

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360346

研究課題名(和文)大型宇宙システム用排熱器「液滴ラジエータ」の排熱特性の解明

研究課題名(英文)Radiative Characteristics of Liquid Droplet Radiator for Large Space Structures

研究代表者

戸谷 剛 (Totani, Tsuyoshi)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00301937

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,900,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙太陽発電システムなどの大型宇宙システムの廃熱問題を解決する候補の一つが液滴ラジエータである。液滴ラジエータの設計には、液滴流で形成される放熱面の実効放射率のデータが必須である。本研究では、実験とモンテカルロ法を用いた数値解析により、実効放射率を取得する手法を確立した。この手法から、液滴直径と液滴間隔を変えた3種類の単一液滴流(液滴直径：0.118, 0.106, 0.090 mm, 液滴間隔：0.630, 0.435, 0.212 mm)の実効放射率が、0.073, 0.087, 0.12であることが分かった。

研究成果の概要(英文)：One of the candidates to solve the waste heat problem of large space systems such as space solar power systems is a liquid droplet radiator. The data of the effective emissivity of the radiating surface formed by the droplet stream is essential in order to design the liquid droplet radiator. In this study, a technique for obtaining the effective emissivity by a radiative heat transfer experiment and numerical analysis using Monte Carlo method has been established. It is clarified from this approach that the effective emissivities of three kinds of a single droplet flow (droplet diameter: 0.118, 0.106, 0.090 mm, droplet spacing: 0.630, 0.435, 0.212 mm) are 0.073, 0.087, and 0.12, respectively.

研究分野：宇宙工学

キーワード：排熱特性 液滴ラジエータ 液滴 排熱器 ラジエータ 実効放射率

1. 研究開始当初の背景

2030年の実用化を目指し、1GW級(原子力発電所1基分の電力に相当)の宇宙太陽発電システムの研究開発が行われている^[1]。マイクロ波送電モデルとレーザー送電モデルが検討されているが、どちらも太陽電池で発生した電力をマイクロ波やレーザーに変換する際の廃熱処理の問題を抱えている。90%の変換効率でも、100MWが廃熱になるためである。大型宇宙システムの廃熱問題を解決する候補の一つが液滴ラジエータ(図1)である。液滴ラジエータが従来の放熱板式ラジエータと異なるのは、放熱板の部分が液滴流になることである。放熱面は液滴表面になり、部材を必要としないので、大面積の放熱面を液滴生成器と液滴回収器の距離を離すだけで実現でき、ロケットでの打上げ回数を著しく減少できる。例えば、大型宇宙システムの両端に液滴生成器と液滴回収器を設置すれば大面積の放熱面を確保できる。液滴流からの排熱量の測定は平行な液滴流について1例^[2]のみ行われている。この研究で放熱面の実効放射率を表す式が提案されているが、図2に示す反射・吸収の効果が入っておらず、誤差の大きい結果(15%)となっている。

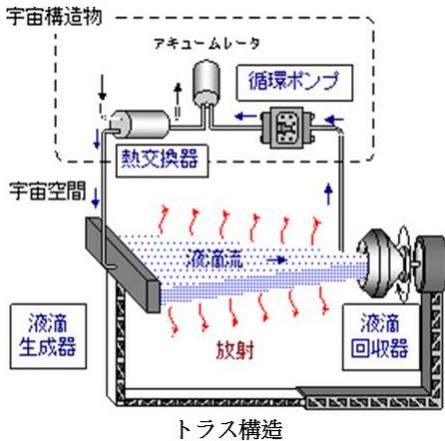


図1 液滴ラジエータの概念図

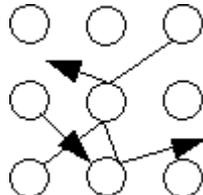


図2 液滴流内の放射の吸収・反射

2. 研究の目的

本研究の目的は、反射・吸収の効果を考慮した方法で、液滴ラジエータの排熱量と実行放射率を取得することである。液滴ラジエータの排熱量は、放熱面の実効放射率と実効面積、液滴温度から計算されるが、液滴流の実効放射率のデータが十分に無い。放熱面の実効放射率と実効面積は、液滴流で形成される放熱面を、放熱板と同様に平面とした時の放射率と放熱面積のことで、図2に示すように、液滴と液滴の間に空間があることと液滴流内部でふく射の吸収、反射が起こるため、液

滴の放射率をそのまま放熱面の実効放射率とすることができない。実験によって、ふく射量を取得することができるが、測定されたふく射量が液滴流のものと壁面等のバックグラウンドから放射されたものであるかを分離することができない。モンテカル口法は、ふく射の吸収、反射を扱うことができる放射伝熱解析手法である。液滴流内部のふく射の吸収、反射を正しく計算するには、液滴の放射率、反射率のデータが必要となる。液体の場合、透過率が液体の厚さにより変化すること、液滴の場合、液滴を測定装置の前に静止させておくことの難しさから、液滴の放射率と反射率のデータは蓄積されていない。

3. 研究の方法

実験よりふく射量を取得し、モンテカル口法を用いた放射伝熱解析(逆解析)によって、得られたふく射量と等しくなる液滴の放射率と反射率を明らかにし、モンテカル口法を用いた放射伝熱解析(順解析)によって、液滴流から放射されたふく射量とバックグラウンドからのふく射量を分離し、液滴流からの排熱量と実効放射率を明らかにする。

図3に排熱量測定実験装置の概念図を示す。空気中での実験では、液滴流と空気間の対流熱伝達の影響で液滴流からの排熱量は宇宙空間とは異なるので、液滴流からの排熱量の測定は真空チャンバ内で行う。液滴流からのふく射量は、円筒状のシュラウド内で測定する。バックグラウンドからのふく射量が大きいと、液滴流からの排熱量がバックグラウンドからのふく射量に埋もれてしまうので、シュラウドの内部に液体窒素を流し、バックグラウンドからの放射量を少なくする。液滴直径と液滴間隔は、ピエゾ振動子の振動周波数とペローズレギュレータにかかる圧力で制御する。表1に実験で用いた液滴流の諸元を示す。

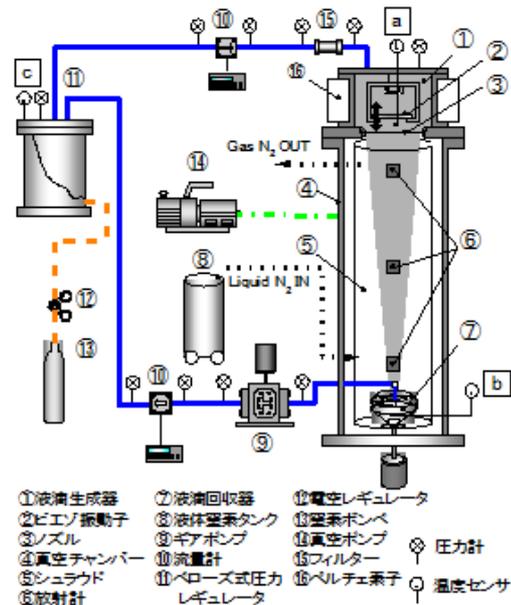


図3 排熱量測定実験装置の概念図

表1 液滴流の諸元

パターン番号	1	2	3
圧力擾乱周波数 [kHz]	15	20	33
ノズル前後の差圧 [MPa]	0.138	0.139	0.138
液滴直径[mm]	0.118	0.106	0.090
液滴中心間隔[mm]	0.630	0.435	0.212
無次元波数	0.366	0.484	0.802
成長係数[1/s]	2454	2767	2025

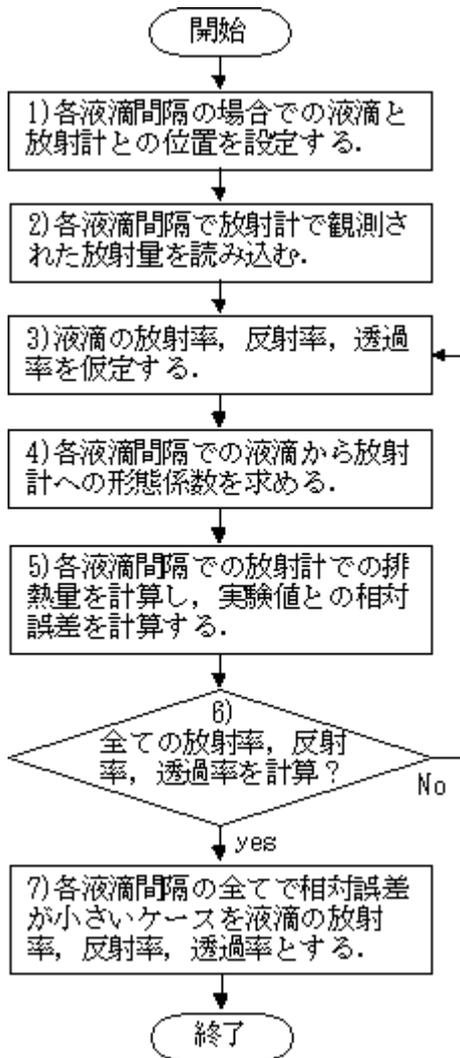


図4 モンテカルロ法を用いた数値解析(逆解析)のフローチャート

図4にモンテカルロ法を用いた数値解析(逆解析)のフローチャートを示す。4)で求める形態係数は、液滴から出るふく射のうち放射計に達するふく射の割合のことである。1つの液滴と1つの放射計であれば、形態係数を手計算で計算することができるが、液滴流内には数多くの液滴があり、放射計から見たとき1つの液滴が他の液滴に隠れたり、放射が他の液滴で吸収、反射されたりするので、手計算では計算できない。モンテカルロ法では、形態係数を計算する際に、放射の射出位置、

射出方向、吸収、反射(散乱)、透過を乱数を用いて決定する。

4. 研究成果

図5は、単一液滴流からの排熱量の数値解析結果と実験結果を比較したものである。凡例中の ϵ は液滴流のふく射率を表す。液滴流の体積に対する表面積が液滴流からの排熱量に与える影響を調べるために、横軸には液滴の体積に対する液滴の表面積の比を取っている。ここで、液滴の体積に対する液滴の表面積の比は液滴1個の表面積を液滴1個の体積で割って得られる値である。この値が51064のときがパターン1、56603のときがパターン2、66445のときがパターン3の液滴流である。この図から、液滴流からの排熱量の数値解析結果と実測値の誤差が最も小さくなることから、液滴流のふく射率は0.7程度であると特定することができる。このことは、本研究の実験と数値解析を併用することで、液滴のふく射率を特定できることを示している。一般的に液滴のふく射率を測定することは難しいが、本研究の手法により比較的簡単に特定することができると言える。液滴のふく射率が関係する現象は、エンジン内の噴霧燃焼などがあるため、本手法は他分野の発展に貢献できる可能性を持っていると言える。

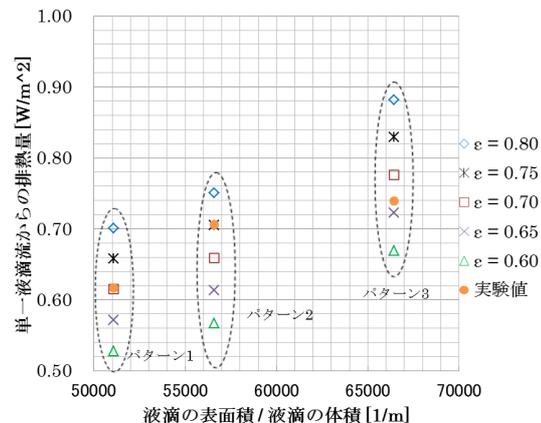


図5 単一液滴流からの排熱量の数値解析結果と実験値の比較

次に、各実験条件における単一液滴流からの総排熱量を、数値解析から算出することにする。液滴流からのふく射エネルギーの一部は反射を繰り返して液滴流自身に吸収される。このエネルギーは液滴流からの排熱量には寄与しないので、単一液滴流からの総排熱量は液滴流からの総ふく射エネルギーから液滴流自身に吸収されるエネルギーを差し引いたものとなる。ここで、液滴流のふく射率を前述で求められた0.7とする。数値解析の結果、単一液滴流からの総ふく射量、液滴流自身に吸収されるエネルギーの割合、単一液滴流からの総排熱量、実効放射率および液滴流を四角柱と近似したときの単位面積当たりの排熱量、単位作動流体質

量あたりの単一液滴流からの排熱量が，表 2 に示されている．この表に示されている通り，本手法により，実効放射率を取得することに成功した．実効放射率は液滴ラジエータを設計するために必須のパラメータである．また，表 2 は，従来型の固体放熱板ラジエータの単位質量あたりの排熱量 $0.2 \text{ kW/kg}^{[3]}$ よりも大きい排熱量を液滴ラジエータが実現できることを示している．さらに，先行研究では不明であった液滴流から放射され液滴流に吸収される割合を定量的に求めることに成功している．液滴流に吸収される割合は，実際の液滴ラジエータで使われると考えられている平行液滴流や収束液滴流では液滴が密集し，単一液滴流よりも大きくなるので，本手法は，平行液滴流や収束液滴流の排熱量を正確に解析するために大きく貢献すると言える．

表 2 単一液滴流の放熱特性

パターン番号	1	2	3
総ふく射量[mW]	10.9	11.8	14.1
液滴流に吸収される割合[%]	2.6	3.2	5.3
総排熱量[mW]	10.6	11.4	13.4
実効放射率	0.073	0.087	0.12
単位面積当たりの排熱量[W/m ²]	16.1	19.1	26.5
単位質量あたりの排熱量[kW/kg]	2.06	2.73	2.61

参考文献

- [1]M. Mori, et al., Acta Astronautica, 59, 132-138, (2006).
 [2]大谷雄一，他 2 名，日本伝熱シンポジウム講演論文集，2, 441-442, (1998).
 [3]A. F. Massardo, et al., Journal of Propulsion and Power, 13(4), 560-564, (1997)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 11 件)

高梨知広，戸谷 剛，永田晴紀，脇田督司，液滴ラジエータにおける平行液滴流からの熱放射に関する数値解析，第 58 回宇宙科学技術連合講演会，2014 年 11 月 13 日，長崎ブリックホール(長崎県長崎市)
 Tomohiro Takanashi, Tsuyoshi Totani, Yuto Kimura, Harunori Nagata, Masashi Wakita, A NUMERICAL ANALYSIS and MEASUREMENT OF RADIATION HEAT FROM A LIQUID DROPLET STREAM UNDER GRAVITATIONAL ENVIRONMENT, 65th International Astronautical Congress, 1st October 2014, Toronto(Canada)
 高梨知広，戸谷 剛，木村優斗，永田晴紀，脇田督司，単一液滴流からの排熱量

測定と数値解析，第 51 回日本伝熱シンポジウム，2014 年 5 月 21 日，アクトシティ浜松(静岡県浜松市)

高梨知広，戸谷 剛，永田晴紀，脇田督司，液滴流からの放射廃熱量の数値解析および測定，第 34 回日本熱物性シンポジウム，2013 年 11 月 20 日，富山市市民会館(富山県富山市)

高梨知広，戸谷 剛，永田晴紀，脇田督司，液滴流の熱放射測定のための数値解析，日本機械学会 熱工学コンファレンス 2013，2013 年 10 月 19 日，弘前大学(青森県弘前市)

高梨知広，永田晴紀，戸谷 剛，脇田督司，液滴流の放射廃熱量を測定するための数値解析，第 57 回宇宙科学技術連合講演会，2013 年 10 月 11 日，米子コンベンションセンター(鳥取県米子市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

戸谷 剛(TOTANI, Tsuyoshi)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：00301937