## 衝撃波加熱コンドリュール形成モデル:

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

<sup>1</sup>筑波大学 数理物質科学研究科,<sup>2</sup>日本学術振興会特別研究員,<sup>3</sup>筑波大学 計算科学研究センター <sup>1</sup>miurah@ccs.tsukuba.ac.ip

コンドリュールとは?: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(図1)



図1:コンドライト隕石の断面図 球状の鉱物(ピンク色) がコンドリュールである. 原始太陽系星雲の始源的な物質 であり、星雲に存在したmmサイズのダストが何らかのメ カニズムで加熱されて融解し、表面張力によって丸くなっ たものが急冷・再固化して形成されたと考えられている. 放射性同位体元素の測定から,融解時期は惑星形成段階と ほぼ同時期である可能性が高いことが知られている.

衝撃波加熱モデル:コンドリュール形成の有力なモデルのひとつ(図2).特徴は、加熱 されて融解したダストが、希薄な高速ガス流にさらされる点、その結果、ガス動圧に よって液滴が変形し、形成されるコンドリュールの形状に影響を及ぼす可能性があ る



図2:衝撃波加熱モデルの模式図.ダス トを含む星雲ガスに衝撃波が伝播してく ると、衝撃波面通過後ガスは瞬間的に加 速されるが、ダストはもともとの位置に 留まろうとする. 結果, ガスとダストの 間に相対速度が生じ、ガス摩擦によって ダストが加熱・融解される、詳細は、例 えばlida et al. (2001)を参照

コンドリュール3次元形状:実際に測定されたコンドリュールは、真球からずれた形状 のものが多く見られる(Tsuchiyama et al. 2003, 図3). 衝撃波加熱ではガス動圧に よって形状が変形するが、その形状はオブレート的(B/A=1)である(Sekiya et al. 2003). また、回転する液滴を考えた場合、遠心力によって液滴が変形するが、その 形状はやはりオブレートである(Chancrasekhar 1964). 実際にはプロレートや三軸 不等(C/B<1かつB/A<1)のコンドリュールも見つかっているが、それらの形状はどの ように説明されるのか?



ガス動圧にさらされながら回転する液滴:衝撃波後面では、融解ダストがガス流にさ らされながら回転する可能性がある(図4). しかし、衝撃波加熱コンドリュール形成モ デルにおいて、ガス流にさらされながら回転する液滴形状に関する研究は現在のとこ る報告されていない、本研究の目的は、3次元数値流体シミュレーションを用いて、 ガス流にさらされながら回転する液滴のダイナミクスを明らかにすることである。



図4:ガス流にさらされて回転するダスト.融解前のダストは 不規則な形状をしていると考えられる、そのため、一様なガス 動圧がダスト表面に作用しても、正味のトルクが生じてダスト が回転することが期待される、このときの回転軸は、ガス流の 向きに対して垂直になることに注目

計算手法:3次元流体力学方程式を移流項と非移流項に分け(セミ・ラグランジュ法), 移流項をR-CIP-CSL2 (Nakamura et al. 2001),非移流項を圧力ベース解法(Yabe and Wang 1991)で解いた。計算格子は等間隔直交格子を採用し、格子数は60<sup>3</sup>、計算領域 の物理サイズは、初期液滴半径の4倍とした。ガス流はx軸正の向きであるとし、回転 軸はz軸であると仮定した

References: [1] lida et al. 2001, Icarus, 153, 430-450. [2] Tsuchiyama et al. 2003, Lunar and Planetary Sci.Conf., abst#1271. [3] Sekiya et al. 2003, Prog.Theo.Phys., 109, 717-728. [4] Chandrasekhar 1964, Rroc Rey Soc.London, A., 1-26. [5] Nakamura et al. 2001, J.Comp.Phys., 174, 171-207. [6] Yabe and Wang 1991, J.Phys.Soc.Japan, 60, 2105-2108.

液滴形状の時間発展:実際の計算結果を図5に示す。液滴半径rは500µm,初期の液滴 回転角速度Ωは971 s<sup>-1</sup>, ガス動圧*p*fmは衝撃波加熱モデルの典型的な値(*p*fm = 4000 dyne cm<sup>-2</sup>), 液滴の表面張力 $\sigma$ と粘性係数 $\mu$ はシリケイトメルトの典型的な値( $\sigma$  = 400 dyne cm<sup>-1</sup>,  $\mu$  = 1.3 poises)を用いた。最初は球だったダスト形状が時間とともに変 形し,最終的にはプロレート的な形状(やや三軸不等ではあるが)で落ち着く,という 結果が得られた



いほど、より時間が遅いときの値を示 i 2  $\rightarrow$  40 cm s<sup>-1</sup> i 2 → 40 cm s<sup>-1</sup> す 回転速度依存性:回転速度を変えた場合の結果を図6に示す。回転速度が上がるにつれ て、液滴形状がオブレートからプロレートに変化していくことが分かる、また、図中 の実線は、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である. 我々の計算結果と解析解を比較すると、回転が遅い場合(ƒ≤0.3-0.4)はシミュレー ション結果は解析解とよく一致しており、回転が速くなると(f ≥ 0.3-0.4)シミュレー ション結果は解析解からずれ、より変形度の大きなプロレートになることが分かっ



た

図6:回転速度を変えた場合の液滴形状の変 化. カラーシンボルが計算結果を表し、fは 角速度を無次元化したパラメータである 赤 (Ω = 560 s<sup>-1</sup>)→緑(Ω = 971 s<sup>-1</sup>)→青(Ω = 1291 s<sup>-1</sup>)となるにつれて初期の液滴回転速 度が速い場合を表す、また、実線はガス動圧 による変形と回転による変形が独立であると いう仮定のもとに得られた解析解である.

0.9

コンドリュール形状との比較: 我々の計算結果, 解析解, そしてコンドリュールの測 定値を同じダイアグラム状にプロットした(図7).回転が遅い場合は計算結果と解析解 はよく一致するので、解析解のみを表示、その結果、group-Aの形状とサイズの傾向 をよく再現することが分かった、また、回転が速いと液滴形状は解析解より大きく変 形したプロレート形状となり、それはgroup-Bの形状をよく再現することが分かっ た



図7:計算結果(黒シンボル、液滴半径は 500 µm, 初期回転角速度は1291 s<sup>-1</sup>を仮定),解析解(実線,液滴半径は200 µmと500 µmを仮定), コンドリュールの 測定結果(カラーシンボル) カラーシンボ ルのサイズは、実際のコンドリュールのサ イズに比例させてある.

まとめ:3次元数値流体シミュレーションにより、ガス流中で回転する融解ダストの ダイナミクスを調べた、ダストの回転は融解直前の不規則なダスト形状に起因すると し、その回転軸はガス流に対して垂直であると仮定した

1. 回転が比較的遅い領域では、回転速度が上がるにつれて液滴形状はオブレートから プロレートに変化していく、その傾向は、group-Aのコンドリュール形状をよく再 現した.

2. 回転がさらに速くなると,プロレート形状となった液滴の変形度がより大きくなる 方向に形状がシフトしていく、その結果、group-Bのコンドリュール形状をよく再 現した.

第18回理論懇シンポジウム「高エネルギー天体物理学の最前線」,京都大学基礎物理学研究所,2005年12月25-27日