

A15 熱膨張アクチュエータの熱真空環境下における熱特性評価

○嶋田岳史（東大院），石村康生，小川博之，岡崎駿（宇宙航空研究開発機構）

○ Takeshi Shimada (School of Engineering, The University of Tokyo),
Kosei Ishimura (ISAS/JAXA), Hiroyuki Ogawa, Shun Okazaki (JAXA)

概要

近年の科学天文衛星において，観測機器の大型化及び形状精度の高精度化への要求が厳しさを増している．その要求に応えるために，本研究グループは人工的な熱膨張をリニアアクチュエータとして利用するポインティング制御機構の研究・開発を行ってきた．先行研究のパラメータ感度解析により，当該ポインティング制御機構の軌道上利用可能性が示された．本論文では，その結果が熱真空環境下で設計解として存在するかを熱真空試験により確認した．熱真空試験の取得データから，ポインティング制御機構自身の温度と周囲環境温度との差を少なくとも 20°C とし，かつ，放熱効率の良い表面熱光学特性にすれば，加熱部温度を5分間でおおよそ $\Delta T = -20^{\circ}\text{C}$ の速度で降温でき（最新の科学衛星のポインティング制御誤差を補正するのに十分な傾斜角である 100 arcsec 超の可動範囲に対応），かつ消費電力が最大でおおよそ 60 W 未満であるような設計解が熱真空環境下においても存在し得ることが示された．

1 はじめに

近年の科学衛星のトレンドは大型化と高精度化である [1]．天体画像の解像度向上のために観測機器のサイズが増加していることが大型化の理由であり，より正確な観測結果を得るために観測機器に課される形状精度が厳しさを増していることが高精度化の理由である．しかし，機器の大型化は形状精度の悪化を招くため，大型化と高精度化を高い水準で両立させることは困難である．

この課題を解決するために，能動的な制御機構を構造物に組み込むスマート構造システムが，精力的に研究されてきた [2]．スマート構造システム概念は，三浦ら [3] によるものが広く知られている．特に，観測機器にとって重要な性能指標であるポインティング精度に注目した研究が数多くなされている．一方で，次世代の科学天文衛星において必要となる 10 m 超の構造物の高精度ポインティング制御のためのスマート構造システムの研究は非常に少ない．この理由として，ポインティング誤差を補正するのに十分な変位を発生でき，ヒステリシスがなく，かつ高信頼性を有する宇宙用アクチュエータが開発されていないことが挙げられる．

この問題を解決するために，著者らは人工的な熱膨張を伸縮機構として利用するリニアアクチュエータの研究・開発を行ってきた [4]．熱膨張アクチュエータは，摺動部/ギャップを廃した構造になっており，十分な変位の発生を可能としつつ，ヒステリシスが非常に小さく，かつ信頼性も高い．先行研究では，熱膨張アクチュエータ搭載ポインティング制御機構（図 1）の宇宙利用可能性評価のために，基礎性能及び消費電力に対するパラメータ感度解析を行った．その結果，5分以内に熱膨張アクチュエータ（以下，ロッド）温度をおおよそ $\Delta T = -20^{\circ}\text{C}$ することができること（近年の科学衛星のポインティング制御誤差を補正するのに十分な傾斜角である 100 arcsec 超の可動範囲に対応），及びロッド1本当たりの消費電力が最大でおおよそ 10 W であることが示された．

本研究の目標は，上記の設計解の熱真空環境下での存在を示すことである．そのために，詳細な熱解析モデルの開発と熱解析の妥当性の裏付けとなる熱真空環境下での熱特性データの取得を行う，本論文では，スケールモデルを用いた熱真空試験により得られた熱特性データについて報告する．

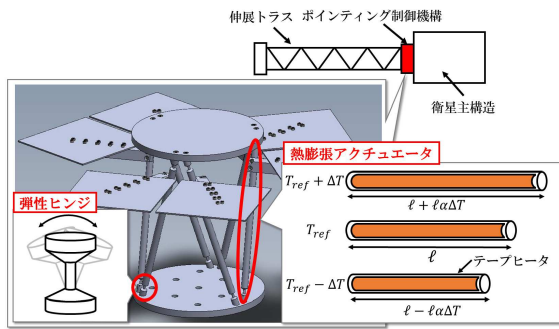


図1 熱膨張アクチュエータ搭載ポインティング制御機構の概念図

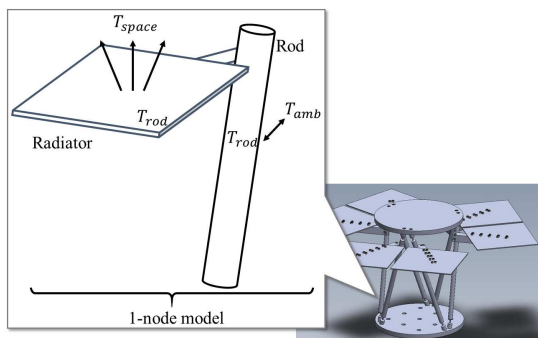


図2 パラメータ感度解析における熱数学モデルの概念図

2 熱真空試験の概要

2.1 熱真空試験の目的

熱真空試験の主目的は、今後開発する詳細な熱解析モデルの妥当性を裏付けるための熱特性データを取得することである。加えて、スケールモデルの供試体を用いることで、実機に近いBBMモデルが解析により提示された設計解を熱真空環境下で満たすことを示す。試験では、供試体の空間温度分布及び消費電力をデータとして取得する。

ロッドの降温速度と消費電力に影響があり、かつ可制御な要因は、i) 周囲環境温度、ii) ロッド温度、iii) 放熱面積、iv) 表面熱光学特性、v) 弾性ヒンジ部熱コンダクタンスの5つであるが、本実験ではi)–iv)の4要因が降温速度及び消費電力に及ぼす影響を評価した。4要因は、降温速度と消費電力のトレードオフに以下のように影響を与える。i) 周囲環境温度：周囲温度が低ければ降温速度は速くなるが消費電力が増える。ii) ロッド温度：ロッド基準温度を高くす

れば降温速度は速くなるが消費電力が増える。iii) 放熱面積：ラジエータを搭載して放熱面積を増やせば降温速度は速くなるが消費電力が増える。iv) 表面熱光学特性：放射率の高い表面にすれば降温速度は速くなるが消費電力が増える。

詳細については後述するが、i) を評価するために、供試体周辺の温度を低温/室温の2条件を、ii) を評価するために、ロッド基準温度を室温/高温の2条件を、iii) を評価するために、ラジエータの有/無の2条件を、iv) を評価するために、表面処理を断熱/放熱の2条件をそれぞれ設定した。

2.2 熱真空試験機器の構成

熱真空試験には、JAXA 相模原キャンパス内の内惑星チェンバを使用した。熱真空試験設備の概観を図3に示す。また、熱真空試験のシステム構成を図4に示す。供試体に設置した計44のT型熱電対により各部の温度を計測し、ロガーに記録する。ヒータB、D、F及びカプトンヒータに関しては、供試体の説明で詳細を述べる。

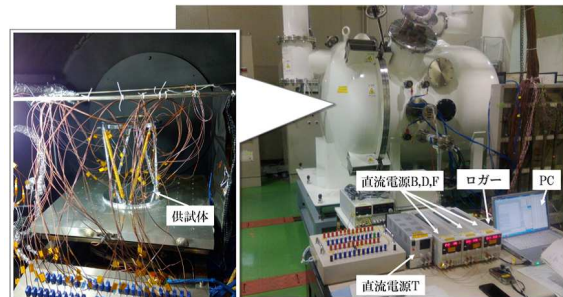


図3 熱真空試験設備の写真

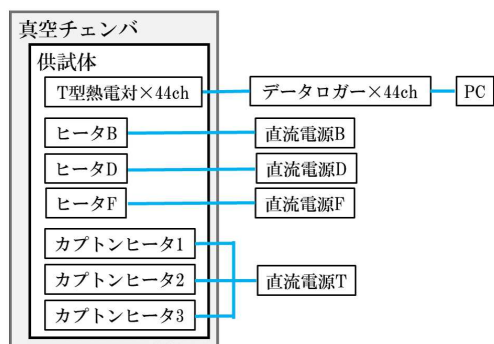


図4 熱真空試験のシステム構成

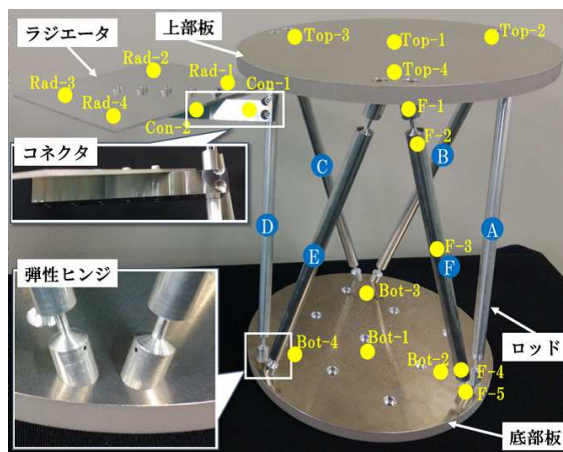


図5 熱真空試験の供試体の概観図

2.3 熱真空試験の供試体

熱真空試験で用いる供試体の概観を図5に示す。供試体は、上/底部板、ロッド、コネクタ、ラジエータから構成されており、材質はすべてアルミニウム A5052 である。各部の寸法を表1に示す。ロッドと上/底部板は M4 ネジ 1 本で、ロッドとコネクタは M3 ネジ 2 本で、コネクタとラジエータは M3 ネジ 10 本で締結した。また、弾性ヒンジは切削加工によりロッドと一体成型となるようにした。

各部の温度を計測するために、各ロッドにそれぞれ 5 (図中、ロッド F の熱電対のみ図示)、上/底部板にそれぞれ 4、コネクタに 2、ラジエータに 4 の計 44 の熱電対を取り付けた (図5中の黄色丸印)。

各ロッドには、図5に示すように、アルファベットを付した。6本中、ロッド B, D, F の3本のみヒータ D ($R = 40 \Omega$), B, F ($R = 47 \Omega$) による加熱を行った。なお、抵抗値の差はテープヒータ長さの差によるものである。また、上部板の温度を制御するために3枚のカプトンヒータ ($R = 380 \Omega$) を設置した。

図5には示していないが、各ロッドの表面熱光学特性特性を表2に示すように変えた。これは、iv) の表面熱光学特性の2条件 (断熱/放熱) に相当する。放射率 ε が 1 に近い程放熱傾向であり、0 に近い程断熱傾向である。その他のラジエータ、コネクタ、上/底部板の表面に関しては、放熱のためにカプトンを貼ったラジエータ上面以外は、断熱のために Al 蒸着カプトンを貼った。さらに、ロッド D にのみラジエータを取り付けた。これは、iii) の放熱面積の2条件 (ラジエータの有/無) に相当する。

表1 供試体の各構成部品の寸法

構成部品	寸法 [mm]
上/底部板	$\phi 200 \times 10$
ロッド	$\phi 10 \times 250$
弾性ヒンジ	$\phi 3 \times 6$
コネクタ	$18 \times 20 \times 130$
ラジエータ	$140 \times 140 \times 2$

表2 供試体の各ロッドの表面熱光学特性

ロッド ID	表面熱光学特性
A	カプトン ($\varepsilon = 0.79$)
B	Al 蒸着カプトン ($\varepsilon = 0.02$)
C	Al 蒸着カプトン ($\varepsilon = 0.02$)
D	Al 蒸着カプトン ($\varepsilon = 0.02$)
E	Al 蒸着カプトン ($\varepsilon = 0.02$)
F	カプトン ($\varepsilon = 0.79$)

2.4 各試験ケースの条件と手順

試験中の供試体各部の温度変化予想を図6に示す。

試験の前半と後半で、供試体の底部板を固定しているコールドプレート (以下、CP) の温度を変化させた。これは、i) の供試体周辺の温度の2条件 (低温/室温) に相当する。前半では、CP 温度を -100°C 付近に、後半では、CP 温度を 20°C 付近になるように制御した。ただし、実際の運用では多くの機器が MLI 等により被覆され、室温程度に保持されていることを考慮すると、周辺機器の温度が -100°C というケースは非常に稀であると思われる。

また、ロッド基準温度を 20°C 付近とする基準状態 1 と、 40°C 付近とする基準状態 2 とに分けた。これは、ii) のロッド基準温度の 2 条件 (室温/高温) に相当する。ロッド温度は、開ループ制御により基準状態 1 又は 2 に保持した。

そして、前半及び後半それぞれにおいて、熱平衡時における定常状態 (図 6 中、Ia 及び IIa に相当) 及び、ロッドの降温を行う過渡状態 (図 6 中、Ib, IIb, 及び III に相当) における空間温度分布及び消費電力データを取得した。試験中、20 分間の温度変化が 1K 以下となったときに、熱平衡状態に到達したとみなした。なお、温度の基準は各ロッドの中心に位置している熱電対 (ID:B-3, D-3, F-3, 図 5 では F-3

のみ図示) の温度とした。

ケース Ia 及び IIa では、各ロッドを基準温度 1 に維持した状態での各部温度及び消費電力を計測した。ケース Ib 及び IIb では、各ロッドについて個別に、基準温度 1 又は 2 に維持した状態から電力値を落としたときの降温速度を計測した。ケース III では、各ロッドを基準温度 2 に維持した状態から全ての電力値をゼロに落としたときの降温速度を計測した。

なお、試験中に熱電対 B-1, C-3, D-2, D-3, F-1 に接触不良が起り、データが取得できなかった。特に、D-3 は温度判定の基準としていたため、以下の実験結果においては、基準点の温度が計測できたロッド B (断熱) 及び F (放熱) について評価する。

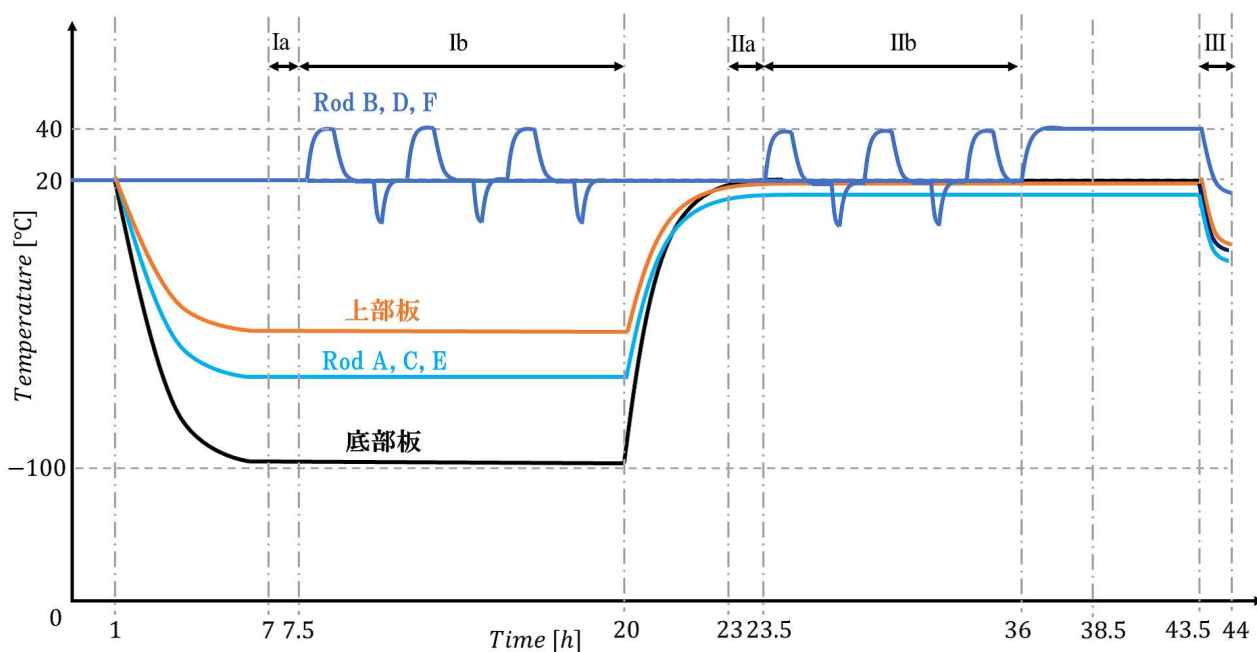


図 6 試験中における供試体各部の温度状態の時間変化

表 3 各状態におけるロッドの消費電力と温度

ロッド ID	Ia&Ib(CP 温度: -100°C)			IIa&IIb(CP 温度: 20°C)		
	基準状態 1	基準状態 2	加熱効率	基準状態 1	基準状態 2	加熱効率
B(断熱)	$8.2\text{W}(22.4^{\circ}\text{C})$	$9.7\text{W}(34.8^{\circ}\text{C})$	$8.3^{\circ}\text{C}/\text{W}$	$0\text{W}(22.4^{\circ}\text{C})$	$1.8\text{W}(38.3^{\circ}\text{C})$	$8.8^{\circ}\text{C}/\text{W}$
F(放熱)	$10.4\text{W}(22.0^{\circ}\text{C})$	$12.5\text{W}(35.2^{\circ}\text{C})$	$6.3^{\circ}\text{C}/\text{W}$	$2.1\text{W}(21.2^{\circ}\text{C})$	$4.3\text{W}(36.7^{\circ}\text{C})$	$7.0^{\circ}\text{C}/\text{W}$

3 熱真空試験の結果と考察

熱解析モデルを開発する際に、その妥当性の裏付けとなる熱真空環境下における試験取得データを以下に記載する。本論文では、主としてこの取得データの報告を行うが、併せて実機に近い BBM モデルが解析により提示された設計解を熱真空環境下で満たすかどうかを評価する。

3.1 定常状態における消費電力の評価

ロッド B(断熱), F(放熱) の各ケースでの定常状態における消費電力, 温度, 及び加熱効率を表 3 に示す。また, 試験 Ia, IIa(定常状態)における供試体各部の温度を図 7,8 に示す。ケース Ia, Ib では, 底部板及び上部板の温度がそれぞれ -100°C , -30°C と低温になるために, ロッド温度との差が大きくなり, 熱が逃げやすくなる。結果として, 1 本当たりの消費電力が 10 W 前後となっている(表 3 を参照)。一方, ケース IIa, IIb では, 底部板及び上部板の温度が共に 20°C とロッド温度に近づくために, 伝導による熱損失が小さくなる。結果として, 基準状態 2 の場合でも, 1 本当たりの消費電力が目標値の 4 割程度となっている(表 3 を参照)。

ポインティング制御機構の運用方法として, ロッド温度をある基準温度に保持した状態から温度変化幅が $\Delta = \pm 20\text{ K}$ 程度の昇温/降温を行い, 変位を発生させてポインティング制御を行うことを想定している。表 3 の熱効率から, 周囲温度が室温程度ならば, ロッド基準温度として 40°C 付近を選択し, そこから更にロッド温度を $\Delta T = 20\text{ K}$ 程昇温したとしても, 1 本当たりの消費電力が最大 7 W 前後であり, 目標値の 7 割程度になることが分かる。加えて, 前述のように, 周囲環境温度が -100°C となるケースは, 実運用上は考えにくい。万が一, それに近い低温の場合であったとしても, 1 本当たりの消費電力が 10 W 前後となっていることから, 周囲温度が室温付近より多少低い場合であっても, 目標消費電力値以下に収まることが期待できる。

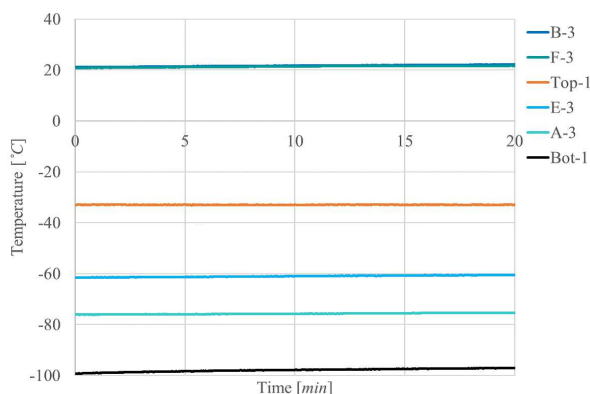


図 7 供試体各部の熱平衡状態における温度 (ケース Ia:CP 温度 -100°C)

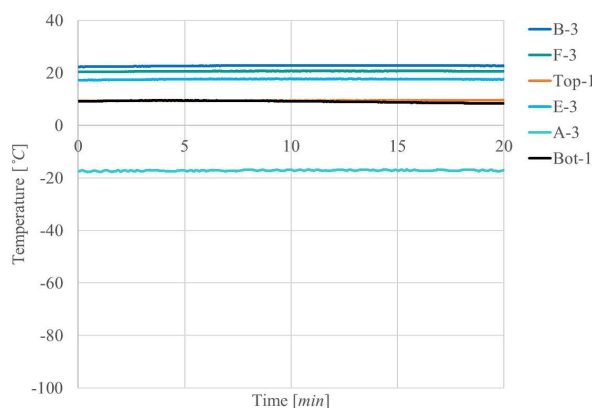


図 8 供試体各部の熱平衡状態における温度 (ケース IIa:CP 温度 20°C)

3.2 過渡状態における降温速度の評価

まず, ケース Ib(CP 温度: -100°C の場合)の結果を述べる。基準状態 2 にあるロッドの電力値を基準状態 1 での電力値まで落としたときの各ロッドの温度変化を図 9,10 に示す(電力値は, 表 3 を参照)。電力を落とした時点から初めの 5 分間の温度減少は, ロッド B : $34.8^{\circ}\text{C} \rightarrow 28.4^{\circ}\text{C} (\Delta T = -6.4^{\circ}\text{C})$; ロッド F : $35.2^{\circ}\text{C} \rightarrow 25.8^{\circ}\text{C} (\Delta T = -9.4^{\circ}\text{C})$ であった。そして, 基準状態 1 にあるロッドの電力値をゼロまで落としたときの各ロッドの温度変化を図 11,12 に示す。電力を落とした時点から初めの 2.5 分間の温度減少は, ロッド B : $22.4^{\circ}\text{C} \rightarrow -3.9^{\circ}\text{C} (\Delta T = -26.3^{\circ}\text{C})$; ロッド F : $22.0^{\circ}\text{C} \rightarrow -13.5^{\circ}\text{C} (\Delta T = -35.5^{\circ}\text{C})$ であった。

次に, ケース IIb(CP 温度: 20°C の場合)の結果を述べる。基準状態 2 にあるロッドの電力値

を基準状態 1 での電力値まで落としたときの各ロッドの温度変化を図 13,14 に示す。電力を落とした時点から初めの 5 分間の温度減少は、ロッド B : $38.3^{\circ}\text{C} \rightarrow 29.0^{\circ}\text{C} (\Delta T = -9.3^{\circ}\text{C})$; ロッド F : $36.7^{\circ}\text{C} \rightarrow 26.2^{\circ}\text{C} (\Delta T = -10.5^{\circ}\text{C})$ であった。そして、基準状態 1 にあるロッドの電力値をゼロまで落としたときのロッド F の温度変化を図 15 に示す。電力を落とした時点から初めの 5 分間の温度減少は、ロッド F : $21.2^{\circ}\text{C} \rightarrow 10.8^{\circ}\text{C} (\Delta T = -10.4^{\circ}\text{C})$ であった。

最後に、ケース III (CP 温度: 20°C の場合) の結果を述べる。基準状態 2 にあるロッドの電力値をゼロまで落としたときの各ロッドの温度変化を図 16,17 に示す。電力を落とした時点から初めの 5 分間の温度減少は、ロッド B : $42.1^{\circ}\text{C} \rightarrow 32.7^{\circ}\text{C} (\Delta T = -9.4^{\circ}\text{C})$; ロッド F : $38.4^{\circ}\text{C} \rightarrow 17.5^{\circ}\text{C} (\Delta T = -20.9^{\circ}\text{C})$ であった。

周囲温度が低温及び室温のケースにおいて電力値をゼロまで落とした場合にのみ目標の降温速度を達成できたことが分かる。また、目標値達成のためには、特に周囲温度が室温程度の場合にはロッドの表面熱光学特性を放射率が 1 に近いものにする必要がある。

3.3 熱真空試験データより得られた知見

以上の取得データから、放射率 ϵ が 1 に近いような高い放射率の表面熱光学特性を有するロッドに対して、周囲環境温度が低い状態で電力値を急激に落とす、又は周囲環境温度が室温程度であっても、ロッドの基準温度を周囲環境温度より最低でも 20°C 以上高くし、電力値を急激に落とすことで目標の降温速度を熱真空環境下においても達成できることが示された。しかし、後者の方策の方が消費電力及び他の衛星搭載機器の温度管理の観点から前者よりも望ましいと言える。

また、今回の熱真空試験により、実機に近い BBM モデルが解析により提示された設計解を熱真空環境下で満たすことを示した。これは、熱膨張アクチュエータが軌道上環境においても、将来的な性能要求を満足することを示唆する。

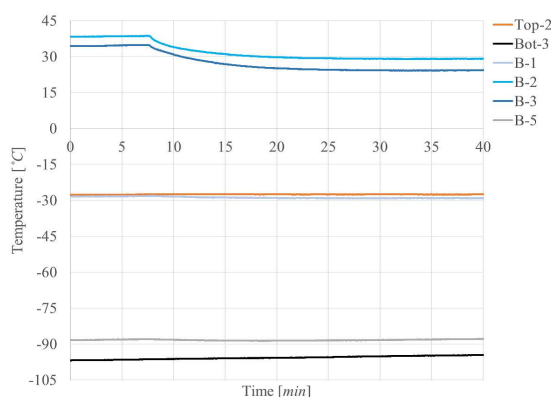


図 9 ロッド B (断熱) の温度変化 (ケース Ib: 基準状態 2 での電力値 → 基準状態 1 での電力値)

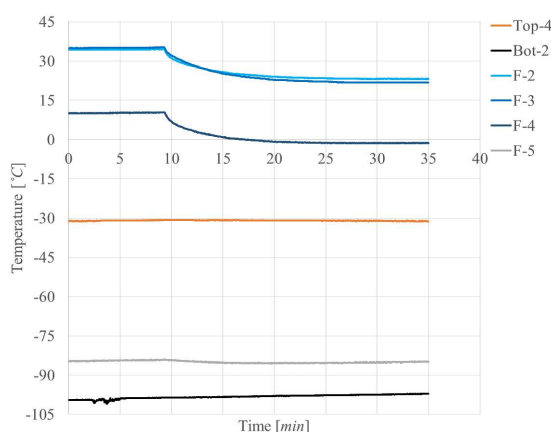


図 10 ロッド F (放熱) の温度変化 (ケース Ib: 基準状態 2 での電力値 → 基準状態 1 での電力値)

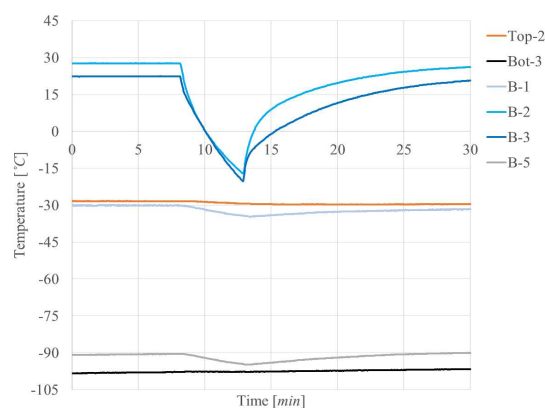


図 11 ロッド B (断熱) の温度変化 (ケース Ib: 基準状態 1 での電力値 → 電力値ゼロ)

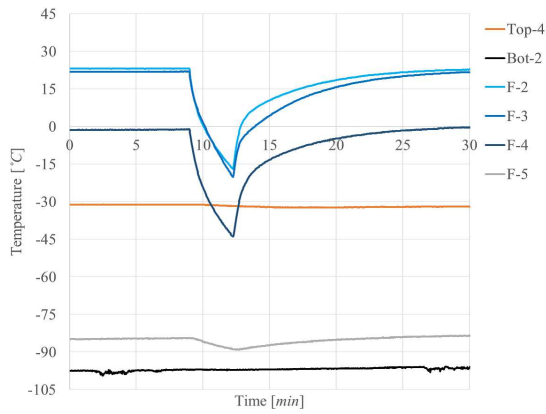


図 12 ロッド F(放熱) の温度変化 (ケース IIb:基準状態 1 での電力値 → 電力値ゼロ)

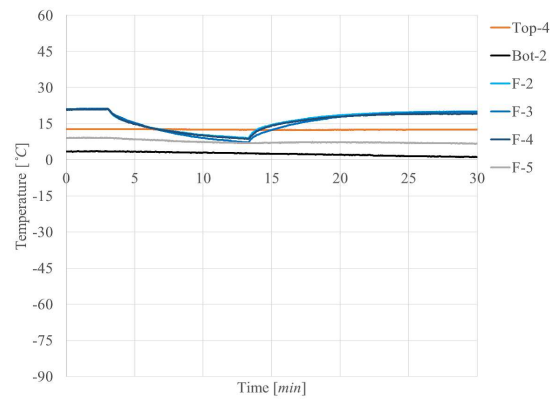


図 15 ロッド F(放熱) の温度変化 (ケース IIb:基準状態 1 での電力値 → 電力値ゼロ)

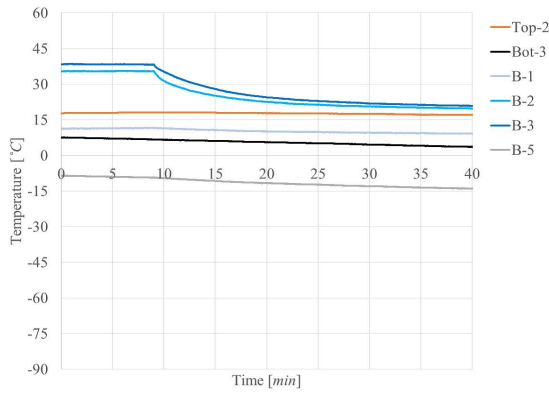


図 13 ロッド B(断熱) の温度変化 (ケース IIb:基準状態 2 での電力値 → 基準状態 1 での電力値)

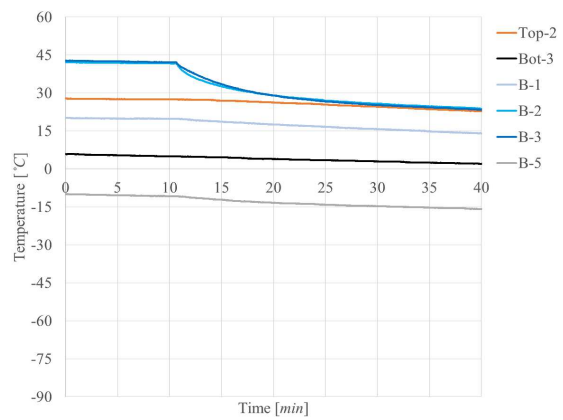


図 16 ロッド B(断熱) の温度変化 (ケース III:基準状態 2 での電力値 → 電力値ゼロ)

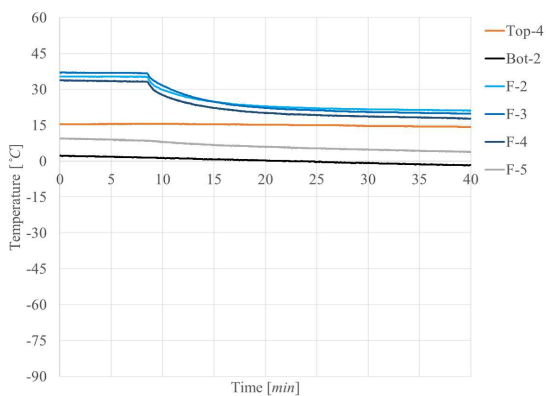


図 14 ロッド F(放熱) の温度変化 (ケース IIb:基準状態 2 での電力値 → 基準状態 1 での電力値)

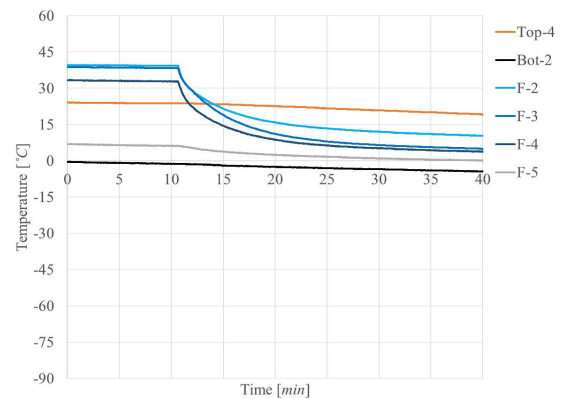


図 17 ロッド F(放熱) の温度変化 (ケース III:基準状態 2 での電力値 → 電力値ゼロ)

4 おわりに

熱真空試験の取得データから、解析で提示された降温速度及び消費電力を、実機に近いBBMモデルが熱真空環境下においても達成で

きることを示した。そのときの条件は、周囲環境温度を 20°C 程度に、かつ放射率が約 0.8 の表面熱光学特性を有するロッドの基準温度を 40°C 程度に維持した状態から印可電力をゼロまで落とすことであった。

参考文献

- [1] Belvin WK (2004) Advances in structures for large space systems. *Space 2004 conference and exhibit*, pp.28-30.
- [2] Denoyer KK and Henderson BK (2001) Recent achievements and new opportunities in adaptive structures. *19th AIAA applied aerodynamics conference*, 1502, pp.16-19.
- [3] Miura K (1992) Adaptive structures research at ISAS, 1984-1990. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 3(1): 54-74.
- [4] Shimada T, Ishimura K, and Kawano T. (2016) Demonstration of A Novel Smart Structural System for Pointing Control of Trusses. In: *ASME 2016 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, Stowe, VT, US.