

Serf-rewetting 流体によるフレキシブルヒートパイプ伝熱性能向上の検討

田中耕太郎(芝工大)、阿部宜之(産総研)、佐藤正秀(宇都宮大)、飯村兼一(宇都宮大)、麓 耕二(弘前大)、小野直樹(芝工大)、斎藤雅規(OE社)、Raffaele Savino(ナポリ大)、夏井坂誠(JAXA)

Thermal Performance on Flexible Heat Pipes with Self-Rewetting Fluids for Space Radiator

Kotaro Tanaka*, Yoshiyuki Abe, Masahide Sato, Kenichi Imura, Kouji Fumoto, Naoki Ono, Masanori Saitoh, Raffaele Savino, and Makoto Natsuisaka

*Sibaura Institute of Technology, Toyosu, Koto-ku, Tokyo 135-8548

E-Mail: k-tanaka@sic.shibaura-it.ac.jp

Abstract: A lightweight, flexible and deployable heat pipes for space radiator system is discussed in this paper. Heat transfer enhancement method in heat pipes with self-rewetting fluid as working fluid is introduced. Two types of heat pipe panels, single and multi-tube type, were fabricated and tested with four kinds of working fluid, water, 1-butanol aqueous solutions, ethanol aqueous solutions, and surfactant solution. Measured temperature data and behavior of working fluid showed 1-butanol and surfactant solutions are effective in heat transfer enhancement. The improved performance is about 10-20%. The other experimental studies using self-rewetting fluid as working fluid are also reported.

Key words; Space radiator system, Flexible heat pipe, Heat transfer enhancement, Self-rewetting fluid

1. はじめに

宇宙ステーション等による将来の宇宙活動の活性化・宇宙構築物の大型化に伴い、より軽量で大面積に展開する放熱用ラジエタシステム開発は重要課題の1つといえる。本研究では、宇宙環境使用を目的とする超軽量・展開可能なヒートパイプラジエタパネルの開発を目標としている。具体的には、Fig. 1に示すように、二相流体ループにより距離の大きい部分を伝熱させ、次にヒートパイプにより熱を枝分かれさせる。最終放熱面にはカーボン材料を使用したラジエタ面を構築する。ここでヒートパイプとカーボン材料の伝熱特性を長さ30cm程度で比較すると、カーボン材料の熱伝導率500W/(mK)の場合、同じ棒状の同断面面積のヒートパイプは10倍以上の熱を移動させることが可能である。

本研究では、特にSelf-rewetting流体を使用して高温側蒸発部の伝熱性能向上の可能性に注目している。Self-rewetting流体とは、気液界面におけるマランゴニ流を利用して伝熱性能の改善を目的とする流体である。

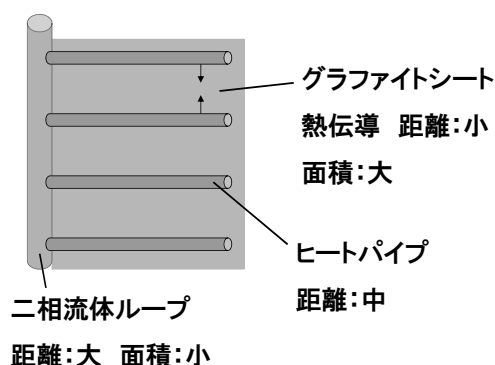


Fig. 1 ヒートパイプパネル放熱器の概要

微小重力環境下において、より大きな効果を発揮することが指摘されている^(1, 2)。本報告では、試作フレキシブルヒートパイプにより、その効果を地上実験において検討した結果を報告する。

2. Self-rewetting 流体の効果

炭素数4以上の高級アルコール希薄水溶液では、表面張力値が温度上昇と共に増加する温度範囲の存在が報告されている⁽³⁾。このような希薄水溶液をヒートパイプ作動液として封入すると、高温側蒸発部における気泡底部において、Fig. 2に示すような温度差マランゴニ効果による伝熱促進効果が期待できる。すなわち、低温部から高温部へと液帰還力が生じる効果により、作動液が気泡底部に回り込む方向で流れることが期待できる。

アルコール水溶液において、蒸発時の気相アルコール濃度は水溶液内より高い。アルコールの選択的蒸発により、気泡底部より離れた界面では相対的に濃度が高く、蒸発が多い気泡底部に近い界面では濃度が低い状

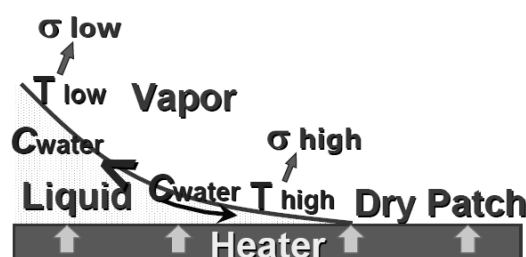


Fig. 2 Self-rewetting 流体による気泡底部に回り込む流れの説明

態となる。その結果、気泡底部より離れた界面の表面張力値は低く、気泡底部に近い界面の表面張力値は高くなり、低温部より高温部へと濃度差マランゴニ流れが生じる。

水では高温部より低温部へのマランゴニ流が逆方向に生じるため、気泡底部への液回り込みによる伝熱促進は期待できない。温度差マランゴニ効果と濃度差マランゴニ効果が同時に作用する機能流体がSelf-rewetting流体と呼ばれ、本研究ではその伝熱促進の改善に注目している。

3. ヒートパイプ性能評価

本研究のヒートパイプは2枚の高分子膜シートを貼り合わせ、一部貼り合わせない部分が加熱時の昇圧で膨れてヒートパイプ流路となる構造を採用している。膨れる流路は直線形状で、幅12mm、長さ260mmである。幅12mmの部分は膨れると内径8mmの管状となる。この直線状流路を単流路と呼ぶ。

流路形状としてもうひとつ複流路と呼ぶ形状を作製した。複流路は幅160mm、長さ270mmの長方形シートに単流路を4本、間隔40mmで並べたものである。複流路ヒートパイプを実験装置に組み込んだ様子をFig. 3 に示す。複流路4本の流路は低温側で横方向に接続されている。

シート材料にはポリイミド材料(UPILEX)を使用した。またポリイミド材料に柔軟なグラファイトシート(Panasonic PGS-EYG)を貼付した Fig. 4 に示すヒートパイプも作製した。

また本研究では、地上大気圧条件で作動する膨張式でないフレキシブル構造ヒートパイプを作製している。この構造をFig. 5に示す。内部の減圧でつぶれないようにプラスチック製の柱構造となっている。

これらのヒートパイプは、高温側、低温側の温度測定、熱移動量の測定により評価される。高温側は電気加熱、低温側は恒温槽の水循環による温度制御を行い、設定温度とした。熱移動量はヒータ加熱量と熱流束センサーにより測定した。

4. 伝熱性能の測定結果

作動流体の種類を変化させた際の熱移動量の測定結果をFig. 6に示す。ヒートパイプは、地上大気圧用(Fig. 5)で、つぶれない構造のヒートパイプを水平状態とした際の測定結果である。高温側温度を30℃から60℃に変化させた際の熱移動量は、最大で7W程度である。高分子材料を用いた場合は、通常の銅ヒートパイプと比較して高熱流束が得られないことが理解できる。これは、高・低温側の包装高分子材料の厚さと熱伝導率に熱移動



Fig. 3 ヒートパイプ伝熱評価装置
(右側が高温側ヒータ部、左側が銅水冷部)

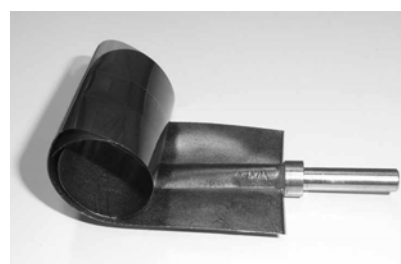


Fig. 4 膨張展開式フレキシブルヒートパイプ
(ポリイミド+グラファイトシート付)

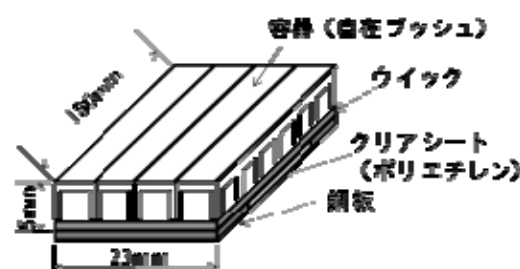


Fig. 5 地上用途用非膨張式ヒートパイプの構造

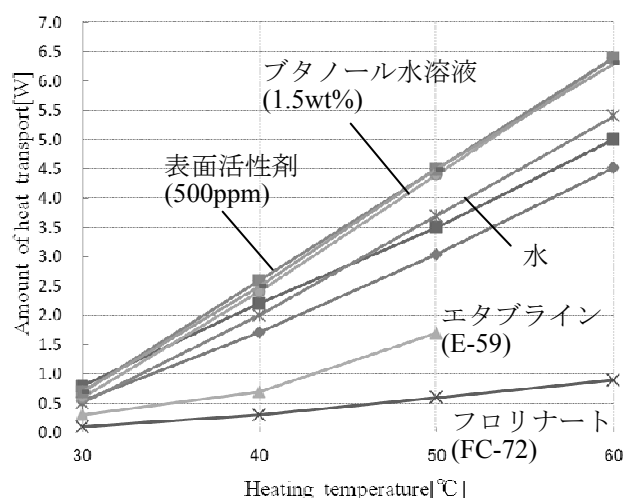
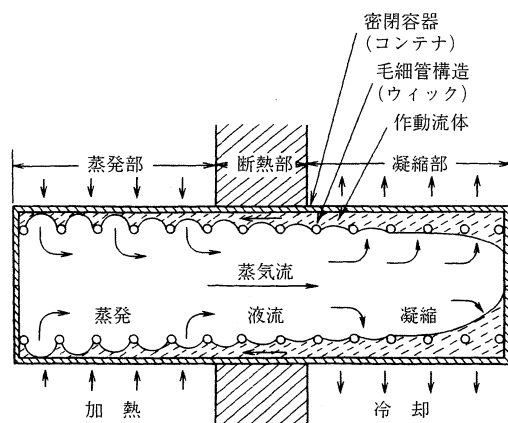


Fig. 6 作動媒体を変化させた際の性能
(地上用途用ヒートパイプ: ウイック有り)

Fig. 7 ウィックヒートパイプ内の作動媒体⁽⁴⁾

が制約されるためである。しかし、宇宙展開型ラジエタへの応用の際には低温側放熱面積は十分大きくなる。そのため、この熱伝導による制約条件は設計により緩和することが可能といえる。

本測定結果より作動媒体をフロリナート(FC-72)、エタブライン(E-59)とした際の性能は水と比較して低いことが理解できる。一方、ブタノール水溶液(1.5wt%)と表面活性剤(500ppm)は、10-20%程度性能が高まる結果を得た。

性能向上の理由に関して、ブタノール水溶液では、先に説明したSelf-rewetting流体の効果による気泡底部における伝熱促進の可能性がある。しかし、ウィック付きヒートパイプ低熱流束時では、ウィック内の液は、Fig. 7のようにウィック内を満たす形で存在すると考えるのが通常である。作動液はウィック隙間に液膜として存在し、高温側から液表面の界面より蒸発するモデルである。一方、今回の結果より、ウィックが存在する低熱流束時の場合でも、高温側で気泡発生が生じていると考えられる。その際にSelf-rewetting流体の効果が発現し、水と比較して性能向上した測定値が得られたと考えられる。

Fig. 8 は、ブタノール水溶液の濃度を1wt%～3wt%まで変化させた際の性能測定結果である。1.5wt%の測定値だけが大きく、他の濃度は水とほぼ同じ測定値となる結果となった。この理由は現在未解決である。ヒートパイプ内に形成される濃度差を含めた考察の必要がある。ここで1.5wt%の測定は2回行なって同じ測定結果を得ており測定された性能差には理由が存在すると考えている。

Fig. 9 は、界面活性剤の濃度を100 ppm～3000 ppmまで変化させた際の性能測定結果である。いずれの濃度でも水と比較して性能向上が測定されている。しかし、濃度と性能向上の関係は今後の検討が必要である。界面活性剤の液相内における濃度分布は、特に表面近傍の濃度に特異な性質があり、その影響が関係しているといえる。

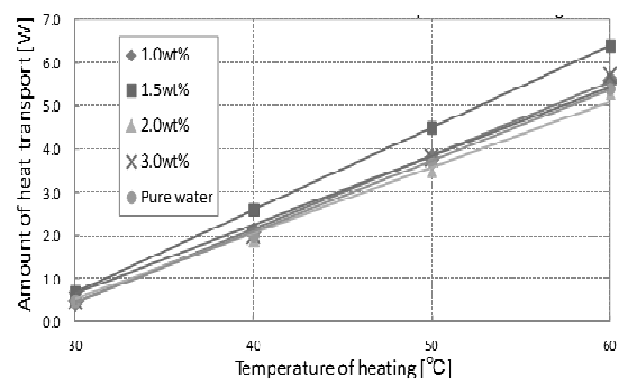


Fig. 8 ブタノール水溶液の濃度の影響

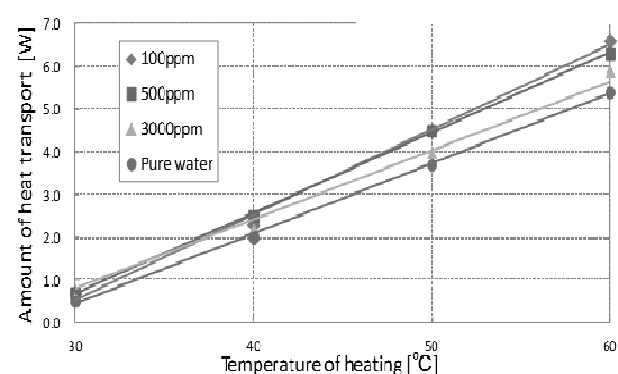


Fig. 9 界面活性剤の濃度の影響

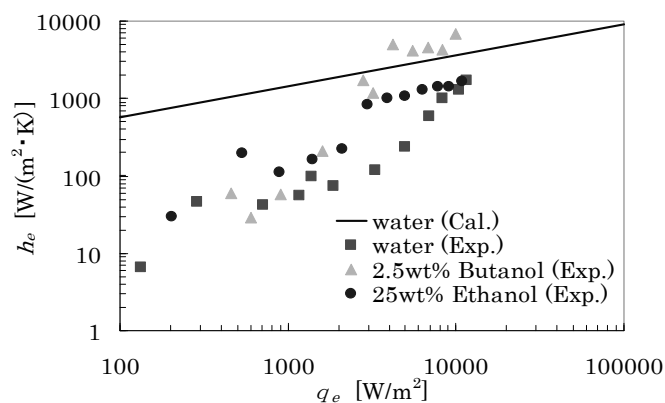


Fig. 10 ブタノール、エタノール水溶液濃度の高温側熱伝達率への影響

高温側部分だけの熱伝達率の測定結果をFig. 10に示す。ヒートパイプは膨張型、垂直固定、ウィックなしの際の測定結果である。ヒートパイプ下部に液が溜まるヒートサイホン状態における測定値である。熱伝達率を求める際の温度差は、高温側壁外面温度より内面温度を算出し、ヒートパイプ中央部の測定値との差とした。

水の測定結果と比較すると、ブタノール水溶液、エタノール水溶液ともに熱流束が3000W/m²～10000W/m²程

度の範囲で性能差が顕著であり、その前後では差は小さいことが理解できる。この理由も今後の検討課題である。図中の直線は、井村らによる鉛直ヒートパイプ内の沸騰熱伝達率の整理式⁽⁵⁾で、水の物性値を用いた計算値である。10000W/m²以上の領域で水の測定結果をよく近似することが報告されている。本結果はそれ以下の領域であるが、計算値と測定値は一致する傾向が測定されている。

5. 表面張力流利用デバイス研究会による研究成果

今回のヒートパイプ内伝熱の実験結果を考察すると、アルコール水溶液、界面活性剤により伝熱性能の向上が期待できることが理解できる。Self-rewetting流体の効果は、気液界面において生じるため、高温側沸騰熱伝達の変化の効果が大きいと考えている。高温側熱伝達率への影響は、熱流束の大きさに関係している可能性が実験結果より得られた。濃度と性能向上の関係なども解明すべき点である。

アルコール水溶液を用いた伝熱性能向上に関する実験は、共著の研究者らにより、最近精力的に行なわれている。これらは地上技術における電子機器等の高熱流束除去をはじめ多くの応用用途がある。

大内・阿部ら(産総研)は、ヒートパイプ内の可視化実験を行ない、アルコールと界面活性剤の水溶液は高温側における気泡発生で気泡径の小さくなることを確認している。ヒートパイプ熱抵抗値は大きく影響されず、最大熱輸送限界がSelf-rewetting流体により大きく改善されることを報告している⁽⁶⁾。

小野(芝工大)は、T字細管(φ7 mm)内の衝突流れの沸騰現象を詳細に検討している。水とブタノール水溶液を比較すると、低熱流束範囲で水の熱伝達率は優れるが、水の最大熱輸送限界以上の領域でブタノール水溶液の熱伝達率が優れる範囲が存在し、また最大熱輸送限界が大きく改善されることを報告している。二相流動が異なることを報告している⁽⁷⁾。

佐藤、飯村ら(宇都宮大)は微粒子、銀・金ナノ流体などによるヒートパイプ性能との関連を測定している^(8,9)。

麓(弘前大)は、自励振動ヒートパイプにブタノール、ペンタノール水溶液を用い、その影響を測定している。各種濃度における測定結果は水より優れるが、濃度と熱伝達率向上の関係は単純ではないことを報告している⁽¹⁰⁾。

6. Self-rewetting流体の効果と微小重力場に関して

サビーノ(ナポリ大)は、SELENE ISS においてSelf-rewetting流体の微小重力下の伝熱実験を計画している⁽¹¹⁾。溝付きヒートパイプでのマランゴニ効果と伝熱の関係が測定される。微小重力環境下においては、気液

二相界面に働く力はマランゴニ流が顕著と考えられ、地上実験では得られない貴重な情報が得られることが期待できる。

7. おわりに

アルコール水溶液、界面活性剤を作動媒体とすると、ヒートパイプ内の伝熱性能の向上が期待できる結果が本研究で得られた。しかし、表面張力流利用デバイス研究会メンバーによる他の実験では、性能向上が認められる結果と認められない結果の両者が報告されている。Self-rewetting流体の効果を確実に発現するためには、溶液の種類、濃度、伝熱面形状、濡れ、温度・熱流束の範囲など多くの影響の知見を今後集積して検討する必要がある。

ヒートパイプ内ではウイック材質・形状が大きく影響する可能性がある。今後の検討課題である。微小重力実験が可能となると、気液二相現象はより大きなスケールで、ゆっくりとした現象で本研究会の目的とする現象が把握できるといえる。メンバー間の情報の集積に加え、微小重力実験手法の提案を行なう勉強会の活動を継続的に行う計画である。

表面張力流利用デバイス研究会の活動は初年度で開始された段階にある。現状におけるSelf-rewetting流体の現象の把握には、残されている課題が多いが、地上技術への広い展開応用が期待される分野である。今後、宇宙・地上利用を含めてその開発が必要といえる。

参考文献

- 1) Abe, Y., 他5名, *Proc. 9th AIAA/ASME Thermophys. Heat Transfer Conf.*, No. 2006-3105 (2006).
- 2) Tanaka, K., 他4名, *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1161, p.554-561(2009).
- 3) Savino, R., 他6名, *Proc. 38th ICES*, 081CES-0066 (2008).
- 4) 日本ヒートパイプ協会, 実用ヒートパイプ, 日刊工業新聞, p.7 (2001).
- 5) 井村, 他4名, *日機論(B)*, 45-393 p.712-722(1979).
- 6) 大内, 阿部, 林, 與倉, *熱工学コンファレンス講演論文集*, p.89-90 (2011).
- 7) Obara, K., Ono, N., 他2名, *Proc. 4th HTFFM*, IV-35, (2011).
- 8) Satoh, M., 他5名, *Int. J. Transport Phenomena*, 12,3-4, p.339-345 (2011).
- 9) 東, 飯村, 他6名, *63回コロイドおよび界面化学討論会講演要旨集*, (2011).
- 10) 麓, 川路, *Thermal Science & Engineering*, 19-1, p.1-7(2011).
- 11) Savino, R., 他9名, *J. Physics*, 37-012032, p.1-13 (2011).