論 文

CONTRIBUTED PAPERS

液滴ラジエータにおける液滴回収過程の観察^{*1}

Observation of Collecting Process of Liquid Droplets in Liquid Droplet Radiator

細 川 俊 介^{*2,3}・川 田 正 國^{*2}

Shunsuke HOSOKAWA, Masakuni KAWADA,

岩 崎 晃^{*2}・工 藤 勲^{*2}

Akira IWASAKI and Isao KUDO

Key Words : Liquid Droplet Radiator, Droplet Collector, Absorption of Droplet in Liquid Film

Abstract

The first stage of droplet collection in a droplet collector of the Liquid Droplet Radiator is collisions of droplet streams with a liquid film formed in an inner surface of the collector. When the droplet streams are absorbed in this liquid film, no splashes should be formed to achieve high collection efficiency. As specifications of a droplet collector, a miscapture rate of incoming droplets is required to be less than 10^{-6} . The collisions and the splashing phenomena of incoming droplets with a liquid film was observed by using a magnifying CCD camera with synchronized irradiation by a laser diode. When the uniform droplet stream is produced where the droplet diameter is less than 300 μm , and the droplet speed less than 20 m/s, no splash is observed.

1. は じ め に

宇宙空間における将来の大型構造物では、消費エネルギーレベルも大幅に増加し、それにともなって廃熱量も増大する。大型構造物からの宇宙空間への廃熱は、ラジエーションによってのみ達成されるため、軽量、高効率、組立が容易で、かつ、デブリスや小隕石の衝突破損時の対策が容易であるなどの次世代型宇宙用ラジエータの開発が求められている。

液滴ラジエータは、上記要求に応えるラジエータとして有望視され、かつ、要素技術開発が進められている¹⁻⁴⁾。第1図に示すように液滴ラジエータでは、廃熱源と熱交換して高温となった作動流体を、液滴生成

器より宇宙空間に非常に多数の液滴流として放出し、飛行中にラジエーションによって放熱することで低温になった液滴をコレクターにて回収し、作動流体として再使用することでラジエータループを構成するものである。この液滴ラジエータを実現するための大きな技術開発要素としては、均一液滴流を精度よく生成する液滴エミッター、ならびに、液滴回収をロスなく行う液滴コレクターの開発が挙げられる。前報において、均一液滴流の生成に関して報告したが⁴⁾、本報では、液滴コレクターを開発する上で最も基本的な、液滴の回収過程の観測を行った結果について述べる。

第2図に示すものは、現在のところ考えられている液滴コレクターの概念図である³⁾。第2図(a)は回転式コレクターで、回転カップで液滴流を回収し、遠心力の作用で外縁より作動流体をピトー管で吸い出すものである。また、第2図(b)は、直線式コレクターで外縁に設けた管より作動流体膜を流し、この膜流の中に液滴を吸収して膜流と共にポンプで回収するものである。これらの方式の得失を第1表に示す

いずれの方式を採用するにしても、液滴流は液膜表面に衝突して回収されることになる。すなわち、第2図(a)の遠心式コレクターでは、液滴流は回転カップの円筒表面やフィン表面にあるそれ以前に回収された液滴流によって形成されている薄い液膜と衝突して液膜流に吸収されるわけである。また、第2図(b)の直線式コレクターでは外縁より積極的に液膜の流れを作成しており、液滴流は、この液膜流と衝突して吸収されるわけである。ここで、液滴が液膜に衝突した際に、反射や分裂等によって飛散することなく完全に液膜に吸収されることが必要である。すなわち、飛散液滴は宇宙環境の微小重力場では、重力により再捕集さ

^{*1} 平成4年8月17日原稿受理

^{*2} 電子技術総合研究所

^{*3} 現所属：(株)増田研究所

第1図 液滴ラジエータ概念図

第2図 液滴コレクター概念図

第1表 液滴コレクター方式の比較

回転式液滴コレクター 直線式液滴コレクター		
液滴シート形状 (放熱面積)	三角形 ($\sim LT/2$)	長方形 ($\sim LT$)
付加機構	回転機構	液膜作成用加圧機構
液回収	ピトー管	外部ポンプ
重量	小	大
大きさ	小	大

(注) L : 液滴エミッターの幅, T : 液滴エミッターとコレクターとの間隔

れることは期待できないので、飛散液滴は回収ロスにつながり、作動流体の補給を必要とすることになる。液滴ラジエータ開発仕様としては、回収ロスの割合は 10^{-6} 以下が要求されており、飛散液滴の発生を完全に抑制する必要がある。

ここでは、液滴流が液膜と衝突する過程をビデオカメラ観測を行い、液滴の飛散を抑制するための条件を

第3図 液膜流生成器

第4図 液滴ラジエータループ模式図

見いだしたので、その結果について報告する。

2. 実験装置

第3図は液滴コレクターを模擬して液膜を形成するもので、上部に設けたスリットより液膜を流すことができる。本液膜生成器を液滴ラジエータ評価真空チャンバー内に設置して、前報⁴⁾で述べた液滴エミッター(シングルノイズ: 直径 $100\ \mu\text{m}$)、ならびに、ギヤポンプと組合せ液滴ラジエータループを構成した(第4図)。本液膜生成装置は、真空チャンバーの外から、液膜と液滴流の衝突角度を調整できるようになってい

第5図 観察システムブロック図

る。液膜作成装置に供給する作動流体は、その流量をニードルバルブで調整し、歯車式流量計（オーバル：モデル LNC 41）で計測している。真空チャンバーは 10^{-2} Pa 以下としており、液滴による衝突寸前の空気圧縮は生じない。また、ギアポンプを用いることで流体ループを連続運転することが可能となった。作動流体としては、拡散ポンプ油（トーレスリコン：SH 704）を使用した。

本液膜作成装置は第2図(b)に示した直線型液滴コレクターの一部であると見なすことができる。しかしながら、第2図(a)の回転式液滴コレクターにおいても、液滴流は遠心力で駆動される液膜とある角度を持って衝突するので、いずれの方式の液滴コレクターの基本回収原理である液滴流の液膜での衝突吸収に関する基礎実験となっている。

観測は、第5図に示すように拡大 CCD カメラとパルスレーザーダイオード（日本科学エンジニアリング：PLD-10）によるストロボ照明を組み合わせた計測システムを用いて行った。この時、パルスレーザーは液滴製造器のピエゾ素子の発振、すなわち、液滴生成に同期して励起を行った。市販の CCD カメラ（ソニー：XC 66）に拡大レンズを装着して、モニター上で約 3×2 mm の画角を得ることができ、 $10 \mu\text{m}$ 程度の飛散液滴も識別できた。CCD カメラのワーキングディスタンスは、約 230 mm 程度で、真空チャンバーの外に CCD カメラを設置して、観測窓を通して液滴の衝突を観測できた。但し、CCD カメラもピエゾ素子の発振に同期して動作させたので、通常のビデオレ

コーダー（ソニー：EVO-9500 A）の固定間隔（30 Hz）で録画するためにフレームメモリを持った画像制御器（マイクロテクニカ：イメージフリーザー Model TKIF-66 A）を使用した。さらに、CCD カメラとレーザーダイオードの励起信号はピエゾ素子の励起周波数（数十 KHz）を周波数分周器で 30 Hz 以下にして画像信号を取り込んだ。

パルスレーザーダイオードのパルス幅は約 50 ns であるので、照明時間中に直径 $200 \mu\text{m}$ 程度の液滴が 16 m/s で移動しても $0.8 \mu\text{m}$ しか移動できないので拡大 CCD カメラを用いても十分鮮明な画像が得られた。

また、パルスレーザーのトリガーは遅延回路を通しており、トリガーのタイミングを調整することで、液滴の液膜との衝突の瞬間を撮影できた。

3. 観測結果

3.1 均一液滴流の場合 本実験で用いた液滴エミッターを用いた場合、 $150 \sim 300 \mu\text{m}$ 程度の液滴径の均一液滴流が得られる⁴⁾。これらの液滴流が、液膜と衝突する様子と観測した結果を第6図に示す。

第6図(a)では、液膜作成装置には作動流体を供給せずに、液滴流自身で形成する液膜のみが存在する場合である。この時、液滴流と液膜の衝突角度 ϕ は $35^\circ \sim 65^\circ$ の範囲で観測したが、ここでは $\phi = 55^\circ$ の場合を示した。次に、 $\phi = 50^\circ$ とし、液膜作成装置に作動流体を供給し、その流量を変化させた場合について第6図(b)～(d)に示した。また、流量を一定とし液滴流と液膜の衝突角度を変えた場合を第6図(d)～(f)に示した。いずれの条件においても飛散粒子は本観測装置を用いた場合には観測できず、第6図に示すように液滴流は液膜に吸収されていった。第2表に第6図で示した液滴流の特性をまとめた。

これらの一連の実験では液膜作成装置のスリット ($1 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$) から作動流体を押し出したわけでスリット出口で液膜の平均流速 V_0 は $Q/0.7 (\text{cm/s})$ となるわけであるが、液滴衝突部（液膜生成装置の中央部）での流速は実測していない。ただ、ここでの流速も V_0 と大きな相違はないはずで、 $Q = 15.7 \text{ cc/s}$ の時に、 $V_0 = 22.4 \text{ cm/s}$ となり、液滴の流速 $V = 17 \text{ m/s}$ に比較して、本実験のいずれの場合も液滴の速度より十分に小さかった訳である。

作動流体の供給量を変化させた結果、液膜流の液膜の厚みが変化する結果、液滴の衝突による自由表面流に影響がある可能性がある。しかしながら、液滴衝突間隔が非常に短いために、生成された自由表面流が十分に緩和しないうちに次の液滴が衝突してしまい、液

第6図 均一液滴流の液膜との衝突

第2表 観察均一液滴液滴流の特性

液特性	密度	$1.07 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
	粘性	$52.8 \text{ mPa} \cdot \text{s}$
	表面張力	$37.3 \times 10^3 \text{ N/m}$
液滴特性	液加圧圧力	$4 \text{ kg/cm}^2 \text{G}$
	励起周波数	30 kHz
	走行速度	16 m/s
	液滴径	$\approx 200 \mu\text{m}$
	液滴間隔	$\approx 300 \mu\text{m}$

膜の厚さに関しても定量的な測定は行えなかった。ただ、第6図(b)～(d)は、本実験で作動流体の供給量を変化させた範囲(ビデオ観測より液膜の厚みは2 mm以下と推定される)では、飛散の有無に関して液膜の厚さの影響は認められないことを示している。

液膜作成装置に作動流体を供給しない場合は第2図(a)の遠心式液滴コレクターの中央部の、厚い液膜流が形成されていない部分の状況に相当する。すなわち、厚い液膜流が形成されていない部分でも液滴は飛散することなく、コレクターの表面上に液膜として回収されることを示している。

また、作動流体の流量を変化させた実験より、第2図(b)の直線式液滴コレクターで外部より供給する作

動流体の必要流量を推定することができる。すなわち、均一液滴流を用いれば、外部より作動流体を供給して液膜流を生成する直線式液滴コレクターでは、供給流量を相当減らすことが可能で、液膜流がうまくコレクターポンプで吸い出されるような流れを生成しさえすれば、液滴流の回収に関しては問題がないことを示している。

さらに、液膜作成装置の角度を変化させて、液膜と液滴流の衝突角度を変化させても、回収には問題がなかったことより、第2図(b)で示した、直線式液滴コレクターの開口角度も大きくとることができることが判明した。開口角度を大きくとることで直線式液滴コレクターで問題であるコレクターの大きさ並びに重量を軽減することが可能となる。

3.2 不均一液滴流の場合 液滴エミッターのピエゾ素子の励起を止めると、エミッターオリフィスより押し出された液噴流は、ランダムな液滴流を形成してしまう。すなわち、様々な周波数成分の擾乱が誘起され、その結果生成された液滴の大きさは数十～700 μm 程度とランダムになると同時に、液滴となる際に液噴流のちぎれかたが不均一なため液滴の速度にばらつきが生じてしまい、時には、わずか1 mの走行距離の間に前後の液滴が衝突し再結合したりする。

液滴径が500 μm 程度を越えると、液滴コレクター

第7図 飛散液滴の発生状況
($Q=10.8$ cc/s, $F=50^\circ$)

上の液膜と衝突した際に、液膜に大きな擾乱を誘起して、ミルククラウンに見られるような擾乱波の先端より飛散液滴を生ずる。第7図は、大きな液滴により誘起された擾乱波と、その先端より生じた飛散液滴をとらえた写真である。この場合、液滴流は流れる液膜に 43° の角度で衝突しているが、円環上より多数の飛散液滴が発生するミルククラウンとは異なり、大多数は、「かたつむりの角」状に飛散液滴が発生した。

また、液膜生成器に作動流体を供給しないで液滴流のみで形成される液膜に不均一液滴流を衝突させた場合、衝突角度が大きい時($\theta=50^\circ$)には、大きな液滴($>500\ \mu\text{m}$)は衝突と共に、破壊分裂し、多数の飛散液滴を発生することが観察できた。

いずれの場合にも、飛散液滴は、宇宙での微小重力環境では、重力により液滴コレクターの液膜に再捕獲されることはない。他の入射液滴流と衝突吸収されてコレクターに入る可能性もあるが、その確率は大きくない。すなわち、液滴コレクター開発仕様である回収失敗率 10^{-6} 以下は達成されない。

3.3 飛散発生条件 今回の実験では、液滴エミッターでの作動流体圧力を $3\sim 5.5\ \text{kg/cm}^2\text{G}$ とすることで、液滴の流速は約 $13\sim 20\ \text{m/s}$ が得られた。また、それぞれの流速で擾乱周波数を変化させて安定な均一液滴流（液滴径：約 $150\sim 300\ \mu\text{m}$ ）を生成した。

液膜作成装置では、液膜と液滴流との衝突角度を $35\sim 65^\circ$ の範囲で、また、液膜の厚みを作動流体の供給流量を変えることで $2\ \text{mm}$ 以下の範囲で変化させた。

いずれの実験においても均一液滴流が生成された場合には、飛散現象は観測できなかったことから、飛散発生の有無に関して、液滴径が最も重要な因子になっていることが推測される。均一液滴流による飛散発生限界の液滴径を観測するためには、液滴エミッターのオリフィス径を大きくする必要があるわけである。ただ、液滴ラジエータの仕様⁴⁾では、 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ の液滴径が必要となるわけで、この液滴径の範囲では回収時に飛散は発生しないといえよう

4. おわりに

液滴エミッター、液滴コレクター、および、循環ポンプより構成した液滴ラジエータループを製作し、真空中で液滴流の挙動を観測した。この際に、新たに開発した拡大CCDカメラとパルスレーザーダイオード、および、同期調整調整回路を組み合わせた観測装置を用いた。

液滴流の液膜との衝突を観測した結果、液滴が高速で液膜に衝突する際に、飛散液滴を発生するかどうかに関して、液滴径が重要なファクターとなっていることが判明した。すなわち、本実験で行った、液滴流速 $13\sim 20\ \text{m/s}$ 、液滴径 $150\sim 300\ \mu\text{m}$ の均一液滴流が、厚さ $2\ \text{mm}$ 以下、流速数十 cm/s 以下の液膜流と、衝突角度 $35\sim 65^\circ$ の範囲内で衝突した場合には全く飛散液滴を観測することができなかった。不均一液滴流で液滴径が約 $500\ \mu\text{m}$ を越えた場合に、飛散現象が観測できたわけである。

これらの結果、液滴ラジエータで用いる $100\sim 200\ \mu\text{m}$ の均一液滴流を用いた場合には飛散液滴を発生することなく液滴流は液膜に吸収されていくことが十分期待できることが判明した。

前報⁴⁾、ならびに本報で、液滴ラジエータを実現す

る上での大きな開発課題である、液滴エミッターと液滴コレクターについて、それらの基礎過程である均一液滴流の作成、および、均一液滴流の液膜への飛散の無い回収の条件を明かにすることができた。今後はスケールアップした液滴ラジエータを製作して、放射液滴シートの光学的特性を評価して、実際ラジエータとして成立するかを実験的に確認する必要がある。

参考文献

- 1) Mattick, A. T. and Hertzberg, A.: Liquid Droplet Radiators for Heat Rejection in Space, J. of Energy, 5, 6 (1981), pp. 387-393.
- 2) Taussig, R. T. and Mattick, A. T.: Droplet Radiator Systems for Spacecraft Thermal Control, J. Spacecraft, 23, No. 1 (1986), pp. 10-17.
- 3) White, K. A.: Liquid Droplet Radiator Development Status, AIAA-87-1537, 1987.
- 4) 細川俊介, 川田正国, 岩崎 晃, 工藤 勲: 液滴ラジエータ用均一液滴流の生成, 日本航空宇宙学会誌, 39 (1991), pp. 551-557.

1) Mattick, A. T. and Hertzberg, A.: Liquid Droplet Radia-