

たんぽぽ曝露パネル温度測定のまとめ

橋本博文 (JAXA), 今井栄一 (長岡技科大), 矢野創 (JAXA), 横堀伸一, 山岸明彦 (東葉大)

Summary of Tanpopo Exposure Panel Temperature Measurement

Hirofumi Hashimoto*, Eiichi Imai, Hajime Yano, Shin-ichi Yokobori, Akihiko Yamagishi

*ISAS/JAXA, Sagami-hara, Kanagawa 252-5210

E-Mail: hashimoto.hirofumi@jaxa.jp

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 $29 \pm 5^\circ\text{C}$. Furthermore, the thermometer endured use more than three years and demonstrated that the durability was particularly superior.

Key words: Temperature measurement, Bimetal thermometer, Tanpopo, ISS, JEM, EF, ExHAM

1. はじめに

たんぽぽミッション^{1,2)}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ォーム (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。このミッションでは、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°C 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氣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 には電氣的インターフェイスがないため、非電氣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³⁾。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、2015年4月14日 (UTC) 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 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られる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に ExHAM に取り付けられた曝露パネルと温度計を示す。また、これらの運用記録を表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。よって、温度計は通算1126日の期間、宇宙環境に曝露されていた。

Table 1 Thermometer exposure record.

Exposure		Date (Y.M.D)	Exposure days	Total Exposure days
1 st year	Start	2015. 5. 26	384	384
	End	2016. 6. 13		
2 nd year	Start	2016. 6. 29	385	769
	End	2017. 7. 19		
3 rd year	Start	2017. 7. 28	357	1126
	End	2018. 7. 20		

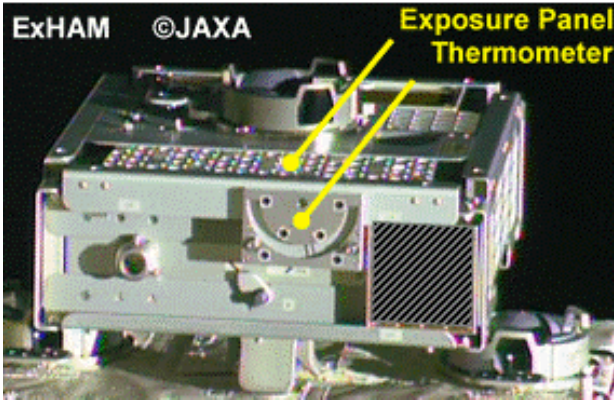


Fig.1 Exposure panel and thermometer on ExHAM.

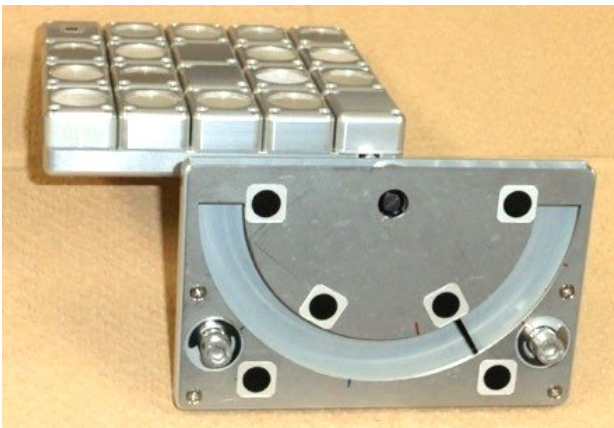


Fig.2 Exposure panel with thermometer.

3. 温度計の構造

温度計が取り付けられた曝露パネルを図2に示す。曝露パネル(100mm×100mm×19.5mm)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(25mm×20mm×11.5mm)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おり、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6mm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、曝露パネルの伝導温度を測定できる。

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幅12mmの三日月状のスリットが切れ、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159g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る。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縮することで軸を回転させ、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鉱を高純度(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

たんぼぼミッションからの要求は、「曝露パネルの最高温度が多く微生物が死滅する80℃を超えないことを確認する」というものであり、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 $-115.0\sim 32.8^{\circ}\text{C}$ 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 $-80\sim 80^{\circ}\text{C}$ 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。さらに、表示部の指針の角度に対して温度校正を行い、指針の角度から温度を読み取れるようにした。3 年を超えるフライト後、同様に校正を行ったが、温度計は宇宙で正確に動作していたことが証明された。

6. 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、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。ISS の軌道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、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 $-75^{\circ}\sim +75^{\circ}$ の範囲で変化する。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。図 3 に温度計運用期間の β 角の変化を示す。

7. 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、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、温度を求めた。ビデオ映像の解像度には限界があり、数値は読み取り誤差 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ を含む。温度測定結果を図 4、および、表 2 に示す。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 ($\beta = 74^{\circ}, 53^{\circ}, 29^{\circ}, 1^{\circ}, -28^{\circ}$) の温度測定を行った。このときの対応箇所を図 3 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°C を記録した。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 3 に緑点で示す。しかし、この場合の最高温度は 21°C 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°C を記録した。また、最低温度に関しては、ほぼ確実に $\beta = -75^{\circ}$ のときになると考えられるので、12 月 28 日 ($\beta = -75^{\circ}$) と $\beta = -15^{\circ}$ との中間である $\beta = -45^{\circ}$ 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°C を記録した。その後、最高温度と最低温度を記録した $\beta = -15^{\circ}, -75^{\circ}$ および、その中間点 -45° で、2 年目と 3 年目の測定を繰り返し実施した。これら 12 月の対応箇所を図 3 に青点で示す。この表から、最高温度は 2017 年 12 月 8 日に $\beta = -15^{\circ}$ で 29°C 、最低温度は 2016 年 12 月 25 日と 2017 年 12 月 22 日に $\beta = -75^{\circ}$ で -42°C 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°C を超えていないことが確認できた。

8. まとめ

たんぼぼミッションでは、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 $29\pm 5^{\circ}\text{C}$ ($\beta = -15^{\circ}$)、最低温度は $-42\pm 5^{\circ}\text{C}$ ($\beta = -75^{\circ}$)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°C 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も、大変お世話になった。ここに記して謝意を表したい。

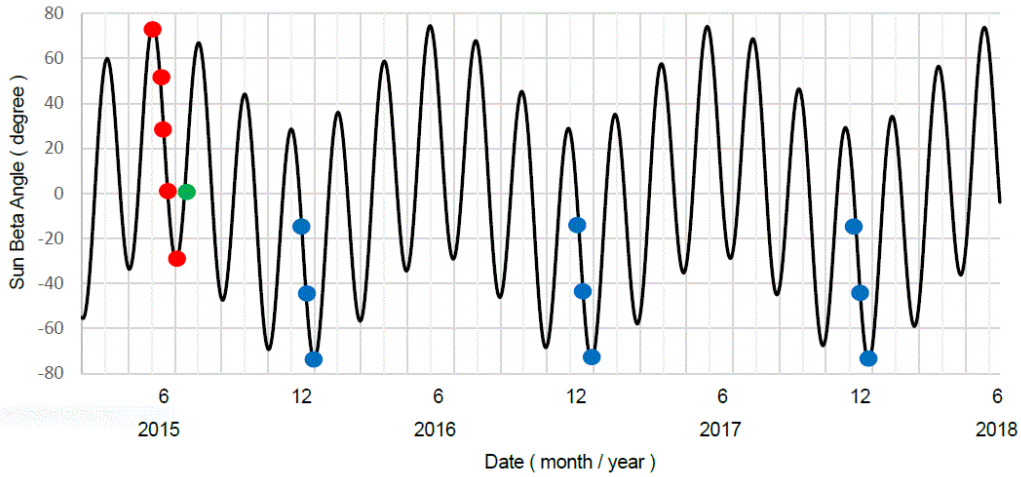


Fig.3 Profile of the Sun beta angle variation.

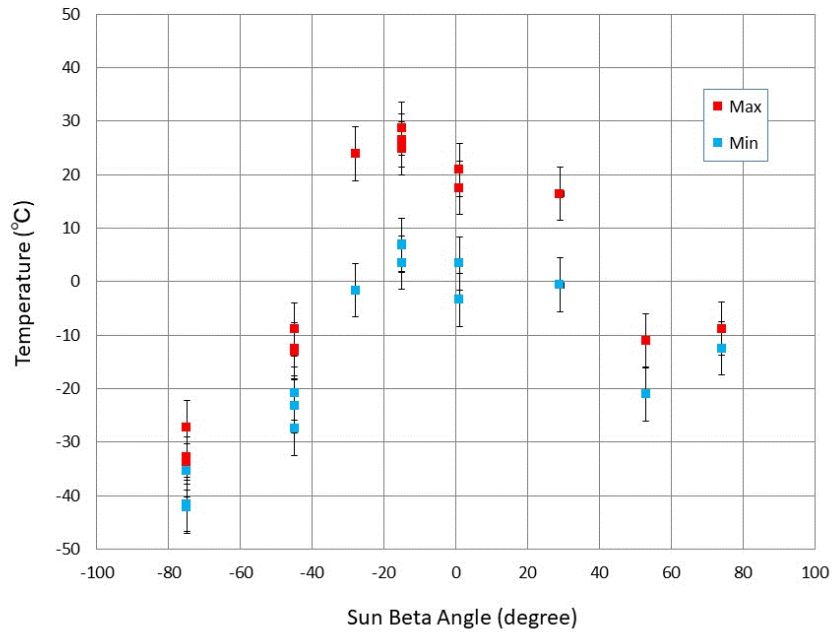


Fig.4 Results of temperature measurement with thermometer.

Table 2 Results of temperature measurement.

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

参考文献

- 1) 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).
- 2) 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).
- 3) 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).