解析し、液滴の回転速度と液滴形状の関係を明らかにした。また、このときの液滴形状は実際に測定されたコンドリユールの形状をよく再現することが分かった。

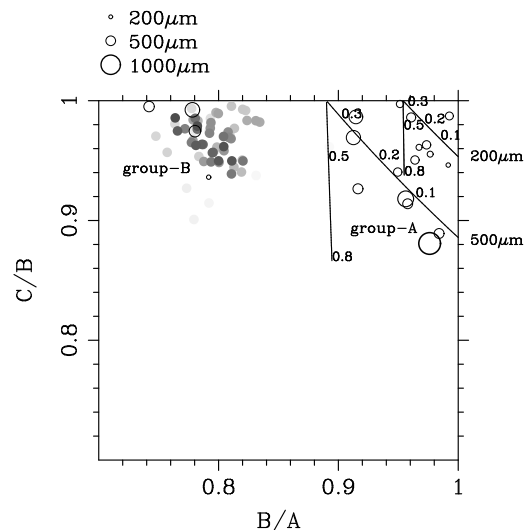


図 1: 液滴形状を三軸 A, B, C の楕円体で近似したときの、 B/A と C/B の関係。

References: [1] Iida et al. 2001, *Icarus*, **153**, 430. [2] Sekiya et al. 2003, *Prog.Theo.Phys.*, **109**, 717. [3] Tsuchiyama et al. 2003, *Lunar and Planetary Sci. Conf.*, abst#1271. [4] Chandrasekhar 1964, *Proc.Roy.Soc.London, A*, 1. [5] Nakamura et al. 2001, *J.Comp.Phys.*, **174**, 171. [6] Yabe and Wang 1991, *J.Phys.Soc.Japan*, **60**, 2105.