

B13 可変コンダクタンスヒートパイプを用いた 熱膨張アクチュエータの基礎特性評価

飯野 晶 (早稲田大学), 岡崎 峻 (JAXA), 秋田 剛 (千葉工業大学)
石村 康生 (ISAS/JAXA), 山川 宏 (早稲田大学), 小川 博之 (ISAS/JAXA)
Akira IINO (Waseda Univ.), Shun OKAZAKI (JAXA), Takeshi AKITA (Chiba Inst. Tech.),
Kosei ISHIMURA (ISAS/JAXA), Hiroshi YAMAKAWA (Waseda Univ.) and Hiroyuki OGAWA (ISAS/JAXA)

1. はじめに

最近の宇宙機の開発の傾向として大型化と高精度化が挙げられる。前者は、ミッションの範囲を拡大するために宇宙機の構造要素の開発の傾向にみられる。宇宙機に搭載するアンテナや宇宙望遠鏡の口径、太陽光パドルなどの構造要素はそれ自身の面積が大きいほど高い観測パフォーマンスが行えるようになるために、大型化が進められている¹⁾。一方、後者の例としては X 線天文衛星 ASTRO-H がある。ASTRO-H は最大伸展長さが 14m 程度であることに對し、その指向精度は数十秒角と、その最大伸展長さに対して小さい²⁾。

宇宙機の大型化と観測精度の高精度化を両立させるためのひとつのアイデアとして、アクティブな構造の形状制御の実装が挙げられる。ここで、アクティブな構造の形状制御とは、衛星自身が自らの変形量を感知し、理想値との差を測り、アクチュエータによって補正していくという制御概念のことである。

アクティブな構造の形状制御を採用した場合、アクチュエータの選定が 1つのポイントとなる。現在宇宙機に使用されているアクチュエータは、電動モーターや形状記憶合金など多種多様である³⁾。しかし、どのアクチュエータもメリットとともにデメリットがあり、そのデメリットを補うために設計が複雑になることや、実使用時の制御に制約が出てしまう可能性がある。例えば、電気モーターは、制御はしやすいが、その反面、電気モーター自身が複数のパーツから構成されるため、機構が複雑になってしまう。また、形状記憶合金は任意変形量に正確に制御することが困難になる恐れがある。

そこで筆者らはアクティブな構造の形状制御用アクチュエータに熱膨張を利用したアクチュエータを採用する。これは宇宙機の構造部材、もしくはアディショナルなパーツにヒーターを巻きつけ加熱・熱膨張させることでリニアアクチュエータとして使用するというものである。この熱膨張アクチュエータの最大のメリットは、その構成から機構が単純であることである。加えて、加熱量を操作するだけで任意の変形量に制御することも可能である。以上のことから、今後の宇宙機の形状制御、特にポインティング制御のアクチュエータとして実装されることが期待されている⁴⁾。

これまでに行われた実験・解析により、熱膨張アクチュエータを用いたトラスやスチュアートのプラットフォームの形状制御が行われ、その実用性は示されている^{1),4),5)}。これらの研究の中で、熱膨張アクチュエータの改善点に、形状制御の観点から熱膨張アクチュエータの部材上の温度の均一化を図ること、消費電力を節約するために熱膨張アクチュエータの性能向上などが挙げられている。前者については、中空 Al 棒を熱膨張アクチュエータとして加熱した際、中空 Al 棒上の空間的な温度の分布の偏差が約 10%存在していたという実験結果が報告されている⁵⁾。部材上の温度の分布の偏差は形状制御を困難にする恐れがあるため、部材上の温度の均一性が望まれる。一方で後者は、将来的に熱膨張アクチュエータを実利用する際に、電力制限が課されることを考慮したうえで提示されたものである⁴⁾。

そこで本研究では、熱膨張アクチュエータの機能向上のため、アクチュエータの構造部材に可変コンダクタンスヒートパイプ (VCHP : Variable Conductance Heat Pipe) の使用を提案する。従来、VCHP は熱輸送が目的で使用されることが主であり、構造部材として使用するという試みは新しいと言える。本研究では VCHP の熱特性を利用し、熱膨張アクチュエータの改善点である、加熱後の部材上の温度の均一化と、消費電力 (加熱量) に対する温度上昇量の向上を図る。

2. 可変コンダクタンスヒートパイプについて

ヒートパイプ (HP : Heat Pipe) とは中空のパイプであり、内部にグルーブと呼ばれる溝、またはウィックという目の細かい網を有する。さらに、パイプ内に作動流体という凝縮性の流体が封入されている。一般的に、パイプの一端には電子機器などの熱源が、パイプ中部には断熱材が取り付けられており、もう一端は何も取り付けしていない状態で使用される (図 1)。これらの区間をそれぞれ蒸発部、断熱部、凝縮部と呼ぶことにする。図 1 に示すようにパイプ内の作動流体が移動サイクルを繰り返すことによって、HP は熱輸送を行う。より詳細に説明すると、まず、熱源が発熱を開始すると蒸発部にたまっていた液体の作動流体が熱を受け取り蒸気になる。すると蒸気はパイプ内を移動し、凝縮部へと移動する。そこで蒸気は放熱し、液体になる。液体はグルーブを流れ、蒸発部に戻る⁶⁾。

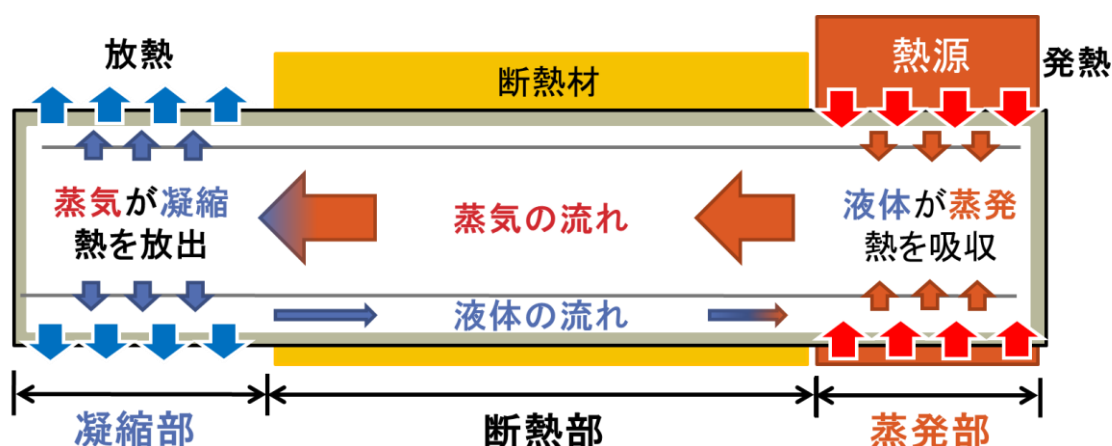


図 1 HP の作動時のイメージ

VCHP の基本的な構造は HP と同じである (図 2)。HP との違いは、VCHP の内部には作動流体に加えて、非凝縮ガスも封入されていること、凝縮部側にリザーバと呼ばれるタンクが接続されていることの 2 点である。VCHP の熱輸送原理も基本的には HP と同じであり、作動流体の流れのサイクルにより熱輸送が行われる。このサイクルによって VCHP 内に拡散していた非凝縮ガスはリザーバとパイプの凝縮部側に吹き寄せられる。この際、パイプ内部は擬似的に作動流体の領域と非凝縮ガスの領域とに界面を隔ててわかる。これにより、作動流体は熱を界面から凝縮部と断熱部との境界までの区間でしか放熱しなくなる。

界面位置は 2 つの領域の圧力によって定まる。蒸発部にかかる加熱量が増せば作動流体の領域の圧力も増し、界面が非凝縮ガスの領域側に移動する。そのため、作動流体の放熱量も増す。パイプを加熱する量が増した分だけ作動流体の放熱量も増すため、結果として作動流体の領域の温度は一定に保たれようとする。蒸発部にかかる加熱量が減少した場合は、先ほどとは逆の現象が生じ、結果として作動流体の領域の温度は一定に保たれようとする⁷⁾。この原理を利用すれば、パイプの蒸発部・断熱部部分の温度均一性を見込める。最終的に、この温度均一性を利用できる VCHP の断熱部と蒸発部の部分をリニアアクチュエータとすることを考えている。

パイプ内に生じる界面はリザーバ側の加熱量を変えることでも移動が可能である。リザーバを加熱すれば、非凝縮ガスの領域の圧力が増し、界面が作動流体の領域側に移動する。結果、作動流体の放熱量は減り、温度が上昇する。この原理を応用すれば、蒸気温度、すなわちパイプ温度を上げたい時にリザーバも加熱することで、リザーバを加熱していない場合よりも温度上昇量・温度上昇速度の上昇が見込める。逆に、リザーバ温度を下げることで、リザーバを加熱した場合よりもパイプの放熱速度を向上させることも予想される。

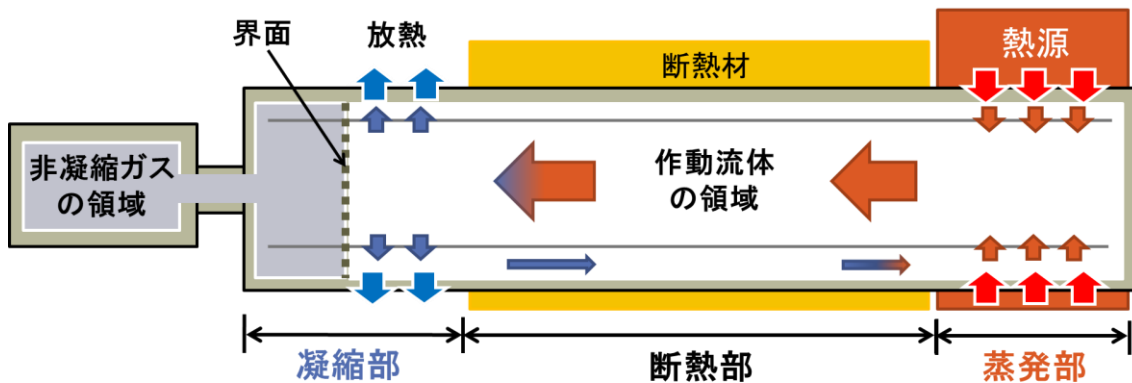


図2 VCHPの作動イメージ

3. 加熱実験による可変コンダクタンスヒートパイプの基礎特性の評価

本研究では、加熱実験を通じて VCHP の基礎特性のうち、(1) 限られた電力（加熱量）の中でアクチュエータのパフォーマンスを向上させることを目的として単位加熱量に対する温度上昇量の評価を行う。また、(2) 形状制御を正確にすることを目的として VCHP の断熱部・蒸発部の温度均一性を評価する。加えて、(3) VCHP のリニアアクチュエータとして性能も評価する。

3. 1 可変コンダクタンスヒートパイプの加熱実験のための実験装置と実験条件の設定

図3に今回使用する実験系を示す。パイプは図3の赤丸で囲った部分でジグと固定している。図3の両白矢印で示した区間は右から、蒸発部、断熱部、凝縮部、リザーバである。蒸発部にはヒーターを巻きつけてあり、加熱することが可能である。また、蒸発部と断熱部には断熱材を巻きつけてある。凝縮部にはラジエータが取り付けられてあり、ファンを用いて強制風を当てている。リザーバには蒸発部と同じように、ヒーターが巻きつけてある。パイプの内部には図4に示すようなグループが彫ってあり、パイプ内には作動流体としてアセトンと非凝縮ガスとして空気を封入している。実験装置の各部位のサイズを表1にまとめて示す。

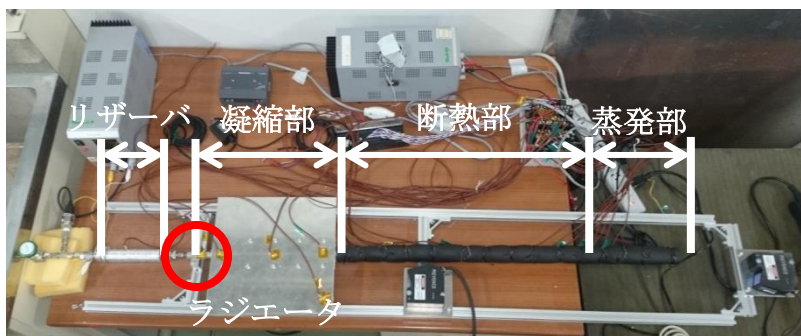


図3 加熱実験用実験装置

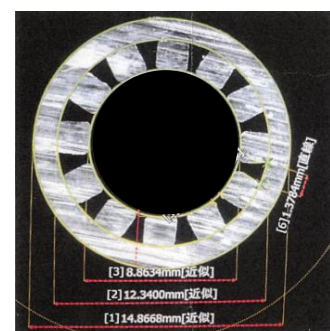


図4 パイプ内部

表 1 実験装置のサイズ
(a) パイプ・ラジエータ・リザーバ

パイプ全長 [mm]	1000	パイプ・外径 [mm]	15
パイプ・蒸発部長さ [mm]	200	パイプ・内径 [mm]	12
パイプ・断熱部長さ [mm]	500	パイプ・グループ径 [mm]	1.7
パイプ・凝縮部長さ [mm]	300	リザーバ内部体積 [mm ³]	5.0×10^{-5}
ラジエータサイズ [mm ³]	250×250×2		

(b) 封入した流体の量

作動流体 (アセトン) [ml]	22	非凝縮ガス (空気) [mol]	9.4×10^{-4}
------------------	----	------------------	----------------------

実験で計測する値は温度とパイプの変形量である。前者は、パイプ上に 18 箇所とリザーバ、室温をそれぞれ熱電対で測定する。蒸発部と断熱部の熱電対は 50mm 間隔で、凝縮部の熱電対は 75mm 間隔で設置してある。後者は、図 3 に示すように、レーザー変位計を 2 箇所に設置し、右側のレーザー変位計でパイプ全体の変形量（蒸発部・断熱部・凝縮部の変形量の和）を、中央のレーザー変位計で凝縮部の変形量を測定する。

本研究ではパイプの蒸発部を加熱したときの温度・変形量の時系列データを測定する。実験時のパイプとリザーバの加熱量の組み合わせは以下の通りである。ただし、リザーバを加熱する場合はあらかじめ一定時間加熱し、定常状態にしておく。

表 2 実験の加熱条件

	加熱時間[s]	パイプ加熱量[W]	リザーバ加熱量[W]	総加熱量[W]
実験①	1800	15	5	20
実験②	1800	20	0	20

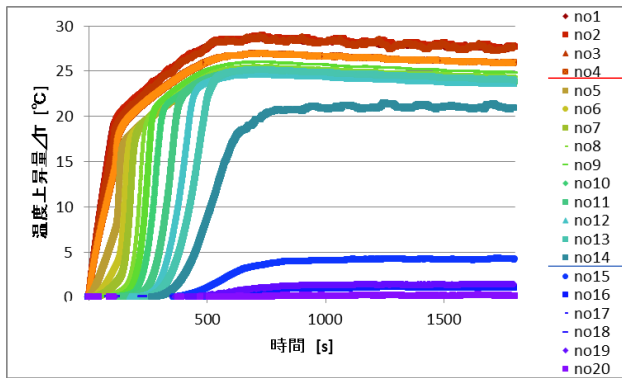
3. 2 可変コンダクタンスヒートパイプの加熱実験の結果と評価

3. 2. 1 単位加熱量に対する温度上昇量の評価

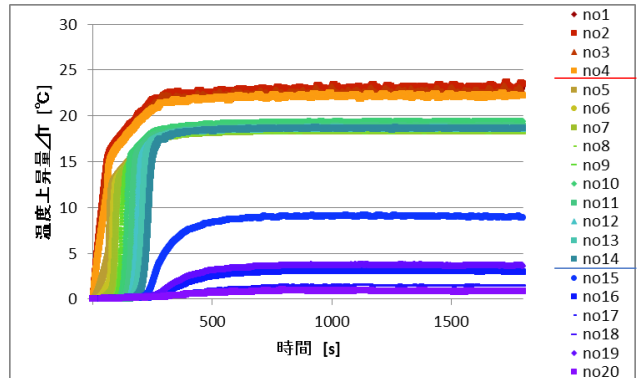
まず、VCHP を加熱した際の単位加熱量に対する温度上昇量の評価を行う。2 種類の実験におけるパイプの温度上昇量変化の時系列データを図 5 に示す。図 5 (a) (b) の no1~no4 は蒸発部、no5~no14 は断熱部、no15~no18 は凝縮部の温度である。

図 5 (a) から実験①では no14 を除く断熱部 (no5~no13) の温度は約 25°C 上昇、対して図 5 (b) から実験②では断熱部 (no5~no14) の温度は約 18°C 上昇していることが確認できる。どちらの実験も系全体に加えている総熱量は 20W だが、実験①の温度上昇量の方が高い。これは実験①ではリザーバを加熱したことにより、非凝縮ガスの内圧が上がり、界面が作動流体の領域側に移動したことで、蒸気の放熱量が減ったことに起因している。

以上の実験結果から、リザーバを加熱したほうが、単位加熱量に対するパイプの蒸発部・断熱部における温度上昇量が増加する場合もあることが確認できた。



(a) 実験①



(b) 実験②

図 5 加熱時間と温度上昇量の関係

3. 2. 2 温度均一性の評価

次に、VCHP の蒸発部と断熱部の温度均一性の評価を行う。加熱開始から 1800s 経過したときのパイプ上の温度分布を図 6 に示す。図 6 から、蒸発部 (no1~no4) と断熱部 (no5~no14) の最大温度差はそれぞれ約 0.5°C、約 2°C と、いずれも温度上昇量に対する平均値に対して 4% 以下の差でおさまっていることが確認できる。従来研究⁵⁾で熱膨張アクチュエータの構造部材として想定していた中空 Al パイプでは空間的な温度の散らばりが約 10% あったことと比較すると、VCHP を使用することにより温度均一性が向上している。

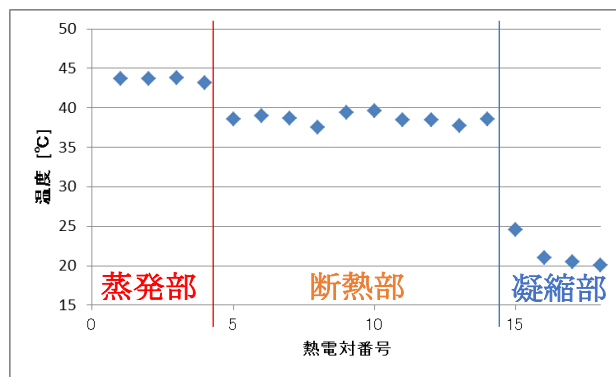


図 6 VCHP のパイプ上の温度分布

3. 2. 3 リニアアクチュエータとしての性能評価

最後に、VCHP のリニアアクチュエータとしての機能の評価を行う。実験②の加熱開始から 1800s 経過時までにパイプ全体および凝縮部が変形した量と、その差から求めた断熱部と蒸発部の変形量との和 Δl を表 3 に示す。実験では、加熱前の蒸発部と断熱部の長さは 700mm、実験を通しての蒸発部と断熱部の温度上昇量はそれぞれ約 23°C、約 18°C に対し、 $\Delta l = 0.343[\text{mm}]$ の出力を得ることができた。

表 3 VCHP の変形量

パイプ全体[mm]	凝縮部[mm]	断熱部+蒸発部 Δl [mm]
0.356	0.013	0.343

さらに、VCHP の変形量と、実験で測定した温度上昇量を用いて計算で求めた熱膨張量との相対誤差を確認する。実験②の加熱開始から 1800s 経過時までに上昇した温度量を用いて断熱部と蒸発部との熱膨張

量の和 Δl を以下の式を使用して計算すると、 $\Delta l = 0.32$ [mm]であった。実験結果と相対誤差を求めると約 6%であり、高い精度で推定することができた。

$$\Delta l = \alpha \sum_{i=1}^{14} l_i \Delta T_i = 0.32 \text{ [mm]}$$

ここで、

熱電対番号 : $i = 1 \sim 14$

Al の熱膨張率 : $\alpha = 23 \times 10^{-6}$ [$1 / ^\circ\text{C}$]

パイプ上の各区間長さ : $l = 50$ [mm]

パイプ上の各区間温度変化 : ΔT_i [$^\circ\text{C}$]

である。

以上より、VCHP のリニアアクチュエータとしての出力の評価と、高い精度での変形量の推定が可能であることが確認できた。

4. まとめ

本研究では熱膨張アクチュエータの加熱対象部材として可変コンダクタンスヒートパイプを提案した。可変コンダクタンスヒートパイプの熱特性を検証するために加熱実験・基礎特性の評価を行った結果以下のような結論を得た。(1) 可変コンダクタンスヒートパイプを加熱する際は、リザーバを加熱したほうが単位加熱量に対するパイプの蒸発部・断熱部における温度上昇量が増加したことが確認できた。この結果を通じて、限られた電力(加熱量)の中でアクチュエータのパフォーマンスを向上させる方法を提案できた。(2) 可変コンダクタンスヒートパイプのリニアアクチュエータとして使用する蒸発部・断熱部の温度の均一性が向上した。これにより、熱膨張アクチュエータの形状制御を今までよりも高精度に行うことが見込める。(3) 可変コンダクタンスヒートパイプのリニアアクチュエータとしての性能を評価できた。

参考文献

- 1) Ryo Koyama, Kosei Ishimura, Akira Iino, Yusuke Funakoshi and Hiroshi Yamakawa, Shape Control of the Stewart Platform with Elastic Hinge Utilizing Artificial Thermal Expansion, ICAST2015 : 26th International Conference on Adaptive Structures and Technologies, 2015.
- 2) 高橋 忠幸, 次期国際 X 線天文衛星 第 26 号科学衛星(ASTRO-H)プロジェクトについて, http://www.astro.isas.jaxa.jp/future/NeXT/news/2008/0820/press/080724_NeXT_SAC1v3.pdf
- 3) 日本機械学会, 機械工学便覧応用システム編 γ 11 宇宙機器・システム、三美印刷株式会社, pp.107 - 120, 2007.
- 4) 船越 裕亮, 石村 康生, 荻 芳郎, 岩佐 貴史, 周期外乱を受けるトラス構造物の高精度なポインティング制御, 第 29 回宇宙構造・材料シンポジウム, 2013.
- 5) 石村 康生, 山川 宏, 飯野 晶, 小山 遼, 岡崎 峻, 小川 博之, 河野 太郎, 船越 裕亮, 秋田 剛, 仙場 敦彦, 大型高精度光学架台の研究メンバー, 光学架台の高精度ポインティング制御の基盤技術開発, 第 30 回宇宙構造・材料シンポジウム, 2014.
- 6) 日本ヒートパイプ協会, 実用ヒートパイプ, 日刊工業新聞社, pp.1 - 15, 2001.
- 7) 大島 耕一, 松下 正, 村上 正秀, ヒートパイプ工学, 朝倉書店, pp.137 - 161, 1979.