

## 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, 白鳥英, 小澤俊平, 日比谷孟俊  
 首都大学東京 航空宇宙システム工学専修

### Effects of gravitational acceleration on formation of coronets on liquid layer

*Kensuke Watari, Suguru Shiratori, Shumpei Ozawa and Taketoshi Hibiya*  
 Dept. Aerospace Engineering, Tokyo Metropolitan University,  
 Asashigaoka 6-6, Hino, Tokyo 191-0065  
 E-Mail: watari@astan1.tmit.ac.jp

Abstract: "Coronet" is phenomenon, when a droplet impact at the surface of thin liquid layer. This phenomenon is related with surface tension, viscosity, impact speed, and droplet size. However, it has not yet been reported, whether gravitational acceleration affects coronet formation. The effect of gravitational acceleration was investigated using a parabolic flight experiments. At low Reynolds number, silicone oil does not coalesce with a thin film layer; bouncing was observed. At higher Reynolds number, droplet collides with a film and formed a coronet.

*Key words:* Coronet formation, microgravity, Bouncing, Coalescence, Parabolic flight experiment

#### 1. 緒言

ミルククラウン(coronet)とは, Figure 1 に示すように液滴が液膜に衝突する際に生じる王冠形状のことで, 1907年に Worthington によって初めて学術的な研究報告がなされた[1]. この現象は, GDI エンジン(燃料直噴エンジン)やインクジェットプリンタなど, 様々な工業製品の内部で実際に生じており, これらの性能向上のため, 現象の解明が求められている.

この現象に関する研究は, 高速度カメラの発展と, 数値解析手法の進歩に伴い, 関連するパラメータに着目して多く行われている. Macklin は, 高速度カメラを利用したその場観察実験によって, その形状に対する粘性と表面張力の影響について考察した[2]. また, Harlow と Shannon は, 彼らが考案した MAC 法(marker and cell method)によって, 初めて2次元数値計算による研究を行い, 形成過程に対する粘性の影響について述べた[3]. 近年ではコンピュータの性能向上から, Harlow らの研究をもとに, 3次元計算によって, 表面張力や雰囲気圧力の影響などを考慮した研究も行われている[4, 5].

ミルククラウン現象は, 地上で観察する限り, 液面に衝突した液滴が跳ね返るという現象であることから(Fig.1 参照[6]), 重力加速度の影響があるものと考えられるが, 既往の研究において重力加速度の効果を議論しているものはない.

そもそも, 衝突した液滴が液膜と合体して, Fig.1a に示すような液柱形状になるかどうかという点においては, NASA の Pettit 宇宙飛行士が宇宙ステーションの中で行った Saturday Morning Science のビデオが, 興味深いヒントを与えている[7]. すなわち,

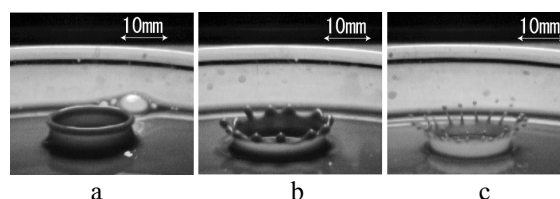


Fig.1 Three types of coronet forms: a) Form 1, b) Form 2, c) Form 3 [6].



Figure 2 Small droplet does not coalesce with a surface of inner wall of a bubble. NASA Saturday morning science.

気泡の内側の表面で, 液滴が壁と合体(coalescence)することなく, 跳ね返る(bouncing)現象が報告されている. この場合, 相手の液面の曲率は負である. Pan と Suga は, 数値計算によって, 無重力環境で液滴同士(相手の曲率は正)を衝突させた場合, それらが合体せずに, 跳ね返る場合があることを報告して

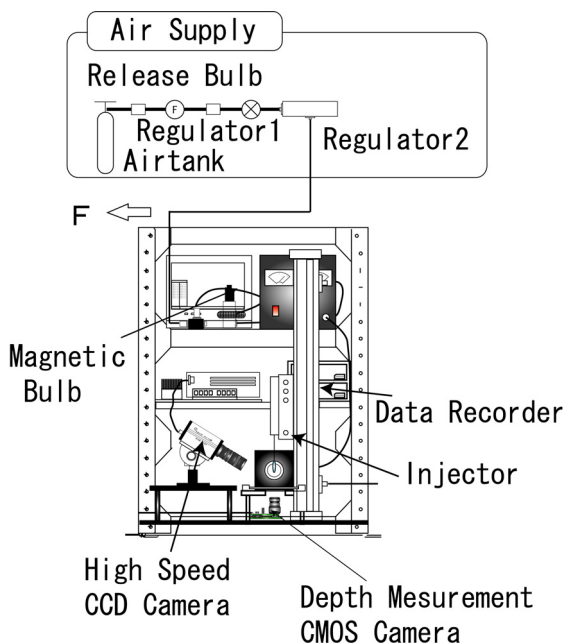


Figure 3 Experimental facility for use in coronet formation under microgravity.

いる[8]. すなわち、相手の液面の曲率の如何に拘らず bouncing は生じており、平面をなす液膜の場合にも bouncing が生じてよいと考えられるが、これまでのところ報告は全くない。

一方、ミルククラウンの高さや、軸対称の形状が非軸対称化 (Fig.1 における Form1 から Form2 への遷移) することに及ぼす重力加速度の効果についても、解明されていない。

本研究では、航空機の放物線飛行による微小重力状態( $10^{-2} \sim 10^{-1}G$ )を利用して、ミルククラウン形成に及ぼす重力加速度の影響について検討した。特に、低重力下でのミルククラウン現象発現 (bouncing か coalescence か) の有無と、重力加速度とミルククラウンの周方向波数変化との関係に注目した。

## 2. 実験方法

地上の 1G 環境では重力加速度を利用して液滴の形成および滴下が可能であるが、微小重力環境ではそれが出来ない。そこで、Fig 3 に示すような慣性力を利用した射出装置を製作して実験を行った。この装置では、まず空気圧によってシリンジ先端に液滴を形成する。次にこのシリンジを、高压空気を用

いたエアシリンダによって高速で駆動・制動し、液滴に慣性力を与えることで、下部に設置した液膜に向けて射出した。また、航空機の振動や傾きによって、液膜厚さが変動しやすく、この結果、ミルククラウン形成に影響を及ぼす。そこで、液膜を染料で赤く着色し、それを透過した光の輝度値の変化を CMOS カメラで測定し、液膜厚さを観測した。さらに、液滴に電荷が溜まり帯電状態になるのを防ぐため、液滴と液膜には常に金属片を接触させ、アースを取った。なお、本研究で用いた試料を Table1 に示す。重力加速度は、シリコンオイルおよび水のいずれにおいて、パラボラ飛行時に航空機のピッチ角を可変とすることによって得られる  $10^{-2}$  および  $10^{-1}G$  と、地上の通常の加速度 1G の 3 水準である。

## 3. 無次元数

ミルククラウンの形成には、液体の密度、表面張力、粘性、衝突速度、液膜厚さなどの様々な物理量関与する。現象の理解を容易にするために、通常、無次元数による整理が行われている。主として次の 3 つの無次元数が用いられる。

$$We = \frac{\rho u^2 r}{\sigma} \quad (1)$$

$$Re = \frac{ur}{\nu} \quad (2)$$

$$D^* = \frac{D}{r} \quad (3)$$

ここで、 $We$  および  $Re$  は、ウェーバー数およびレイノルズ数であり、ウェーバー数は 慣性力と表面張力との比、レイノルズ数は慣性力と粘性力との比である。  $U$  は衝突速度、 $\rho$  は密度、 $\sigma$  は表面張力、 $\nu$  は動粘性率である。  $D^*$  は液膜厚さ  $D$  を衝突する液滴の半径  $r$  で除した無次元液膜厚さである。重力加速度が入った無次元数としてフルード数  $Fr$  が考慮されている場合がある[2]。

$$Fr = u/(gr)^{1/2} \quad (4)$$

ここで  $g$  は重力加速度である。

## 3. 実験結果

Figures 4 および 5 に、微小重力下での 2 つの液滴衝突実験の結果を示す。Figure 4 はミルククラウンが形成される場合 (coalescence mode) である。一方、Fig.5 には跳ね返る場合 (bouncing mode) を示す。すなわち、条件により、ミルククラウンが形成

Table 1 Experimental condition

	Silicone oil	Water
Surface tension (mN/m)	16.7 ~ 20.1	30
Viscosity (mPa·s)	2 ~ 10	1

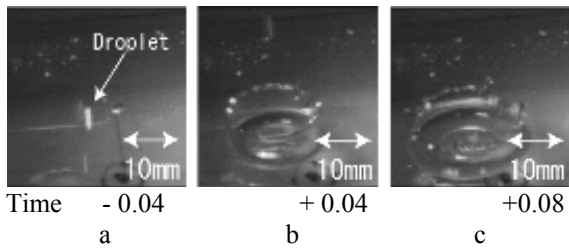


Figure 4 Coalescence mode of collision under microgravity: surface tension:20.1mN/m, viscosity 10mPa·s, impact velocity 2016mm/s and dimensionless depth 0.5. Time is defined as 0 at the moment of touch of droplet at the liquid surface.

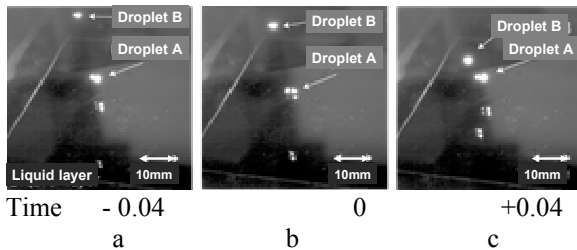


Figure 5 Bouncing mode of collision under microgravity: surface tension: 18.3mN/m, viscosity 6mPa·s, impact velocity 882mm/s and dimensionless depth 0.5. a) Two droplets A and B are flying to the liquid surface. Reflected image of a droplet is observed just below the droplet A. At the bottom rim of the photograph, reflected image of a droplet B is observed. b) Reflected image of a droplet A disappears; a droplet reaches the surface of the liquid. Droplet B goes down. A mirror image of the droplet B goes up. c) A droplet A goes up and a droplet B goes down. Reflected images are also observed.

される場合とそうでない場合があることを示している。bouncing は、これまでの筆者らの実験では見つかっていなかった現象である。bouncing mode になるか coalescence mode を呈するかを、液滴が有する  $Re$  数と重力加速度で整理したのが Figure 6 である。水で行った場合には、重力加速度に対する依存性はシリコンオイルに比べ顕著であり、僅かな重力加速度の増加により、coalescence mode が出現した。

Figure 7 にミルククラウンが形成され、Form2 以上の形態を示した場合の、液頂部に生成する周方向不安定性の波数を示す。1G と  $10^2G$  とでは、一つの線に乗っていないように見える。 $10^2G$  の方が 1G のときよりも、低い  $Re$  数で不安定化が生ずるように見える。

$Fr$  数を用いて液柱高さを整理すると、1G と  $10^2G$  での液柱高さ と  $Fr$  数との関係は 1本の線に乗らなかった。 $Fr$  数が重力加速度の入った無次元数ではある

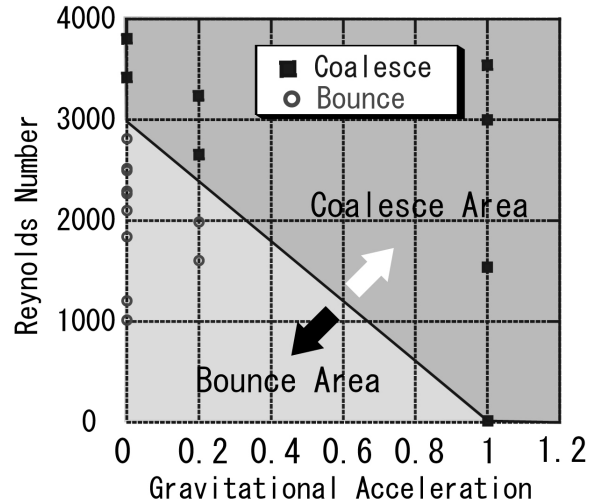


Fig. 6 Mode map of collision for silicone oil: surface tension of 18.3mN/m, viscosity of 6mPa·s and dimensionless depth 0.5. Mode selection depends both on Reynolds number and gravitational acceleration

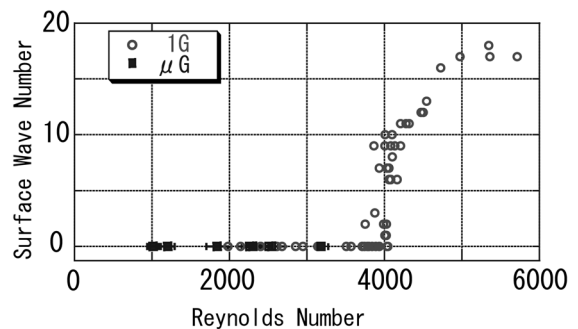


Figure 7 Surface wave number of a coronet as a function of Reynolds number for the 1G and 10-2G conditions.

が、ミルククラウン現象を解析するには必ずしも相応しくない無次元数である。

#### 4. 考察

##### 4.1. 液滴の跳ね返り

Figure 5 からも分かるように、bouncing が生ずる場合には、衝突した液滴-液膜間において質量の移動を生ずることなく跳ね返っている。最初に、この原因を、紫外線を発して液滴表面ならびに液膜の表面に電荷を発生させるクセノンランプによる照明によるものと予想し、クセノンランプを off にして実験を行った。が、結果には差異は見られず、bouncing の原因が電荷によるものとする考えは否定された。

液滴と液膜との間に、液滴によって圧縮された空気の層が存在することが推測される。Pan および Suga によれば、2つの液滴が微小重力状態で衝突する場合について計算し、bouncing をおこす場合と

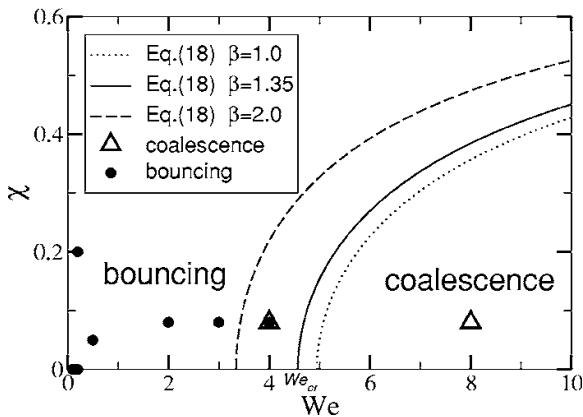


Figure 8 Classification of collision mode by Weber number and impact factor  $\chi$  [8].

coalescenceを生ずる場合とを  $We$  数と impact factor  $\chi$  を用いて整理している (Fig. 8 参照). ここで,  $\chi$  は 2 液滴の衝突の際のオフセンターの度合いを示している. 本研究の場合には平面液膜への衝突であるから  $\chi=0$  の現象と考えてよい. bouncing をおこすか coalescence となるかは, 2 液間にトラップされる空気層の影響を考える必要がある. 重力加速度が大きくなると coalesce しやすく, また, 微小重力状態にあっても  $Re$  数が一定数以上になると coalesce し, ミルククラウンが形成されるということは, 液滴が接近して 2 液間の空気層の圧力が高まると, 液滴もしくは液膜の変形を促し, 液間で液体同士の接触を妨げていた気体の圧力が外部に逃げてしまい, 結果として液体同士の融合が生ずると考えられる. この推測を確認するには, 接触部分や, 接触時の前後の液滴形状に着目した観察を行うことが重要であると考えられる.

#### 4.2. クラウンの波数

$10^2$  および  $10^{-1}G$  環境で形成されたミルククラウンは,  $1G$  下で形成されたものに比べ, 外見の形状に明確な差異は認められない. しかし, 周方向表面波に着目すると (Figure 7 参照) は, 周方向表面波が発現する Form1/Form2 遷移の  $Re$  数は, 重力加速度が小さくなると低い値となっている. このことから, 重力加速度が存在する環境においては, 重力加速度が周方向表面波の発現を抑制する働きをしていることがわかる. つまり,  $1G$  環境で形成されたミルククラウンは, クラウン内部の流速が, ポテンシャルエネルギーに変換され, 結果として運動エネルギーの散逸を招いた結果であると推測される. ただし, 構築された実験装置の特長により, 液滴の高速での射出が難しく, 高  $Re$  数での実験結果が十分でない. この考察を明確に裏付けるためには, 今後  $Re$  数  $3500 \sim 6000$  での実験が必要である.

#### 5. 結言

- ミルククラウン形成に関わる bouncing あるいは coalescence の選択に, 重力加速度依存性がある. 特に, 低重力, 低  $Re$  数の環境では, bouncing が生じやすいために, ミルククラウンは形成されない.
- bouncing あるいは coalescence の選択には 2 液間に存在する気体の関与を考慮する必要がある.
- 微小重力環境において, ミルククラウンが形成される場合, Form1/Form2 遷移の低  $Re$  数側へのシフトが示唆される. しかし, 高  $Re$  数領域での実験データが少ないため, 今後検証する必要がある.
- $Fr$  数は, ミルククラウン現象を記述するのに, 相応しい無次元数ではない.

#### 謝辞

本研究は, 日本宇宙フォーラムの地上公募研究の助成を受けて行った. また, 研究成果の一部は, 日本科学協会平成 18 年度笹川研究助成によるものである. 航空機実験は, ダイヤモンドエアサービス株式会社において実施された. 関係各位に深く感謝する

#### 参考文献

- [1] A.M. Worthington, "The study of splashes", London (1907).
- [2] W.C. Macklin and G.J. Metaxas, "Splashing of drops on liquid layer" Journal of Applied Physics, 47 (1976) 3964-3970.
- [3] F. H. Harlow and J.P. Shannon, "The splash of liquid drop", Journal of Applied Physics, 38 (1967) 3855-3866.
- [4] M. Rieber and A. Frohn, "A numerical study on the mechanism of splashing", International Journal of Heat and Fluid Flow, 20 (1999) 455-461.
- [5] Y. Zhang, K. Shimada, M. Nakagawa and T. Yabe, "Analysis on break up of coronets", 14<sup>th</sup> Symposium on Numerical Fluid Dynamics, A05-2, (2000).
- [6] 渡健介, 林貴昭, 白鳥英, 日比谷孟俊, "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" 日本マイクロ重力応用学会誌, 23 (2006) 46-47.
- [7] [http://science.nasa.gov/headlines/y2003/25feb\\_nosoap.htm](http://science.nasa.gov/headlines/y2003/25feb_nosoap.htm) [Saturday Morning Science]. 25feb\_nosoap.htm
- [8] Yu Pan and K. Suga, "Numerical simulation of binary liquid droplet collision", Physics of Fluids, 17, (2005) 082105-14.