

# 単相流体ループを用いた宇宙機用熱マネジメントシステムに関する研究 —磁性流体を用いた機器の個別温度制御の検討—

○瀧口 裕太郎（東京理科大学大学院），太刀川 純孝（宇宙航空研究開発機構），  
小川 博之（宇宙航空研究開発機構），麓 耕二（青山学院大学），齋藤 智彦（東京理科大学）

## Thermal management system for spacecraft using single-phase fluid loops -Advantages of ferrofluid for temperature control of individual instruments-

Yutaro Takiguchi (Tokyo University of Science), Sumitaka Tachikawa (JAXA), Hiroyuki Ogawa (JAXA),  
Koji Fumoto (Aoyama Gakuin University), Tomohiko Saitoh (Tokyo University of Science)

Key Words: single-phase fluid loops, ferrofluid, thermal control technology

### Abstract

New thermal management system with super insulation is needed for deep space missions or overnight lunar missions. Because it is difficult to generate enough heater power by solar energy in such missions, the spacecraft should be insulated as highly as possible to reduce heater power. To achieve such super insulation, we propose a new thermal management system that includes (1) high performance insulation that covers the entire spacecraft and radio wave-transmitting insulation for antennas, (2) single-phase fluid loops for transporting the waste heat of each instruments to a radiator, and (3) a smart radiation device for radiating the waste heat. In this paper, we have adopted ferrofluid as coolant for the single-phase fluid loops in order to control each instrument temperature individually. We have studied how we could control the flow rate of the loops and have found out a simple control method with minimal power consumption of the pump. Based on the results, advantages of ferrofluid for temperature control of individual instruments are discussed.

### 1. 緒言

宇宙機の熱設計の目的はミッション終了まで搭載機器を許容温度範囲に保つことである。一般的な熱制御方式では各機器の上限温度を逸脱しないように排熱機構を設計し、下限温度を逸脱しないようにヒータ制御を行っている。しかし、この方式では深宇宙探査や月面越夜などの長期間の低温環境を経験するミッションでは莫大なヒータ電力が必要になる。さらに、太陽光強度が低下するため太陽光発電による発生電力が低下してしまい熱設計が成立しなくなる。そこで、我々は上記ミッションの熱設計を成立させるために単相流体ループを用いた省電力かつ高断熱な熱マネジメントシステム（ETMS：Energy-saving Thermal Management System）の提案および開発を進めている。

図1にETMSと従来方式の比較を示すとともに、ETMSの特徴を以下に示す。

- ① 高断熱化のために次世代断熱材であるPF-MLI<sup>1)</sup>で宇宙機全体を覆い、従来MLIで発生していた縫い糸や端部での熱リークを削減する。
- ② 同軸ケーブルや導波管を通して宇宙空間に暴露

されたアンテナへと宇宙機内部の熱が伝導し、放熱されるのを防ぐため、誘電体多層膜を用いた電波透過型断熱材RT-MLI<sup>2)</sup>でアンテナ全体を覆う。

- ③ ハーネスを通して宇宙空間に暴露された太陽電池パネルへと宇宙機内部の熱が伝導し、放熱されるのを防ぐため、無線電力伝送方式を採用し、RT-MLIで断熱を行う。

- ④ 従来、複数枚のラジエータを設置していたが、ETMSではそれらを1つにまとめ宇宙機の外部に設置し断熱を強化する。単相流体ループを用いて各機器の熱をラジエータまで輸送する。

- ⑤ ラジエータにはOSRのような放射率が一定の従来デバイスではなく、SRD<sup>3)</sup>、HSR<sup>4)</sup>、WO<sub>3</sub><sup>5)</sup>などの高温では高放射率、低温では低放射率となる放射率可変デバイスを用いることで低温時の断熱を強化する。

本研究ではETMSの単相流体ループにおいて、省電力化を目的とし、流量を必要最小限に制御する方法を開発している。今回は作動流体に磁性流体を導入することによって機器を個別に温度制御し、水などの通常の冷媒に比べ、さらに流量を低下させる方法を提案し、その実現可能性について検討した。

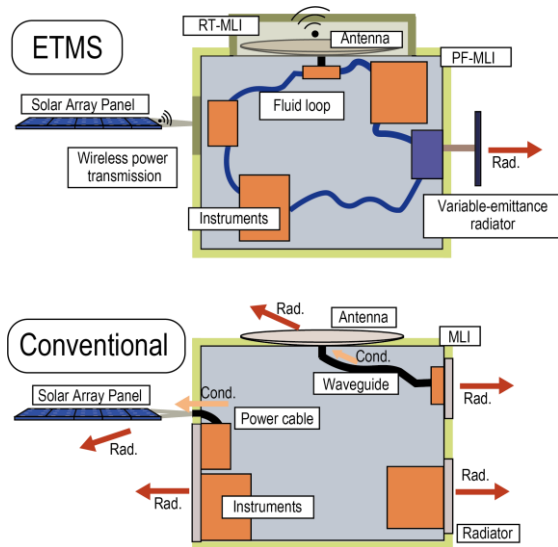


図 1 ETMSと従来方式の概略図.

## 2. 単相流体ループの制御および磁性流体の導入

単相流体ループによる熱輸送は熱輸送量  $Q$ 、流体の密度  $\rho$ 、比熱  $c$ 、流量  $f$ 、熱交換部の入口流体温度  $T_{in}$ 、出口流体温度  $T_{out}$ としたとき、式(1)の強制対流の式に従う。

$$T_{out} = \frac{Q}{\rho c f} + T_{in} \quad (1)$$

図1のように搭載機器が直列に接続されている場合を考える。熱輸送量と流体温度の関係は図2のような直線となり、式(1)より傾きが流量の逆数となる。各機器は許容温度範囲（黄箱）を持つことから機器1は桃色、機器2は水色、機器*i*は橙色、機器*n*は緑色のよう機器ごとに適切な流量範囲が存在する。それら全ての共通部分（斜線部）が全機器を許容温度に抑えることができる流量範囲となる。その範囲における最大の傾き  $f_{min}$  が最小流量の状態であり、これを様々な運用モードに対して常に保つように制御することが求められる。

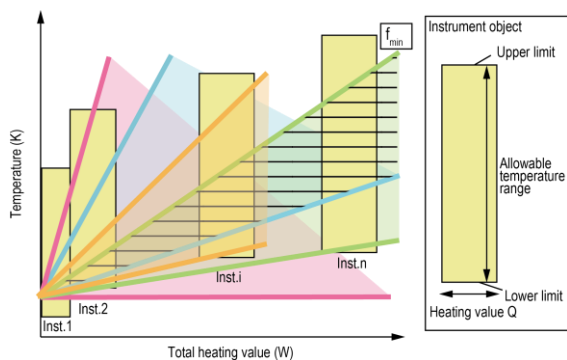


図 2 単相流体ループの制御と各温度.

図3（上）は全ての搭載機器がONの状態である。機器温度（桃色■）は流体との熱抵抗の分、流体温度よりも高くなっており、機器3が上限温度に到達する①が最小流量を示している。例えば、機器3がOFFになったとすると、図3（下）のように機器2が上限温度に達するまで流量を小さくできる、つまり、傾きを①から②へと変化させることができる。ここで、機器4の温度だけに着目すると傾きを③まで大きくすることが可能であるが、機器2の温度が許容温度を逸脱してしまうことがわかる。もし、機器2の熱抵抗を選択的に制御することができれば、傾きを③へと変化させること、つまり、流量をさらに低下させることが可能である。そこで、本研究では熱抵抗を選択的に制御する方法として磁性流体の磁場に対する応答性に着目した。磁性流体は流れの中で磁場を印加すると局所的に流速が増加し<sup>6)</sup>、熱伝達特性が向上する<sup>7)</sup>ことが報告されている。

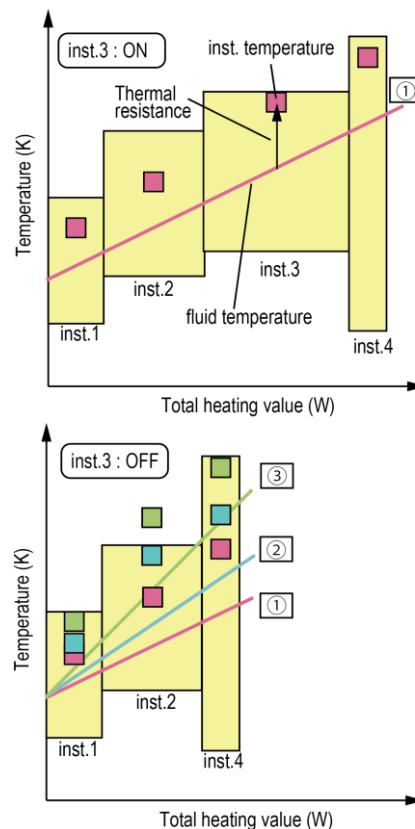


図 3 運用モード変更に応じた流量制御。  
（上）：機器3ON，（下）：機器3OFF

## 3. 実験コンフィギュレーション

本実験では磁性流体を流体ループに導入した際の磁場制御による機器の個別温度制御の実現可能性を熱抵抗変化で評価した。実験コンフィギュレーション

ンを図4に示す.

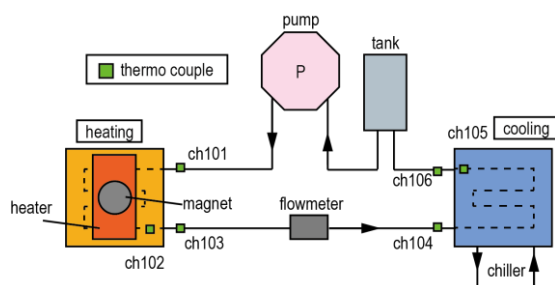


図 4 実験コンフィギュレーション.

流体ループは宇宙機内部を想定して機器の加熱をシートヒータ (10 W), ラジエータでの冷却をチラー (5°C) で模擬し, 作動流体には20°Cにおいて表1の物性値を持つマグネタイト系磁性流体DS-50 (シグマハイケミカル製) を用いた. ポンプはQL-100 (タクミナ製) を使用し, 流量10~20 ml/minの範囲で吐出を行った. また, 流量はOF05ZAT (愛知時計電機製), 各温度の計測はK型熱電対, 磁場の測定には5180 Gauss/Tesla Meter (東洋テクニカ製) を用いた. 磁場の印加には円柱状のネオジウム磁石を図5のように発泡スチロールで断熱された加熱部の中央に設置し, 強度に関しては上部の磁石と加熱部の距離を操作することで変化させた.

表 1 DS-50の代表的な物性値 (20°C).

飽和磁化	密度	比熱	粘度
48 mT	1.38 g/cm <sup>3</sup>	1519 J/kg/K	156 mPa·s

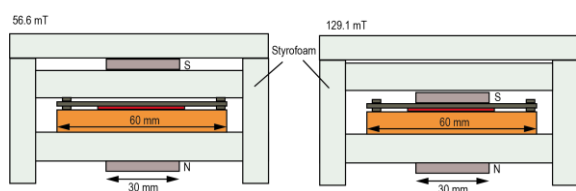


図 5 磁石の設置方法.

(左) : 56.mT, (右) : 129.1 mT

熱抵抗 $R$ はループ内が定常になったときの加熱部入口流体温度  $T_{ch101}$ , 加熱部温度 $T_{ch102}$ , 発熱量  $Q$ を用いて式(2)で算出した.

$$R = \frac{T_{ch102} - T_{ch101}}{Q} \quad (2)$$

#### 4. 実験結果および考察

まず, 磁場の有無によって生じた機器温度 (ch102)

の変化を示す. ポンプ設定流量13.5 ml/minにおける磁場強度56.6 mTでの結果を図6, 磁場強度129.1 mTでの結果を図7に示す. グラフ内には流量計が検出した流量の平均値を示し, offは磁石を取り外した状態, onは磁石を設置した状態を表す.

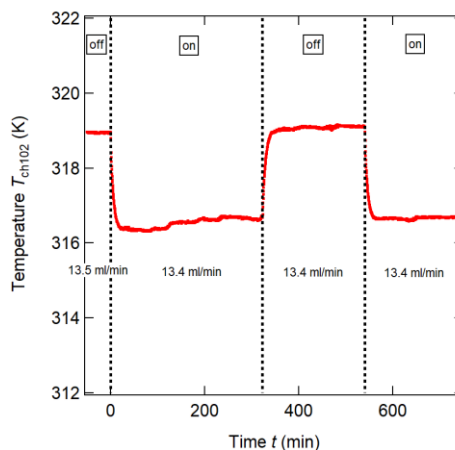


図 6 設定流量13.5 ml/min, 磁場強度56.6 mTによる機器温度変化.

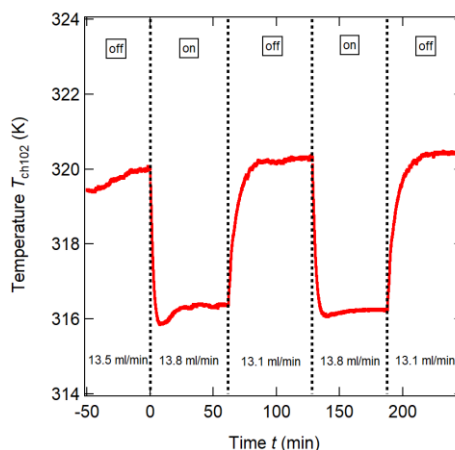


図 7 設定流量13.5 ml/min, 磁場強度129.1 mTによる機器温度変化.

流量のバラつきによる影響も含んでいるが, 無磁場に比べて56.6 mTでは約2.3 K, 129.1 mTでは約4.0 Kの温度変化が生じており, どちらもon/off直後に数十分のオーダーで顕著な温度変化が表れ, その後, 温度変化が安定することを確認した.

続いて, これらの結果および流体温度 (ch101) から式(2)を用いて各流量に対して算出した熱抵抗を図8に示す.

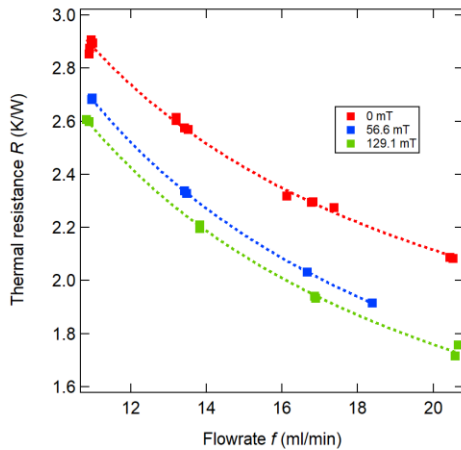


図 8 各流量における熱抵抗.

無磁場のときの熱抵抗に比べて、56.6 mTでは10.9～18.3 ml/minの範囲で0.20～0.28 K/W，129.1 mTでは10.9～20.4 ml/minの範囲で0.30～0.36 K/Wの熱抵抗変化を確認した．この結果から磁性流体の導入により機器の個別温度制御の実現可能性が示唆され，より効率的な流量制御が可能になると考えられる．また，流量の増加に伴い熱抵抗変化が大きくなるような傾向を確認した．これは壁面近傍の磁性流体クラスタの移動速度がRe数の増加に伴い上昇する傾向が確認されたと流れの可視化実験<sup>9)</sup>で報告されていることから，本実験においても同様の現象が現れ，それが温度境界層を薄くすることに寄与し，熱抵抗変化が大きくなったと考えられる．

最後に，図8において式(3)の関数を用いてフィッティングを行った．そして，各結果に対するフィッティング係数a，bを表2にまとめた．

$$R = a/f + b \quad (3)$$

表 2 フィッティング係数.

磁場強度	a	b
0 mT	18.6582	1.182970
56.6 mT	20.9163	0.777810
129.1 mT	19.9541	0.762144

ここで，フィッティング関数の物理的意味について検討するために流体と機器の熱交換において1次元系を考えると，流れ方向に関する位置xで流体温度 $T_x$ と機器温度 $T_{ch102}$ は熱伝達係数h，接触面積Aを用いて式(4)で書ける．

$$T_{ch102} = Q/hA + T_x \quad (4)$$

$T_x$ は $T_{ch101}$ と $T_{ch103}$ 間の流路長Lの中に存在し，線形であ

ると仮定すると式(5)で書け，式(4)に代入すると式(6)が導かれ式(3)と同形になる．

$$T_x = \frac{Qx}{\rho cfL} hA + T_{ch101} \quad (5)$$

$$\frac{T_{ch102} - T_{ch101}}{Q} = \frac{x}{\rho cL} \frac{1}{f} + \frac{1}{hA} \quad (6)$$

実験コンフィギュレーションより $x=271$  mm， $L=344$  mm，物性値は表1を用いると式(6)の第一項の係数は22.47となり，表2のaと比較すると僅かに大きいに近い値となった．また，表2のbでは磁場強度が大きくなると値が小さくなり，磁性流体の熱伝達係数が磁場強度の増加により大きくなる傾向と一致していると考えられる．このことからフィッティング関数は磁性流体の熱抵抗変化の傾向を概ね捉えていると考えられる．そのため，式(3)で流体ループに磁性流体を導入する際の簡単な性能の見積もりを行うことが可能だと考えられる．

## 5. おわりに

ETMSにおいて，より効率的な流量制御のために磁性流体を導入し，流体ループ内の機器を個別温度制御することを提案した．実際に流体ループを作製し，磁場による機器と流体間の熱抵抗の変化を測定することでアプリケーションとしてのポテンシャルについて実験的に検証を行なった．その結果，具体的な機器の温度変化に関しては磁場のon/off直後で数十分のオーダーの間で顕著な変化が起こることが確認された．また，熱抵抗に関しては磁場強度56.6 mTでは無磁場の状態と比べて0.20～0.28 K/Wの変化，129.1 mTでは無磁場の状態と比べて0.30～0.36 K/Wの変化が確認された．

今後は，複数機器を配置した流体ループを作製し，実際の運用を想定して各機器をON/OFFした条件下での流量および磁場制御による効率的な温度制御の確認を行う．また，実際に宇宙機に導入する際の効果的な磁場印加機構についても検討する．更なる展望として磁性流体は今回使用したマグネタイト系磁性流体以外にもMnZnフェライト系磁性流体が存在し，その流体はポンプレスシステムの実現可能性が期待されているため，それを利用したETMSに関しても検討する．

## 参考文献

- 1) Sumitaka Tachikawa, Ryuichi Takagi, Yuki Mizutani,

- Yasuhiro Hiasa, Akira Ohnishi : Performance Evaluation of New Thermal Insulation System with Polyimide Foams, 41<sup>th</sup> International Conference on Environmental Systems, 2011-5257, (2011).
- 2) 富岡孝太, 太刀川純孝, 川原康介, 長坂雄次 : 誘電体多層膜を用いた電波透過型多層断熱材の開発, 第61回宇宙科学技術連合講演集, 3F15, (2017).
  - 3) Sumitaka Tachikawa, Akira Ohnishi, Yasuyuki Nakamura, Akira Okamoto : In-Orbit Thermal Performance of a Smart Radiation Device, SAE International, 2007-01-3125, (2007).
  - 4) Shunsaku Eguchi, Sumitaka Tachikawa, Nobuaki Ishii, Tomohiko Saitoh : Experimental study of heat switch radiator using shape memory alloy for high insulation system, 68<sup>th</sup> International Astronautical Congress, C2.7.5.x40993, (2017).
  - 5) 池田一翔, 山口祐貴, 長坂雄次, 太刀川純孝, 田口良広 : WO<sub>3</sub>を用いた宇宙機用放射率可変ラジエータに関する研究－WO<sub>3</sub>の赤外領域における放射特性の測定とその評価－, 39<sup>th</sup> Japan Symposium on Thermophysical Properties, B111, (2020).
  - 6) 相沢亮汰, 石井慶子, 麓耕二 : 感温磁性マイクロカプセル溶液を用いた流れ場可視化, 実験力学, Vol.19, No.4, (2019).
  - 7) Jin Wang, Guolong Li, Hengxuan Zhu, Jing Luo, Bengt Sundén : Experimental investigation on convective heat transfer of ferrofluids inside a pipe under various magnet orientations, International Journal of Heat and Mass Transfer, (2019).