

特集 2: 航空機による学生無重力実験コンテスト
(解説)

ミルククラウン形成過程における重力加速度の影響について

渡 健介・林 貴昭・白鳥 英・日比谷 孟俊

Effects of Gravitational Acceleration on Formation of Coronets

Kensuke WATARI, Takaaki HAYASHI, Suguru SHIRATORI and Taketoshi HIBIYA

Abstract

The formation mechanism of coronet was investigated using a microgravity obtained during parabolic flight of a jet plane Gulf Stream II. When coronet height was plotted against the Weber number, gravitational acceleration appears to affect the height of coronets. The Froude number cannot be an appropriate parameter to describe crown height.

1. 緒 言

ミルククラウン現象とは、液滴が固体壁面上の液膜に衝突したときに生じる、王冠形状の総称である。その特異な外観から、過去様々な研究がなされてきた。学術的研究としては、1907年に発表された Worthington¹⁾による写真撮影が最初である。計算機の発展に伴い数値的解析も盛んに行われ、ミルククラウンは、その解析手法の評価を行う対象としても注目されている。しかし、現象自体が極めて短時間に生じるものであり、また、液体の物性値や液体の落下速度、液膜の厚さなど、様々なパラメータが影響するため、そのメカニズムに対する統一的な見解は未だ存在しない。これは、解析の手法だけでなく、今まで計算上無視されてきた様々なパラメータも現象に影響を与えているためと考えられている。既往の研究論文と筆者らによって行われた観察によれば、ミルククラウン現象の特異な王冠形状は、その形成過程において、周方向 (θ 方向) に速度分布が生じているためと考えられる。また、筆者らの観察実験から、周方向速度分布が生じない場合や生じた分布にも様々なパターンが存在し、これらを統計的にまとめると、3種に大別できることがわかった。このうち、周方向の速度分布を一切持たない軸対称形状のものを Form 1, 周方向に速度分布を持つ非軸対称形状のものを Form 2, Form 2 同様周方向に速度分布を持ちながら、クラウンの先端から小液滴の分裂があるものを Form 3 と分類する (Fig. 1)。周方向速度分布の生成を、表面張力に起因する (表面弾性効果)²⁾とするもの、雰囲気と液体の密度差に起因する (Rayleigh-Taylor 不安定性) のもの³⁾など、様々な要因が考慮の対象となっている。ミルククラウン現象に関係すると思われる全てのパラメータを、無次元数を用いて整理す

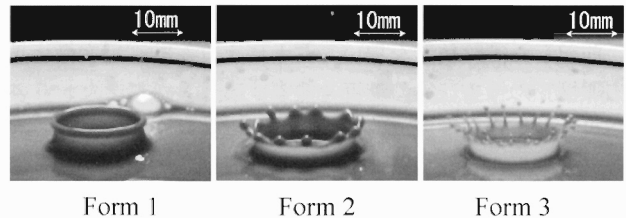


Fig. 1 Classification of coronet form. Form 1: axisymmetric, Form 2: appearance of azimuthal component of velocity, Form 3: split crown edge.

Table 1 Dimensionless number to describe coronet formation

Dimensionless number	Definition
Dimensionless depth	$D^* = D/R$
Reynolds number	$Re = RU/\nu$
Weber number	$We = \rho U^2 R / \sigma$
Froude number	$Fr = U / (Rg)^{1/2}$

D : characteristic length, g : gravitational acceleration, U : velocity, ρ : density, μ : viscosity, σ : surface tension

ば、Table 1 のようになる。

これらの無次元数内部に含まれる物性値や物理量の一部を変化させることが可能であるが、各無次元数は異なる無次元数と同一のパラメータを含む場合が多く、無次元数を独立に動かすことは困難である。そのため、実験的手法からは、統一的なメカニズムの発見に至っていない。本研究では、これまでの研究において明らかになっていない重力加速度の寄与に着目し、ミルククラウン形状やその不安定化に与える影響を、学生パラボラ実験の機会を利用して実験的に解明することを試みた。

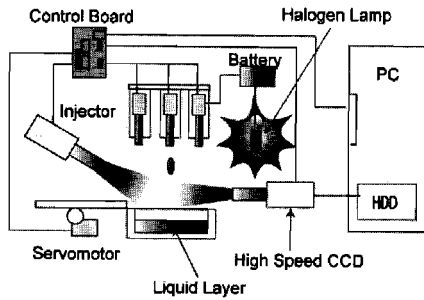


Fig. 2 Experimental apparatus of coronet formation for use in a parabolic flight.

2. 実験方法

重力加速度を変えることは、ジェット機 Gulf Stream II の放物線飛行によって行った。加速度データによれば $1 \times 10^{-2} G$ から $3 \times 10^{-2} G$ 程度の微小重力環境であった。通常重力下においては、衝突までの液滴落下距離の調節により衝突速度を制御できるが、微小重力環境では、何らかの方法で液滴に初速を与える必要がある。さらに、静水圧が働かないため、液膜を保持する機構が必要となる。本研究では、慣性力を利用した液滴射出機構を開発し、容器の壁面を撥油剤でコーティングすることで液膜の保持を可能にした。液体にはシリコンオイル（信越シリコン製 KF96-6CS~10CS）を用い、高速度 CCD カメラ（Red-lake MotionScopePCI1000）により、液滴衝突時の液滴の大きさ、衝突速度およびクラウン高さの観測を行った（Fig. 2）。航空機実験と並行して、同様の測定系を用いて 1G 下での比較対照実験を行った。

2. 結果と考察

1G 下での実験結果と、航空機の放物線飛行が作る微小重力環境下 ($10^{-2} G$) での実験結果を合わせて整理し、クラウン高さに及ぼすパラメータについて考察した。

Fig. 3 に示すように、Weber 数の関数としてクラウン高さを整理すると、1G 下で作られたクラウンの高さよりも $10^{-2} G$ で作られた場合の方が、クラウンは若干高くなっているように見える。衝突時の液滴エネルギーで整理した場合にも同様の傾向が見られた。Fig. 4 に、無次元パラメータ Froude 数を用いて、クラウン高さを示す。Froude 数は、これまで、地上でのクラウン高さを表記するために用いられてきたパラメータである。図に示すように、 $10^{-2} G$ 下と 1G 下のデータは 2 本のカーブに分かれており、重力加速度の効果を統一的に示すことはできない。

ミルククラウン形成とは、衝突する液滴の持つエネルギー（運動エネルギーおよび表面エネルギー）が、液膜の運動に関わるエネルギー、液柱の形成によるポテンシャルエネルギー、液柱形成による表面エネルギーとして変換されるプロセスである。液柱の高さは、ポテンシャルエネルギーに関わる。重力加速度によってクラウン高さが異なるのは、ポテンシャルエネルギーの違いを反映したものであろう。Froude 数には分母に重力加速度が入っているが、クラウン形成が衝突に

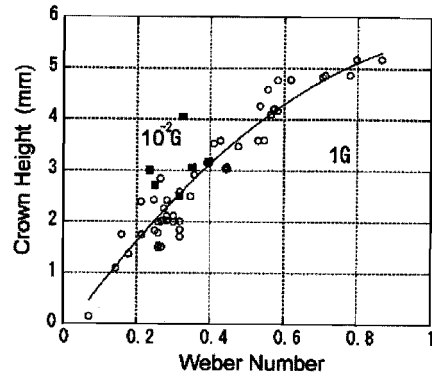


Fig. 3 Crown height as a function of Weber number for the $10^{-2} G$ and 1G conditions.

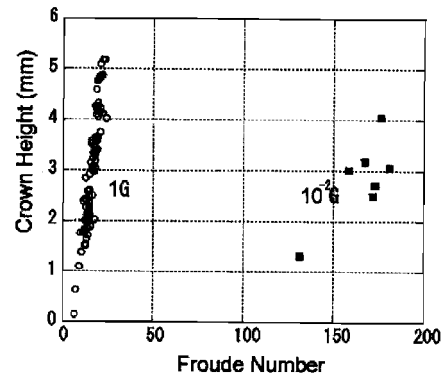


Fig. 4 Crown height as a function of Froude number for the $10^{-2} G$ and 1G conditions.

よるエネルギーの変換によるものと考えると、重力加速度が変化した場合のクラウン高さを Froude 数で整理することは適切でないと考えられる。

3. 更なる理解に向けて

本実験では、微小重力環境におけるミルククラウン形成過程を Froude 数で整理することはできないこと、さらに、Weber 数で整理すれば 1G と $10^{-2} G$ とでは若干の差異が認められることがわかった。しかしながら、取得されたデータ数がわずかであるため、その差異の要因を特定し明確化するには至らなかった。今後は、実験装置の改良によるデータ数の増加、データ取得精度の向上を図る。また、より現象を多角的に捉えるため、無次元数以外のデータ整理方法を検討し、妥当性を検証していく。

謝辞

本実験は JAXA 主催第 2 回無重力実験コンテストの一環であり、JSF および DAS の協力のもとに行われた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) A. M. Worthington: "A study of splashes" (Longmans Green and Company, London, 1908).
- 2) Y. Zhang and T. Yabe: CFD Journal, 8 (1999) 378.
- 3) A. L. Yalin and D. A. Weiss: J. Fluid Mech., 283 (1995) 141.

(2005年12月12日受理)