

高 Ohnesorge 数領域における液滴流の捕集と飛散を分ける閾値

北海道大学 戸谷 剛, 南部航太, 川上哲人, 由利泰史, 永田晴紀

Threshold between Spreading and Splashing of Droplet Streams in the Region of High Ohnesorge Number

Tsuyoshi Totani, Kouta Nanbu, Akihito Kawakami, Yasufumi Yuri and Harunori Nagata
Graduate School of Engineering, Hokkaido University, Kita 13 Nishi 8, Kita ku, Sapporo, 060-8628
E-Mail: tota@eng.hokudai.ac.jp

Abstract: This research has aimed to prevent the working fluid from dispersing at the droplet collector of liquid droplet radiators by specifying the threshold in which splashing and spreading of droplets in space are divided. The following results have been achieved by this research. 1. It was clarified not to be able to arrange the threshold in which splashing and spreading were divided only by a past arrangement type of the threshold. 2. The threshold approved to fluids with the different viscosity is discovered. 3. It is discovered that the droplets splashes more hardly under microgravity than under normal gravity. 4. The cause that the threshold between splashing and spreading under microgravity are different from that under normal gravity has been specified. The above-mentioned results greatly contribute to the proof examination on the orbit of the liquid droplet radiator.

Key words; Threshold, Spreading, Splashing, Droplet Stream, Liquid Droplet Radiator

1. 序論

宇宙太陽発電所, 宇宙ホテルなど将来大電力を取り扱う大型宇宙構造物の出現が予想される。実現する際の課題の一つが廃熱処理である。液滴ラジエータ (図 1) は, 現在の宇宙用ラジエータと比べて, 単位重量あたりの排熱量を 5~10 倍大きくできる特徴を持つ^[1]。単位重量あたりの排熱量を大きくできる秘訣は, 宇宙でも蒸発しにくい液体 (シリコンオイル (高 Ohnesorge 数) など) を液滴生成器から液滴回収器に向かって直接宇宙空間に噴霧することである。一方, 宇宙空間に噴霧された液滴は, 液滴回収器ではほぼ 100%回収されなければならない。液滴の回収エラーは液滴ラジエータの作動流体の不足につながり, 宇宙構造物自体の機能不全につながるためである。液滴の回収を妨げる大きな要因の一つが回収面での液滴の飛散であり, 宇宙空間 (微小重力・真空環境) での液滴の捕集と飛散を分ける閾値を特定することは, 液滴回収器での液滴の飛散を防ぐ観点から大きな意義がある。そこで本研究では, 高 Ohnesorge 数領域における液滴流の捕集と飛散を分ける閾値を特定することを目的とする。

2. 実験方法

実験装置の概略図を図 2 に示す。液滴流は, 液滴生成器から真空チャンバー内に射出される。真空チャンバー内には, 傾斜を持った壁面が置かれており, 液滴流はこの壁面に衝突する。衝突後の液滴流の挙動 (捕集または飛散) は, 高速度ビデオカメラ (株式会社フォトロン・FASTCAM-P01 BW) と CCD カメラ (SONY XC-7500) によって撮影される。液滴流が衝突する壁面は, 10 mm/s の速度で移動する。壁

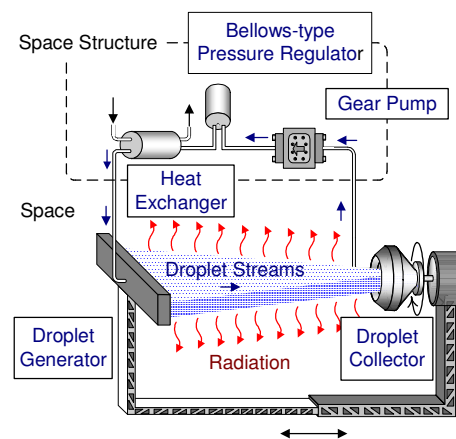


Fig.1 Schematic diagram of liquid droplet radiator

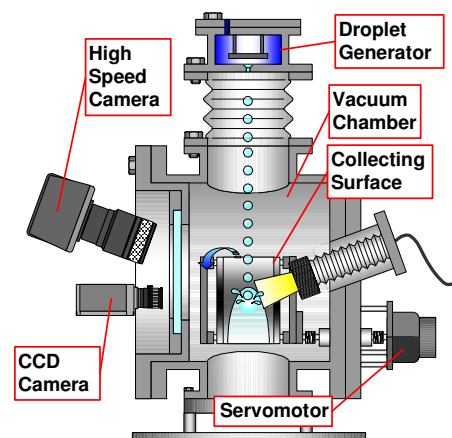


Fig.2 Schematic diagram of an experimental setup

面を移動させるのは, 図 1 に描かれているような回転式液滴回収器の回収面を模擬するとともに, 微小重力下では重力の効果が小さいため, 作動流体が流れ落ちず, 衝突部付近に作動流体がたまることを防

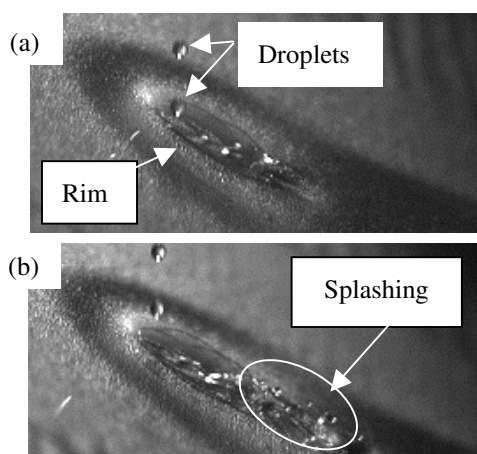


Fig.3 Images of (a) Spreading and (b) Splashing

ぐためである。液滴流は、数 10 m/s で壁面に衝突するため、壁面の移動は液滴流の飛散と捕集には無視できると考えている。

表 1 に本研究で使用した 2 種類のシリコンオイル (信越化学工業株式会社 信越シリコーン KF96 10 cSt, KF96 50 cSt) の物性値を示す。液滴ラジエータでは、作動流体を直接、宇宙空間へ噴霧するため、低蒸気圧の流体が用いられる。シリコンオイルは、液滴ラジエータで使われる作動流体の候補の一つである。

Table 1 Properties of working fluid

Dynamic viscosity ν	Density ρ	Surface Tension σ
10 [mm ² /s, cSt]	932 [kg/m ³]	20.1 [mN/m]
50 [mm ² /s, cSt]	957 [kg/m ³]	20.8 [mN/m]

3. 結果および考察

衝突後の液滴流の挙動を図 3 に示す。対応する実験条件を表 2 に示す。

Table 2 Experimental conditions in Fig.3

	Dynamic viscosity ν	κ	\mathbf{K}
Fig.3 (a)	10 [mm ² /s, cSt]	0.320	2165
Fig.3 (b)	10 [mm ² /s, cSt]	0.564	2125

表 2 の 2 つの無次元数は以下の式で表される。

$$\mathbf{K} = \mathbf{We} \cdot \mathbf{Oh}^{-0.4}, \quad \kappa = \frac{\pi D F}{V_0}$$

ただし、

$$\mathbf{We} = \frac{\rho(V_0 \sin \theta)^2 d}{\sigma}, \quad \mathbf{Oh} = \frac{\mu}{(\rho \nu)^{0.5}}$$

であり、各記号は、

d : 液滴直径 [m]

D : 液滴流射出ノズルの直径 [m]

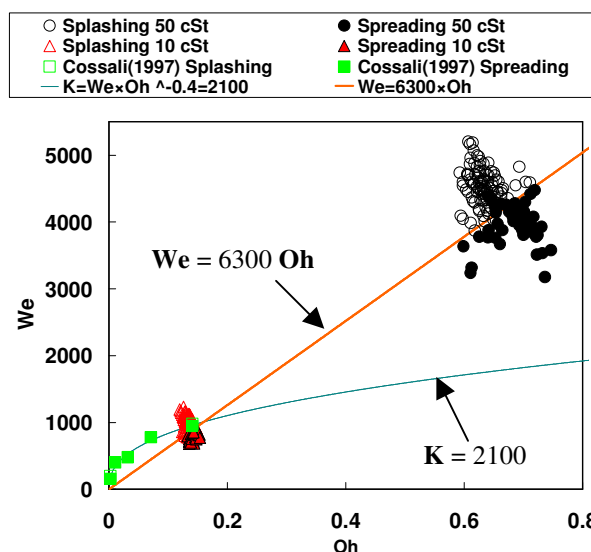


Fig.4 Distributions of splashing and spreading

F : 液滴生成周波数 [Hz]

V_0 : 液滴速度 [m/s]

ρ : 密度 [kg/m³]

σ : 表面張力 [N/m]

ν : 動粘性係数 [m²/s]

θ : 液滴流と壁面の角度 (=60 [deg])

を表す。 \mathbf{We} , \mathbf{Oh} は Weber 数と Ohnesorge 数である。

Weber 数は液滴の運動量と表面張力に関する無次元数であり、Ohnesorge 数は液滴の粘性や表面張力など物性値に関する無次元数である。図 3 を見て分かるように、(a) では液滴流は捕集され、(b) では液滴流は飛散している。この図から、本研究の実験機器は液滴の捕集と飛散を判別するために十分の能力を持っていると言える。

Cossali^[2]らは、単一液滴が濡れている固体面に衝突する場合の捕集と飛散を分ける閾値は \mathbf{K} で表すことができることを明らかにした。図 4 は実験結果を無次元数 \mathbf{We} , \mathbf{Oh} を用いて整理したグラフである。白抜き記号が飛散を、塗りつぶされている記号が捕集を表す。丸印と三角印はそれぞれ本研究で得られた 50 cSt と 10 cSt の結果である。四角印が Cossali からの結果のプロットである。この図を見ると、 \mathbf{Oh} 数が小さい (0.2 以下) 領域では、Cossali が主張する $\mathbf{K}=2100$ の線で飛散する領域と捕集する領域が分かれているのに対し、 \mathbf{Oh} 数が大きい (0.6 ~ 0.8) 領域では、捕集と飛散を分ける閾値は $\mathbf{K}=2100$ から大きくずれていることが分かる。図 5 は飛散形態の違いを表している。(a) はいわゆるミルククラウンと呼ばれる飛散形態であり、低 \mathbf{Oh} 数領域で見られる。一方、(b) は本研究で観察された 50 cSt の飛散の様子である。(a) のミルククラウン

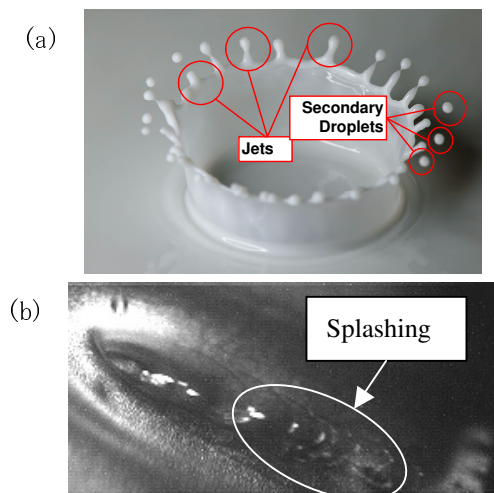


Fig.5 Difference of splashing
(a) milk crown (b) 50 cSt

や図3 (b)では、飛散している流体が粒状になっているのに対し、図5 (b)では帯状になっている。表面張力に比べて粘性が強くなり、粘性によって減速され、粒状になりにくいのではないかと推測した。また、図4より50 cStの捕集領域と飛散領域は、 $We = 6300 Oh$ の線で分かれているように見える。そこで、下記に示す Na で閾値を整理することにした。

$$Na = \frac{We}{Oh}, \quad We = \frac{\rho(V_0 \sin \theta)^2 d}{\sigma}, \quad Oh = \frac{\mu}{(d\sigma\rho)^{0.5}}$$

図6は Na 数を用いて、通常重力下と微小重力下での実験の結果を比較したものである。丸印が通常重力下での結果であり、三角印が微小重力下での結果である。白抜き記号が飛散を、塗りつぶされた記号が捕集を表す。これらのプロット結果から通常重力下で飛散していた領域で、微小重力下では捕集していることが分かる。このことから、液滴流は通常重力下よりも微小重力下の方が飛散しにくいと言える。

次に微小重力下の方が液滴流を捕集しやすい原因を考える。本実験では液滴の射出方向が重力方向と同じであるため、通常重力下では液滴が加速され、微小重力下よりも速い速度で壁面に衝突することをまず疑ったが、通常重力下と微小重力下での液滴の速度の変化を考慮して Na 数を計算しても、 Na 数の違いを説明できなかった。そこで、図7に示すように、通常重力下よりも微小重力下の方が Rim の高さが高くなり、衝突後の液体が Rim の外部に出にくくなり、微小重力下の方が捕集しやすくなったという仮説を立て、次式で表す Nan 数で結果を整理することにした。

$$Nan = \frac{We}{Oh}, \quad We = \frac{\rho(V_0 \cos \theta \cos \theta_{mg})^2 d}{\sigma}, \quad Oh = \frac{\mu}{(d\sigma\rho)^{0.5}}$$

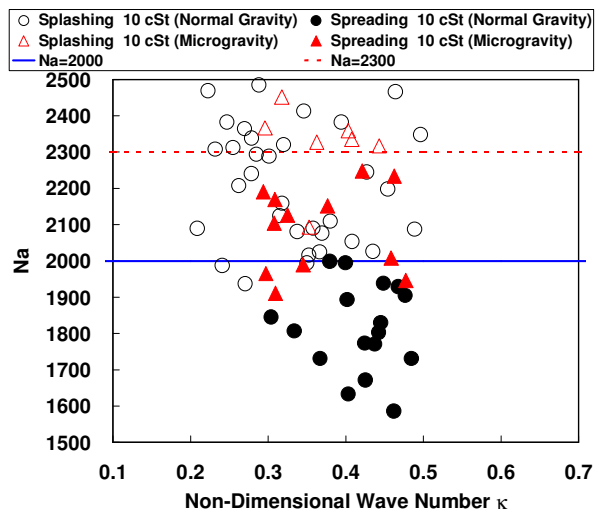


Fig.6 Difference of the thresholds

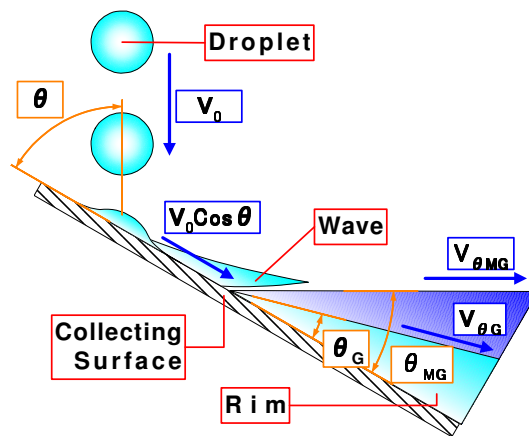


Fig.7 Schematic diagram of the change of the thickness of rim under microgravity

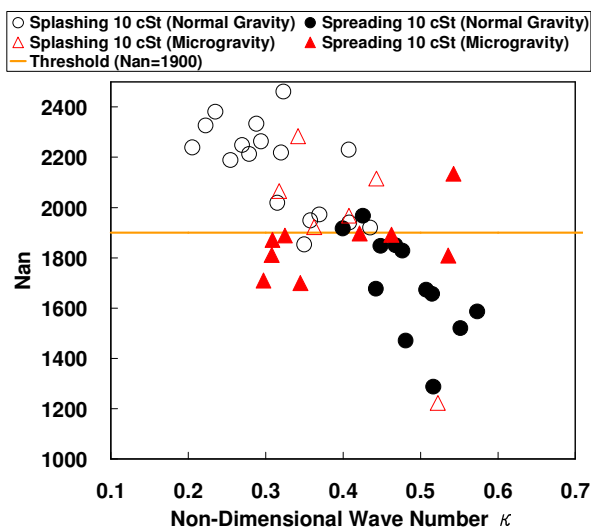


Fig.8 The threshold between splashing and spreading

Nan 数は、**We** 数の速度を壁面および Rim に沿う速度で評価している。結果を図 8 に示す。この図を見て分かるように、通常重力下での閾値の位置と微小重力下での閾値の位置が一致している。このことから、図 6 に表れた微小重力の方が通常重力よりも捕集されやすい原因は、微小重力下のほうが Rim の勾配が急になり、Rim を乗り越えにくくなったためであることが定量的に証明された。

液滴流の捕集と飛散を分ける閾値が微小重力下の結果でも通常重力下での結果でも一致するパラメータが見つかったことから、今後は通常重力下での実験を行えば、微小重力下での結果を予測できると言える。また、液滴ラジエータの回収器で液滴流の飛散を防ぐために、液滴回収器に入る液滴流の速度を **Nan** 数が閾値よりも小さくなるように設計すれば良いという液滴ラジエータの設計指針を得ることができた。

4. 結論

本研究では、通常重力下および微小重力下で液滴流を真空チャンバー内にある壁面に衝突させ、液滴流の挙動（捕集と飛散）を観察し、液滴流の捕集と飛散を分ける閾値を調べることから以下のことを明らかにした。

- 従来の閾値では整理できない飛散形態がある
- 微小重力下の方が通常重力下よりも捕集しやすい
- **Rim** の角度が微小重力下で大きくなるのが捕集しやすくなる原因である
- 微小重力下でも通常重力下でも **Nan** 数を用いれば整理できる

謝辞

本研究は（財）日本宇宙フォーラムが推進している「宇宙環境利用に関する地上研究公募」プロジェクトの一環として行ったものである。また、本研究の一部は、科学研究費補助金（16686048）の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] R. T. Taussig and A. T. Mattick, Droplet Radiator Systems for Spacecraft Thermal Control, Journal of Spacecraft and Rockets, 23(1), pp.10-17, 1986.
- [2] G. E. Cossali, et. al., The impact of a single drop on a wetted solid surface, Experiments in Fluids, 22, pp. 463-472, 1997.