

宇宙航空研究開発機構研究開発報告

JAXA Research and Development Report

超小型探査機搭載に向けた 汚染防止用蓋開閉システムの開発

Development of the shutter system dedicated for ultra-small missions

吉岡 和夫, 桑原 正輝, 疋田 伶奈, 荒尾 昇吾, 吉川 一郎

Kazuo YOSHIOKA, Masaki KUWABARA, Reina HIKIDA,
Shogo ARAO and Ichiro YOSHIKAWA

2019年2月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目 次

1. はじめに	2
2. 超小型衛星搭載の極端紫外望遠鏡	2
2.1. 超小型探査機 EQUULEUS	2
2.2. 極端紫外望遠鏡 PHOENIX	2
3. 蓋開閉システム	3
3.1. 蓋の構造	3
3.2. バイオメタルを用いた開閉機構	4
3.3. ロック機構	5
3.4. 開閉センサ	6
3.5. 動作確認（熱真空環境）	7
4. まとめ	8
参考文献	8

超小型探査機搭載に向けた汚染防止用蓋開閉システムの開発

吉岡 和夫^{*1}, 桑原 正輝^{*2}, 疋田 伶奈^{*3}, 荒尾 昇吾^{*3}, 吉川 一朗^{*1}

Development of the shutter system dedicated for ultra-small missions

Kazuo YOSHIOKA^{*1}, Masaki KUWABARA^{*2}, Reina HIKIDA^{*3}, Shogo ARAO^{*3}, Ichiro YOSHIKAWA^{*1}

ABSTRACT

For the optical instruments mounted on spacecraft, the contamination management for maintaining performance and the countermeasures against damage due to unintended sunlight incidence are important. During the ground transportation or environmental tests, or the transient uncontrolled state in orbit, the optical elements must be protected by closing the lid of the instrument. However, for the ultra-small spacecraft with severe restrictions on weight and size, mounting a lid-like structure that can be freely opened and closed has been thought to be unrealistic due to the problem of the large envelope area and the complexity of the mechanism. Here we show a new technique of a diaphragm-type lid with space-saving and simple mechanism, which can be applied to the ultra-small spacecraft. As the opening and closing system, springs made of shape memory alloy which self-shrink with Joule heat have been adopted, and small sensors for checking the opening/closing state of the lid have been also mounted. We have conducted the operation tests under vacuum environment from -20°C to +50°C to establish the optimum operating conditions. The lid opening and closing system developed through this research will be installed in the extreme ultraviolet telescope mounted in the ultra-small spacecraft under development for the launch in 2020.

Keywords: ultra-small mission, shutter, optics, contamination

概要

飛翔体搭載の光学観測装置において、性能を維持するためのコンタミネーション管理や、意図せぬ太陽光入射による光学素子の損傷への対策は重要である。打ち上げ前の輸送時や環境試験時、もしくは軌道上運用中に一時的な無制御状態に陥る際には、装置の蓋を閉じるなどして光学素子を守る必要がある。しかし、重量や寸法に厳しい制約のある超小型探査機では、包絡域の問題や仕組みの複雑性のため、自在に開閉できる蓋の搭載は現実的ではないと考えられていた。そこで我々は超小型探査機にも応用可能な、省スペースかつ単純な仕組みの絞り型の蓋を開発した。開閉駆動にはジュール熱で自己収縮する形状記憶合金製バネを採用し、さらに蓋の開閉状況を確認するための小型センサも実装した。また、-20°Cから+50°Cまでの温度環境下で真空動作試験を実施し、最適な運用条件を確立した。本研究を通して開発された蓋開閉システムは、2020年の打ち上げを目指して開発中の超小型探査機に搭載される極端紫外望遠鏡に実装される。

doi: 10.20637/JAXA-RR-18-007/0001

^{*} 平成 30 年 12 月 10 日受付 (Received December 10, 2018)

^{*1} 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 (Graduate School of Frontier Sciences, The University of Tokyo)

^{*2} 宇宙科学研究所 太陽系科学研究系 (Department of Solar System Science, Institute of Space and Astronautical Science)

^{*3} 東京大学大学院 理学系研究科 (Graduate School of Science, The University of Tokyo)

1. はじめに

近年、相乗りによる打ち上げ機会が増えている超小型探査機に向けた基礎技術の一つとして、省スペースで簡便な仕組みの蓋開閉システムを開発した。超小型ミッションの枠組みは、科学目標を精鋭化することで短期間、低予算で野心的なミッションを実現できるという強みがある一方で、リソースが限られているため性能や冗長性の取捨選択を強いられる。例えば、望遠鏡の設計においては、高感度と高分解能を両立させるために、より大型の主鏡と長い焦点距離をもつ光学系が望まれるが、大きさ・重量の制約からこれらの両立は不可能であり、定められた条件の中で最適解、すなわち妥協点を見出すことになる。

このように超小型ミッションに数多くある制約の中でも、「装置の性能維持もしくは汚染対策（コンタミネーション管理）」にかかるリソースは、特に蔑ろにされやすい。我々はその妥協を排除し、超小型探査ミッションの科学成果の最大化を目的として、省スペースで簡便な仕組みの蓋開閉システムを開発してきた。本論文では、2020年に打ち上げが予定されているEQUULEUS⁽¹⁾に搭載される1Uサイズの極端紫外望遠鏡（PHOENIX: Plasmaspheric Helium ion Observation by Enhanced New Imager in eXtreme ultraviolet）に用いる絞り型の蓋開閉システムの開発を通じた研究成果をまとめる。

2. 超小型衛星搭載の極端紫外望遠鏡

我々は2020年にNASAの新型ロケット（SLS: Space Launch System）の相乗りの機会を利用して打ち上げられる超小型探査機 EQUULEUS に搭載される極端紫外望遠鏡（PHOENIX）を開発している。本論文で発表する成果は、PHOENIX に用いられるシステムの開発に沿っているが、一般の超小型探査機にも応用可能な技術である。以下に EQUULEUS, PHOENIX について簡単に紹介する。

2.1. 超小型探査機 EQUULEUS

EQUULEUS は6U サイズ（1U: 10×10×10cm）、重量 14kg の超小型探査機である。SLS による打ち上げの後、地球近傍で母船と切り離される。その後は EQUULEUS 自身が持つ軌道・姿勢制御システムを用いてフライバイやスラスト制御を経て地球-月の第2ラグランジュ点近傍を周回する軌道に遷移し、観測運用を実施する⁽¹⁾。EQUULEUS には、PHOENIX の他に、月面衝突発光観測装置（DELPHINUS）及びダストモニタ（CLOTH）の2つのサイエンス機器が搭載される。

2.2. 極端紫外望遠鏡 PHOENIX

PHOENIX は、地球近傍の宇宙空間のヘリウムイオンが太陽光を共鳴散乱して発する輝線（波長 30.4nm）を用いてプラズマ圏を撮像する。地球と月の第2ラグランジュ点から、準定常的にプラズマ圏の動的描像を捉え、太陽活動に対する応答を始めとする地球大気進化の理解に向けた重要な情報の取得を目指す。光学系の反射回数を少なくして集光率を高めるため単純な光学設計である。有効直径 53mm の球面鏡で集められた光が炭素とアルミニウム製の波長選別用薄膜フィルタを通り、MCP（Micro Channel Plate）と RAE（Resistive Anode Encoder）で構成される2次元位置検出器で電気信号に変換される（図1）。

EQUULEUS への搭載条件を満たすために、PHOENIX は様々な小型化の工夫がなされている。例えば主鏡の表面にはマグネシウムと炭化ケイ素の多層膜コートを施し、波長 30.4nm への反射率を高めると同時に、金属薄膜フィルタを用いて、他の波長（水素ライマンアルファ輝線の波長 121.6nm 等）の検出効率を抑え S/N 比を向上させた。約 30 分の時間分解能でプラズマ圏を撮像するために必要な感度を達成している。なお、装置全体の包絡域は 10cm×10cm×6.6cm 以内に収まる。光学素子の特性を始めとした観測装置全体の性能に関しては、Kuwabara et al. [2018]に詳しくまとめられている⁽²⁾。

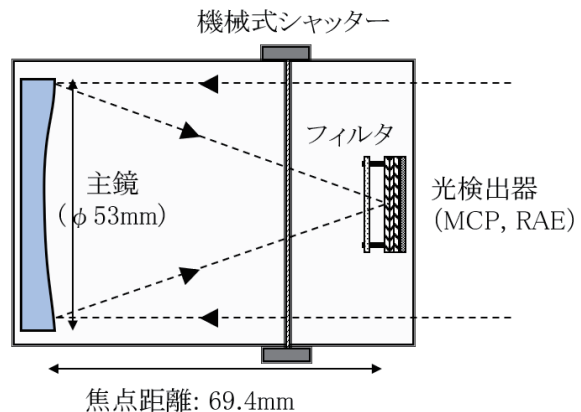


図 1. PHOENIX (FM) の写真 (左). 黒色塗装が施された鏡筒の隣に電気回路部が取り付けられている. PHOENIX の光学設計の概略図 (右). 観測対象の光は焦点距離 69.4mm の球面鏡で集められたのちにフィルタで波長選別されて検出器 (MCP, RAE) に至る.

3. 蓋開閉システム

PHOENIX のような光学観測装置において鏡やフィルタ, 検出器の汚染対策は極めて重要である⁽³⁾. 特に相乗りでの打ち上げ機会が多い超小型探査機は, 親ミッションの都合を優先させるために, 総合環境試験や打ち上げオペレーション時などに清浄度の低い環境に長期間晒されることも珍しくない. また, 打ち上げ時にフェアリングから生じるシリコン等の汚染成分が光学素子に付着する危険性もある. さらに, 姿勢制御系に十分な冗長性を担保できない超小型ミッションでは, 放射線由来のシングルイベント等により一時的な無制御状態に陥り, 意図せず太陽光が視野に入ってしまう危険性がある. 1 秒以下の短時間でも, 太陽光を直視してしまうと, 金属薄膜フィルタなどの光学素子は致命的な損傷を被る. このように, 超小型ミッション搭載の光学観測装置において, 自在に開閉できる蓋は重要な構成要素である. そこで我々は, 以下に述べる仕組みの蓋開閉システムを開発した.

3.1. 蓋の構造

蓋には大別して二つの用途がある. 一つには, 装置の性能維持のために地上での輸送及び試験中に真空密閉保管し, 打ち上げ後に十分な高真空環境に到達してから開くというものである. この場合は気密性の確保のために, バイトン製 O-ring を用いた封着構造を設けるなど, 設計が複雑になる. しかし蓋を開く動作は打ち上げ後の一度だけでよいと, バネ等を用いた“片道動作”の機構が許される. 一方で, 二つ目の用途としては太陽光入射や埃による汚染を防ぐための保護が挙げられる. この場合は, 気密性は求められないものの, 繰り返しの開閉動作が求められる.

蓋の開閉機構としては, 軸回転式(図 2A)と絞り式(図 2B)の 2 通りが考えられる. 前者は宇宙ステーションの曝露部に搭載された IMAP ミッション(2012 年打ち上げ)に用いられた方法である⁽⁴⁾. また, BepiColombo 水星探査ミッション(Mercury Planetary Orbiter)や, ひさき衛星に搭載された紫外線観測装置の光検出部などにも用いられており, 飛翔体への搭載実績は少なくない^(5, 6). しかし, この手法は展開時に蓋が掃引する領域が広く, 他の装置との物理干渉を起こしやすいという問題もあり, 空間制約の厳しい超小型ミッションには適さない. 一方で後者の構造は, 図 2B に示すように外周部分(水色領域)に格納された複数の薄い羽を移動させることで全体として蓋を開閉する方式である. 一般的なカメラに用いられる“絞り”と同じ構造である. この方式は, 蓋の掃引領域が面内に収まるため, 超小型ミッションに適している. そこで我々は, 後者の方法を採用し, 省スペース性を考慮した絞り式の蓋システムを開発した.

絞り式の蓋は適切な羽の回転動作が重要である. 我々は回転機構として“固定リング”と“回転リング”を重ねた構造を採用した. すなわち, 羽(厚さ 0.5mm ステンレス製)の片端を固定リングに, もう一方の端を回転リ

ングにそれぞれ固定し、後者のみを移動させることでそれぞれの羽を面内方向で移動させ重なり合う面積を変えることで、蓋としての開口面積を調整する。具体的な構造は次節に示す。

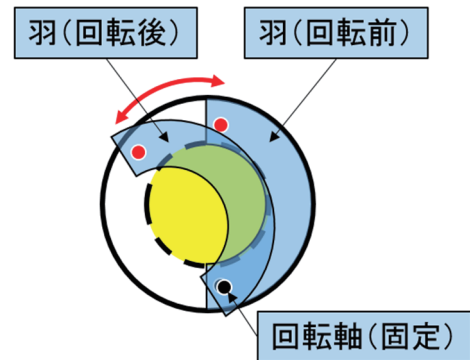
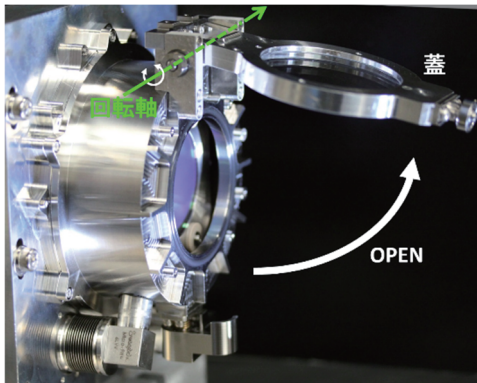


図 2A. 軸回転式の蓋 (BepiColombo/MPO 搭載機器の試作品)

図 2B. 絞り式の蓋の構造。複数の羽が重なり合う面積を変えることで開口率を調整する。

3.2. バイオメタルを用いた開閉機構

蓋の構造を図 3 に示す。リングの回転駆動には、形状記憶合金で作られたバネ(バイオメタル:トキコーポレーション製 BMX150)を用いる。バイオメタルは一定以上の温度で収縮する。我々は、バネに電流を流すことで生じるジュール熱を用いて収縮させる方法を採用し、省スペースで簡便な仕組みの開閉駆動を実現した。なお、蓋の開動作と開動作にはそれぞれ 1 本ずつのバイオメタルを用いる。片方のバイオメタルに通電して収縮させて、もう一方の(通電されていない)バイオメタルよりも強く引くことにより、“綱引き”の要領で「開く/閉じる」の動作を制御する(図 3 の“全体図”の破線矢印)。羽(部分的に重ねた 16 枚)を回転させるために、観測装置(例えば望遠鏡の鏡筒)に対して固定された枠(固定枠)と、回転する枠(回転枠)をそれぞれ重ね合わせ、前者と後者にそれぞれ羽の一端を固定する。2 本のバイオメタルを互いに接触しないように溝繋ぎ合わせ、それぞれが引き合う構造である。

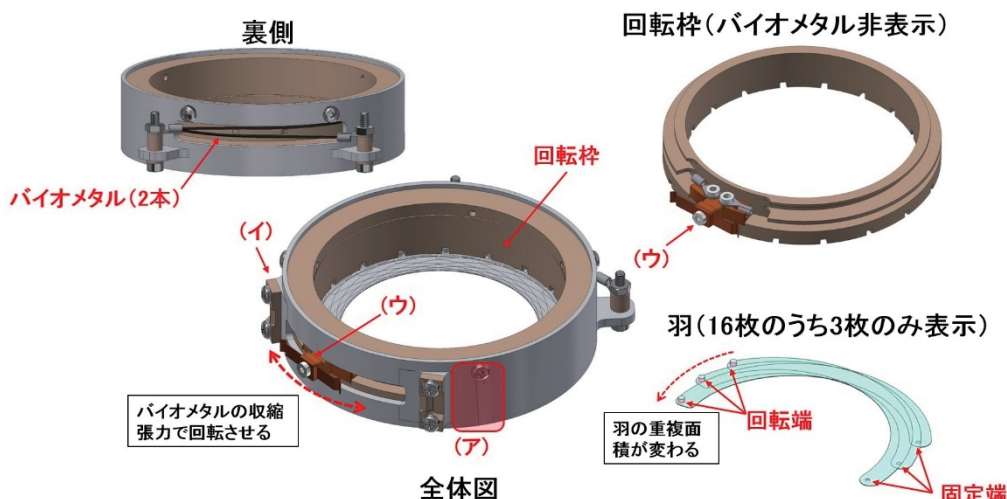


図 3. 2 本のバイオメタルと 16 枚の羽を用いた蓋開閉システムの概要。図中の(ア)～(ウ)にはロック機構と開閉センサ(後述)が設置される。

なお、バイOMETAL製バネの収縮力は非通電時にも生じており、通電したバイOMETALが通電していないものに比べて十分に強い張力をもつ必要がある。つまり、時計回りに所定の角度だけ枠を回転させると、引き伸ばされた反対側のバイOMETALの張力によって、反時計回りに回転枠を引き戻す力が働く。図 4 に非通電時のバネの張力(収縮力)と変位の関係を実測した結果を示した。このグラフに示すように、バイOMETALの収縮力は、通常のバネと同様に変位に比例する。すなわちバイOMETALの通電時の収縮力(F_A)は、通電開始直後(収縮前)よりも、収縮後の方が弱い(図 4 中の赤線)。逆に非通電側のバイOMETALの収縮力(F_B)は、初期状態よりも伸展後の方が強くなる(図 4 中の青線)。以下の式を満たすことが、バイOMETAL製バネ同士の張力のバランスをとりつつ、所定の角度まで枠を回転させるために必要な条件である。

$$F_A(\text{収縮後, 通電 ON}) - F_B(\text{伸展後, 通電 OFF}) > 0$$

PHOENIX の設計では、バイOMETALの初期長さ約 40mm であり、伸展時は約 95mm(変位+55mm)、収縮時は 65mm(変位+25mm)である。後者の状態が最も張力が弱く、図 4 より F_A =約 84[gf]である。一方、図 4 の測定範囲外ではあるが、非通電バネの変位が 55mm(最長)となっても、 F_B =20[gf]を超えることはないと考えられるため、本設計で上の式を満たしているといえる。

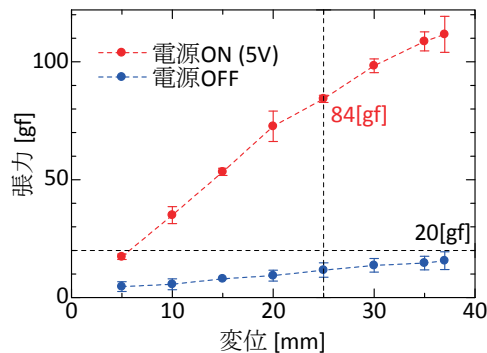


図 4. バイOMETALの変位と張力の関係

3.3. ロック機構

上述のように、片方のバイOMETALを収縮させて羽を回転させても、通電を止めると 2 本のバイOMETALの張力が釣り合う位置(中央)に戻ってしまう。このような逆行動作を防ぎ、開いたまま(もしくは閉じたまま)の位置を維持しなければならないため、ロック機構を設ける必要がある。我々は、図 5 に示す板バネ式のロック機構を回転枠に取り付け、逆行防止用の山型ストッパー(PEEK 製)を取り付けた。ストッパーの性能試験として、以下に示すように保持力の測定(A:大気)と動作確認(B:真空)を繰り返して行い、さらに振動試験耐性(C)も評価した。

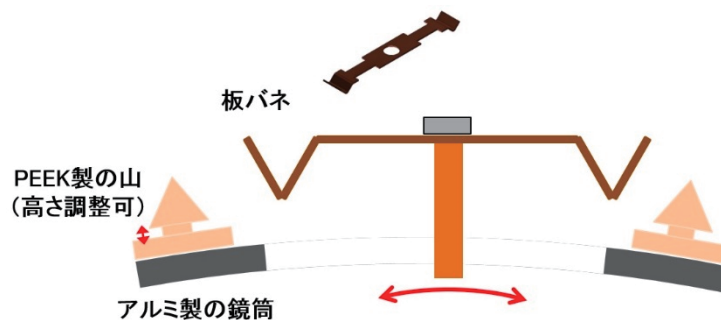


図 5. 板バネと山型 PEEK のロック機構。図 3 中の(イ), (ウ)に相当する

- (A) 板バネの形状は固定として、PEEK 製の山(図 5)の高さ(挿入するシムの厚さ)を調整することでストッパーの保持力を調整し、開閉時それぞれにロックを解除するために要する力をデジタルフォースゲージで測定した(図 6)。
- (B) 真空環境下(1E-3Pa 以下)で動作性を確認した。バイオメタルへの印加電圧は EQUULEUS のバス側から供給される値と同じく 5V とした。
- (C) EQUULEUS で要求されているレベル(QT)の振動試験を施し、その前後で(A),(B)の試験を行った。

以上の試験の結果、ストッパーの高さと保持力の関係性を見出し以下の結論を得た。

1. バイオメタルに 5V を印加した際に開閉可能なストッパーの保持力の最大値は 100 gf である(この値を超えるとバイオメタルでは開閉できない)。
2. ストッパーの保持力を 80-100gf の間に設定して 100 回以上の連続開閉試験を真空中で行い、問題なく動作することを確認した。
3. 上述の試験を振動試験の前後に行い、動作には影響がないことを確認した。なお、リングの回転重心と装置の重心がずれていると加振中にストッパーが外れてリングが回転してしまうため、バランスをとるために回転リングに鉛リベットを埋め込んだ。その結果、80-100gf のストッパーの保持力のもと加振中にも蓋は固定されたままの状態を維持できることを確認した。さらに、振動時の羽同士の摩擦を減らすために、表面にアルマイトコーティングを施した。振動試験後に、目視で確認できる大きさの粉塵が発生していないことを確認した。

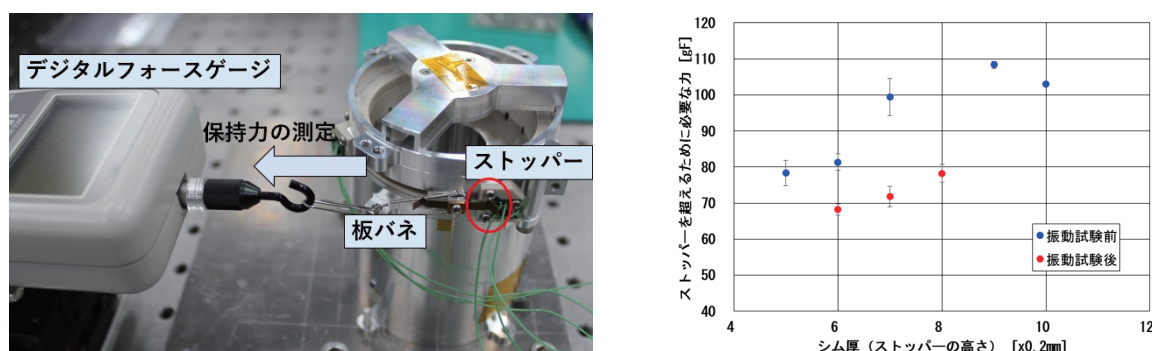


図 6. ストッパーの試験の様子(左)および保持力の測定結果(右)

3.4. 開閉センサ

軌道上での運用時に、蓋の開閉状態を検知するためのセンサは重要である。仮に何らかの原因でロックが外れてしまった場合、回転リングは 2 本のバネのつりあいの位置に移動してしまい、結果的に望遠鏡の開口面積は全開時の約 30%となる。しかし、観測データのみからではその状況を確認する術はなく、結果として感度校正に致命的な誤りをもたらす(観測対象が暗いせいで光量が少ないのか、蓋が半開きになっているせいで光量が少ないのかを判別できない)。そのような事態を避けるため、小型の磁気センサを用いた蓋の開閉状態を確認するためのシステムを搭載する。

我々は、民生品の磁気センサ(Murata 社製 MRMS205A)を用いた。この素子の V_{cc} と GND の間に 5V の電位差を与えた状態で 150[mT]以上の磁場が特定の方向から一定距離以内に近づいた際に、 V_{out} 電位が 5V から 0V に変化する。この素子を図 7(右)に示す回路に組み込むことで、仮にショート故障しても消費電力を 0.05W に抑える設計にして電源系統へのリスク低減を図った。また供給電圧のリプル除去のためのフィルタ用のコンデンサ(0.1 μ F)も組み込んでいる。

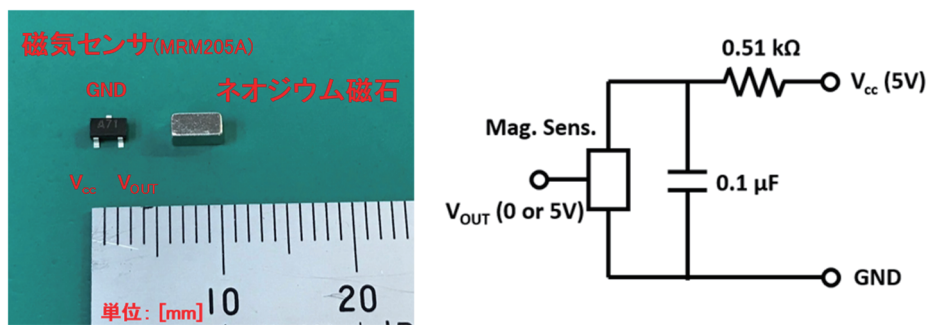


図 7. 磁気センサとネオジウム磁石(左)およびセンサ回路(右)

民生品のチップ抵抗とチップコンデンサを用いて、1cm×1cm 以下の面積に図 7 の回路を収める基板を製作し、図 3 の(ア)と(イ)の位置にそれぞれ取り付けした(CLOSE センサと OPEN センサ). さらに、図 3 の(ウ)に示す回転リングの枠上に小型のネオジウム磁石(図 7 左)を取り付け、蓋が閉じて磁石が(ア)に近づいてきたときには CLOSE センサが、逆に蓋が開いて磁石が(イ)に近づいたときは OPEN センサが ON になる仕組みとした(磁石とセンサの最接近距離は約 5mm). なお、本システムで採用したセンサの動作磁界の範囲は 0.5–2.5mT である. この値は 1m の距離では 13–63nT に相当する. 磁力計等が搭載されるミッションに用いる際には、磁場相殺用の磁石の搭載などの対処が必要になる可能性がある.

3.5. 動作確認(熱真空環境)

バイオメタルは熱により収縮するため、環境温度に対する動作特性を把握する必要がある. ここでは、PHOENIX のフライト品として制作した蓋開閉システムおよびセンサの動作を確認するため、熱真空環境下(最低-20℃, 最高 50℃)にて開閉試験を実施した(図 8).

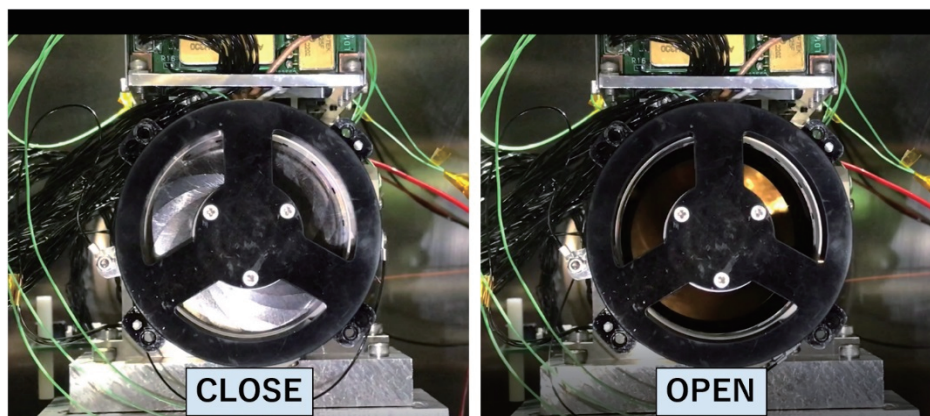


図 8. 真空環境下で蓋が閉じた状態(左)と開いた状態(右)

OPEN 動作, CLOSE 動作それぞれに必要な通電時間を測定した結果を図 9 および表 1 にまとめる. バイオメタルの温度を上昇させるために要する時間が長くなるため、開閉に要する通電時間は低温ほど長くなり、-20℃から 50℃の範囲ではおおそ線形な変化が見られた. この結果から、軌道運用中に、低温環境下で開閉動作を行わなければならない場合は、通電時間に注意しなくてはならないことがわかる. ただし、必要以上の長時間通電により、バイオメタルが損傷する危険性もあるため、0℃以下では 8 秒間、0℃より高温では 5 秒間の通電時間を最適値として結論する.

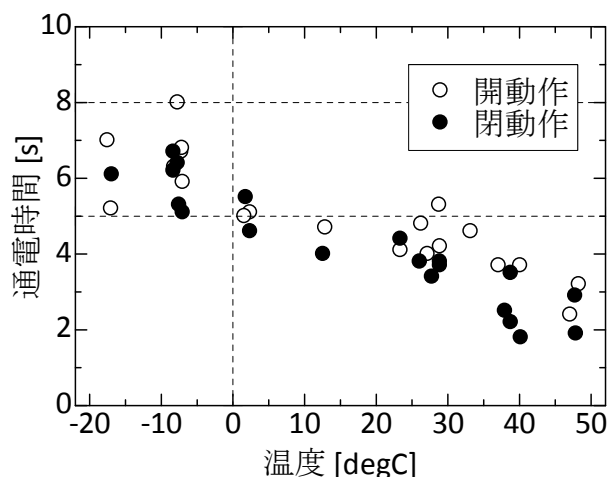


図 9. 環境温度と蓋の駆動に必要な通電時間の関係

表 1. OPEN/CLOSE 運用に必要な通電時間

	環境温度 0℃以上	環境温度 0℃未満
OPEN 運用に必要な通電時間	5 秒	8 秒
CLOSE 運用に必要な通電時間	5 秒	8 秒

4. まとめ

我々は、超小型探査機に向けた基礎技術の一つとして、省スペースで簡便な仕組みの絞り型の蓋開閉システムと、磁気センサとネオジウム磁石を使った小型の開閉検知システムを開発した。2020 年の打ち上げを目指して開発中の超小型探査機 (EQUULEUS) に搭載される、極端紫外望遠鏡 (PHOENIX) への実装に向けた開発の一環として、振動試験や熱真空環境試験を行い、フライト品として供出可能な完成度に達した。本研究で紹介した蓋開閉システムは、超小型ミッションにおける標準的な汚染防止策として広く利用価値がある。さらに光学観測装置にとどまらず、ダスト、プラズマ観測装置などの飛翔体搭載機器全般にも応用可能である。これまで、リソースの限られた超小型探査機では、蔑ろにされがちであった汚染管理を容易にすることで、環境試験や打上運用時の作業スケジュールの制約緩和にもつながる。リソースを削り一点に特化した科学目標を掲げることの多い超小型探査にとって、構造が単純で信頼性の高い汚染防止システムがあれば、より野心的なミッションの創出へのハードルを下げる役割も果たすだろう。

参考文献

- 1) Funase, R. et al., Flight Model Design and Development Status of the Earth—Moon Lagrange Point Exploration CubeSat EQUULEUS Onboard SLS EM-1, 32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellite, Utah, USA, 2018.
- 2) 桑原正輝, 吉岡和夫, 疋田伶奈, 村上豪, 荒尾昇吾, 吉川一朗, 超小型探査機搭載の極端紫外光観測装置の開発, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, in press

- 3) Roussel, J-F., T. Tondu, T. Paulmier, M. Van Eesbeek, and R. Rampini, Progress on the Physical Approach to Molecular Contamination Modeling, JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS, 48(2), pp246-255, 2011.
- 4) Yoshikawa, I., Homma, T., Sakai, K., Murakami, G., Yoshioka, K., Yamazaki, A., Sakanoi, T., and Saito, A., Imaging observation of the Earth's plasmasphere and ionosphere by EUVI of ISS-IMAP on the International Space Station, IEEJ Trans. Fund. Mater., 131, 1006-1010, 2011.
- 5) Yoshioka, K., Murakami, G., Yoshikawa, I., Maria, J.-L., Mariscal, J.-F., Rouanet, N., Mine, P.-O., and Quémerais, E., Optical performance of PHEBUS/EUV detector onboard BepiColombo, Adv. Space Res., 49, 1265-1270, 2012.
- 6) Yoshioka, K., Murakami, G., Yamazaki, A., Tsuchiya, A., Kagitani, M., Sakanoi, T., Kimura, T., Uji, K., and Yoshikawa, I., The extreme ultraviolet spectroscopy for planetary science, EXCEED, Planetary and Space Science, 85, 250-260, 2013.

宇宙航空研究開発機構研究開発報告 JAXA-RR-18-007

JAXA Research and Development Report

超小型探査機搭載に向けた汚染防止用蓋開閉システムの開発

Development of the shutter system dedicated for ultra-small missions

発行 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
〒182-8522 東京都調布市深大寺東町7-44-1
URL: <http://www.jaxa.jp/>

発行日 平成31年2月18日
電子出版制作 松枝印刷株式会社

※本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工作することを禁じます。
Unauthorized copying, replication and storage digital media of the contents of this publication, text and images are strictly prohibited. All Rights Reserved.

