TEMPERATURE MEASUREMENT OF SPACE ENVIRONMENT WITH MECHANICAL THERMOMETER FOR THE TANPOPO MISSION

Hirofumi Hashimoto^{1,2}, Eiichi Imai³, Hajime Yano^{1,2}, Shin-ichi Yokobori⁴ and Akihiko Yamagishi⁴ ¹Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1 Yoshinodai, Chuo-ku, Sagamihara-shi, Kanagawa 252-5210, Japan

²The Graduate University for Advanced Studies, Shonan Village, Hayama-shi, Kanagawa 240-0193, Japan ³Nagaoka University of Technology, 1603-1 Kamitomioka, Nagaoka-shi, Niigata 940-2188, Japan

⁴Tokyo University of Pharmacy and Life Sciences, 1432-1 Horinouchi, Hachioji-shi, Tokyo 192-0392, Japan

E-mail: hashimoto.hirofumi@jaxa.jp

(Received: October, 1, 2019 Accepted: October, 29, 2019)

Abstract

Temperature of space environment was measured with the mechanical thermometer using a bimetallic strip coil for the Tanpopo mission. The Tanpopo mission was a multi-year passive exposure experiment for astrobiology exposure and micrometeoroid capture on board the Exposed Experiment Handrail Attachment Mechanism (ExHAM) at the Japanese Experiment Module 'Kibo' (JEM) Exposed Facility (EF) on the International Space Station (ISS). Since its microbial exposure experiment requires recording the maximum temperature that the Tanpopo exposure panel senses, we have developed a mechanical thermometer with no electric power supplied from the ExHAM. At a given time and orbital position of the ISS, the thermometer indicator was video-imaged by the extravehicular video camera attached to the JEM-EF. With these images analyzed, we were able to derive the maximum temperature of the exposure panels on the space pointing face of the ExHAM as $29 \pm 5^{\circ}$ C. Furthermore, the thermometer endured use more than three years and demonstrated that the durability was particularly superior.

Key words: Temperature measurement, Mechanical thermometer, Bimetallic strip, Tanpopo, ISS, JEM, EF, ExHAM

たんぽぽミッションでの機械式温度計に よる宇宙環境温度測定 橋本 博文^{1,2}、今井 栄一³、矢野 創^{1,2}、横堀 伸一⁴、 山岸 明彦⁴

¹宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1 ²総合研究大学院大学 240-0193 神奈川県三浦郡葉山町(湘南国際村) ³長岡技術科学大学 940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1 ⁴東京薬科大学 192-0392 東京都八王子市堀之内1432-1 hashimoto.hirofumi@jaxa.jp

1. 緒言

たんぽぽミッション[1,2,3]は、有機物・微生物の

宇宙曝露と宇宙塵・微生物の捕集を目的とした日本 初のアストロバイオロジー実験である。 ミッション に用いられる供試体は、国際宇宙ステーション(ISS) 日本実験棟「きぼう」(JEM)の船外実験プラットフ オーム(EF)上の簡易曝露実験装置(ExHAM)に取り 付けられ、宇宙環境に曝露された。また、ミッショ ンでは、有機物や微生物試料を反地球方向の宇宙環 境に曝すための容器の集合体である曝露パネルが 使用された。曝露実験期間中の曝露パネルの最高温 度が80℃を超えると生物試料に影響を与えるので、 それを確認する必要がある。これがミッション要求 である。曝露パネルの温度は、太陽光の照射、接触 しているExHAMからの熱伝導、周囲の機器からの 熱放射に依存するが、ISSの巨大な太陽電池パネル 等による遮光、JEM-EF上の熱環境、曝露パネルの 表面形状の複雑さから、単純には予測できず、他の ミッションの温度情報もほとんど参考にならない。 よって、曝露パネルの温度は独自に測定する必要が ある。一般的に、温度測定は熱電対により温度を電 気的に測定し記録する簡便かつ信頼性の高い方法 が用いられるが、曝露パネルが設置される環境では 低温のため電池が使用できない。さらに、ExHAM には電気的インターフェイスがないため、非電気的 な温度計および測定方法を開発する必要があった。 そこでバイメタルを用いた機械式温度計を開発し、 これを曝露パネルに取り付けて、JEMの船外カメラ からビデオ撮影し、そのビデオ画像から温度を読み 取るという方法で温度測定を行った[4]。この温度計 は当初3ヶ月と設定された設計寿命をはるかに超え た3年以上の間、動き続け、運用を終えて地上に帰 還した。本論文では、この温度計の軌道上運用、設 計と構造、宇宙環境曝露前後の比較、温度測定結果 と考察について報告する。これらはISS軌道上で行 われたアストロバイオロジー実験の記録と結果で あり、非常に貴重なものである。

2. 温度計の軌道上運用

温度計は他のたんぽぽ供試体とともに、日本時間 2015年4月15日に米国ケープカナベラル空軍基地よ りスペースX社商用補給機6号機ドラゴン(SpaceX-6



Fig. 1 (a) Tanpopo mission was conducted on board the Exposed Experiment Handrail Attachment Mechanism (ExHAM) at the Exposed Facility (EF) of the Japanese Experiment Module 'Kibo' (JEM) on the International Space Station (ISS). (b) This photograph is the exposure panel installed on the ExHAM to see from the Pressurized Module of Kibo. The exposure panel is mounted such that it is embedded underneath the top surface (space pointing face) of the ExHAM.

Dragon CRS-6)で ISS へ向けて打ち上げられた。その 後、5月14日に JEM 船内で ExHAM に取り付けられ た。ExHAM は、宇宙飛行士が船外活動の際に使用す るハンドレールに供試体を取り付けて曝露実験を行 うためのアタッチメントツールである。その後、 ExHAM は5月26日にエアロックから船外へ搬出さ れ、ロボットアームにより EF 上のハンドレールに固 定された。図1(a) に「きぼう」の船内実験室(与圧 部)と EF および ExHAM の設置位置(黄色の丸)を 示す。船内実験室の方向(赤い矢印)から見た ExHAM を図1(b) に示す。上面の曝露パネルと温度計の表示 板が見える。

温度計の曝露運用記録を表1に示す。初めに3枚の 曝露パネルがExHAMに取り付けられ、曝露開始から およそ1年後、2年後、3年後に1枚ずつ回収し、地上 に帰還後、解析される。2018年7月20日に最後に回収 された曝露パネルには、温度計が一体化するように 取り付けられていた。つまり、温度計は通算1126日 の期間、宇宙環境に曝露されていたことになる。

Table 1	Tanpopo	thermometer	exposure	record.
	1 1		1	

Exposure		Date (Y.M.D)	Exposure days	Total Exposure days	
, st	Start	2015. 5. 26	294	384	
1 year	End	2016. 6. 13	384		
2 nd year	Start	2016. 6. 29	295	760	
	End	2017. 7. 19	385	/69	
3 rd year	Start	2017. 7. 28	257	1126	
	End	2018. 7. 20	557		

3. 温度計の構造

温度計が取り付けられた曝露パネルを上面(曝露 面)から見た写真を図2(a)に、斜め上前から見た 写真を図2(b)にそれぞれ示す。曝露パネル(100 mm×100 mm×19.5 mm)は、有機物、微生物などの 試料や線量計を内包した20個の独立したユニット (25 mm×20 mm×11.5 mm)から構成され、各々の ユニットは台座にボルトで固定されている。ユニッ トや台座はアルミニウム合金(超々ジュラルミン) 製で熱伝導は良く、曝露パネル全体が短時間で平衡 温度に達するように設計されている。アルミニウム 製部品の宇宙環境に露出する面は腐食を避けるた めアルマイト処理が施されている。温度計の測温部 は直径6 mmの円柱状で、曝露パネルのユニットの 一部や台座と密着するように曝露パネル内部で強 固に固定され、曝露パネルの温度を測定できる。こ のように曝露パネルと温度計が結合された状態で 軌道上のISSへ輸送された。

温度計表示部(110 mm×70 mm×8.5 mm)を正面 から見た写真を図2(c)に示す。この表示部は本体 がアルミニウム合金(超々ジュラルミン)製で、こ れにステンレス製の表示板が皿ネジで固定してあ る。表示板には温度指針の一部だけを見ることがで きるように、幅12 mmの三日月状のスリットが切ら れている。さらに、後に解析時に画像処理を行うた めの黒く塗りつぶした円が描かれた金属製EVAラ ベル(黒丸)が6枚貼られている。本体下部には ExHAMへ固定するための2本のボルトが本体から 抜け落ちないように取り付けられている。温度指針 が万一可動範囲を超えた場合に破損しないように、 本体の天井部分が開放されている。曝露パネルを除 いた温度計単体の質量は159 gである。

4. 測温部の構造

温度計に使用したバイメタルは米国Engineered Materials Solutions社製で、高膨張金属(22%Ni,3%Cr, 残Fe)と低膨張金属(36%Ni,残Fe)を組み合わせ たものであり、その仕様を表2に示す。また、測温部 の写真および内部構造を図3に示す。帯状バイメタル (長さ90mm×幅1.5mm×厚さ0.18mm)を7巻半の らせん状に加工したバイメタルコイルが保護管に収 められており、一端は保護管の端部に、他端は温度 指針の軸にそれぞれ固定されている。このバイメタ ルコイルが温度変化により緩締することで軸を回転



Fig. 2 (a) The mechanical thermometer is attached to the Tanpopo exposure panel which contains twenty units. Microbes, organic compounds and dosimeters for exposure experiment are enclosed in these units. Dimension of the exposure panel is 100 mm×100 mm×19.5 mm while it is 25 mm×20 mm×11.5 mm for each unit.

(b, c) The mechanical thermometer consists of an indicator and a temperature sensor. The indicator is comprised of an aluminum alloy body and a stainless steel panel in which a U-shaped slit was cut. The temperature sensor is made of a stainless steel pipe. The pointer is connected to the shaft in the pipe. The mass is 159 g.

High thermal expansion coefficient	18.9×10 ⁻⁶ /°C
Low thermal expansion coefficient	$< 2.0 \times 10^{-6}$ /°C
Specific deflection	14.0×10 ⁻⁶ /°C
Range of linearity	−20~150 °C
Range of available	−70~370 °C
Maximum of temperature	540 °C
Elastic coefficient	172×10^3 MPa
Density	8.03 g/cm ³
ASTM B388	TM1

Table 2 Specification of the bimetallic strip

させ、その回転角を温度指針で読み取り温度に変換 する。

軸をステンレスで製作した場合、通常、軸受け部 分はより硬度が低い黄銅で製作するが、宇宙環境で の耐性を考慮して軸受け部分もステンレスで製作し、 固体潤滑剤を樹脂に配合した塗料を加熱乾燥させて 潤滑塗膜を形成した。塗料はサンエツ潤滑社製OM MR#211で、二硫化モリブデンMoS₂を主成分とし特 殊樹脂を配合した天然の輝水鉛紘を高純度(99.9%以 上)に精製したものである。塗装工程は2段階あり、 まず1回目の塗装で1~2µmの膜厚にして10分の乾燥 後、2回目の塗装で2~5µmの膜厚にし、180℃で焼き 付け乾燥を30分行った。

5. 温度計設計と温度校正

たんぽぽミッションからの要求は、「曝露パネルの 最高温度が多くの微生物が死滅する80℃を超えない ことを確認する」ということであり、高い温度精度 は必要なく5℃もあれば十分である。また、事前の温 度シミュレーション結果から曝露パネルの軌道上定 常時解析予測温度範囲は-115.0~32.8℃で変化する ことが予測されていた。マージンを十分にとり測定 温度範囲は-140~90℃とする。よって、要求される 温度計の設計仕様は、「温度範囲:-140~90℃、精度 5℃」である。

軸受け部分の材料を軸と同じステンレスに変更して 固体潤滑処理を施したが、実績がないので十分に耐 久性があることを温度サイクル試験により確認しな ければならない。ISSの公転周期は約90分なので、最 も過酷な条件を仮定すると、90分で-115.0~32.8℃の 温度サイクル試験を約1年間行う必要がある。しかし 設備や時間に制限があるため、小型冷凍機とヒータ ーを組み合わせた自作の温度サイクル試験機により、 90分で-80~80℃の温度サイクル試験を3ヶ月間実施 して温度計軸受け部分の耐久性を確認した。この試 験から稼働実績による保証寿命は3ヶ月となる。また これ以外に宇宙用実験供試体としてNASAによって 定められた規格(SSP 50835 Revision D)による機能 ・性能試験、減圧試験、振動試験を実施した。

設計仕様では測定温度範囲は-140~90℃であり、 そのときの振れ角は160°になる。温度計表示部のス



Fig. 3 Photograph and Internal mechanism of the thermometer is shown. There is a bimetallic strip coil in the pipe. One end of the coil is fixed to the shaft and the other end of the coil is fixed to the edge of the pipe. It turns the shaft that the coil loosens and fastens by a temperature change. We can read the temperature from the pointer angle.

リット開口角はさらにマージンを考えて180°として フライトモデルを製作し、図4のように表示部の指針 の角度A(°)、そのときの温度T(\mathbb{C})を定義して温 度校正を行った。表示部のスリットの内側にある黒 丸は大よそ0°,60°,120°,180°の目盛位置である。 温度測定は3回行い再現性を確認した。指針の角度と 温度の関係は、0℃以上ではほぼ直線で線形であるが、0℃以下では少し直線から外れる。これはバイメタ ルの仕様が低温部では線形でないためである。よっ て、温度範囲を2分割し低温側では二次曲線による補 間を行う。A = 85°を境目に高温側では式(1)、低温 側では式(2)をそれぞれ用いて指針角度から温度へ の換算を行うことにする。これらの換算式をグラフ に描いたものを図5に示す。式(1)は赤、式(2)は 青で示している。

$T = -1.2532A + 94.807 \tag{(}$	1)	
---------------------------------	---	---	--

 $T = -0.0046A^2 - 0.2234A + 40.453$ (2)

6. 宇宙環境曝露前後の温度計の比較

地上帰還後に温度校正を実施したので、打ち上げ 前と比較した結果を表3に示す。データは指針角度が 0°,60°,120°,180°のときのものである。指針の読 み取り精度に限界があるので、誤差は±1℃である。 帰還後の温度計では、-55℃以下で指針が温度計内部 で接触して温度が読み取ることができなかったので、 180°のデータはない。しかし、他の3点では校正値は ほぼ一致している。実際の測定値では-55℃以下のデ ータはなかったので、今回の測定範囲内では温度計 は十分に機能した。また、宇宙環境曝露前後の校正 値がほぼ同じであったことから、この3年以上の間、 温度計は宇宙で正確に動作していたことが示された。

宇宙環境曝露前後の温度計表示部の写真を図6に 示す。左が曝露前で右が曝露後である。これらの写 真を比較すると、曝露後はEVAラベルが黄ばんでい



Fig. 4 Definition of pointer angle on the indicator of the thermometer.



Fig. 5 Calibration curve for the Tanpopo thermometer. Equation (1) is applied in $0^{\circ} < A \le 85^{\circ}$ (red). Equation (2) is applied in $85^{\circ} < A < 180^{\circ}$ (blue).



Before exposure

After exposure

Fig. 6 These are photographs of indicator of the thermometer before and after exposure in space. The left is before exposure, the right is after exposure. After the exposure experiment, EVA labels are yellowed. The supporting marker disappears.



Fig. 7 The definition of the beta angle between the orbital plane of ISS and the solar direction.

Table 3 These values of temperature calibration before and after exposure in space environment almost accord. Error is $\pm 1^{\circ}C$.

Pointer angle	Temperature (°C)		
(degree)	Before exposure	After exposure	
0	93	93	
60	21	21	
120	-55	-54	
180	-151	N/R	

ること、マジックペンで付けた補助マーカーが消え ていることがわかる。3年以上の運用に耐えたことか ら、たんぽぽミッションに対して機械式温度計の耐 久性が十分であることが実証できた。

7. 太陽ベータ角と温度計運用

船外カメラの使用時間には制限があるため、最高 温度を記録すると考えられる期間を推測して、撮影 計画を立案する必要がある。太陽からISSへの熱放射 条件は、図7のようにISSの軌道面と太陽方向がなす 太陽ベータ角(β角)に依存すると考えられるので、 このβ角を指標にして考える。

ほぼ曝露パネルの実験期間に対応する約3年分のβ

角の変化を図8に示す。国際宇宙ステーションの公転 面は地球の赤道面に対して、51.6°傾いており、歳差 運動により約2ヶ月の周期で太陽方向に対して回転 している。これに地球の地軸の傾き23.4°が太陽方向 に対して1年の周期で回転していることが重なり、図 8のように周期が異なる正弦曲線を合成したような 変化を示す。したがって、β角は1年の間に大よそ-75°<β<+75°の範囲で変化する。

8. 太陽ベータ角と温度予測

たんぽぽ曝露パネルを基準にした(固定した)場 合の太陽の動きのイメージを図9に示す。曝露パネル は図1 (b) で示す通りExHAMの上面(宇宙面)に埋 め込まれるように取り付けられている。3種類の極端 なβ角条件の場合である β = +75°, 0°, -75° について 考える。

- (1) β=+75°の場合、太陽光が曝露パネルに照射する 角度が浅く時間も短いため、温度上昇は小さいと 考えられる。しかし、太陽光が図 9 の右側から ExHAM に照射し続けるため、ExHAM 自体の熱 伝導が良ければ温度は上がり、熱伝導が悪ければ ExHAM は曝露パネルに対して単なる遮光物と なり、温度はあまり上がらない。
- (2) β=0°の場合、太陽は大きく移動し曝露パネルは 45 分ずつ昼夜を繰り返す。曝露パネルに垂直に 太陽光が当たる瞬間もあり温度上昇が予想され るが、日照時間が短く温度が十分に上がる時間は 短いので、温度上昇が大きいとは限らない。
- (3) β=-75°の場合、船内実験室が常に遮光し、曝露 パネルに太陽光は直接当たらず日陰となるため、 温度はほとんど上昇しないと予測される。

以上から、曝露パネルが最高温度を記録するのは、 β角がプラスの場合である可能性が一番高いと予測 されるが、不確定な要素もあり、プラスの値から船 内実験室に遮光されないマイナスの値にかけて、広 い範囲を考慮する必要があることがわかる。

9. 温度測定結果

温度計のビデオ映像は日陰、補助照明のみの夜間、



Fig. 8 A profile of the Sun beta angle variation. The beta angle shows a complex sigmoidal curve depending on the precession of the orbital plane of ISS. The color dots indicate the angles on the observed dates.



Fig. 9 The directions of sun light at the orbital positions with $\beta = +75^\circ$, 0° or -75° , respectively.

逆光などで画質の状態が悪い時間帯もあるため、各β 角条件でISSが4公転する6時間以上の撮影を実施し、 取得したビデオ映像から最高温度、最低温度を示し ていると思われる画像を選んで、温度計の針の角度 を読み取り、図5の校正曲線から温度を求めた。ビデ オ映像の解像度には限界があり、これらの数値は読 み取り誤差±5℃を含む。

温度測定結果を表4に示す。前章の温度予測を考慮 し、最高温度が予想されるβ角が正の場合を第一に行 うことにして、2015年6月2日から7月3日にかけて、5 回(β=74°,53°,29°,1°,-28°)の温度測定を行った。 このときの対応箇所を図8に赤点で示す。この5回の 測定点では意外なことにβ角が一番小さい-28°の場 合に最高温度24℃を記録した。前章の温度予測から、 実際は $\beta = 0^{\circ}$ の場合に最高温度を記録する可能性が 高いと推測されるので、確認のため7月13日($\beta = 1^{\circ}$) にもう一度、温度測定を試みた。このときの対応箇 所を図8に緑点で示す。しかし、この場合の最高温度 は21℃であり、やはり $\beta = -28^{\circ}$ のときの方が温度は高 かった。 $\beta = 1^{\circ}$ と-28°の間で最高温度になる可能性も あるため、12月15日に $\beta = -15^{\circ}$ を測定すると最高温度 26℃を記録した。また、前章の温度予測からほぼ確 実に $\beta = -75^{\circ}$ のときに最低温度になると考えられる ので、12月28日($\beta = -75^{\circ}$)と $\beta = -15^{\circ}$ との中間であ $\delta\beta = -45^{\circ}$ を12月21日に測定した。その結果、やはり $\beta = -75^{\circ}$ のときに最低温度-35℃を記録した。その後、 最高温度と最低温度を記録した $\beta = -15^{\circ}$, -75°および その中間点 $\beta = -45^{\circ}$ で、2年目と3年目の測定を繰り返

	Observation Date		Sun Beta	Maximum	Minimum	
No.					Temp.	Temp.
	Year	Year Month		(degree)	(°C)	(°C)
1			2	74	-9	-13
2		6	8	53	-11	-21
3	2015		13	29	16	-1
4			20	1	18	-3
5		2015 7	3	-28	24	-2
6			13	1	21	3
7			15	-15	26	7
8		12	21	-45	-9	-21
9			28	-75	-27	-35
10	2016	2016 12	10	-15	25	4
11			17	-45	-13	-28
12			25	-75	-33	-42
13			8	-15	29	7
14	2017	12	14	-45	-13	-23
15			22	-75	-34	-42

Table 4 Results of temperature measurement by the thermometer on board the JEM-EF. Error is $\pm 5^{\circ}$ C.

し実施した。これら12月の対応箇所を図8に青点で示 す。

この表から、最高温度は2017年12月8日にβ = -15° で29℃、最低温度は2016年12月25日と2017年12月22 日にβ = -75°で-42℃をそれぞれ記録していることが わかった。これらのことから、少なくとも曝露期間 中の温度測定日において、ミッション要求である最 高温度が80℃を超えていないことが確認できた。

10. 考察

温度測定結果をグラフにしたものを図10に示す。 横軸にβ角をとり、縦軸にそのときの最高温度(赤) と最低温度(青)を示した。各データシンボルには エラーバーとして±5℃を付している。同じβ角におけ る複数の温度の値に違いがあるが、エラーバーの範 囲内にある。さらに考察を進めるため、各β角におい て太陽光が照射する方向を図11に示す。左上のJEM の写真の黄色い枠内の部分のJEM本体とJEM-EF等を 青で示し、ExHAMを緑、曝露パネル(EP)を黒でそ れぞれ示した。赤い矢印が太陽光の照射方向で、数 字がβ角を表す。実際にはISSの公転に伴い、この矢 印が軸の周りをまわる。

第8章で予測したように、温度測定結果は基本的に β角の絶対値が小さい場合に温度が高く、大きい場合 に温度が低くなっている。これはβ角の絶対値が小さ い方が太陽光の差し込む角度がより垂直に近くなる からと考えられる。そして、β角の絶対値が大きい場 合、負の値(マイナスハイベータ)のときではJEM 本体や保管室の陰になる時間があり、β角が正の値(プラスハイベータ)のときよりも温度が低くなる。 次にβ角毎に細かく考察する。

- (1) β=74°の場合、曝露パネルには浅い角度で短い時間のみ太陽光が照射するだけであるが、 ExHAMに対して太陽は周極星となり図11の右 側から常に日があたる。しかし、ExHAM本体 内部の熱伝導がよくないので、曝露パネルは ExHAMにより遮光されるだけで、ある程度ま でしか温まらない。ExHAMには夜がないので、 最高温度と最低温度の差は小さい。
- (2) β=53°の場合、右端下方に設置された機器のため、太陽が下方にある時間帯は日陰となり、昼夜ができるので、β=74°の場合ほど温度が上がらない。
- (3) β=29°の場合、太陽光が差し込む角度が大きくなる時間が増えるため、最高温度は高くなり、 日陰になるときの最低温度との差も大きくな



Fig. 10 Results of temperature measurement by the thermometer on board the JEM-EF.



Fig. 11 The directions of sun light irradiating exposure panel (EP) according to sun beta angle. る。 $\beta = -75^{\circ}$ の場合で-42±5

- (4) β = 1°の場合、さらに同様の傾向が強く表れ、
 最高温度もより高くなる。
- (5) β=-15°の場合、β=1°の場合に加えて、曝露パネルの左側の側面にも少し太陽光が照射するため、さらに最高温度は高くなり、曝露パネルの最高温度を記録したと考えられる。
- (6) β=-28°の場合、β=-15°の場合とほぼ同様であ るが、太陽光の角度がやや小さくなるため、最 高温度はやや低くなる。同時に日陰となる時間 も増えて最低温度がより下がるため、最高温度 と最低温度の差が最大となる。
- (7) β = -45°の場合、JEMの上部に設置されている 船内保管室により遮光されるようになり、日陰 時間が増え、温度は低くなる。最高温度と最低 温度の差も小さくなる。
- (8) β=-75°の場合、さらにJEM本体による遮光で全く太陽光があたらなくなり、温度は最も低くなる。曝露パネルの最低温度もこのときに記録した。常に日陰になるため、最高温度と最低温度の差は小さい。

厳密な議論をするためにはデータ数が圧倒的に足 りないが、温度計の運用機会は限られている。これ らの考察は他のミッションで温度の予測をする場合 に役立つと考えられる。

11. 結言

たんぽぽミッションでは、曝露パネルの最高温度 の記録を求められているが、電気式の温度計及び記 録計が使用できない。そこで、バイメタルを用いた 機械式温度計を開発し、曝露パネルに取り付け、JEM の船外カメラから温度計指示部をビデオ撮影し、そ のビデオ画像から温度を読み取るという方法で温度 測定を行った。約3年間に15回の温度測定を行った結 果、最高温度はβ=-15°の場合で29±5℃、最低温度は β = -75°の場合で-42±5℃であった。これらのことか ら、少なくとも曝露期間中の温度測定日において、 ミッション要求である最高温度が80℃を超えていな いことが確認できた。さらに3年以上の運用に耐え、 機械式温度計が宇宙環境で有効に機能することが実 証できた。

謝辞

宇宙航空研究開発機構(JAXA)宇宙科学研究所 の山下雅道名誉教授には、バイメタルを用いた機械 式宇宙温度計のアイデアをいただいた。横河計器製 作所には温度計製作にご尽力いただいた。また、温 度計の運用では宇宙飛行士をはじめ、JAXA有人宇 宙技術部門有人宇宙技術センターの方々に、大変お 世話になった。ここに記して謝意を表したい。

引用文献

- 山岸明彦、矢野創、奥平恭子、小林憲正、横堀伸一、 田端誠、河合秀幸、TANPOPO: 有機物と微生物の宇 宙空間曝露と微隕石及び微生物の捕集実験, Biological Sciences in Space, Vol.21, No.3, pp. 67-75 (2007)
- Yamagishi, A., Yokobori, S., Hashimoto, H., Yano, H., Higashide, M., Tabata, M., Imai, E., Yabuta, H., Kobayashi, K. and Kawai, H., Tanpopo: Astrobiology exposure and micrometeoroid capture experiments proposed experiments at the exposure facility of ISS-JEM, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, Vol.12, No.iste29, Tk_49-Tk_55 (2014)
- Yamagishi, A., Kawaguchi, Y., Hashimoto, H., Yano, H., Imai, E., Kodaira, S., Uchihori, Y. and Nakagawa, K., Environmental data and survival data of *Deinococcus aetherius* from the exposure facility of the Japan experimental module of the International space station obtained by the Tanpopo mission, Astrobiology, Vol.18, No.11, DOI:10.1089/ast.2017.1751 (2018)
- 橋本博文、今井栄一、矢野創、渡辺英幸、横堀伸一、 山岸明彦,たんぽぽミッションにおける機械式宇宙 温度計の開発,日本機械学会論文集,Vol.82, No.835, DOI:10.1299/transjsme. 15-00538 (2016)