

B14 形状記憶合金を用いたヒートスイッチラジエータの開発

Experimental Study of Heat Switch Radiator using Shape Memory Alloy

江口駿作(東京理科大学・院), 太刀川純孝(宇宙航空研究開発機構),
石井信明(宇宙航空研究開発機構), 齋藤智彦(東京理科大学)

SHUNSAKU Eguchi (Tokyo University of Science),
SUMITAKA Tachikawa (JAXA), NOBUAKI Ishii (JAXA),
TOMOHIKO Saitoh (Tokyo University of Science)

Abstract

Spacecraft is exposed to low-temperature environment in deep space or on lunar surface, so higher thermal insulating system is needed to accomplish those missions. We have been proposing a new thermal control concept, Energy-saving Thermal Management System (ETMS), which uses single-phase mechanically pumped fluid loop. In this paper, we describe a new radiator, Heat Switch Radiator (HSR), that enables variable effective emittance in the ETMS. We focused on shape memory alloys (SMA) which causes martensitic transformation and designed prototype HSR using the SMA spring. We report its experimental results of thermal conductance (radiator to heat source) and its calculation results of effective emittance.

1. はじめに

深宇宙探査, 月面探査等のミッションでは, 宇宙機, 探査用ローバーなどが, 太陽光強度が小さい, もしくは太陽光が当たらない環境に長期間曝されることとなる. そのため, 太陽光パネルでの発電量が低下するとともに, 搭載機器の温度補償のためのヒータ電力が増大する. そこで, そのようなミッションを成功させるためには, 高断熱, かつ, 低電力な熱設計が求められる. 筆者は, そのような要求を満足する宇宙機の熱制御システムとして, 図1に示すような Energy-saving Thermal Management System (ETMS) を提案している^[1]. ETMS は, 宇宙機全体を Polyimide form MLI^[2]および電波透過型 MLI^[3]を用いてアンテナを含めた強固な断熱を行う. また, 搭載機器の発熱は, メカニカルポンプループシステムを用いて熱輸送が行われるとともに, 廃

熱の有効利用を行う. つまり, ラジエータを1つにまとめることによって, 高断熱化を達成することができる. ヒータ電力を抑えることができる.

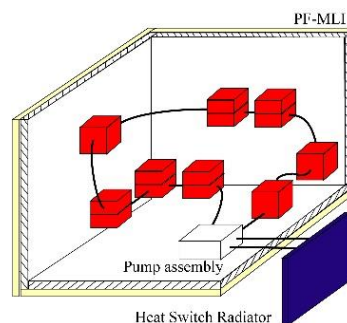


図1 ETMS を搭載した宇宙機の概略図.

ラジエータの主な役割は, 宇宙機内の熱を排熱することであるが, 宇宙機内部の流体を凍結させないこと, また, 低温環境で宇宙機の温度を過度に

低下させないことも重要である。通常のラジエータでは、放射率が温度によって変化しないため、Stefan-Boltzmannの法則から先に述べた要求を満たすことができない。そこで、我々は、形状記憶合金(Shape Memory Alloy : SMA)を用いて、熱制御対象の温度によって、実効放射率が変化するラジエータ(Heat Switch Radiator : HSR)を提案している。本論文では、試作したプロトタイプのHSRについて、熱コンダクタンスの測定と、熱解析モデルによる実効放射率の推算を行った結果について報告する。

2. SMAの原理^[4]

SMAでは、マルテンサイト変態によって、負荷に対して、原子が拡散を伴わず、互いに連携して移動を行う。このとき、低温ではオーステナイト相が安定で、温度が A_s 点でオーステナイト相への変態が開始し、 A_f 点で結晶全体がオーステナイト相となる。また、高温では、マルテンサイト相が安定で、温度が M_s 点でマルテンサイト相への変態が開始し、 M_f 点で結晶全体がマルテンサイト相となる。原子は元の位置情報を記憶し、材料に負荷を加えても、図2のように材料を加熱することで、元の形状に戻る(形状記憶効果)。

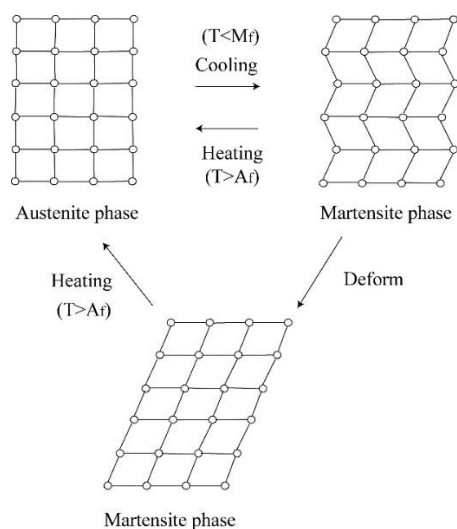


図2 マルテンサイト変態の概略図。

3. HSR アクチュエータの動作原理

アクチュエータの概略図を図3に示す。

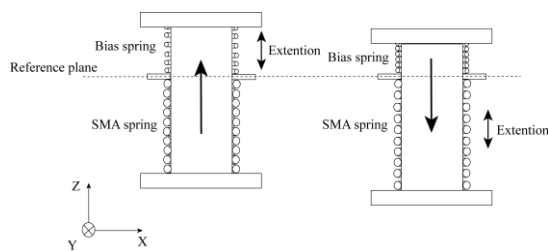


図3 アクチュエータの概略図。

基準面より上にバイアスばね、下にSMAばねが設置されている。低温時には、SMAばねよりもバイアスばねの発生力が大きく、バイアスばねが伸びるため、+Z方向に力が加わる。また、高温時には、SMAばねが形状記憶効果によって元の形状に戻ろうとするため、SMAばねの方がバイアスばねの発生力より大きく、SMAばねが伸びるので、-Z方向に力が加わる。そのため、このようなアクチュエータを用いると、低温時には熱源とラジエータ面を乖離させることができる。この時、熱結合は放射が支配的になるため、熱コンダクタンスが小さくなり、実効放射率が小さくなる。一方、高温時には、熱源とラジエータ面を密着させることができる。この時、熱結合は伝導が支配的になるので、熱コンダクタンスは大きくなり、実効放射率も大きくなる。

4. HSRの設計結果

実際に試作したHSRアクチュエータのプロトタイプを図4に示す。このHSRを恒温槽に入れ、10~30℃でアクチュエータの動作確認を行った。その結果、図5に見られるように20~25℃の間で、ラジエータとアクチュエータ本体の密着/乖離の様子を確認することができた。さらに、HSRアクチュエータに使用したSMAばねの電気抵抗率およびばね発生力を恒温槽内で調べた結果を図6、7に示す。電気抵抗率が変化する温度から、SMAの変態

温度(A_s , A_f , M_s , M_f)を決定した。

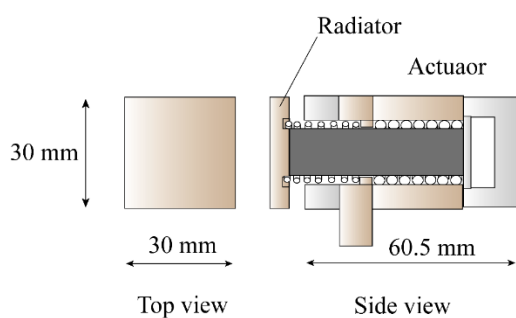
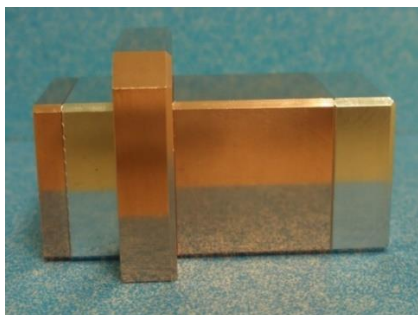


図 4 HSR Prototype.

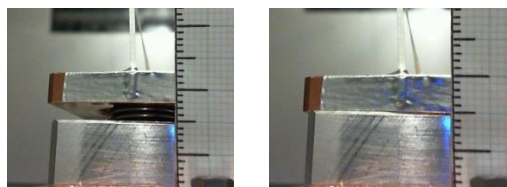


図 5 HSR の動作の様子(左：低温時(20 °C), 右：高温時(25 °C)).

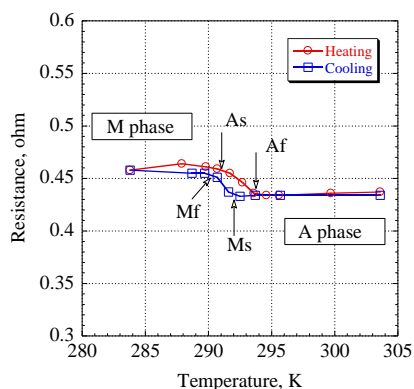


図 6 電気抵抗率の温度依存性.

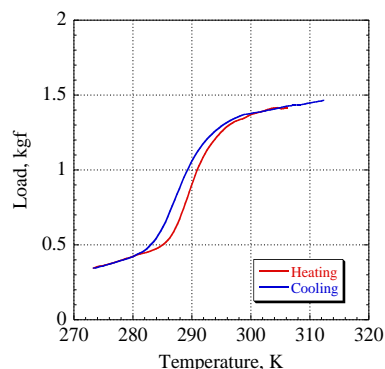


図 7 ばねの発生力の温度依存性.

5. 熱コンダクタンスの測定

HSR の放射率可変熱制御デバイスとしての性能を調べるために、実効放射率を測定する必要がある。しかし、先に述べたように、実効放射率は熱コンダクタンスに寄与して決定されるため、HSR の実際の性能は、ラジエータとアクチュエータ本体の熱コンダクタンスの大きさが重要となる。そこで図 8 の真空チャンバーを用いて、熱コンダクタンスを測定した。チャンバー内は対流による熱伝導効果を無くすため、 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ Torr の高真空状態にした。また、HSR の周囲をヒートシールドで断熱することで輻射による熱交換影響を低減した。ヒータとコールドプレートを用いて、図 9 のよう 1 次元の熱流束を仮定し、アクチュエータ温度、ラジエータ温度を測定し、ヒータ加熱量を 4 端子法によって測定することで、式(1)から熱コンダクタンスを算出した。

$$C = Q / (T - T_{\text{radiator}}) \quad (1)$$



図 8 測定装置.

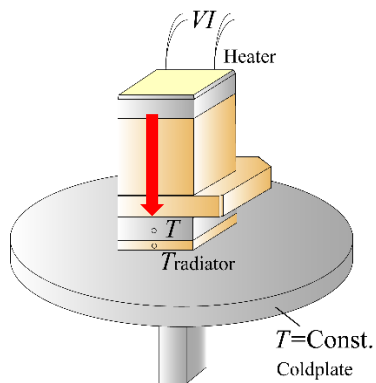


図 9 HSR 内の伝熱の概略図.

測定の結果を図 10 に示す. これより, 密着時には温度が高くなるにつれて熱コンダクタンスが上昇し, 最終的には飽和することがわかった. これは, SMA ばねの発生力に温度依存性があるために, 温度が高くなるほどばねの発生力が大きくなり, 面間の接触面積が増えたためだと考えられる. また, 密着/乖離時で熱コンダクタンスの値が 45 倍ほど変化しているのがわかる. この測定により得られた熱コンダクタンスの値を表 1 に示す.

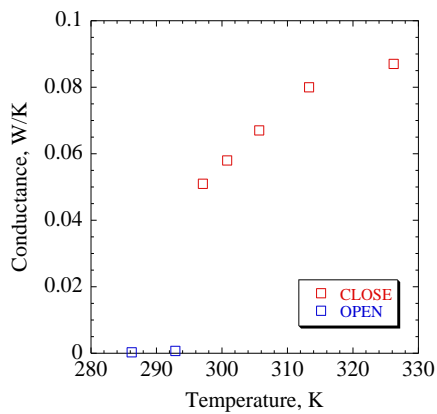


図 10 熱コンダクタンスの測定結果.

表 1 熱コンダクタンスの測定値

	熱コンダクタンス[W/K]
密着時	0.09 (>330 K)
乖離時	0.002 (<280 K)

6. 熱解析による実効放射率の推算

図 11 のように熱解析モデルを作成した. このとき, HSR は, ラジエータ面(-Z 面)以外は完全な断熱状態を仮定し, ラジエータ面と対抗させた 77 K のコールドプレートとの輻射結合から実効放射率の推算を行った. また, HSR の熱コンダクタンスには, 表 1 の値を使用し, ラジエータ面の表面材料は銀蒸着テフロン(放射率 0.76)を用いた.

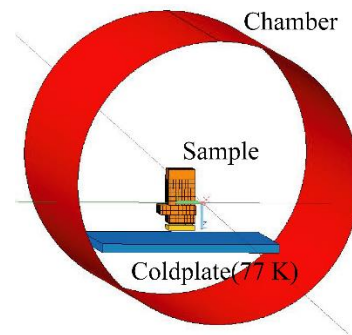


図 11 熱解析モデル.

この解析によって得られた実効放射率の温度依存性を図 12, 表 2 に示す.

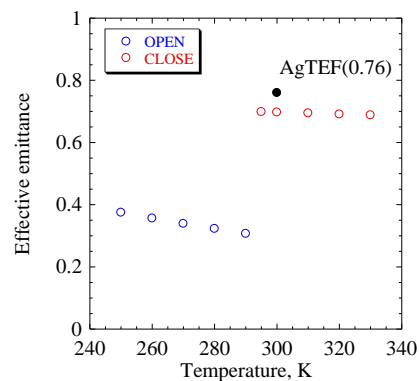


図 12 実効放射率の推算結果.

表 2 実効放射率の推算値

	実効放射率
密着時	0.698 @295 K
乖離時	0.307 @290 K

ここで得られた実効放射率を密着時により大きく、乖離時により小さくするため、HSR に次のような改良を施した。

- (A) 密着時にラジエータとアクチュエータ本体の接触面が異種金属同士であり、接触度が悪くなることから、それを改善するために面間に高熱伝導材として知られるグラファイトシート(200 μm 厚)を挟んだ(図 13 左)。これによって、接触面積を増加させ、熱コンダクタンスの上限値を増加させる。
- (B) 乖離時に、ラジエータとバイアスばねが接触していることにより、熱コンダクタンスが大きくなっていると考え、バイアスばねとラジエータの間にポリイミドフィルム(UPILEX, 125 μm 厚)を挟んだ(図 13 右)。

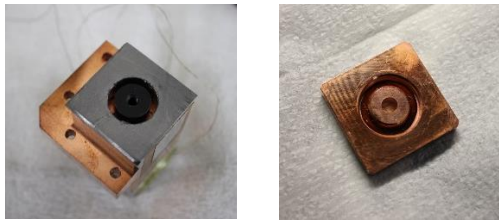


図 13 熱コンダクタンスの改良(左：グラファイトシートの設置，右：ポリイミドフィルムの設置)。

以上の(A)，(B)の改良を行い，再度熱コンダクタンスを測定した結果を図 14，表 3 に示す。密着時および乖離時の熱コンダクタンスの値が約 130 倍以上の変化となり，改善されたことがわかる。

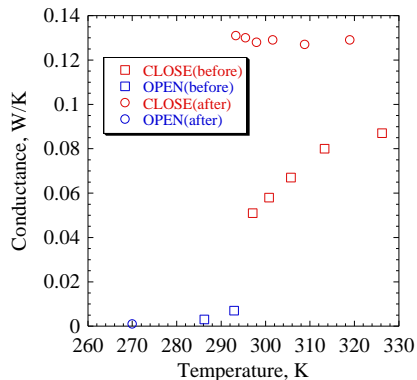


図 14 熱コンダクタンスの測定結果(2)。

表 3 改良前後の熱コンダクタンスの比較。

	熱コンダクタンス[W/K]	
	改良前	改良後
密着時	0.09 (>330 K)	0.13 (>290 K)
乖離時	0.002 (<280 K)	<0.001 (<270 K)

この改善された熱コンダクタンスを使用して，再度熱解析を行った結果，図 15，表 4 のように実効放射率の改善が見られた。

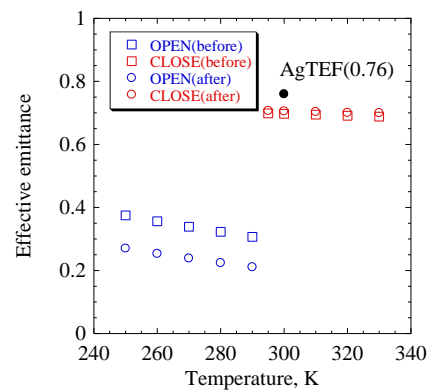


図 15 実効放射率の推算結果(2)

表 4 改良前後の実効放射率の比較。

	熱コンダクタンス[W/K]	
	改良前	改良後
密着時	0.698 @295 K	0.707 @295 K
乖離時	0.307 @290 K	0.211 @290 K

7. 実効放射率の評価

得られた実効放射率の結果に関して，次の評価式を用いて性能評価を行う。

$$\alpha = \varepsilon_{high} / \varepsilon_{low} \quad (2)$$

$$\beta = (\varepsilon_{high} - \varepsilon_{low}) / (T_{high} - T_{low}) \quad (3)$$

式(2)は，放射率の変化量を評価しており，式(3)は，温度変化に対する放射率変化の応答性を評価している。ともに値が大きいほど性能が高いことを表している。

また，HSR と他の放射率可変熱制御デバイスを

式(2)および(3)によって比較し、性能を評価する。比較対象は、HSR と同様に機械式熱制御デバイスであるサーマルルーバとした。サーマルルーバは2種類の異なる金属の熱膨張率差を使ったバイメタルでルーバを開閉することにより実効放射率を変化させるデバイスである。比較した結果を、図 16 および表 6 に示す。

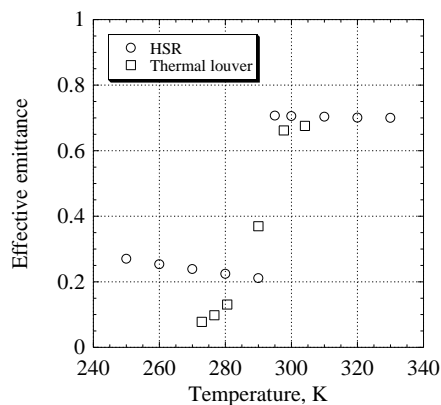


図 16 HSR とサーマルルーバの実効放射率の温度依存性^[5]。

表 5 HSR とサーマルルーバの性能比較。

	HSR	Thermal louvers
ϵ_{high}	0.707 @295 K	0.67 @293 K
ϵ_{low}	0.211 @290 K	0.080 @283 K
α	3.35	8.38
β	0.099	0.059

これより、HSR は、サーマルルーバに比べて、温度に対する応答性がよいこと、そして低温での放射率がサーマルルーバに比べて高いことに起因して放射率変化量が小さいことがわかった。

8. 結論

(1) 今回、ETMS へ組み込むラジエータとして、形状記憶合金を用いて、実効放射率が可変な Heat Switch Radiator を提案・試作した。

(2) HSR の熱コンダクタンスを測定し、さらに、グ

ラファイトシートを用いて密着時における熱コンダクタンスを高くし、ポリイミドフィルム(UPILE X)を用いて乖離時における熱コンダクタンスを低下させた。

(3) 実効熱コンダクタンスの測定結果を用いて熱解析を行ったところ高温で実効放射率が 0.707、低温で実効放射率が 0.211 となった。サーマルルーバと比較し、本デバイスの有用性を確認した。

(4)改善点として、低温での実効放射率をより低下させる必要があることを確認した。現在、ラジエータとアクチュエータ本体が乖離している時の熱コンダクタンスを低下させるための改良を行った HSR 2 号機を製作中である。

9. 参考文献

- [1] 江口駿作, 太刀川純孝, 小川博之, 大川万里生, 齋藤智彦: 単相流体を用いた小型宇宙機用熱マネジメントシステムに関する研究—温度制御特性の評価—, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, (2016).
- [2] 太刀川純孝, 高木龍一: ポリイミドフォームを用いた新しい断熱システムの評価, 第 57 回宇宙科学技術連合講演会予稿集, 2I06, (2013).
- [3] Kota Tomioka, Taisei Honjo, Sumitaka Tachikawa, Kousuke Kawahara and Yuji Nagasaka: Evaluation of Thermal Control Mirror with Tunable Thermo-optical Properties for Radiowave Transmissive Insulation, 46th International Conference on Environmental Systems, (2016).
- [4] 宮崎修一, 大塚和弘: 形状記憶合金の基礎とその応用, 日本繊維機械学会 Vol. 42, No. 11, pp. 5-13, (1989).
- [5] David. G. Glimore: “Spacecraft Thermal Design Handbook Volume I: Fundamental Technologies”, The Aerospace Corporation, (2002).