



配布先: 文部科学記者会、科学記者会、名古屋教育記者会、豊橋市政記者クラブ

報道機関 各位

2024年 6月 11日

## 高温・極寒の宇宙環境に耐える熱制御技術を開発 月面探査車の長期活動の実現に貢献

### 【本研究のポイント】

- ・月面ローバ<sup>注1)</sup>の新しい熱制御技術を開発
- ・月探査の越夜のためのヒートスイッチ技術を開発
- ・電気流体力学<sup>注2)</sup>ポンプによる mW(ミリワット)級の超低消費電力な方法によってヒートスイッチ機能を実験室にて実証

### 【研究概要】

名古屋大学大学院工学研究科の西川原 理仁 准教授らの研究グループは、宇宙航空研究開発機構(JAXA) 研究開発部門第二研究ユニットの宮北 健 主任研究開発員と豊橋技術科学大学大学院工学研究科の瀬下 玄輝 博士前期課程学生、横山 博史 教授、柳田 秀記 名誉教授との共同研究で、月面ローバが 2 週間の寒い夜を超えるためのヒートスイッチデバイスを新たに開発しました。

近年、国際的な開発競争が激しくなっている月探査の中で、月面ローバによる探索活動は、人類の活動領域の拡大など持続的な月探査の中心的役割と位置づけられ、非常に重要な役割を担っています。

月は2週間ごとに昼と夜が入れ替わり、月面ローバは昼の太陽が当たる時は100℃、夜の陰になる時は-190℃と、大きな温度差の環境の下で活動することが求められます。そのため、月面ローバに搭載される電子機器を適切な温度に維持するために昼は放熱し、夜は保温するヒートスイッチ技術が必要です。さらに月面ローバは使用可能なエネルギーが限られるため、省エネルギーでの動作も同時に求められます。

本研究では、低消費電力で冷媒の流動を制御可能な電気流体力学ポンプを新たに開発し、無電力で高効率な放熱ができるループヒートパイプ<sup>注3)</sup>と組み合わせることで、昼は無電力で放熱し、夜は低消費電力で極寒環境との断熱ができる熱制御デバイスを開発し、実験室環境での実証に成功しました。本技術によって極寒の夜を耐えることができる月面ローバによる長期的な月探査活動の実現が期待されます。

本研究成果は、2024年5月17日付エルゼビアのジャーナル「Applied Thermal Engineering」に掲載されました。



## 【研究背景と内容】

近年、宇宙開発において特に月探査の開発競争が激しくなっています。米国を中心に日本も参加する月探査の国際プロジェクト「アルテミス(Artemis)計画」では、月周回軌道における宇宙ステーション「ゲートウェイ」の建設や、有人の月面探査車による月面活動拡充などが計画されています<sup>1</sup>。

中国では、無人探査機「嫦娥(じょうが)6号」が月の裏側に着陸し試料を地球に持ち帰る「サンプルリターン」に挑戦しています<sup>2</sup>。インドでは、2023年8月にチャンドラヤーン3号が世界初で初めて月の南極付近への着陸に成功しました<sup>3</sup>。

日本では、2024年1月にJAXAの小型月着陸実証機「SLIM(スリム: Smart Lander for Investigating Moon)」が世界初の「ピンポイント着陸」に成功しました。また、国内の民間企業では株式会社 ispace が月探査に挑戦中です。

月では2週間ごとに昼と夜が入れ替わり、月面ローバは昼の太陽光が当たる時は100℃、夜の陰になる時は-190℃と、大きな温度差の環境の下で活動することが求められます。

月面ローバには、ミッションを行うための電子機器やバッテリー等が搭載されており、これらを適切な温度に維持する必要があります。昼は月面ローバが活動するため、電子機器は発熱します。宇宙空間では空気がないため、この電子機器の発熱を積極的に冷却、放熱しなければいけません。一方、極寒の夜は電子機器が冷えすぎないように外の環境から断熱して保温しなければいけません。すなわち、昼夜をまたぐような長期的な月探査を行うには、昼の放熱、夜の断熱を切り替えることができるヒートスイッチ技術が必須となります。

さらに、月面ローバは地球から持ち込んだ電力および太陽光を主なエネルギー資源としており、使用可能なエネルギーが限られているため、省エネルギーで行うことも同時に求められます。

そこで本研究では、省エネルギーでヒートスイッチができる熱制御デバイスの開発を目的として、無電力で高効率な放熱ができるループヒートパイプ(LHP)<sup>4</sup>と低消費電力で冷媒の流動を制御可能な電気流体力学(EHD)ポンプを組み合わせることで、昼は無電力で電子機器を冷却し、夜は低消費電力で極寒環境との断熱ができるこれまでにない新しい熱制御デバイスを考案しました。

図1に開発したデバイスの動作の概略を示します。デバイスはLHPの液管部にEHDポンプが組み込まれています。昼はEHDポンプはオフの状態であり、LHPは通常動作し、月面ローバ内部の発熱を蒸気でラジエータに輸送し、ラジエータから宇宙空間にふく射で放熱します。

蒸気は液に凝縮し、月面ローバ内部にある蒸発器に戻り再度吸熱します。この作動流体の循環は蒸発器の多孔体で発生する毛細管力によって行われるため、電力は不要となります。極低温環境となる夜においては、電子機器を保温するためにヒータ等で加温しても、LHPの動作により電子機器が冷えすぎたり、大きな電力が必要となったりします。そのため、EHDポンプによりLHPの流れとは逆方向に圧力をかけることでLHPの流動を止め、断熱ができると考えました。

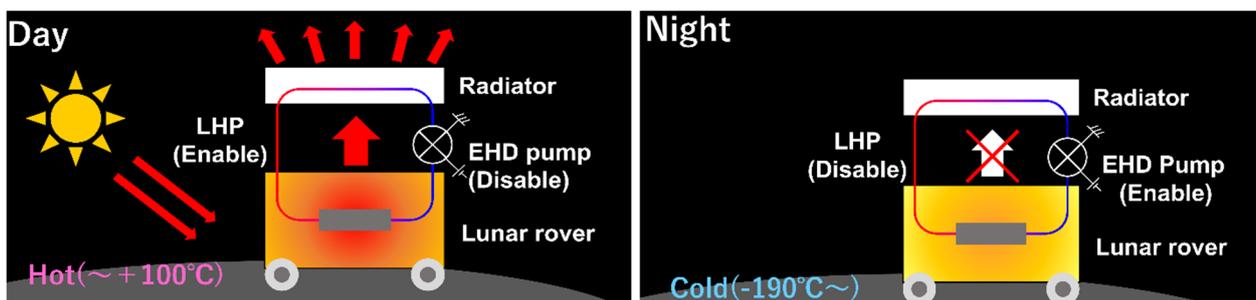


図1 本熱制御デバイスによる月面ローバの越夜の様子

提供: JAXA/名古屋大学

本研究では、上記で説明した提案を実証するために、新たに EHD ポンプを開発し、JAXA の保有する LHP に組み込んで実験室環境で試験(図2)を行い、EHD ポンプを動作させることによって LHP 動作を停止させることに成功しました。

具体的には、数値シミュレーションによる EHD ポンプの電極形状の選定、設計、製作した EHD ポンプの性能評価、EHD ポンプを組み込んだ LHP での動作停止の実証試験、EHD ポンプを手動バルブに置き換えた際の動作挙動の違いについて実証しました。

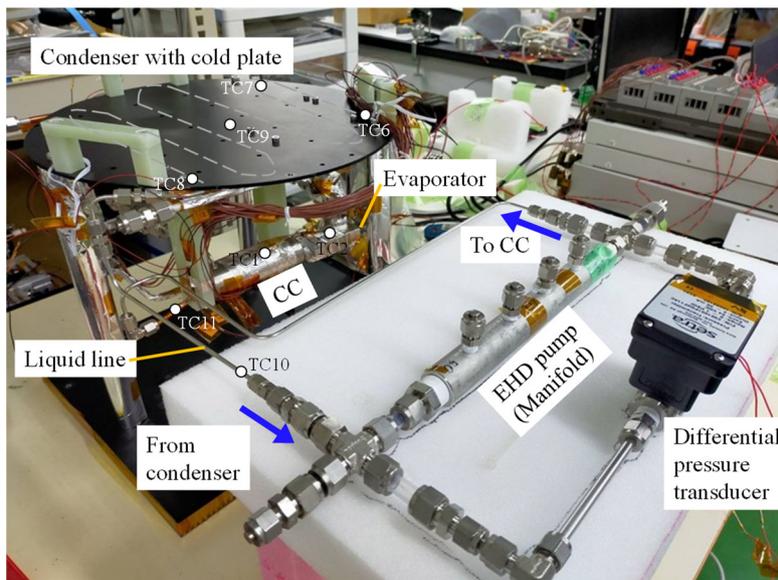


図2 開発した熱制御デバイスの写真 提供:JAXA

## 【成果の意義】

表1に、これまでに開発された LHP 制御技術と本技術との比較を示します。評価項目は、重量、可動部の有無、電気制御が能動的か受動的か、圧力損失への影響、消費電力です。

表1 従来技術との比較

	ヒータ制御	受動バルブ制御	EHD 制御(本技術)
重量	◎軽	○中	○中
可動部	◎無し	△有り	◎無し
電気制御	能動制御	受動制御	能動制御
圧力損失	◎無し	△高い	○低い
消費電力	△中	◎無し	○小

比較する技術は、LHP のリザーバーにヒータもしくは熱電素子を付けて LHP を制御する「ヒータ制御」、LHP の蒸気管に圧力や温度によって受動的に開閉するバルブを取り付けて LHP を制御する「受動バルブ制御」の二つです。

ヒータ制御はリザーバーの外にヒータを取りつけるため、軽くて、可動部がなく、LHP の圧力損失への影響のないのが利点ですが、消費電力が数 W オーダーとなります。一方、受動バルブは電気が不要なため消費電力が 0 なのが利点ですが、可動部があり、バルブ内は流路が小さくなるため圧力損失が比較的高くなります。

圧力損失が高くなると昼の放熱時の LHP の熱性能に影響がでます。本技術の EHD 制御はこれら2つの間の特長を有する技術で、つまり、圧力損失は受動バルブより低く、消費電力はヒータ制御よりも小さくなります。

実際に試験では、圧力損失は LHP が発生させることができる最大圧力の 0.5%程度

# Press Release

で、消費電力は 30 mW 以下でした。つまり、本技術は昼の放熱特性を落とすことなく、夜の保温を小さな電力で行うことができるものです。しかし、本論文では、全く新しいコンセプトである本デバイスを実験室環境で実証したまでで、月面ローバに実際に搭載するには、月探査で想定される様々な環境での試験やデバイスの改良が今後必要です。

また、本研究は EHD 技術を LHP の流動制御に適用した一例ですが、これにとどまらず、宇宙機における熱流体制御技術として幅広く利用できると考えています。

図3に各種流動における熱伝達率<sup>注 4)</sup>を示します。EHD は熱伝達率の高い、液体強制対流と沸騰・凝縮などの相変化を伴う熱輸送に適用可能であり、無重力下での新しい熱流体制御技術としてのポテンシャルが十分にあると考えられます。これからもその可能性を追求していきたいと考えています。

本研究は、2022 年度から始まった JAXA との共同研究によって行われたものです。

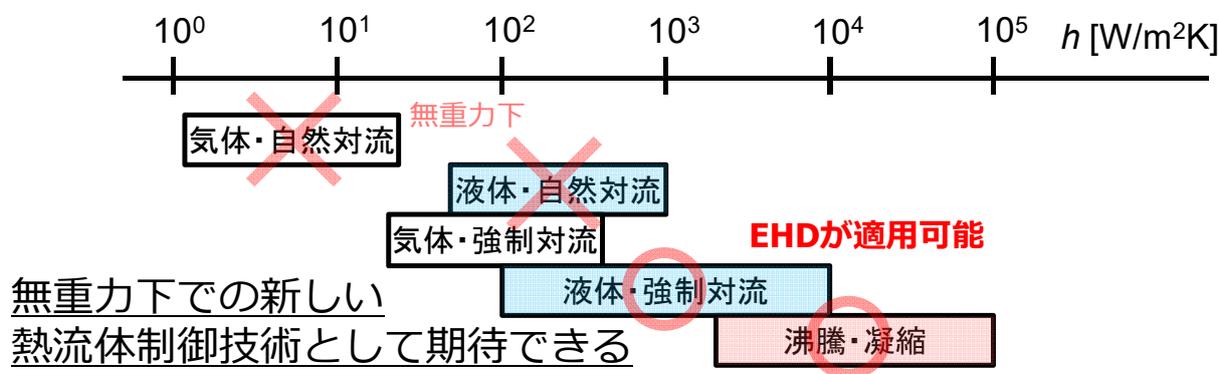


図3 各種流動における熱伝達と無重力下での EHD 技術の可能性

提供:名古屋大学

## 【参考文献】

1. 下斗米一明, 「アルテミス計画」とは, UchuBiz, <https://uchubiz.com/article/fea39872/>
2. NHK news web, <https://www3.nhk.or.jp/news/html/20240503/k10014440001000.html>
3. sorae 編集部, インド月探査「チャンドラヤーン 3 号」続報, sorae, <https://sorae.info/space/20230928-chandrayaan-3.html>
4. 長野方星, 宇宙用ループヒートパイプの高機能化へのアプローチ, 日本機械学会熱工学部門ニューズレター, No.70, 2013. <https://www.jsme.or.jp/ted/NL70/TED-Plaza Nagano.htm>
5. P. Atten and J. Yagoobi, Electrohydrodynamically induced dielectric liquid flow through pure conduction in point/plane geometry, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 10, no. 1, pp. 27-36, 2003. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2003.1176555>

## 【用語説明】

### 注 1)月面ローバ:

月表面を、探査することができる探査車。月面の地質・資源の調査などを広い範囲で行うことができる。

### 注 2)電気流体力学(EHD):

絶縁性液体に高い電圧を印加すると流動が起きる現象。電極を流路に配置するだけでポンプができる。詳しくはこちら。

<http://kitnetblog.kitnet.jp/koizumi/2011/03/post-45.html>

### 注 3)ループヒートパイプ(LHP):

多孔体内で生じる毛細管力を駆動力とし、電力を用いずに小さな温度差で熱を長距離輸送できる熱輸送デバイス。詳しくはこちら。

<https://www.jsme.or.jp/ted/NL70/TED-Plaza Nagano.htm>

### 注 4)熱伝達率:

対流熱伝達において、伝熱面の単位面積を通して、単位温度差・単位時間あたりに移動する熱量。熱伝達率は物性値ではなく、流速、流動様式、流体の物性値、伝熱面の形状・寸法・姿勢、温度差などによって変わる。

## 【論文情報】

雑誌名: Applied Thermal Engineering

論文タイトル: Demonstration of heat switch function of loop heat pipe controlled by electrohydrodynamic conduction pump

著者: Masahito Nishikawara(NU), Takeshi Miyakita(JAXA), Genki Seshimo(TUT), Hiroshi Yokoyama(TUT), Hideki Yanada(TUT)

DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123428

URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123428>