

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14246

研究課題名(和文) 磁性流体の微粒化を利用した高効率宇宙放熱システムの提案

研究課題名(英文) Proposal of a highly efficient heat radiation system for space structure using magnetic fluid atomization

研究代表者

井上 智博 (INOUE, CHIHIRO)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・特任准教授

研究者番号：70466788

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：将来的に、超大型宇宙構造物を実現するに当たっては、更なる排熱量の増加が要求されると見込まれる。そこで本研究では、磁場に応答して流動する磁性流体に吸熱させた上で、それを宇宙空間に吐出・分裂させ、有効放熱面積を格段に増加させることによって、効率的に排熱を行うことを着想している。初めに実施した基礎試験では、高速度カメラを使用し、外部磁場の違いによる磁性流体噴霧特性の変化を観察した。その成果を踏まえて、製作したノズルから磁性流体噴霧を噴射し、システムの有効性を検討することを試みた。

研究成果の概要(英文)：Thermal management is essentially important for space structures. In the future, the amount of exhaust heat is expected to severely increase. To overcome the difficult problem, a solution using the magnetic fluid is proposed. By absorbing the heat to the magnetic fluid, and, injecting it outward, following atomization occurs producing spray, the effective area for discharging the heat drastically increases. The objective in the present study is to investigate the feasibility obtaining the fundamental atomization characteristics of the magnetic spray and clarifying issues. At first, we observed the spray of magnetic fluid affected by imposed magnetic field. Then, we tried the feasibility study. A typical problem is nozzle contamination by particles consisting the magnetic fluids, which should be solved by miniaturizing the particle size. Also, the scale factor to realize the idea applying big space structures is still an open question.

研究分野：航空宇宙推進学

キーワード：宇宙構造物 排熱 磁性流体 微粒化

### 1. 研究開始当初の背景

人類の活動領域が宇宙空間へと広がり、今後も更なる宇宙利用が現実視される中で、人工衛星や宇宙構造物における熱管理技術の高度化は極めて重要である。対流や拡散の効果期待できない宇宙空間では、輻射による放熱を行うべく、十分な面積を有するラジエーターを利用して来た。現在、電力消費量100KWの国際宇宙ステーションにおけるラジエーター長さは20mを超える。将来的に、メガワット～ギガワット級の電力を消費する超大型宇宙構造物のラジエーターは、現在の数十倍以上の面積になり、打ち上げ重量に占めるラジエーター重量が過大になることが十分想定される。こうした背景から、過去に、小型放熱システムとして、液滴ラジエーター(Liquid Droplet Radiator : LDR)が提案され、研究が行われてきた。LDRは、作動液体を単一液滴として連続的に宇宙空間に吐出し、放熱させた後、再度回収して熱吸収させることで、従来のラジエーター面積を縮小させることを狙う。しかし、LDRで目指す単位質量あたりの放熱量は、従来のラジエーターと比べて高々10倍であり、超大型宇宙構造物からの排熱には、多量の作動液体が必要になる。

応募者は、これまでに表面積を格段に増加できる液体微粒化の研究を行ってきた。そこで、有効な放熱面積拡大のために微粒化技術を用い、かつ、磁場を用いて宇宙空間を飛散する液滴を回収できれば、効果的な排熱システムを実現可能であると考えた。即ち、磁性流体を微粒化させて磁性噴霧を生成し、排熱後に、回収用磁場で磁性噴霧を捕獲・回収して、再度作動液として使用する、磁性流体噴霧ラジエーター(Magnetic Spray Radiator : MSR)を考案するに至った(図1)。

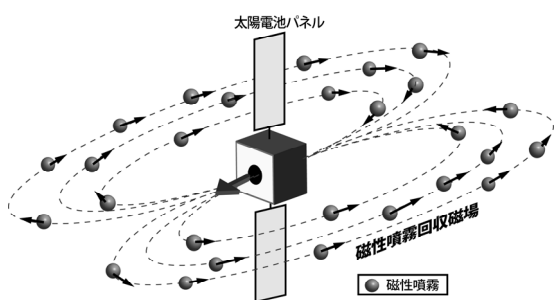


図1 磁性流体噴霧ラジエーター(MSR)システム概念図(宇宙構造物において熱回収した磁性流体を吐出・微粒化・放熱した後、磁場に乗せて回収する。回収した磁性流体は再利用する。)

### 2. 研究の目的

本研究では、MSR実現に向けた第一歩として、基礎的な磁性流体微粒化現象の解明を行なう。まず、実用環境との類似性を想定して、低い吐出圧で吐出した磁性流体粒子の粒径分布と空間的な広がりを明らかにする。あわせて、印可した磁場によって磁性流体の挙動

を制御できるかを検討し、システム成立性の検討と課題の明確化を行う。磁性流体の噴霧特性は、これまで詳細に計測されておらず、学術的観点からも興味深いと考えられる。

### 3. 研究の方法

東京大学工学部7号館(東京都文京区本郷)に設置した微粒化実験装置(図2)にて実験を行なった。磁性流体を、製作したノズルから空間中に噴射し、高速度カメラ(Photron FASTCAM-APX RS)を使用して、磁性流体噴霧を観察した(図3)。代表的なフレームレートと露光時間は、それぞれ1,000 fpsと1/25,000 sである。メタルハライドライトを光源として使用し、被写体の影写真を時系列に取得した。その際、外部磁場を付加することで、噴霧挙動の変化を明らかにした。あわせて、粒径計測を行い、印加磁場に対する粒径の変化を定量化した。粒径計測は、撮影した影映像を、画像解析によって等価面積直径に換算して算出した。

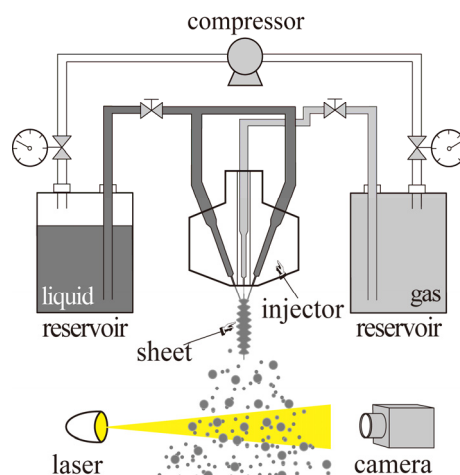


図2 微粒化試験装置の概観(大気中に吐出した磁性流体挙動を高速度カメラで撮影・計測する。)

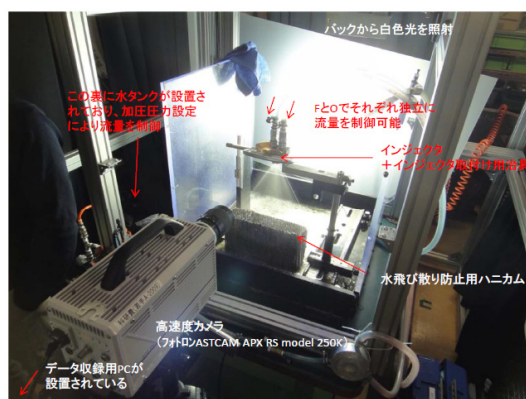
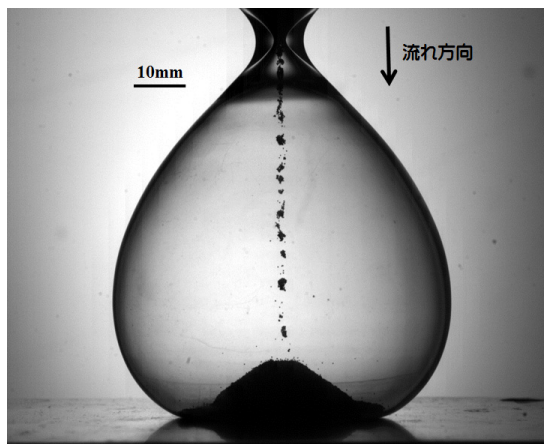


図3 可視化の様子(背景光を照射し、被写体の影を高速度カメラで撮影する。)

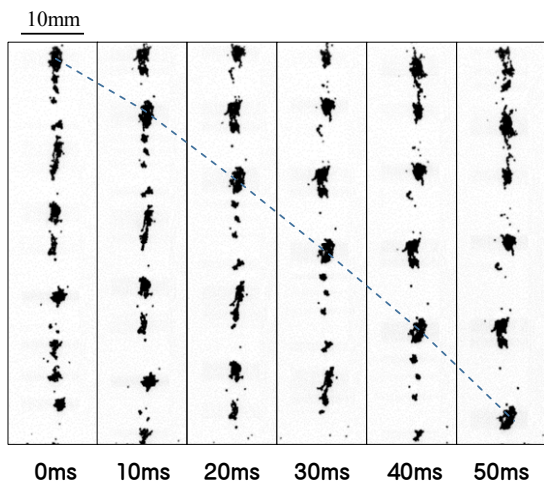
### 4. 研究の成果

まず、高速度撮影を実施したところ、磁場によって磁性流体の飛行形態が明確に変化するなど、磁性流体噴霧挙動に対する磁場の

効果を確認できた(図 4~図 8)。具体的には、印加磁場が無い場合(図 2(a)), 磁性流体が凝集した塊の径(以下、粒径)は小さく、周期的に垂直に落下する。10ms 毎に並べた時系列映像を見ると、粒径の大小が存在するものの、個別の粒子は鉛直方向に落下するのみであることを確認できる。



(a) 瞬時画像



(b) 時系列画像 (点線の粒子は同一のもの)

図 4 印加磁場 0mT

これに対して、420mT の磁場を側方から印加すると(図 5(a)), 粒径が大きくなり、同時に、磁力線に沿って凝集粒子が回転運動を見せる。図 5(b)の時系列映像において、点線で示した粒子に着目すると、0ms において鉛直方向に配列した粒子が、徐々に回転運動を呈し、磁力線に沿って粒子が運動することを確認できる。個々の磁性粒子が磁場によって磁化された結果、凝集粒子が出現したと考えられるものの、詳細については今後の検討が必要である。更に、印加磁場を 840mT に増加すると(図 6(a)), 凝集傾向が顕著になって粒径はより大きくなり、回転運動も強くなる。時系列可視化結果の図 6(b)を見ると、各粒子が磁力線に沿った形状となっており、印加磁場の影響が強く認められる。印加磁場を 0~820mT とした場合の時系列画像を積算した結果をまとめて、図 7 に示す。印加磁場を強めることで、軌跡が右に移動し、磁力線に沿って流

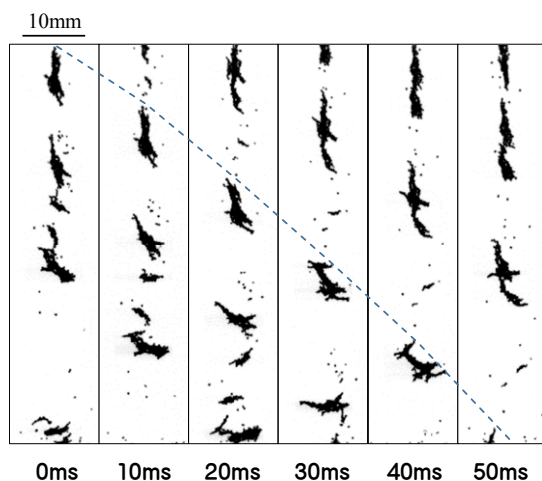
体が移動する様子を認めることが出来る。続いて、印加磁場をさらに 1260mT まで増加させると(図 8), 流動性を失うことを確認した。印加磁場が 0~840mT における流量は、ほぼ一定である。

次に、得られた可視化結果を画像解析して、粒径を計測した。図 9 に、印加磁場 0mT~840mT における粒径の確率密度関数(pdf)を示す。可視化結果とも対応して、印加磁場の増加に伴い、大粒径の塊が増加する。また、いずれの場合も共通して、微小な磁性流体粒子の出現頻度が最も大きいことがわかる。

以上より、磁場を印加するによって、磁性粒子の微粒子群の軌跡を制御するとともに、出現する粒子群の顕著な変化を確認することが出来たことから、当初目的の通り、磁性流体粒子の微粒化特性を明らかにすることに初めて成功した。これらの成果を踏まえて、吐出圧を上げて磁性流体噴霧を噴射し、磁性流体噴射・回収システムの有効性を検討することを試みた。実験の結果、特に問題になったのがノズルの目詰まり(コンタミ)であり、将来的に、磁性流体粒子の更なる微細化が課題であることが明確になった。また、システムのスケールファクタについては未解明であり、実用化に向けた課題であることが認識された。



(a) 瞬時画像

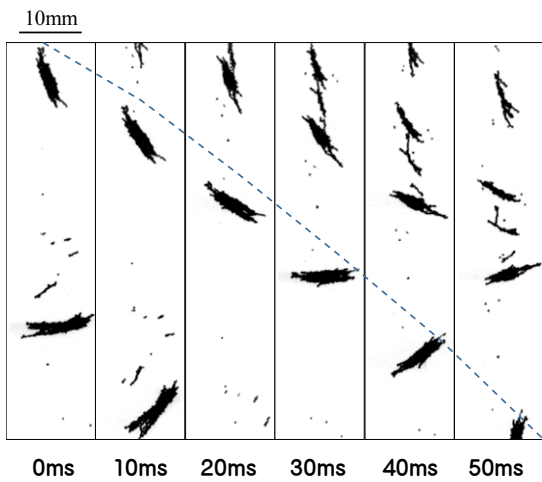


(b) 時系列画像

図 5 印加磁場 420mT



(a) 瞬時画像



(b) 時系列画像

図 6 印加磁場 840mT



(a) 0mT (b) 420mT (c) 840mT

図 7 時間積分した粒子群の軌跡  
(流れ方向は上から下。磁場を印加することで、右方向に軌跡が移動していることを確認できる。)



図 8 印加磁場 1260mT の瞬時画像  
(容器右側に磁石を設置した。)

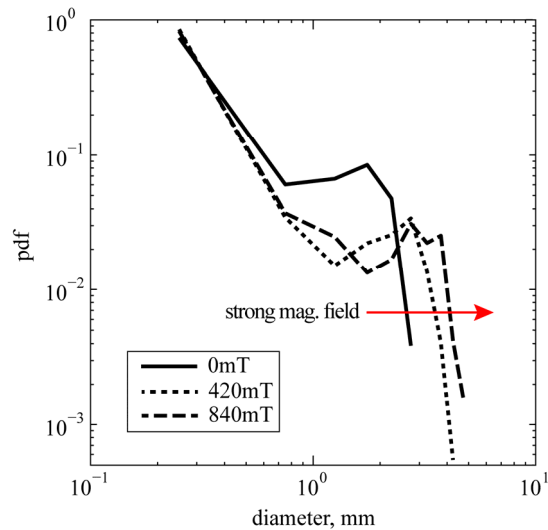


図 9 印加磁場による粒径の変化  
(1260mT は流動性を失っているため、計測は行わない。)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① Chihiro Inoue, Yu-ichiro Izato, Atsumi Miyake, Emmanuel Villermaux, "The direct self-sustained fragmentation cascade of reactive droplet", Physical Review Letters 118, 074502 (2017). 査読有

[学会発表] (計 9 件)

- ① Chihiro Inoue, Toshinori Watanabe, Takehiro Himeno, Seiji Uzawa, "Flow Interaction by Multi Doublet Injectors", Space Propulsion, 2016/5/2, Roma (Italy).
- ② 井上智博, 渡辺 紀徳, 姫野 武洋, 鶴沢 聖治, "多噴射器環境下の衝突微粒化", 第 24 回微粒化シンポジウム, 2015/12/17, 神戸大学深江キャンパス (兵庫県・神戸市).
- ③ Chihiro Inoue and Emmanuel Villermaux, "Visco-capillarity in Sparkling Fireworks", APS-DFD2015, 2015/11/23, Boston (USA).

- ④ Chihiro Inoue, Atsushi Shimizu, Toshinori Watanabe, Takehiro Himeno and Seiji Uzawa, “Numerical and Experimental Study on Spray Flux Distribution Produced by Liquid Sheet Atomization”, IGTC2015, 2015/11/16, 虎ノ門ヒルズ(東京都・港区).
- ⑤ 井上智博, 伊里友一朗, 三宅淳巳, 越光男, “線香花火の火弾寿命”, 火薬学会秋季研究発表会, 2015/11/10, 別府市公立学校共済組合宿泊所豊泉荘 (大分県・別府市).
- ⑥ Chihiro Inoue, “Droplets in Sparkling Firework”, ILASS-Korea, 2015/10/23, Jeju (Korea).
- ⑦ Chihiro Inoue, “Successive droplet rupture in sparkling fireworks”, Liquid Fragmentation in Nature and Industry, 2015/6/29, Leiden (Netherlands).
- ⑧ Chihiro Inoue, Atsushi Shimizu, Toshinori Watanabe, Takehiro Himeno and Seiji Uzawa, “Numerical And Experimental Investigation On Spray Flux Distribution Produced By Liquid Sheet Atomization”, ASME TurboExpo, 2015/6/17, Montreal (Canada).

研究者番号 : 70466788

(2)研究分担者 ( )

研究者番号 :

(3)連携研究者 ( )

研究者番号 :

(4)研究協力者 ( )

〔図書〕 (計 1 件)

- ① 新井充(監修), 井上智博, 他, “花火の事典”, 東京堂 (2016)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

名称 :  
 発明者 :  
 権利者 :  
 種類 :  
 番号 :  
 出願年月日 :  
 国内外の別 :

○取得状況 (計 0 件)

名称 :  
 発明者 :  
 権利者 :  
 種類 :  
 番号 :  
 取得年月日 :  
 国内外の別 :

〔その他〕

ホームページ等

[http://www.rocketlab.t.u-tokyo.ac.jp/member/inoue/chihilab\\_jpn.html](http://www.rocketlab.t.u-tokyo.ac.jp/member/inoue/chihilab_jpn.html)

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

井上 智博 (INOUE CHIHIRO)  
 東京大学大学院・工学系研究科・特任准教授