

伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692 Vol. 64, No. 266
2025. 1

Thermal Science and Engineering

ISSN 0918-9963 Vol. 33, No. 1
2025. 1



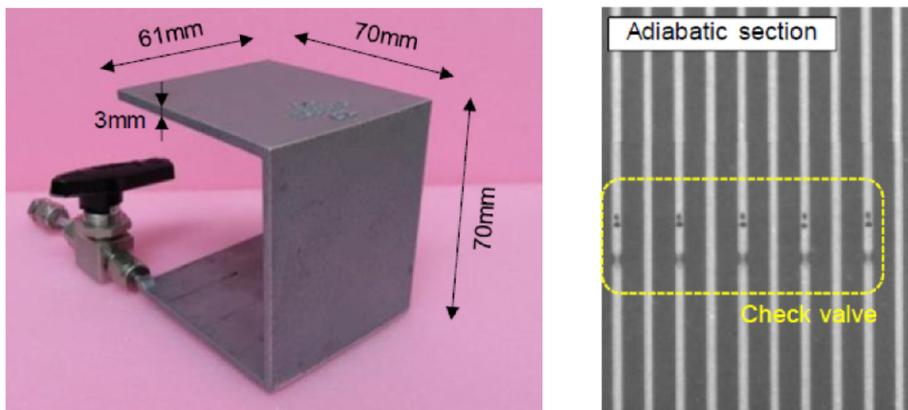
◆特集：ヒートパイプ研究の最前線

名称	ループヒートパイプ LHP	自励振動 HP OHP/PHP	ループ式サイフォン LTS	ベーパーチャンバー VC
原理	毛細管現象	自励振動	重力	毛細管現象
図				

次世代ヒートパイプファミリー
(特集記事「ヒートパイプ技術の進展と動向 (長野方星)」より)



超薄型ヒートパイプ内の可視化
(特集記事「超薄型ヒートパイプ/超薄型ベーパーチャンバー (齋藤祐士)」より)



3D プリンタで造形した振動流型ヒートパイプ
(特集記事「宇宙用ヒートパイプ (岡本篤)」より)

伝 熱

目 次

〈巻頭グラビア〉

長野 方星 (名古屋大学), 齋藤 祐士 (フジクラ), 小糸 康志 (熊本大学), 岡本 篤 (宇宙航空研究開発機構) ……………	表紙裏
---	-----

〈特集：ヒートパイプ研究の最前線〉

特集「ヒートパイプ研究の最前線」にあたって ……………	小糸 康志 (熊本大学) ……………	1
ヒートパイプ研究の進展と動向 ……………	長野 方星 (名古屋大学) ……………	2
超薄型ヒートパイプ/超薄型ベーパーチャンバー ……………	齋藤 祐士 (フジクラ), 小糸 康志 (熊本大学) ……………	7
ループヒートパイプ ……………	西川原 理仁 (名古屋大学) ……………	16
自励振動型ヒートパイプ ……………	麓 耕二 (青山学院大学), 永井 大樹 (東北大学) ……………	24
ヒートパイプの作動液としてのナノ流体の利用 ……………	大川 富雄 (電気通信大学) ……………	32
ヒートパイプの応用/実用例 ……………	齋藤 祐士 (フジクラ) ……………	38
宇宙用ヒートパイプ ……………	岡本 篤 (宇宙航空研究開発機構) ……………	44

〈会議報告〉

第5回ナノ・マイクロ熱ふく射に関する国際ワークショップ (NanoRad2024) 開催報告 ……………	宮崎 康次 (九州大学), 江目 宏樹 (山形大学), 櫻井 篤 (新潟大学), 磯部 和真 (岡山大学), 藤井 宏之, 戸谷 剛 (北海道大学) ……………	50
---	---	----

〈行事カレンダー〉 ……………	55
-----------------	----

〈お知らせ〉

第62回 日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集 ……………	57
HTSJ 国際伝熱シンポジウム開催のご案内 ……………	57
優秀プレゼンテーション賞 (第62回日本伝熱シンポジウム) について ……………	61
編集出版部会からのお知らせ ……………	62

〈編集出版部会ノート〉 ……………	66
-------------------	----

CONTENTS

< Opening-page Gravure: heat-page >

Hosei NAGANO (Nagoya University), Yuji SAITO (Fujikura Ltd.),
Yasushi KOITO (Kumamoto University), Atsushi OKAMOTO (JAXA) Opening Page

< Special Issue: Recent Advances in Heat Pipe Research and Development >

Preface to “Recent Advances in Heat Pipe Research and Development”
Yasushi KOITO (Kumamoto University) 1

Advancement and Trends in Heat Pipe Technology
Hosei NAGAGNO (Nagoya University) 2

Ultra-thin Heat Pipes / Ultra-thin Vapor Chamber
Yuji SAITO (Fujikura Ltd.), Yasushi KOITO (Kumamoto University) 7

Loop Heat Pipes
Masahito NISHIKAWARA (Nagoya University) 16

Pulsating Heat Pipe
Koji FUMOTO (Aoyama Gakuin University), Hiroki NAGAI (Tohoku University) 24

Utilization of Nanofluids as Working Fluid in Heat Pipes
Tomio OKAWA (The University of Electro-Communications) 32

Examples of Heat Pipe Application and Practical Use
Yuji SAITO (Fujikura Ltd.) 38

Heat Pipes for Space Applications
Atsushi OKAMOTO (JAXA) 44

< Conference Report >

Organizing Report on 5th International Workshop on Nano-Micro Thermal Radiation (Nano Rad2024)
Koji MIYAZAKI (Kyushu Institute of Technology),
Hiroki GONOME (Yamagata University),
Atsushi SAKURAI (Niigata University),
Kazuma ISOBE (Okayama University),
Hiroyuki FUJII, Tsuyoshi TOTANI (Hokkaido University) 50

< Calendar > 55
< Announcements > 57
< Note from the JHTSJ Editorial Board > 66

特集「ヒートパイプ研究の最前線」にあたって

Preface to "Recent Advances in Heat Pipe Research and Development"

小糸 康志 (熊本大学)

Yasushi KOITO (Kumamoto University)

e-mail: koito@gpo.kumamoto-u.ac.jp

本誌の2012年10月号で特集「古くて新しいヒートパイプ」が組まれました。当時、日本ヒートパイプ協会の会長を務められていた、早稲田大学の勝田正文先生を中心に記事の執筆作業が進められ、ヒートパイプ技術最近の進展、ヒートパイプの理論、ヒートパイプの設計、ヒートパイプの製造と試験、各種熱輸送デバイスをテーマとして特集記事がまとめられました。ヒートパイプ研究に携わる研究者や技術者は勿論のこと、これからヒートパイプ研究に携わろうとする方々に対しても有益で貴重な情報がまとめられており、著者も参考にさせていただいています。

2012年の特集から10年以上が経ち、新しいヒートパイプの研究開発や実用も進んでいることから、再度、本誌においてヒートパイプに関する特集を組むことになりました。この10年間で、例えば、スマートフォンの発熱問題を背景に、それまで無かった超薄型のヒートパイプの開発が進み、非常に多くの論文が発表されています。また、3Dプリンターなど、ヒートパイプの研究開発に新たな手法が用いられています。このような最近の研究動向と2012年の特集の内容を踏まえ、今回は「ヒートパイプ研究の最前線」と題し、ここ10年のヒートパイプ研究を中心に特集記事を組むことになりました。

特集記事の執筆に当たり、2012年の特集と同じく、日本ヒートパイプ協会 (<https://www.jahp.jp/>) に協力を依頼しました。現在会長を務められている名古屋大学の長野方星先生にご快諾いただき、日本ヒートパイプ協会の理事会で特集記事のテーマについてご審議いただくとともに、主に理事の方々に執筆をお願いすることになりました。

名古屋大学の長野方星先生には、ヒートパイプの進展と分類について記載いただくとともに、非常に多くの書誌情報を分析いただき、ヒートパイプに関する世界の研究開発動向をまとめていただ

きました。

株式会社フジクラの齋藤祐士氏には、超薄型のヒートパイプとベーパーチャンバーについて、ウィック式のものを対象として産業界での開発例を紹介いただきました。また、小糸の方で超薄型のヒートパイプとベーパーチャンバーの学術分野における研究動向を紹介させていただきました。齋藤祐士氏には、産業界において豊富な経験を持たれていることから、ヒートパイプの応用/実用例についても具体例を挙げて紹介いただきました。

名古屋大学の西川原理仁先生には、ループヒートパイプについて、高性能化や多機能化、現象解明を目的とした基礎研究から民生分野への応用を目的とした応用研究まで、幅広い研究を紹介いただきました。

青山学院大学の麓耕二先生、東北大学の永井大樹先生には、自励振動型ヒートパイプについて、各種パラメータの影響について記載いただくとともに、メカニズム解明のための研究事例と特殊機能を有するデバイスについて紹介いただきました。

電気通信大学の太田富雄先生には、近年注目を集めているナノ流体を作動液とするヒートパイプについて既存研究を概観いただくとともに、ヒートパイプのコンテナにナノ粒子層を形成した新しいヒートパイプについて紹介いただきました。

宇宙航空研究開発機構の岡本篤氏には、宇宙利用の観点から執筆いただき、軸方向溝ヒートパイプ、振動流型ヒートパイプ、ループヒートパイプの宇宙利用における開発例と実用例を紹介いただきました。

今回の特集にあたって、第一線で活躍されているヒートパイプの研究者7名の方々に協力いただくことができました。末筆になりますが、ご多忙中にもかかわらず、特集記事の執筆をご快諾いただき、貴重な記事を提供いただきました執筆者の皆様には厚く御礼申し上げます。

ヒートパイプ技術の進展と動向 *Advancement and Trends in Heat Pipe Technology*

長野 方星 (名古屋大学, 日本ヒートパイプ協会会長)
Hosei NAGANO (Nagoya University)

1. はじめに

ヒートパイプ技術は、その発明から約 60 年が経過し、現在では宇宙分野からエレクトロニクス、自動車、通信機器に至るまで、幅広い産業分野に普及が進んでいる。金属材料よりも軽く、それでいて金属の何十倍も熱を伝えるヒートパイプは多くの研究者を魅了し、その現象理解や設計モデルの確立に向けた研究が進められてきた。また、その研究の過程において新たな動作原理を持つヒートパイプや、これまでの常識を超える超薄型や超長尺のヒートパイプなどが考案され、新たな学術研究領域が展開されつつある。さらに、近年はカーボンニュートラル社会の実現に向けた取り組みが進む中で、放熱の省電力化や熱エネルギーの有効利用が強く意識されるようになり、無電力の放熱・熱搬送技術として、ヒートパイプが再び注目されている。

本稿では、ヒートパイプ技術の発展の歴史、国内外の研究開発動向、および将来の展望について、有識者からの情報や書誌データに基づいて概観する。

2. ヒートパイプの進展

ヒートパイプの研究開発の歴史、特に産業的発展とその中での日本の企業や研究者の活躍については、元フジクラの望月正孝氏のご自身の豊富な経験を元に丁寧にまとめられている。本節では、望月氏から個人的に提供いただいた資料[1]を、氏の許可のもと引用させていただく。

1963 年以前にはパーキンスチューブや熱サイフォンの特許があったものの、実質的には 1963 年に Grover によるヒートパイプの発明が、その歴史の始まりと言える。1960 年代のヒートパイプ基礎研究を契機に、アメリカでは人工衛星への利用が始まった。1976 年には McDonnell Douglas 社が

アラスカ石油パイプラインに低温ヒートパイプ 12 万 2 千本を設置し、基礎融解防止として初の大規模な実用化が行われた。

1980 年代はヒートパイプの黄金時代であった。日本では、東京大学の 大島耕一教授を中心に基礎研究が進み、Navier-Stokes 方程式をヒートパイプの熱流動解析に応用する試みを行った。また、早稲田大学の柴山信三教授はヒートパイプの基礎研究に、熊本大学の井村英昭教授はサーモサイフォンの伝熱実験式に取り組んだほか、工業技術院の山本格博士は高温用ナトリウムヒートパイプを研究し、日本の底力を示した。産業界では鈴木金属工業が日本で初めて銅・水ヒートパイプの生産と販売を開始し、産業用や家庭用として金型冷却や均熱化、包装機、繊維機械、熱交換器、卓上コンロのボンベ加熱などの実用が始まった。鈴木金属工業の本田一郎氏による独自のアイデアが多く盛り込まれており、その後フジクラに事業が継承された。

1982 年には大島耕一を会長として日本ヒートパイプ協会が設立され、30 社以上の法人会員を集めた。三菱電機、東芝、NEC は人工衛星の電子機器冷却に、古河電気工業はオーディオ用パワートランジスタの冷却に、昭和アルミニウムは空調用熱交換器に、フジクラは融雪用途にと、ヒートパイプの普及が進み世界で競争力を発揮した。アメリカでは Thermocore と Norren Product の 2 社しかなかった。またヨーロッパではヒートパイプ産業がほとんど発展しなかった。

1990 年代にはヒートパイプ産業は大きく変化する。1994 年、インテルが 64bit CPU 「Merced」の発熱 (130W) に対応するため、初めてベーパーチャンバーと高密度フィンのヒートシンクが採用された。これらの冷却には古河電工とフジクラの製品が用いられた。同年、インテルの Pentium 32bit プロセッサが登場し、CPU の発熱増加に伴いノー

トブック PC に小型ヒートパイプが大量に使用され、古河電工とフジクラが市場をリードした。世界初のヒートパイプ搭載 PC は DEC のノート PC と記憶され、月産 1,000 万本といった大規模生産のピークを迎えた。IBM、ヒューレットパカード、デル、アップル、日本の東芝、NEC、ソニー、松下電器、日立、三洋電機、シャープなども一斉に採用を進めた。その後、日本企業は古河電工が中国に、フジクラがタイに生産拠点を移し、自動化した大量生産システムを構築した。一方、アメリカでは Thermocore が台湾に生産拠点を移したが、成功には至らなかった。

1997 年頃、日本の PC メーカーが台湾の OEM・ODM に設計・生産を委託し始めると、ヒートパイプの納入先は台湾へ集中した。台湾 PC メーカーは当初、日本製のヒートパイプアセンブリを購入する必要があったが、1990 年代後半には台湾ローカルメーカーの成長が始まり、CCI, Auras, Foxconn などがアセンブリ生産を行うようになった。結果として、日本メーカーはヒートパイプの単品供給に切り替えた。台湾進出を試みた Thermocore は事業不振により撤退し、その生産設備が台湾に残されたことで、コピー設備が現れ、CCI や Auras などが自社生産を開始した。しかし台湾製ヒートパイプは機械化・自動化が遅れていたため、多くのトラブルを引き起こした。

2000 年代後半になると台湾メーカーは中国に進出し、続々と生産拠点を移した。日本メーカーは台湾や中国製品と差別化を図るため、ベーパーチャンバーや薄型ヒートパイプに特化し、サーバーや薄型ノート PC 向け冷却に集中した。2000 年代後半にはトヨタのプリウスをはじめとする自動車の LED 冷却にヒートパイプが採用されるようになった。

2010 年代に入るとさらに新たな局面を迎えた。2013 年 11 月には NEC が世界初のヒートパイプ冷却を採用したスマートフォンを発売し、2014 年には発熱 5W を超えるソニーの Xperia などにも搭載された。さらに、サムスン、LG、マイクロソフトのスマートフォンにも普及が進み、日本メーカーの薄型ヒートパイプが評価された。しかし他のヒートパイプ製品と同様に、スマートフォンも台湾や中国製のヒートパイプへ置き換わっていき、高発熱 CPU 向けには超薄型ベーパーチャンバーが搭

載されるようになった。また、薄型タブレット PC でも 30W の CPU 冷却に薄型ヒートパイプが使用されるようになった。

2020 年代に入ってもスマートフォンのヒートパイプ冷却は続き、新たな市場として電気自動車も注目されている。リチウムイオン電池、モーター、インバータの冷却に今後ヒートパイプの需要がさらに高まると期待される。加えて、データセンターやスーパーコンピュータにおける低熱抵抗ヒートパイプ冷却も必要とされている。理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」や「富岳」には、マイクロチャンネルコールドプレートとメモリ冷却用のヒートパイプが組み込まれ、エクサスケールの計算速度が実現された。

(望月正孝氏 個人提供資料[1])

これは、ヒートパイプ開発の黎明期から深く関わり、その歴史をまさに築いてきた方ならではの臨場感あふれる貴重な記録である。

3. ヒートパイプの分類

ヒートパイプの研究開発の初期段階では、主に毛細管現象を利用したウィック式ヒートパイプと、重力を利用したサイフォン式ヒートパイプの 2 種類に分類されていた。その後、ヒートパイプの限界突破やデメリットを克服する形で、あるいは偶発的な形で新しい原理や構成のヒートパイプが誕生し、多様な用途に対応できるようになりつつある。表 1 に従来のヒートパイプから派生したヒートパイプファミリーをまとめる。

まず、ループヒートパイプ (Loop Heat Pipe, LHP) は、ウィック構造を受熱部 (蒸発器) のみに有し、あとは平滑な管で構成される一方向循環型のヒートパイプである[2]。従来のヒートパイプにおける飛散限界がなく、またウィックが蒸発器のみに存在するため、ウィックでの圧力損失が低く抑えられ、細孔径を μm オーダーまで小さく (毛細管力を大きく) できることが特長である。本技術は 1970 年に旧ソ連の Gerasimov と Maydanik が発明したとされている。それより少し前にアメリカの Stenger がキャピラリーポンプルーブ (Capillary Pumped Loop, CPL) を発明している。LHP と CPL の主な違いはリザーバの位置であり、それ以外の構造および動作原理は同じである。現

表1 次世代ヒートパイプファミリー

名称	ループヒートパイプ LHP	自励振動 HP OHP/PHP	ループ式サイフォン LTS	ベーパーチャンバー VC
原理	毛細管現象	自励振動	重力	毛細管現象
図				

在は LHP が主流になりつつある。

自励振動型ヒートパイプ (Oscillating Heat Pipe, OHP または Pulsating Heat Pipe, PHP) はパイプ内の液体と蒸気の相変化による自律的な振動を利用しており、従来の毛細管現象や重力を用いたヒートパイプとは原理から異なっている[3]. OHP は日本で発明された技術であり 1990 年に赤地らによって提案された。ウィックを必要としないため構造がシンプルであるが、循環流を促進するために逆止弁構造などを設けることが提案されている。物理現象が複雑であることから、現在も多くの研究者が現象解明やその数理表現に取り組んでいる。

ループ式サーモサイフォン (Loop Thermosyphon, LTS) は重力のみで駆動できる循環型熱輸送技術であり、従来のサイフォン式のヒートパイプのフラiddingを解消することができ、大型なシステムへの適用が期待されている[4]. 1980 年ごろから研究が開始された。熱源位置がボトムヒートに限定されるものの、数百 W/cm² の熱流束に対応できる点が魅力である。

ベーパーチャンバー (Vapor Chamber, VC) は従来のヒートパイプが二次元方向に広がった形状となっており、一方向に熱を輸送するよりも熱を面内に拡散したい場合に効果が大きい[5]. また、平板構造となっているため熱源との接触が良い点も特長である。近年スマートフォンやタブレットに多く利用され、薄さ 0.2 mm 代のものも存在する。なお、アメリカを中心に小型・薄型のベーパーチャンバーが Thermal Ground Plane (TGP) という名称で研究されている。より高熱流束を志向しているが原理、構造的には VC と同じである。

以上のように、新たなヒートパイプ構造を有するファミリーが誕生しており、様々な放熱要求に適した活用が期待できる。

4. 書誌情報から見る世界の研究開発動向

日本国内にいとヒートパイプの研究のピークはすでに過ぎたように感じられる。伝熱シンポジウムでもヒートパイプのセッションが設けられているものの、発表件数は多くはない。しかし国際会議に行くと、その発表件数や聴衆の熱量が日本とは大きく異なっているように感じる。また、ヒートパイプ単独での国際会議である International Heat Pipe Conference and International Heat Pipe Symposium も 2 年に 1 度のペースで開催されており、大学・研究機関と企業の双方から多くの発表や参加がある。そこで、世界の論文出版データを基に、客観的な視点でヒートパイプの研究開発の経年分析と国際比較を行う。

図 1 に Elsevier 社の学術データベース Scopus[6] に収録されている学術論文と国際会議論文の中から、ヒートパイプ関連の学術誌の論文数の年次推移を示す。言語は英語に限定し、タイトルまたはキーワードにヒートパイプ関連の用語が含まれる論文を抽出している。

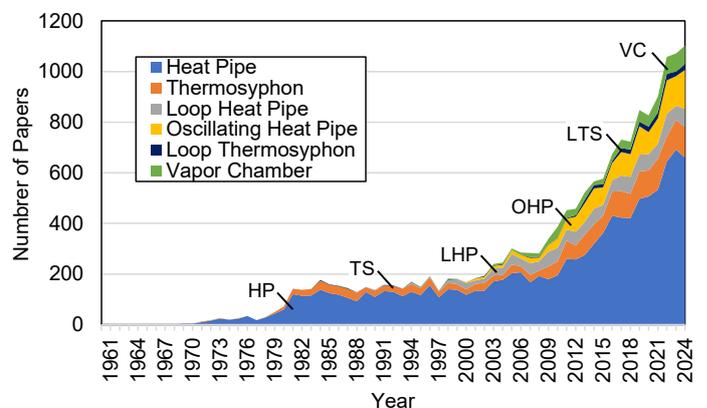


図 1 ヒートパイプ関連論文の出版件数推移

ヒートパイプの研究が始まった 1960 年代から今日に至る約 60 年の間に、実に 16,600 件以上のヒートパイプ関連の論文が出版されている。論文数は 1980 年代から顕著に増加し、年間約 150 件の論文が発表されている。また 2000 年頃からさらに増加し、現在では毎年 1,000 件以上のヒートパイプ関連の論文が発表されている。

ヒートパイプの種類ごとに論文の内訳を見てみると、1900 年代にはウィック式ヒートパイプ(HP)とサーモサイフォン式(TS)がほとんどであったが、2000 年ごろからループヒートパイプ(LHP)や自励振動ヒートパイプ(OHP)など新しい種類のヒートパイプに関する論文が増え始め、これが全体の論文数の増加に寄与している。また、ベーパーチャンバー(VC)はさらに後年になって登場し、特に近年の薄型化需要の高まりとともに論文数が増加している。そして現在の状況を調べると、2024 年の出版数 1103 件の内訳は、LHP が 73 件、OHP が 154 件、LTS が 22 件、VC が 74 件、TS が 120 件となっており、圧倒的に多いのは従来型ヒートパイプ(HP)に関する論文の 660 件であった。

次にどの国でヒートパイプの研究が活発であるかについて、論文執筆者の国籍別に分析する。図 2 には、著者の国籍別にヒートパイプ論文の出版年推移を示している(上位 6 国に限定)。

このグラフから見て取れるのは、アメリカと日本の著者による論文数は 1980 年代後半から 1990 年代にかけて増加したものの、その後はほぼ横ばいである。ただし同じ横ばいでもアメリカの論文数は年 100 件強であるのに対し、日本の論文数は年間 20~30 件程度であり、これは韓国やイギリスの年間約 40 件よりも少ない状況である。

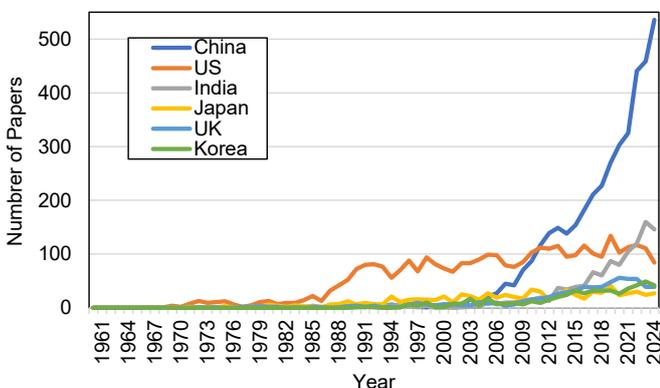


図 2 著者の国籍別ヒートパイプ関連論文出版推移

注目すべきは、中国やインドの著者による論文数が 2010 年代以降急激に増加しているという点である。2024 年には中国から 536 件、インドから 146 件の論文が出版されており、現在では世界のヒートパイプ研究論文の半数以上がこの 2 国から発表されている。

次に、どの国際ジャーナル誌にヒートパイプ関連の論文が多く掲載されているかを分析する。図 3 には過去 10 年(2014~2024 年)においてヒートパイプ関連論文が掲載された学術誌のトップ 10 を示している。なお、カッコ内の数字は各論文のインパクトファクター(IF 値)である。

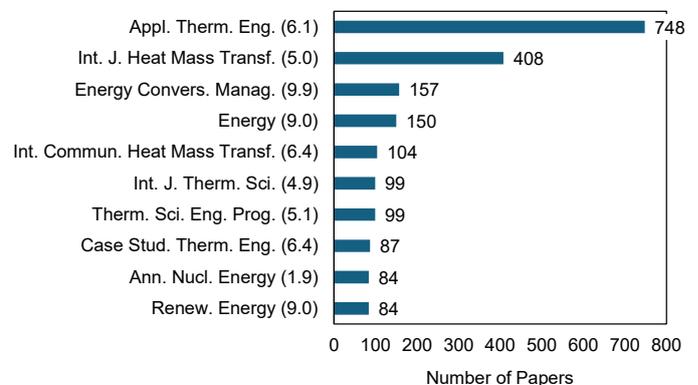


図 3 ヒートパイプ関連論文の掲載先 (2014 年~2024 年の累計)

過去 10 年間で掲載数が最も多いのは *Applied Thermal Engineering* (748 件) で、次に *International Journal of Heat and Mass Transfer* (408 件)、さらに *Energy Conversion and Management* (157 件)、*Energy* (150 件) と続いている。総じて、ヒートパイプ関連の論文は熱工学やエネルギー分野における一流ジャーナル誌に数多く掲載されている点が特徴であり、図 3 に示されている論文誌は全て Journal Impact Factor が上位 25%以内位置する、いわゆる Q1 ジャーナルである。

5. ヒートパイプの研究動向

最後にヒートパイプ関連の論文タイトルから研究開発のトレンドを分析する。2024 年に出版されたヒートパイプ関連論文 1000 件強のタイトルに基づいて、基礎研究と応用研究に分類し、さらにいくつかのカテゴリーに分類した結果を表 3 に示す。尚、トピックが複数にまたがる研究も多いた

め、かなり大雑把な分類となっていることをご理解いただきたい。

まず大分類として、基礎研究と応用研究はおおむね半々であるが、若干応用研究が多い傾向にあった。基礎研究としては、ヒートパイプの動作特性の実験的評価や可視化、構成要素（蒸発器、凝縮器、ウィック界面）の特性把握、性能向上のための新たな材料や冷媒（グラフェンやナノ流体含む）の提案、理論モデルの提案や数値シミュレーションなどに分類することができた。

また、応用研究としては、電子機器（半導体チップ、スマートフォン含む）、自動車（バッテリーやインバータなど）やデータセンターの冷却、太陽熱など再生可能熱エネルギー利用、排熱回収やヒートポンプシステムとの融合、宇宙機や原子力関係など極限環境に適用などの研究論文が多かった。まさに近年課題となっている電子機器や電気自動車の熱マネジメント問題や、カーボンニュートラル実現に向けた取り組みにヒートパイプが積極的に検討されていることが見て取れる。ヒートパイプ単体の研究だけではなく、ヒートパイプを含む熱システムの研究論文が多いことも特徴的であった。

表3 論文タイトルから分類した研究トピック

基礎研究	件数
起動特性, 熱流動挙動の把握	110
毛細管力, 相変化, 液膜の挙動の解明	85
材料の特性評価・改善, 構造最適化	90
理論モデル, 数値シミュレーション	135
応用研究	件数
電子機器, 自動車, データセンター冷却	150
太陽熱など再生可能エネルギー	95
排熱回収・熱エネルギー貯蔵	75
宇宙機や小型原子炉など極限環境使用	80
その他	90

6. まとめ

本稿では、ヒートパイプ技術の進展と、書誌データから見える世界の研究開発動向について解説

した。ヒートパイプの研究開発の歴史を振り返る中で、その発明から実用化に至る過程において、日本の産業界、学界が果たした役割が非常に大きかったことが明らかとなった。また、書誌情報の分析から、ヒートパイプ研究が世界的にはますます活性化しており、特に電子機器の放熱や再生可能熱エネルギーの有効利用といった分野で期待が高まっていることが示された。

今後も、国内外の研究者たちの努力により新たな技術革新が進み、その発展が伝熱分野を活性化させ、持続可能な社会の実現を支える原動力になることを期待する。そのためにも特に若い世代の柔軟な発想と積極的な取り組みが不可欠であり、ヒートパイプ分野への新たな参入を大いに期待したい。

謝辞

本原稿執筆に際し全面的にご協力くださいました元フジクラの望月正孝氏に心より謝意を申し上げます。また作図や書誌情報分析に協力くださった皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 望月正孝, 個人提供資料.
- [2] Ku, J., Operating Characteristics of Loop Heat Pipes, Proc. 29th Int. Conf. Environmental Sys., ICES1999-01-2007 (1999).
- [3] Han, X., et. al., Review of the development of pulsating heat pipe for heat dissipation, Renew. Sustain. Energy Rev., **59** (2016), 692.
- [4] Cao, J., et. al., A review on independent and integrated/coupled two-phase loop thermosyphons, Appl. Energy., **280-15** (2020) 115885.
- [5] Egbo, M., A review of the thermal performance of vapor chambers and heat sinks: Critical heat flux, thermal resistances, and surface temperatures, Int. J. Heat and Mass Transf., **183** (2022) 122108.
- [6] Elsevier 社 Scopus (<https://www.scopus.com/>, 2024.10.30 取得) .

超薄型ヒートパイプ／超薄型ベーパーチャンバー

Ultra-thin Heat Pipes / Ultra-thin Vapor Chambers

齋藤 祐士 (株式会社フジクラ), 小糸 康志 (熊本大学)

Yuji SAITO (Fujikura Ltd.), Yasushi KOITO (Kumamoto University)

e-mail: yuji.saito@jp.fujikura.com, koito@gpo.kumamoto-u.ac.jp

1. はじめに

ここ 10 年のヒートパイプ研究の特徴のひとつとして薄型化が挙げられる。スマートフォンに代表される薄型電子機器のサーマルマネジメントを主な目的としてヒートパイプの薄型化が進んでおり、現在、超薄型ヒートパイプ (Ultra-thin Heat Pipe) という言葉が広く使われている。Tang ら[1] は、厚さが 2.0 mm 以下のヒートパイプを超薄型ヒートパイプと定義しているが、厚さが 1.0 mm 以下のものが多数開発されており、ヒートパイプの薄型化を競う研究動向も見受けられる。また、2000 年頃からベーパーチャンバー、すなわち、高発熱密度の熱源から熱を二次元的に拡散させる平板状のヒートパイプが実用されている[2]が、最近では、超薄型ベーパーチャンバー (Ultra-thin Vapor Chamber) の研究開発が活発である。

超薄型ヒートパイプ、超薄型ベーパーチャンバーともに、従来サイズのものと同様、作動流体の蒸発・凝縮潜熱を利用するため、小さな温度差で比較的大きな熱量を輸送することができる。また、ウィックの毛細管力等を利用して作動流体を還流させるため、外部動力を要すること無く作動する。しかしながら、従来サイズのものと比較して厚さが極めて薄いため、超薄型ヒートパイプ、超薄型ベーパーチャンバー特有の新たな研究課題も出ているようである。

超薄型ヒートパイプ、超薄型ベーパーチャンバーは、学術分野と産業分野の両分野において注目されており、様々な研究が行われている。本稿では、これら二つの分野におけるここ 10 年の研究を中心に研究開発動向を概説する。

2. 学術分野の動向

2.1 超薄型ヒートパイプ

従来のヒートパイプは、図 1 に示すように、コンテナの内壁にウィックが取り付けられ、蒸気空

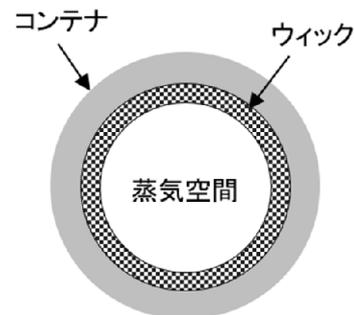


図 1 従来のヒートパイプの断面

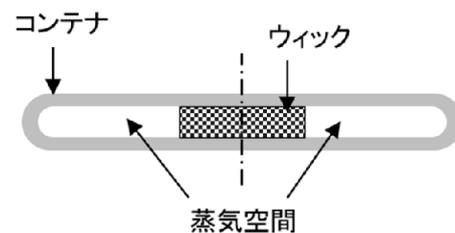


図 2 超薄型ヒートパイプの断面 (センターウィック式)

間が十分に確保されている。超薄型ヒートパイプも、従来のヒートパイプと同じく作動流体の還流機構としてウィックが使用されているが、厚さが極めて薄いため、製作に当たってはウィックのレイアウト、すなわち、蒸気空間をいかに確保するかが課題となる。そこで、図 2 に示すように、コンテナの内部中央部にのみウィックを設置したセンターウィック式の超薄型ヒートパイプが多数開発されている。このヒートパイプは、円管状のコンテナ内にウィックを入れ、目的とする薄さまでコンテナを押し潰すことによって製作されており、ウィックには焼結金属[3]や金網[4]、繊維[5]などが使用されている。また、発泡金属と金網[6]、焼結金属と金網[7]など、複合ウィックを使用したセン

ターウィック式超薄型ヒートパイプも開発されている。超薄型ヒートパイプの形状については、多くのものがストレート形状であるが、曲げ加工が施されたΩ形状のもの[8]も開発されている。

円筒状のコンテナを押し潰す方法以外にも、二枚の薄板でウィックと蒸気空間を挟んで密閉する方法で超薄型ヒートパイプが製作されている。コンテナを押し潰す方法と比較して製作プロセスは複雑になるが、ヒートパイプの幅を広くすることができる。このため、図2のように内部中央部だけでなく、ウィックと蒸気空間が交互に並んだストライプ式の超薄型ヒートパイプ[9, 10]が開発されている。

2.2 超薄型ペーパーチャンバー

超薄型ペーパーチャンバーも、二枚の薄板でウィックと蒸気空間を挟む方法で製作されているが、前述の超薄型ヒートパイプと異なり、熱を二次元的に拡散させるために、図3に示すように、ウィックと蒸気空間が層状に配置されている。具体的には、ウィックとしてシート状の金網を使用した超薄型ペーパーチャンバーの開発例[11, 12]が報告されており、作動流体には水が使用されている。なお、外部から力が加わった際に変形しないよう蒸気空間には小さな支柱が配置されているが、超薄型ペーパーチャンバーの熱輸送特性と支柱との関係について調べた研究結果[13]も報告されている。さらに、作動流体の還流を促進するために、蒸気空間の一部に金網のウィックを追加した研究結果[14]や、蒸気空間全体に目の粗い金網を配置した研究結果[15]も報告されている。

超薄型ヒートパイプ、超薄型ペーパーチャンバーともに、従来サイズのもの比べてウィックと蒸気空間の体積が大幅に小さいため、内部に封入する作動流体の液量の調整が難しい。特に、作動流体を入れ過ぎると、図4に示すように、蒸気空間に液スラグが生じる。液スラグはウィックに作動流体を補給するリザーバーの役割を果たす[16]一方、その生成位置によっては蒸気の流れが阻害されるため蒸気流の圧力損失が大きくなる。また、蒸気空間に液スラグが生じない場合でも、蒸気空間高さが低くなると蒸気流の圧力損失が大きくなる[17]。従来サイズのものでは蒸気流の圧力損失は小さいが、超薄型ヒートパイプ、超薄型ペーパー

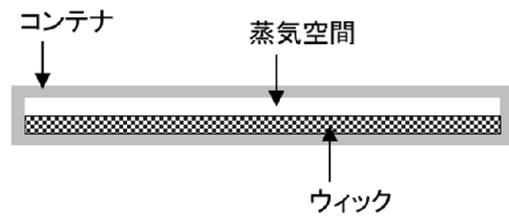


図3 超薄型ペーパーチャンバーの断面

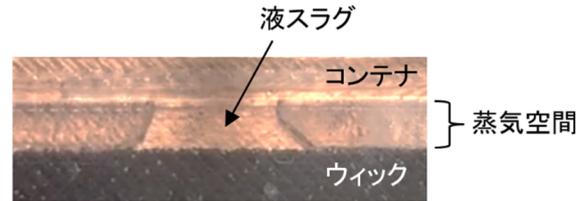


図4 蒸気空間内の液スラグ

チャンバーの開発に当たっては、蒸気流の圧力損失に関する検討が必要である。

2.3 蒸気流路の圧力損失

従来サイズの円筒型ヒートパイプについては、蒸発部における蒸気の吹き出し、凝縮部における蒸気の吸い込みを無視した層流の場合、蒸気の圧力損失 ΔP_V は式(1)で表される[18]。

$$\Delta P_V = \frac{8 \mu_V Q}{\pi \rho_V r_V^4 \lambda} L_{eff} \quad (1)$$

ここで、 μ_V 、 ρ_V 、 λ はそれぞれ蒸気の粘度、密度、潜熱であり、 Q 、 r_V 、 L_{eff} はそれぞれヒートパイプの熱輸送量、蒸気流路半径、有効長さである。超薄型ヒートパイプ、超薄型ペーパーチャンバーについては、蒸気流路の断面が円形で無いため、 r_V を水力直径を用いて評価することにより ΔP_V を見積もることができるが、図2のようにヒートパイプ内に蒸気流路が複数本配置されている構造の場合は、 Q が全流路合計の熱輸送量であるため、 ΔP_V を算出する場合には Q を流路本数で割る必要がある。

式(1)を用いて設計した超薄型ペーパーチャンバー[19]が報告されているが、一方で、蒸気空間高さが1 mm以下になると式(1)が適用できなくなると結論づけられた研究結果[20]も報告されてい

る。式(1)は蒸発部における蒸気の吹き出し、凝縮部における蒸気の吸い込み、さらに、前述した蒸気空間内での液スラグ生成の影響を無視している。超薄型ヒートパイプ、超薄型ベーパーチャンバーの開発に従来のヒートパイプ、ベーパーチャンバーの設計理論がどこまで適用できるのか、吟味が必要であると思われる。

3. 産業分野の動向

電子機器の冷却装置にヒートパイプが一般的に使用されるようになり、電子機器の薄型化が進むたびに冷却装置の薄型化が要求され、薄型のヒートパイプから超薄型ヒートパイプ、超薄型ベーパーチャンバーが開発されてきた。超薄型ヒートパイプおよび超薄型ベーパーチャンバーは、最大熱輸送量が小さいのが問題であり、この改善内容は後述するが、最大熱輸送量の予測式をベースに改善が図られてきたので、最大熱輸送量の予測式について次に示す。

3.1 ヒートパイプの最大熱輸送量

超薄型ヒートパイプ、ベーパーチャンバーを用いた応用製品の使用環境では、最大熱輸送量は、毛細管力限界が起因となる。毛細管力限界起因の最大熱輸送量 Q_{\max_cap} の予測式は、式(2)で示される。

$$Q_{\max_cap} = \frac{P_c}{\Delta P'_L + \Delta P'_V} \quad (2)$$

ここで、 P_c 、 $\Delta P'_L$ 、 $\Delta P'_V$ の定義は、式(3)、(4)および(5)に示す。 P_c は、ヒートパイプ内部流体の循環駆動力に相当する毛細管力を示し、 $\Delta P'_L$ 、 $\Delta P'_V$ は、それぞれ内部の液流および蒸気流による圧力損失に関する値を示す。

$$P_c = \frac{2 \sigma \cos \theta}{r_p} \quad (3)$$

$$\Delta P'_V = \frac{32 \mu_V L_{eff}}{\rho_V A_V D_{hv}^2 \lambda} \quad (4)$$

$$\Delta P'_L = \frac{\mu_L L_{eff}}{K \rho_L A_w \lambda} \quad (5)$$

ここで、 σ ：表面張力[N/m]、 θ ：接触角[rad]、 r_p ：

毛細管半径[m]、 μ_V ：蒸気粘性係数[Pa s]、 L_{eff} ：ヒートパイプ相当長 $=L_e/2+L_a+L_c/2$ [m]、 L_e ：蒸発部長さ[m]、 L_a ：断熱部長さ[m]、 L_c ：凝縮部長さ[m]、 ρ_V ：蒸気密度[kg/m³]、 A_V ：蒸気流路断面積[m²]、 D_{hv} ：蒸気流路水力直径[m]、 λ ：蒸発潜熱[J/kg]、 μ_L ：液粘性係数[Pa s]、 K ：透過率[m²]、 ρ_L ：液密度[kg/m³]、 A_w ：ウィック流路断面積[m²]を示している。

図5にヒートパイプ元直径6mmのものを4mm～2mmまで潰した時の最大熱輸送量の変化を示す。ヒートパイプを潰すと、ヒートパイプ内部の蒸気空間が減少する。これは、式(4)の蒸気流路断面積 A_V および蒸気流路水力直径 D_{hv} が小さくなり、蒸気流圧力損失に関する値 $\Delta P'_V$ が増えるためである。これにより、式(2)の最大熱輸送量 Q_{\max_cap} が低減することを示している。

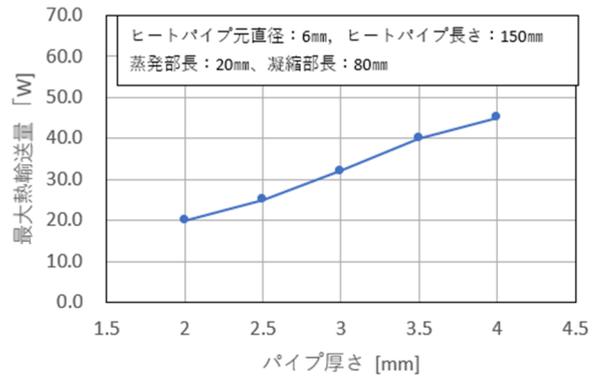


図5 ヒートパイプ厚さと最大熱輸送量

ここでは、薄型ノート PC、スマートフォンなどのコンパクトなモバイル製品に用いられている超薄型ヒートパイプおよびベーパーチャンバーについて記述するが、これらは、ノート PC の CPU の発熱量の増加やノート PC 冷却ユニットに求められる狭スペース性に対応してきたヒートパイプの延長上にある。そこで、まず、ノート PC に用いられてきたヒートパイプについて述べる。

3.2 ノート PC 用ヒートパイプ

現在、ヒートパイプは、様々な電子部品の冷却に用いられているが、現在の状況を作り出すきっかけとなった出来事は、1993年にインテルがペンティアムチップを発売した当時、ノート PC の CPU 冷却にヒートパイプを用いた放熱板をインテルが推奨したことである。それ以前は、電子部

品の冷却にヒートパイプが用いられるのは、一時的に冷却ができない場合である事が多かった。しかしながら、これ以降は、表1に示される発熱量が増加し続けるノートPCのCPUの冷却にヒートパイプが採用、大量に使用され、ヒートパイプが電子部品冷却の一手段として認知された。

表1 ノートPC CPU 発熱量

時期	CPU 発熱量
1993 年以前	5W 以下
‘93 年 ～ ‘99 年	5W～12W
‘99 年 ～ ‘01 年	12W～25W
‘01 年 ～ 現在	25W～35W

ノート PC 用ヒートパイプは、通常、丸管の形でヒートパイプを製造し、そのヒートパイプを曲げ・潰し加工を行い、写真1のような設計形状に成形し出荷、あるいは、その形状のヒートパイプに放熱プレートあるいは放熱フィンおよび受熱ブロックなどを接合・組立し、冷却ユニット製品として出荷する。



写真1 曲げ・潰し加工されたヒートパイプ

同一ウィックで同一長さのヒートパイプの場合、蒸気空間の大小は、ヒートパイプ化された丸管ヒートパイプの直径および加工後のヒートパイプ厚さにより決まり、ヒートパイプの最大熱輸送量性能に大きく影響する。表2に表1で示されたCPU発熱量に対して、ノートPCに使用されたヒートパイプの主な形状を示す。5W以下は、ヒートパイプを使用していない放熱プレートのみなので、5W以上のヒートパイプの主な仕様が示されている。表2には、ヒートパイプの仕様欄に直径と厚さが示されているが、直径は、ヒートパイプ製作時の丸管の直径を示し、厚さは、曲げ、潰し加工

を行った後の最小の厚さを示す。

表2 発熱量とヒートパイプの主な形状

CPU 発熱量	ヒートパイプの主な仕様
5W～12W	直径 3～6 mm を用い、厚さ 3～4 mm
12W～25W	直径 6～8 mm を用い、厚さ 2～3 mm
25W～35W	直径 6～8 mm を用い、厚さ 1～2.5 mm

発熱量が増えるに従いヒートパイプの丸管直径が大きくなり、ヒートパイプの内部断面積が増え、最大熱輸送量が増える方向にある。一方、厚さはより薄くなり、内部断面積が減り、最大熱輸送量が減る方向にある。消費者は、より薄型のノートPCを望み、ノートPCメーカーの競争ポイントとなるため、CPUの発熱量は増えるが、より薄いヒートパイプが要求され、この対応のため、ウィック構造などの最適化が行われた。

3.3 ノートPC用薄型ヒートパイプ

表2のCPU発熱量5W～12Wおよび12W～25Wに対するヒートパイプの主な仕様に対して、写真2に対応されたウィック構造を示す。どのウィックもパイプ内面に位置し、グループウィックは、パイプ内面に長手方向の溝が形成されている。焼結パウダーウィックは、微小銅粉を焼結でパイプ内面に接合されている。複合ウィックは、グループとスパイラルで押し付けた銅極細線を組み合わせたものである。これらのウィック構造のヒートパイプを潰した薄型ヒートパイプが使用された。一方、表2のCPU発熱量25W～35Wに対するヒートパイプの主な仕様に対して、写真2のウィック構造の薄型ヒートパイプでは、ドライアウトが生じ、これらのウィックの最大熱輸送量を超えてしまった。

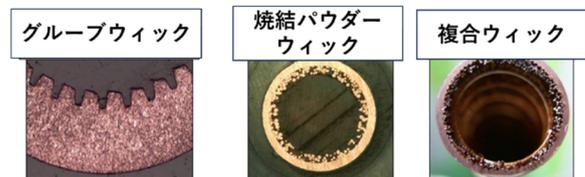


写真2 ヒートパイプのウィック構造

3.4 ノートPC用超薄型ヒートパイプ

最大熱輸送量を増やすには、式(2)で大きな毛細管力と小さな圧力損失が必要である。これらの値を最適化するため、式(2)の物性値を除き検討

を行った。

ウィック材料について透過率 K と毛細管力半径 r_p を測定した結果を表 3 に示す。液流の圧力損失低減には、大きな透過率が良く、毛細管力増加には、小さな毛細管力半径が良い。相反する特性であり、バランスを考えると焼結パウダーあるいは、銅極細線のバランスが良い。

表 3 ウィックの特性値 [21]

ウィックタイプ	透過率 K [$m^2 \times 10^{-10}$]	有効毛細管半径 r_p [$m \times 10^{-3}$]
焼結パウダー	0.1~10.0	0.01~0.10
#100 メッシュ	1.8	0.12
軸方向グループ	35.0~1250	0.25~1.50
銅極細線	7.6	0.11

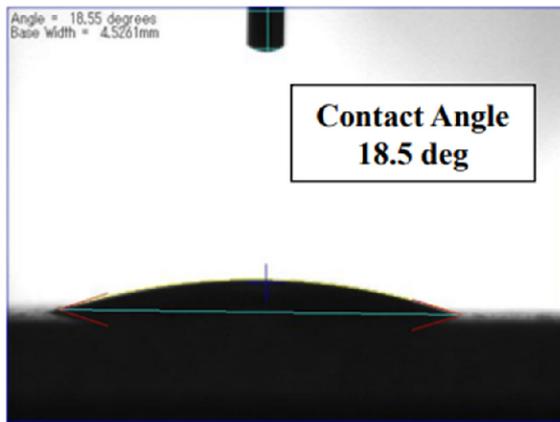


写真 3 表面処理後の接触角 [21]

毛細管力 P_c は、小さな毛細管力半径 r_p と小さな接触角 θ で大きくなるが、ウィック材料を決めると毛細管力半径 r_p が決まり、接触角 θ が影響する。接触角は、ヒートパイプ内面の表面状態が影響するので、最適化が図られる。写真 3 に最適化した表面処理後の接触角 $\theta 18.5^\circ$ の測定結果を示す。

写真 4 にノート PC 用の超薄型ヒートパイプに用いたウィック構造を示す。発熱部は、このヒートパイプ断面の下側にあり、ウィックを蒸発部に近いヒートパイプの中央部に配置し、蒸気流路を 2 分割にした構造である。写真のウィック材料は、銅極細線であるが、焼結銅パウダーも使用されている。

このウィック構造は、ウィックをヒートパイプ内部全面に配置するものに比べて、蒸気流路の水力半径が大きくなり、蒸気流圧力損失が小さくな

る。また、蒸気流と液流のカウンターフローの面積がより小さいので流体圧力損失が、より小さくなる。

更に、ウィックが蒸発部に近い部分に配置されるので、ヒートパイプ内部全面にウィックが配置されるものに比べて有効蒸発面積が、大きくなり、蒸発部の熱抵抗がより小さくなる。

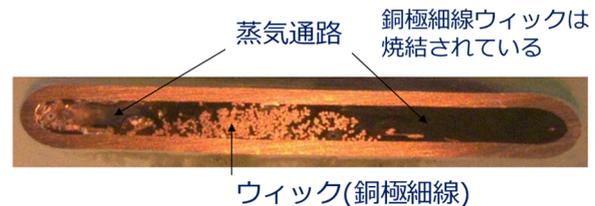


写真 4 ノート PC 用超薄型ヒートパイプウィック構造

写真 5 に超薄型ヒートパイプ上面からの X 線写真を示す。曲げ箇所のヒートパイプ幅中央部分は、長さ方向の伸び、圧縮が小さいため、中央部に焼結されているウィックは、破損する事なく流路を確保でき、ヒートパイプ加工による最大熱輸送量の低減が防げる。これらの改善により、ノート PC 用超薄型ヒートパイプが開発され、市場の要求を満足させてきた。



写真 5 ノート PC 用超薄型ヒートパイプ (X 線写真)

ノート PC の機能向上は、マーケットより継続して求められており、ノート PC 用超薄型ヒートパイプの性能改善は、継続して進められている。ここで示されたノート PC 用超薄型ヒートパイプのウィック構造の改善検討例[22]を挙げる。

図 6 にノート PC 用超薄型ヒートパイプウィック構造と改善案を示す。Wick - Type#1 と Wick - Type#3 がそれぞれ焼結銅パウダーと銅極細線の超薄型ヒートパイプのウィック構造であり、改善

案は、Wick - Type#1 と Wick - Type#3 のそれぞれに編組線を組み込ませることにより、ウィック部分の透過率 K を向上させることを目的としている。

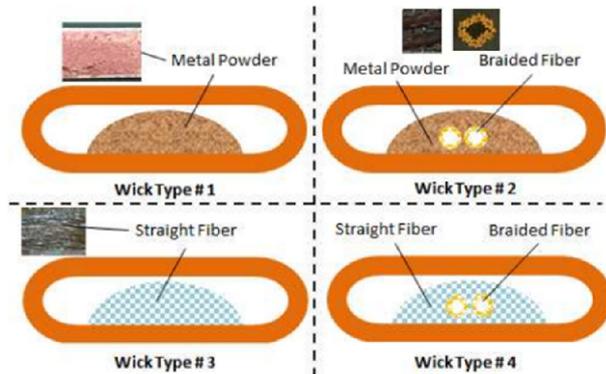


図6 ノート PC 用超薄型ヒートパイプのウィック構造と改善案 [22]

評価は、元直径 6 mm、長さ 150 mm のストレート形状を厚さ 1.5 mm に潰した形状で、加熱部 15 mm、冷却部 50 mm の試験装置を用い、ヒートパイプ温度を 60°C に調整し行った。図 7 に熱入力とヒートパイプ熱抵抗の関係を示している。編組線をウィックに組み込むことにより、組み込まないものに比べ約 4W の最大熱輸送量を増加させる事ができた。

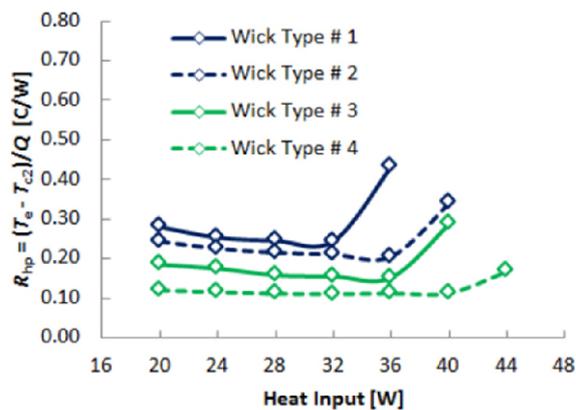


図7 様々なウィック構造の熱入力とヒートパイプ熱抵抗の関係 [22]

3.5 スマートフォン用超薄型ヒートパイプ

モバイルコンピューティングデバイスは、2000年代に iPhone, Android, BlackBerry などのスマートフォンが市場を独占し、現在もスマートフォンは、社会生活で不可欠なものとなっている。スマートフォンも PC と同様に機能向上要求に対し、より

高性能 CPU が用いられる事により、チップの発熱量が増加してきた。図 8 に古いデータであるが、モバイルハンドデバイスに使用されている CPU の発熱量の変化が示されている。

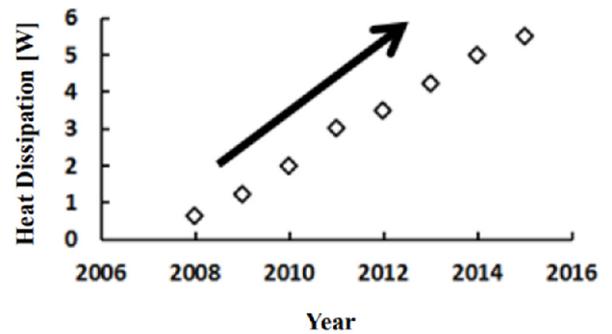


図8 モバイルハンドデバイスに使用されている CPU 発熱量の変化 [21]

現在、スマートフォンのチップ冷却は、チップの熱（ホットスポット）をスマートフォン筐体全体への熱拡散で行われており、発熱量の小さいものは、グラファイトシートや薄い金属板が用いられている。チップの発熱量が、4~5W を超えてくるとこれらの方法では、チップ温度が許容温度を超え始めるものが出てきた。そこでノート PC の冷却方法と同様に金属板にヒートパイプを加えて熱拡散能力を上げた放熱板が検討され、2013年に NEC カシオモバイルコミュニケーションズのスマートフォンに世界初の超薄型ヒートパイプ熱拡散放熱板が搭載された。それ以降、スマートフォン冷却の一手段として使用されている。

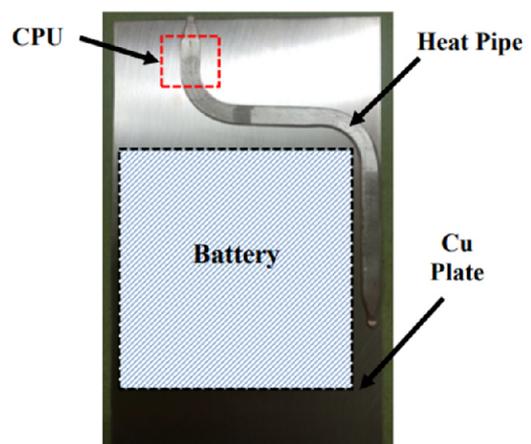


写真6 スマートフォン用超薄型ヒートパイプ付き放熱板のコンセプトサンプル[21]

写真6に金属板に超薄型ヒートパイプを半田付けした熱拡散放熱板のコンセプトサンプルを示す。スマートフォンへの搭載には、金属放熱板を含めた厚さの制限と部品の隙間を取り回しできるヒートパイプが求められる。金属板の厚さは、0.2mm前後のものが用いられ、ヒートパイプの厚さは当初0.8mm程度であったが、すぐに0.3~0.4mmが求められた。これに対応するためにノートPC用超薄型ヒートパイプをベースにスマートフォン用超薄型ヒートパイプが開発された。

超薄型ヒートパイプのウィック構造を写真7に示す。ノートPC用超薄型ヒートパイプでは、ウィック材料は、焼結パウダーも使われていたが、スマホ用超薄型ヒートパイプは、製造上より銅極細線が使用されている。ウィック構造は、ノートPC用超薄型ヒートパイプのウィック構造と同様に中央部にウィックを配置し、蒸気流路を2分割している。ノートPC超薄型ヒートパイプのコンセプトに加えてウィック配置した銅極細線ウィックは、ウィックの透過率を大きくするため、潰した後もウィックの束の中に液通路の空間が残る易い形状のものが使用されている。

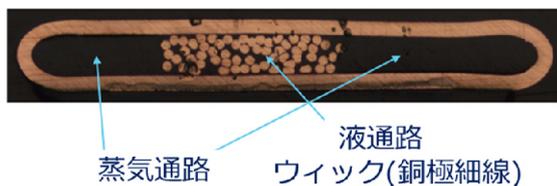
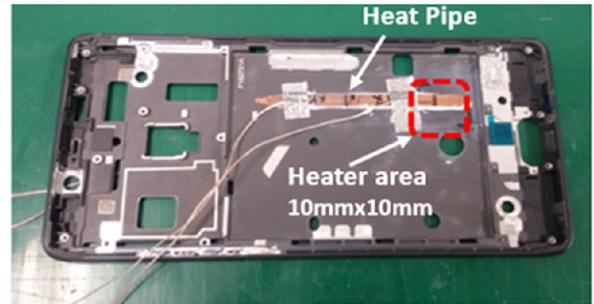


写真7 スマートフォン用超薄型ヒートパイプウィック構造

超薄型ヒートパイプを使用した場合の効果の一例を述べる。写真8に示された超薄型ヒートパイプ付きのフレームのサンプルとフレームのみの比較試験が行われた。雰囲気温度が25°Cの環境で、銅ブロックヒータ（10mm×10mm）の入力を変え、定常状態に達した後に測定した結果が図9に示されている。ヒータ入力5Wの時、それぞれのサンプルのヒータの温度差は、6.7°Cであり、雰囲気温度からのヒータ上昇温度で比較すると約16%の熱性能向上が得られている。

超薄型ヒートパイプ自体の最大熱輸送量は、それほど大きくなく写真6や写真8のように放熱板



ケースサイズ：155mm×75mm×0.65~0.75mm
超薄型ヒートパイプ：長さ70mm，厚さ0.4mm（元直径3mm）

写真8 筐体フレームに超薄型ヒートパイプを取り付けた状態

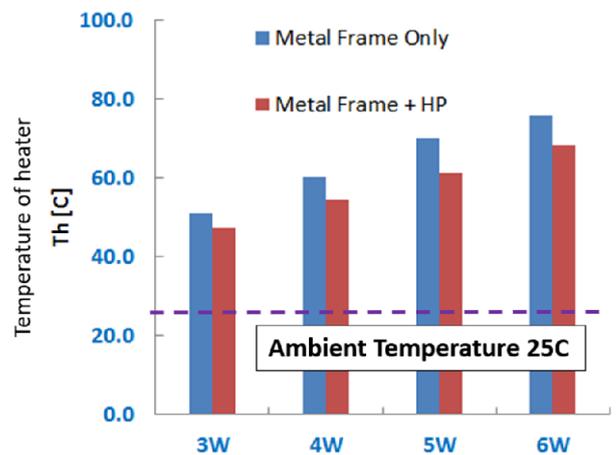


図9 フレームのみと超薄型ヒートパイプ付きフレームとの比較

やフレームとの組み合わせで使われるのが一般的である。参考として、表4に85mm x 30mm x 0.2mmサイズの銅放熱板に超薄型ヒートパイプ（長さ80mm）を取り付けたもので最大熱輸送量試験を行った結果をまとめたものを示す。

表4 超薄型ヒートパイプ潰し厚さと最大熱輸送量（放熱板付）

元外径 [mm]	潰し厚さ [mm]		
	0.3	0.35	0.4
2.0	3.5 W	4.5 W	5.5 W
3.0	4.0 W	5.0 W	6.0 W
4.0	—	—	7.0 W
5.0	—	—	7.5 W
6.0	—	—	8.0 W

3.6 スマートフォン用超薄型ペーパーチャンバー

スマートフォン用超薄型ヒートパイプと金属板を組み合わせた熱拡散板に対してペーパーチャンバーは、熱拡散板をペーパーチャンバーのコンテナが兼ねるので、超薄型ヒートパイプ付き放熱板の放熱板厚さ分薄くなり、スペース的に優位性がある。また、熱性能的にも超薄型ペーパーチャンバーの凝縮面が放熱面となるので、超薄型ヒートパイプ付きの熱拡散板より、熱性能が優れている。これらの特徴より、スマートフォンメーカーは、2018年前後に超薄型ペーパーチャンバーを採用し始めた。

超薄型ヒートパイプを用いた放熱板と超薄型ペーパーチャンバーの性能差を単純な形状のサンプルで評価した。それぞれの外観を写真9に示す。評価は、10 mm x 10 mmサイズの銅ブロックヒータを用い、雰囲気温度 25°C でヒータ入力を変え、定常状態に達した後にヒータ温度を測定した。表5に比較評価に用いたサンプルの主要仕様および熱入力 5W 時のヒータ温度を示した。ヒータ温度差が 7.6°C あり、雰囲気温度からのヒータ上昇温度で比較すると約 12% の熱性能向上が得られている。

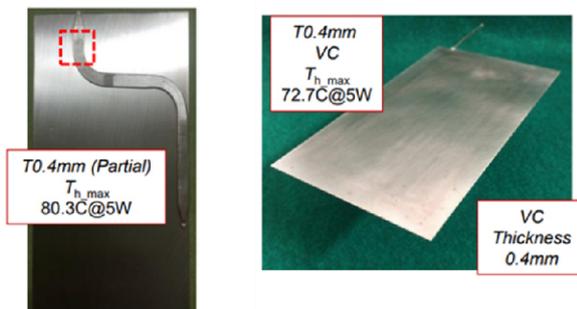


写真9 比較用サンプル外観

表5 サンプル主要仕様と発熱体温度

	超薄型 HP	超薄型 VC
最大厚さ[mm]	0.6	0.4
HP or VC の厚さ[mm]	0.4	0.4
プレート厚さ[mm]	0.2	-
HP 本数	1	-
ヒータ温度(at 5W) [°C]	80.3	72.7

HP：ヒートパイプ、VC：ペーパーチャンバー

スマートフォンや VR ゴーグルなどのモバイルハ

ンドデバイスは、今後も需要の大きな魅力のある市場である。今後、使用チップの高性能化にともなう発熱問題に対する冷却ソリューションとして超薄型ペーパーチャンバーは有効なソリューションであり、今後、需要の増加が期待できる。

ペーパーチャンバーは、上下コンテナを接合して製造されるので、ウィック構造に比較的容易に手を加えられるため、メッシュ、焼結パウダー、グループおよびそれらを組み合わせた複合ウィックなど多種多様なものが使用され、従来のヒートパイプメーカーのみならず新規メーカーも参入している。また、コンテナ材料は、従来、銅であり、上下のコンテナ接合のロウ付け、拡散接合などの高温プロセスで焼鈍し、強度が低下していたが、強度のあるステンレス製の容器を使って薄型ペーパーチャンバーを市場に提供しているメーカーもでてきている。

4. おわりに

ウィック式の超薄型ヒートパイプ、超薄型ペーパーチャンバーについて、学術分野における最近の研究動向と、産業界における開発例を概説した。ヒートパイプの薄型化に関しては非常に多くの研究が行われており、本稿で紹介したウィック式以外にも、超薄型のループヒートパイプ[23]や自励振動式ヒートパイプ[24]が研究開発されている。薄型化は、ここ 10 年のヒートパイプ研究の大きな動向のひとつであり、今後も、狭い空間内でのサーマルソリューションとして、超薄型の各種ヒートパイプの研究開発と実用が期待される。

参考文献

- [1] Tang, H. et al., Review of Applications and Developments of Ultra-thin Micro Heat Pipes for Electronic Cooling, Appl. Energy, **223** (2018) 383.
- [2] 日本ヒートパイプ協会, 実用ヒートパイプ第2版, 日刊工業新聞社 (2001).
- [3] 古河電工, ヒートシンク用高性能薄型焼結ヒートパイプ, 古河電工時報, **126** (2010) 20.
- [4] Aoki, H. et al., Ultra Thin Heat Pipe and Its Application, Front. Heat Pipes, **2** (2011) 043003.
- [5] Ahamed, M.S. et al., Characterization of a High Performance Ultra-thin Heat Pipe Cooling Module for Mobile Hand Held Electronic Devices, Heat

- Mass Transf., **53** (2017) 3241.
- [6] Zhou, W., et al., Thermal Performance of Ultra-thin Flattened Heat Pipes, *Appl. Therm. Eng.*, **117** (2017) 773.
- [7] Yi, F. et al., Experimental Study on Thermal Performance of Ultra-thin Heat Pipe with a Novel Composite Wick Structure, *Int. J. Therm. Sci.*, **193** (2023) 108539.
- [8] Ming, T. et al., Heat Transfer Enhancement of the Ultra-thin Flat Heat Pipe Integrated with Copper-fiber Bundle Wicks, *Appl. Therm. Eng.*, **236** (2024) 121676.
- [9] Lv, L. and Li, J., Managing High Heat Flux up to 500 W/cm² through an Ultra-thin Flat Heat Pipe with Superhydrophilic Wick, *Appl. Therm. Eng.*, **122** (2017) 593.
- [10] Cui, Z. et al., Thermal Performance of an Ultra-thin Flat Heat Pipe with Striped Super-hydrophilic Wick Structure, *Appl. Therm. Eng.*, **208** (2022) 118249.
- [11] Yu, J. et al., Experimental Investigation of the Thermal Characteristics of a Novel Pure-metal-based Flexible Ultrathin Vapour Chamber, *Appl. Therm. Eng.*, **227** (2023) 120354.
- [12] Wong, S.C. et al., Straight Ultra-thin Vapor Chambers Tested under Different Modes for Different Vapor Duct Thicknesses, *Appl. Therm. Eng.*, **257** (2024) 124353.
- [13] Zhao, Z. et al., Heat Transfer Performance of the Vapor Chamber with Spiral Support-composite Wick, *Int. J. Heat Mass Transf.* **232** (2024) 125933.
- [14] Zhang, S. et al., High Performance and Reliable Ultra-thin Vapor Chamber Via an Optimized Second Vacuuming and Sealing Process, *Appl. Therm. Eng.*, **241** (2024) 122318.
- [15] Huang, G. et al., Fabrication and Thermal Performance of Mesh-type Ultra-thin Vapor Chambers, *Appl. Therm. Eng.*, **162** (2019) 114263.
- [16] Chen, C. et al., Visualization Experiments on Operational Characteristics of a Centered-wick Heat Pipe (Effect of Liquid Volume), *Multiphase Sci. Technol.*, **33** (2021) 45.
- [17] Maneemuang, S. et al., Effect of Pipe Flattening on Pressure Drop in Vapor Core and Thermal Characteristic of Miniature Round and Flat-shape Heat Pipe with Sintered Fiber Wick, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **176** (2021) 121416.
- [18] 大島耕一ら, ヒートパイプ工学, 朝倉書店 (1979).
- [19] Chen, Z. et al., Design, Fabrication and Thermal Performance of a Novel Ultra-thin Vapour Chamber for Cooling Electronic Devices, *Energ Convers Manage*, **187** (2019) 221.
- [20] Weilong, G. et al., Vapor Flow Resistance Characteristics in Ultra-thin Flat Heat Pipes, *Therm. Sci. Eng. Prog.*, **48** (2024) 102409.
- [21] Mohamed S.A. et al., *InterPACKICNMM*, (2015) 48019.
- [22] Mohamed S.A. et al., Development of a Novel Wick Structure of Enhance the Thermal Performance of Thin Heat Pipe at Vertical Top Heat Application, *Joint 19th IHPC and 13th IHPS*, (2018)
- [23] Mizutani, T. et al., Experimental and Analytical Investigation of a 0.3-mm-thick Loop Heat Pipe for 10 W-class Heat Dissipation, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **193** (2022) 122950.
- Qu, J. et al., Performance Characteristics of Ultra-thin Flat Plate Oscillating Heat Pipes with Alternate Channels and Auxiliary Micro-grooved Structures, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, **157** (2024) 107738.

ループヒートパイプ Loop Heat Pipes

西川原 理仁 (名古屋大学)
Masahito NISHIKAWARA (Nagoya University)
e-mail: nishikawara@nagoya-u.jp

1. はじめに

ループヒートパイプ (LHP) は 1972 年にロシアのウラル工科大学の Y. F. Gerasimov と Y. F. Maydanik 博士らにより初めて考案された。作動流体は水で、1.2 m 先に 1 kW の熱輸送をすることに成功した。従来のヒートパイプの課題である輸送距離を長くできないことや蒸発器が凝縮器の上に配置されるトップヒートでの性能低下を改善するものであった[1]。図 1 に直管のウィック式ヒートパイプ (HP) と LHP の概要を示す。HP はウィックが蒸発部から凝縮部まで途切れることなく配置されており、輸送距離が長くなるとウィックを通る液体の圧力損失が増大することが課題であった。一方 LHP では、ウィックは蒸発器にのみ配置されているため輸送距離が長くなってもウィックでの圧力損失 (= ΔP_{wick}) は増大せず、毛細管力 (= P_{cap_max}) をより輸送管での圧力損失 $\Delta P_{transport}$ や重力水頭 $\rho g \Delta h$ に使えるようになった。

$$P_{cap_max} > \Delta P_{wick} + \Delta P_{transport} + \rho g \Delta h \quad (1)$$

そのため、LHP は HP と比較して輸送距離が長く、凝縮管も長くできるため排熱面を広くとれ、蒸発器と凝縮器との高さの差 (= Δh) があっても最大毛細管力を超えない限り (式(1))、動作可能となる。この特徴を活かすため LHP では HP のウィックより小さな細孔径を有するウィックが用いられる。上記に加えて、LHP はリザーバ (CC) が設置されていることや蒸発器や凝縮器の構造が HP とは異なり、特に蒸発器では LHP 特有の熱流動が現れる。LHP の動作原理の詳細は 2012 年発行の本誌「特集：古くて新しいヒートパイプ」[2]にまとめられているため、本稿では LHP の近年の研究動向について概観する。

2. 近年の研究動向

ここでは LHP 研究を主に高性能化や多機能化

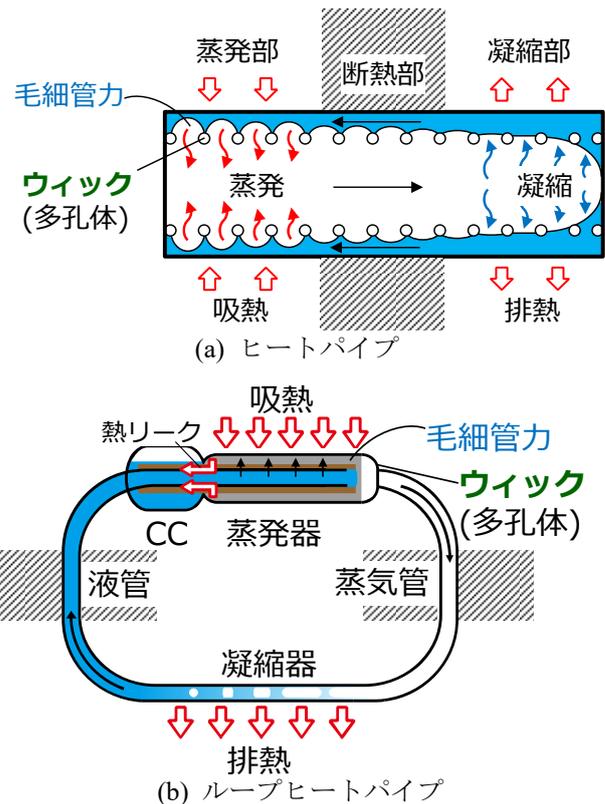


図 1 ヒートパイプと LHP との違い

また物理現象の解明を目指した基礎研究と各種産業、機械に適用する LHP 開発や低コスト化を目指した応用研究とに分類し、それぞれについて記す。

2.1 基礎研究

2.1.1 高性能化・多機能化

LHP の熱性能は主に最大熱輸送量 (毛細管限界) と熱抵抗の 2 つである。最大熱輸送量を向上させたり熱抵抗を低減させることによって、輸送距離の長距離化、熱輸送量の大容量化、小型・薄型化、高熱流束化を実現することができ、これまでに適用できなかった熱要求に答えられるようになる。

高性能化を目指した研究は主に LHP の心臓部

であるウィックの開発である。ウィックに求められる特性は最大熱輸送量の観点からは、式(1)からわかるように毛細管力を大きくしてウィックでの圧力損失を小さくすることである。毛細管力は $2\sigma\cos\theta/r_p$ (ここで σ は表面張力, θ は接触角, r_p は細孔半径) で表されるので、流体との濡れ性を良くして細孔を小さくすることが求められる。圧力損失は多孔体の浸透率 K に反比例するため浸透率を大きくする必要があるが、これには高い空隙率と大きな細孔が必要である。そのため従来の HP と同様に細孔径への要求は対立している。毛細管力と圧力損失の比をとることによってまとめて考えることができ、この時に出てくる多孔体特性が K/r_{eff} (ここで $r_{eff}=r_p/\cos\theta$) であり、キャピラリーパフォーマンスと呼ばれる。さらに LHP では式(1)で示されるように輸送管や重力による圧力損失も重要で、毛細管力とそれらの比を考えた時に出てくる多孔体特性は $1/r_{eff}$ である。図2にこれまでに開発された HP および LHP ウィックの $K/r_{eff} - 1/r_{eff}$ マップを対数スケールで示す。また浸透率の予測式であるコゼニーカルマン式による結果も示す。右肩下がりになっており K/r_{eff} を大きくしたければ小さな $1/r_{eff}$ が必要で、 $1/r_{eff}$ を大きくすると K/r_{eff} は小さくなってしまふ。そのため、HP では K/r_{eff} が重要なので、数百 μm 程度の細孔がよく利用され、LHP では $1/r_{eff}$ も求められるため数 μm ~ 数十 μm 程度の細孔が求められる。多孔体は粒子構造だと細孔径を小さくでき、繊維やメッシュ構造だと高浸透率となり、この2種類が多く使用されて

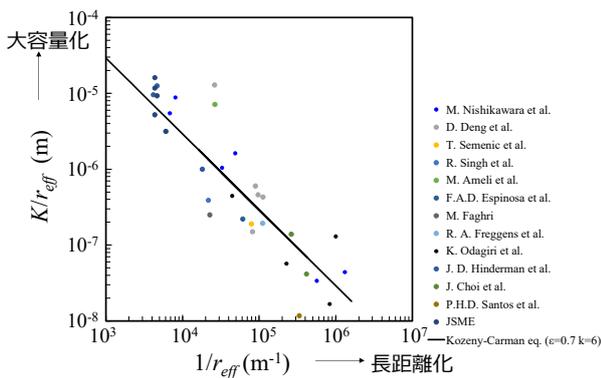


図2 これまでに開発されたウィックの $K/r_{eff} - 1/r_{eff}$ マップ (長い輸送距離や大きな高低差には大きな $1/r_{eff}$ が必要で、大容量化には大きな K/r_{eff} が必要となる) [3-14]

いる。その他にはフォーム構造や複合構造 (例えば粒子と繊維), 高い浸透率の層と大きな毛細管力の層との二層構造とするウィックも開発されている。また多孔体の表面処理により濡れ性を向上させる取り組みもある (図3)。

熱抵抗の観点からは、蒸発器の熱抵抗低減には高熱伝導性のウィックが求められる。しかし一方で、ウィックが高熱伝導になると CC への熱リーク (図1b)が増大し、これとエネルギー的に釣り合う凝縮器でのサブクール領域の増大、結果的に凝縮器での熱抵抗増大につながる。低熱伝導性ウィックでは逆のことが言え、ウィック熱伝導率への要求は対立している。前述の多孔体の流体力学的な特性のトレードオフで必要となる K/r_{eff} や r_{eff} の予測、計測、これらを基にした毛細管力や圧力損失の見積りは比較的容易であるが、熱的な特性のトレードオフでは、多孔体の実効熱伝導率の予測、計測、これを基にした熱抵抗の見積り、特に蒸発器の熱抵抗の見積りは多孔体内の気液二相流現象を考慮する必要があるため非常に難しくやっかいである。熱的特性のトレードオフがあるためウィック材料は、金属 (銅, アルミ, ニッケル, チタン, ステンレス), セラミック (アルミナ, ジルコニア, 石英), 樹脂 (テフロン, ポリエチレン, ポリプロピレン) など幅広い熱伝導率で開発されている。高熱伝導層と低熱伝導層を有する二層ウィックも開発されている。また2つの細孔径を有するバイポーラスウィックによって、蒸発界面を増加させ蒸発器熱抵抗を低減させる研究も行われている。蒸発器熱抵抗の低減という観点では、蒸気管への通り道となるグループの形状最適化、マ

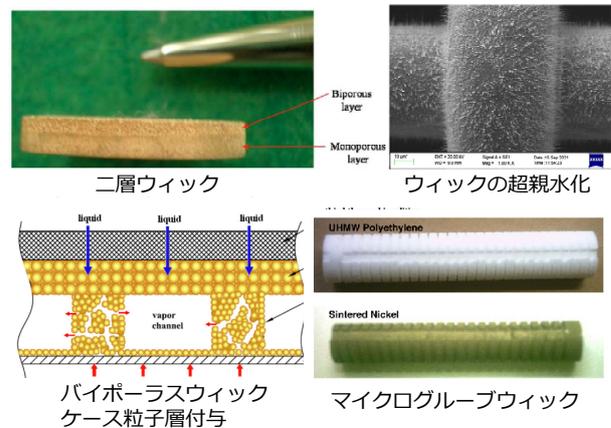


図3 開発されたウィック例[5,15-17]

イクログループ化，また蒸発器ケース側へのマイクログループ加工，表面処理による超親水化，粒子層付与などによって蒸発器熱抵抗を低減させる試みも行われている（図3）。

LHPの動作可能範囲の拡大という意味では，作動流体にトルエンを用いた動作温度の高温化[18]，液体窒素などを用いた極低温化[19]を目指した研究も行われている．再エネ利用に向けては低熱流束化も必要だと思われるが，これに関してはほとんど行われていない．

作動流体については，水，アンモニア，アルコール，フッ素系冷媒が良く使用されるが，環境負荷の少ない作動流体の適用，ナノ粒子を混ぜたナノ流体，凝固点降下や銅以外の材料に適合する水LHPに関する研究が行われている．

その他にLHPとその他のヒートパイプを組み合わせることによって動作可能範囲を拡大する取り組みもある．例えばペーパーチャンバとLHPを組み合わせることによって高熱流束化に対応したり，OHP/PHPとLHPを組合せることにより大面積での吸熱が可能になる[20]．

最大熱輸送量や熱抵抗では評価できない機能を有する多機能なLHP開発も行われている．複数の蒸発器や凝縮器を有するマルチエバポレータ/コンデンサ型LHPによって複数熱源からの吸熱，複数冷熱源への排熱が可能になる．さらに，発熱部－非発熱部間で熱を共有，つまり吸熱していない蒸発器が凝縮器に変化できるようになる．ChangらはマルチエバポレータLHPの蒸気と液体の分布を観察し，吸熱している蒸発器のCCでは

蒸気と液体の飽和状態が存在するのに対し，無負荷の蒸発器のCCでは過熱液体で満たされていることを明らかにした[21]．

またLHPに温度制御性やヒートスイッチ機能を付与する研究も行われている．これまで各種方法によって温度制御が実証されてきた（表1）．ヒータや熱電素子（TEC）でCC温度を制御する方法，蒸気管にバイパスバルブやバイメタルバルブを設置し凝縮器への流体輸送を制御する方法，CC圧力を非凝縮性ガス（NCG）タンクによって制御する方法，蒸発器内に設置した鉄球の位置を磁力によって制御する方法，液管に電気流体力学（EHD）ポンプを設置し作動流体の流量を制御する方法である．ヒータとTECによる方法は外付けできるのが最大の利点であるが，数W程度の消費電力が必要となる．その他の方法はあらかじめLHPに組み込む必要がある．バイパスバルブやバイメタルバルブは無電力かつパッシブに制御可能であるが，非制御時の蒸気管での圧力損失が大きくなる．NCGタンクによる方法は，比較的重量のある圧力制御システムが必要であるが，0.01℃の高精度な制御が可能である．EHDポンプによる方法は高電圧が必要となるが，ミリワット級の低消費電力で機械的可動部がなく非制御時の圧力損失が非常に小さいのが特長である．

2.1.2 現象説明

性能予測の精度向上，高精度な設計，振動現象やヒステリシスなどの非定常動作挙動や不安定挙動解明のため，内部熱流動の可視化や数値シミュレーション研究が行われている．可視化はガラス

表1 LHP温度制御デバイスの特徴[22-39].

Devices	Electric Heaters [22-24]	TECs [25-32]	Bypass Valves [33-35]	Bimetal thermostatic control valve [36]	Pressure control using NCG tank [37,38]	Steel ball with magnet [39]	EHD pumps [40]
System weight	Light	Reasonable	Reasonable	Reasonable	×Heavy	Reasonable	Reasonable
Mechanical movement	Without	Without	With	With	With	With	Without
Electrical control	Active	Active	Passive (Active option)	Passive	Active	Manual Control	Active
Pressure loss	◎No	◎No	×High	×High	◎No	×High	○Low
Power consumption	×High	△Moderate	◎No	◎No	○Low	-	○Low

などの透明材料を用いた可視光による観察が多く行われているが、サーモグラフィ、中性子ラジオグラフィ、内部にカメラを挿入するボアスコープによる観察も行われている。

蒸発器の可視化においては、低熱負荷時のウィックが液で満たされている時のケースとウィックとグループで形成される三相界面におけるメニスカスの存在とメニスカスからの熱輸送が蒸発器熱伝達に大きく寄与していること、核沸騰などによってウィック内が気液二相状態に遷移すること、気液二相状態では気相領域が熱流束に伴い拡大しその形状が3次元的であること、気液二相状態時に蒸発器熱伝達率が極大になること、起動時のグループやCCおよびコア内の気液分布と蒸発器温度のオーバーシュートとの関係が明らかになっている(図4)。またZhangらは円筒蒸発器を軸方向に真っ二つにした可視化蒸発器を構築し、熱リークによってコア内で沸騰が起きることやコア内の気液界面の振動によって温度振動が引き起こされることを明らかにした[47]。コアおよびCC内の可視化においては、実際の熱流動挙動に基づいたウィックとコア間の熱伝達率の予測モデルの構築が最大の課題だと思われる。

中性子ラジオグラフィによる可視化では、実機をそのまま可視化装置内に導入し内部の気液分布を観察できることが最大の特徴であり、Hatakenakaらは、セカンダリウィック装着時のウィック及びコア内の気液分布、起動時の蒸発器内気液分布を明らかにしている[48]。

数値シミュレーションにおいては定常状態の予

測については、各要素の熱抵抗などをフィッティングすることによって、実験と整合する予測ができるようになっている。しかし、CCへの熱リーク、蒸発器の熱伝達率や多孔体内の圧力損失の予測(特に気液二相流時)にはまだ課題がある。非定常解析では、一部の報告では起動挙動や温度振動をよく再現しているが、まだ十分とは言えないのが現状である。特に、CCおよびコア内の気液分布および温度分布の考慮が必要と考えられ、これにより起動時のLHP全体の気液分布挙動、温度振動、熱リーク見積りの高精度化などにつながると考えられる。

蒸発器ウィック内熱流動については、連続体モデル、ポアネットワークモデル(PNM)、格子ボルツマン法(LBM)によるシミュレーションが行われている(図4)。ウィック内が気液二相状態の時は、多孔体内に気液界面が存在するため現象が複雑となる。PNMとLBMでは不均一な空隙構造を考慮できるため、気液二相状態での詳細な気液界面形状を計算することができる。蒸発器の周期構造の一部を取り出した計算が行われており、実際の観察結果と定性的に整合する結果が得られている。しかし、多孔体内二相熱流動と蒸発器熱伝達率の関係、多孔体微細構造と気液分布および熱流動との関係、気液二相状態遷移時の熱流動などの詳細についてはまだ課題がある。PNMやLBMでの3次元の実際の蒸発器形状、スケールでのシミュレーションについては計算コストの課題もある。

2.2 応用研究

発明以来、LHPは宇宙分野で先行して開発が進められてきたが、2000年頃から民生応用においても研究開発が進められてきた。まずLHPの適用可能性を示すためにこれまでに開発されたLHPの輸送距離と実効熱伝導率の関係を対数スケールでまとめたものを図5に示す。LHPの実効熱伝導率は以下の式で計算した。

$$k_{LHP} = \frac{Q}{\Delta T_{e-c}} \frac{L_{vl+c}}{A_{vl}} \quad (2)$$

ここで、 Q は熱輸送量、 L_{vl+c} は蒸気管と凝縮器の長さの和、 ΔT_{e-c} は蒸発器と凝縮器との温度差、 A_{vl} は蒸気管の断面積である。輸送距離はスマホサイズから10m級まで実証されており、幅広い分野で適用可能であることがわかる。最大の実効熱伝

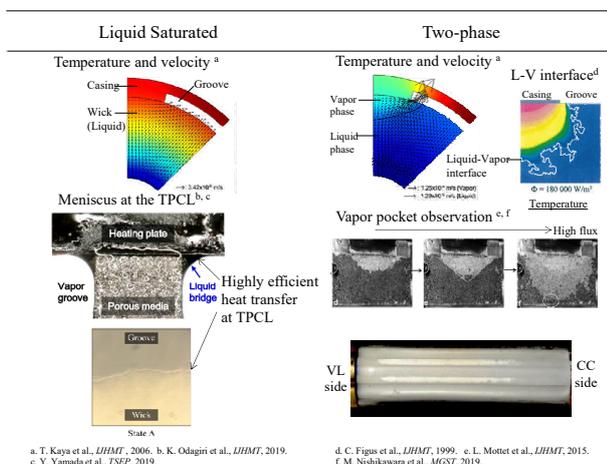


図4 LHP蒸発器内熱流動に関する研究例[41-46]

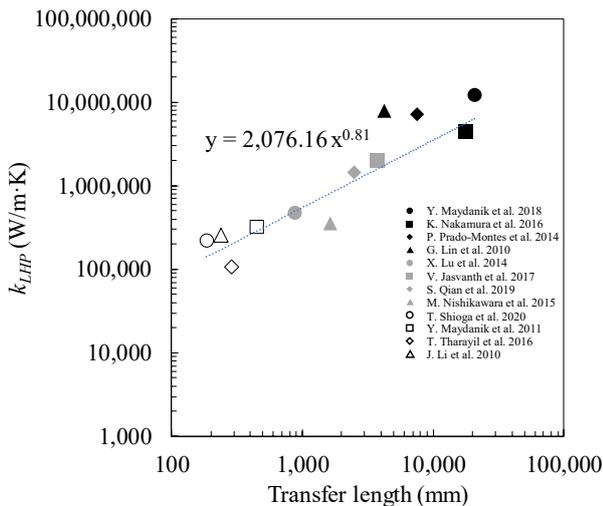


図5 LHPの実効熱伝導率[49-60]

導率は1千万にまでのぼっている。図5の近似式を用いれば大雑把にはLHPによる熱輸送性能を見積ることができる。熱流束は100 W/cm²程度、熱輸送量は10 kW程度、動作温度は200 °C程度が実証されている最大である。

2.2.1 民生分野での各種機器への応用

LHPの応用研究は多くが電子機器の冷却を目的としたものである。パソコンCPUやGPU、IGBTなどのパワーエレクトロニクス[61]、EVバッテリー[62]、スマホ[63]、EVインホイールモータ[64]、データセンタ[65]、LED[66]などで開発例がある。2024年にはStreacom（オランダ）とCalyos（ベルギー）の共同開発でLHPによるゲーミングPCのCPUとGPUを冷却するファン不要のケーシングが約20万円で発売されている（図6）。これは400 W程度の冷却能力で、LHP市販例の第一号だと思

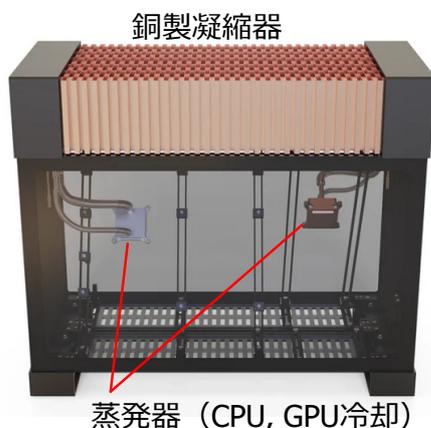


図6 Fanless Gaming Case [67]

われる。冷却以外では、ジェットエンジンインタークーラの防氷など加熱目的での開発例もある。

2.2.2 低コスト化

LHPは数百円で市販されているHPと比較するとまだ価格は高く、ラインでの生産で数十万円程度である。様々な分野で利用されるには低コスト化が必須である。コストの要因は主に金属多孔体自体の価格と精度を必要とする蒸発器の組み立てである。蒸発器ケースの中で多孔体を焼結する方法や3Dプリンタによってウィックを含めた蒸発器を一体で製作する試みが行われている。3Dプリンタでは、条件を調整することにより細孔径も制御できることが示されている[68]。3Dプリンタの分解能が向上し数μmの空隙やそのネットワークを自由に製作できるようになれば、細孔分布などの多孔体の微細構造と、浸透率および実効熱伝導率などの多孔体特性との関連やLHP熱性能との関係などは非常に興味深い課題になると思われる。3Dプリンタによる低コスト化と微細構造による高性能化の合わせ技で普及を加速させることができるかもしれない。また2023年のヒートパイプ国際会議では、モジュール化によって同じ設計の蒸発器を並列に並べることで様々なフットプリントに対応する事例も紹介された。また、軽量化のため樹脂チューブやアルミコンデンサの適用も検討されている[36]。2017年には台湾の研究グループより、蒸発器の組み立て方法を工夫することにより、ニッケルウィック搭載100 W級LHPのコストが20ドル以下となったことが報告されている[69]。

3. おわりに

近年のLHP研究動向を紹介した。LHP研究者の貢献によりLHPの動作可能範囲が広がっており、これから民生分野の各種機器に実装されていくだろうと予想している。これから低コスト化やより一層の適用範囲の拡大によって応用事例を増やして、次世代産業の省エネに大きく貢献できると考えられる。

Scopusにて2010年以降のLHP文献の出版件数を調べたところ、日本は、中国、アメリカ、インド、イギリスに次ぐ5位であった。これを1位にすることは現実的でないと考えますが、より世界での存在感を高めるには、研究室や一組織単位での

活動には限界があるので、産学のヒートパイプコミュニティがチームとなって魅力ある新しい研究開発を行い、世界をリードしていく必要があると考える。

参考文献

- [1] Gerasimov, Y. F. et al., *Eng. Phys. J.*, **28-6** (1975) 957-960.
- [2] 大串哲朗, 伝熱, **51-217** (2012) 39-46.
- [3] Deng, D. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **56** (2013) 283-293.
- [4] Semenic, T. et al., *J. Heat Transf.*, **130** (2008) 022602.
- [5] Singh, R. et al., *J. Heat Transf.*, **131** (2009) 082601.
- [6] Ameli, M. et al., *Appl. Therm. Eng.*, **52** (2013) 498-504.
- [7] Espinosa, F.A.D. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **55** (2012) 7471-7486.
- [8] Faghri, A., *Heat Pipe Science and Technology*, Taylor & Francis Group (1996).
- [9] Freggens, R. A., Experimental determination of wick properties for heat pipe applications, Proc. 4th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference (1969) 888-897.
- [10] Odagiri, K. and Nagano, H., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **130** (2019) 938-945.
- [11] Hinderman, J. D. and Phillips, E. C., Determination of properties of capillary media useful in heat pipe design, Proc. ASME-AIChE 11th National Heat Transfer Conference (1969) 69-HT-18.
- [12] Choi, J. et al., Investigation on operational characteristics of the miniature loop heat pipes with flat evaporators based on diverse vapor removal channels, Proc. 16th IHPC (2012).
- [13] Santos, P.H.D. et al., *Appl. Therm. Eng.*, **30** (2010) 1784-1789.
- [14] 日本機械学会(JSME), 機械工学便覧, 丸善 (1987).
- [15] Cui, Z. et al., *Appl. Therm. Eng.*, **208** (2022) 118249.
- [16] Xu, J. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **72** (2014) 163-176.
- [17] Riehl, R. R. and dos Santos, N., *Appl. Therm. Eng.*, **28** (2008) 1745-1755.
- [18] Gakal, P. et al., *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, **1226** (2022) 012036.
- [19] Mo, Q. and Liang, J. T., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **49** (2006) 770-776.
- [20] Pastukhov, V. G. and Maydanik, Y. F., *Int. J. Therm. Sci.*, **74** (2013) 81-85.
- [21] Chang, X. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **135** (2019) 378-391.
- [22] Grob, E. et al., Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) loop heat pipes: An eventual first year on-orbit, 34th International Conference on Environmental Systems (2004).
- [23] Choi, M., Thermal vacuum/balance test results of swift BAT with loop heat pipe thermal system, 2nd International Energy Conversion Engineering Conference (2004).
- [24] Rodriguez, J. I. and Na-Nakornpanom, A., In-flight performance of the TES loop heat pipe rejection system: Seven years in space, 42nd International Conference on Environmental Systems (2012).
- [25] Ku, J. and Ottenstein, L., Thermoelectric converter for loop heat pipe temperature control: Experience and lessons learned, 40th International Conference on Environmental Systems (2010).
- [26] Nagano, H. et al., *Trans. Jpn. Soc. Aeronaut. Sp. Sci. Aerosp. Technol. Jpn.*, **10** (2012) Pc_27-Pc_33.
- [27] Franzoso, A. et al., TECLA: A TEC-enhanced loop heat pipe, 43rd International Conference on Environmental Systems (2013).
- [28] Yang, R. et al., Experimental study and analysis of applying thermoelectric cooler to improve LHP operation with non-condensable gas, Proc. Jt. 18th IHPC 12th IHPS (2016) 299-306.
- [29] Hongxing, Z. et al., *J. Mech. Sci. Technol.*, **31** (2017) 2597-2605.
- [30] Okamoto, A. et al., Initial evaluation of on-orbit experiment of loop heat pipe on ISS, Proc. 49th International Conference on Environmental Systems (2019).
- [31] Fang, Z. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **178**

- (2021) 121476.
- [32] Pastukhov, V. G. and Maydanik, Y. F., *Int. J. Therm. Sci.*, **172** (2022) 107351.
- [33] Gongharov, K. A. et al., *SAE Tech. Pap.* (2006) 2006-01-2171.
- [34] Mishkinis, D. et al., Thermal control of loop heat pipe with pressure regulating valve, *Proc. VIII Minsk Int. Semin. Heat Pipes, Heat Pumps, Refrig. Power Sources* (2011).
- [35] Hartenstine, J. et al., Loop heat pipe with thermal control valve for variable thermal conductance link of lunar landers and rovers, *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition* (2011)
- [36] Mishkinis, D., Recent trends on capillary driven two phase heat loops developments and applications, *Proc. Jt. 21st IHPC 15th IHPS* (2023).
- [37] Joung, W. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **86** (2015) 796–808.
- [38] Park, C. et al., Operating characteristics of a pressure-controlled loop heat pipe with a mechanically driven gas pressure controller, *Proc. Jt. 21st IHPC 15th IHPS* (2023).
- [39] Khalili, M. et al., *Appl. Therm. Eng.*, **143** (2018) 964–976.
- [40] Nishikawara, M. et al., *Appl. Therm. Eng.*, **249** (2023) 123428.
- [41] Kaya, T. and Goldak, J., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **49** (2006) 3211–3220.
- [42] Odagiri, K. and Nagano, H., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **130** (2019) 938–945.
- [43] Yamada, Y. et al. *Therm. Sci. Eng. Prog.*, **11** (2019) 125-132.
- [44] Figus, C. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **42-14** (1999) 2557–2569.
- [45] Mottet, L. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **83** (2015) 636–651.
- [46] Nishikawara, M. et al., *Microgravity Sci. Tech.*, **31** (2019) 61-71.
- [47] Zhang, Q. et al., *Appl. Therm. Eng.*, **164** (2020) 114472.
- [48] Hatakenaka, R. et al., Visualization of Internal Fluid Behavior in a Miniature Loop Heat Pipe using Neutron Radiography, *41st International Conference on Environmental Systems* (2011) AIAA 2011-5140.
- [49] Maydanik, Y. F. et al., *Appl. Therm. Eng.*, **130** (2018) 1052-1061.
- [50] Nakamura, K. et al., *Appl. Therm. Eng.*, **107** (2016) 167-174.
- [51] Prado-Montes, P., *Appl. Therm. Eng.*, **66** (2014) 474-484.
- [52] Lin, G., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **53** (2010) 3231-3240.
- [53] Jasvanth, V. S. et al., *Appl. Therm. Eng.*, **111** (2017) 1655-1663.
- [54] Qian, S. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **139** (2019) 280-292.
- [55] 西川原理仁, マルチスケール気液二相熱流動解析に基づくループヒートパイプ熱輸送機構の解明と高性能化に関する研究, 名古屋大学, 博士論文 (2015)
- [56] Lu, X. and Wei, J. J., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **79** (2014) 54-63.
- [57] Maydanik, Y. F. et al., *Appl. Therm. Eng.*, **31** (2011) 3533-3541.
- [58] Tharayil, T. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **93** (2016) 957-968.
- [59] Li, J. et al., *Appl. Therm. Eng.*, **30** (2010) 741-752.
- [60] Shioga, T. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **151** (2020) 119436.
- [61] Dupont, V. et al., Railways qualification tests of capillary pumped loop on a train, *Proc. 17th IHPC* (2013).
- [62] Bernagozzi, M. et al., *Appl. Therm. Eng.*, **194** (2021) 117061.
- [63] Shioga, T. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **181** (2020) 116018.
- [64] Ušakovs, I. et al., *Case Studies Therm. Eng.*, **47** (2023) 103069.
- [65] Xue, Z. H. et al., *Appl. Therm. Eng.*, **220** (2022) 119715.
- [66] Huang, B. J. et al., *J. Light Visual Environment*, **32-2** (2008) 148–155.
- [67] <https://www.calyos-tm.com/applications/personal-computers>, access at 2024/10/2.

[68] Gupta, R. et al., Proc. Small Satellite Conf. (2023)
134.

[69] Huang, B. J. et al., Appl. Therm. Eng., **126** (2017)
1091-1097.

自励振動型ヒートパイプ Pulsating Heat Pipe

麓 耕二 (青山学院大学)

Koji FUMOTO (Aoyama Gakuin University)

e-mail: fumoto@me.aoyama.ac.jp

永井 大樹 (東北大学)

Hiroki NAGAI (Tohoku University)

e-mail: nagai.hiroki@tohoku.ac.jp

1. はじめに

自励振動型ヒートパイプ (Pulsating Heat Pipe: PHP あるいは Oscillating Heat Pipe: OHP, 以下 PHP) は, 1990 年頃, 赤地によって考案された[1]. 一般的な PHP は図 1 に示すような流路直径が数ミリの 1 本の蛇行流路で形成されている. この細い流路を加熱部と冷却部の間に複数回往復させ, 流路内部を真空ポンプ等で真空に脱気した後, 作動流体を流路体積の半分 (50 vol%) 程度封入したもので, 表面張力により形成された液スラグの自励振動によってパッシブで高い熱輸送を実現する. PHP には基本的に加熱部, 断熱部, および冷却部が設けられており, 蒸発と凝縮が連続的に起きることで内部に局所的な圧力変動が生じる. この圧力変動により自励振動が生じ, 潜熱と顕熱を利用した高効率な熱輸送を行う. 圧力差により作動流体が駆動し自励的に振動することで熱輸送が行われるため, 従来型ヒートパイプに比べ重力の影響を受けにくいのが特徴である. また, 従来型ヒートパイプのようにウィックやグルーヴのような内部構造に由来する毛管力限界やフラiddiing 限界による液還流制限がないことから高い熱輸送性能を有すると考えられており, これまで様々な研究が行われている. 特に近年, 高密度・高集積化

された電子機器の冷却用, 放熱用デバイスとして, PHP の動作機構の解明を目的とした基礎的研究, 熱輸送性能向上を目的とした応用的研究, およびそれらの研究から得られた知見を考慮した数値シミュレーション研究が行われている. 本稿では, PHP の基礎的情報の提供と主に 2010 年以降の PHP 研究の動向等を踏まえて紹介する.

2. 熱輸送性能におよぼす各種パラメータ

PHP の熱輸送性能を決めるパラメータには作動流体の種類, 充填率, 流路形状, 流路表面の濡れ性, 流路ターン数, および設置姿勢などが存在する. これまで熱輸送性能の向上およびメカニズム解明を目的に様々な検討が行われている. 次に各種パラメータと PHP の熱輸送性能の関係について概説する.

2.1 動作原理について

PHP は図 1 に示す通り一端が加熱部 (受熱), 他端が冷却部 (放熱) となり, 一般的に加熱部と冷却部の間は断熱部が設けられている. この状態で PHP の加熱部では, 沸騰・蒸発が発生し, 他端の冷却部では凝縮が生じるため, 両者の圧力差により, 液スラグが移動する. また PHP は一筆書きの流路形状のため, 液スラグの移動が他の液スラグを加熱部へ導くことになる. このように圧力変動に伴う液スラグの移動が連成し, 連続的な振動を引き起こす. この時, 自励振動によって液スラグによる顕熱移動と気液相変化に伴う潜熱移動の両者によって加熱部から冷却部へ熱を輸送する. また PHP は図 2 に示す通り, 蛇行流路の端部処理方法によって開ループ型 (Open loop 型) と閉ループ型 (Closed loop 型) に大別される. 開ループ型と閉ループ型の熱輸送性能には有意な差があることが報告されている. 特に閉ループ型では, 加熱量が大きくなると, ループに対して一方向への

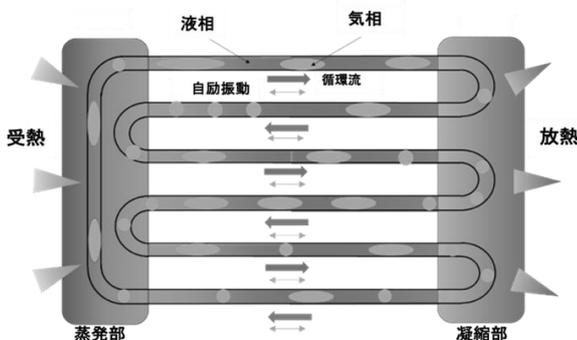


図 1 PHP (Closed loop 型) の概要

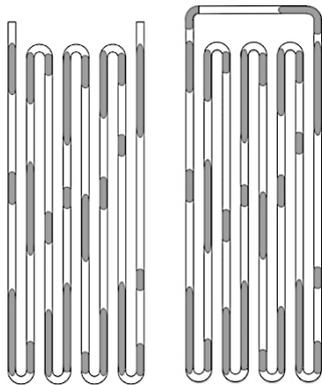


図2 開ループ (Open loop), 閉ループ (Closed loop)

循環流が形成されることが分かっている。その結果、開ループ型に比べて高い熱輸送性能を示すことが知られている。また積極的な一方の循環流を形成させる目的から、流路内部にチェックバルブの挿入や流路断面形状を変化させる方法が試みられている。なお PHP の動作原理に関しては、未解明な部分が多く、熱輸送メカニズムの解明に向けて現在でも数多くの研究が行われている[2, 3]. Zhang ら[4]は作動流体の表面張力および液膜による熱伝達を考慮した熱伝達モデルを計算することで、PHP の熱輸送性能におよぼす物理的影響および様々な幾何学的影響について調査している。特に PHP の熱伝達は主に顕熱輸送により行われており、その割合は全熱輸送の 90%以上を占めると報告している。Shafii ら[5]は開ループ型および閉ループ型の PHP の熱伝達モデルを提案し、液スラグおよび蒸気プラグの挙動について調査している。解析に基づき、開ループ型および閉ループ型のどちらにおいても顕熱輸送が主な熱輸送方法であることを報告している。三浦ら[6]は PHP の複数ターンから 1 ターン分を切り出し、加熱部と冷却部を設置した単流路において作動流体を機械的に振動させて自励振動型ヒートパイプの流動を模擬し、潜熱輸送と顕熱輸送の寄与度合いを調査した。詳細な実験により、振動振幅が増加すると潜熱輸送量が増加する一方、液柱振動数が増加すると潜熱輸送は低下することを明らかにしている。これらの傾向は流路内に存在する液膜の状態に起因すると指摘している。

2.2 流路形状および流路ターン数がおよぼす影響

PHP が動作するためには、第一に流路内で液

スラグと蒸気プラグを形成できる程度に管内径が十分小さい必要がある。言い換えると作動流体の表面張力と管内径に基づく液スラグの保持力が重力に勝ることが必須と言える。また PHP において理論的な最大内径は、ボンド数 (Bo 数) が 4 に等しい時に生じることが知られている[7]. ボンド数は重力と表面張力の比として知られる無次元数であり、次式で定義される。

$$Bo = \frac{g(\rho_l - \rho_v)D_i^2}{\sigma} \quad (1)$$

ここで、 g は重力加速度、 ρ_l および ρ_v はそれぞれ液体および蒸気の密度、 σ は表面張力を表す。式(1)を D_i について整理し、ボンド数 Bo に 4 を代入すると最大内径 D_{max} は次式より求められる。

$$D_{max} = 2 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (2)$$

ここで、式(2)によって算出される水の D_{max} は約 5 mm となる。また管内径は最大内径以下であれば、径が大きくなるほど熱輸送量が大きくなり、熱抵抗値も低くなることが報告されている[8]. 一方、PHP の宇宙環境利用を目的とした研究では、地上の重力加速度に比べて小さくなることから、地上実験では動作できない程度の大きな直径を有する PHP の性能評価が行われている[9].

流路断面の形状には様々なものがあり、PHP 内の流動形態に影響を与えると考えられている。具体的には正方形断面および三角形断面など、鋭角を持つ流路断面形状の場合には、毛細管作用により作動流体が流路の角に引き込まれるため、円形断面の場合に比べ液スラグを形成し易くなると言われている[10]. また流路表面の表面性状において、濡れ性はマイクロチャンネル内のスラグ流の圧力損失に影響を与える重要なパラメータである。これまで PHP の流路表面を親水性にすることで液スラグの自励振動が活発になること、および熱抵抗値が低くなり熱輸送性能が向上することが報告されている[11].

流路ターン数 (チャンネル数ともいう) は、PHP の熱輸送性能に大きな影響を与える。具体的には、チャンネル数を増加させることで重力の影響を極小化できることが知られている。これはチャンネル

ル数が増加することで、より多くの異なった箇所
で熱入力が行われることになり、不特定多数のチ
ャンネル内部において相変化に伴う圧力差が生じ、
振動流が励起され易くなることに起因している。
結果として、最大内径 (D_{max}) 以下において管径
が大きく、かつ流路ターン数が増加するほど熱輸
送性能が高くなるのが、複数の研究により報告
されている[12].

2.3 設置姿勢がおよぼす影響

PHP においては局所的な圧力変動が作動流体の
自励振動の駆動力であることから、従来型ヒート
パイプに比べて重力の影響は小さいと言われている。
PHP の熱輸送性能におよぼす設置姿勢の影響
は、一般的にチャンネル数の多寡に関わらず垂直
ボトムヒートモード (PHP が垂直に設置され、下
端を加熱部とした状態) が最も良い性能を示し、
また水平姿勢では熱輸送性能が低下することがよ
く知られている。さらにトップヒートモード (加
熱部が上部に位置する状態) では、極端に性能が
低下する。一方、流路ターン数が極めて多い場合
(例えば 40 ターン以上) の実験結果では、熱輸送
性能は設置姿勢の影響を受けないことが報告され
ている[13]。また近年、設置姿勢の影響を受けず、
高い熱輸送性能を維持できる PHP の研究開発が
盛んに行われている。鈴木ら[14]は、PHP にウィ
ックを挿入し、作動流体に流動の方向付けを行う
ことで、循環流を誘起し熱輸送性能を向上させた。
またトップヒート姿勢において PHP にリザーバ
(液溜め) を取り付けることで、水平姿勢の場合と
同程度の性能が得られることを報告した例もある
[15].

2.4 作動流体の種類および封入率がおよぼす影響

PHP の熱輸送性能は、使用される作動流体によ
って大きな影響を受ける。特に作動流体の表面張
力、潜熱、比熱、粘性、および飽和状態における
温度と圧力の関係など、各種物性値が熱輸送性能
に大きな影響を与える。そのため作動流体の選定
には適材適所の選択が求められる。

次に作動流体の各物性値と PHP の性能に関し
て概説する。

(1) 潜熱：潜熱が小さい場合には、ある一定温度
という条件の下では、作動流体は素早く蒸発し、
また蒸気圧も高くなるため、液スラグの振動速度
が速くなり PHP の熱輸送性能は向上する。一方、

PHP は潜熱に比べて顕熱の熱輸送割合が大きい
ことが知られている。そのため、高い比熱を持つ
作動流体が望ましいことが示唆される。

(2) 粘性：粘度が低い場合には、壁面とのせん断
応力および管内の圧力損失が減少するため、少な
い熱入力でも振動流を維持できる。

(3) 飽和状態における温度と圧力の関係
($(dp/dT)_{sat}$)：飽和状態における温度と圧力の変
化割合は、温度変化に対する蒸気泡の成長・崩壊
速度に影響を与える。そのため $(dp/dT)_{sat}$ の値が大
きい場合には、加熱部と冷却部間の圧力差が増加
し、液スラグの振動が激しくなるため PHP の熱輸
送性能が向上する。

以上のように PHP の作動流体には、使用温度範
囲、システムの圧力、材料との相互作用などによ
って決定される。一般的に水、アルコール類、冷
媒系、フルオロカーボン系、およびアンモニアな
どが使用される。これまで数多くの実験結果が報
告されており、PHP の作動流体に特化したレビュー
論文も報告されている[16]。興味深い取り組み
としては、 SiO_2 や Al_2O_3 などのナノ粒子を混濁し
たナノ流体を作動流体として用いることで高い熱
輸送性能を得る研究[17]や二成分系の水溶液 (メ
タノール水溶液およびエタノール水溶液など) を
使用した研究がある。中でも Self-rewetting 溶液
(自己浸潤液ともいう) を作動流体として使用し
た研究が注目されている。Self-rewetting 溶液の特
異な表面張力特性により、加熱面近傍において低
温側から高温側へと液還流が生じ (マランゴニ効
果)、ヒートパイプの動作限界であるドライアウト
の抑制効果が報告されている[18].

作動流体の封入率 (Filling Ratio, 以下 FR) は、
常温大気圧下における作動流体の封入体積を PHP
の全内容積で除したものである。FR が低すぎる場
合には、液スラグの振動を持続させるための十分
な液体がなくなるため、加熱部ではドライアウト
が発生し易くなる。一方、封入率が高すぎると、
液スラグを押し出すための蒸気泡が十分に発生で
きないため、その装置はサーモサイフンの様に
振舞うことになる。そのため、一般的に PHP として
動作する最適な FR は、40vol% から 60 vol% の範
囲とされており、この範囲内において激しく自励
振動が発生し、結果として高い熱輸送性能が得ら
れる。

一方、作動流体に混入する非凝縮性ガスの影響に関して、大丸ら[19]は、長期ミッション型の宇宙探査機に PHP が搭載された際の高信頼性を獲得するため、内部で発生する非凝縮性ガス (Non-Condensable Gas : 以下 NCG) が熱輸送性能におよぼす影響の有無とその特性について調査を行った。同氏によると、低熱入力帯において NCG は PHP の起動特性を悪化させ、また NCG の添加量が多い場合 (NCG:10%)、熱抵抗値が著しく増大し、性能が低下することを報告している。

3. メカニズム解明のための研究事例

PHP は構造の単純さが大きな長所であるが、内部で生じている熱輸送現象、すなわち、相変化を伴う細管内気液二相の往復振動流の流れと伝熱現象は極めて複雑である。これまで PHP の振動機構および熱輸送メカニズムの解明を目的とした基礎的研究が数多く行われている。ここでは PHP を対象とした可視化研究および数値シミュレーション研究について紹介する。

3.1 内部流動および温度分布に対する可視化研究

PHP の可視化研究は、内部で発生する複雑な熱輸送現象の理解を深める上で重要となる。また可視化研究によって得られた知見は、液体の蒸発・凝縮サイクル、液スラッグの流動、二相流の挙動を直接観察することができ、数値解析や理論モデルの検証に役立つ。これまでにも多種多様な可視化技術が試みられている。詳細については、PHP の可視化に特化したレビューもあるので参照されたい[20]。ここでは、特徴的なイメージング技術をピックアップして概説する。

ガラス製細管を蛇行流路形状に加工した PHP を用いて、熱輸送時の自励振動挙動および液スラッグ等の流動を詳細に可視化できるが、温度状況の把握には依然として熱電対を用いる必要がある。このような状況に対して、内部の温度分布の把握を目的として PHP の一部に赤外線透過するサファイアガラスを使用し、赤外線カメラおよび高速度カメラによって内部の温度分布と流動を明らかにする試みがある。しかしながら、作動流体の種類に制限があること、気相の温度測定が困難であることが課題点となっている[21]。また PHP の流路に接するガラス表面側に発光強度に温度依存性を有する燐光分子 (Temperature Sensitive Paint,

以下 TSP) を用いて PHP の流路内壁面の温度分布を計測する試みがある。TSP を PHP 内部に接触させることで、これまで計測が困難であった流路内部温度を非接触で空間的かつ連続的に取得することができ、赤外線カメラによる手法と比較して高精度であることが報告された[22]。

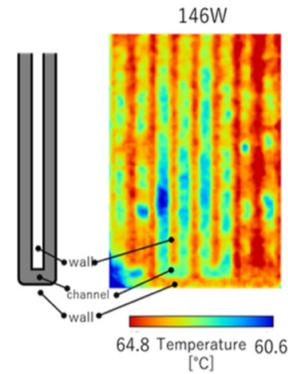


図3 PHP 流路および壁面の瞬間的な温度分布

一方、アルミニウム製 PHP に対して、中性子ラジオグラフィ装置を用いて内部の流動現象を可視化する手法がある[23]。中性子線はアルミなどの金属を透過するが、水 (水素) によってブロックされる性質を有する。そのため PHP のような気液混相流に対する可視化に適している。図 4 に PHP に中性子を照射した時のイメージと取得画像 (サンプル画像) を示す。取得画像の黒い部分は液相を白い部分は蒸気相および PHP の筐体部分を示している。高速度カメラ等を使用することで内部の流動様相をリアルタイムに可視化できる。一方、撮像の解像度に課題があり、流路壁に存在する薄い液膜や蒸発によって発生する微小な気泡を詳細に可視化することは難しいのが現状である。

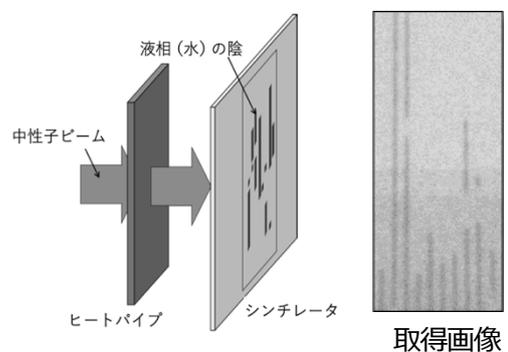


図4 中性子ラジオグラフィによる可視化イメージと取得画像

3.2 シミュレーションによる自励振動の評価

PHP の数値モデルでは、蒸気と液体の界面挙動の予測が重要である。特に、マルチターン間の相互作用やヒートパイプ全体の挙動を正確に捉えるため、マイクロな二相流モデルとマクロなスケールのモデルの両方が必要となる。PHP は主に毛細管力により分離したスラグ流に支配され、この液体スラグ流をモデリングすることが求められる。これまで PHP の設計指針を得るために様々な実験が行われ、経験的にその仕様が決められてきた。これに対して、PHP 自身の作動原理を解明し、明確な設計指針を得るために様々な内部流動モデルが提案されてきている。

Faghri ら[24]は、PHP 内部に働く力学として、内部振動流に対する二相混相流の状態変化による質量変化を考慮した流体力学モデル、そして壁面と作動流体との顕熱移動、作動流体と蒸発気体との潜熱移動を考慮した熱輸送の伝熱工学モデルを提案している。その後、このモデルがベースとなった内部流動をシミュレートした数値計算が多く行われている。特に 2001 年に Shafii と Faghri によって発表されたものが主流となり、その後、2005 年に Holley[25]が、2011 年には Mameli[26]がそれぞれにモデルをアップデートしている。これらのモデルでは PHP 内に分布する気液に関してエネルギー保存則、および運動量保存則を時間発展的に解くことで、内部流体の運動を模擬することが可能となっている。特に近年 Mameli らによって改善されたモデルでは、管壁と作動流体間の強制対流熱伝達率を詳細化し、気液の運動にターン部での圧力損失を考慮したことにより、定常状態の性能に関しては実験値と良い一致を見せるまでに至っている。

4. 特殊機能を有するデバイスの紹介

次に PHP に関連する応用的な研究事例を紹介する。

4.1 マイクロ PHP

PHP の中でも流路直径が 1mm 以下である物はマイクロ PHP (以下 μ PHP) と呼ばれ、昨今のコンピュータ、スマートフォン、家電製品など、電子機器の小型化に対応可能な冷却デバイスとして注目されている。

流路高さが 350 μ m、長さ 40mm、作動流体にエ

タノールを使用した μ PHP に対して熱輸送性能と内部流動の関係性を明らかにした報告がある[27]。それによると μ PHP においても、高い熱輸送性能を有し、また熱輸送量に占める潜熱輸送の割合が高いことが報告されている。また Kim らの研究グループ[28]は、 μ PHP に関して先導的な研究を行っており μ PHP の性能評価、熱輸送メカニズム、および最適形状等について詳細な研究を行っている。岩田ら[29]は、流路直径が 400 μ m で冷却部から蒸発部への液の流れを誘発するため逆止弁を設置し、宇宙環境下で使用可能な軽量でフレキシブルな極細 PHP を開発した。作動流体に HFC-134a を使用し、高い熱輸送性能を実現した。さらに流路の一部にリザーバ(液溜め)を取り付けることで、加熱部の温度をリザーバ温度付近で能動的に制御できることも明らかにした。

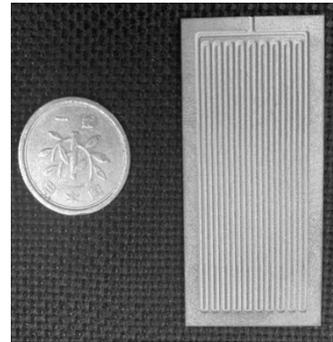


図 5 μ PHP 流路の外観
(長さ 52 mm, 幅 25 mm, 厚さ 1.5mm)

4.2 逆止弁付き PHP

閉ループ型 PHP の場合、安定動作し、かつ高い熱輸送性能を示すためには作動流体の流れを循環流化することがキーポイントとなる。条件によっては特別な機構が無い PHP でも循環流が生じるが、確実に循環流化するためには、作動流体が一方方向に流れやすい仕組みを流路内に設けるとするのが基本的な考え方である。先行研究では、いくつかのアプローチが提案されており、逆止弁構造の適用のほかに非一様な流路内径の適用、ウィックの挿入、流路内壁の沸騰しやすさに傾斜を付ける方法等がある。Miyazaki ら[30]は、内径 2mm、銅パイプ製 PHP にフローティングタイプの逆止弁を 3 箇所を組み込み、動作特性実験を実施した。逆止弁無しではボトムヒート姿勢でしか動作しなかったのに対して、逆止弁付き OHP ではボトムヒ

ート、水平モード、およびトップヒートモードの全姿勢で動作することを確認し、逆止弁付き OHP の有効性を示している。

4.3 宇宙応用を目的とした PHP

PHP は、基本的に蛇行細管のみで構成される熱輸送デバイスであるため、狭い隙間において効率的な熱輸送が可能であり、複雑なルーティングにも適用可能である。また従来のヒートパイプに比べると重力依存性が小さいことから、PHP の宇宙利用の検討が進められている。実機適用に向けた研究例として、宇宙機に搭載される電子機器を想定した PHP の冷却システムの開発、実機検証、および無重力環境を模擬した検証が広く進められている [31]。

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) では、小型実証衛星 SDS-4 での平板型ヒートパイプの軌道上性能評価ミッション (FHP On-orbit Experiment: FOX) において、チェックバルブ付きの平板型 PHP の実証実験を実施し [32]、初期の気液分布が PHP の始動特性に強く影響すること、および始動が困難な初期条件を確認した [33]。また JAXA では、南極での宇宙線反粒子測定計画 (General Anti-Particle Spectrometer: GAPS) での気球実験装置向けに PHP を開発し、実証試験への適用を目指している。GAPS では内部発熱が広範囲に分布しており、内部温度を -35°C に保ちながら宇宙空間へ熱を放射させる必要があることから、加熱部、冷却部とともに約 2m、断熱部長さが 1~3m 程度の大型 PHP の開発が進められた [34, 35]。

4.4 3D プリンターで生成した PHP

ヒートパイプの小型化・軽量化が求められる中、PHP の筐体にプラスチック材料を使用するポリマー製ヒートパイプが提案されている。中でも熱溶解積層方式 3D プリント樹脂製の PHP は低コストかつ可塑性が高いという利点を持ち、低温領域での熱輸送性能が期待されている。これまで金属製 PHP と同様の蛇行流路を有する、3D プリントによる ABS 製の PHP が開発された [36]。この二つの樹脂製の PHP は従来の金属製 PHP より製造コストが低く、製造時間も大幅に減少された。しかし、熱溶解積層方式は熱可塑性樹脂のフィラメントを熱で熔融し、ノズルから吐出して層を形成し、その繰り返しで一層ずつ積み重ねて造形するため、積層と押出線の間は樹脂が密着していない

隙間が生じやすい。そのため熱溶解積層方式 3D プリント樹脂製の内部真空度を維持するのは難しい。今後、真空度の維持および最適製造方法等を含む新たな技術によって当該分野の進捗が望まれる。図 6 に樹脂製 3D プリンターで作製したサンプル PHP の外観を示す。主な寸法は、長さ 160 mm、幅 34 mm、厚さ 2.5mm、チャンネル数 14、流路断面 $1.1\text{mm}\times 1.3\text{mm}$ である。

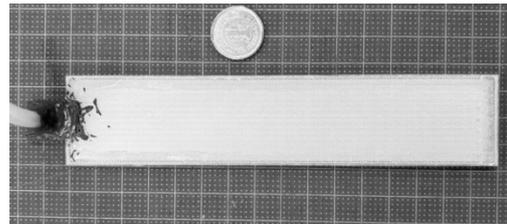


図 6 3D プリンターで作製した樹脂製 PHP の外観

4.5 低封入率型 PHP

2023 年、従来の PHP 研究を基に新たなヒートパイプが報告された [37]。ここでは最新トピックとして紹介する。従来、PHP において作動流体の封入率は一般的に 50 vol% 前後が最適であり、封入率を低下させるとドライアウトが発生するため、例えば 20 vol% 以下での研究は行われていない。これに対して、ヒートパイプの形状および主な寸法は従来の PHP と同様であるにもかかわらず、流路表面に化学処理を施すことにより、これまでドライアウトが生じるとされる極めて低い充填率 (10, 5 vol%) において熱輸送を実現することが報告された。これを低封入率型 PHP (Low Filling Ratio - Pulsating Heat Pipe, 以下 LFR-PHP) と称している。LFR-PHP は一辺 1.26 mm の正方形断面のチャンネルを 28 本有する、長さ 400 mm のアルミ製扁平多穴管を筐体としている。図 7 に LFR-PHP の一部を加熱した時の各部における温度履歴を示す。作動流体の封入量は 10 vol% であり各温度は加熱部 (T_{e2})、断熱部 (T_{ad})、凝縮部 (T_{c2}) を示している。図より加熱量を増加させると、15.2W 以降において全ての温度がほぼ同一となり、400mm のヒートパイプが均温化されているのがわかる。また一般的には PHP の熱抵抗が 0.2K/W 程度であるのに対して、LFR-PHP は、その 1/10 である熱抵抗 0.021K/W 程度となることが確認された。以上のように LFR-PHP は従来型 PHP に比

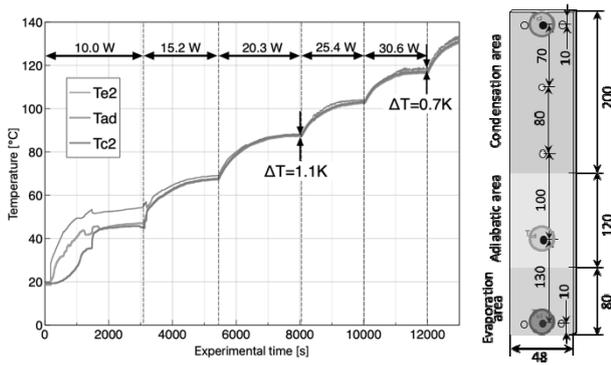


図7 長さ400mm LFR-PHPの温度履歴

べ極めて高効率な熱輸送を行うことが確認されたが、内部の流動状態および熱輸送特性の詳細などは未だ明らかになっておらず、今後の進展に期待したい。

5. おわりに

本項では電子機器冷却への応用ならびに各種放熱用デバイスとして期待される自励振動型ヒートパイプ (PHP) の概要と研究開発の動向、および各種取り組みを紹介した。今後、PHP 研究のさらなる進展により、従来型ヒートパイプやベーパーチャンバー同様、熱輸送デバイスとしての信頼性を得ることで、多岐分野での実用化が期待できると信じている。

参考文献

[1] Akachi, H., U.S. Patent4, 921, 041(1990).
 [2] Zhang, Y. and Faghri, A., Advances and Unsolved Issues in Pulsating Heat Pipes, *Heat Transf. Eng.*, **29** (2008) 20-44.
 [3] Jaeyeong, J. et al., Experimental investigations of heat transfer mechanisms of a pulsating heat pipe, *Energy Conv. Manag.*, **181** (2019) 331-341.
 [4] Zhang, Y. and Faghri, A., Heat transfer in a pulsating heat pipe with open end, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **45-4** (2002) 755-764.
 [5] Shafii, M. B. et al., Thermal modeling of unlooped and looped pulsating heat pipes, *J. Heat Transfer*, **123** (2001) 1159-1172.
 [6] 三浦正義, 長崎孝夫, 伊藤優, 加振機構を用いた自励振動ヒートパイプの熱輸送特性に関する基礎的研究 (有効熱伝導率の測定), *日本機械学会論文集*, **81-827** (2015) 14-00651.
 [7] Cai, Q. et al., Operating characteristics

investigations in pulsating heat pipe, *J. Heat Transfer*, **128-12** (2006) 1329-1334.
 [8] Yang, H. et al., Performance characteristics of pulsating heat pipes as integral thermal spreaders, *Appl. Therm. Eng.*, **48** (2009) 815-824.
 [9] Mangini, D. et al., A pulsating heat pipe for space applications: Ground and microgravity experiments, *Int. J. Therm. Sci.*, **95** (2015) 53-63.
 [10] Mahyar F., et al., Advancements in pulsating heat pipes: Exploring channel geometry and characteristics for enhanced thermal performance, *Int. J. Thermofluids*, **22** (2024) 100644.
 [11] Rapolu, P. and Sang, S. Y., Characterization of wettability effects on pressure drop of two-phase flow in microchannel, *Experiments in Fluids*, **51** (2011) 1101-1108.
 [12] Charoensawan, P. et al., Closed loop pulsating heat pipes: Part A: parametric experimental investigations, *Appl. Therm. Eng.*, **23** (2003) 2009-2020.
 [13] Shafii, B. and Mohammad, F. A., Analysis of heat transfer in unlooped and looped pulsating heat pipes, *Int. J. Numer. Methods Heat Fluid Flow*, **12-5** (2002) 585-609.
 [14] 鈴木祐二, 井上剛良, ウィックを挿入した自励振動型ヒートパイプの熱輸送特性, *Thermal Science & Engineering*, **26-3** (2018) 55-63.
 [15] 岩田直子, 小川博之, 宮崎芳郎, 温度制御可能な自励振動型ヒートパイプの実験的研究, *日本伝熱学会論文集*, **18-4** (2010) 127-132.
 [16] Xu, Y. et al., An updated review on working fluids, operation mechanisms, and applications of pulsating heat pipes, *Renewable and Sustainable Energy Rev.*, **144** (2021) 110995.
 [17] Lin, Y.-H. et al., Effect of silver nano-fluid on pulsating heat pipe thermal performance, *Appl. Therm. Eng.*, **28-11** (2008) 1312-1317.
 [18] 麓耕二, 川路正裕, Self-rewetting 溶液を用いた自励振動型ヒートパイプの性能向上に関する研究 (ブタノールとペタノールの場合), *Thermal Science and Engineering*, **19-1** (2011) 1-7.
 [19] 大丸拓郎, 永井大樹, 自励振動ヒートパイプにおける非凝縮ガスの影響, *航空宇宙技術*, **13**

- (2016) 17-24.
- [20] Su, Z. et al., Recent advances in visualization of pulsating heat pipes: A review, *Appl. Therm. Eng.*, **221** (2023) 119867.
- [21] Malla, L. K. et al., Thermal and flow characteristics in a flat plate pulsating heat pipe with ethanol-water mixtures: From slug-plug to droplet oscillations, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **194** (2022) 123066.
- [22] 大高裕矢, 石井慶子, 麓耕二, 自励振動型ヒートパイプ内部における感温塗料を用いた温度分布および蛍光染料を用いた流動の同時計測, *実験力学*, **22-1** (2022) 67-74.
- [23] Yasuda, Y. et al., Visualization of the working fluid in a flat-plate pulsating heat pipe by neutron radiography, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **185** (2022) 122336.
- [24] Mohammad, B. et al., Thermal Modeling of Unlooped and Looped Pulsating Heat Pipes, *J. Heat Transfer*, **123** (2001) 1159-1172.
- [25] Holley, B. and Faghri, A., Analysis of pulsating heat pipe with capillary wick and varying channel diameter, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **48** (2005) 2635-2651.
- [26] Mameli, M. et al., Numerical model of a multi-turn Closed Loop Pulsating Heat Pipe: Effects of the local pressure losses due to meanderings, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **55** (2012) 1036-1047.
- [27] Kamijima, C. et al., Relating the thermal properties of a micro pulsating heat pipe to the internal flow characteristics via experiments, image recognition of flow patterns and heat transfer simulations, *Int. J. Heat Mass Transf.* **163** (2020) 120415.
- [28] Jun, S. and Kim, S. J., Comparison of the thermal performances and flow characteristics between closed-loop and closed-end micro pulsating heat pipes, *Int. J. Heat Mass Transf.* **95** (2016) 890-901.
- [29] Iwata, N. et al., Characterization of thermal behavior of a micro pulsating heat pipe by local heat transfer investigation, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **196** (2022) 123203.
- [30] Miyazaki, Y. et al., Oscillating Heat Pipe with Check Valves, *Proceedings of the 6th International Heat Pipe Symposium, Chiang Mai, (2000)*.
- [31] 永井大樹, 安達拓矢, 大丸拓郎, 宇宙機の熱・流体制御の最前線, *J.HTSJ*, **57-238** (2018) 23-30.
- [32] 安藤麻紀子, 岡本篤, 前田真克, 杉田寛之, 平板型ヒートパイプ軌道上実証実験の初期評価, *日本機械学会熱工学コンファレンス講演論文集*, 熊本, (2012).
- [33] Ando, M. et al., On-orbit demonstration of oscillating heat pipe with check valves for space application, *Appl. Therm. Eng.*, **130** (2018) 552-560.
- [34] 岡崎峻, 松宮宏明, 福家英之, 宮崎芳郎, 井上剛良, 小川博之, GAPS 用大型自励振動ヒートパイプの熱輸送性能, 第 51 回伝熱シンポジウム講演論文集, 静岡, (2014).
- [35] Fuke, H. et al., Development of a Cooling System for GAPS using Oscillating Heat Pipe, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, **14-30** (2016) 17-26.
- [36] Hideyama, F. and Koito, Y., Heat Transfer Characteristics of an ABS Polymer Pulsating Heat Pipe Fabricated by a 3-D Printer, *Thermal Science & Engineering* **27-2** (2019) 59-66.
- [37] Fumoto, K. and Ishii, K., Flat plate pulsating heat pipe operating at ultra-low filling ratio, *Appl. Therm. Eng.*, **228-25** (2023) 120468.

ヒートパイプの作動液としてのナノ流体の利用

Utilization of Nanofluids as Working Fluid in Heat Pipes

大川 富雄 (電気通信大学)

Tomio OKAWA (The University of Electro-Communications)

e-mail: okawa.tomio@uec.ac.jp

1. はじめに

ヒートパイプの作動液は、高温部で熱を吸収して蒸発あるいは沸騰し、蒸気となって低温部に移動する。次に、低温部で放熱して液化し、ウィックの毛細管力を利用して高温部に戻る。すなわち作動液は、ヒートパイプ内で高温部から低温部に熱を移動するための媒体として、重要な役割を担う[1]。作動液に求められる主な特性としては、

- 使用温度域で適度な飽和蒸気圧を有すること
- 少量の液で大量の熱輸送を可能とするため、蒸発潜熱が大きいこと
- 毛細管力により速やかに低温部に移動するため、高表面張力かつ低粘性であること
- 高温部における吸熱とウィックによる液の搬送を高効率で行うため、濡れ性が良いこと
- 高効率で蒸発、沸騰、凝縮を行うため、熱伝導率が高いこと
- コンテナやウィック材との共存性が良く、腐食などを生じないこと

などがあげられる[2]。この他、地球温暖化係数が低いこと、人体に有害でないこと、不燃性であること、安価であることなども重要な観点である。以上を総合すると、水は優れた作動液であり、室温～200℃程度の温度域で最もよく使用される。これに次いで、水では凍結が心配されるより低温の条件ではエタノール、水ではきわめて高压となる高温条件ではナフタリンなどが比較的ポピュラーな作動液と言える。この他、極低温ではヘリウムや窒素、超高温ではリチウムや銀が作動液の候補となる[3]。

上述した古典的な作動液に加え、ヒートパイプの作動液として近年注目を集めている液体として図1に示すナノ流体がある。ナノ流体とは、水や油などのベース液中にナノメートルサイズの微粒子を懸濁した液のことで、1995年にChoiが熱伝導率の特異な上昇を報告して以来[4]、ナノ流体の

物性値や熱伝達特性について数多くの研究が行われている[5,6]。相変化熱伝達に関する研究も2003年頃より数多く行われており[7-9]、特に核沸騰中に伝熱面上に形成されるナノ粒子層の毛細管効果により、限界熱流束(CHF)が大きく向上することなどが報告されている[10,11]。

ナノ流体を作動液とするヒートパイプに関する研究も相変化熱伝達に関する研究とほぼ同時期に開始され[12,13]、現在でも精力的に研究が継続されている[14-16]。本稿では、ナノ流体を作動液とするヒートパイプに関する既存研究を概観し、その可能性と今後の課題について考察する。なお、核沸騰の場合と同様に、ヒートパイプ中でも、コンテナの内壁やウィックにナノ粒子が付着してナノ粒子層を形成する。このため、ナノ流体を作動液とするヒートパイプでは、作動液の他、コンテナ内壁及びウィックの表面特性にも変化を生じる。核沸騰中におけるCHFの向上では、液中に懸濁するナノ粒子よりもむしろナノ粒子層を構成するナノ粒子がより重要となることから、コンテナの内壁に予めナノ粒子層を形成したヒートパイプの伝熱特性に関する研究も紹介する[17,18]。

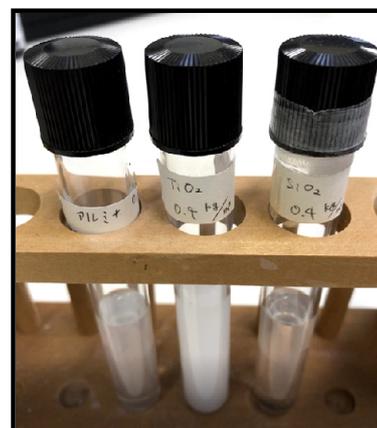


図1 ナノ流体の外観 (ベース液：水，粒子材質：左からアルミナ，二酸化チタン，シリカ)

2. ナノ流体ヒートパイプ

2.1 ナノ流体の作成方法と特性

ナノ流体の作成方法は、ナノ粒子の生成とナノ流体の作成が同時に行われる **One-step** 法と別途作成したナノ粒子をベース液中に分散させてナノ流体を得る **Two-step** 法に大別できる[19]。 **One-step** 法は、さらに物理的手法や化学的手法などに分類でき、液中に粒子を均一に分散させる上で有利とされているが、例えば金属蒸気を液体表面で凝縮させるなど高度な技術が必要で、製造コストも高い。一方、 **Two-step** 法では、比較的容易にナノ流体を作成可能であり、広く使用されているが、液中でナノ粒子が凝集して粒子クラスターを形成しやすい。このため、超音波の照射や機械的な攪拌などの手法に加えて、界面活性剤の添加、pH の調整、ナノ粒子の表面加工など、ナノ粒子の分散性を高めるための様々な工夫がなされている[20]。

ナノ流体を特徴付ける因子は、ベース液に関するものとナノ粒子に関するものに大別でき、ベース液に関するものとしては液体の種類、界面活性剤等の有無、pH 値、ナノ粒子に関するものとしては粒子の材質、形状、サイズ、表面状態、濃度、液中におけるクラスターの形成状況などがあげられる。さらに、ベース液として混合液を用いる、液中に異なるナノ粒子を懸濁するなどの手法もあるため、ナノ流体のバリエーションは正に無限と言える。特に、異なる粒子を懸濁させた液体はハイブリッドナノ流体と呼ばれ、近年盛んに研究が行われている[16,19,21-23]。

ヒートパイプの作動液として利用する場合、ナノ流体の物性値としては、高熱伝導率、低粘性係数、高表面張力が望ましい。熱伝導率及び粘性係数のパラメーター依存性については Mehta ら[24] が広範な文献調査を実施し、ナノ粒子の材質、形状、サイズ、濃度等の影響を検討している。一例として、水ベースの Al_2O_3 ナノ流体の熱伝導率の調査結果を図 2 に、水に様々な材質のナノ粒子を懸濁させた場合の粘性係数の変化に関する調査結果を図 3 に示す。これらの図より、ナノ流体の熱伝導率と粘性係数は、粒子の懸濁によりともに増加する傾向であり、増加率に及ぼす温度の影響は顕著ではないことがわかる。なお、ヒートパイプへの応用で特に重要となる熱伝導率の増加率は、ベース液に強く依存するが、水ベースのナノ流体

の場合、最大で 50~100%程度のものである[22]。ナノ流体の表面張力については、図 4 に示すように、粒子の濃度とサイズの増加とともに微増傾向となる場合もあるが[25]、ナノ粒子の懸濁が表面張力に及ぼす影響はほとんどないと報告例もあり[26]、表面張力に変化を生じるメカニズムも含めて、今後さらなる検討が必要である。

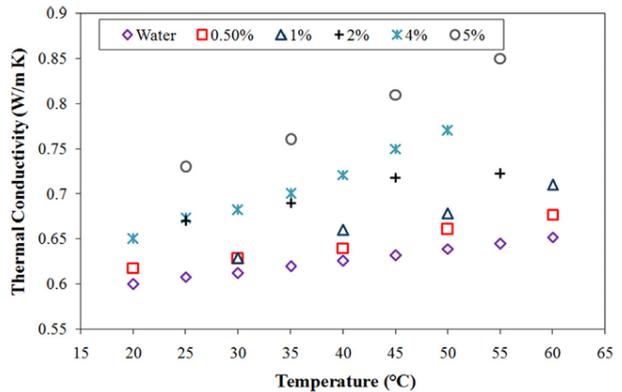


図 2 水ベースの Al_2O_3 ナノ流体の熱伝導率[24]

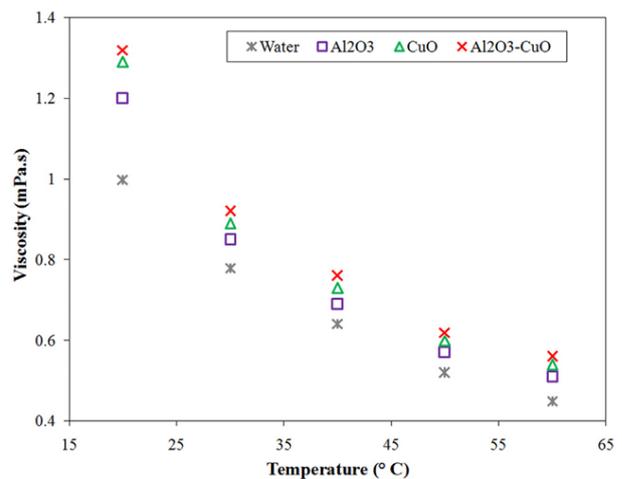


図 3 水ベースの各種ナノ流体の粘性係数[24]

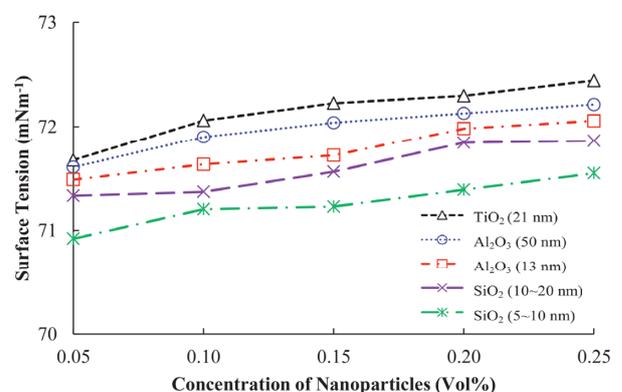


図 4 水ベースの各種ナノ流体の表面張力[25]

2.2 ナノ流体ヒートパイプの熱輸送性能

ナノ流体は、様々な形式のヒートパイプで作動液に使用された実績があり、主要なものとして、微細溝、メッシュ、焼結金属をウィックとするヒートパイプ、自励振動ヒートパイプ (OHP)、密閉型二相サーモサイフォンがあげられる[27,28]. いずれのヒートパイプにおいても、作動液にナノ流体を用いることで、熱抵抗の低減と最大熱輸送量の増大が達成される場合が多く、ヒートパイプの性能向上を図る上で、ナノ流体の使用は有効な方策と言える。熱抵抗の低減率と最大熱輸送量の増加率は条件に依存するが、大まかな目安としては、ナノ粒子の懸濁による熱抵抗の低減率は 0.5 倍程度まで、最大熱輸送量の増加率は 1.5 倍程度までの場合が多い。一例として、コンテナの内壁に成形した微細溝をウィックとするヒートパイプで作動液に水ベースの CuO ナノ流体を用いた場合の熱輸送性能を図5に示す[29]. 作動液を水から CuO ナノ流体に変更することで、熱抵抗は低減、最大熱輸送量は増大する結果となっていることがわかる。なお、粒子濃度の影響を見ると、0.5~1wt%では粒子濃度の増加とともに熱抵抗が減少するが、1~2wt%では逆にやや増加する結果となっている。一方、図2に示したように、ナノ流体の熱伝導率は粒子濃度の増加とともに単調に増加する場合が多い。したがって、ナノ流体によりヒートパイプの熱輸送性能に変化を生じるメカニズムは単純ではなく、少なくとも作動液の熱伝導率のみでは説明できないことが示唆される。

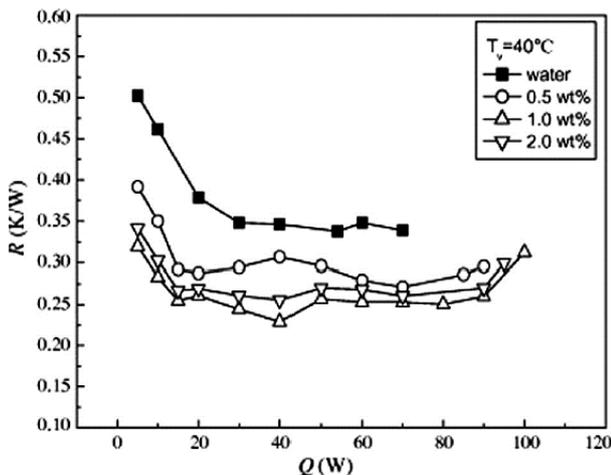


図5 水ベースの CuO ナノ流体を作動液とする微細溝付きヒートパイプの熱輸送性能[29]

2.3 ナノ流体による熱輸送性能向上のメカニズム

ナノ流体の核沸騰では、液中のナノ粒子が伝熱面に付着してナノ粒子層を形成する。ナノ粒子層は多孔質構造のため、毛細管力を発現して周囲の液を伝熱面の近傍に引き寄せ、この結果、CHF が大きく増大する[10]. 一方、ナノ流体を作動液とするヒートパイプでも、液中のナノ粒子がコンテナの内壁やウィックの表面に付着することが実験的に確認されている[14]. このため、ナノ流体によりヒートパイプの熱輸送性能が変化する原因としては、液中に懸濁するナノ粒子に起因するものとナノ粒子層中のナノ粒子に起因するものに大別できる。まず、作動液中のナノ粒子に起因するものとして、以下があげられる。

- 熱伝導率、粘性係数、表面張力係数等の作動液の物性値の変化
 - 作動液中でのナノ粒子のブラウン運動
- ナノ粒子層の形成に起因するものとして以下があげられる。

- 表面粗さの増大による伝熱面積及び発泡核密度の増大
- 毛細管力による液輸送能力の向上
- 断熱効果

作動液中のナノ粒子とナノ粒子層の両方に起因する、あるいはどちらに起因するのかわからないものとして以下があげられる。

- 作動液とコンテナ内壁・ウィック表面との濡れ性の向上（接触角の低下）
- 核沸騰により形成される蒸気泡挙動の変化

上述の通り、ナノ流体を作動液として用いた場合にヒートパイプの熱輸送性能が変化する原因は数多く考えられる。作動液の熱伝導率の増大やナノ粒子層の毛細管効果により熱輸送性能は向上する報告例が多いものの、粘性係数の増大やナノ粒子層の断熱効果など、熱輸送性能をむしろ低下させる方向に働くものもあり、注意が必要である。

既に述べたように、ナノ流体には無限のバリエーションが存在するため、より高い熱輸送性能を達成するナノ流体の探索を試行錯誤的に行うのは効率的ではない。このため、作動液にナノ流体を使用した場合に、どの程度の熱輸送性能の向上が得られるかを予測することを目的として、様々な理論モデルが提案されている[14,27]. この他、豊富な実験データの蓄積を背景として、ナノ流体の

物性値やこれをヒートパイプの作動液に応用した場合の熱輸送性能の変化を、機械学習を用いて定量的に予測しようとする試みも近年盛んに行われている[15,30,31].

3. ナノ粒子層ヒートパイプ

ナノ流体を作動液とするヒートパイプにおける熱輸送性能の向上には、作動液中に懸濁するナノ粒子だけでなく、コンテナ内壁やウィック表面に付着してナノ粒子層を形成するナノ粒子も少なからず関与している。ナノ粒子の付着は、沸騰や蒸発の際に液中に懸濁するナノ粒子が固体壁に近接する際に生じると考えられている[32]。このため、ヒートパイプ内でのナノ粒子層の形成は、主に蒸発部で生じる。また、ヒートパイプの使用中にナノ粒子層を自然に形成する場合、その厚さや微細構造を制御することはほぼ不可能である。この発想の下、Wang ら[17,18]は、コンテナの内壁やウィックに予めナノ粒子層を形成することで、さらなる熱輸送性能の向上を試みた。

金属メッシュをウィックとするヒートパイプで、金属メッシュ及びコンテナ内壁に予めナノ粒子層を形成した上で熱抵抗を計測した結果を図6に示す[17]。本図より、コンテナ内壁にナノ粒子層を形成した場合の熱抵抗の減少はわずかだが、メッシュにナノ粒子層を形成した場合には、半分程度に熱抵抗が減少しており、ヒートパイプの性能向上を図る上で本手法が有効であることがわかる。熱抵抗低減の主な要因としては、ナノ粒子層の形成によるウィックの毛細管力の増大により、凝縮部から蒸発部への凝縮液の搬送を効率的に行うとともに、コンテナ内壁の全面により均一に作動液を分布させることができたためと考えられる。

銅管の内壁に形成したナノ粒子層のレーザー顕微鏡による断面写真を図7に示す。本図より、ナノ粒子層の厚さは10 μm 程度で、多孔質構造を有することがわかる。これより、極薄のウィックとして機能する可能性がある。このため、ナノ粒子層を形成した銅管に作動液として蒸留水を封入してヒートパイプとし、金属メッシュをウィックとする通常のヒートパイプと熱伝達性能を比較した。実験結果を図8に示す[18]。本図より、きわめて薄いウィックを用いているにもかかわらず最大熱輸送量(MHTR)の低下は30%程度で通常のヒ-

トパイプと比較して遜色なく、熱抵抗は特に熱輸送量が20W以上の条件では半分以下に大きく低減している。したがって、ナノ粒子層は、特に小型のヒートパイプ用のウィックとして有望と考えられる。

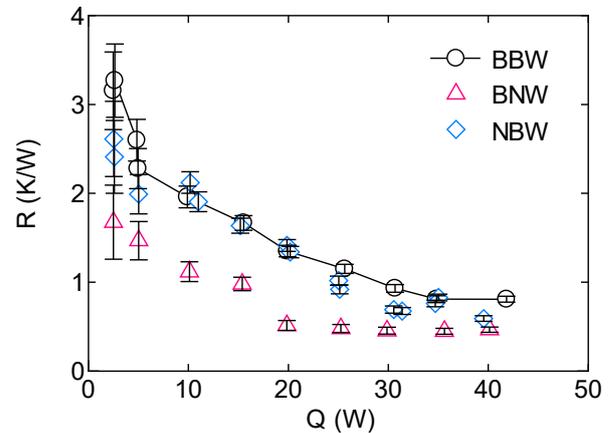


図6 金属メッシュヒートパイプ (BBW) でメッシュ (BNW) 及びコンテナ内壁 (NBW) にナノ粒子層を形成した場合の熱抵抗の変化[17]

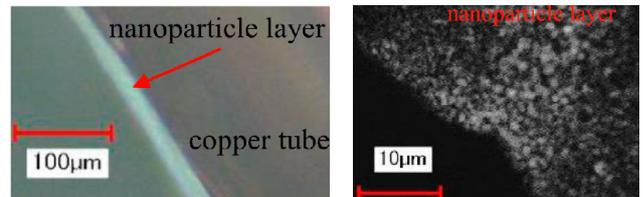


図7 銅管内壁に形成したナノ粒子層の断面[18]

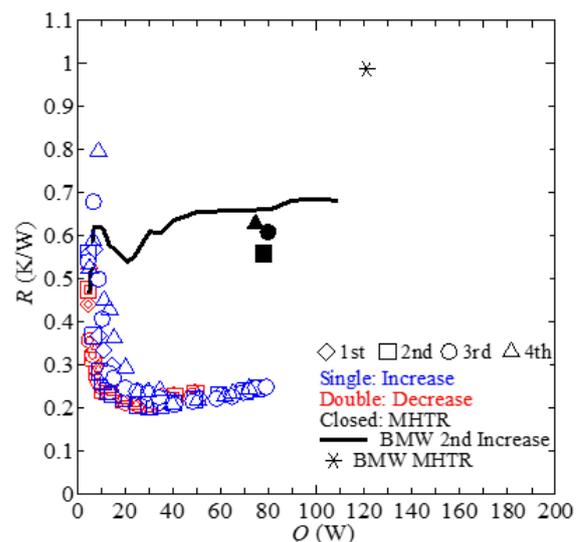


図8 ナノ粒子層をウィックとするヒートパイプの熱輸送性能[18]

4. まとめ

液体中にナノ粒子を懸濁したナノ流体の物性値変化とこれをヒートパイプの作動液として用いた場合の熱輸送性能の変化に関する既存研究を概観した。ナノ流体では、ナノ粒子懸濁前のベース液と比較して、熱伝導率は向上、ヒートパイプの熱抵抗は低減、最大熱輸送量は増加する場合が多いため、ナノ流体はヒートパイプの有望な作動液と言える。ただし、ナノ流体の物性値変化を正確に予測できる段階にはなく、またヒートパイプの熱輸送性能の変化は作動液の物性値変化のみならずヒートパイプの内部に形成されるナノ粒子層の影響も受ける。したがって、ナノ流体によりヒートパイプのさらなる性能向上を達成するためには、ナノ流体の物性値及びヒートパイプの熱輸送性能の変化のメカニズム解明のための努力が必要である。この際、ナノ流体の物性値変化やナノ流体ヒートパイプの熱輸送性能について数多くの実験データが蓄積されていることから、近年の発展が目覚ましい機械学習を活用する方策も有効と考えられる。

ナノ流体ヒートパイプでは、ヒートパイプの内部に形成されるナノ粒子層が熱輸送性能の向上をもたらす場合があることから、コンテナ内壁とウィック表面に予めナノ粒子層を形成したヒートパイプの熱輸送性能に関する著者らの研究成果も紹介した。著者らの製作したナノ粒子層は、多孔質構造を有するとともに厚さ $10\mu\text{m}$ 程度であることから、既存のヒートパイプのウィックで毛細管力を増強するとともに、単独で用いた場合には極薄のウィックとして機能する可能性を示した。

謝辞

ナノ粒子層を予め形成したヒートパイプの熱輸送性能に関する研究は、公益財団法人 JKA (競輪) の補助の下、王萌蕾氏 (電気通信大学) が主導的に実施したものである。記して感謝の意を表す。

参考文献

[1] 池田義男, 伊藤謹司, 樋田昭編著, ユーザーのためのヒートパイプ応用, 学献社 (1981).
 [2] Dunn, P. D., Reay, D. A. (伊藤謹司訳), ヒートパイプ, 学献社 (1978).
 [3] 山西哲夫, 清水定明, ヒートパイプとその応

用, オーム社 (1980).
 [4] Choi, S. U. S., Eastman, J. A., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, San Francisco, USA, ASME, FED231/MD66 (1995) 99-105.
 [5] Wang, X.-Q., Mujumdar, A. S., Heat transfer characteristics of nanofluids: A review, International Journal of Thermal Sciences 46 (2007) 1-19.
 [6] Bacha, H. B., Ullah, N., Hamid, A., Shah, N. A., A comprehensive review on nanofluids: Synthesis, cutting-edge applications, and future prospects, International Journal of Thermofluids 22 (2024) 100595.
 [7] You, S. M., Kim, J. H., Kim, K. H., Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer, Applied Physics Letters, 83 (2003) 3374-3376.
 [8] Liang, G., Mudawar, I., Review of pool boiling enhancement with additives and nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer 124 (2018) 423-453.
 [9] Fang, X., Chen, Y., Zhang, H., Chen, W., Dong, A., Wang, R., Heat transfer and critical heat flux of nanofluid boiling: A comprehensive review, Renewable and Sustainable Energy Reviews 62 (2016) 924-940.
 [10] Okawa, T., Takamura, M., Kamiya, T., Boiling time effect on CHF enhancement in pool boiling of nanofluids, International Journal of Heat and Mass Transfer 55 (2012) 2719-2725.
 [11] Okawa, T., Nagano, K., Hirano, T., Boiling heat transfer during single nanofluid drop impacts onto a hot wall, Experimental Thermal and Fluid Science 36 (2012) 78-85.
 [12] Chien, H.-T., Tsai, C.-I., Chen, P.-H., Chen, P.-Y., Improvement on thermal performance of a disk-shaped miniature heat pipe with nanofluid, 5th International Conference on Electronic Packaging Technology (2003) 389-391, 1298767.
 [13] Tsai, C. Y., Chien, H. T., Ding, P. P., Cha, B., Luh, T. Y., Chen, P. H., Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on heat pipe

- thermal performance, *Materials Letters* 58 (2004) 1461-1465.
- [14] Sureshkumar, R., Mohideen, S. T., Nethaji, N., Heat transfer characteristics of nanofluids in heat pipes: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20 (2013) 397-410.
- [15] Wang, X., Luo, L., Xiang, J., Zheng, S., Shittu, S., Wang, Z., Zhao, X., A comprehensive review on the application of nanofluid in heat pipe based on the machine learning: Theory, application and prediction, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 150 (2021) 111434.
- [16] Pandey, H., Kumar Gupta, N., A descriptive review of the thermal transport mechanisms in mono and hybrid nanofluid-filled heat pipes and current developments, *Thermal Science and Engineering Progress* 31 (2022) 101281.
- [17] Wang, M., Okawa, T., Effect of nanoparticle layer coating on heat transfer performance of heat pipe, *Heat Transfer Engineering* 42 (2021) 1748-1754.
- [18] Wang, M., Liu, Y., Okawa, T., Experiments on thermal performance of heat pipes using nanoparticle layer as the wick, *Applied Thermal Engineering* 228 (2023) 120518.
- [19] Urmi, W. T., Shafiqah, A. S., Rahman, M. M., Kadirgama, K., Maleque, M. A., Preparation methods and challenges of hybrid nanofluids: A review, *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences* 78 (2021) 56-66.
- [20] Singh, U., Gupta, N. K., Stability issues and operating limitations of nanofluid filled heat pipe: A critical review, *Materials Today: Proceedings* (2023).
- [21] Sarkar, J., Ghosh, P., Adil, A., A review on hybrid nanofluids: Recent research, development and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43 (2015) 164-177.
- [22] Sajid, M. U., Ali, H. M., Thermal conductivity of hybrid nanofluids: A critical review, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 126 (2018) 211-234.
- [23] Singh, B., Sood, S., Hybrid nanofluids preparation, thermo-physical properties, and applications: A review, *Hybrid Advances* 6 (2024) 100192.
- [24] Mehta, B., Subhedar, D., Panchal, H., Said, Z., Synthesis, stability, thermophysical properties and heat transfer applications of nanofluid – A review, *Journal of Molecular Liquids* 364 (2022) 120034.
- [25] Bhuiyan, M. H. U., Saidur, R., Amalina, M. A., Mostafizur, R. M., Islam, A. K. M. S., Effect of nanoparticles concentration and their sizes on surface tension of nanofluids, *Procedia Engineering* 105 (2015) 431-437.
- [26] Munyalo, J. M., Zhang, X., Particle size effect on thermophysical properties of nanofluid and nanofluid based phase change materials: A review, *Journal of Molecular Liquids* 265 (2018) 77-87.
- [27] Alawi, O. A., Sidik, N. A. C., Mohammed, H. A., Syahrullail, S., Fluid flow and heat transfer characteristics of nanofluids in heat pipes: A review, *International Communications in Heat and Mass Transfer* 56 (2014) 50-62.
- [28] Gupta, N. K., Tiwari, A. K., Ghosh, S. K., Heat transfer mechanisms in heat pipes using nanofluids – A review, *Experimental Thermal and Fluid Science* 90 (2018) 84-100.
- [29] Yang, H. F., Liu, Z.-H., Zhao, J., Heat transfer performance of a horizontal micro-grooved heat pipe using CuO nanofluid, *Journal of Micromechanics and Microengineering* 18 (2008) 35-38.
- [30] Maleki, A., Haghighi, A., Mahariq, I., Machine learning-based approaches for modeling thermophysical properties of hybrid nanofluids: A comprehensive review, *Journal of Molecular Liquids* 322 (2021) 114843.
- [31] Kumararaja, K., Sivaraman, B., Saravanan, S., Performance evaluation of hybrid nanofluid-filled cylindrical heat pipe by machine learning algorithms, *Journal of Thermal Engineering* 10 (2024) 286-298.
- [32] Kwark, S. M., Kumar, R., Moreno, G., Yoo, J., You, S. M., Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 (2010) 972-981.

ヒートパイプの応用/実用例

Examples of Heat Pipe Application and Practical Use

齋藤 祐士 (株式会社 フジクラ)
 Yuji SAITO (Fujikura Ltd.)
 e-mail: yuji.saito@jp.fujikura.com

1. はじめに

ヒートパイプは、基本的には、毛細管力利用、重力利用などにより外部からの動力を用いず、蒸発・凝縮による高熱伝達素子の特徴を生かし、宇宙用機器、電子・電力機器、機械・機具などへの実用や自然エネルギーを利用した機器の開発・実用がなされている[1], [2]. また、モバイル機器に使用される超薄型のサイズのもの[3]から、地中熱利用ヒートパイプ融雪システムに使用される長尺サイズのもの[4]まで、用途に合わせて開発、実用化されており、応用・実用例は枚挙にいとまがない。

筆者は、長年この業界に携わってきているが、ヒートパイプが、工業製品としてユーザーに広く認知されたのは、ノートパソコンの CPU の冷却に適用され始めたことからと考えている。1993年にインテルがペンティアム CPU を発売開始したと同時に、ノート PC のバッテリー電力消費を低減するため、CPU 冷却には、ファンを使用せず、ヒートパイプと放熱板（通常アルミプレート）を組み合わせた冷却製品をインテルは、推奨した。これにより、各ノート PC メーカーが、ヒートパイプを用いた冷却製品を使用開始し、OEM/ODM メーカーにも広がっていった。大量生産品であるノート PC へのヒートパイプ適用実績が蓄積され、ノート PC のみならず、デスクトップ PC やサーバの CPU などのチップ冷却に採用され、この分野の一般的な冷却製品として現在に至っている。

先に記したようにヒートパイプの応用・実用例は、多々あるが、ここでは、市場に大量に供給された CPU をはじめとしたチップが搭載されている製品の要求に応じた多様なヒートパイプ応用冷却製品を紹介する。また、現在話題となっている生成 AI に不可欠な AI サーバの冷却製品についても紹介する。一方、スマートフォンなどのモバイルコンピューティングデバイスの冷却装置は、超

薄型ヒートパイプ/超薄型ベーパーチャンバーの記事に記載しており、ここでは取り上げないこととする。

2. ヒートパイプの原理と最大熱輸送量

ノート PC、デスクトップ PC およびサーバの CPU などのチップの冷却製品は、チップの性能向上に伴いチップの発熱量の増加および使用されるスペースの制約に対応する必要がある。ヒートパイプの場合は、これらの要求に対して、専ら最大熱輸送量を増加させることが課題となることが多い。そこで、まず、ヒートパイプの原理と最大熱輸送量について簡単に述べる。

図 1 にヒートパイプの構造と作動状態を示す。

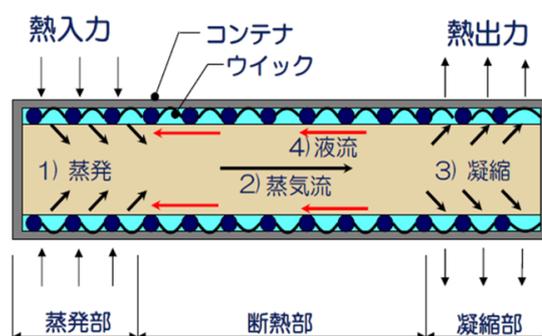


図 1 ヒートパイプ構造および作動原理

ヒートパイプのコンテナは、通常、銅、SUS などの金属が使われ、使用する作動流体は、金属コンテナと化学変化などを起こしにくいものが用いられている。また、ヒートパイプ内部には、多孔性のウイックが設けられている。

作動流体（純水など）は、飽和状態で蒸気と液がヒートパイプ内部に封入されており、熱が蒸発部に加えられると液が直ちに 1) 蒸発し、2) 蒸気流が蒸発部空間から断熱部空間を通り凝縮部空間へと流れる。熱が凝縮部から放出されると、蒸気が直ちに 3) 凝縮し、4) 液流が、凝縮部から断熱

部を通り蒸発部へとウイック内部をウイックの毛細管力で流れる。この蒸発・凝縮を伴う流体の循環により、大量の熱を小さな温度差で輸送する事ができる素子がヒートパイプである。

熱入力が大きくなっていくと、蒸発部に液が戻ることができず、蒸発部にドライアウトが生じる。その熱量を最大熱輸送量と呼んでおり、ヒートパイプの熱性能評価指標の一つである。ここで、紹介する製品に使用するヒートパイプの最大熱輸送量は、毛細管力限界が起因となる。ヒートパイプが正常に作動している時は、式(1)の関係にある。

$$Pc \geq \Delta P_L + \Delta P_V \quad (1)$$

ここで、 Pc [Pa] はヒートパイプ内部流体の循環駆動力に相当する毛細管力を示し、 ΔP_L [Pa]、 ΔP_V [Pa]は、それぞれ内部の液流および蒸気流による圧力損失を示す。左辺 Pc と右辺 $\Delta P_L + \Delta P_V$ が等しくなる熱輸送量が、最大熱輸送量 Q_{max_cap} となる。最大熱輸送量を増やすには、毛細管力の増加、液流・蒸気流の圧力損失低減に取り組む必要がある。

3. ヒートパイプの応用/実用例

3.1 ノート PC

ノート PC の冷却装置は、市場からのノート PC の機能向上要求に対する CPU の性能向上による発熱量増加およびスペース的な制約より、より軽量、コンパクトで放熱性能を満たすものが求められる。そこで、ヒートパイプには、コンパクトで大きな熱を運ぶことができるものが求められてきた。表 1 にノート PC の CPU の発熱量変化と冷却装置の概略の変化を示している。

表 1 ノート PC CPU 発熱量と冷却装置

時期	発熱量	冷却装置
1993 年以前	~5W	放熱プレート又はファン冷却
'93 年~'99 年	5W~12W	ヒートパイプ付放熱プレート
'99 年~'01 年	12W~25W	ハイブリッドタイプ
'01 年~現在	25W~35W	RHE タイプ

1993 年~1999 年の CPU の発熱量が 5W~12W になると写真 1 に示されているヒートパイプ付放

熱プレートのヒートパイプに CPU を接触させ、ヒートパイプで熱をプレート全体に拡散し、筐体に熱伝達する。この熱を筐体表面からの放熱で CPU の温度を規定値以下に抑えていた。

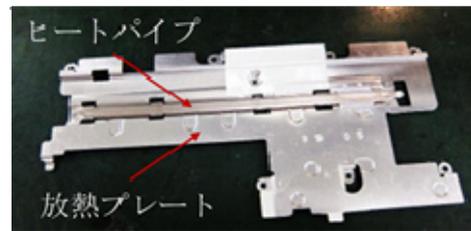


写真1 ヒートパイプ付放熱プレート

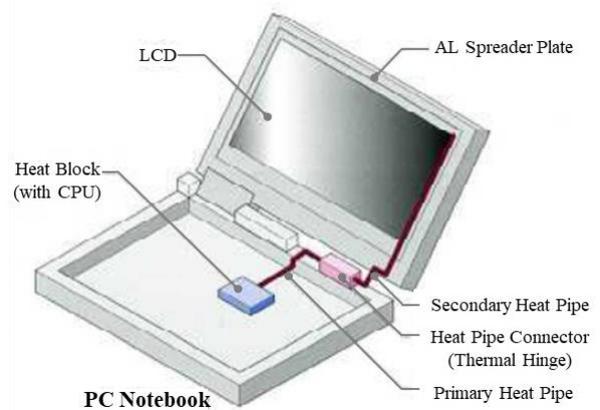


図2 ヒンジコネクタヒートパイプ

また、図 2 に示される 2 本のヒートパイプをヒートパイプコネクタ（熱伝導用コネクタ）で接続しディスプレイの裏面のアルミ放熱板に熱を拡散するものもあった。ヒートパイプコネクタ部分では、ヒートパイプは摺動する。

1999 年~2001 年の CPU の発熱量が 12W~25W になると写真 2 に示されているファンとヒートパイプ付きプレートが一体となったハイブリッドタイプのもが使用された。CPU などの熱は、放熱プレートに拡散しながら、残りの熱をフィン部分よりファンで放熱する冷却装置である。



写真2 ハイブリッドタイプ

2001年以降のCPUの発熱量が25W～35Wになるとハイブリッドタイプの放熱プレート部分の温度が高くなり、筐体表面温度が設計許容温度を超えてしまうものが出てきた。この影響を小さくするために、写真3に示されているCPUの熱をフィン部分に集中的に運ぶタイプのRHE(Remote Heat Exchanger)タイプの冷却装置が使用された。写真3には、ファン一体型とファン分離のRHEタイプが示されている。ファン付のRHEタイプは、一見ハイブリッドタイプに見えるが、ファンの蓋部分の銅板は、ファンにより冷却されているので、ハイブリッドタイプの放熱板に比べて冷却効果が高く温度が低くなる。また、緩衝材を発熱部と接触するブロック上に付け、筐体と直接接しない様に距離が取られている。

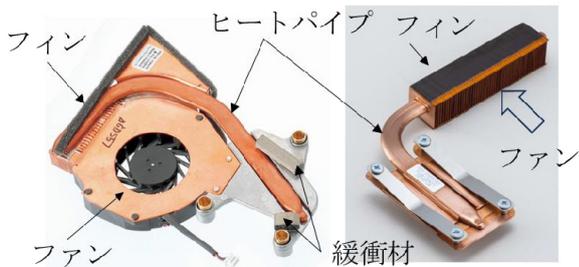


写真3 RHEタイプ (ファン付き, ファン無)

RHEタイプのヒートパイプは、発熱量が増えているため、ヒートパイプのウイック構造を変えて最大熱輸送量を増加させている。これについては、超薄型ヒートパイプ/超薄型ベーパーチャンバーの記事に記載されているので、参照されたし。

ノートPCの中でもCPUにデスクトップの高性能CPUを用いたものが使用される製品も登場した。問題は、発熱量が、80W前後になるもので、複数本のヒートパイプを用いても冷却できず、より高性能のベーパーチャンバーが使用された。写真4にベーパーチャンバーを用いた冷却装置を示す。ヒートパイプに比べ、チップ全面に直接接触できるので、ヒートパイプの熱抵抗の内、大きな割合を占める蒸発部の熱抵抗が小さくできる。また、製造上、ウイックを取り付けた後に蓋をロウ付けなどにより接合し、ベーパーチャンバー化するので、ウイック取り付け時にウイックへの工夫が比較的容易にできる。例えば、凝縮部から断熱

部にかけては、圧力損失の小さなメッシュウイックを用い、断熱部の途中から蒸発部までは、毛細管力の大きな銅粉ウイックを使うなどにより、最大熱輸送量を増加させることが可能となる。

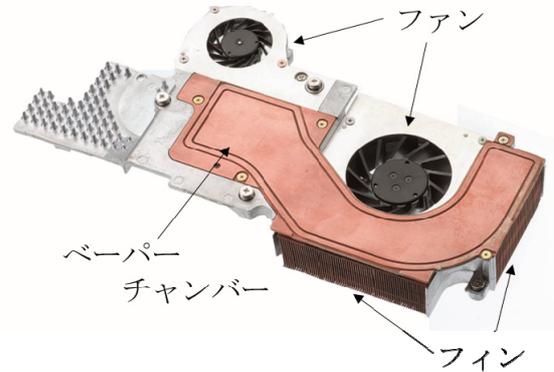


写真4 ベーパーチャンバー冷却装置

3.2 デスクトップPCおよびサーバ

デスクトップPCおよびサーバは、比較的スペースに余裕があるので、冷却には、アルミ押し出しのヒートシンクや写真5に示す銅ベースにフィンを半田付けあるいはフィンを銅ベースに機械的なカシメをしたヒートシンクが用いられている。

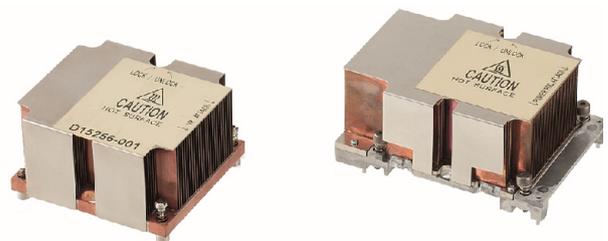


写真5 銅ベース+銅フィンヒートシンク

発熱量の大きいチップに対して、写真5のヒートシンクでは、フィン面積が不足する場合には、ヒートパイプを用いてフィン面積を増やすことにより熱性能を向上させている。高さ方向のスペースがない場合、サーバでは、高さが、1Uあるいは2U(1Uは、44.45mm)のものでは、RHEタイプの冷却製品が用いられる。一方、高さ方向にスペースがある場合、サーバでは、3U以上のものでは、タワータイプヒートシンクが用いられている。それぞれの外観を写真6に示す。両タイプとも発熱量が大きなチップの冷却に用いられているので複数本のヒートパイプが使用されている。ヒート

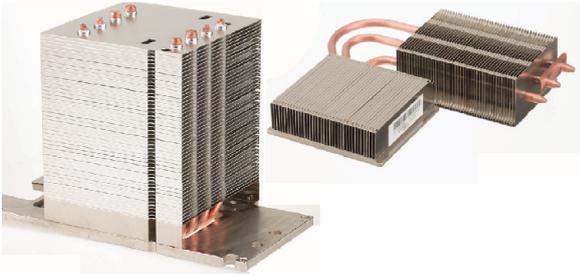


写真6 タワータイプとRHEタイプヒートシンク

パイプの一部は、発熱体（チップ）の上に設置されるため、発熱体サイズにより設置できるヒートパイプの本数に制限がある。

また、発熱量の大きなチップには、ヒートパイプより熱抵抗の小さなベーパーチャンバー（以下VCと記載）ヒートシンクも使用された。写真7にブレードサーバに使用されたVCヒートシンクを示す。ブレードサーバは、高さが低くフィン高さが取れないため、平面方向にベースを広げてフィン面積を増やすが、銅ベースは、チップからの拡散熱抵抗が大きいので、ベース部分を熱拡散の良いVCにすることにより熱抵抗を低減している。

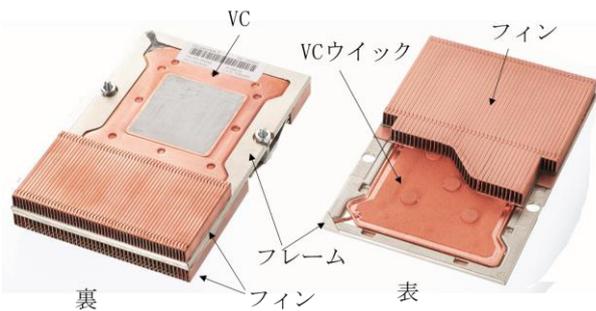


写真7 VCヒートシンク（ブレードサーバ）

このVCには、銅粉を焼結したウイックが用いられている。VCヒートシンクは、熱拡散が金属ベースより良好であるので、発熱体（チップ）とヒートシンクのベース面積の比が大きなヒートシンクに用いられた。1kW近くのマルチチップを冷却する大型ヒートシンクのベース（150 mm x 320 mm）に大型VCが用いられたこともある。

3.3 AI サーバ

現在、生成AIをビジネスに活用しようと高性能GPUを用いたAIデータセンタをマイクロソフト、メタ、アマゾンなどのハイパースケールデー

タセンタ業者が構築しようとしのぎを削っている。AIデータセンタに用いるAIサーバには、GPU、CPUが用いられており、近年、処理速度向上に伴い発熱量が急速に増えている。図3に2010年からのインテルCPUおよびNVIDIA GPUの消費電力（発熱量）の変化を示している。2016年までは、消費電力は200W前後でほぼ横ばいであったが、2016年以降、徐々に上がり始め、特にGPUは、2020年には、2010年の約2倍の400W、今年には、1200Wの消費電力のチップを発表し、4年間で3倍の発熱量の増加となっている。GPUが、ディープラーニングを行うのに最適であるので、NVIDIAは、チップ開発サイクルを短くして矢継ぎ早に新たなGPUチップを発表している。

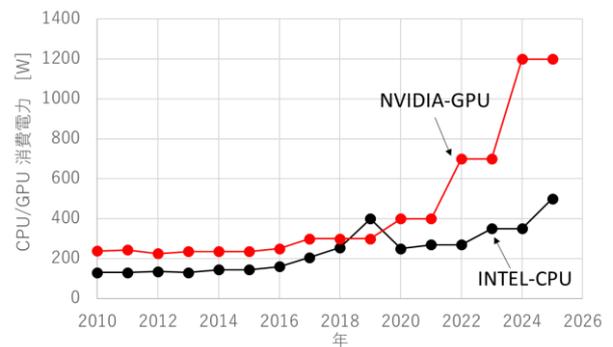


図3 CPUおよびGPUの消費電力変移

このようなチップの冷却には、既存の空冷冷却製品では、対応できなくなっており、新たな製品が開発、実用化されてきている。図4に冷却装置高さ（サーバ高さ）と発熱量に対して、どのような冷却装置があるかを示している。

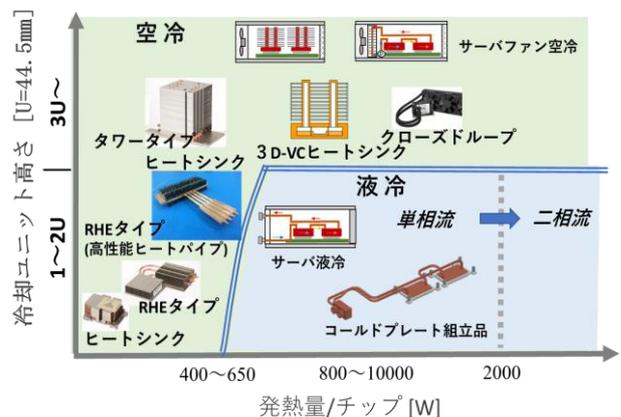


図4 サーバチップの冷却装置

冷却装置高さが、1~2U でチップ発熱量が、400~650W を超えると液冷が用いられる。液冷を用いるには、液冷用の設備が必要になるので、新規に立ち上げるデータセンタは、導入しやすく、液冷が考慮してある。また、データセンタ全体の冷却に使用される消費電力は、液冷は空冷にくらべ格段に効率がよいので、消費電力が低減する面からも液冷が採用されていく方向にある。

一方、既存のデータセンタでは、既存設備の空冷で冷却できることが望まれている。図4に空冷部分で、先にサーバチップ冷却装置として記述していなかった高性能ヒートパイプを使用した RHE タイプと 3D-VC ヒートシンクがそれぞれ、冷却ユニット高さが 1~2U と 3U 以上の部分に示されている。これらの冷却装置は、ここ数年で開発、実用化されたものなので、ここで少し詳しく紹介する。

・高性能ヒートパイプ RHE タイプ

写真8にデータセンタ向けサーバの冷却として使用されている高性能ヒートパイプ RHE タイプのヒートシンクを示す。フィン、ほぼサーバ幅一杯を使用されている。サーバのチップ周りには、DIMMなどの部品があるため、サーバ筐体の幅をできるだけ使いフィンの面積を増やすことのできるスペースは、ある程度チップより離れた位置になる。また、先に述べたようにヒートパイプは、発熱体のサイズにより本数が制限される。したがって、ヒートパイプに求められるのは、発熱体からフィン部分までの比較的長い距離を制限されたヒートパイプ本数で発熱体の熱を運ぶことである。ここ数年のチップの発熱量増加により、従来のヒートパイプでは、ドライアウトが起こってしまうため、最大熱輸送量がより大きなヒートパイプが必要となっている。

データセンタ向けヒートパイプの最大熱輸送量を増やすには、式(1)の液流圧力損失 ΔP_L 、および蒸気流圧力損失 ΔP_v の低減が必要である。この開発を行った例が、文献[5]および[6]に示されている。文献[5]では、蒸気流と液流を分離することで、蒸気流と液流の間で生じるカウンターフロー圧力損失を無くし、最大熱輸送量を従来品の2倍強に増やせたことが報告されている。文献[6]には、従来のウィック断面積を2倍にし、かつウイ

ック設置位置を最適化する事により、従来品より熱抵抗の低減と最大熱輸送量の増加が報告されている。

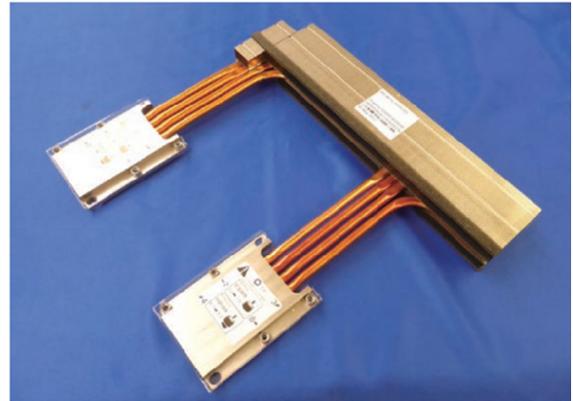


写真8 データセンタ向け高性能ヒートパイプ RHE タイプ[5]

・3D-VC ヒートシンク

図5にタワータイプヒートシンクと3D-VCヒートシンクの模式図を示す。3D-VCヒートシンクは、ベースをVCベースとし、凝縮部管とVCベースが直結しており、蒸気と液体が行き来することができる構造になっている。また、VCが直接発熱体に接触しているため、タワータイプヒートシンクのようにベースとヒートパイプの間の接触熱抵抗がない。さらにVCなので、蒸発部のウィック構造を工夫してヒートパイプおよびVCの熱抵抗の中では、最も大きな蒸発部熱抵抗を低減することが比較的容易にできる。

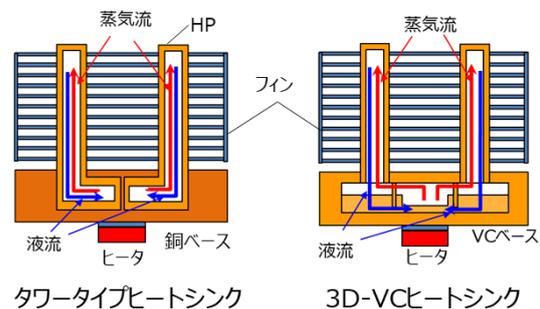


図5 タワータイプと3D-VCヒートシンクの模式図

図6にタワータイプヒートシンクと3D-VCヒートシンクの熱抵抗比較を行った結果を参考までに

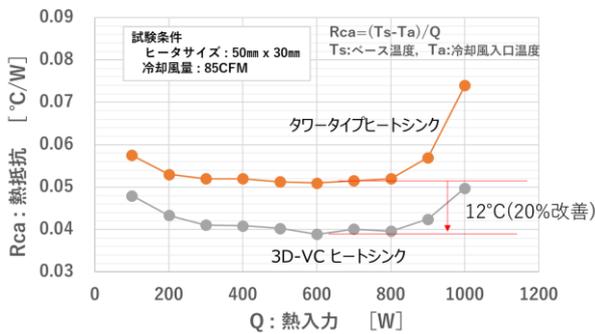


図6 タワータイプと3D-VCヒートシンクの熱抵抗比較

示す。タワータイプヒートシンクに比べて3D-VCヒートシンクが良好な結果を示している。600W入力時に3D-VCヒートシンクは、タワータイプヒートシンクの熱抵抗より20%低く、温度では発熱体温度が、12°C低くなっている。

今年3月中旬にNVIDIAから発表されたGPUのリファレンスデザインの冷却装置は、発熱量が、700Wと1000Wに対しては、空冷が、1200Wには、液冷が提示されている[7]。この辺りの発熱量が、ヒートパイプやVCを用いた空冷の限界とも思われるが、更に空冷の性能が伸ばせれば、既存のデータセンター業者には喜ばれるものと考えられる。

一方、チップおよびサーバメーカーは、2000Wレベルを視野においた開発を進めようとしている。このレベルになると単相の液冷では限界で蒸発・凝縮の二相冷却が必要と言われている。この二相冷却システムは、ポンプ循環であるが、挑戦しがいのある製品である。

4. おわりに

CPU, GPUなどのチップが搭載された製品の冷却装置としてヒートパイプ、ベーパーチャンバーが応用・実用化されている製品について紹介した。また、ここ数年間でAIに関わるチップの性能向上にともない発熱量が急速に増加しており、今後も発熱量が増えていく方向にある。この方向に対して、大発熱量チップに対応できる冷却製品の迅速な開発と実用化が期待される。

参考文献

- [1] 日本ヒートパイプ協会, 実用ヒートパイプ初版, 日刊工業新聞社 (1985).
- [2] 勝田正文, ヒートパイプ技術最近の進展, 伝熱, 51-217 (2012) 14.
- [3] Mohamed S.A. et al., InterPACKICNMM, (2015) 48019.
- [4] (株) 興和, 地中熱ヒートパイプ融雪システム, https://www.kowa-net.co.jp/wp-content/uploads/1276/03hpi_dl_A4_202410.pdf.
- [5] 上久保将大, データセンター向け銅短繊維ヒートパイプの開発, 古河電工時報, 139 (2020) 37.
- [6] Mohamed S.A. et al, High Performance Heat Pipe Development for Data Center Cooling, Joint 21st IHPC and 15th IHPS, (2023) HPAUS-93.
- [7] 笠原一輝, GTC2024 春 基調講演レポート 特別寄稿 笠原一輝, <https://www.gdep.co.jp/information/report/>, (2024).

宇宙用ヒートパイプ Heat Pipes for Space Applications

岡本 篤 (宇宙航空研究開発機構)
Atsushi OKAMOTO (JAXA)
e-mail: okamoto.atsushi@jaxa.jp

1. はじめに

ヒートパイプは現在では地上の様々な民生分野で広く利用されているが、元々は宇宙機の熱制御に使用することを目的として研究、開発されたものである。ヒートパイプが初めて宇宙機の熱制御に使用されたのは 1968 年に打ち上げられた米国の衛星 GEOS-II である。図 1 に示すように C バンドトランスポンダの熱制御のために長さの異なる 2 本のヒートパイプが使用された[1]。ヒートパイプは軽量かつ熱伝導率が高いという優れた特徴を有しており、空気が存在せず、対流熱伝達による徐熱が期待できない宇宙機搭載機器の排熱に非常に効果的であり、現在では多くの宇宙機で使用されている。

現在、宇宙機で使用されているヒートパイプは主に軸方向溝ヒートパイプやループヒートパイプであるが、宇宙機の熱制御系に対する要求の高度化に伴い、既存のヒートパイプの高性能化に向けた研究開発が行われているとともに、ヒートパイプの新しい使用方法、あるいは新しい方式のヒートパイプの研究開発が実施されている。本記事では、前回宇宙機の熱制御に関する特集記事が発表された 2012 年以降の技術動向を中心に紹介する。

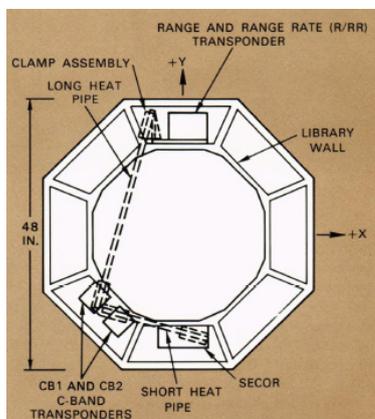


図 1 GEOS-II におけるヒートパイプ使用例[1]

2. 軸方向溝ヒートパイプ

宇宙機に用いられるヒートパイプの主な用途は発熱量および発熱密度の大きい機器の発熱を移動・拡散させることにより機器の温度上昇を抑えることである。ヒートパイプには熱輸送量に変化しても熱コンダクタンスが変わらずほぼ一定である固定コンダクタンスヒートパイプ (Constant Conductance Heat Pipe, CCHP) と熱輸送量に応じて熱コンダクタンスが変化する可変コンダクタンスヒートパイプ (Variable Conductance Heat Pipe, VCHP) があるが、固定コンダクタンスヒートパイプが多く用いられている。タイプとしては、軸方向溝ヒートパイプが多く用いられている。その理由は、重力のない宇宙環境で使用するため必要な濡れ高さが大きくないため大きな毛細管力を得られる焼結金属等は必要なく、なおかつ流動抵抗を小さくできるとともに構造・強度の観点で信頼性が高いからである。作動流体には、宇宙機においてヒートパイプが熱制御を行う対象機器の一般的な動作時の許容温度範囲 (-20°C~+60°C) において、凍結しない、かつメリット数が多いアンモニアが多く使われており、容器の材料としては、アンモニアとの化学適合性が良好かつ軽量のアルミニウム合金が採用されている。

ヒートパイプの使用方法としては、通信・放送の中継器などの高発熱機器の発熱をヒートパイプで軸方向に拡散させて発熱集中による温度上昇を抑制する、あるいは衛星のラジエータパネル(アルミスキン、アルミコアのハニカムパネルが多く用いられる) 内部に二次元的にヒートパイプを配置してネットワークを組むことにより、パネルの温度分布を小さくすることでフィン効率を向上させて放熱面の排熱効率を高めるような方法が多く採られていた。しかし、静止衛星においては、排熱能力の更なる向上要求があったが、放熱面の排熱能力を決める放熱面温度、フィン効率、放熱面

表面赤外放射率 ϵ は大幅に改善する余地は残っていない状況であった。そこで、図2に示すように太陽光が照射して高温になるパネル（北面とする）と太陽光が照射せず低温になるパネル（南面とする）を連結ヒートパイプと呼ばれるヒートパイプで熱的に結合させて衛星の放熱面を3次元ヒートパイプネットワークで結ぶことにより、北面から南面に熱輸送を行うことで北面の温度上昇を抑制すると同時に南面の温度を上げ、衛星システム全体としての排熱効率を大幅に向上する方法が考案された[2]。

上述の使用法はいずれもヒートパイプを衛星システム側の熱制御素子として用いるものであるが、近年の宇宙機搭載機器の発熱量、発熱密度が増大している傾向を踏まえて、機器内部にヒートパイプを使用する例が出てきている。従来、機器内部に実装された高発熱部品が発生する熱の大部分は、部品が実装された電子基板およびアルミ合金製の機器筐体を経由して熱伝導により機器底部まで輸送され、機器筐体底面を介して衛星システム側のパネルに熱を受け渡すのが一般的であるが、機器内部に実装された電子部品の発熱量、発熱密度の増加に伴い、熱伝導による排熱のみでは熱抵抗が大きく、衛星システム側に引き渡すまでに大きな温度降下を生じてしまう。衛星システム側に引き渡される時点における温度が低くなると、それに伴い、最終的に宇宙空間に輻射にて排熱を行うラジエータパネルの温度が低くなり、排熱効率が大幅に低下することが課題となる。この課題を解決するために図3に示すようにこれまで宇宙用途では行われていなかった搭載機器内部にヒートパイプを使用する例が出てきている [3]。

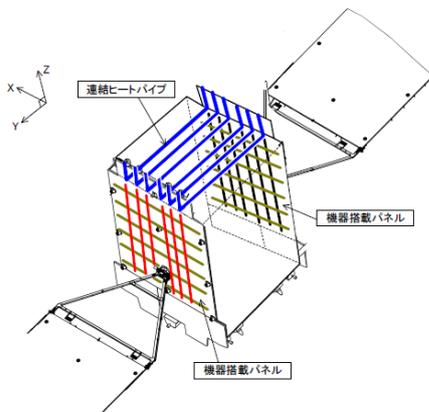


図2 3次元ヒートパイプネットワーク[2]

機器内部にヒートパイプを適用する場合、打ち上げ前に重力のある地上で実施する熱設計の検証試験においては、衛星システム側のヒートパイプが動作することが優先され、必ずしも機器内部のヒートパイプにとって理想的なコンフィギュレーションにならないことが想定されるため、重力に逆らって動作させることを可能とするために、液の加熱部への還流に必要な毛細管力を軸方向溝ヒートパイプよりも高めることを目的として図4のように3Dプリンタを用いてヒートパイプを造形する試みも行われている[4]。



図3 通信機器内部へのヒートパイプ適用[3]

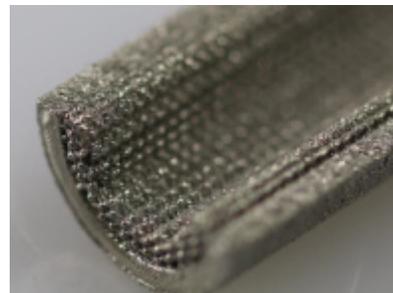


図4 3Dプリンタで造形したヒートパイプ[4]

3. 振動流型ヒートパイプ

振動流型ヒートパイプは Oscillating Heat Pipe (OHP) または Pulsating Heat Pipe (PHP) と呼ばれ、加熱部と冷却部を往復する蛇行細管内に作動流体が封入された構成で、熱が与えられると作動流体の蒸発・沸騰により内部で圧力変動が生じ、それを駆動力として作動流体が細管内を振動、あるいは循環しながら、顕熱と潜熱の組み合わせにより熱輸送を行う。1990年代に日本において地上の民生用途で発明された技術であり[5]、宇宙機への適用を目指して多くの宇宙機関、メーカー、大学等が研究開発を実施してきている。長い間、研究開発

フェーズであったが、2012年にJAXAが50kg級の小型衛星である宇宙実証衛星4号機 (Small Demonstration Satellite, SDS-4) に逆止弁付 OHP (図5) を搭載して軌道上実証実験を実施した。約4年半にわたって断続的に実験を実施し、微小重力環境下において問題なく起動して安定動作できることを確認した。また、軌道上で4年半経過後も定常状態における実効熱伝導率に変化は見られないと報告している[6]。また、米国の空軍研究所 (Air Force Research Laboratory, AFRL) はスペースプレーン X-37B に OHP (図6) を搭載して軌道上実験を実施した。加熱位置、冷却位置および作動流体の異なる3種類のOHPの軌道上実験データと地上実験データの比較評価を行い、OHPの熱輸送特性に及ぼす重力の影響を報告している[7]。日米伊が協力して進めている南極で気球による長時間観測を行う宇宙線反粒子探索計画 GAPS では図7に示すような $2\text{m} \times 2\text{m} \times 2\text{m}$ の空間に分散配置された多数のシリコン検出器を一定温度に制御する要求に対応するために OHP を使用する予定で、図8に示す逆止弁と重力のアシストにより動作する加熱部、冷却部が約2m、断熱部が1~3mの大型 OHP の開発が進められている [8, 9]。

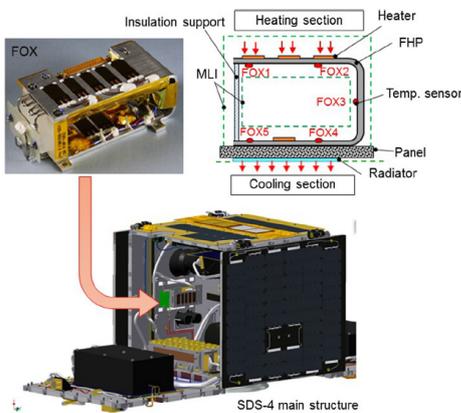


図5 SDS-4 搭載軌道上実験用 OHP[6]



図6 X-37 搭載軌道上実験用 OHP[7]

このように研究開発フェーズから宇宙実証フェーズに入っており、近いうちに OHP を宇宙機の実際の熱制御に使用する例が出てくるものと予想される。なお、これまでは作動流体が封入された金属配管を金属製プレートで挟み込んだ形態の OHP がほとんどであったが、昨今の三次元造形技術の発展により、3D プリントを用いた OHP の研究開発が行われている。従来の製造方法では複雑な形状を実現するのが難しかったが、3D プリントを用いることで3次元的な複雑な排熱経路を実現できるようになっている。NASA ジェット推進研究所 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) では電動アクチュエータ (図9) やバッテリーの冷却に使用することを目的として 3D プリントにより造形した OHP の研究開発を実施している[10]。JAXA では2章で述べた衛星搭載機器の高発熱化・高発熱密度化に対応するために、3D 造形の活用により高発熱機器の筐体内部に OHP 配管を組み込むことで、機器内部の発熱部品から衛星システムへの伝熱経路中にある筐体の熱コンダクタンスを大幅に向上することにより機器内部の温度降下を抑えることを目指した研究開発を実施している。3D プリントで造形された OHP の外観および逆止弁が配置された断熱部の X 線可視化画像を図10に示す[11]。

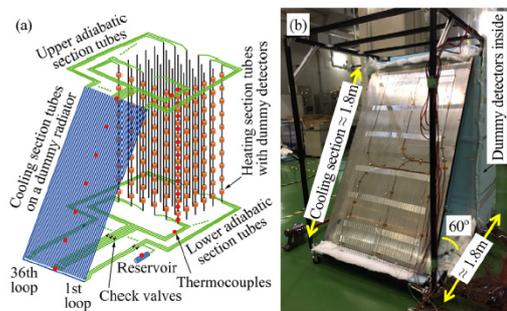


図7 GAPS 排熱コンフィギュレーション[8]

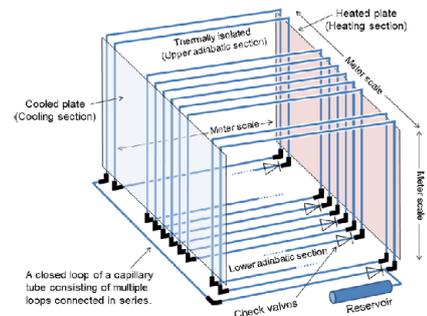


図8 GAPS 用大型 OHP[9]

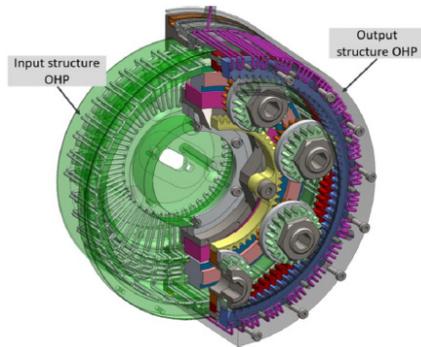


図9 アクチュエータ組込み 3D 造形 OHP[10]

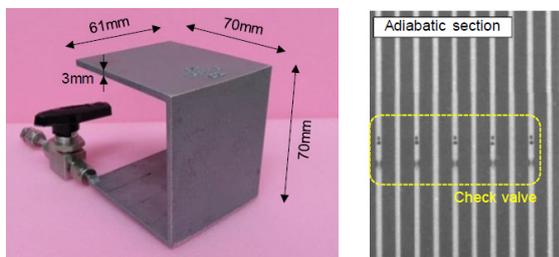


図10 3Dプリンタで造形した OHP[11]

4. ループヒートパイプ

ループヒートパイプ (Loop Heat Pipe, LHP) は、蒸発器、蒸気管、凝縮器、液管、リザーバから構成され、内部に封入された作動流体の相変化を利用して熱輸送を行うデバイスである。ヒートパイプとは異なり蒸気と還流液の流路が分かれており、作動流体が一方方向に循環するのが特徴である。熱輸送距離が長い、熱輸送特性が重力の影響を受けにくい、複雑な配管ルーティングが可能といった軸方向溝ヒートパイプにはない優れた特徴を有している。また、リザーバを僅かな電力で加熱・冷却することによりループの動作温度を高精度に制御できるとともに、蒸発器に熱が与えられている状態においてもリザーバの温度を蒸発器の温度よりも僅かに高くなるようにすることにより冷媒の循環、すなわち熱輸送を止めることができる。この機能を活用することで、例えば月面における越夜時に宇宙機内部で機器が発生する熱をラジエータに輸送せずヒータ発熱に代わって機器の保温に使用することができ、保温ヒータ電力の低減、バッテリーの必要容量の低減に繋がるといった利点がある。

現在では高度化するミッションに自在に対応するためには必要不可欠な技術となっており多くの

宇宙機で使用されるようになってきている。LHP の一つの使用例は、発熱機器からラジエータまでの熱輸送経路が長い、複雑、あるいは打上げ前に地上で実施する熱設計の検証試験時にトップヒートの状態になるといった軸方向溝ヒートパイプでは実現できない排熱の用途に用いられる。X 線天文衛星 ASTRO-H や XRISM では X 線検出器を 50mK に冷却する冷却システムに使用される 2 段スターリング冷凍機の排熱に図 11 に示すような 4 式の LHP が使用されている。当該 LHP はロケットによる衛星の打上げ直前まで、ロケットフェアリング内で機能する必要があるが、熱源である冷凍機が LHP 凝縮器よりも約 70cm 上方にある。よって、トップヒート状態となり、軸方向溝ヒートパイプなど他の方式では排熱が難しく、重力に逆らって熱輸送が可能な LHP が採用されている[12]。

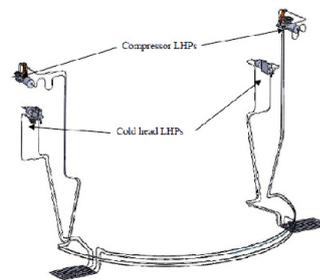
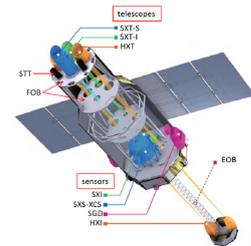


図11 ASTRO-H 搭載冷凍機の排熱用 LHP [12]

また、宇宙機の打ち上げ時には収納しておき、軌道上で展開して放熱面積を拡大する技術である展開ラジエータにおいて、熱源から展開先のラジエータまでの熱輸送手段として LHP が使用される例が多い。熱輸送距離が長く、配管に可とう性を持たせることができるという特徴を生かして、展開動作を実現できるというもので、主に静止通信衛星など発熱量が非常に多い宇宙機において必要となる技術として、世界各国の宇宙機関、メーカーで開発が行われている[13-15]。一例として、欧州で開発されている展開ラジエータのイメージ図

を図 12 に示す. 衛星の南面パネルのヒートパイプと LHP 蒸発器を熱的に結合させ, 展開したラジエータパネルまでの熱輸送を LHP が担う. また, 図 13 に示す通り, 静止衛星の東西面ラジエータを LHP で熱的に連結する試みも行われている[16].

2 章で述べた通り, 宇宙機搭載機器の高発熱・高発熱密度化に伴い, 宇宙機システムと機器内部の高発熱部品の温度差が大きくなるという課題がある. その課題を解決するために LHP を用いて機器内部に搭載された高発熱部品を直接徐熱する方法も提案されている. 図 14 に示すように, LHP (リザーバが蒸発器から離れた位置にあるため, 厳密には LHP ではなく CPL (Capillary Pumped Loop)) の蒸発器を機器内部の高発熱部品と熱的に結合させ, 熱を機器の外まで運ぶことにより宇宙機システムと機器内部の高発熱部品の温度差を低減するものである[17]. また, OHP と同様に 3D プリンタを用いた LHP の研究開発も行われている. これまで別々の部品で構成されていた蒸発器ケースとウィックを一体成型することにより蒸発器ケース/ウィック間の接触界面をなくすことで接触熱抵抗を低減することを目的とした研究開発が多い.

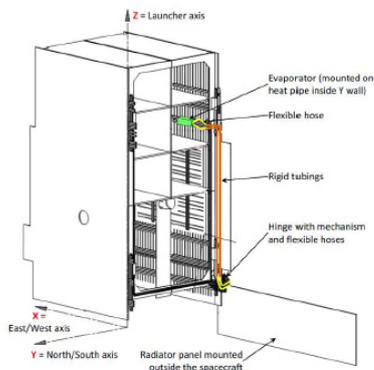


図 12 LHP 展開ラジエータ[14]

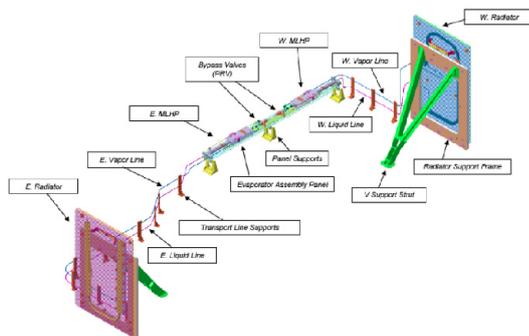


図 13 LHP による東西面連結[16]

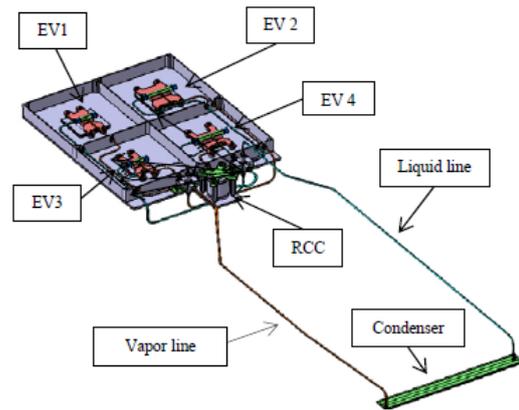


図 14 CPL による機器内部部品の直接排熱[17]

5. まとめ

宇宙機の熱制御系に対する要求は今後益々, 高度化, 複雑化すると思われるが, ヒートパイプ技術が今後出てくる新しい熱制御技術と共存しつつ, 今後も変わらず貢献していくことを願う. また, 宇宙開発の更なる発展に皆様のヒートパイプや伝熱に関するご研究に貢献いただけると幸いです.

参考文献

- [1] R. E. Harkness, Performance of the GEOS-II 14 Heat Pipe System, John Hopkins Applied Physics Laboratory Technical Digest (1969).
- [2] 松田智規, 田中好和, 野村武秀, 小谷真人, 高橋直幸, 高排熱型 3 次元ヒートパイプネットワークシステムの開発, 第 51 回宇宙科学連合講演会講演集, 3I04, (2007).
- [3] I. Troxel, M. Fehring, and M. Chenoweth, Flexible Fault Tolerance Using the ARTEMIS Reconfigurable Payload Processor, Presentation at Military and Aerospace FPGA and Applications (MAFA) Meeting, 24 pages, Palm Beach, FL, USA, November 27-29th, (2007).
- [4] R. McGlen and C. Sutcliffe, Additive Manufactured Titanium-Ammonia Heat Pipes for Thermal Management of Space Electronic Devices, Proceedings of 50th International Conference on Environmental Systems, ICES-2020-306, 9pages, Lisbon, Portugal, July 12-16, (2020).
- [5] Akachi, H., 1990, U.S. Patent Application for a "Structure of a heat pipe," Patent No.

- US4921041A, filed 25 June 1988, published 1 May, (1990).
- [6] M. Ando, A. Okamoto, K. Tanaka, M. Maeda, H. Sugita, T. Daimaru, and H. Nagai, On-orbit Demonstration of Oscillating Heat Pipe with Check Valves for Space Application, *Applied Thermal Engineering*, Volume 130, pp.552-560, November (2017).
- [7] Brenton S. Taft, and Kevin W. Irick, ASETS-II OSCILLATING HEAT PIPE SPACE FLIGHT EXPERIMENT: THE FIRST SIX MONTHS ON ORBIT, *Frontiers in Heat and Mass Transfer (FHMT)*, 12, 24 (2019).
- [8] H. Fuke, S. Okazaki, A. Kawachi, M. Kondo, H. Ogawa, and N. Yamada, Design and application of multi-loop capillary heat pipes to cool GAPS silicon detectors, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, A 1049 (2023) 168102.
- [9] S. Okazaki, H. Fuke, H. Ogawa, et al., Meter-scale multi-loop capillary heat pipe, *Applied Thermal Engineering*, Volume 141, pp. 20–28, (2018).
- [10] M. Cox, and T. Daimaru, Characteristics of an Additively Manufactured Titanium Oscillating Heat Pipe, *Proceedings of 53rd International Conference on Environmental Systems*, ICES-2024-259, 8pages, Louisville, Kentucky, USA, July 21-25, (2024).
- [11] M. Ando, and A. Okamoto, Thermal performance of additively manufactured three-dimensional oscillating heat pipe with check valves in various orientations, *Proceedings of 53rd International Conference on Environmental Systems*, ICES-2024-259, 9pages, Louisville, Kentucky, USA, July 21-25, (2024).
- [12] A. Okamoto, J. Melendez, and F. Romera, Loop Heat Pipes for ASTRO-H/SXS, *Proceedings of 47th International Conference on Environmental Systems*, ICES-2017-349, 13pages, Charleston, South Carolina, U.S.A., July 16-20, (2017).
- [13] J. Verdonck, P. Hugonnot, A. Ferrero, J. Martin, M. Serrano, and A. Torres, Development and qualification of a Deployable Radiator in the frame of the European Horizon 2020 Pegasus program, *Proceedings of 48th International Conference on Environmental Systems*, ICES-2018-293, 18pages, Albuquerque, New Mexico, USA, July 8-12, (2018).
- [14] A. Lecossais, F. Jacquemart, G. Lefort, E. Dehombreux, F. Beck, and V. Frard, Deployable Panel Radiator, *Proceedings of 47th International Conference on Environmental Systems*, ICES-2017-140, 9pages, Charleston, South Carolina, USA, July 16-20, (2017).
- [15] M. Takeshi, T. Yabe, A. Okamoto, T. Fukatsu, T. Kusashima, and N. Katayama, Development of a Deployable Radiator Equipped with Loop Heat Pipes for High-Throughput Communication Satellites, *Presentation at European Space Thermal Engineering Workshop 2024*, Noordwijk, Netherlands, October 8-10, (2024).
- [16] A. Torres, D. Mishkinis, and T. Kaya, Mathematical model validation of a thermal architecture system connecting east/west radiators by flight data, *Applied Thermal Engineering* 66(2014) 1-14.
- [17] M. Escribano1, P. Montes, A. Torres, and F. Beck, Thermal Control of electronic equipment by using a Mini Hybrid Capillary Pumped Loop (MH-CPL), *Proceedings of 47th International Conference on Environmental Systems*, ICES-2017-202, 13pages, Charleston, South Carolina, USA, July 16-20, (2017).

第5回ナノ・マイクロ熱ふく射に関する 国際ワークショップ (NanoRad2024) 開催報告

Organizing Report for 5th International Workshop on Nano-Micro Thermal Radiation (NanoRad2024)

宮崎 康次 (九州大学), 江目 宏樹 (山形大学), 櫻井 篤 (新潟大学),
磯部 和真 (岡山大学), 藤井 宏之, 戸谷 剛 (北海道大学)
*Koji MIYAZAKI (Kyushu Univ.), Hiroki GONOME (Yamagata Univ.), Atsushi SAKURAI (Niigata Univ.),
Kazuma ISOBE (Okayama Univ.), Hiroyuki FUJII, Tsuyoshi TOTANI (Hokkaido Univ.)*

1. はじめに

2024年7月16日から19日まで、北海道札幌市の北海道大学フロンティア応用科学研究棟にて、第5回ナノ・マイクロ熱ふく射に関する国際ワークショップ (NanoRad2024) が開催されました。この会議は3年毎に開催されるのが通例であり、第1回 (2012年) は日本 (松島), 第2回 (2014年) は中国 (上海), 第3回 (2017年) は韓国 (大田) で開催されました。第4回 (2020年) は中国 (上海) で予定されていましたが、2023年まで延期して開催が検討されていたものの、COVID-19による渡航制限の影響により残念ながら中止となりました。そこで急遽2024年日本開催を前倒しで進めることとなり、日本がリーダーシップを発揮してスタートした国際会議が再び里帰りできました。海外の研究者にとっては訪問チャンスの少ない北海道が候補として挙がり、予算ならびに会場の確保を現地実行委員にお願いすることになりました。国内外関係者のご尽力で無事に会議を終え、総参

加者数112名 (国内41名, 海外71名), 発表論文数86件 (Plenary 4件, Invited 15件, Oral 33件, Poster 34件) となりました。参加国内訳は、中国28名, アメリカ14名, フランス9名, 韓国7名, ドイツ5名, 台湾4名, カナダ1名, シンガポール1名, スペイン1名, トルコ1名でした。以下、現地実行委員、プログラム、大会幹事からワークショップの運営状況や各行事についてまとめて頂きましたのでご覧ください。

(宮崎 康次, 江目 宏樹)

2. 現地実行委員

夏の北海道で会場を確保することから作業がスタートしました。NanoRadの開催形式上、100名が1部屋に入る会場を3日間確保することと、ポスター発表する設備を用意する必要がありました。第1回の成功を参考にするため、当時の大会委員長にご意見を伺ったところ、松島湾クルーズが大変好評だったこと、風光明媚な場所に集まっ



図1 NanoRad2024 参加者集合写真

てアットホームな雰囲気で開催することをご提案いただきました。そこで、MICE の招致に力を入れていた釧路市でクルーズも行っている阿寒湖周辺で行うことを当初計画しました。しかしながら、夏のベストシーズンで宿泊代が高いこと、ポスター設備を札幌から輸送することがあること、最寄りの空港から阿寒湖までの交通アクセスが貧弱であることなどから、阿寒湖周辺での開催を断念しました。宿泊と会場が同じであれば、アットホーム感を演出できるのではと考え、札幌市内でのホテルでの開催を検討しましたが、ここでもまた会場費が高く断念しました。授業期間内ではありましたが必要な部屋数が少ないことから、学内で会場を探したところ、鈴木章先生がノーベル化学賞を受賞されたことを記念して建てられた鈴木章ホールが奇跡的に3日間空いていることが分かり、会場とすることにしました。ただ、この会場ではコーヒブレイク以外、昼食をとることができないため、昼食の手配について課題が発生しました。コロナ禍以前であれば、ホテルが経営するレストランが学内にあったのですが、コロナ禍を受けて撤退していました。そのため、鈴木章ホールから10分ほど歩いたところにあるオープンイノベーションハブ「エンレイソウ」を昼食会場として予約し、ケータリングを学外のビリオンローズさんをお願いしました。バンケットとレセプションについては、日本旅行さんに手配をお願いしました。レセプションは、サッポロビール園で北海道の風土料理ジンギスカンで皆様をお迎えし、バンケットをホテルマイステイズ札幌アспенで行いました。NanoRadに関連する大規模な国際学会METAが富山で開かれ、ASMEのNational Heat Transfer Conferenceと日程が一部重なり最終日からしか参加できないなど、最後まで参加者数を把握するのが困難でした。次に資金の確保です。北海道開催とのことで道と市の援助を直ぐに検討しました。併せて科研費成果促進や鹿島学術振興財団への申請(4件)を進めました。ホームページ、参加申込み(参加費支払い含む)、VISA申請を外部業者へ委託(センキョウさん)して、負担軽減も図りました。

(藤井 宏之, 戸谷 剛)

3. プログラム

本ワークショップでは、上記の口頭発表は全て

一つの会場におけるシングルセッションでの開催となりました。これは第一回のNanorad2012から引き継がれた伝統です。全ての研究者が朝から晩まで同じ空間と時間を共有し、密度の高い議論をするためです。さて、プログラム編成にあたってまず、Plenary講演者を決定しました。これは、3名の共同議長による合議により、後述する4名の基調講演者が決まりました。次に、本ワークショップでは多くの招待講演者をお呼びすることが慣例となっています。残念ながら、Nanorad2020(上海)がコロナのため中止になったことから、その際に招待されるはずであった先生方を、基本的な軸として招待者リストを作成しました。それに加えて現在、最も活躍する研究者の皆様を招待することといたしました。その結果、後述する15名の先生方からご快諾を受け、錚々たる陣営を敷くことができました。正直申し上げて、全員、基調講演者で呼ぶべきでは...と思うレベルでした。学会運営上、仕方ないことでしたが、招待講演者の先生方、快く札幌まで来て頂いたことに心より感謝申し上げます。次に、一般口頭発表を募集しました。基調講演と招待講演のラインナップをしっかりとできましたので、一般口頭発表の応募はすぐにこちらの想定数をオーバーしてしまいました。締切を一週間くらいは延期しよう、と目論んでいましたが、これ以上集まってしまうとシングルルームワンセッションの開催は無理と判断し、泣く泣く予定通り募集を締め切りました。時差を考慮に入れていなかったため、現地時間で締切日に間に合わなかった先生方の応募は締切1日後も受け付けました。ポスター発表については、口頭発表ほどキツキツではなかったため安心して受け入れることができました。

今回、アブストラクト集を作成するにあたり、参加者の皆様には1ページのみの原稿で、発表の要点と主たる結果や図を記載していただくようにしました。全体的に非常にレベルが高く、明らかにおかしな参加者もいなかったため、査読作業は大変スムーズに行うことができました。口頭発表者が決まったら、発表スケジュールの決定です。予定より口頭発表者数が多くなってしまったため、基調講演者40分、招待講演者30分、一般講演者15分の枠として、朝9時から夕方18時までびっちり口頭発表が詰まった過密スケジュール

となってしまいました。第1回の松島開催では、学会中にクルージングがあったりして少し余裕があって楽しかった記憶があるので、次回への宿題とします。プログラム集の作成にあたっては、各PDFファイルの細かな修正から、業者さんから上がってきたプログラムリストの誤字脱字、フォーマットの細かな違いなどを、実行委員の磯部和真先生と河野貴裕先生が完璧に修正してくださいました。私一人では絶対に細かな点まで目が行き届かず、大変助かりました。ありがとうございました。座長の選定については、招待講演者の先生方を中心に依頼させていただきました。招待講演者は海外の方がほとんどでしたので、必然的にそうってしまったのですが、もう少し日本人の先生方に座長をお願いしておけばよかったと後悔しています。こちらも次回への宿題とさせていただきます。最後に、プログラム編成については、これまでのNanoradの伝統があつてこそ、非常にハイレベルな講演者を揃えることができましたし、学会中も超一流の先生方による議論も活発に行われ、まさにふく射研究の最先端の場にいることが実感できました。ご協力いただいた皆様に心より感謝申し上げます。以下、プレナリー講演です。
(櫻井 篤)

- Prof. Gang Chen
所属 : Massachusetts Institute of Technology (MIT), USA
題目 : Photomolecular Effect and Universal Interfacial Absorption



図2 Gang Chen 先生の講演の様子

- Prof. Philippe Ben-Abdallah
所属 : Institut d'Optique, France
題目 : Near-Field Heat Transfer Close to the Contact and in Many-Body Systems



図3 Philippe Ben-Abdallah 先生の講演の様子

- Prof. Masahiro Nomura
所属 : The University of Tokyo, Japan
題目 : Enhanced Thermal Conduction and Radiation by Surface Phonon Polaritons



図4 Masahiro Nomura 先生の講演の様子

- Prof. Shanhui Fan
所属 : Stanford University, USA
題目 : Near-Field Thermal Radiation with Time-Modulated Systems



図5 Shanhui Fan 先生の講演の様子

4. Raymond Viskanta Award

NanoRad2024 では、Raymond Viskanta Award の授与が行われました。ふく射伝熱部門における Elsevier 若手科学者賞は、Purdue 大学 (USA) の Raymond Viskanta 教授 (1931-2021) の名を冠し、彼の 1950 年代からのふく射伝熱分野への多大な貢献を称えるものです。2024 年度の Viskanta 賞は、ふく射伝熱の理論と応用に取り組む若手科学者・技術者を対象としており、招待講演者の一人である Yi Zheng 教授 (Northeastern 大学, USA) に授与されました。

(宮崎 康次)



図6 Raymond Viskanta Award 受賞の様子. 左から Pinar Mengüç 教授 (Award Committee Chair), Yi Zheng 准教授 (Award winner), 右: Mathieu Francoeur 教授 (JQRST Editor in Chief)

5. Best Poster Award

NanoRad2024 の初めての試みとして、Nanophotonics (IF = 7.9, De Gruyter) がスポンサー

となり、優秀学生ポスター賞について審査されました。受賞者は以下の3名です。

(江目宏樹, 磯部和真, 宮崎康次)

- Yusuke Koizumi
所属：山形大学（日本）
題目：Experimental Evaluation of the Optical Absorption Performance of Pickering Emulsions with Plasmonic Nanoparticles
- Saeki Nakano
所属：山形大学（日本）
題目：Temperature Dependence of Electron-Phonon Coupling in Heterostructure Nanoparticles
- Gyu Heo
所属：KAIST（韓国科学技術院，韓国）
題目：Design of Bifacial Near-Field Thermophotovoltaic Converters with Internal Cooling Channels in Silicon Layers



図7 Best Poster Award 受賞の様子. 左から Saeki Nakano (山形大学), Yusuke Koizumi (山形大学), Gyu Heo (KAIST), Koji Miyazaki 教授 (Conference Chair)

6. おわりに

コロナ禍による自粛から1年が経過し、影響を受けての前倒し開催が今年2024年7月だったことが驚きです。言うまでもなく社会が元通りになりました。まだまだ航空券が高価だった時期にも関わらず遠くはヨーロッパから参加頂いた先生方にも感謝しております。特集号の企画やプレゼン賞の審査など、運営にも積極的に参加頂きました。

夏の北海道という素晴らしい気候の下、ご家族連れの海外先生方も多く、開催地について最高の評判を頂くことができました。ふく射をキーワードとして固い結束で丸となって大会成功に向けて努力して下さった実行委員メンバーの成果と思っております。さらに共催団体として手厚く運営をサポートして下さった理事会、国際部会、各種委員会の先生方には多くのご指導とご助言を賜りました。ワークショップ開催を支えて下さった皆様方に誌面を借りまして深く感謝申し上げます。

今回は2027年に Changying Zhao 教授 (Shanghai Jiao Tong University) が Chair として中国上海で開催されます。多くの皆様のご参加をお待ちしております。

(宮崎 康次, 江目 宏樹)

Conference Chair

Koji Miyazaki, (Kyushu University, Japan)
Sheng Shen (Carnegie Mellon University, USA)
Mauro Antezza (University of Montpellier, France)

Local Organizing Committee

Chair

Tsuyoshi Totani (Hokkaido University)

Technical Program Chair

Atsushi Sakurai (Niigata University)

Secretary General

Hiroki Gonome (Yamagata University)

Hiroyuki Fujii (Hokkaido University)

Members

Kazuma Isobe (Okayama University)

Makoto Kashiwagi (Waseda University)

Masamichi Kohno (Kyushu University)

Atsuki Komiya (Institute of Fluid Science, Tohoku University)

Makoto Shimizu (Tohoku University)

Yutaka Tabe (Hokkaido University)

Yuhei Miyauchi (Kyoto University)

Yoichi Murakami (Tokyo Institute of Technology)

Takahiro Kono (Tokyo Metropolitan University)

行事カレンダー

本会主催行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先/ウェブサイト
1月				
10(金)～12(日)	Japan-China Heat Transfer Symposium 2025			Chair : Naoki SHIKAZONO (Univ.Tokyo) Secretary-general : Gota KIKUGAWA (Tohoku Univ.) https://www.ifs.tohoku.ac.jp/mcf/jchts25/
14(火)～15(水)	The 1st A3 Nano & Thermal Energy Engineering Workshop			企画メンバー : Yaerim Lee, The University of Tokyo E-mail : yaerim@photon.t.u-tokyo.ac.jp
5月				
14(水)～17(土)	第62回日本伝熱シンポジウム HTSJ 国際伝熱シンポジウム	2025年 1月10日(金)	2025年 2月28日(金)	第62回日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局 (東京科学大学 工学院 機械系内) E-mail : symp2025@htsj-conf.org https://pub.confit.atlas.jp/ja/event/htsj2025
14(水)～17(土)	IUTAM Symposium on Machine Learning in Diverse Fluid Mechanics			Symposium Chair : Koji Fukagata (Keio Univ.) Co-organizer : Yoshiyuki Tagawa (Tokyo Univ. of Agriculture and Technology) https://iutam-mlf2025.org/
7月				
21(月)～25(金)	Turbulence, Heat and Mass Transfer 2025 (THMT'25)	2025年 1月15日(水)	2025年 4月30日(水)	Chair : K. Suga, Osaka Metropolitan Univ., Japan Co-Chair : M. Tanahashi, Institute of Science Tokyo, Japan OC-Secretary : K. Iwamoto, Tokyo Univ. of Agriculture https://www.thmt-25.org/

本会共催, 協賛行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先
2025年				
1月				
10(金)	共通基盤技術シンポジウム 2025 ～クライオ電子顕微鏡技術を活用した液状材料・プロセス研究の新展開～			化学工学会 材料・界面部会事務局 渡邊貴一 (岡山大学) E-mail : scej-dmi@okayama-u.ac.jp 日本顕微鏡学会 液状材料の微細構造研究部会 高橋真一 (兵庫県立大学) E-mail : takashin181@gmail.com https://microscopy.or.jp/jsm2022/wp-content/uploads/2024/09/f8a2d2142ea91a3fd4d6e291a1c867ca.pdf
14(火)～17(金)	GXI-International Symposium on Zero-Carbon Energy Systems (GXI-ZES)		2024年 10月15日(火)	国際会議 GXI-ZES 事務局 E-mail : gxi-zes@zc.iir.titech.ac.jp https://gxi-zes.org/
20(月)	2024年度神戸大学価値創造スマートものづくり研究センター シンポジウムおよび見学会「神戸発! 水素で拓く未来社会」			〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1 神戸大学 価値創造スマートものづくり研究センター (大学院システム情報学研究科本館内) Tel : 078-803-6250 あるいは 803-6367 Fax : 078-803-6391 E-mail : smart-center@org.kobe-u.ac.jp
24(金)	第1回反応装置セミナー ～反応装置の設計・操作の基礎から応用まで～			大阪公立大学 堀江孝史 E-mail : horie@omu.ac.jp
30(木)～31(金)	第53回ガスタービンセミナー			公益社団法人日本ガスタービン学会事務局 〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13-402 Tel. 03-3365-0095 Fax. 03-3365-0387 E-mail : gtsj-office@gtsj.or.jp
31(金)	第37回CES21講演会 地域で創出する新たな価値 -水素/アンモニア/メタネーションによる脱炭素サプライチェーンの構築-	定員になり次第締切		公益社団法人化学工学会関西支部 〒550-0004 大阪市西区鞠本町1-8-4 大阪科学技術センター6階 EL : 06-6441-5531 FAX : 06-6443-6685 E-mail : apply@kansai-scej.org
2月				
6(木)	第3回燃焼工学講座			日本燃焼学会事務局 : office@combustionsociety.jp
3月				
28(金)	第4回燃焼工学講座			日本燃焼学会事務局 : office@combustionsociety.jp

行事カレンダー

6月				
2 (月)	水・蒸気性質シンポジウム 2025	2025 年 3月31日 (月)		日本水・蒸気性質協会 https://www.jpapws.org/ Email : office@jpapws.org
4 (水) ~6 (金)	第30回計算工学講演会	2025 年 1月17日 (金)	2025 年 4月4日 (金)	日本計算工学会 事務局 Email : office@jcses.org
15 (日) ~19 (木)	第41回熱電変換国際会議/第7回熱電変換アジア会議	2025 年 1月31日 (金)		第41回熱電変換国際会議/第7回熱電変換アジア会議 (ICT/ACT2025) 運営事務局 〒105-0001 東京都港区虎ノ門 2-2-5 共同通信会館 4階 株式会社インターグループ内 TEL : 03-5549-6916 FAX : 03-5549-3201 E-mail : ict2025@intergroup.co.jp

第 62 回 日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集
HTSJ 国際伝熱シンポジウム研究発表論文募集

第 62 回 日本伝熱シンポジウム実行委員会

委員長 店橋 護

主幹事 齊藤卓志

幹事 長澤 剛

HTSJ 国際伝熱シンポジウム実行委員会

委員長 伏信一慶

主幹事 村上陽一

幹事 兒玉 学

第 62 回の日本伝熱シンポジウム（以下、伝熱シンポ）を、以下のとおり沖縄県にて開催いたします。なお、2025 年度は日本伝熱学会のさらなる国際化を促すことを目的に、HTSJ 国際伝熱シンポジウム（以下、国際シンポ）を伝熱シンポとともに開催いたします。多くの皆様にご参加いただけますようお願い申し上げます。なお、伝熱シンポと国際シンポのいずれかに参加申込いただければ、両方にご参加いただけます。

開催日：2025 年 5 月 14 日（水）～17 日（土）

会場：沖縄コンベンションセンター (<https://www.oki-conven.jp/>)

所在地 〒901-2224 沖縄県宜野湾市真志喜 4-3-1 電話番号 098-898-3000

アクセス 那覇空港あるいは那覇バスターミナルからバスを利用

バス便の多い真志喜バス停から会場までは 900 m、徒歩約 11 分

交通アクセス情報(<https://www.oki-conven.jp/access/>)

講演申込締切： 2025 年 1 月 24 日（金）

講演論文原稿提出締切： 2025 年 2 月 28 日（金）

早期参加申込締切： 2025 年 4 月 4 日（金）

申込は下記のホームページより：

<https://pub.conf.it.atlas.jp/ja/event/htsj2025>

【シンポジウムの形式】

- 講演発表形式として
 - a) 通常の一般セッション（口頭発表、伝熱シンポは日本語あるいは英語、国際シンポは英語のみ）
 - b) オーガナイズドセッション（口頭発表、伝熱シンポは日本語あるいは英語、国際シンポは英語のみ）
 - c) 伝熱シンポにおいて、学生および若手研究者を対象とする優秀プレゼンテーション賞セッション

ン（日本語あるいは英語）を実施。

- 伝熱シンポの講演あたりの割当時間は、15分（発表10分、個別討論5分）で、各セッションの最後に総合討論の時間（5分×セッション内の講演件数）を設ける予定です。
- 国際シンポの講演あたりの割当時間は、15分（発表10分、個別討論5分）の予定です。
- 優秀プレゼンテーション賞セッションについては、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞（第62回 日本伝熱シンポジウム）について」をご参照下さい。

【参加登録費等】（以下の内容は伝熱シンポと国際シンポで共通）

- 参加申込の時期

早期申込：2025年4月4日（金）まで

通常申込：2025年4月5日（土）以降

- シンポジウム参加費

会員一般（不課税） 早期申込：14,000円 通常申込：17,000円

協賛学会員一般（課税） 早期申込：15,400円（うち消費税1,400円）

通常申込：18,700円（うち消費税1,700円）

非会員一般（課税） 早期申込：18,700円（うち消費税1,700円）

通常申込：22,000円（うち消費税2,000円）

会員学生（不課税） 早期申込：8,000円 通常申込：9,000円

非会員学生（課税） 早期申込：9,900円（うち消費税900円）

通常申込：11,000円（うち消費税1,000円）

※特別賛助会員は1口につき3名、賛助会員は1口につき1名、参加費が無料になります。

※名誉会員は参加費が無料になります。

※学会員とは、日本伝熱学会会員のことを指します。

※講演論文集電子版は参加者全員に配布されます。

- 講演論文集の販売について

講演論文集のみの販売は致しませんのでご注意下さい。

【意見交換会】（以下の内容は伝熱シンポと国際シンポで共通）

- 開催日： 2025年5月16日（金）

- 会場： ラグナガーデンホテル（〒901-2224 沖縄県宜野湾市真志喜4-1-1）

- 参加費（早期申込締切：2025年4月4日、それ以降は通常申込）

一般 早期申込：9,900円（うち消費税900円） 通常申込：13,200円（うち消費税1,200円）

学生 早期申込：4,950円（うち消費税450円） 通常申込：7,150円（うち消費税650円）

- 意見交換会終了後、那覇市内までの帰りの送迎バスを運行する予定です。

【参加登録と参加費等の支払い方法】（以下の内容は伝熱シンポと国際シンポで共通）

- 参加登録は本シンポジウムのウェブページから行って下さい。

- 参加費等の支払いをもって「参加登録の完了」とします。
- 参加登録および参加費等の支払方法および期限を設定します（詳細はシンポジウムホームページに掲載します）。

講演申込方法，講演論文集，執筆要綱

【講演申込方法】

- 伝熱シンポの一般セッションと優秀プレゼンテーション賞セッションの講演者（登壇者）は，日本伝熱学会会員（ただし，賛助会員と特別賛助会員は除く）に限ります。講演者が日本伝熱学会会員でない場合は，会員申込と会費納付を行って下さい（オーガナイズドセッションについては，オーガナイザーの指示に従って下さい）。
- 国際シンポの講演者（登壇者）は，日本伝熱学会会員（ただし，賛助会員と特別賛助会員は除く）であることが望ましいですが，非会員でも構いません。
- 原則としてウェブによる申込に限らせて頂きます。本シンポジウムで準備するウェブサイトから必要なデータを入力して下さい。ウェブによる申込ができない場合には，実行委員会事務局にお問い合わせ下さい。
- 申込では，まず，伝熱シンポでの発表か，国際シンポでの発表かを選択します。その後，一般セッション，オーガナイズドセッション，優秀プレゼンテーション賞セッション（伝熱シンポのみ）のいずれで発表するかを選択して下さい。優秀プレゼンテーション賞セッションに申込の場合には，本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞（第 62 回 日本伝熱シンポジウム）について」をご参照下さい。
- 伝熱シンポに発表申込される方は，論文要旨（日本語で 200～250 字）を入力して下さい。講演論文集の抄録として科学技術振興機構（JST）のデータベースに登録します。また，国際シンポに発表申込される方は，Abstract（英語で 150～200 words）を入力して下さい。
- 講演発表申込は，伝熱シンポと国際シンポを通じて，講演者 1 名につき 1 題目とさせていただきます。ただし，異なる内容について両シンポでの発表を希望される方は，実行委員会事務局にお問い合わせ下さい。
- 講演の採否およびセッションへの振分けは，実行委員会にご一任下さい。

【講演論文集電子版】

- 講演論文または講演アブストラクトのいずれかの原稿（伝熱シンポは日本語あるいは英語，国際シンポは英語）を，PDF ファイルで本シンポジウムのホームページから提出して下さい。講演論文は A4 サイズで 2～6 ページ，講演アブストラクトは，A4 サイズで 1 ページとします。
- 従来の講演論文とは別に，当該講演内容を後日原著論文として TSE 以外の学術雑誌等に投稿する場合は，二重投稿にならないように配慮して 1 ページの講演アブストラクトを提出することができます。
- 講演論文集として電子版のみを発行し，冊子版は発行しません。
- 講演論文集電子版は参加登録サイトの個人ページを介して公開します。なお，参加できなかった日

本伝熱学会員には、講演論文集電子版をネットからのダウンロードを基本として配布します（ダウンロードが困難な会員は事務局へお申し込み下さい）。これは賛助会員についても同様の扱いとします。

- 講演論文集電子版はシンポジウム開催日の1週間ほど前から参加登録サイト上で公開します。従って、特許に関わる公知日はシンポジウム開催日よりも早くなりますのでご注意ください。
- シンポジウム終了後、一定期間を経て講演論文集電子版の参加登録サイト上での公開を終了します。
- 原稿提出締切日までに提出されなかった講演論文・講演アブストラクトは、講演論文集電子版に掲載されません。

【執筆要綱】

- 伝熱シンポジウムは①～④の原稿から、国際シンポは③、④から選択して執筆して下さい。
 - ① 講演論文（一般セッション、オーガナイズドセッション、優秀プレゼンテーション賞セッション（伝熱シンポのみ））
 - ② 講演アブストラクト（一般セッション、オーガナイズドセッション、優秀プレゼンテーション賞セッション（伝熱シンポのみ））
 - ③ Full size manuscript
 - ④ Abstract manuscript
- 各原稿の書式の詳細ならびにテンプレートは、講演申込サイトにあるテンプレートをご参照下さい。
- 論文表題および著者名は、講演申込時のデータと同じものを同じ順序で書いて下さい。講演申込時のデータと異なる場合には、目次や索引に反映されないことがあります。
- PDF ファイル作成のためのファイル変換時には、「フォントの埋め込みを行う」を設定して下さい。提出前に必ず、変換後のPDF原稿を印刷して確認して下さい。

【ご注意】（以下の内容は伝熱シンポと国際シンポで共通）

- 講演論文原稿提出締切後の講演申込の取消しおよび講演論文原稿の差替えは、シンポジウムの準備と運営に支障をきたしますのでご遠慮下さい。
- 講演申込は共著者の許可を得てから行って下さい。
- 論文題目と著者名が、講演申込時と論文提出時で相違しないように特にご注意下さい。
- 口頭発表用として実行委員会事務局が準備する機器は、原則としてプロジェクタのみとさせていただきます。パーソナルコンピュータは各自ご持参下さい。
- 参加登録費、意見交換会参加費等は参加取消しの場合でも返金いたしません。
- 本シンポジウムに関する最新情報については、随時更新するホームページでご確認下さい。

【お問い合わせ先】

第62回 日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局

（東京科学大学 工学院 機械系内）

E-mail : symp2025@htsj-conf.org

優秀プレゼンテーション賞（第 62 回日本伝熱シンポジウム）について

日本伝熱学会 学生会委員会
委員長 春木 直人

第 62 回日本伝熱シンポジウムでは、下記の要領で、若手研究者および学生を対象とした優秀プレゼンテーション賞セッションを設けます。日頃の研鑽の成果を披露するチャンスとして、奮ってご応募下さい。

- 開 催 日：5 月 15 日（木）シンポジウム第 2 日目
- 発 表 形 式：発表者 1 名あたり、発表内容をまとめたポスタープレゼンテーションを行う形式をとる予定です。
- 対 象：企業・大学・研究機関等の技術者・研究者で、令和 7 年 4 月 1 日現在で 28 歳以下の方、または、申込当日に学生である方。
- 応 募 資 格：発表者は日本伝熱学会の会員（正員・学生員）に限ります。発表者が日本伝熱学会会員でない場合は、早期参加申込締切までに会員申込と会費納付を行ってください。なお、本セッションで発表する方は、応募資格を必ず満たす必要があります。また、過去に本賞を受賞された方は応募することはできません。
- 応 募 件 数：大学に所属する学生の場合：指導教員（同じ所属大学に限る）あたり 1 名（1 件）
大学以外の研究機関、企業に所属する場合：研究グループあたり 1 名（1 件）
とします。
- 応 募 方 法：第 62 回日本伝熱シンポジウム発表申込時に、本誌掲載の講演申込方法に従って、“優秀プレゼンテーション賞”を選択し、“指導教員または研究グループ長等”を入力してください。
なお、講演論文原稿の様式については一般セッションと同様のものとします。
- 審査・選考方法：複数名の審査員による評価に基づいて選考し、受賞者を決定します。
- 表 彰：受賞者はシンポジウム第 3 日の学会総会で表彰されます。



編集出版部会からのお知らせ —各種行事・広告などの掲載について—



インターネットの普及により情報発信・交換能力の比類ない進展がもたらされました。一方、ハードコピーとしての学会誌には、アーカイブ的な価値のある内容を手にとって熟読できる点や、一連のページを眺めて全貌が容易に理解できる点など、いくら電子媒体が発達してもかなわない長所があるのではないかと思います。ただし、学会誌の印刷・発送には多額の経費も伴いますので、当部会ではこのほど、密度のより高い誌面、すなわちハードコピーとしてぜひとも残すべき内容を厳選し、インターネット（HP：ホームページ、ML：メーリングリスト）で扱う情報との棲み分けをした編集方針を検討いたしました。

この結果、これまで会告ページで取り扱ってきた各種行事・広告などの掲載につき、以下のような方針で対応させていただきたく、ご理解とご協力をお願いする次第です。

対象	対応	具体的な手続き (電子メールでの連絡を前提としています)
本会（支部）主催による行事	無条件で詳細を、会誌とHPに掲載、MLでも配信	申込者は、記事を総務担当副会長補佐協議員（ML担当）、広報委員会委員長（HP担当）あるいは編集出版部会長（会誌担当）へ送信してください。
関係学会や本会会員が関係する組織による 国内外の会議・シンポジウム・セミナー	条件付き掲載 会誌：1件当たり4分の1ページ程度で掲載（無料） HP：行事カレンダーに掲載しリンク形成（無料） ML：条件付き配信（無料）	申込者は、まず内容を説明する資料を総務担当副会長補佐協議員に送信してください。審議の結果、掲載可となった場合には総務担当副会長補佐協議員より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を編集出版部会長（会誌担当）と広報委員会委員長（HP担当）に送信してください。
大学や公的研究機関の人事公募（伝熱に関係のある分野に限る）	会誌：掲載せず HP：条件付き掲載（無料） ML：条件付き配信（無料）	申込者は、公募内容を説明する資料を総務担当副会長補佐協議員に送信してください。審議の結果、掲載可となった場合には総務担当副会長補佐協議員より申込者にその旨通知しますので、申込者は記事を広報委員会委員長（HP担当）に送信してください。
一般広告 求人広告	会誌：条件付き掲載（有料） HP：条件付き掲載 （バナー広告のみ、有料）	申込者は、編集出版部会長（会誌担当）または広報委員会委員長（HPバナー広告担当）に広告内容を送信してください。掲載可となった場合には編集出版部会長または広報委員会委員長より申込者にその旨通知しますので、申込者は原稿を編集出版部会長または広報委員会委員長に送信してください。掲載料支払い手続きについては事務局からご連絡いたします。バナー広告の取り扱いについては http://www.htsj.or.jp/wp/media/36banner.pdf をご参照下さい。

【連絡先】

- ・総務部会長：大宮司 啓文（東京大学）：daiguji@thml.t.u-tokyo.ac.jp
- ・編集出版部会長：佐々木 直栄（日本大学）：sasaki.naoe@nihon-u.ac.jp
- ・広報委員会委員長：渡部 弘達（立命館大学）：hirowtnb@fc.ritsumeji.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐協議員：李 敏赫（東京大学）：mlee@mesl.t.u-tokyo.ac.jp
- ・事務局：村松佳子：office@htsj.or.jp

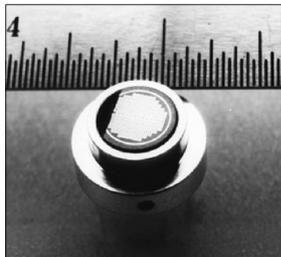
【注意】

- ・原稿は Word ファイルまたは Text ファイルでお願いします。
- ・HP はメンテナンスの都合上、掲載は申込月の翌月、また削除も希望掲載期限の翌月程度の時間遅れがあることをご了承願います。
- ・ML では、原則としてテキスト文の送信となります。pdf 等の添付ファイルで送信を希望される場合はご相談ください。

熱流束センサー

熱流束センサーは、熱エネルギーの移動密度 (W/cm^2) に比例した直流電圧を出力します。
弊社の製品は、大変手軽に高速・高精度で熱流量の測定をすることができます。
特に応答速度の早いこと、センサーからの出力レベルが高いことが特徴で、
熱流束マイクロセンサー (HFM) では、応答速度最高6マイクロ秒を達成しています。

熱流束 マイクロセンサー



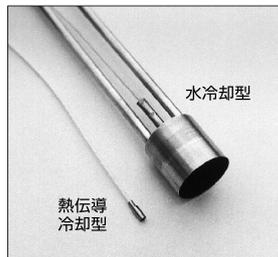
特徴

- 最高速の応答 (約 6μ 秒)
- $850^{\circ}C$ まで外部冷却不要
- 低雑音 / 高感度
- 熱流束と温度を測定
- 伝導、対流、輻射に等感度

使用例

- エンジン内壁の熱伝達状態観察
- ロケットエンジンのトラブル実験
- タービンレード熱風洞試験
- 自動車用エアバッグ安全性試験
- ジェットエンジンバックファイヤー試験

サーモゲージ

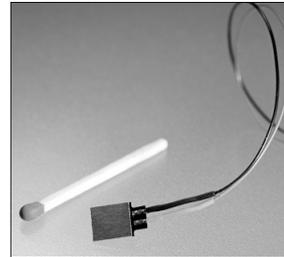


センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタンタンで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

使用例

- 焼却炉・溶鉱炉の熱量測定
- 火災実験の際の輻射熱ゲージ
- バーナーなど熱源の校正用基準器
- 着火性・燃焼性試験 (ISO5657, 5658, 5660)
- 米国連邦航空局のファイヤー・スモークテスト

gSKIN® 熱流束センサー



「gSKIN®」熱流束センサーはセンサー自身の表面を通過する熱流束を29対の超高感度な熱電対を用いて測定します。センサーは、 $72m^2$ の広さを持ち、厚さは $0.4mm$ です。レベル-0パッケージの最適化ポリマーと1-レベルパッケージの金属の構造になっています。

使用例

- 電気・電子機器内の発熱・放熱状態測定
- 熱交換器の効率測定
- パイプの放熱状況測定
- 暖房および換気自動システムの測定
- 熱移動/熱放出の即時応答測定

熱流束センサー 校正サービス

熱流束センサーの校正作業をお引き受けいたします。校正証明書は米国基準局NISTにトレーサブルです。校正設備の物理的な制約で、お引き受けできない場合もあります。ご相談ください。



センサテクノ株式会社

URL

www.senstech.jp

〒106-0031 東京都港区西麻布3-24-17 霞ビル4F
TEL: 03-5785-2424 FAX: 03-5785-2323

E-mail

info@senstech.jp



■ CAPTEC 社日本総代理店 ■ MEDTHERM 社輸入販売店 ■ ITI 社輸入販売店

当社は、独自の高度技術を持つ、海外メーカーの熱計測機器をご提供致しております。

CAPTEC 社(フランス)

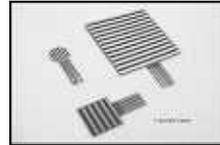
CAPTEC(キャプテック)社は、独自の高度技術により、低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化しても感度は常に一定で、熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。
輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

熱流束センサー



サイズ: 5×5mm～300×300mm
厚み: 0.4mm (平面用・曲面用)
温度範囲: -200～200°C
応答速度: 約 200ms
オプション: 温度計測用熱電対内蔵
形状: 正方形・長方形・円形
特注品: 高温用・高圧用・防水加工

輻射センサー



サイズ: 5×5mm～50×50mm
厚み: 0.25mm
温度範囲: -200～250°C
応答速度: 約 50ms
オプション: 温度計測用熱電対内蔵
形状: 正方形・長方形・円形
波長領域: 赤外/可視+赤外

MEDTHERM 社(アメリカ)

MEDTHERM(メドサーム)社は、これまで30年以上にわたり、高品質の熱流計及び超高速応答の熱電対を提供してまいりました。航空宇宙・火災・燃焼分野における豊富な実績を有しています。用途に応じ、様々な形状・仕様の製品を製造可能です。

熱流計/輻射計



熱流束範囲: 0.2-4000Btu/ft²sec(フルスケール)
サイズ: 1/16インチ(約1.6mm)～1インチ(約25.4mm)
最高温度: 200°C(水冷なし)/1500°C(水冷)
出力信号: 0-10mV(DC・線形出力)
直線性: ±2%(フルスケールに対して)

応答速度: 50ms以下*
再現性: ±0.5%
較正精度: ±2%
オプション: 輻射窓・視野角指定等

*応答速度は、熱流束レンジによって異なります。

超高速応答同軸熱電対

本同軸型熱電対は、第1熱電対のチューブの中に第2熱電対ワイヤーが挿入された同軸構造になっています。第2熱電対ワイヤーは、厚み0.0005インチ(約0.013mm)の特殊なセラミックで絶縁コーティングされています。プローブ先端の熱電対接点は、厚み1～2ミクロンの金属皮膜で真空蒸着されており、最高1マイクロ秒の応答速度を実現しています。



【主な用途】
表面温度及び表面熱流束計測
風洞試験・エンジンシリンダー・エアコンプレッサー等
【最小プローブ径】
0.015インチ(約0.39mm)

【熱電対タイプ】
T型(銅/コンスタンタン) -270°C～+400°C
J型(鉄/コンスタンタン) -210°C～+1200°C
E型(クロメル/コンスタンタン) -270°C～+1000°C
K型(クロメル/アルメル) -270°C～+1372°C
S型(白金10%ロジウム/白金) +200°C～+1700°C

ITI 社(アメリカ)

ITI(International Thermal Instrument Company)社は、1969年の設立以来、高温用熱流板や火災強度熱流計など、特殊な用途に対応した製品を提供しています。特注品の設計・製造も承っております。

高温用熱流板



最高温度: 980°C
応答速度: 0.1s
直径: 8mm～25.5mm 厚み: 2.5mm

水冷式 火災強度熱流計



最高温度: 1900°C
応答速度: 0.1s
最大熱流束レンジ: 0～3000W/cm²

当社取扱製品の適用分野

- 伝熱一般
- 温熱環境
- 炉・ボイラー
- 航空宇宙
- 火災
- 燃焼
- 各種エンジン

有限会社 テクノオフィス

〒225-0011 神奈川県横浜市青葉区あざみ野 3-20-8-B
TEL. 045-901-9861 FAX. 045-901-9522
URL: <http://www.techno-office.com>

「水と空気」の機能性

射出成形とダイキャスト成形の生産環境を最適化

ファンクショナル・フルイッドは、水に起因する様々な障害を防止し、高効率で安定した冷却工程、製品精度の向上、省エネルギー推進を目的とした製品を提供しています。「水と空気」の機能性を追求し、生産環境の改革を通じて、お客様の生産技術の向上と、社会課題の解決に貢献します。

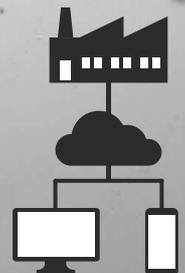
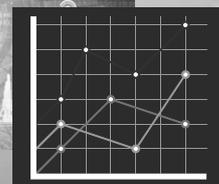
■ 射出成形用二次冷却システムUWT-1000WHX



NEW

■ 遠隔監視システム

冷却水を遠隔監視し、安定生産と省人化を実現。



編集出版部会ノート

Note from the JHTSJ Editorial Board

本号では、小糸康志先生（熊本大学）にお願いして、特集「ヒートパイプ研究の最前線」を組んでいただきました。ヒートパイプを中心とした最近10年の研究開発動向に関わるトピック8件のご寄稿をいただきました。ご多用中にも関わらずご寄稿下さりました皆様に厚くお礼申し上げます。

本特集の前報に当たる特集「古くて新しいヒートパイプ」が本誌（Vol.51, No.217）に掲載されてから12年の月日が流れたことに驚きを感じつつ、愛しい人との再会に似たこの上ない喜びを感じております。当時、日本ヒートパイプ協会会長を務められていた勝田正文先生に特集企画をご快諾いただいた時の感激は昨日のここのように思い出されます。

同誌の目次に改めて目を配ると、小澤守先生による委員会報告「福島第一原子力発電所災害に係る伝熱学会特別委員会報告」や加藤康司先生による特別寄稿「ロハスの家とコミュニティー21世紀の持続可能社会形成のためにー」が目にとまり、奇遇にもこの一冊に私との関連深い内容が詰め込まれていたことに気付かされます。

編集出版部会長任期も残りわずかとなりましたが、会員の皆様にとって大切な一冊となり得る会誌「伝熱」の出版を心がけて、尽力したいと考えております。

佐々木 直栄（日本大学）

Naoe SASAKI (Nihon University)

e-mail: sasaki.naoe@nihon-u.ac.jp

企画・編集出版担当副会長 永井 二郎（福井大学）

編集出版部会長 佐々木 直栄（日本大学）

委員

（理事） 齊藤 泰司（京都大学）

（協議員） 大西 元（公立小松大学）、岡部 孝裕（弘前大学）、柏木 誠（早稲田大学）、小糸康志（熊本大学）、仮屋 圭史（佐賀大学）、古川 琢磨（八戸工業高等専門学校）、地下 大輔（東京海洋大学）

TSE チーフエディター 鈴木 雄二（東京大学）

TSE 編集幹事 李 敏赫（東京大学）

編集出版部会 連絡先： 〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1番地

日本大学 工学部機械工学科

佐々木 直栄

Phone: 024-956-8695

E-mail: sasaki.naoe@nihon-u.ac.jp