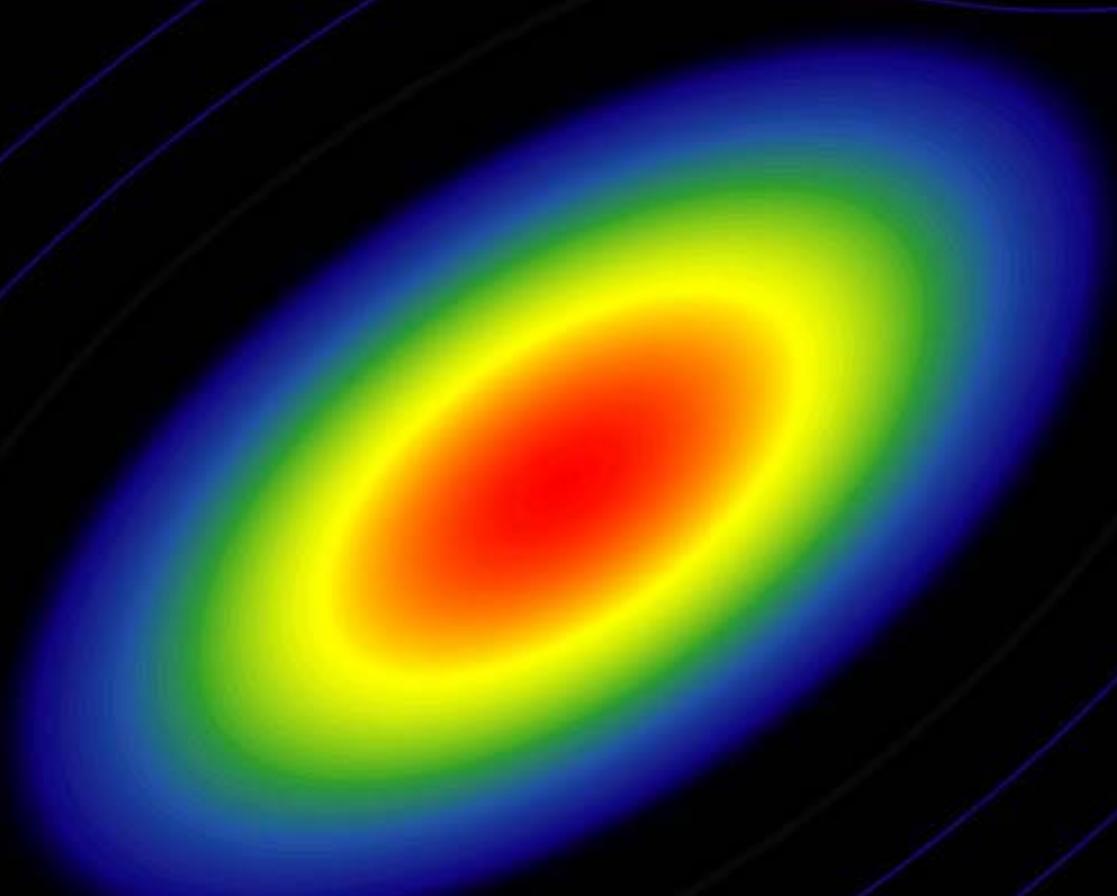


伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692 Vol.44 No.186
2005.5



JHSJ

◆小さな伝熱機器◆

「伝熱」原稿の書き方

How to Write a Manuscript of Dennetsu

伝熱 太郎 (伝熱大学)
Taro DENNETSU (Dennetsu University)

1. はじめに

以下の注意事項に留意して、原稿を作成すること。

2. 「伝熱」用原稿作成上の注意

2.1 標準形式

原稿は Microsoft Word 等を用いて作成し、図や写真等は原稿に張り込み一つのファイルとして完結させる。原稿の標準形式を表 1 に示す。

表 1 原稿の標準形式

| | |
|--------|--|
| 用紙サイズ | A4 縦長(210mm×297mm), 横書き |
| 余白サイズ | 上余白 30mm, 下余白 30mm 左余白 20mm, 右余白 20mm |
| タイトル | 1 段組, 45mm 前後あける (10 ポイント(10×0.3514mm)で 8 行分) |
| 本文 | 2 段組, 1 段 80mm, 段間隔余白 10mm |
| 活字 | 10 ポイント(10×0.3514mm) 本文 (Windows) MS 明朝体 (Macintosh) 細明朝体 見出し (Windows) MS ゴシック体 (Macintosh)中ゴシック体 英文字・数字 Times New Roman または Symbol |
| 1 行の字数 | 1 段あたり 23 文字程度 |
| 行送り | 15 ポイント(15×0.3514=5.271mm) 1 ページあたり 45 行 ただし、見出しの前は 1 行を挿入 |

2.2 見出しなど

見出しはゴシック体を用い、大見出しはセンターリングし前に 1 行空ける。中見出しは 2.2 などのように番号をつけ左寄せする。見出しの数字は半角とする。行の始めに、括弧やハイフン等がこないように禁則処理を行うこと。

2.3 句読点

句読点は、および。を用い、、や。は避けること。

2.4 図について

図中のフォントは本文中のフォントと同じものを用いること。

2.5 参考文献について

2.5.1 番号の付け方

参考文献は本文中の該当する個所に[1], [2,4], [6-10]のように番号を入れて示す。

2.4.2 参考文献の引き方

著者名、誌名、巻、年、頁の順とする。毎号頁の改まる雑誌(Therm. Sci. Eng.など)は巻-号数のようにして号数も入れる。著者名は、名字、名前のイニシャル。のように記述する。雑誌名の省略法は科学技術文献速報(JICST)に準拠する。文献の表題は省略する。日本語の雑誌・書籍の場合は著者名・書名とも省略しない。

参考文献

- [1] 伝熱太郎, 伝熱花子, 日本機械学会論文集 B 編, **80-100** (1999) 3000.
- [2] Incropera, F. P. and Dewitt, D. P., *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons (1976).
- [3] Smith, A. et al., *Therm. Sci. Eng.*, **7-5** (1999) 10.
- [4] 山田太郎, やさしい伝熱, 熱講社 (1980).

原稿作成用のテンプレート (MS-WORD) は下記の伝熱学会のホームページよりダウンロードできます。

伝熱学会のホームページ <http://www.htsj.or.jp/>
会告・記事・論文投稿表紙のテンプレート

http://www.htsj.or.jp/den_guide.html

転載許諾願申請フォーム

<http://www.htsj.or.jp/reqcopy.html>

伝 熱

目 次

〈小さな伝熱機器〉

| | | |
|---|------------------------------------|----|
| 「小さな伝熱機器」特集にあたって..... | 北村 健三 (豊橋技術科学大学) | 1 |
| 毛管式ヒートパイプの熱輸送限界..... | 野田 英彦 (八戸工業大学) | 2 |
| ヒートパイプ/ベーパーチャンバーによるPCの冷却技術..... | 望月 正孝 (㈱フジクラ) | 10 |
| 自励振動ヒートパイプの熱輸送特性に関するレビュー..... | 長崎 孝夫 (東京工業大学) | 13 |
| ペルチェモジュールの実用..... | 福田 克史 (小松エレクトロニクス㈱) | 18 |
| ミニチャンネル型高密度蒸気発生器における伝熱特性の解明とその開発 | 宇高 義郎 (横浜国立大学), 田崎 豊 (日産自動車) | 22 |
| 单相流マイクロチャンネル熱交換器..... | 浅古 豊 (首都大学東京) | 26 |
| PC用ヒートシンクの動向..... | 木村 裕一 (古河電気工業株式会社) | 30 |

〈国際活動・会議報告〉

| | | |
|---|--|----|
| 第6回実験熱流体世界会議(ExHFT-6)報告 | 笠木 伸英 (東京大学), 円山 重直 (東北大学), 吉田 英生 (京都大学) | 32 |
| 庄司正弘先生の2005年ヌッセルト-レイノルズ国際賞受賞を祝して | 笠木 伸英 (東京大学) | 36 |
| ヌッセルト・レイノルズ賞を受賞して..... | 庄司 正弘 (産業技術総合研究所) | 37 |

〈特別寄稿〉

| | | |
|-----------------|------------------------|----|
| 沸騰の科学 (1) | 甲藤 好郎 (東京大学名誉教授) | 38 |
|-----------------|------------------------|----|

〈博物館めぐり〉

| | | |
|------------------|-------------------|----|
| 東京電力 電気の史料館..... | 関 紀明 (東京電力) | 43 |
|------------------|-------------------|----|

〈Heat Transfer〉

| | | |
|-----------------|--------------------|----|
| プランクの法則の裏側..... | 円山 重直 (東北大学) | 44 |
|-----------------|--------------------|----|

〈行事カレンダー〉

| | | |
|-------|-------|----|
| | | 49 |
|-------|-------|----|

〈お知らせ〉

| | | |
|-------------------------------|-------|----|
| IHTC-13: CALL FOR PAPERS..... | | 51 |
|-------------------------------|-------|----|

インターネット情報サービス

●<http://www.htsj.or.jp/>

最新の会告・行事の予定等を提供

●htsj@asahi-net.email.ne.jp

事務局への連絡の電子メールによる受付

日本伝熱学会 2004 年度（第 43 期）会長・副会長・理事・監事

◆会 長 荒木 信幸（静岡大学）

◆副会長 増岡 隆士（九州大学）

◆理 事 門出 政則（佐賀大学）
池川 昌弘（北海道大学）
平田 哲夫（信州大学）
清水 昭比古（九州大学）
森 治嗣（東京電力）

武石 賢一郎（大阪大学）

高田 保之（九州大学）
円山 重直（東北大学）
竹中 信幸（神戸大学）
三浦 隆利（東北大学）
康 倫明（ダイキン）

笠木 伸英（東京大学）

花村 克悟（東京工業大学）
北村 健三（豊橋技術科学大学）
逢坂 昭治（愛媛大学）
大原 敏夫（デンソー）

◆監 事 伊藤 正昭（日立製作所）

工藤 一彦（北海道大学）

Journal of the Heat Transfer Society of Japan
Vol.44, No.186, May 2005

CONTENTS

< Small Heat Transfer Equipment >

| | |
|--|----|
| On the Special Issue of 'Small Heat Transfer Equipment' | |
| Kenzo KITAMURA (Toyohashi Univ. of Technology)..... | 1 |
| Heat Transfer Limit of Wicking Heat Pipes | |
| Hidehiko NODA (Hachinohe Institute of Technology) | 2 |
| A Cooling Technology for PC by Heat Pipes and Vapor Chamber | |
| Masataka MOCHIZUKI (Fujikura Ltd.)..... | 10 |
| Review of Pulsating Heat Pipes | |
| Takao NAGASAKI (Tokyo Institute of Technology)..... | 13 |
| Practical Use of Peltier Modules | |
| Katsushi FUKUDA (Komatsu Electronics Inc.) | 18 |
| Heat Transfer Characteristics and Development of Mini-channel Type Vapor Generator | |
| Yoshio UTAKA (Yokohama National University), Yutaka TASAKI (Nissan Motor Co. LTD.) | 22 |
| Micro-channel Heat Exchangers for Single Phase Flow | |
| Yutaka ASAKO (Tokyo Metropolitan University) | 26 |
| Trend of Heat Sink for CPU in Personal Computer | |
| Yuichi KIMURA (The Furukawa Electric Co., Ltd.) | 30 |

< Report on International Conference and Seminar >

| | |
|--|----|
| 6 th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics, ExHFT-6 | |
| Nobuhide KASAGI (The University of Tokyo), Shigenao MARUYAMA (Tohoku University) | |
| Hideo YOSHIDA (Kyoto University) | 32 |
| In Celebration of Professor Masahiro Shoji's Receipt of 2005 Nusselt-Reynolds Prize | |
| Nobuhide KASAGI (The University of Tokyo) | 36 |
| Some Feelings for Receiving Nusselt-Reynolds Prize | |
| Masahiro SHOJI (AIST-Tsukuba) | 37 |

< Contribution >

| | |
|---|----|
| Science of Boiling (1) | |
| Yoshiro KATTO (Professor Emeritus of The University of Tokyo) | 38 |

< Museum Tour >

| | |
|--|----|
| TEPCO Electric Power Historical Museum | |
| Toshiaki SEKI (Tokyo Electric Power Company) | 43 |

< Heat Transfer >

| | |
|---|----|
| Back Ground of Planck's Law | |
| Shigenao MARUYAMA (Tohoku University) | 46 |

< **Calendar** >49

< **Announcements** >51

「小さな伝熱機器」特集にあたって
On the Special Issue of 'Small Heat Transfer Equipment'

北村 健三 (豊橋技術科学大学)
Kenzo KITAMURA (Toyohashi Univ. of Technology)

筆者の研究室では、パソコンの購入が必要になったとき、それがデスクトップ型であれば大学の近くにあるパソコンショップに出掛け、電源ケースやマザーボード、HD、CDドライブなど、必要なパーツを購入し、研究室で学生に組立ててもらい、2、3時間も有れば既製品と変わらない性能をもったパソコンが出来上がる。このようなパソコンの自作は安価である他に、意外な効用をもっているようである。それはパソコンのパーツの中に、ヒートシンクやファン、熱伝導グリースなど様々な放熱対策部品が組み込まれており、これから伝熱を学ぼうとする学生にとって格好の教材を提供していることである。ヒートシンクとファンを組み合わせたCPUクーラーは、衝突噴流の高い熱伝達率を巧みに利用していること、熱伝導グリースやテープはCPU本体とヒートシンク間の接触熱抵抗の低減を狙ったものであるが、この部分が意外に大きな熱抵抗となっていること、更に話題を発展させて、現在ノート型パソコンの90%以上では、ヒートパイプが放熱対策部品として利用されており、液晶ディスプレイの裏面やキーボード表面などに熱を輸送、放散していること、など聞きかじりの話を披露すると、日頃「伝熱」を勉強している学生諸君には、俄然興味をもって聞いてもらえるのが不思議である。

上の事情は学生だけでなく、我々「伝熱」を専門とする研究者にとっても同じではないだろうか。ヒートシンクやヒートパイプなどがパソコンの冷却に利用されていることは知っていても、それが現在どのような状況にあり、今後どのように発展していくのかについては、身近な話題であり興味は有るものの、筆者をはじめ門外漢の研究者にはよく分からない。本号の特集「小さな伝熱機器」は、このような素人の興味に基づいて企画されたものである。

まず、「毛管式ヒートパイプの熱輸送限界」のうち、最も重要な「毛細管圧力限界」に関して八戸工大の野田先生に研究の現状を、ついで「ヒートパイプおよびベーパーチャンバーのPCへの応用例」を(株)フジクラの望月氏に、「PC用ヒートシンクの動向」について古河電工(株)の木村氏にそれぞれ紹介して頂くことにした。また、将来の発展が期待される「自励振動ヒートパイプ」について東工大の長崎先生に、「ミニチャンネル型蒸気発生器」および「単相流マイクロチャンネル熱交換器」について、それぞれ横浜国大の宇高先生、首都大学東京の浅古先生に執筆頂いた。併せて、近年急速に材料開発、用途開発が進められている「ペルチェ素子」の動向、実用例について小松エレクトロニクス(株)の福田氏に紹介して頂いた。本特集号7件の記事のうち3件は、企業の第一線で活躍中の技術者による執筆であり、製品開発に関わる様々な課題がコンパクトにまとめられた内容となっている。また、残りの4件の記事は、大学の研究室で取り組まれている機器の開発や高性能化に関するレビュー記事であり、研究の現状や動向を伺い知る格好の資料となっている。

以上、「言葉多くして、舌足らず」の紹介文となってしまった。本特集が読者の興味と関心を多少なりとも引くことができれば幸いである。最後になりましたが、年度末の多忙な時期にも関わらず、原稿を執筆頂いた皆様に心よりお礼を申し上げます。

なお、本5月号より9回の予定で、本年1月24日に逝去されました東大名誉教授甲藤好郎先生のご遺稿「沸騰の科学」が掲載されます。詳細につきましては、本号掲載記事をご覧ください。

毛管式ヒートパイプの熱輸送限界

Heat Transfer Limit of Wicking Heat Pipes

野田 英彦 (八戸工業大学)

Hidehiko NODA (HACHINOHE Institute of Technology)

1. はじめに

電子機器の高性能化が進み、高集積化、高速化とともに発熱密度、発熱量が増大している。コンピュータやゲーム機のMPUはすでに30Wを超え、狭隘な空間から効果的に除熱する冷却システムの最適設計が必要となっている。

ヒートパイプは、ウイックと呼ばれる多孔質物質をコンテナ内壁に内貼りにし、作動流体を注入して減圧して密封したものである。コンテナ内は飽和状態であり、熱を加えるとウイック内に存在する液が蒸発し、蒸気は温度の低い凝縮部（放熱部）のウイック上に凝縮する。凝縮した液は、ウイックの毛細管圧力で蒸発部（受熱部）に戻る。潜熱で熱輸送するので、多量の熱輸送が可能である。また、蒸気流の圧力損失が小さいので、全体がほぼ均一温度で、小さな温度差で熱輸送が可能である。さらに、無重力状態でも動作可能であること、重力場では熱を下から上へのみ輸送する熱ダイオード性があること、等の特徴を持っている。

優れた伝熱性能を持っているので、すでに電子機器冷却や金型冷却、道路融雪、等、広範囲に利用されている。

熱輸送を行う際に、毛細管圧力を駆動力としてコンテナ内部を作動流体が循環するので、循環が阻害されると、蒸発部のウイックが乾き上がり、突然熱輸送できなくなる限界が存在している。熱輸送限界は種々の要因で発生するが、ここでは、地上用ヒートパイプでは最も一般的な熱輸送限界である毛細管圧力限界について述べる。

また、ウイックには、金網ウイック、ファイバーウイック、焼結金属ウイック、グループウイック、等が利用されている。それぞれ、孔の形状が異なるので、ここでは、大きい毛細管圧力を容易に得られ、工業製品であり均質な、平織り金網ウイックについて述べる。

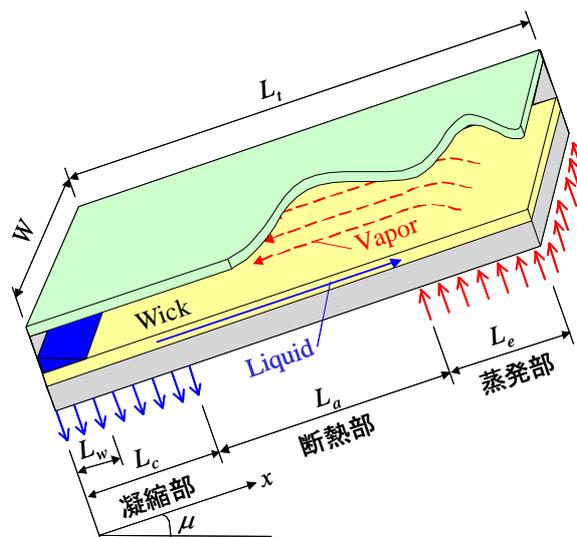


図1 ヒートパイプ

2. 毛細管圧力限界による熱輸送限界

ヒートパイプを図1に示す。通常は円管状であるが、平板型で示している。蒸発部で蒸発した作動流体は、低温、低圧の凝縮部に移動し、ウイック上に凝縮する。凝縮した液はウイックの毛細管圧力を駆動力として、蒸発部に還流する。しかし、毛細管圧力には最大値が存在し、還流に伴う圧力損失の和が最大毛細管圧力に達すると、液が還流できなくなり、蒸発部が乾き、熱輸送限界となる。したがって、蒸発部、凝縮部に等熱流束を仮定すると、熱輸送限界 Q^* は次式で算出できる。

$$Q^* = \frac{(p_c^* - \Delta p_b) \lambda W}{\left(\int_{L_w}^{L_c} \frac{v dx}{2K\delta_n} + \int_{L_c-L_e}^{L_c-L_w} \frac{v dx}{K\delta_n} + \int_{L_c-L_e}^{L_c} \frac{v(L_t-x)}{K\delta_n L_e} dx \right)} \quad (1)$$

ここで、 p_c^* は最大毛細管圧力、 Δp_b は体積力による圧力差、 λ は蒸発潜熱、 ν は液の動粘度、 K はウイックの透過率、 δ_n はウイック厚さである。熱輸送限界を増大させるには、大きい毛細管圧

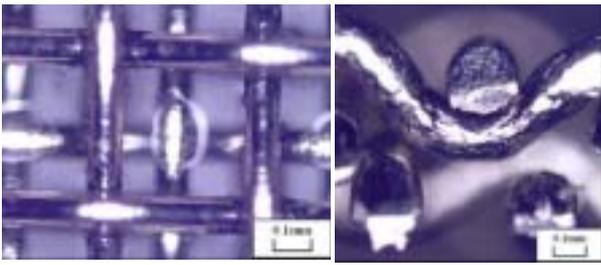


図2 平織り金網ウイック

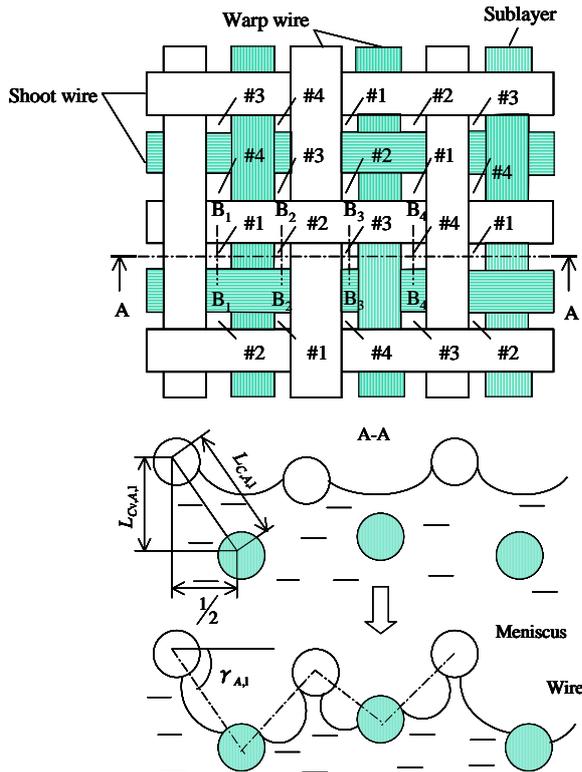


図3 メニスカス形状

力と大きい透過率の相反する特性が求められ、体積力による圧力差の違いによって、最適なウイック選定が重要となる。したがって、最大毛細管圧力、透過率、ウイック厚さの予測が必要となる。

3. 最大毛細管圧力

金網ウイックの最大毛細管圧力に関する研究は多数行われているが、ほとんどは個々のウイックの実験値を示すにとどまっている。解説書[1], [2]には、隣接格子のメニスカスとの関係から導出した次に示す Tien らの式[3]を掲載している。

$$p_c^* = \frac{4\sigma}{d+w} \quad (2)$$

w は目開き, d は素線径, σ は表面張力である。

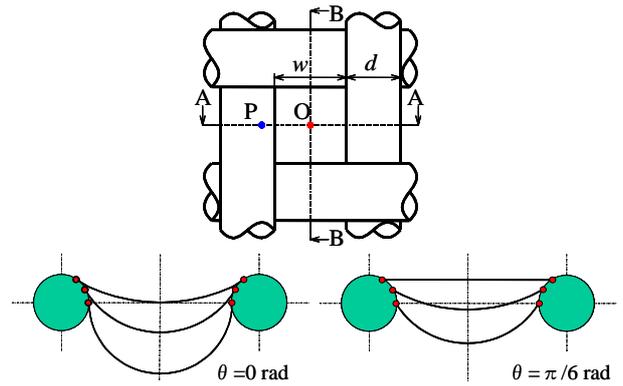


図4 メニスカス形状に及ぼす接触角の影響

また小佐井ら[4]は、格子の形状を解析し、接触角に対する考慮に不明瞭な点があり、実験値との整合が悪い。

平織り金網ウイックの形状を図2に示す。工業製品であり、精度良く製作されているため、下層と上層の金網は整然と重なる。

ウイックの模式図と A-A 断面の素線断面位置および円弧で近似したメニスカス形状を図3に示す。上下層で形成される孔の形状は、詳細に検討すると#1~#4の4種類となる。金網ウイックに形成されるメニスカスは、気液界面の圧力差すなわち毛細管圧力が小さい時は上層の金網に形成される。しかし、圧力差が金網一層の最大毛細管圧力を超えると、メニスカスは破壊し、直ちに上下層の隙間に形成される。したがって、金網ウイックの最大毛細管圧力は、一層の金網の最大毛細管圧力と、上下層の隙間に形成されるメニスカスの最大毛細管圧力のいずれか大きいほうの値となる。

メニスカス形状に及ぼす接触角の影響を図4に示す。金網格子の中心点 O を通る A-A 断面のメニスカス形状を示している。素線断面を円で、メニスカス形状を円弧で近似している。同じ接触点位置では、接触角 θ が小さい方がメニスカスの曲率半径 r は小さくなっており、接触点が下がるに伴い、 r が減少している。

毛細管圧力 p_c は、ヤング・ラプラスの式(3)から、曲率半径 r に反比例するので、毛細管圧力の増大とともに、メニスカスは後退することになる。

$$p_c = 2\sigma/r \quad (3)$$

メニスカスの破壊形態には、図5に示す3種類が存在する。曲率半径 r が最小値となる Case(a),

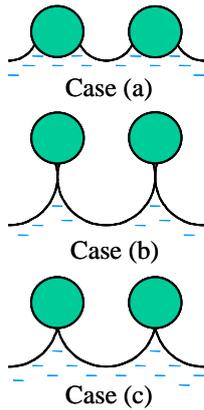


図5 メニスカスの破壊形態

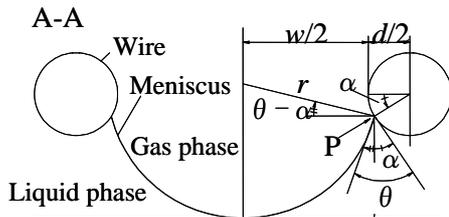


図6 座標

隣接格子メニスカスとの間の液膜厚さがゼロとなる Case(b), 隣接格子メニスカスと素線表面で接触する Case(c)である。

まず、金網一層のメニスカスの最大毛細管圧力について、図6に示す座標で解析した。ここで、点Pはメニスカスと素線の接点、 α は素線中心を結ぶ線からの伏角である。

メニスカスの半径 r は、点Pの伏角 α と接触角 θ から次式で表される。

$$r = \frac{(d+w) - d \cos \alpha}{2 \cos(\theta - \alpha)} \quad (4)$$

したがって、一層金網格子に形成されるメニスカスの毛細管圧力の解析値 $p_{c,1,cal}$ は、次式で与えられる。

$$p_{c,1,cal} = \frac{2\sigma}{r} = \frac{4\sigma \cos(\theta - \alpha)}{(d+w) - d \cos \alpha} \quad (5)$$

Case(a)は式(6)で求められるので、式(7)の解が得られる。また Case(c)は伏角 α が $\pi/2$ の位置である。

$$\text{Case (a)} \quad dp_{c,1,cal}/d\alpha = 0 \quad (6)$$

$$\alpha = \theta - \sin^{-1} \{d \sin \theta / (d+w)\} \quad (7)$$

$$\text{at } \theta < \tan^{-1} \{-(d+w)/d\}$$

$$\text{Case (c)} \quad \alpha = \pi/2 \quad (8)$$

$$\text{at } \theta \geq \tan^{-1} \{-(d+w)/d\}$$

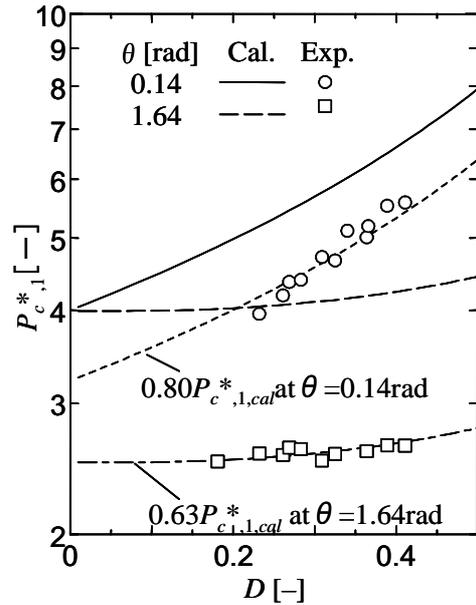


図7 金網一層の最大毛細管圧力の解析値と実験値の対応と予測式

一方、解説書[1], [2]に掲載されている Case(b)の破壊形態は、金網一層の場合には存在しない。詳細は文献[5],[6]を参照されたい。

解析値と実験値を比較する。最大毛細管圧力 p_c^* は、メッシュ数と表面張力に比例するので式(9)で、また格子形状に影響されるので、形状を式(10)で無次元化して図7に示す。

$$P_c^* = p_c^* \left(\frac{d+w}{\sigma} \right) \quad (9)$$

$$D = \frac{d}{d+w} \quad (10)$$

解析はメニスカス形状を円弧、素線断面を円と仮定して行った。しかし、格子角部の影響で格子中心の曲率半径は接点より大きくなり、金網の最大毛細管圧力は、解析値より小さくなる。そこで、接触角 θ の影響も考慮して、実験値と解析値の対応を式化し、次式を得た。

$$\frac{P_{c,1,exp}^*}{P_{c,1,cal}^*} = -0.106(\theta - \pi) + 0.5 \quad (11)$$

本実験の接触角は、0~1.64rad の広範囲としたが、最大毛細管圧力の解析値は、Case(a)の式(7)で与えられる伏角 α を用いた式(5)で与えられた。ヒートパイプのウイックの接触角は通常小さい値である。したがって、1層の金網の最大毛細管圧力は、式(7)の α を用いて、次式で予測できる。

$$p_{c^*,1,emp} = \frac{4\sigma \cos(\theta - \alpha) \{-0.106(\theta - \pi) + 0.5\}}{(1 - D \cos \alpha)(d + w)} \quad (12)$$

最大毛細管圧力の予測値 $p_{c^*,1,emp}$ と実験値 $p_{c^*,1,exp}$ の対応を図 8 に示す. 両者は良好に一致しており, 金網 1 層の最大毛細管圧力が式(12)で精度よく予測できることが分かる.

次に金網を重ねた上層と下層の隙間に形成されるメニスカスについて, 同様の検討を行った. 図 3 に示したように, 孔の形状は 4 種類である. しかし, 隣接する孔が水平には存在しないため, 隣接するメニスカスが接触する Case(b)の破壊形態が存在する.

孔の形状は, 金網を重ねた上下層の隙間によって変化する. 上下層の隙間には, 上層と下層の金網が接触する最小値が存在する. そこで, まず隙間の最小値 c_{min} を幾何学的に導出した. 金網の隙間 c は, 図 9 に示すように, 上層の最下点と下層の最上点の距離と定義する. したがって, c_{min} は負の値となる.

金網素線の曲がり半径を円弧として, 上下層の金網が接触した場合の金網断面を図 10 に示す. 左図, 右図は, それぞれ縦線方向, 横線方向の断面図である. この座標を元に, 上下層の隙間の最小値 c_{min} は次式で表される. 詳細は文献[7]を参照されたい.

$$c_{min} = d/2 - r_w - r_s - \delta_1 + \sqrt{(r_w + d/2)^2 - t^2} + \sqrt{(r_s + d)^2 - t^2} \quad (13)$$

ここで, d は素線径, δ_1 は金網一層の厚さ, t は $(d+w)/2$ で与えられる上下層の金網素線の水平距離, r_w, r_s は縦線, 横線の曲率半径である.

式(13)の両辺を $(d+w)$ で除して無次元化すると, 無次元最小隙間 C_{min} は, 次式で表される.

$$C_{min} = D/2 - R_w - R_s - \Delta_1 + \sqrt{(R_w + D/2)^2 - (1/2)^2} + \sqrt{(R_s + D)^2 - (1/2)^2} \quad (14)$$

Δ_1 は次式で定義する無次元金網一層厚さである.

$$\Delta_1 = \delta_1 / (d + w) \quad (15)$$

上下層の隙間に形成されるメニスカスの断面形状を円弧と仮定して, 最大毛細管圧力を解析的に求めた. ヒートパイプのウイック内を想定し, 接触角 θ が 0.14rad (8°) の場合について, 隣接格

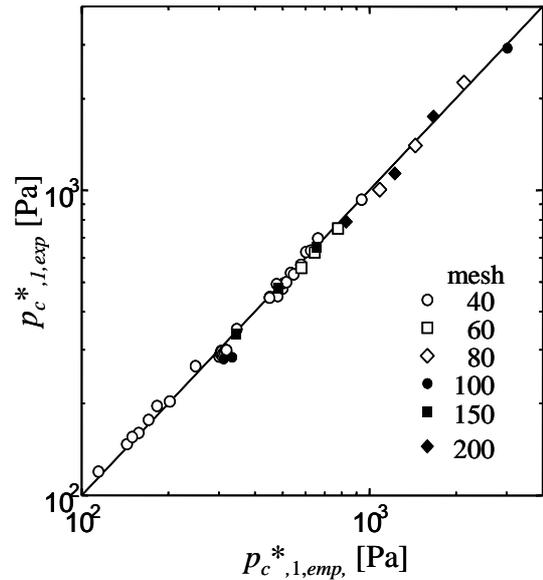


図 8 一層の金網の最大毛細管圧力の予測値と実験値の対応

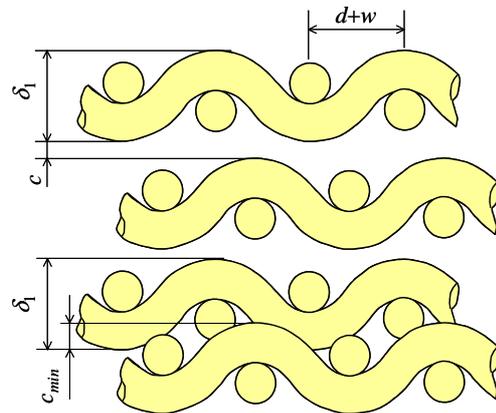


図 9 金網上下層の隙間

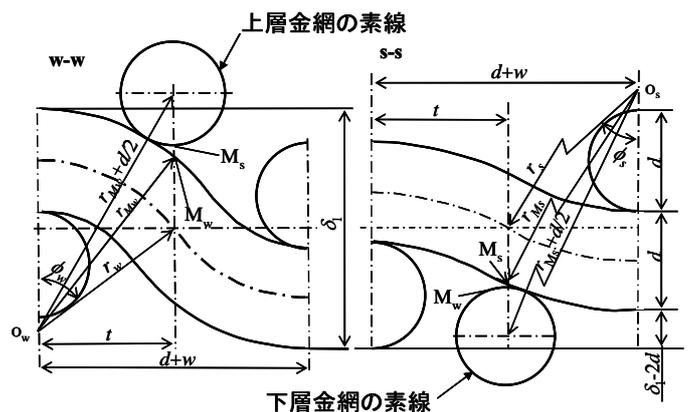


図 10 上下層の金網が接触した場合の素線位置

子のメニスカスの影響も考慮して, 解析を行った. また, 金網を 2 枚重ねて, 最大毛細管圧力に及ぼす上下層の隙間の影響を実験的に求めた. 解析方

法, 実験方法の詳細は文献[7], [8]を参照されたい.

代表的な無次元最大毛細管圧力の実験値と解析値を図11に示す. 実線は解析値, 一点鎖線は式(12)から算出される金網一層の最大毛細管圧力の予測値を式(9)で無次元化した値を示している. 黒丸は, 実験値を示している. 実験は上下層の隙間が十分大きい領域から, 最小隙間までの領域について行った. したがって, 実験値, 解析値の左端は無次元最小隙間 C_{min} における値を示している.

実験値は, 無次元隙間 C が大きいときには, 一点鎖線で示す一層の金網の最大毛細管圧力とほぼ同じ値を示しているが, C が小さくなると最大毛細管圧力が急激に上昇し, C_{min} の時に最大になる. 無次元最大毛細管圧力は, 金網形状や接触角に影響されるが, 図示した金網の場合, 一層の値の2倍近い値になっている.

上下層の隙間のメニスカスの最大毛細管圧力の解析値は, 実験値よりかなり大きい値を示しているものの, 実験値と同様の傾きを示している. これは, メニスカスの断面形状を円弧と仮定して解析したことに起因する. そこで, この関係を式化して, 隙間のメニスカスの最大毛細管圧力を予測する次式を導出した.

$$P_{c^*,n,emp} = \{(4.1D^2 - 1.5D + 0.8) - (6.58D - 3.01)(C_{min} - C)\}P_{c^*,n,cal} \quad (16)$$

ここで, $P_{c^*,n,cal}$ は無次元最大毛細管圧力の解析値である. 解析はウィック形状が複雑であるので難解であり, 繰り返し計算を要するので, 解析値を式化して次式を導出した.

$$P_{c^*,n,cal} = (53D^2 + 14D - 0.1)C^2 + (95D^2 - 53D - 5)C + \{(52D / \Delta_1 - 33.5)D + 10.3\} \quad (17)$$

したがって, 金網ウィックの最大毛細管圧力は, 式(12)で算出される一層の最大毛細管圧力と式(16), (17)で算出される上下層の隙間のメニスカスの最大毛細管圧力の, いずれか大きい値で予測できる.

無次元最大毛細管圧力の予測値と実験値の対応を図12に示す. 実験値と予測値は良好に対応しており, 金網無次元形状 D , Δ_1 , 接触角 θ , および上下層の無次元隙間 C から, 精度よく最大毛細管圧力を予測できることが分かる.

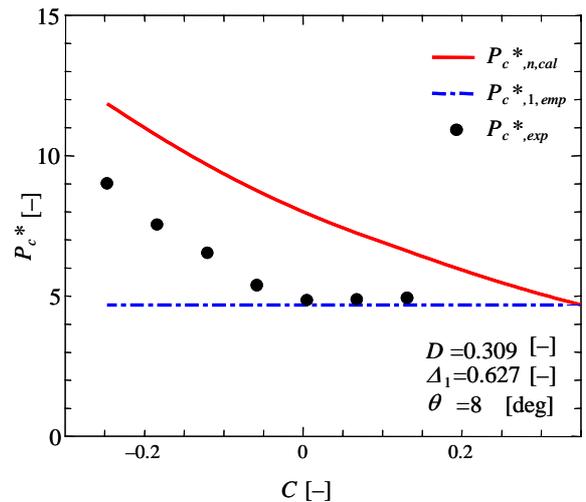


図11 無次元最大毛細管圧力の実験値と解析値の対応.

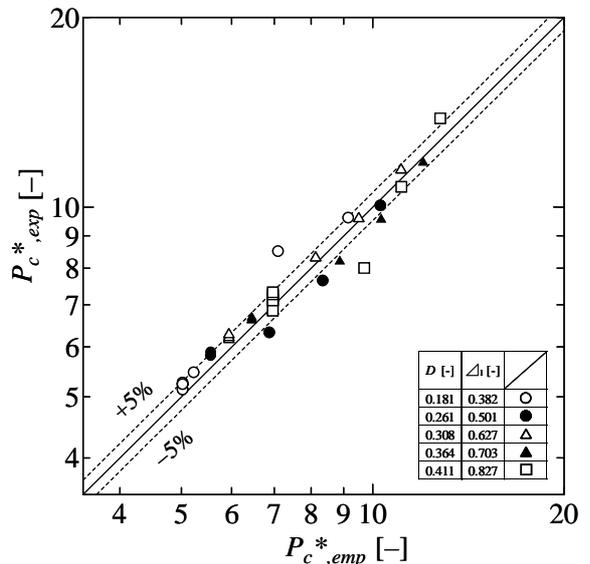


図12 無次元最大毛細管圧力の実験値と予測式の対応

4. 透過率

金網ウィックは多孔質として取り扱われ, 透過率 k に関する研究は数多くなされているが, それらの多くは個々の実験データを示すにとどまっている. Marcus は, ウィックの有孔率 ϵ_n を金網形状から評価し, Shumit が行った透過率の実験結果から, Blake-Kozeny の式を修正し, 金網ウィックの透過率 k を予測する次式を導出した[9].

$$k = \frac{\epsilon_n^3 d^2}{122(1 - \epsilon_n)^2} \quad (18)$$

この予測式(18)は、多くのヒートパイプの解説書[1], [2]に掲載されているが、得られる値は実際の値よりかなり小さいことが多い。小佐井らは、透過率が金網を押し付ける圧力によって変化することに着目し、ウイック厚さ δ_n と金網一層の厚さ δ_1 の比 $\delta_n/(n\delta_1)$ で整理し、透過率の予測式を提出した[10]。著者らは、金網一層分の厚さと素線径の比で整理し、予測式を提出した[11], [12]。

金網ウイック内の流れをダルシ流れとすると、図13に示すウイック内の圧力損失 Δp は次式で与えられる。

$$\Delta p = \frac{\mu m l_i}{\rho a_{wk}} \quad (19)$$

ここで、 μ は粘度、 m は質量流量、 ρ は密度、 a_{wk} はウイック断面積、 l_i はウイック長さである。ウイックの有孔率 ε_n は、ウイック体積と内部に存在する素線体積から、等価直径 d_h は空隙体積と素線表面積から、それぞれ式(20), (21)で与えられる。

$$\varepsilon_n = 1 - \frac{\pi S N n d^2}{2 \delta_n} \quad (20)$$

$$d_h = \frac{2 \varepsilon_n \delta_n}{1 + \pi d S N n} \quad (21)$$

ここで、 S は素線の曲がり率、 N はメッシュ数である。

せん断応力と平均流速 u に対応する動圧の比である摩擦係数 f と、等価直径 d_h を代表寸法とするレイノルズ数 Re を導入すると、 fRe は次式で与えられる。

$$fRe = \frac{d_h^2 \Delta p}{2 l u \mu} \quad (22)$$

これらの式から、透過率 k は次式となる。

$$k = \frac{\varepsilon_n d_h^2}{2 f Re} \quad (23)$$

fRe を精度良く予測すれば、透過率 k を精度良く予測できることになる。圧力損失は流速に支配される。そこで、ウイック内流れ方向の流路断面について検討した。ウイックの流れ方向断面を図14に示す。上下層の隙間が最小隙間であるときの断面を示している。また、流れ方向の距離を素線間隔 $(d+w)$ で無次元化した無次元距離を X とし、

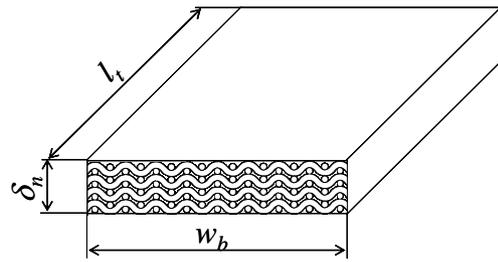


図13 金網ウイックの流路形状

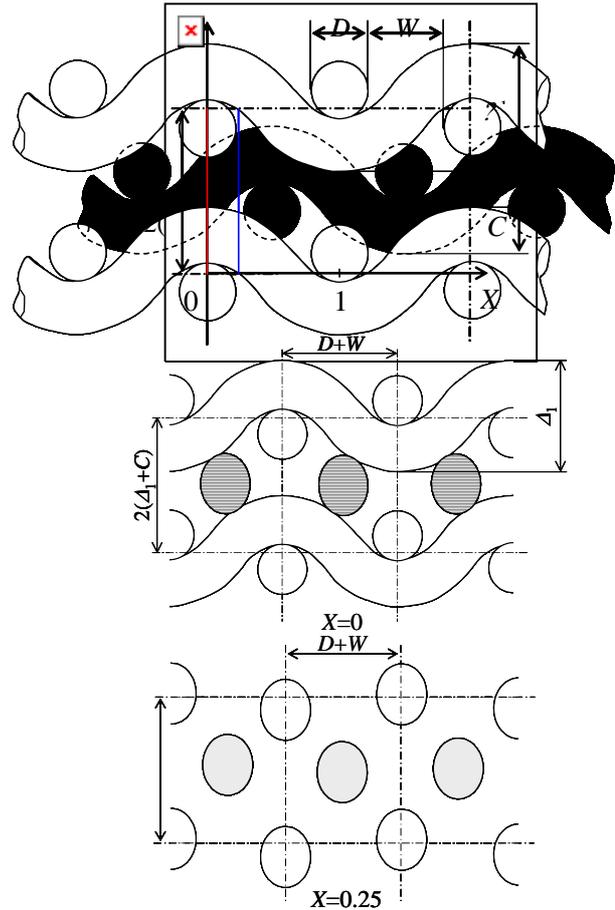


図14 ウイック内断面図

流れに直角方向の横線が存在する位置($X=0$)と存在しない位置($X=0.25$)の流路断面を同時に示している。 $X=0$ の位置では、流路が狭く、流速が早くなるのが分かる。流路断面積とウイック断面積の比を局所有孔率 ε_l は、 $X=0$ の位置で最小値 $\varepsilon_{l,min}$ となる。

fRe と最小局所有孔率 $\varepsilon_{l,min}$ の関係を図15に示す。 fRe は、 $\varepsilon_{l,min}$ が0.57以上の領域で急激に減少している。この原因は、上下層の隙間が広がると、各層間の隙間は均一に分布しないので、一部の隙間が大きくなり流動抵抗が減少したためと考えて

いる。一方、 $\varepsilon_{l,min}$ が 0.57 以下の領域では、流路形状が大きく変化しないため fRe の変化も少ない。

図中の実線、破線はそれぞれ式(24), (25)を示している。これらの式で算出される値の小さい値で fRe を予測し、式(23)から透過率を予測できる。

$$fRe = \exp(-8.4\varepsilon_{l,min} + 8.45) \quad (24)$$

$$fRe = \exp(-0.55\varepsilon_{l,min} + 3.98) \quad (25)$$

5. ウィックの厚さ

金網ウィックの最大毛細管圧力、透過率ともに金網形状と上下層の隙間の関数として予測式を導出した。そこで、熱輸送量が熱輸送限界に近づいた場合の上下層の隙間について検討する。

金網ウィックは金網を複数層重ねたものであり、通常その隙間を予測することはできない。しかし、ヒートパイプが動作し熱輸送を行うと、蒸発部ウィックの液面にメニスカスが形成され、毛細管圧力を発生する。200 メッシュの金網ウィックでは通常 3kPa 程度もの大きい毛細管圧力を発生し、蒸気の圧力でウィックがコンテナ壁に押し付けられることになる。そこで、ウィックの厚さに及ぼす毛細管圧力の影響を調査した。実験方法は文献 [13]を参照されたい。

実験結果を図 16 に示す。縦軸はウィック厚さが一層の厚さ δ_1 の層数 n 倍になる場合に 1、上下層の隙間が最小値の場合に 0 となるように無次元化した無次元ウィック厚さ Δ_n であり、 c/c_{min} に対応している。100 メッシュステンレス金網についての実験結果である。毛細管圧力が 1kPa 以上でウィック厚さは一定値になっており、 Δ_n は 0.3~0.6 になっている。したがって、熱輸送限界時の金網ウィックの上下層の隙間が、最小隙間 c_{min} の 0.3~0.6 となることを考慮して熱輸送限界を算出すれば、ヒートパイプの最適設計が可能となる。

6. おわりに

ヒートパイプは優れた伝熱素子として、電子機器の冷却、等に幅広く用いられてきた。しかし、ウィック形状が複雑であるため、特性を精度良く予測する手法が確立されておらず、熱輸送限界の予測は困難であった。

最近の電子機器の発熱量増大によって、ヒートパイプを最適設計することが必要となった。本研

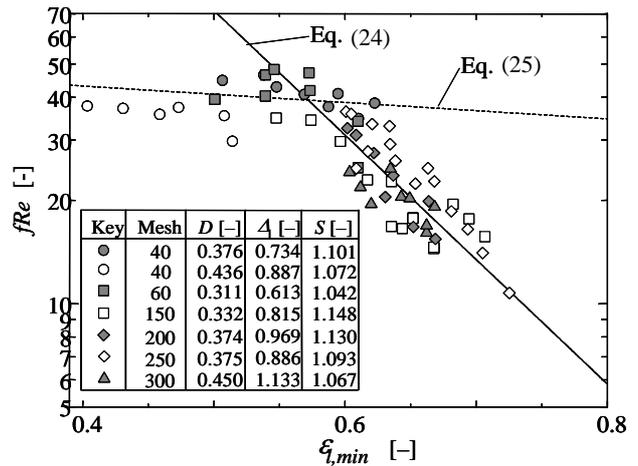


図 15 fRe に及ぼす最小局所有孔率の影響

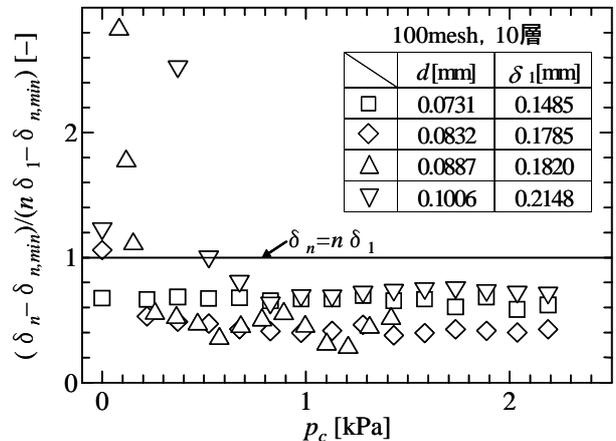


図 16 ウィック厚さに及ぼす毛細管圧力の影響

究では金網ウィックの特性を予測する手法を開発した。本研究成果を用いてヒートパイプを最適設計し、電子機器冷却の限界が少しでも改善できればと期待している。

参考文献

- [1]池田義雄, 伊藤謹司, 樋田昭, 「ユーザーのためのヒートパイプ応用」, 学献社 (1981) 9.
- [2]日本機械学会編, 「伝熱工学資料改訂第 4 版」, 丸善 (1997) 281.
- [3]Tien, C. L. and Sun, K. H., Int. J. Heat Mass Transfer, 14 (1971)1853.
- [4] 小佐井博章, 井村英昭, 池田勇二, 機論, 56-521B (1990)168.
- [5]野田英彦, 白石淳, 永渕慶秀, 宮武修, 化学工学論文集, 22-2 (1996) 270.

- [6]Noda, H. and Kumagai, M., Proc. 11th IHPC (1999)85.
- [7]Noda, H. Sasaki, et al., Theory, Applications and Prospects of HEAT PIPE TECHNOLOGY, (2001)309.
- [8]野田英彦, 永渕慶秀, 東田淳, 宮武修, 化工論, 22-4 (1996) 916.
- [9]Marcus, B. D., NASA CR-2018(1972)18.
- [10] 小佐井博章, 井村英昭, 池田勇二, 機論, 56-521B (1990) 161.
- [11]野田英彦, 吉岡啓介, 浜武俊朗, 機論, 57-542B (1991) 223.
- [12]野田英彦, 東田淳, 八戸工業大学紀要, 18 (1999)45.
- [13]野田英彦, 千坂博和, 赤坂実, 渡辺正幸, 化工 66 年会講演要旨集 (2001) A117
-

ヒートパイプ/ベーパーチャンバーによるPCの冷却技術

A Cooling Technology for PC by Heat Pipes and Vapor Chamber

望月 正孝 (株フジクラ)

Masataka MOCHIZUKI (Fujikura Ltd.)

1. はじめに

近年、高性能化するコンピュータの冷却の為にヒートパイプを組み込んだ冷却装置の開発と普及は著しく、ノートPC (パーソナルコンピュータ) の2004年度生産量の45百万台の90%に搭載されている。更に、年間1億台生産されているデスクトップPCにも普及を始めた。ヒートパイプは、液体の蒸発と凝縮を利用した閉ループの受動的伝熱素子であり、小さな温度差で大量の熱を輸送できる。ヒートパイプの内壁には、ウイックと呼ばれる毛細管ポンプ作用を生み出す構造が組み込まれている。ウイックは、ファイバ、メッシュ、焼結金属、軸方向グルーブ等があるが、最大熱輸送量、熱抵抗の他に、ノートブックPCでは大半のヒートパイプが曲げたり、つぶしたりされる場合が多いので、これらの点を考慮してヒートパイプを設計、選定する必要がある。

1995-1997年の間は、CPUの発熱量が10W以下と少なかった為、直径3mmのヒートパイプでも伝熱性能は十分であったが、最近ではCPUの発熱量の増加により、4mmのヒートパイプを3本使用したり、6mmや8mmのヒートパイプが利用され始めている。その冷却熱量は、ノートPCでは35W、デスクトップでは100Wを超えている。最近では、幅広のヒートパイプや平板型ヒートパイプ (ベーパーチャンバー) を使うことで、更なる冷却性能を向上したものが搭載されている。所詮ヒートパイプは受動的伝熱素子であるが、更なる性能向上が望まれる。冷却フィン、冷却ファン、伝熱シート等の部品を如何に旨く組み合わせてシステムの高性能化を目指している。最近、ポンプを使った水冷式冷却システムも実用されているが、コストと信頼性に課題が残り、ヒートパイプは空冷化延命の救世主であることに間違いはない。近年では、人工衛星の電子部品の冷却に使われているループヒートパイプやマイクロチャンネル等伝熱

の最新技術を電子機器に取り込もうという研究も進んでおり、コンピュータの進化にとって冷却技術開発は必要不可欠である。

2. ノートPCの冷却

2.1 ヒートパイプによるパッシブな冷却方式

図1に、CPUの熱をキーボード表面から周囲に放熱するシステムを示す。CPUの熱はヒートパイプによりアルミニウム等の放熱板に熱拡散され、キーボードを介して周囲に放熱される。熱抵抗 (吸熱ブロック-周囲温度) は、 $5\text{--}8^\circ\text{C}/\text{W}$ 程度であり、キーボードの大きさと許容温度の制限により10Wの放熱が限界である。一方、シャーシ低部から周囲に放熱することも可能であるが、熱 (対流) は上から下には伝えにくい為、7W程度が限界である。近年では、プラスチックの筐体に代わり、マグネシウムやチタンの軽量金属を採用し放熱対策を施しているものもある。[1]

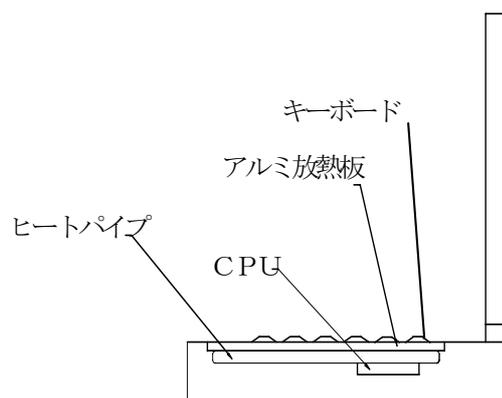


図1 キーボードより放熱するノートPCの構造

他のパッシブな冷却方式として、ヒンジヒートパイプ冷却方式がある。CPUの熱は、吸熱ブロックを介して#1のヒートパイプに伝わり、サーマルヒンジコネクタに伝熱される。ヒンジコネク

ターは、銅製の二つ割れ構造で2本のヒートパイプを熱的に結合する。#2のヒートパイプは、ヒンジコネクタからLCD（液晶パネル）の裏面に伝熱しアルミ放熱板より周囲に排熱する。#2のヒートパイプは、LCDの開閉に併せて回転する必要がある。

2.2 ヒートパイプによるアクティブな冷却方式

図2にヒートパイプ式RHE（Remote Heat Exchanger）を示す。CPUの熱は、銅ブロックを介してヒートパイプに伝わり、管体端部の放熱しやすい個所にまで伝熱され、ヒートシンクを介して周囲に放熱される。放熱効率を高めるために、ファンが取り付けられ、周囲より吸引された低音の空気により冷却し、そのまま排気する。管体内部の空気をファンが吸引すると、他の熱源で加熱された空気によりヒートシンクを冷却することになり、冷却効率が低減することがあるので、管体内部の空気の流れを併せて解析することが必要である。

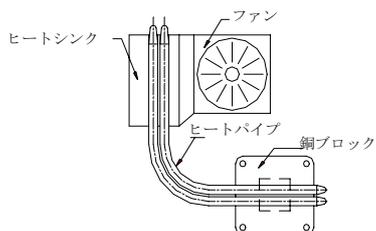


図2 ヒートパイプ式RHE

2.3 各種冷却方式の冷却能力

図3に、ヒートパイプ付アルミ放熱板、RHE、ヒンジヒートパイプの3種類の代表的冷却方式の熱抵抗を比較して示す。ヒンジヒートパイプは、熱抵抗 $4^{\circ}\text{C}/\text{W}$ が可能となる。RHEはアクティブ方式のため、更に熱抵抗は低下し、 $2^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 以下が実現できる。

最新のノートPCでは、CPUの発熱量は35Wに到達し、更にグラフィックチップやメモリーの発熱量も増加したため、トータルでは50W以上の冷却ソリューションが求められている。CPUと受熱ブロックの間には、伝熱シートやグリスが使われているが、この接触熱抵抗の低減も考慮すべきである。ヒートパイプの固有熱抵抗も最近では、十年前のヒートパイプに比べると1/2に低減

されている。図2に示すように、最近ではヒートパイプを2本使うか、もっと幅広のヒートパイプや平板型ヒートパイプ（ベーパーチャンバー）を使うデザインも現れた。いずれにしてもヒートパイプの高性能化は大きな課題である。ヒートパイプと受熱ブロック及びヒートシンクの結合も機械的カシメより、ハンダによる金属的接合にて、接触熱抵抗を低減することが可能である。最も大きな低減を必要とするパーツは、ヒートシンクと放熱ファンである。ヒートシンクとファンは、コンパクト化を避けて通れない。特にファンは、音響ノイズを30dB以下に抑えないとしない為、回転数を上げる事は困難となり、モータのスイッチングノイズや風切音の低減の為に、終わり無き開発が進められている。

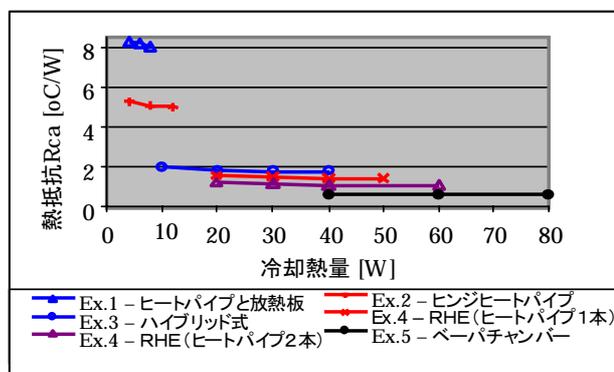


図3 各種冷却方式の比較

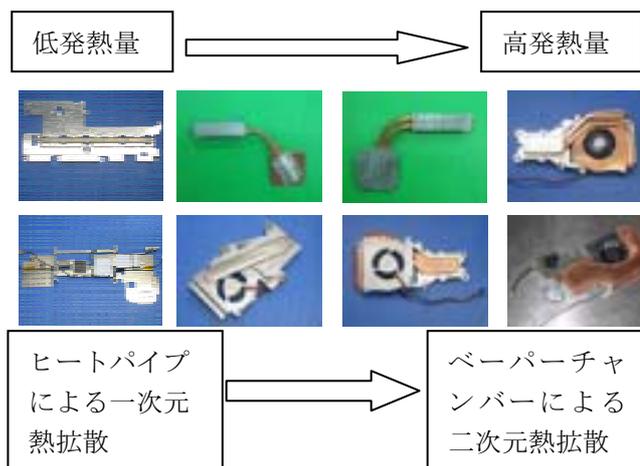


図4 冷却方式のトレンド

図4は、実際にノートPCに搭載されている冷却装置のここ数年の製品のトレンドを示す。発熱量の増大に伴い、複数本のヒートパイプ使用によ

る平面熱拡散に移行し、ベーパーチャンバーによる二次元熱拡散方式が開発された。

3. ベーパーチャンバー

新型熱拡散板として、平板状のヒートパイプである“ベーパーチャンバー”は開発され、これをヒートシンクに取り付けたCPU冷却システムが実用化された。ヒートシンクの冷却面はCPUの発熱面よりも大きく、これらに間にベーパーチャンバーを取り付けることにより、CPUからの発熱を広く拡散させ、ヒートシンクの冷却面へと伝えることができることから、効率の良い放熱が達成される。また、ベーパーチャンバーの厚さは5mm以下と薄く、銅やアルミ製の従来の熱拡散板よりも軽量であるという特長を有する。ベーパーチャンバーに関しては、従来のCPU冷却システムに対する優位性が既に実証されている。[2]



図5 ベーパーチャンバーヒートシンク

図5に、サーバーの80WクラスCPU冷却用に商品化されたベーパーチャンバーヒートシンクを示す。直径100-150 μ mの銅粒を厚さ0.3-0.5mm程度にベーパーチャンバーコンテナの内面に焼結させてウイックを形成する。ウイックの気孔率は50%以上の熱伝導性の良い多孔質体である。凝縮した液体をスムーズに蒸発部に還流するために、同様の多孔質体で構成されたウイックカラムが内部に配置されている。熱源とヒートシンクのフットプリントの面積比が大きくなればなるほど、ベーパーチャンバーの有用性は高まる。今後益々CPUの発熱量は増大するのに対して、ダイのサイズは大きくならないので、ベーパーチャンバーの活用は益々進むと考えられる。

4. デスクトップ用ヒートシンク

デスクトップCPUの冷却には、従来アルミ押出型ヒートシンクと軸流ファンの組み合わせが使われてきたが、要求熱抵抗の低下に伴いヒートパイプヒートシンクが実用化され始めた。冷却フィンのフィン効率を高めるためCPU近傍の熱をヒートパイプが奪い、フィンに伝熱する。図6の例では、130Wもの熱を4本のL字型ヒートパイプにてフィンに伝熱している。ヒートシンクの熱抵抗レベルは、0.2°C/Wをきるものが実現している。



図6 ヒートパイプヒートシンク

5. まとめ

CPUの高発熱化は益々進むと予測され、ヒートパイプとベーパーチャンバーは、空冷延命の為の救世主である。今後は、兄弟分のLHP、CPLの実用が期待される。しかしながら常にコストと信頼性に対して強い意識を保持しなくてはならない。

参考文献

- [1] Masataka Mochizuki et al., Practical Application of Heat Pipe and Vapor Chamber for Cooling High Performance Personal Computer, 13th IHPC, (2004)
- [2] Yasushi Koito et al., Numerical Analysis on Thermal Transport Phenomena in Plate-Type Heat Pipes, Proceedings of the 10th APCChE Congress, 3I-06, CD-ROM, 10 pages (2004) (APCChE.pdf)

自励振動ヒートパイプの熱輸送特性に関するレビュー Review of Pulsating Heat Pipes

長崎 孝夫 (東京工業大学)

Takao NAGASAKI (Tokyo Institute of Technology)

1. はじめに

電子素子冷却など発熱部から放熱部へ熱を輸送するデバイスとして、ウィック式・グループ式ヒートパイプ (以下“通常ヒートパイプ”または“通常HP”と呼ぶ)、二相熱サイホン (広義にはヒートパイプ),あるいはキャピラリーポンプルーブがよく用いられる. これらは蒸発潜熱を用いることにより小さな温度差で大量の熱を輸送するものであるが, それぞれの方式に固有の熱輸送限界があり, その性能向上が求められている. その他, 流路内の液を往復振動させることにより液単相で高性能熱輸送を実現するドリームパイプおよびその改良型である COSMOS ヒートパイプ[1]も注目されるが機械的な加振機構を要することが実用の妨げとなっている.

以上の各種方法に対し, 比較的新しい方式であり, その作動原理および性能がいまだ十分明らかになっていないものとして自励振動ヒートパイプが注目される. これは 1990 年頃, 赤地氏により考案されたものであり[2,3], 図 1 に示すように加熱部と冷却部の間に 1 本の細い流路を何回も往復させる. この流路を真空中に排気して蒸発液体を流路体積の半分程度封入すると, 表面張力効果により液スラグと蒸気プラグが形成され, 加熱量の増加に伴い液スラグの振動が自励的に発生し, 加熱部から冷却部へ熱を輸送する. この流路の両端を封止した場合を非ループ型, 両端を連結した場合をループ型と呼ぶ. ループ型では振動流に加え, 条件によっては 1 方向の循環流も生じることが知られている. さらにループ型の場合の直管部に逆止弁を取付けることにより性能が向上する. 本稿ではこの自励振動 HP についてこれまで報告されている研究および知見の概要を述べる.

2. 実験研究

最も基本的な形態として銅細管を用いた実験に

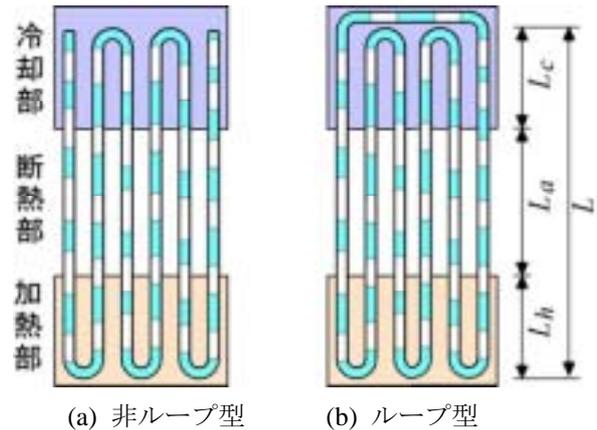


図 1 自励振動ヒートパイプの模式図

ついてこれまで報告されている結果の例を表 1 に示す. ここで示した以外にも有用な実験結果が多数報告されていることは予めお断りしておく. 以下では表 1 に基づき種々の因子の影響について述べる.

2.1 設置角度およびターン数の影響

文献[4]ではターン数 N が比較的多い 40 の場合について, 管径, 設置角度($-90^\circ \sim 90^\circ$)の影響が調べられている. 管内径が 2mm の場合にはボトムヒート, 水平, トップヒートの全モードで作動するが, この順番で熱輸送性能が低下する. トップヒートでの特性について, 作動温度が低い時 (断熱部温度 $T_a=45^\circ\text{C}$) にはある熱輸送量以上でないと作動しないのに対し, 作動温度が高い時 ($T_a=90^\circ\text{C}$) には低い熱輸送量でも作動することが示されている. なお管内径が 1.6mm の場合, $\theta < 0$ では作動しない. 文献[5]では管内径が 1mm, 2mm, $L_h=L_a=L_c=100\text{mm}, 150\text{mm}$, ターン数が 5 から 23 までの 6 種類, 設置角度が 0° から 90° , 作動媒体を水・エタノール・R123 とした実験が行われている. その結果, 水平モードで作動する目安をターン数 16 以上としている. またこれらの実

表1 銅管を用いた実験結果の例

| 文献 | 内径 [mm], 形式 | ター ン数 N | 各部長さ L_h, L_a, L_c [mm] | 作動媒体 (封入率 α) | 設置 角度 θ [deg] | 熱輸送特性の例 (概略値) λ_{eff} [kW/(m·K)], R_{th} [K/W], Q [W] |
|------------|---------------------|-----------------|---------------------------------|-------------------------|--|---|
| [4] | 2.0 | 40 | 180, 220, 200 | R142b (0.4) | 90 | $\lambda_{eff} \cong 40 \sim 50$ for $Q = 200 \sim 600$ ($T_a = 45^\circ\text{C}$) $R_{th} \cong 0.017 \sim 0.024$ for $Q = 100 \sim 1000$ ($T_a = 90^\circ\text{C}$) ($R_{th,1} \cong 1.4 \sim 1.9$ for $Q_1 \cong 1.3 \sim 13$) |
| | | | | | 0 | $\lambda_{eff} \cong 30 \sim 40$ for $Q = 100 \sim 600$ ($T_a = 45^\circ\text{C}$) |
| | | | | | -90 | $\lambda_{eff} \cong 10$ for $Q = 300 \sim 600$ ($T_a = 45^\circ\text{C}$) |
| | 1.6 | ↑ | ↑ | ↑ | 90 | $\lambda_{eff} \cong 80 \sim 110$ for $Q = 100 \sim 300$ ($T_a = 45^\circ\text{C}$) $R_{th} \cong 0.022$ for $Q_{max} \cong 350$ ($T_a = 90^\circ\text{C}$) ($R_{th,1} \cong 1.8$ for $Q_{max,1} \cong 4.4$) |
| | | | | | 0 | $\lambda_{eff} \cong 60 \sim 70$ for $Q = 100 \sim 300$ ($T_a = 45^\circ\text{C}$) |
| | | | | | $\theta < 0$ | 作動せず |
| 1.0 | ↑ | ↑ | ↑ | 90 | $R_{th} \cong 0.02$ for $Q_{max} \cong 300$ ($T_a = 90^\circ\text{C}$) ($R_{th,1} \cong 1.6$ for $Q_{max,1} \cong 3.8$) | |
| [5] [6] | 2.0 | 16 | 100, 100, 100 | 水 | 90 | $Q_{max} \cong 660$ ($Q_{max,1} \cong 21$) |
| | | | | R123 | ↑ | $Q_{max} \cong 620$ ($Q_{max,1} \cong 19$) |
| | | | | エタノール | ↑ | $Q_{max} \cong 530$ ($Q_{max,1} \cong 17$) |
| | 1.0 | ↑ | ↑ | 水 | ↑ | $Q_{max} \cong 60$ ($Q_{max,1} \cong 1.9$) |
| | | | | R123 | ↑ | $Q_{max} \cong 130$ ($Q_{max,1} \cong 4.1$) |
| | | | | エタノール | ↑ | $Q_{max} \cong 120$ ($Q_{max,1} \cong 3.8$) |
| [7] | 2.0 非ルー プ型 | 4 | 50, 260, 50 | 水 (0.5) | 90, 0, -90 | $\lambda_{eff} \cong 11$ for $Q = 200$ (θ にほとんど依存せず) $\lambda_{eff} \cong 16$ for $Q_{max} \approx 300$ ($\theta = 0$) ($R_{th,1} \approx 3.2$ for $Q_1 = 31$, $\theta = 0$) ^(注1) |
| [8] | 2.0 逆止弁付 | 14 | 50, 500, 50 | R134a (0.5) | 0 | $R_{th} \cong 0.05$ ($R_{th,1} \cong 1.4$) ※ 逆止弁なしでは $\theta=0$ で作動せず |
| [9] | 2.4 断熱部は ガラス管 | 2 | 55, 286, 55 | 水 (0.5) | 90 | $Q \cong 140$ for $\Delta T \cong 50\text{K}$ ($R_{th,1} \cong 1.4$, $Q_1 \cong 35$) |
| | | | | R141b (0.6) | 90 | $Q \cong 70$ for $\Delta T \cong 50\text{K}$ ($R_{th,1} \cong 2.9$, $Q_1 \cong 18$) |
| | | | | | 3 | $Q \cong 40$ for $\Delta T \cong 40\text{K}$ ($R_{th,1} \cong 4$, $Q_1 \cong 10$) |
| | | | | | 0 | 作動せず |
| [10] | 1.2 | 2 | 50, 285, 50 | 水 (0.6) | 90 | $Q \cong 150$ for $\Delta T \cong 240\text{K}$ ($R_{th,1} \cong 6.4$, $Q_1 \cong 38$) |
| | | | | エタノール (0.6) | ↑ | $Q \cong 130$ for $\Delta T \cong 220\text{K}$ ($R_{th,1} \cong 6.8$, $Q_1 \cong 33$) |
| | | | | R141b (0.7) | ↑ | $Q_{max} \cong 56$ for $\Delta T \cong 130\text{K}$ ($R_{th,1} \cong 9.3$, $Q_{max,1} \cong 14$) |
| [11] | 0.5 | 12 | 15, 17, 18 | R141b (0.5) | 90, -90 | $Q^* \cong 85$ for $\Delta T = 70\text{K}$ ($R_{th,1}^* \cong 20$, $Q_1^* \cong 3.5$) |

- ・形式：特に記載のないものはループ型
- ・ L_h ：加熱部長さ， L_a ：断熱部長さ， L_c ：冷却部長さ
- ・設置角度 $\theta=90$ ：鉛直ボトムヒート， $\theta=0$ ：水平， $\theta=-90$ ：鉛直トップヒート
- ・ R_{th} ：熱抵抗， λ_{eff} ：実効熱伝導率， Q_{max} ：最大熱輸送量， ΔT ：ヒートパイプの温度差， T_a ：断熱部温度
- ・ Q_1 ：断熱部直管1本あたりの熱輸送量 ($=Q/(2N)$)， $R_{th,1}$ ：断熱部直管1本あたりの熱抵抗 ($=\Delta T/Q_1$)
- ・*：銅管の熱伝導による熱輸送を差し引いた値 (文献中で明記されているもの)
- ・(注1)：文献記載の温度データに基づく筆者の概算値

験データに基づき熱輸送量に関する無次元相関式を提案している[6]. 以上のように管径が小さいほど、ターン数が少ないほど、また熱輸送距離が長いほどボトムヒート以外では作動しにくくなるのが一般的傾向である. ただし文献[7]では $N=4$ という少ないターン数でも設置角度にほとんど依存しない熱輸送性能が得られている (作動媒体は水, 冷却水温 20°C , $Q=250\text{W}$ 時の加熱部付近壁温約 120°C). また逆止弁を取付けた文献[8]では比較的少ないターン数で水平モードの長距離熱輸送が可能となっている. さらに文献[11]のように内径 0.5mm という極細管でも長さが短い場合にはボトムヒートとトップヒートでほぼ同一の性能が得られている.

2.2 熱輸送性能

実際的な関心事は従来型 HP と自励振動 HP の性能比較 (熱抵抗および最大熱輸送量) であろう. 表 1 中の内径 2mm の実験における銅管外径は 3mm であることから, 外径 3mm の通常ヒートパイプの性能を取り上げると, $L_h = L_a = L_c = 100\text{mm}$ の場合にボトムヒートで熱抵抗 $R_{th} = 0.67 \text{ K/W}$, 最大熱輸送量 $Q_{max} = 25\text{W}$, 水平で $R_{th} = 0.8 \text{ K/W}$, $Q_{max} = 12\text{W}$, トップヒートで $R_{th} = 1.27 \text{ K/W}$, $Q_{max} = 4\text{W}$ との例がある. 表 1 中の内径 2mm のデータについて, 文献[5]では上述の通常 HP とほぼ同じ $Q_{max,1}$ (添字 1 は直管部 1 本あたりを意味する) となっている. 文献[7]の $\theta = 0$ では $Q_{max,1}$ は通常 HP よりかなり大きい (通常 HP の最大熱輸送量は有効長さに反比例することにも注意). また表 1 には示していないが, 文献[17]で内径 $0.9 \sim 1.5\text{mm}$ ($N=4$, ボトムヒート) の場合について熱輸送限界が詳細に調べられ, ウィック式 HP に比べ最大熱輸送量が大きいことが示されている. 次に熱抵抗について見ると, 文献[4][7][8]の $R_{th,1}$ は上述の通常 HP よりも大きい. ただしこれらの熱輸送距離は例に挙げた通常 HP より長く, 実効熱伝導率では通常 HP と同程度の場合もある. さらに表 1 の文献[4]に見られるように管内径が減少すると実効熱伝導率は増加する傾向にある[9][17]. このこととウィックなどの内部構造が不要なことを考え合わせると, 自励振動 HP は細径化に適していると思われる. なお管内径 D について, 表面張力効果により蒸気プラグが形成されるためには $D\sqrt{(\rho_l - \rho_v)g/\sigma}$ が約 2 以下の必要がある[6].

作動流体に関しては冷媒系と水が代表的であり, 冷媒系は水に比べ蒸気圧が高く液粘性が小さい特徴がある. 表 1 には示していないが文献[9]の内径 0.8mm の場合には R141b では作動するが水およびエタノールでは作動しないこと, また文献[11] (内径 0.5mm) では, R141b の場合には温度差 ΔT が 10°C 程度でも熱輸送が生じるのに対し, 水の場合には ΔT が 80°C 程度以上でないと熱輸送が生じないことが示されており, 水に比べ冷媒系の方が自励振動を発生しやすいことが分かる. その他の特徴として自励振動 HP は通常 HP に比べ不凝縮ガスの影響を受けにくいことが示されており[9], 実用上有利であろう.

2.3 可視化

ガラス管流路を用いた可視化はこれまでかなり多く行われている. その中の文献[9]ではボトムヒートにおいて温度差が小さい場合の振動流, 温度差が増加した場合の脈動循環流における液スラグと蒸気プラグの時間変化の様子が明瞭に示され, 脈動循環流の発生機構を蒸発・凝縮との関連で説明している. さらに主蒸気プラグの長さ変化から潜熱輸送量を見積もり, 振動液柱による顕熱輸送の貢献が大きいことを示唆している.

また水平モードについて, 矩形溝流路 (25 ターン) を設けた銅板を透明板で覆い可視化を行った結果が報告されている[12]. それによれば蒸気と液はそれぞれ加熱部側と冷却部側に明瞭に分離して存在する. そして冷却部側の各 U 字状液柱が振動し, この振動が波のように伝播および発生・成長・減衰を繰り返す. このような挙動は文献[13]でも観察されており, 冷却部が鉛直上方に位置するボトムヒートの場合とは異なる流動挙動と考えられる.

その他, 陽子線ラジオグラフィ法を用い, アルミ平板 ($190 \times 50 \times 1.3\text{mm}$) 内の矩形断面蛇行流路における相分布と振動の様子を可視化した結果も報告されている[14][15].

2.4 性能向上の試み

自励振動 HP の性能向上の試みとして, ウィックまたは溝付き流路を用いた実験も行われている. 文献[16]では加熱部側半分を内面溝付き銅管, 冷却部側半分を平滑銅管 (内径 2mm , 6 ターン) とし, ボトムヒートでは実効熱伝導率が最大約 2 倍増加, 水平モードでは平滑管の場合と大きな差異

がないことを示している。またガラス管流路の一部にメッシュ状ワイヤウィックを挿入することにより最大熱輸送量が増加することを示している。文献[17]では内径 0.9mm の銅管（ターン数 2，ボトムヒート）の場合について平滑管と溝付き管の比較を行い，溝付き管は熱抵抗が増加するが最大熱輸送量は増加することが示されている。また文献[18]では平板型自励振動 HP の溝流路表面を焼結多孔構造とした場合（Combined Pulsating and Capillary Transport と称している）の実験結果が示され，同一寸法の銅ブロックの約 1/6 の熱抵抗となることが示されている。その他，文献[13]ではアルミ板に設けた矩形溝流路の溝幅を交互に変化させることにより振動が生じやすくなり，4 ターン流路での水平モード作動が可能になることを示している。

3. 数値解析研究

自励振動 HP の数値シミュレーションについて Faghri らが一連の研究を行っている[19]。この解析では液柱内の流れ方向温度分布の非定常変化を数値的に解き，その際の液と壁面間の熱伝達係数および壁面摩擦はモデル化と解析解および経験式により与える。液柱先端におけるメニスカス蒸発・凝縮については精緻なモデルが導入されている。このようなモデル化により蒸気プラグの状態変化と液柱の速度・温度変化を時間的に解き進める。以上の方法を用いて断熱部のない等温加熱壁と等温冷却壁から成るターン数 2（液注 2 つ）の計算が行われ，定常的な振動状態を得るとともに顕熱輸送が全体の 95% 程度を占めることなどが示されている。文献[20]でも類似の手法による解析が行われているが，液柱先端における蒸発・凝縮量の評価は総括熱伝達率を与えることで簡略化している。この計算では実験結果との比較が行われ，計算された熱輸送量は実験結果に比べかなり小さいが一定の修正係数を乗じることで異なる条件の熱輸送量を統一的に予測できるという結果が示されている。また筆者は液柱内の軸対称 2 次元温度場の時間変化を厳密に解くとともに断熱部管壁温度の時間変化も液体との伝熱を考慮して解く数値解析を行い，実験観察と類似した液柱振動の計算結果を得ている[21]。なお以上の解析では蒸発・凝縮を液柱先端における表面蒸発・凝縮として扱

っている。この仮定は前述の文献[12]の可視化で述べたような流動形態の場合には概ね妥当と考えられるが，文献[9][14][15]の可視化に示されるように液スラグ内での核沸騰が重要と考えられる場合も多い。自励振動 HP の解析において微細流路（いわゆるミニチャンネル）内の相変化現象の把握が最も重要である。

4. おわりに

以上のように自励振動 HP について現在も活発に研究が行われ，次第にその特性が明確になりつつある。しかしながら，加熱部長さ，断熱部長さ，冷却部長さ，流路径，ターン数，設置角度，作動媒体の物性値および管壁材料との組合せ（濡れ性），ループ型と非ループ型の相違，細管型と平板型の相違（円形断面と矩形断面の相違，および隣接する流路間の壁による熱的干渉の有無），さらにターン部の曲げ半径など影響因子が非常に多く，汎用性のある設計手法はいまだ構築されていない。実効熱伝導率，温度差などの定義が統一されていないことも異なる研究者の結果を総合する上で障害であり，性能評価方法の標準化が必要にも思われる。また解析手法の発展も現在緒に就いた段階であり，自励振動 HP の作動原理解明とその性能予測手法確立について今後の研究に期待する部分は多い。

参考文献

- [1] 西尾茂文，日本機械学会熱工学コンファレンス講演論文集 (2004) 95.
- [2] Akachi, H., *U.S. Patent* 4,921,041 (1990).
- [3] 赤地久輝，日本機械学会 P-SC295「マイクロチャンネル内の流動と熱伝達」研究分科会成果報告書 (2001) 129.
- [4] 魏啓陽，和泉智水，前沢三郎，赤地久輝，第 35 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，II (1998) 519.
- [5] Charoensawan, P., Khandekar. S., Groll, M. and Terdtoon, P., *Applied Thermal Eng.*, **23** (2003) 2009.
- [6] Khandekar. S., Charoensawan, P., Groll, M. and Terdtoon, P., *Applied Thermal Eng.*, **23** (2003) 2021.
- [7] 鈴木敦，日本機械学会論文集 B 編，**69-678** (2003) 430.

- [8] 宮崎芳郎, 赤地久輝, 第 38 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, **III** (2001) 735.
- [9] 西尾茂文, 永田真一, 馬場史郎, 日本機械学会論文集 **B** 編, **68-671** (2002) 2086.
- [10] 永田真一, 汪双鳳, 許建偉, 西尾茂文, 第 41 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, **I** (2004) 333.
- [11] 西尾茂文, 永田真一, 白樫了, 第 40 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, **I** (2003) 319.
- [12] 宮崎芳郎, 日本機械学会 2001 年度年次大会講演論文集, **VII** (2001) 426.
- [13] 北島仁, 長崎孝夫, 伊藤優, 第 39 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, **I** (2002) 147.
- [14] 高橋修, 河原全作, 芹澤昭示, 河野益近, 赤地久輝, 第 34 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, **I** (1997) 255.
- [15] 高橋修, 河原全作, 芹澤昭示, 河野益近, 柿木俊平, 赤地久輝, 第 35 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, **II** (1998) 529.
- [16] 若杉秀明, 井上剛良, 日本機械学会熱工学コンファレンス講演論文集 (2004) 357.
- [17] 西尾茂文, 多田良佳弘, 永田真一, 館野友一, 第 40 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, **I** (2003) 321.
- [18] Zuo, Z.J., North, M.T. and Ray, L., *ASME HTD* Vol.**364** (1999) 237.
- [19] Shafii, M.B., Faghri, A. and Zhang, Y., *Int. J. Num. Method for heat and fluid flows*, **12** (2002) 585.
- [20] Sakulchangsattajai, P., et al., *Applied Thermal Eng.*, **24** (2004) 995.
- [21] 長崎孝夫, 伊藤優, 石川智隆, 第 42 回日本伝熱シンポジウム (2005) 発表予定 (C221)
-

ペルチェモジュールの実用 Practical Use of Peltier Modules

福田 克史 (小松エレクトロニクス株)
Katsushi FUKUDA (Komatsu Electronics Inc.)

1. はじめに

1954年に素子材料としてBi-Te系が適していることが発見されると、多くの研究者や企業がペルチェモジュールの実用化研究・開発に取り組み、室内空調や冷蔵庫の試作もおこなわれた。しかしながらコンプレッサ式冷凍器に比べて冷却能力が劣っているため、当時の期待ほど用途が拡大しなかった。ただしペルチェモジュールはコンプレッサにない多くの利点があるため、これらの特徴を生かした応用商品や用途がある。本稿ではペルチェ冷却の原理とその特徴を生かした実施例を紹介する。

2. ペルチェ冷却とは

2.2 ペルチェ効果

図1のように、2種類のA,B物質をつなぎ合わせて、両端から電流を流すと、物質の接点で電流値に比例した吸・発熱が生じる。

$$Q = \pi I \quad (1)$$

発見者にちなみ、この効果をペルチェ効果と呼ぶ。係数 π はペルチェ係数である。接合している各々の物質の熱起電能をあらわすゼーベック係数と α_A , α_B と接点の絶対温度を用いると次式で表記できる。

$$Q = \pi I = (\alpha_A - \alpha_B) T I \quad (2)$$

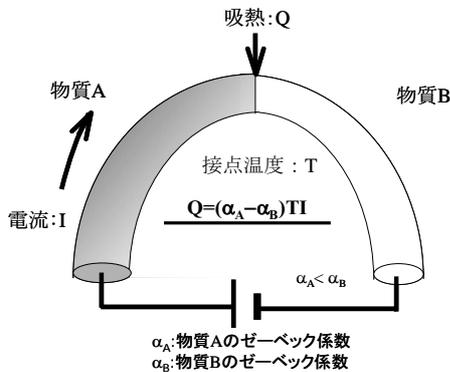


図1. ペルチェ効果

直流電源・電池の極性を反転し電流がBからAへ流れると接点で発熱が生じる。このときの発熱量も同じ式で表されるが電流の向きが異なるため符号が負となる。

2.1 ペルチェモジュール

ペルチェモジュールではゼーベック係数が正のP型素子と負であるN型素子で対を構成している。一般的な構造はP型とN型の半導体素子に素子を連結する接合電極、電力を供給するためのリード線、絶縁及び熱流のインターフェースのためのセラミック板で構成されている。

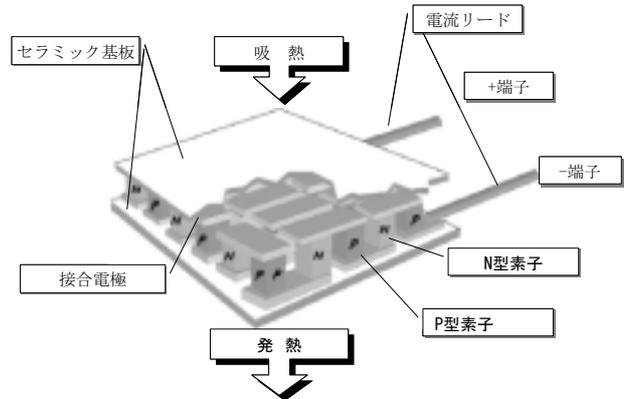


図2. ペルチェモジュールの構造

電流を流すことにより半導体素子内で電気を運ぶ担い手(キャリア)であるホールと電子が熱を運びヒートポンプとして機能する。その結果モジュールの冷却面から発熱面に連続的に熱がポンプされるため、素子をはさんだ冷却面と発熱面に温度差が生じる。発熱面からフィン・ファンなどでの放熱することで冷却面の温度を-40度以下にすることが可能である。電流の極性反転で熱流も反転するので加熱も可能でありさらに印加電流の調整により精密な温度制御も容易に行える。

2.3 ペルチェ冷却

図3は1対のPN素子からなるペルチェ冷却の概念図である。PN素子は金属電極で電氣的に接合している。またその反対側にも同じく金属電極が接合している。

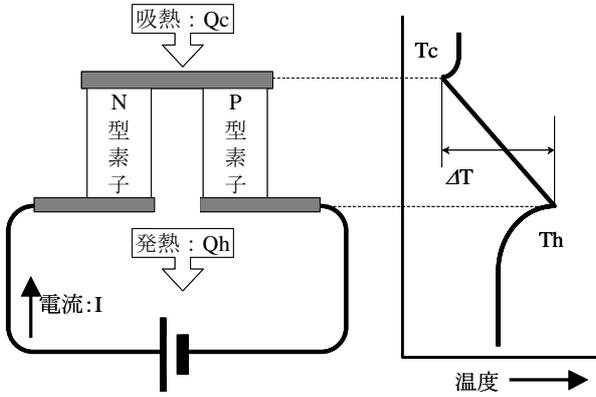


図3. ペルチェ冷却概念図

N型素子側から電流Iを流すと、上部の接合部では式(3)の吸熱、下部では式(4)の発熱が生じる。

$$Q_c = \alpha T_c I - \frac{1}{2} R I^2 - K \Delta T \quad (3)$$

$$Q_h = \alpha T_h I + \frac{1}{2} R I^2 - K \Delta T \quad (4)$$

(3)式の右辺第1項はペルチェ吸熱をしめしており、(4)式の右辺第1項は(3)式とは逆にペルチェ発熱をしめしている。T_cは上部接合部、T_hは下部接合部の絶対温度であり、αは

$$\alpha = (\alpha_p - \alpha_n) \quad (5)$$

である。ここでα_pはP型素子のゼーベック係数、α_nはN型素子のゼーベック係数である。

両式の第2項、第3項はペルチェ効果以外の熱流効果をしめしている。第2項はPN素子の抵抗の和：Rによるジュール発熱流が上部接合部、下部接合部に等分されたジュール項である。第3項は上下接合部間の熱伝導項でPN素子の熱コンダクタンスKに上下接合部の温度差

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (6)$$

を乗じた熱伝導をしめしている。

吸熱量Q_cは電流値Iの2次関数となり、特定の電流値で最大値をとり、それ以上の電流を通電すると吸熱量は減少しさらに電流を増加させると発熱に転じる。

また式(4)の右辺第1項をΔTとQ_cを使って変形すると、

$$Q_h = Q_c + (\alpha \Delta T + R I) \times I \quad (7)$$

となる。この式の右辺第2項の括弧内はゼーベック起電力と抵抗による電圧降下の和で、PN対に通電した際のPN間で生じる電圧になることから、第2項は外部から与えた単位時間あたりの電力となり、発熱部からは吸熱した熱量Q_cと外部から与えた電力にあたる熱が放出されることがわかる。

複数のPN素子対を直列にすると吸熱量は対数に比例して増加する。また素子の長さ：Lと断面積Aの比を変更するとPN素子の抵抗値Rが変わり、吸熱量を大きくできる。このようにして吸熱負荷の大きさや印加電源の条件に合わせてモジュール最適化は素子の寸法、対数で調整する。

2.4 最大温度差と性能指数

ペルチェモジュールの冷却温調温度域は、モジュールの最大温度差：T_{max}で規定される。

モジュールの最大温度差は(8)式で与えられる。

$$\Delta T_{\max} = \frac{1}{2} \frac{\alpha^2}{R \cdot K} T_c^2 \quad (8)$$

PN素子の寸法は断面積A長さLで等しいものとし、PN素子の比抵抗の和を

$$\rho = \rho_p + \rho_n \quad (9)$$

PN素子の熱伝導度の和を

$$\kappa = \kappa_p + \kappa_n \quad (10)$$

と定義すると(8)式中のRとKに含まれる寸法因子は打ち消しあってキャンセルされて、最大温度差はPN素子材料の物性値のみに依存し

$$\Delta T_{\max} = \frac{1}{2} \frac{\alpha^2}{\rho \cdot \kappa} T_c^2 \quad (11)$$

となる。

(11)式中のゼーベック定数、比抵抗、熱伝導度の物性値部分をPN素子の物性値の和でなく、素子材料単独の物性値で

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho \cdot \kappa} \quad (12)$$

とあらわした際のZ値を素子材料の単体の性能指数として定義されている。性能指数の単位は(1/K)であり、性能指数に温度Tを乗じた無次元性能指

数 ZT もよく使われる。(11) 式で示したように性能指数が大きい PN 素子を用いたモジュールはその最大温度差も大きくなる。最大温度差と同様に冷却効率も性能指数 Z に依存する。性能指数はペルチェモジュールの性能と冷却素子材料の物性を関連づける重要なパラメータであり、モジュールの最大温度差は素子数、素子寸法に依存せず、素子の材料物性のみに依存する。

3. ペルチェ冷却の実用

3.1 ペルチェ冷却の特徴

現状のペルチェ冷却は前述したように、コンプレッサ式冷凍器と比較し冷却能力が劣っており広く普及していないが、その特徴はコンプレッサにない多くの利点がある。①構造が簡単であるため小型軽量である。②可動部分がなく振動騒音がない。③電流値の制御により吸熱をコントロールできるために精度・応答性に優れている。④電流の方向を変えれば加熱にも使用可能であり、室温近傍での温度制御に利用しやすい。⑤保守が簡単である。⑥超小型が可能であり場所をとらないことが上げられる。

表 1. コンプレッサとペルチェ冷却の比較

| コンプレッサ | ペルチェ | ペルチェ冷却の特徴 |
|--------|-------|---|
| 圧縮機 | モジュール | ○振動、騒音ない ○摩擦がなく高信頼 ○小型、軽量、形状自由局部冷却に適する |
| モータ | 直流電流 | |
| 膨張弁蒸発器 | 低温接合部 | ○電流極性切替で冷却・加温が可 加温効率は 100% を上回る |
| 凝縮器 | 高温接合部 | ○電流の比例制御で高精度温度制御が容易 ○室温付近の温度領域の連続的な高精度温度制御が容易 ○温度応答性がよい |
| 配管 | 電気配線 | ○ガス漏れがなく高信頼性 ○無重力下でも作動 |
| 冷媒 | キャリア | ○環境破壊ガスなし |

3.2 応用分野

民生分野では静穏性、小型軽量という点で、ホ

テルや病院用の冷蔵庫、レジャー用クーラボックス、海外ではミネラルウォーターのサーバ冷却に利用されている。一方産業分野には主に精密な温度制御ができることから半導体プロセス機器の温度制御装置、除湿器、デバイスの温調では赤外線センサーの冷却にも利用されており、人工衛星などに搭載されて宇宙で使用されている。光通信で使用されるレーザダイオードの波長制御にはサーモモジュールは欠く事のできないデバイスである。また遺伝子工学の分野においても特定の DNA を複製増加するための遺伝子増幅装置（サーマルサイクラー）などに利用されている。

表 2. ペルチェ冷却の用途

| 分野 | 用途 | 吸熱能力(W) |
|-------------|------------|-----------|
| オプトエレクトロニクス | 光通信 LD 温調 | 0.7~10 |
| | CCD 冷却 | 0.5~5 |
| | 赤外線検出器冷却 | 0.5~5 |
| 半導体製造装置 | 洗浄装置薬液温調 | 1000~2000 |
| | レジスト塗布工程温調 | 200~500 |
| | 露光装置の温調 | 500~1000 |
| パソコン | CPU 冷却 | 50~200 |
| 民生 | 小型冷蔵庫 | 100~200 |
| | クーラボックス | 50~100 |
| | ウォーター-チラー | 50~100 |
| 自動車 | シートクーラー | 100~200 |
| | 車載クーラー | 50~1000 |
| バイオ | DNA 増幅器 | 100~200 |
| | 分光光度計 | 100~200 |
| 理化学 | チラー | 100~1000 |
| | インキュベータ | 100~200 |
| | 除湿機 | 50~300 |

3.3 ペルチェモジュールの使用方法

詳しい使用方法についてはモジュールメーカーのカatalog など参照していただきたいが、モジュールメーカーでは通常図 4 に示すようなモジュールの特性図を用意している。

この特性図ではモジュールの冷却側（あるいは発熱側）の温度を一定にした際に、右肩ががりの斜線で示されるモジュール電流値に対して、得られる温度差と吸熱量を特製図の左軸および横軸で示している。吸熱量について前述したようにモジ

ジュールの素子寸法および対数によって変わるため、電源の使用に応じて適切なモジュール型式、数量を選ぶことになる。ちなみに本図右軸はモジュール電圧をしめしており、右肩あがりの斜線でしめしたモジュール電流値とモジュール温度差が決定すれば電圧がもとまる。

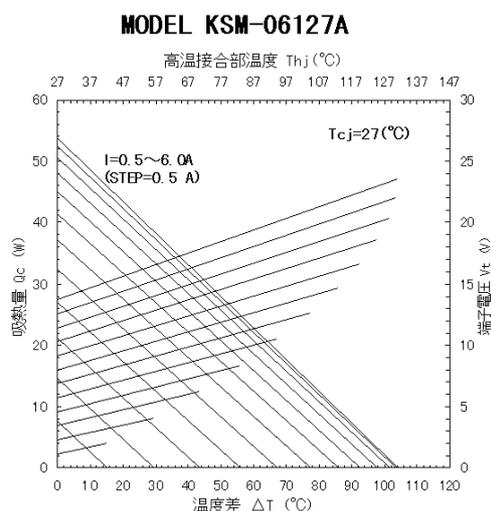


図 4. ペルチェモジュール特性図

実用上では冷却対象物とペルチェモジュール、および熱交換器とペルチェモジュール間に熱抵抗があるため、冷却対象物や環境温度とペルチェモジュールの冷却面温度、発熱面温度は大きくことなるので注意が必要である。ペルチェメーカーでは熱抵抗を考慮したシミュレータや特性図を用意しているのでそれを利用する。また簡易的に熱抵抗の効果を見積る方法[1]もある。

4. ペルチェ冷却の今後

光通信で使用するレーザダイオードパッケージでは、レーザダイオードの発熱密度がCPU並みかそれ以上であり、且つパッケージが小型でパッケージから放熱も困難であるために、高性能なペルチェモジュールが要求される。

1990年から2000年にかけて光部品の市場が急拡大し、日本のペルチェメーカーを中心にペルチェ素子材料の改良が進められた。光通信向けのペルチェの性能はまだまだコンプレッサには及ばないもの、大きく向上した(図6参照)。

今後このような高性能モジュールが、新たな用途を拡大するのではと思われる。一方過去15年程の

間に、中国で多くのモジュールメーカーが設立されモジュール価格が非常に安価になった。信頼性・性能の面で劣悪のものもあるようではあるが、クーラボックスなど民生市場が拡大している。

本稿では紹介しなかったが、ペルチェ効果の逆原理であるゼーベック効果(温度差で起電力が発生する)を利用した熱電発電も近年注目されており、冷却および発電向けの新材料(熱電材料)の研究も活発化しており、今後の展開が注目されている。

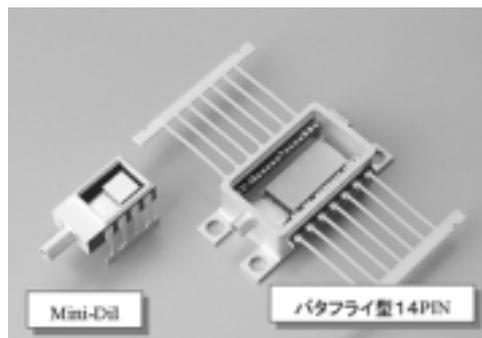


図 5. レーザダイオードパッケージ

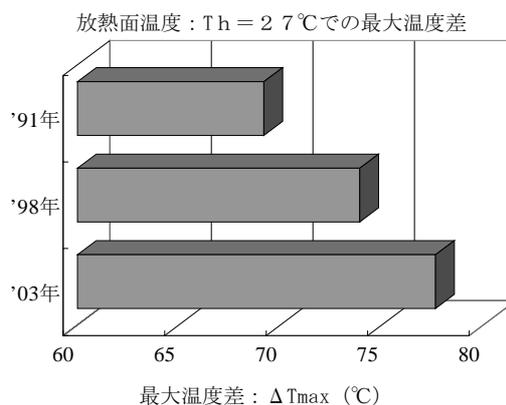


図 6. 最大温度差の向上

(小松エレクトロニクス)

5. 終わりに

2004年に国内の熱電材料研究者が中心になり、日本熱電学会が設立された。この分野では伝熱技術が実用時に重要であり、伝熱研究者の学会参加または学会員の交流があらたなブレイクスルーを生むのではと考えている。

参考文献

[1]坂田亮編, 熱電変換, 裳華房, (2005).

ミニチャネル型高密度蒸気発生器における伝熱特性の解明とその開発
Heat Transfer Characteristics and Development of Mini-channel Type Vapor Generator

宇高 義郎 (横浜国立大学) 田崎 豊 (日産自動車)

Yoshio UTAKA (Yokohama National University), Yutaka TASAKI (Nissan Motor Co. LTD.)

1. はじめに

近年の環境問題を背景として高効率・低有害排出物である燃料電池車の開発が急がれている。例えば、エネルギー密度の高い液体燃料を改質して燃料電池 (FC) スタックに水素を供給するオンボード式の改質型燃料電池があるが、その中で本研究は特に熱効率が高く改質に水蒸気を必要とする水蒸気改質方式またはオートサーマル方式の蒸気発生器に着目する。このシステムと蒸気発生器の概要を図 1 および 2 に示す。FC スタックから排出された余剰の水素と空気の燃焼による高温ガス加熱により蒸気を生成させる。このような蒸気発生器には自動車用パワートレインとしての応答性、搭載性を満たすために、高効率・コンパクト化が求められる。これらの要求を満たす

一形式として、単位体積あたりの伝熱面積を拡大し、また試料および装置の熱容量を小さくすることができるといえるミニチャネル式蒸気発生器、すなわち高温ガス用通路と液体用通路を交互に積層して構成されるプレート式熱交換器を用いることが考えられる。その場合には、可能な限り狭いチャネル間隙のもとで良好な伝熱特性を実現することが重要になる。

ミニチャネル内の沸騰様相は、制限流路内で生じる現象のため蒸気泡は流路によって急速に薄く拡大され、それに対応して蒸気泡と伝熱面間に形成される薄液膜が伝熱特性に特に重要な役割をもつなど、プール沸騰とは異なることが報告されている^[1,2]がそのメカニズムはまだ十分に解明されていない。

それらを鑑み、高効率・コンパクトな蒸気発生器の開発を効率的に進めるためにはまず(1) ミニギャップ制限流路内で生じる熱伝達現象の支配機構とその熱伝達特性を明らかにすること、(2) それらの知見をもとにミニチャネル型蒸気発生器の熱伝達性能を研究段階で必要な精度をもってより簡便に予測する解析手法を得ることが必要である。以下に、これまで進めてきた検討内容の一例を紹介する。

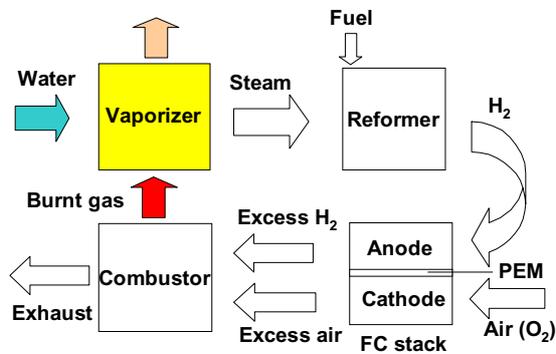


Fig. 1 Outline of reformer FCV

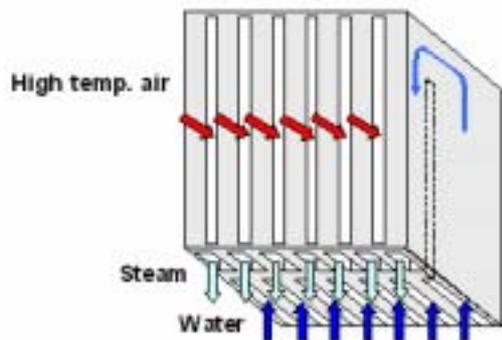


Fig. 2 Plate type vapor generator

2. ミニチャネル沸騰熱伝達特性とその伝熱機構

2.1 伝熱表面のぬれ性と間隙寸法の影響

伝熱面仕様と間隙寸法の沸騰熱伝達特性に及ぼす影響とその伝熱機構の実験・解析を行った^[3]。実験装置の概要を図 3 に示す。破線で囲まれた部位がミニチャネル試験部を示す。加熱板 (50×102 mm²) と石英ガラスにより形成されるミニチャネル部の液面高さは一定に保たれ、100 °C 近傍の温水が供給される。発泡及び気泡成長の様相は加熱板正面に置かれた高速度カメラで記録され画像解析される。

間隙 $s = 0.5 \text{ mm}$ と 10.0 mm のチャネルにおいて、ラッピング加工銅面、酸化チタンおよびシリコン樹脂コーティングを用いて伝熱面のぬれ性を親水性から疎水性まで変化させた場合の熱伝達特性を図

4(a) (b)に示す. プール沸騰に相当する間隙の広い 10 mm では親水性の向上は熱伝達を低下させるが, 逆に, 間隙 0.5 mm のミニチャネルにおいては向上する ($s = 0.25, 1.0$ mm も同様). 同時に, それらの現象における発泡特性など種々の影響因子について観測を行い, 沸騰曲線への表面ぬれ性の影響を検討した. その結果として, ミニチャネル沸騰においては蒸気と伝熱面の間における薄液膜の形成とその維持が表面ぬれ性と関係して極めて重要な要因であり,

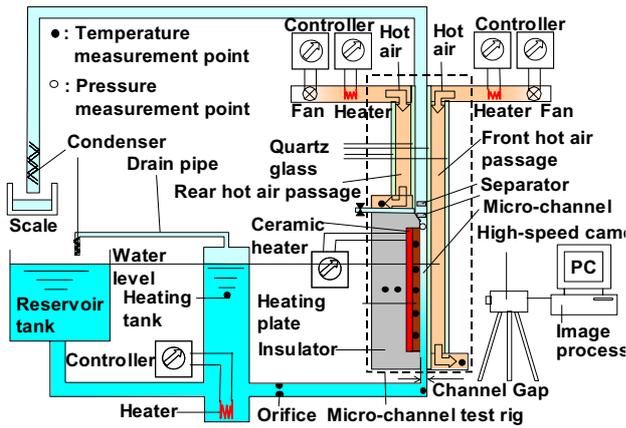
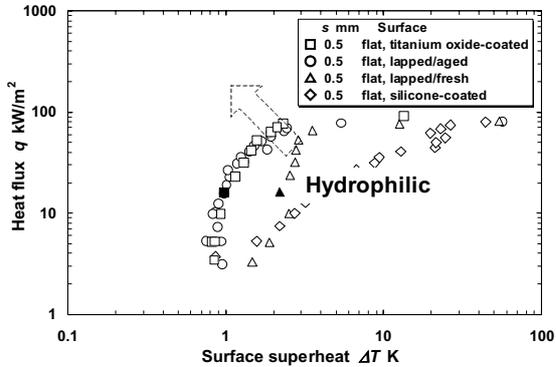
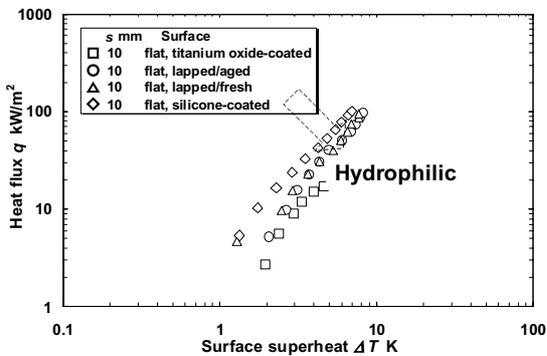


Fig. 3 Outline of experimental apparatus



(a) $s = 0.5$ mm



(b) $s = 10$ mm

Fig. 4 Effect of wettability on boiling curves

上記の差異は主にぬれ性面における薄液膜の形成とその維持による熱伝達の促進によることを示した.

次に, 蒸気伝熱面のうち良好な伝熱特性を示す, ぬれ性の良好な酸化チタンコート面における沸騰曲線を図 5 に示す. ミニチャネルにおける沸騰・蒸発形式は, 蒸気泡形成に伴って生じる間欠的な薄液膜生成による“薄液膜支配領域”とチャネル入口部にて周期的な液の前進・後退を生じ, 出口側部分でドライアウトを示す“ドライアウト出現領域”(それぞれ白抜きおよび黒塗り記号)に区分される. 次に, 蒸気発生器の熱交換性能を解析する上で必要なドライアウト出現領域の限界熱流束特性と薄液膜支配領域において熱伝達の主要な役割を果たす薄液膜の挙動に関する検討例について述べる.

2.2 限界熱流束の特性 (ドライアウト出現領域)

熱流束の限界を規定するドライアウト出現領域はウエットとドライアウト領域が混在する. 後述の蒸気発生器の熱伝達解析に用いる限界熱流束を解明するには伝熱全面の平均的な限界熱流束の解析にとどまることなく, ウエットとドライアウト領域に区分

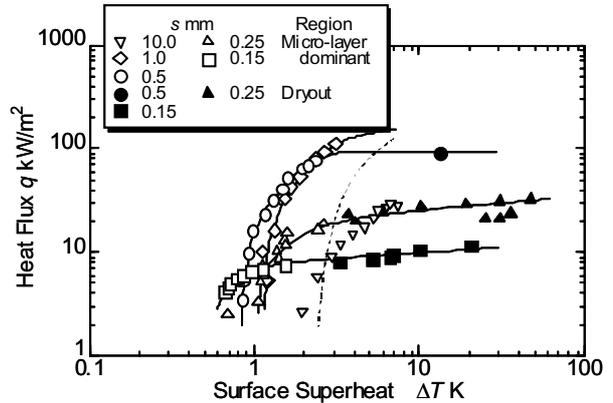


Fig. 5 Effect of gap size and two domains in boiling curves on wetting surface

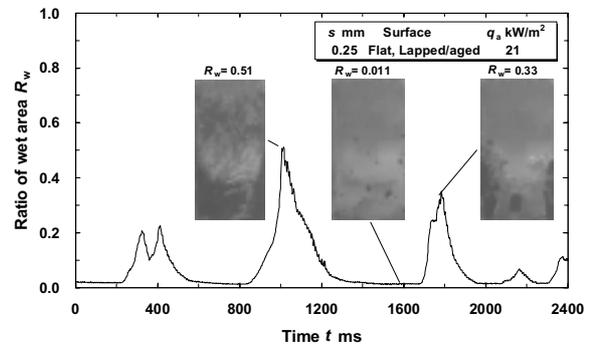


Fig. 6 Ratio of wet area to surface area ($s = 0.25$ mm, lapped/aged, $q = 21$ kW/m², $\Delta T = 5$ K)

したより詳細な沸騰熱伝達特性を明らかにする必要がある^[4]。そのため、図3の実験装置をベースに、伝熱面全体の伝熱量分布を明らかにするため測温点数を増やした加熱板を用いて、3次元熱伝導逆問題解析により伝熱面の過熱度と熱流束分布を求めるとともに、画像解析を用いて伝熱面ウエット領域の面積割合経過を求める解析手法を検討した。

ここでは、間隙 0.25mm におけるウエット領域の面積割合の時間変化とそのうちの代表的な沸騰様相例を図6に示す。伝熱面の過熱度分布は下流に移行するに伴い上昇し、熱伝達率分布は下流に移行するに伴い急激に低下する傾向を示している。また、上記解析によれば、ウエットとドライ領域では過熱度および熱伝達率が大きく異なっていることが示された。

2.3 薄液膜構造と特性（薄液膜支配領域）

前述のように、ミニチャンネル沸騰系においては薄液膜支配領域が主要な伝熱形態であり、薄く広がった蒸気と伝熱面間に形成される薄液膜の生成・保持特性が重要な要因である。薄液膜厚さ測定および蒸気泡生成・成長過程の観測を行い、薄液膜挙動と沸騰条件との関係について行った測定・解析例を紹介する^[5]。ミクロンオーダーの非常に薄い液膜が比較的高速にて生成・変化するため、その厚さ測定には非接触・高応答性を有する測定系を用いることが望ましい。ここでは、実験装置を光学測定に適合するように工夫し、著者らの一部^[6]が用いてきた赤外レーザ消光法を適用した^[5]。

図7に3種類の間隙 $s = 0.5, 0.3, 0.15$ mm における初期薄液膜厚さ δ_0 の測定結果を示した。いずれの間隙とも、気泡成長速度 V_L に対して直線的に変化する“直線的増加領域”と、“一定厚さ領域”に区分される。また、他の結果も合わせて、初期薄液膜厚さは概ね気泡先端速度だけの関数であることが示された。図8には、実際の気泡先端速度変化を与えて、図7の結果に基づいて計算した初期液膜厚さ分布を示す。気泡生成位置から離れるに従って液膜は厚さを増加させることがわかる。初期液膜厚さは間隙の減少に伴って小さくなり、全体としては数ミクロンから数十ミクロンの範囲にある。この特性は、図5にみられるような、ミニチャンネル間隙が狭いほど低過熱度域における熱流束が大きく、また限界熱流束が低いことを説明する主要なメカニズムと考えられる。すなわち、より狭い間隙の薄液膜はより薄く、より急な温度勾配が現れるため蒸発速度が増加し、

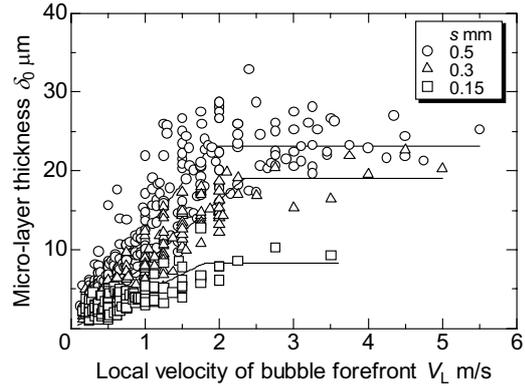


Fig. 7 M-L thickness and velocity of bubble forefront

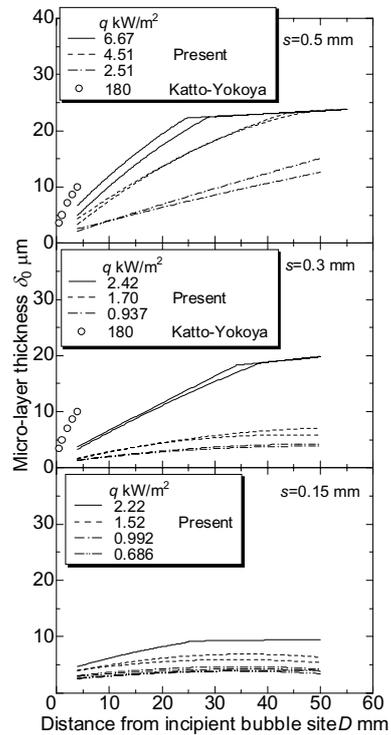


Fig.8 Initial micro-layer thickness distribution

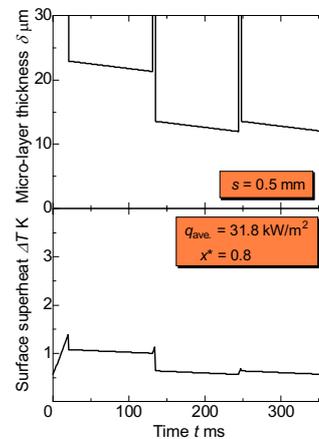


Fig.9 Variations of micro-layer thickness and superheat in a vapor period for $q = 31.8$ kW/m²

高い熱伝達を可能にする。一方、熱流束が増大すると、薄い液膜はより短時間で消失しドライアウト出現領域への移行が早まると推察される。

さらに、薄液膜における蒸発伝熱および液充滿時の熱伝導を仮定し、それぞれの期間を測定することにより、1 気泡周期における過熱度および薄液膜厚さ変化を計算した一例を図9に示す。液充滿時に過熱度は上昇した後、薄液膜形成とともに過熱度の減少する過程が見られる。これらの計算結果と沸騰曲線の測定結果はよく一致し、薄液膜の蒸発伝熱が主要な伝熱形態であることが定量的に示される。

3. ミニチャネル式蒸発器性能設計解析手法の検討

上記知見を活用した蒸気発生器の熱交換性能予測のための解析手法^[7]について述べる。解析の構成としては、隔壁、フィンの仕様と蒸発流体、高温ガスのフローパターンをモデリングする。CFD または 2 節で述べた解析手法より求めた気液単相流、気液二相流の熱伝達特性を高温ガス、蒸発流体に適用、評価条件を設定して熱交換性能解析をおこない蒸気発生器の熱交換性能と構造体の温度分布を予測する。気液二相流のドライアウト出現領域におけるミニチャネル内沸騰熱伝達モデルを図10に示す。熱伝達モデルはクオリティと熱伝達率及び限界熱流束の特性から構成され、所定の限界熱流束を超えると薄液膜蒸発領域からドライアウト領域へと遷移する。

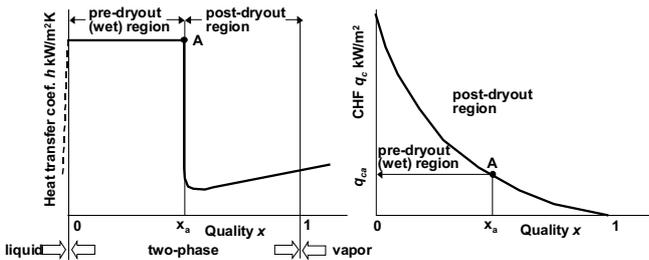


Fig.10 Heat transfer model

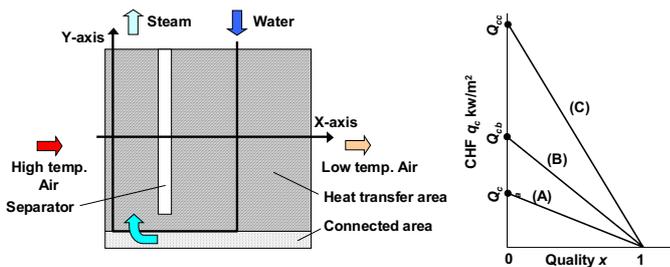


Fig.11 Model and CHF characteristics

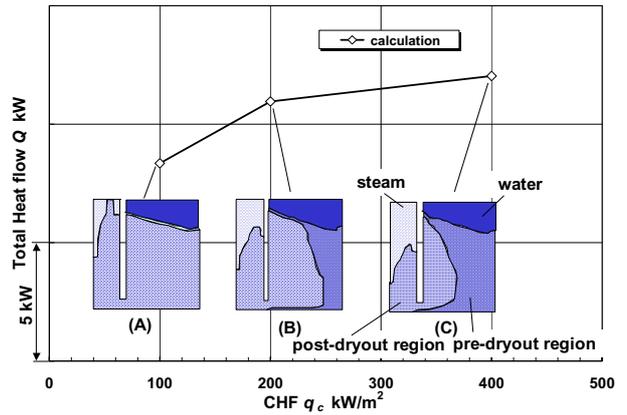


Fig.12 Effect of CHF characteristics on heat transfer rate

純水を被蒸発流体、空気を高温ガスとしてミニチャネルの熱伝達特性が蒸気発生器の熱交換性能に及ぼす影響感度を解析した一例を示す。蒸気発生器モデルと仮定した限界熱流束ークオリティの関係を図11に示す。3通りの特性A,B,C各々の熱交換量と蒸発流体のモードを図12に示す。限界熱流束を向上することによりドライアウト領域が抑制され薄液膜蒸発領域が拡大し熱交換量も増加する。以上述べた定常での熱交換性能に加え、間隙寸法等構造諸元の発生蒸気質量流量の過渡特性等も予測可能であり、高効率・コンパクトな蒸気発生器の開発を効率的に進める上で有効な解析手法となる。

参考文献

- [1] 甲藤好郎,横谷定雄,機論(2), **32-238** (1966) 948.
- [2] Fujita,Y., Ohta,H. and Uchida,S., JSME Int. J. Ser. II, **31-3**(1988)513.
- [3] 田崎豊, 宇高義郎, 機論(B),**70-691**(2004)737.
- [4] 田崎豊, 宇高義郎, 第41回伝熱シンポジウム, 講論集, **I**(2004)255.
- [5] 宇高義郎, 田崎豊, 奥田修平, 機論(B), (2005.4).
- [6] Utaka,Y. and Nishikawa,T., J. Enhanced Heat Transfer, **10-2**(2003)119.
- [7] 田崎豊, 宇高義郎, 自動車技術会論文集, **35-3** (2004)123

単相流マイクロチャンネル熱交換器

Micro-channel Heat Exchangers for Single Phase Flow

浅古 豊 (首都大学東京)

Yutaka ASAKO (Tokyo Metropolitan University)

1. はじめに

半導体チップの裏面にミクロンオーダーの溝を切り、そこに流体を流して冷却する「マイクロチャンネルを用いた冷却法」を Tuckerman ら[1]が1981年に提案して以来、マイクロチャンネルの流れと熱伝達に関する多くの研究が精力的に行われている。それと平行してマイクロチャンネル熱交換器の開発も行われている。マイクロチャンネル熱交換器の特長は「小型」の他に昇温の速さである。ここではマイクロチャンネルの単相流の流れと熱伝達に関するこれまでの研究について概観したのちマイクロチャンネル熱交換器に関する国内外の研究開発の現状を解説し、さらに私の研究室で行っているマイクロチャンネルを流れるガス流の熱伝達について紹介する。

2. マイクロチャンネルの流れと熱伝達

マイクロチャンネルを流れる単相流の流れと熱伝達については Garimella ら[2]のレビューに詳述されているので、ここではその概略を述べるにとどめる。よく知られているように、流れが層流の場合、通常サイズの流路では発達域の摩擦係数と Re 数との積は断面の形状で決まる定数で、例えば円管では64である。しかしながら、マイクロチャンネルの[摩擦係数] \times [Re]の測定値は層流域に限っても研究者によってばらばらであった。

例えば、[摩擦係数] \times [Re]が一定値ではあるが通常サイズのそれより高い値をとる Wu ら[3]の結果、逆に通常サイズのそれより低い値をとる Yu ら[4]の結果、さらに[摩擦係数] \times [Re]が Re 数の関数である Peng ら[5]の結果が報告され、一時期混乱した。しかし、ここ2~3年は、マイクロチャンネルの流れは通常サイズのそれと変わらないとの結果が相次いで報告され(例えば Judy ら[6], Liu & Garimella [7]), 「非圧縮性流体の場合、マイクロチ

ャンネルの流れは通常サイズのそれと変わらない」に落ち着いてきたようである。

同様に、熱伝達についても報告された Nu 数は研究者によってばらばらで、層流、非圧縮流れに限っても、ほとんどが通常サイズのそれより低い値であった。しかし、これについても最近、マイクロチャンネルの熱伝達は通常サイズのそれと変わらないとの結果が相次いで報告されている(例えば Lelea ら[8], Lee & Garimella [9])。

3. マイクロチャンネル熱交換器

3.1 伝熱面積密度

熱交換器の「コンパクトネス」の「ものさし」として伝熱面積密度 β (単位体積あたりの伝熱面積)[10]が用いられている。ETSU [11]の分類を表1に示す。それによると $10^4 > \beta > 3 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{m}^3$ を層流型熱交換器、 $\beta > 10^4 \text{ m}^2/\text{m}^3$ をマイクロ熱交換器と分類している。

表1 伝熱面積密度 β [11]

| Compact heat exchanger type | Area density (m^2/m^3) |
|-----------------------------|--|
| Liquid-liquid compact HEX | > 300 |
| Gas-liquid compact HEX | > 700 |
| Laminar flow HEX | > 3,000 |
| Micro heat exchanger | > 10,000 |

3.2 マイクロチャンネル熱交換器

マイクロチャンネル熱交換器は米国 PNNL (Pacific Northwest National Laboratory)で開発されて以来、さまざまなマイクロチャンネル熱交換器が開発され、市販されているものもある。

PNNL で開発されたマイクロチャンネル熱交換器[12]は吸収式小型ヒートポンプ用の再生熱交換器への適用を目的としたもので、マイクロチャンネルは深さ1mm、幅100~300 μm で、R124の流量が35~300 ml/minの時10~100W/cm²の熱を伝達し、

熱通過率は $10\text{k}\sim 35\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$ であった。

ドイツのカールスルーエ研究センターのマイクロプロセス技術研究所 (Forschungszentrum Karlsruhe, Institute for Micro Process Engineering) で作られたマイクロチャンネル熱交換器は厚さ $100\ \mu\text{m}$ の銅板に約 $130\ \mu\text{m}$ のピッチで深さ $70\ \mu\text{m}$ 幅 $100\ \mu\text{m}$ のマイクロチャンネルを加工し、その銅板を積層し拡散接合させたもので、熱交換部分の体積は $1\ \text{cm}^3$ である[13]。マイクロチャンネルのSEM写真を図1に、熱交換器の全体を図2に示す。同様の構造の $8, 27\ \text{cm}^3$ の直交流型熱交換器や向流型の熱交換器[14]も作られている。また、マイクロチャンネルの伝熱促進を図るため、マイクロチャンネルの側壁を切断しスリットフィン状にした熱交換器[13]も作られている。この伝熱促進型マイクロチャンネルを用いた熱交換器の熱通過率は水で $60\text{kW}/\text{m}^2\text{K}$ に達するが、圧力損失も同時に増大している。これら熱交換器のデータを表2に示す。なお、伝熱面積密度 β を計算する際、分母の[熱交換器の体積]には流路の体積をとる場合と熱交換器の体積をとる場合とがあり、ここでは前者を β 、後者を β' とした。

染谷らは高温側 $19.7\times 250\ \mu\text{m}$ 、低温側 $19.7\times 500\ \mu\text{m}$ の流路が互いに直交した積層構造のマイクロチャンネル熱交換器を製作し、空気-空気の場合の熱通過率を調べ[15]、高温側の Re 数が約 800、低温側の Re 数が約 330 のとき、熱通過率が約 $180\ \text{W}/\text{m}^2\text{K}$ であることを報告している。この値は通常サイズのそれに比べかなり高い値である。さらに、同様の構造で高温側 $250\times 250\ \mu\text{m}$ 、低温側 $250\times 500\ \mu\text{m}$ のマイクロチャンネル熱交換器の熱通過率および圧力損失を調べ、この場合にも空気-空気の熱

通過率が約 $180\ \text{W}/\text{m}^2\text{K}$ に達し、圧力損失は高温側の Re 数が約 470 のとき約 $25\ \text{kPa}$ であることを報告している[16, 17]。

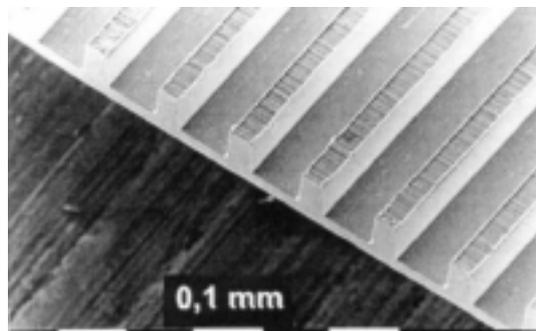


図1 マイクロチャンネルのSEM写真[13]

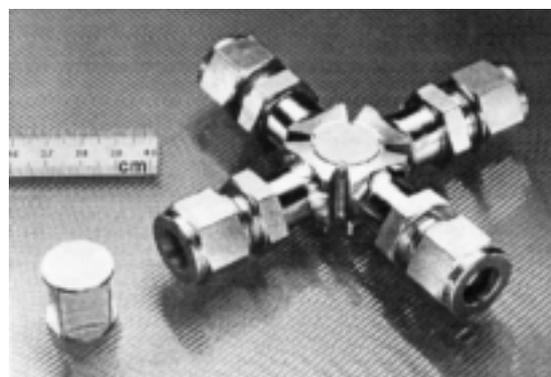


図2 1cm^3 の熱交換器[13]

ドイツ IMM (Institute für Mikrotechnik Mainz) 社から X 線リソグラフィ(LIGA)技術で微細加工した外部加熱型(HTMD)、向流型(COMH)、直交流型(CRMH)のマイクロチャンネル熱交換器が市販されている[18]。それらのチャンネル寸法と熱通過率等を表3に、COMHのプレートの写真を図3

表2 カールスルーエ研究センターのマイクロチャンネル熱交換器

| 型式 | 直交流[13] | 向流型[14] | 伝熱促進型[13] |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 材質 | Copper | SUS | SUS |
| Channel 寸法 (W×D×L mm) | 0.1×0.07×10 | 0.2×0.1×20 | 0.16×0.045×14 |
| Channels plates | - | 340/passage | 44 |
| Plate 寸法 (W×L×t mm) | 10×10×0.1 | 40×40×0.5 | 50 |
| 外形寸法 (W×L×H mm) | 10×10×10 | 40 | 14×14×0.1 |
| 伝熱面積 (cm ²) | - | 40 | 14×14×5 |
| $\beta\ \text{m}^2/\text{m}^3$ | 48,000 | 30,000 | 57,000 |
| $\beta'\ \text{m}^2/\text{m}^3$ | 15,000 | - | - |
| 熱通過率 (kW/m ² K) | 15~25 | 6~12 | 35~60 |
| 熱交換有効度 | (100~600 kg-water/h) | (10~100 kg-water/h) | (200~400 kg-water/h) |
| 圧力損失 (kPa) | - | 0.3 at 100 kg-water/h | - |
| 交換熱量 (kW) | 600 at 700 kg-water/h | - | 500 at 300 kg-water/h |
| | 16 at 600 kg-water/h | 2.5 at 100 kg-water/h | 12 at 400 kg-water/h |

に示す。なお、プラントのプリヒーターを HTMD で置き換えた実例[19]も紹介されている。

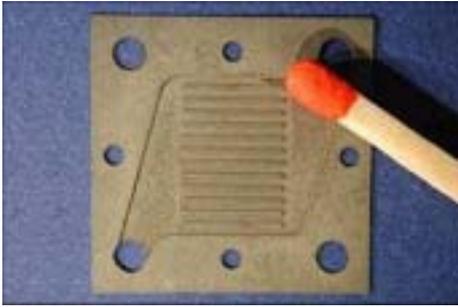


図3 COMH用プレート[18]

韓国の Ispec 社からは 40×40mm 厚さ 300 μm の SUS304 に、約 350μm のピッチで深さ 200 μm、幅 300 μm の溝を 34 本切り、それらを積層したマイクロチャンネル熱交換器が市販されている[20]。熱通過率や圧力損失は公表されていないが、単位流路体積当たりの伝熱面積密度βは 16,700 m²/m³である。

4. マイクロチャンネルを流れるガス流の熱伝達

マイクロチャンネルは流動抵抗が大きいいため、圧力は下流に向かって大きく低下する。したがって流体がガスの場合は下流に向かって膨張、加速する。圧力比によっては出口で Ma>1 にもなりうる。実際に染谷ら[15]の熱交換器の場合にはマイクロチャンネル出口の Ma 数は最大 1 程度になっているものと思われる。

よく知られているように高速のガス流の場合、速度が増加すると運動エネルギーは増加するが、

その増加分熱エネルギーが減少し、温度は低下する。図4の二点鎖線はマイクロチューブ入口上流に設けた淀み点温度 T_{stg}=300 K の貯気槽から壁温 T_w=350 K、直径 D=50 μm のマイクロチューブに空気が流入する場合の無次元混合平均温度の数値計算結果[21]である。図中の-○-は非圧縮流れの混合平均温度である。非圧縮流れの場合には混合平均温度は壁温に漸近するが、ガスの場合には運動エネルギーへの変換に伴う温度低下が見られ、流路の後半部分で熱伝達が増加する。これは非圧縮性流体と大きく異なる点である。図中の実線は全温 T_Tで、流路後半での熱伝達によって全温度は非圧縮流れの混合平均温度より高くなる。

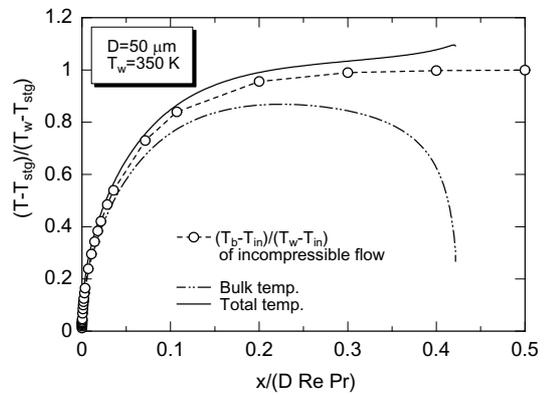


図4 混合平均温度の低下の一例

ガスの熱伝導が極めて良い場合を考えると、チャンネル出口のガス温度は壁温まで回復すると考えられ、その場合の伝熱量は動温分多くなる。しかし、ガスの熱伝導はそれほど良くないので、実際の伝熱量の増加分は動温分よりは少ない。次式

表3 IMM社のマイクロチャンネル熱交換器[17]

| 型式 | HTMD | COMH | CRMH |
|-----------------------------------|---|--|---|
| 材質 | Inconel 600 | SUS316 | SUS316 |
| Channel 寸法 (W×D×L mm) | 0.5×0.1×8 | 0.3×0.2×17 | 0.7×0.2×12 |
| Channels/plate | 12 | 34 | 9 |
| plates | 50 | 10+10 | 12+12 |
| Plate 寸法 (W×L×t mm) | - | 40×40×0.5 | 22×22×0.2 |
| 外形寸法 (W×L×H mm) | 32×32×26 | φ70×80 | 32×32×26 |
| 伝熱面面積 (mm ² /plate) | 120 | 580 | 195 |
| β m ² /m ³ | 27,400 | 18,000 | 12,800 |
| β' m ² /m ³ | 5,460 | 2,900 | 10,100 |
| 熱通過率 (kW/m ² K) | - | 2,300 at 7 L-water/h | 4,000 at 0.5 L-water/min 700 at 75 L _N -air/min |
| 熱交換有効度 | - | 0.72 | - |
| 圧力損失 (kPa) | <10 at 500 L _N - N ₂ /h | 25 at 10 L-water/h 2 at 10 L _N - N ₂ /h | 300 at 2.1 L-water/min 300 at 95 L _N -air/min |

は実際の伝熱量の増加分と動温分との比を表し、図5はこの比とチャンネル出口のMa数との関係を示したものである。

$$Ratio = \frac{T_T - T_{b,incomp}}{\int \rho u \frac{u^2}{2} dA / \int \rho C_p u dA} \quad (1)$$

平行平板型[22]、円管[21]いずれの場合も、回復比は壁温によらずチャンネル出口のMa数の関数で表される。したがって、等温壁のマイクロチャンネルを流れるガス流の全温は非圧縮性流れの熱伝達の結果を利用して次式から推定できる。

$$T_T = T_{b,incomp} + Ratio \times \frac{\int \rho u \frac{u^2}{2} dA}{\int \rho C_p u dA} \quad (2)$$

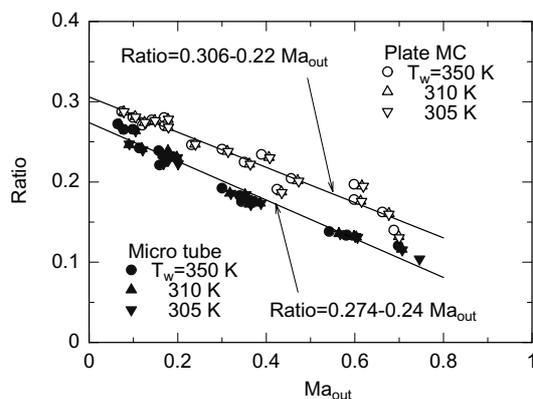


図5 回復比

4. おわりに

ここで紹介したものは主にインターネットを手がかりに調べたものです。もれがあるかもしれませんがご容赦ください。なお、上述のようにマイクロチャンネルを流れるガス流の熱伝達は流れが高速になると非圧縮性流体のそれと異なるので、ガス-ガスのマイクロチャンネル熱交換器の特性も非圧縮性流体のそれと異なると予想されます。その解明は今後の課題です。

参考文献

[1] Tuckerman, D. B. and Pease, R. F. W., *IEEE Electron Dev. Lett.*, EDL-2 (5) (1981) 126.

[2] Garimella, S. V. and Singhal, V., *1st Int. Conf. on Microchannels and Minichannels*, (2003) 159.
 [3] Wu, P. and Little, W. A., *Cryogenics*, 23 (1983) 273.
 [4] Yu. D. et al., *ASME/JSME Thermal Engineering Conf.*, 1 (1995) 523.
 [5] Peng, X. et al., *Experimental Heat Transfer*, 7 (1994) 265.
 [6] Judy, J. et al., *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 45-X (2002) 3477.
 [7] Liu, D. and Garimella, S. V., *8th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conf.*, AIAA2002-2776 (2002) 1.
 [8] Lelea, D. et al., *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 47-12/13 (2004) 2817
 [9] Lee, P. and Garimella, S. V., *ASME Heat Transfer Conf.*, HT2003-40293 (2003) 1.
 [10] Shah, R.K., et al., *Compact Heat Exchangers*, Hemisphere Publishing co. (1990).
 [11] ETSU, *Guide to Compact Heat Exchangers (GPG089)* (1994) 2.
 [12] Ravigururajan, T. S. et al., *Proceedings of 31th National Heat Transfer Conf.*, 7 (HTD329) (1996) 157.
 [13] Schubert, K. et al., *Microscale Thermophysical Engineering*, 5-1 (2001), 17.
 [14] Haldritter, A., et al., *2nd Int. Conf. on Microchannels and Minichannels*, (2004) 967.
 [15] 染谷ら, 機械学会 2003 年次大会, J10-2 2206, (2003).
 [16] 染谷ら, 機械学会 2004 年次大会, 2418, (2004).
 [17] <http://www.yacida.co.jp/>
 [18] (株)アイテック, マイクロリアクターカタログ, <http://www.itec-es.co.jp/>
 [19] Bayer, T., et al., *Proceedings of MICRO.tec 2000. VDE World Microtechnologies Congress*, (2000) 493.
 [20] <http://www.ispec.co.kr/>
 [21] Asako, Y., *Thermal Science Engineering*, 12-5 (2004) 31.
 [22] Asako, Y. and Toriyama, H., *Microscale Thermophysical Engineering*, 9-1 (2005) 15.

PC 用ヒートシンクの動向
Trend of Heat Sink for CPU in Personal Computer

木村 裕一 (古河電気工業株式会社)
Yuichi KIMURA (The Furukawa Electric Co., Ltd.)

1. はじめに

電子機器の小型化・高性能化は、それに使用されている半導体素子の小型化・高性能化が進むことによって成り立っている。特にパーソナルコンピュータ（以下PCと呼ぶ）等で使用されるCPUは、18～24ヶ月で性能が2倍になるというムーアの法則に従って、これまで着実に高性能化が進んできた。一方高性能化に伴い素子からの発熱量は増加してきており、これらの熱を効率良く放熱するために、より高性能な冷却器（ヒートシンク）が必要となってきた。ここでは特にPC用のヒートシンクについての動向を示すと共に、その重要性や対応方法について、発熱量や発熱密度の観点から示していく。

2. ヒートシンクの要求性能

2.1 発熱量・発熱密度の現状

図1に代表的な半導体素子の発熱量と発熱密度の状況を示す⁽¹⁾。発熱密度とは単位面積当たりからの発熱量を示す。低発熱量ではあるが高発熱密度のものに、光通信に使用されるレーザーダイオード等があり、

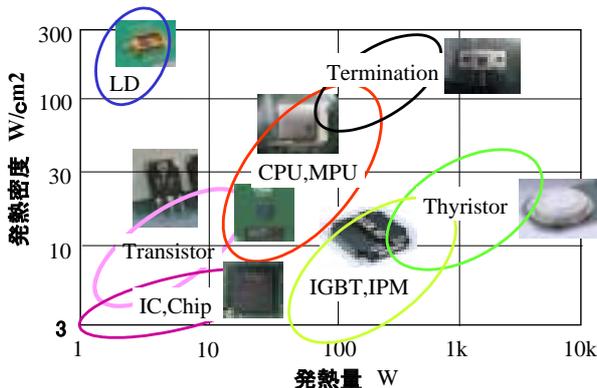


図1 各種素子の発熱量と発熱密度

中発熱量ではあるが比較的高発熱密度のものに、PC等に使用されているCPUが、高発熱量ではあるが中発熱密度のものに、電力制御機器等で使用される、

ThyristorやIGBTがある。いずれの素子も高性能化に伴い、右斜め上の方向に発熱量と発熱密度は推移している。ちなみに、ホットプレートが発熱密度は10W/cm²程度、核反応炉では200 W/cm²程度と言われている。

2.2 ヒートシンクの性能

通常ヒートシンクは図2に示すように、ベース材とフィン材で構成され、素子に対してはTIM (Thermal Interface Material) と呼ばれる界面材を介して接合されている。またヒートシンクの性能は、式1に示すように素子との接合部のベース温度(Ts)と雰囲気温度(Ta)を発熱量(W)で除した

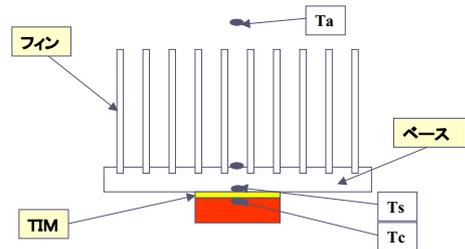


図2 ヒートシンクの構成と性能

値で表され、熱抵抗(Rsa)と呼ぶ。ここで重要なのは、ヒートシンクは素子の温度を下げるために使用されるものであるため、実際は素子温度(Tc)が要求値を満足するようなヒートシンクを選定する必要がある。言いかえると、界面材の熱抵抗を考慮に入れたヒートシンク設計が必要となってくる。

$$Rsa = \frac{(Ts - Ta)}{W} \quad (1)$$

ところでPC用ヒートシンクには、それ自体にファンが実装されているアクティブタイプと、ファンが別置きになっているパッシブタイプと呼ばれるものがある。パッシブタイプのヒートシンクの性能は、通常図3に示すようなウィンドトンネルと呼ばれるダクトを使用し測定される。ダクトの

サイズや熱源となるヒータ形状およびTIM材は、実際の使用条件に合ったものを使用することが、本来の目的の特性を得るために重要となる。

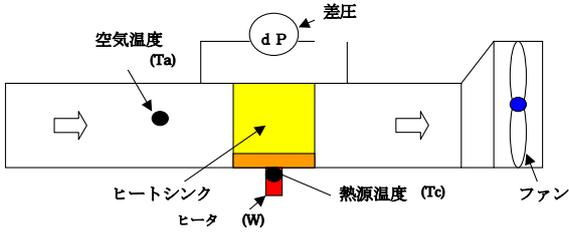


図3 ヒートシンクの評価方法

3. 各種ヒートシンク

3.1 ヒートシンクの種類

図4に代表的なPC用ヒートシンクの例を示す⁽²⁾。ヒートシンクの構成は極めて単純ではあるが、その製造方法によって分類される。発熱量が少ない時は、aに示すようなアルミニウムの押し出しフィンなどで十分放熱することができたが、発熱量の増加に伴い、より細かいピッチの高いフィンが必要になってきた。製造技術そのものも進歩し、製造できる範囲は広がってはきているが、更なる高性能化の要求から、新しいヒートシンクが提案されてきた。また発熱密度の増加により、熱を効率良く広げるため、eのようにベース部分に熱伝導率の高い銅を用いたり、fのように中央部分に銅フィンを用い、両サイドにアルミニウムフィンを用いることにより、高性能化を図ったものもある。

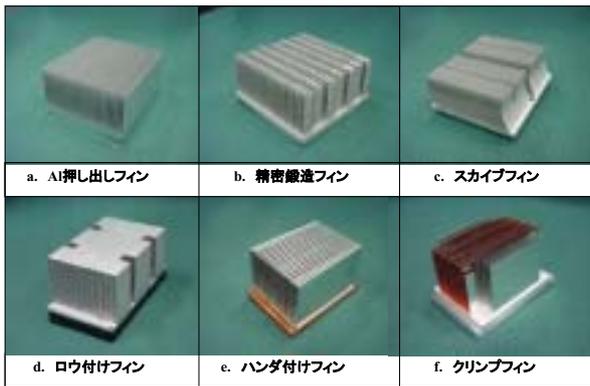


図4 各種ヒートシンク

更に近年環境対策という観点から、eのようなハンダを使用するものから、fのようにかしめによりフィンとベースを接合したクリンプフィンが用いられるようになってきた。

3.2 更なる高性能化に向けて

3.1に発熱密度の増加に伴い銅ベースを使用するようになったことを示したが、実際同一形状のヒートシンクのベース部分に、異なる熱伝導率の材料を用いた場合の性能を、シミュレーションにより求めた結果を図5に示す。銅を使用することにより、熱抵抗を $0.04^{\circ}\text{C}/\text{W}$ も改善することが可能となる⁽³⁾。

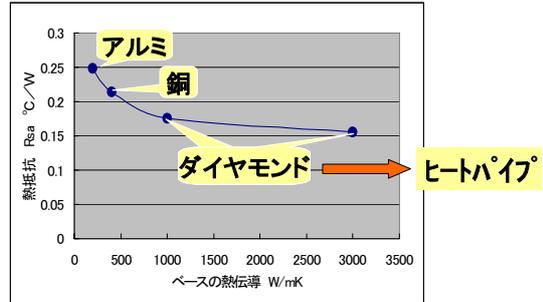


図5 熱伝導率の違いによる性能の違い

また、例えばヒートパイプ (HP) と呼ばれる熱の超伝導体をベース部分に使用することにより、更なる高性能化が可能となる。更には、図6に示すようにペルチェ素子 (TEC: Thermo Electro Cooler) と組み合わせることにより、これまで得られなかった性能改善を行うことが可能となってきた⁽⁴⁾。

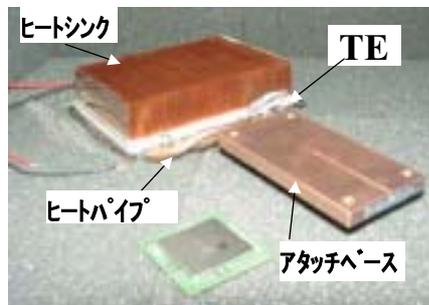


図6 TECを用いたHP式ヒートシンク

4. おわりに

ヒートシンクは日々進化してきており、今後もいろいろなニーズに対応した新しい解が提案されていくであろう。

- [1] 木村裕一, 伝熱学会関東支部・日本ヒートパイプ協会共催シンポジウム, (2004).
- [2] 木村裕一, 熱設計・対策技術シンポジウム, A6-2 (2002).
- [3] 木村裕一, 熱設計・対策技術シンポジウム, H3-1 (2003).
- [4] Ikeda M. et al., iMAPS., Session3-A (2004).

第6回実験熱流体世界会議(ExHFT-6)報告

6th World Conference on Experimental Heat Transfer,
Fluid Mechanics, and Thermodynamics, ExHFT-6

笠木 伸英 (東京大学), 円山 重直 (東北大学), 吉田 英生 (京都大学)
Nobuhide KASAGI (The University of Tokyo), Shigenao MARUYAMA (Tohoku University)
Hideo YOSHIDA (Kyoto University)

1. はじめに

2005年4月17日~21日に本会が共催した6th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics (ExHFT-6: 実験熱流体世界会議)が、宮城県松島町で開催された(写真1)。ExHFT-6は、熱流体现象の科学的解明・工学的応用に取り組む世界各国の実験研究者が一堂に会し、熱流体分野における実験科学・工学の最新の手法や知見に関わる学術的交流を通じて、研究の一層の進歩および国際間の友好を促進することにある。これまで、第1, 2回 Dubrovnik (当時のユーゴスラビア: 1988, 1991), 第3回 Honolulu (米国: 1993), 第4回 Bruxelles (ベルギー: 1997), 第5回 Thessaloniki (ギリシャ: 2001)と、欧米を中心に開催されてきた。

前回のExHFT-5でのアセンブリー会議(議長: G. P. Celata, 副議長: 笠木, 事務局: R. K. Shah)において、第6回は初めてアジア圏の日本で開催されることが決定された。ExHFT-6では、笠木と円山が共同議長を、吉田が論文委員長を務め、会場は日本三景の一つ松島を一望できるホテル、会期は例年桜が満開になる4月中旬の正味4日間として開催計画が成された。



写真1 会議場入口

2. セッションとキーノート・レクチャー

会期と会場を決定後、まず着手したことは、ExHFT-6の範囲を明示するためのセッションのテーマ設定と、それらに概ね対応するキーノート・レクチャーの選定であった。その結果は以下に示す通りである。

Fundamentals:

Heat & Mass Transfer, Interdisciplinary Area in Heat & Fluid Flow, Fluid Dynamics, Thermodynamics, Reaction & Combustion, Measurement Techniques.

Topics and Applications:

Nanotechnology, MEMS, Micro Electronic Equipment, Biotechnology & Medical Systems, μ TAS, Manufacturing Processes, Advanced Energy Systems, Biomass & Agricultural Systems, Environmental & Geophysical Systems, Synergetic Experimental & Computational Methodology, Education.

Keynote Lectures (敬称略):

G. Akay / Univ. Newcastle [UK]
A. Cavallini / Univ. Padova [Italy]
W. J. A. Dahm / Univ. Michigan [USA]
D. A. Greenhalgh / Cranfield Univ. [UK]
K. Hanjalic / Delft Univ. Tech. [Netherlands]
L. Jacquin / ONERA [France]
C. J. Kim / UCLA [USA]
J. S. Lee / Seoul Natl. Univ. [Korea]
T. Niimi / Nagoya Univ. [Japan]
D. Poulikakos / ETH [Switzerland]
K. Tanishita / Keio Univ. [Japan]
C. Tropea / Tech. Univ. Darmstadt [Germany]

会議を性格づける最重要因子は、いうまでもなくキーノート・レクチャーであるので、時間枠の許す範囲で、できるだけ多くの世界的に著名な研

研究者をお招きするようにした。後述の **Lead Scientists** からの推薦を基に論文委員会で検討を重ねた結果、専門分野、国などのバランスに配慮して、2004年9月上旬に上記講師陣を確定できたときは、第一関門を通過した気分であった。

キーノート・レクチャーの内容は、ナノ粒子インク流動、流動スカラー場の多次元画像計測、マイクロポーラスメディアでの輸送現象、動脈流ダイナミクス、実験数値計算融合手法、壁面衝突スプレーの力学、剪断流れの渦力学、マイクロ・ナノ構造温度計測、管内対流凝縮、エンジンのレーザ診断計測、高クヌートセン数流の光計測、マイクロ液滴の力学とデバイス応用など、いずれも興味深い内容で好評であった。

3. 論文投稿・査読システム

ExHFT では、世界各国に **Lead Scientists** (以下 **LS**) と呼ばれる委員 (今回は 64 名) が配置され、論文投稿の勧誘や査読を各地域で行うという分散型方式を伝統とする。この方式には長所もあれば短所もある。ポイントは、論文委員会が要所要所で **LS** といかにうまく連携し、全体を一定の基準で統率できるかという点である。事務局の開設したオンライン・システムのホームページを介して、著者、**LS**、論文委員会の連携はおおむね円滑に進めることができたが、第一段階で要求した **Extended Abstract**、第二段階で要求した **Full Paper** の各原稿のフォーマットや電子ファイルの完備を確認することは、担当者の大きな負担であった。

査読プロセスの後、原則として著者の一人が参加登録手続きを済ませたことを確認した上で、投稿された 270 編の **Extended Abstract** 中から、247 編の論文が最終的に受理された。



写真3 レセプション

4. 会議の形式

会議の形式としては、多数の平行レール・セッション室で個々の論文の口頭発表を行う、これまでのスタイルを大幅に変更し、1室で行われるキーノート・レクチャーと、2室の一般セッション (1室 15 編程度) の構成とした。一般セッションでは、まず各論文の 3 分間のショート・プレゼンテーションを連続して行い、その後ポスター・セッション会場に場所を移して発表者と参加者が密な討論を行える形式とした。これは、本学会が昨年京都で開催した国際伝熱フォーラムで採用した形式と同じある。各論文の内容を大まかに把握した後に関心を抱いた論文のポスターに向いて密な討論ができる本形式は、参加者にも好評であった。

5. 会議開催

会議の性質上、ほとんどの経費を参加者の登録費でまかないつつも、参加者に最大限のサービスを提供する必要があった。そのために、松島ベイクルーズやバンケットなども会計上綿密な計画が練られた。さらに、開催直前までビザ書類の手続きや外国人出席者の個別対応などが続いた。最終的な参加登録者は、254 名で 21 名の同伴者も加えると 275 名の参加者だった。その内 131 名が外国 (32 ヶ国) からの参加者であった。

会期中、例年に比べ遅い開花となった桜こそ間に合わなかったものの、天候には概ね恵まれた。17 日のレセプションは松島の夕暮れを背景に盛会であった。(写真 2・3)



写真2 会場から松島を望む



写真4 開会式 (Celata アセンブリー議長からの開会挨拶)



写真5 開会式 (笠木からの歓迎挨拶)



写真6 Nusselt-Reynolds Prize を授賞される
庄司正弘先生

18日の開会式は、Celata アセンブリー議長の開会挨拶(写真4)で始まり、笠木からの歓迎挨拶(写真5)が続いた。引き続き、毎回のExHFTで、熱流体力学に関する実験で顕著な業績を挙げられた研究者に贈られるNusselt-Reynolds Prizeの授賞式と記念講演があった。今回は、沸騰研究で先駆的な仕事をしてこられた庄司正弘先生に対し贈られた(写真6)。日本で開催されたExHFT-6に花を添えていただく結果ともなり、誠に喜ばしいことであった。



写真7 Tropea 教授のキーノート・レクチャー

会議はキーノート・レクチャー(写真7)を軸として、その間に9回(パラレルで計17個)の一般論文セッション(写真8)が組み込まれた。ショート・プレゼンテーション・セッションの座長にはそのセッションでのベスト・プレゼンテーション賞の決定権が与えられ、判定基準は内容でもポスターの仕上がりでもよいと一任された。60分間のポスター討論の最後は、その表彰で締めくくられ、受賞者には銘酒が贈られた。

ショート・プレゼンテーションは、大部分がパワーポイントにより行われたが、事前チェックがなされたこともあり、トラブルは比較的少なかった。ただ、会議前から心配されたno-showの問題は予想を上回るものとなった。247編の論文中no-showは51編で、全体の2割を超えたことは残念である。no-showを国別に集計すると4つの国



写真8 ポスター・セッション



写真9 松島ベイクルーズ



写真10 利府太鼓の熱演

が際立って多いことも判明した。論文の査読プロセスから、プログラム編成、そして最終的な印刷に至るまで、多くの方々が貴重な時間を費やしていることを考えると、意図的な no-show があるとすれば研究者のモラルの欠如として悲しむべきことといえる。

会議3日目夕刻には船を借り切って松島湾のベイクルーズを行った(写真9)。参加者は塩釜港に水揚げされる新鮮なネタの寿司やビール・ワイン・酒を楽しむだけでなく、クルーズ船の周囲を飛び回るかもめと戯れたりして、好天に恵まれた夕暮れの松島を堪能した。

4日目夜には、主会場のレイアウトを変更してバンケットが開催された。この機会を利用して、ICHMTのルイコフ・メダルが平田賢先生に授与された(詳細は次号参照)。地元利府町の女性を中心とする利府太鼓の演奏(写真10)は圧巻で、バンケット会場に力強く鳴り響き、感動した外国人参加者が舞台に近づいてビデオや写真に収めるシーンが見られた。

6. おわりに

今回の会議は、会議準備の意見交換や連絡の大半を電子メールを介して行った。メールの総数は論文委員会が関係したものだけでも2700通程度、事務局が取り扱ったメールについては数え切れないという。このようなメールの数にも示されるように、確かに一つの国際会議を準備・開催するのは容易ではなく、期間中、関係者のエネルギーと時間を吸収しつくしてしまうといっても過言ではない。

しかし、会議での論文発表や討論に反映されるように、学術的に大いなる成果が挙げられたこと、そして参加者から会議運営・企画に対する感謝や賞賛の言葉を頂いたことは、筆者らを含め関係者一同にとって大きな喜びである。最終日には多くの外国人参加者に握手を求められ、近いうちに、そしてExHFT-7でもまた会おう、と言葉を交わして別れた。国内のメンバーと共に一つの目標に向かって力を合わせたことも、かけがえのない楽しい思い出である。

言うまでもなく、この思い出は会議準備・開催にご協力いただいた全ての方々と共に共有すべきものであり、関係各位にこの場を借りて厚く御礼申し上げたい。中でも、丸田薫東北大助教授、小林秀昭東北大教授、井上剛良東工大教授、菱田公一慶應大教授、升谷五郎東北大教授、鈴木雄二東大助教授、佐多教子東北大助教授、小原拓東北大助教授、青木秀之東北大助教授、結城和久東北大講師、小宮敦樹東北大助手、廣田光智東北大助手、森健太郎東北大元技官には労を厭わぬご尽力を頂き、謝意を表する次第である。また、共催団体として東北大学流体科学研究所の支援をいただいた。

会議アブストラクト集と全ての論文を納めたCD-Rは実費で購入可能ですので、ご希望の方は円山までご一報下さい。

庄司正弘先生の 2005 年ヌッセルト-レイノルズ国際賞受賞を祝して
In Celebration of Professor Masahiro Shoji's Receipt of 2005 Nusselt-Reynolds Prize

笠木 伸英 (東京大学)

Nobuhide KASAGI (The University of Tokyo)

去る 4 月 18 日宮城県松島町で開催された第 6 回実験熱流体世界会議の開会式で、同会議アセンブリーが会議開催毎 (ほぼ 4 年毎) に授与するヌッセルト-レイノルズ国際賞が、伝熱分野で長く活躍されてこられた庄司正弘先生 (東京大学名誉教授, 産業総合技術研究所) に贈られました。伝熱学会会員の皆様とご一緒に心からお祝いしたいと存じます。

改めて言うまでもなく, Osborne Reynolds (Belfast 生, 1842-1912) と Wilhelm Nusselt (Nürnberg 生, 1882-1957) は, 流体・伝熱分野で偉業を成し遂げた重要人物で, 彼らの名前を冠した無次元数をご存じでない方はおられないでしょう。彼らの洞察に富んだ理論や整理式は, 精緻な実験的な裏付けによって, 初めて確固たる学術的な位置付けを得たと言えます。実験熱流体世界会議は, サラエボ大学の E. N. Ganic 教授, ロチェスター工科大学の R. K. Shah 教授らが核となって組織され, 1988 年以来 2~4 年毎に会議を開催, 2 回目以降に, ヌッセルト-レイノルズ国際賞を, 特に実験的手法によって優れた研究成果を挙げた各国の研究者に贈賞してきました。これまでの受賞者は, R. Viskanta (1991), R. J. Goldstein (1993), G. F. Hewitt (1997), J. H. Whitelaw (1997), R. J. Adrian (2001), A. E. Bergles (2001) で, 今回庄司先生はアジアからの初めての受賞者となりました。

小生は, N-R Prize Committee の副委員長, 委員長, 元委員長として 3 期に渡り受賞者の選出に携わって参りましたが, 今回も複数のいずれも素晴らしい業績を有する著名な研究者が各国から推薦されました。そのような中で, 小生同様, 庄司先

生を推される委員が多数いたことは, やはり先生の卓越したご業績の賜物と思います。熱力学, 熱伝導理論, 沸騰や蒸気爆発などの相変化伝熱, レーザー治療, カオス力学系に関する先見性溢れた多くの研究活動と業績は, 数々の論文や講演を通じて国際的によく知られ高く評価されています。さらに, 多くの優れた人材の育成, 国内外学会活動, そして現在も変わらぬ表面張力現象やカオス現象に対する並々ならぬ研究の熱意, それらが委員会委員に認められた結果と理解されます。

松島の会議では, 開会式中の授賞の直後に庄司先生の受賞記念講演がありました。抜山, 西川, 甲藤先生ら先達の偉業を含めて沸騰研究展望に関する講演があり, これに対して多くの参加者の賞賛がありました。我々, 同じ伝熱分野で仕事をしてきた者にとっても, 誠に嬉しく, 誇らしいことでした。

庄司正弘先生は, 昨年還暦を迎えられ, 産総研と東大の連携研究活動のまとめ役として産総研へ移動されましたが, ご自身のご研究の展開も含めて多方面で益々お元気に活動されており, 後進の我々の目からも誠に頼もしく感じる次第です。また, 多くの方がご存じのように, 先生は常に思慮深く, また暖かく細やかな心配りのあるお人柄で, 常に周囲の方々の信頼を集めて, 清々しいリーダーシップを発揮しておられます。今年度は本学会の会長としても, 大いに仕事をして頂きたいと思っております。

庄司正弘先生の受賞をここに改めてお祝いし, 変わらぬご健康と益々のご活躍をお祈りする次第です。

ヌッセルト・レイノルズ賞を受賞して

Some feelings for receiving Nusselt-Reynolds Prize

庄司 正弘 (産業技術総合研究所)
Masahiro SHOJI (AIST-Tsukuba)

はからずもこのたび第6回実験熱流体熱力学国際会議 (the Sixth International Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics) の席でヌッセルト・レイノルズ賞を授った。なんともお恐れ多い名の賞であるが、大変名誉なことであり、有り難く嬉しく思っている。受賞に際し支援いただいた海外の6名の研究者、その取り纏めと推薦のお世話をしてくださった笠木伸英先生(東大)に心より御礼申し上げる。

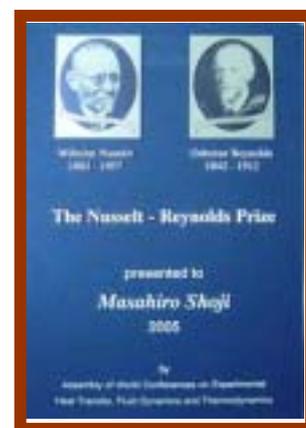
本誌編集氏より感想を一言書くようにとお仰せである。ほんとうに一言で許されるのであれば、受賞の際の返礼に尽きている。開会式における挨拶であったので、文面は事前に準備した。偽らない気持ちを述べたので、前後の儀礼的文言を除いた部分をここに載せさせていただく。

受賞に対する返礼文要旨：

I am really glad having received this honorable prize this time. I would like to extend my sincere appreciation and gratitude to the Award committee and the board members, and also to Prof. Kasagi and other scientists who kindly supported for my nomination to this prize. I received this prize as given not only to me but also to my co-workers including my students, colleagues and friends, who have helped me and encouraged me in doing researches for a long period over the past thirty years. At this occasion, I would like to extent my thanks to all of them. Frankly, I am wondering even now if my academic achievements really deserve the honor given me today as I know many respectable competent scientists in the world who have sufficient achievements and contributions. Fortunately, however, as I am still continuing the researches at the national institute even after the retirement from the University of Tokyo, I will make efforts further so as to be fully worthy of this honor.

受賞講演では、自分自身の研究の前に、わが国沸騰の先達として特に抜山四郎先生と甲藤好朗先生の事績および話題を紹介させていただいた。この講演の準備をする過程で、抜山先生の語録の中に、日頃感じていることに似たもののあることを知った。「研究者は一生に一つでよいから本当に良い研究をすべきである」とのお言葉である。思えば若い頃、甲藤先生からもそうしたことを言われたことがある。「塵も積もれば山となる」との格言があるが、しかし「塵が積もっても、塵でしかない」あるいは「塵が積もれば、ゴミとなる」こともまた真の面がある。然るに自分の姿はどうであったか。評価主義をことさらに気にして、いたずらに数的成果だけを目指してこなかったであろうか。特に最近が多忙に事寄せて、研究と称しつつ取り敢えずの処理ばかりしてきたようにも思う。反省しきりであるが、凡人のなせる業、この年になってはもはや如何ともし難い。そこで身近にいる学生に折に触れ教訓めいたことばかり口にしている。年をとると反省や愚痴ばかりとなるのはまことに悲しく寂しいものである。

なお、編集氏から原稿には写真を入れるようにとのことであった。受賞時の写真は持ち合わせないので、頂いた盾の写真で代用させていただく。



甲藤好郎先生ご遺稿
沸騰の科学 (1)
Science of Boiling (1)

甲藤 好郎 (東京大学名誉教授)
Yoshiro KATTO (Professor Emeritus of The University of Tokyo)

ご遺稿掲載に至る経緯について

本原稿は、今から20数年前の1980年、故甲藤好郎先生が東京大学を定年退官される際、「こんなものを書いてみたよ」と小生に手渡されたものです。先生のご意向がいずこにあったのか確かでなく、先生もその後何もおっしゃらなかったこともありすっかり忘却しておりました。そして小生自身が東大を退くにあたり資料を整理しておりましたとき本原稿を見出し、長きにわたり貴重なものを放置してきた責任を痛感した次第であります。その時既に先生のご病状悪く、先生にご相談することはかないませんでした。ここ数年、研究室学生諸君の勉学のための輪講資料として用いておりましたが、今年になり甲藤先生ご逝去の後、ある席で高田保之先生(九州大学、現本会出版部会長)にお目にかかった際、ふと斯々の未公表のご遺稿があると洩らしましたところ、是非一度読んでみたいとのことでお目かけました。高田先生からは大変貴重なものなので、出版部会の

先生方のご意見もうかがい、できれば本会誌に掲載したいとお申し出があり、甲藤先生の奥様のご了解を得て、今回の掲載に至った次第です。お読みいただければわかりますように、本稿は伝熱の専門家のために書かれたものではなく、沸騰現象とそれに関連した現象について一般向けに平易に書かれたものです。しかも20年以上前のご著作であり、先生がご存命なら、加筆修正なさる部分もあろうかと思えます。このことに関し、必要な注記を入れてはどうか、との意見もございましたが、著作責任の問題もあり、フォーマットを整える他は先生の原稿そのままを掲載させていただくことと致しました。ただし、先生は数多くの美しい沸騰実験の写真を残されておりますので、各号の余白の埋め草として、それらの幾つを挿入しました。しかし、その写真や図はその号の記述内容とは対応しておらず順不同です。これらの点をお含みの上お読みいただければと思います。

庄司正弘 (産業技術総合研究所)

沸騰の科学

甲藤好郎 著

目次

- 1 沸騰入門
- 2 弱い核沸騰
- 3 強い核沸騰
- 4 蒸気の脱出と波
- 5 核沸騰の限界
- 6 液体と加熱面の間の絶縁と復縁
- 7 気液の密月旅行
- 8 加熱管内の流れと沸騰
- 9 奇妙な沸騰アラカルト

1. 沸騰入門

お湯を沸かす

水をポットに入れて、ガスや電気ヒーターにかけておくと、お湯が沸くことは誰でも知っています。この沸くという言葉は、特に「風呂を沸かす」というような、ただ単に水を加熱するだけの意味に使うこともないではありませんが、普通はお湯が沸き立つことを意味しています。つまり、容器に入れた水を次第に加熱していくと、水の底の方

から蒸気の泡が発生、勢いよく立ちのぼるようになり、これを一般に沸騰（ふっとう）と言います。そしてその混乱を含んで激しくふき出る状態の例えから日頃、議論が沸騰するとか、世論が沸騰するといった表現にも広く利用されているわけです。

けれども、世の中の人々が、この沸騰という現象を科学的によく理解しているかという点、それは話が別でありましょう。もともと人類の特徴は火の使用にあると言われる位で、私たちは有史以来、沸騰をすぐ身近に見ながら暮らして来た筈です。でも、驚くべきことですが、人類がこの沸騰現象に科学的な関心を持ち始めたのは、実は今から5、60年来のことに過ぎないのです。もう少し詳しく言うと、ドイツに生まれ、後にアメリカに移ってイリノイ工科大学の教授になったヤコブ教授（1879-1955）が、アメリカへ移る直前の数年間、ベルリンの国立研究施設でおこなった沸騰伝熱や気泡の挙動などについての研究の最初の論文が世に出たのが1931年です。また、東京大学を出て、東北大学の教授になられた抜山教授（1896-1983）もこの頃、沸騰伝熱の基本的特性にかかわる非常に重要な研究をしており、その論文が日本機械学会誌に発表されたのが1934年です。なお、この頃、アメリカのマサチューセッツ工科大学などからも沸騰の実験の報告が少し出ているようです。

そしてこれらが沸騰についての科学的な研究の先駆と言えらるものですが、その後すぐに沸騰の研究が盛んになって行ったわけではありません。アメリカ、旧ソ連、西欧、日本を中心に沸騰について多くの研究が発表されるようになるのは実は第二次大戦後、特に1950年代以降と言ってよく、日本では九州大学の山根教授（1901-1973）の研究が端緒になっています。従って、沸騰について私たちが持っている知識は随分新しいものとも言えるかも知れません。

沸騰と蒸発潜熱

さて地上で私たちが大気から受ける圧力の大きさは、天気予報でお馴染みのミリバールを使うと1013ミリバールになりますが、この圧力下に水が沸騰する時の温度は一定に定まっているので、それを大気圧下の水の沸点（ふってん）と呼び、摂氏温度目盛ではその値が100度（ただし最新の

温度目盛りでは100度の代わりに99.974度とされています）となっているわけです。なお水以外の液体でも、純粋な液体であれば大気圧下に沸騰する温度はそれぞれ決まっています、その物質の大気圧下の沸点と呼ばれています。

歴史的に振り返ってみると、これらのことが分かったのは17世紀の頃になります。まずイタリアの有名な物理学者ガリレイ（1564-1642）が1593年、空気の熱膨張を利用した簡単な温度計を考案しました。しかしこれは気圧の影響をうけるもので、まだ正確なものとは言えませんでした。気圧というものの存在を発見したのは、その後ガリレイの下で働いたトリチェリ（1608-1647）なのです。やがて1657年イタリアの都市フィレンツェで、実験を通して自然を研究しようとする実験アカデミーが設立されましたが、そこで液体温度計が改良され（温度計のガラス管内から空気を抜出してから管を閉じるように工夫）、これを使って氷の融解温度の一定なことが見出されたのです。そして物理学の研究のみならず振り時計の発明でも有名なオランダのホイヘンス（1629-1695）が1665年、水の沸騰温度が一定なことを発見、なおイギリスのボイル（1627-1691）は水の沸点が圧力によって変化することを見出しています。

さて、どんな液体でも加熱すると最初は温度が上がりますが、いま述べた沸点に到達すると、それから後は液体が全部蒸発しきるまで温度が一定に保たれます。液体が蒸気になる、つまり液体内に密に詰っている分子がばらばらに離れて自由に飛び回る気体分子の状態になるためには、ある量のエネルギー（例えば、大気圧の水1キログラムを蒸気にするためには2257キロジュール）が必要で、液体に加えられる熱量はそれに全部使われてしまうからです。そして、この液相から気相への状態変化に必要な熱量のことを蒸発潜熱（あるいは簡単に蒸発熱）と言います。潜熱（せんねつ）というのは、液相から気相への相変化（そうへんか）のために使われてしまい温度上昇にはあずからない熱を指す言葉で、なお蒸発だけでなく、氷（固相）が融解して水（液相）になる時の潜熱などもあります。そしてこの潜熱の概念はイギリスのブラック（1728-1799）によって1761年に導入され、それは彼がグラスゴー大学の教授をしていた時代（1756-66）のことでした。

ところで、大気圧の水が蒸発して蒸気になると、体積がなんと 1603 倍も大きくなります。実は前述のブラック教授と同じグラスゴー大学のなかで、蒸気機関の改良に腐心していたワット（1736－1819）は、水の蒸発の際の体積増加を測定して当時すでに 1800 倍という値を得ていますが、現在の正確な知識では 1603 倍という訳です。ともあれ、僅かの水が水中で蒸発しても、それによって発生する蒸気はまわりの水を大きく押し退け、多くの場合、流体の激しい運動状態を出現させることとなります。

沸騰と沸点

さて、いま沸騰の簡単な実験をすることにして、新品のビーカーを買って来るものとしましょう。そのガラスの面は傷一つなく滑らかで、ピカピカです。そんなビーカーにきれいな水を入れ、温度計を水中に漬けて下から適当なヒーターでゆっくり加熱すると、水の温度が次第にあがって行くのがわかります。そしてやがて水の温度が摂氏 100 度、つまり沸点を明らかに超えますが、予期に反してビーカー内に見えるのは静かな水だけで沸騰は全然起こりません。不審に思っているうち、水の温度が 100 度よりかなり高くなってから、激しい沸騰が突然起こりビーカーから水が飛散するまでになって、いわゆる突沸（とっぷつ）と呼ばれる現象を生じます。

この事実は、一般に沸騰という現象が、沸点だけで理解出来るような単純なものではないことをはっきり示しています。本当のところ、「沸点」は実際の「沸騰」と少し掛け離れた概念なのです。もともと沸点は、ある圧力のもとで液体と蒸気が同じ温度につりあって変化を生じないでいる時の平衡温度を指すのに対し、沸騰の方は、沸点より高い温度の加熱面から液体に熱が伝わり、加熱された液体中で蒸気が絶えず発生しているという変化の状態なのです。

とは言え、前の水の実験でも、ビーカーの底に例えば多孔質の素焼のかけらを入れてやりますと、素焼の面の微小な孔がそれぞれ核になって、そこからたくさんの蒸気泡が連続して発生するようになります。そして素焼片より上の方の水蒸気と水が混在する部分は実質上、ほとんど沸点の温度に保たれます。従って沸点は沸騰とまったく無縁な

ものとも言い切れませんが、しかし科学的に沸騰現象を見て行く上で、「沸点」は必ずしも良い言葉とは言えないことを記しておきましょう。あとでお話するように、沸点よりずっと低い温度の液体に起こる沸騰もあるのです。

沸騰と人間

私たちの食物の調理に沸騰がいろいろの形で関係していることは言うまでもありません。この際の沸騰は、普通は大気圧下のものですが、時には圧力釜など、もっと高压下の沸騰も利用され、要するに人間は日常生活で随分、沸騰の世話になっています。また昔から、日本刀をはじめ鋼に焼きを入れる時など、熱した鋼を水に入れ沸騰独特の強い冷却作用で急冷したりしているわけです。

しかし沸騰は、さらに近代の工学技術の上で実に大きな役割を果たしています。もともと現代の起点とも言うべき 18 世紀の産業革命を可能にしたのはワットに始まる蒸気機関ですが、これに必要な蒸気はボイラーで作られ、ボイラーを強いて訳せば沸騰装置ということです。そして現在では、火力発電所の蒸気タービンをまわすために、一つの巨大なボイラーで一時間に何と 2000 トンもの高压高温の水蒸気を作っているものがあります。

また原子力発電所で使う原子炉をみると、そのタイプの一つに沸騰水型軽水炉があります。ここに「軽水」というのは普通の水のことであって、「重水」という特別な水と区別するための用語です。この型の炉は、1959 年アメリカのデレスデン発電所で運転されたのが世界最初で、日本では 1970 年、日本原子力発電の敦賀発電所に始まっています。この炉では沸騰水型という名前が示すとおり、炉心に送り込まれた水がそこで燃料棒の発生熱をうけて沸騰し、発生した蒸気が直接、蒸気タービンに送られるようになっています。

一方、原子力発電所には加圧水型軽水炉を使うものもあります。この炉は初め原子力潜水艦用に開発されたのですが、原子力発電所としては 1957 年アメリカの SHIPPINGPORT 発電所で運転されたのが世界最初で、日本では 1970 年、関西電力の美浜原子力発電所に始まっています。そして、これは炉内で水が沸騰を起こさないようにした炉で、そのため水の圧力を前の沸騰水型軽水炉の二倍（約 150 気圧）に高くしてあります。また将来の

原子炉として高速増殖炉（普通の原子炉と違い高速の中性子を使って核分裂を持続させます）というものもありますが、ここでは炉心から熱を取り出すのに水を使わず、代わりに液体ナトリウムを流します。このナトリウムやカリウムなどはアルカリ金属と呼ばれる物質で、電気や熱を非常によく伝えます。そしてナトリウムは、大気圧下の融点が摂氏 98 度、沸点が摂氏 881 度の物質ですから、その間の温度で運転すれば、ずっと液体のままの状態です。しかも水のように高圧にする必要がなくなります。ともあれここで話した加圧水型軽水炉や高速増殖炉では、炉内で沸騰が起きませんが、その代り蒸気発生器という大きな装置がどうしても必要で、この装置の中で水を沸騰させ、蒸気タービンをまわすための蒸気を作るのです。

ところで、こうしてボイラーや原子炉で利用される沸騰は、加熱面と流体間のごく僅かな温度差で非常に多量の熱を取る能力があり、従って加熱面の温度を低く保つことが出来るうえ、加熱面の面積を随分小さくすることが出来ます。けれども、この加熱面をよぎる熱の強さが、ある限界値を超えると、今まで持っていた優れた冷却能力を突然失ってしまうという不思議な現象があるのです。その詳しい話は後の 5 章にゆずりますが、原子炉や蒸気発生器など熱が強く伝わる装置の設計には、沸騰による熱除去の限界値について十分な知識が必要なことになります。なお宇宙空間で熱源として利用される小型原子炉の中には、液体カリウムの沸騰が使われるものもあります。

一方、いま仮に何かの原因で、原子炉に水がなくなる事故（冷却材喪失事故と言います）が起こったとしますと、炉内の温度は急に上昇するでしょう。このとき炉内を冷やし、炉を元の状態に戻すためには、急いで炉の中に水を注入しなければなりません。高温になった炉壁に沿って水が炉内に入って行く時に生じる沸騰や急激な状態変化、また炉内で発生する多量の蒸気の逆流が水の流入を妨げる問題などについての科学的な知識が必要になる訳です。

沸騰と先端技術

各種の先端技術でも、その重要な箇所に沸騰の関係しているものが少なくありません。例えば、絶対零度の近くで金属の電気抵抗が完全に零にな

る超伝導という現象は有名ですが、これによって現在では実用的な超伝導マグネット（磁石）が作られ、将来の核融合炉、また磁気浮上列車、荷電粒子を加速するシンクロトロンなど強い磁場を必要とする装置をはじめ、超伝導発電機などにいろいろ使われるようになってきました。そして、このマグネットは、絶対零度の近くで働くため液体ヘリウムで冷却し、しかも多くの場合、沸騰で冷却する必要があります。

また最近のコンピューターや電子機器の発達には誠にめざましいものがありますが、小さく限られたチップ面の上に非常に多数の電子素子（超大规模集積回路では 10 万個以上）が集積され、また計算の高速化のため電気の通る回数が急増し、両面相まって集積面からの熱の発生密度が非常に大きくなって行く訳です。従って、これをうまく冷却する手段が重要になりますが、現在のところ、フッ化炭素（炭化水素中の水素をフッ素で置き換えた化合物で安定かつ電気絶縁性の高い物質）などの液の中にチップを直接入れて沸騰で冷却する方法が最も性能が高いようです。なおこの時もコンピューターの信頼性を保つためには、前に原子炉で話した事柄、つまり沸騰にはその熱除去に限界を与える現象のあることをわきまえている必要があります。そしてこの限界現象がどんなメカニズムで起こるのかを解明し、熱除去の限界値をもっと上げる方法を探すことも重要なことになるのです。それに実は、前に触れた核融合炉なども非常に厳しい冷却を必要とする箇所が多々あり、そのため沸騰による非常に強い特殊な除熱冷却方法の研究が鋭意行われていることも付記しておきたいと思います。

蒸気爆発

さて最後に、沸騰と人間との関係に関連し少し変わった話を一つ付け加えておきましょう。最近（1986 年）、伊豆大島の三原山が激しく噴火し全島民一万三百人と観光客二千人が島から脱出したとき、蒸気爆発の危険性もあるというような意見がテレビで放送されたことを覚えている人も少なくない筈です。そしてここで言っている蒸気爆発は、恐らく高温のマグマが海水中に吹き出したり流入したりして、多量の水蒸気が爆発的に発生する、いわゆる「マグマ水蒸気爆発」のことを言っ

ているのだと思います。

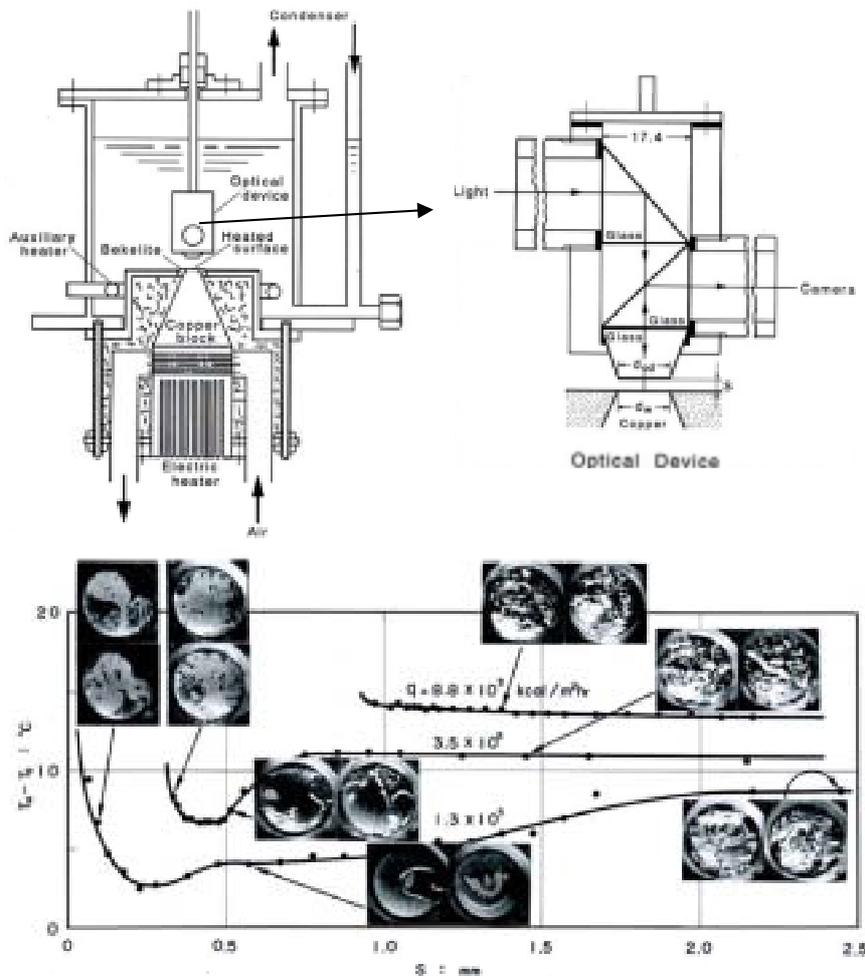
しかし、こうした自然界の特殊状況だけではなく、工業技術の世界にもひろく蒸気爆発と呼ばれる現象があります。例えば、高温の溶けた金属を扱っている工場で、それを水の中にこぼしてしまった時など、大爆発が起こって大きな災害を引き起こした例があります。また最近では原子炉の仮想事故（高温のため溶けた原子燃料が下方の水に落ちる）などを考えると、この蒸気爆発がどんな機構で発生するのかという問題が特に重要になります。ちょっと考えると、溶けた金属の落ち込む水の温度が高く、沸点に近いほど沸騰しやすく爆発の規模が大発の規模が大きくなりそうに見え

ます。しかし実際はそうではなく、後に6章でお話するように本当は水の温度がもう少し低い時が大きくなるという奇妙な事実があるのです。

ともあれ、以上、沸騰と私たちのかかわりあいの一部を、ごく簡単に見て来たわけですが、少なくとも沸騰は私たちと非常に深い関係を持つ現象であることに気付かれた筈です。それに、この現象をもっと広い立場から眺めてみると、すなわち気液二相が微妙にからみあいながら変貌万化の姿を見せるものであって、純粋にそれだけでも大変面白い自然現象です。従って、これからしばらく読者の皆さんと共に、この沸騰現象について科学的な観察を進めてみようと思います。

(次号に続く)

(写真及び図は元東京大学伝熱工学研究室横谷定雄氏提供)



上図の実験装置で観察用の光学プリズム（干渉板）を加熱面に近づけていったときの伝熱特性への影響を調べたもの。高熱流束下ではプリズムが加熱面の近くに及ばない限り影響が現れておらず、沸騰伝熱が加熱面のごく近傍の現象に支配されていることがわかる。

東京電力 電気の史料館
TEPCO Electric Power Historical Museum

関 紀明 (東京電力)

Toshiaki SEKI (Tokyo Electric Power Company)

1. はじめに

今日、電気は空気と同じようにあって当たり前となっている。しかし、ここに至るまでには、120年にわたる多くの先人たちの苦労や努力の歴史があるわけである。

今日の電力供給システムの始まりは、エジソンがニューヨークとロンドンで直流による電力供給を始めた1882年からであるが、翌年、早くも東京電力の前身に当たる東京電燈が創設された。電気事業の創業は、世界の片隅の小さな農業国に過ぎなかった明治期の日本で、世界の最先端産業に取り組んだ先人たちの情熱、チャレンジ精神を示すものである。



図1 東京銀座通電氣燈建設之図(1882)

日本の電気は世界でも最も安定していると言われてきているが、それは一朝一夕にして出来上がったものではなく、120年におよぶ先人たちの懸命な努力があってこそ実現したと言える。

2. 電気の史料館とは

技術発展の履歴を示す貴重なモノも放っておくと、散逸したり破棄されてしまう。

「電気の史料館」は、東京電力が創立50周年記念事業として2001年12月、横浜市鶴見区に一般公開向けに設立した、日本で唯一の電気技術専門の博物館である。「明治時代より引き継がれて

きた“電気作りの精神”を現代に伝え、次の時代に語り継いでいく」をコンセプトにした“電力総合”のテーマパークとなっている。



図2 電気の史料館外観

3. 展示物紹介

電気の史料館内、約4,000m²の展示スペースには、明治中期から現在に至る約700点の実物史料を展示している。



図3 皇居正門石橋飾電灯



図4 電気自動車(1907)

皇居正門石橋に設置され 1893 年から 90 年間灯り続けた飾電灯，ガソリン車以前に実用化されていた電気自動車，昭和 30 年代初め日本の戦後復興と高度経済成長を担った火力発電所の全長 23m もあるタービン発電機の一体展示など，他では見ることのできない重厚感のある実物展示を通して，電気の歴史を目の当たりにすることができる。



図5 旧千葉火力発電所1号タービン発電機

当史料館の特徴として，展示している実物実機史料のほとんどは，それぞれの特徴に応じて内部構造を理解できるようなカットモデル加工を施してある。また，実物史料のみでなく，映像により，明治期には局所的だった電気の供給が，大正～昭和を経て全国に広がっていく様子を映像で紹介する「電気と社会の120年史」や，来館者が任意に選んだ全国の市区町村に，初めて電気がついた年とその当時の社会背景を映像を通して知ることが

できる「私の町に電気が来た日」などや，各コーナー毎に設置されているモニターによる映像解説なども行っている。



図6 私の町に電気が来た日

なお，1時間に1回程度，専門家がやさしく解説しながら館内を案内するガイドツアーを行い，好評を博している。そのほか，「電気のことなら何でも分かる図書館」をコンセプトとした「電気の文書館」を併設し，電気技術に関する研究・調査のための文献・映像史料・錦絵など，約6万点を公開している。



図7 電気の文書館(特設展示)

また，特定のテーマについて深く掘り下げた企画展も開催。第1回～第3回は，エジソン，家庭・都市の電化を，第4回は「モノづくりへの情熱」を取り上げ，大変好評を博している。6月中旬からは，第5回「工業立国日本の誕生～もうひとつの明治維新」を開催する。併せて，夏休みなど一

定期間開催する「特別展」も随時開催している。



図8 第4回企画展「モノづくりへの情熱」

このように、電力の安定供給や効率性を追求し続けた我が国電気事業の100年以上の歴史、そして電力・電機産業が担ってきた「もの作り」の重

要性を、技術・事業史の専門家に一つの産業史として参観いただくと同時に、小・中・高校生を含めた広く一般の方々に、展示物の裏側にある、電気事業を懸命に支えてきた先人たちの顔や努力を感じ取って頂きたいと期待している。

4. 来館案内

住 所：〒230-8510 横浜市鶴見区江ヶ崎町 4-1

電 話：045-613-2400

開館時間：10:00～18:00（入館は 17:30 まで）

休 館 日：月曜日（月曜が祝日の場合は翌日）

入 館 料：大人 500 円，中学・高校 300 円，小学生 200 円（団体割引あり）

（電気の文書館）

開館時間：9:00～17:00（要予約：045-613-2451）

休 館 日：土日，祝祭日

入 館 料：無料

（無料シャトルバス運行）

JR 川崎駅西口から毎日運行中（休館日除く）

（ホームページ）

<http://www.tepco.co.jp/shiryokan/index-j.html>

プランクの法則の裏側

Back Ground of Planck's Law

Heat Transfer

円山 重直 (東北大学)

Shigenao MARUYAMA (Tohoku University)

1. はじめに

日本伝熱学会の会員である本誌の読者は、黒体放射の波長分布を表すプランクの法則を知っていると思います。

誰でも知っているプランクの法則をきちんと導くことは結構大変なのです。さらに、ステファン・ボルツマン定数が実験値ではなく、光速などの物理定数から導くことができる値であるということも、意外と知られていません。詳しくは、花村克悟先生が執筆された教科書[1]や拙書[2]をご覧ください。

1900年に発表されたプランクの法則は、ふく射伝熱に不可欠だけでなく、その後大きな発展を遂げた量子力学の基礎となる発見でもありました。本稿では、プランクの法則の背景とプランクの着想を著者の独断と偏見を交えて述べたいと思います。

2. 歴史的背景

19世紀後半には、産業革命に端を発した古典熱力学が完成され、新たにボルツマンによる統計力学が提唱されていました。また、マクスウエル光の電磁波説など、プランクの法則導出の基礎となる概念が出はじめていました[3]。

当時、ドイツは、産業革命に乗り遅れた後発として、産業振興、特に鉄の生産に邁進していました。良質の鉄を作るためには温度の正確な測定が不可欠です。その要請の下で黒体放射の正確な測定がなされました。図1は、LummerとPringsheimが測定した黒体放射分布[4]です。当時としては高精度で、水蒸気と二酸化炭素による波長 $2.7\mu\text{m}$ と $4.3\mu\text{m}$ 近傍の吸収も正確に、かつ、ごまかさずに示されています。この実験データがプランクの法則誕生の重要な要素となりました。

近代科学の発見は、それ自体で生まれることは希で、産業や社会基盤の要請と密接に結びついて

いることが多いようです。さて、プランクの法則から100年が過ぎ、今世紀の大発見はどこから生まれるのでしょうか。

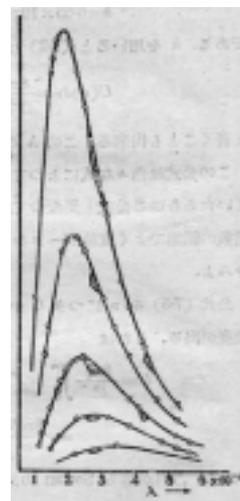


図1. 黒体放射分布の実験式 (文献[4]より引用)

3. プランクの法則は実験データの 内挿式から生まれた

当時、ステファン・ボルツマンの法則やウイーンの変位則は、既に導出されていました。しかし、図1を説明する理論は、ウイーンをはじめとした多くの科学者の試みにも関わらずなかなか生まれませんでした。

プランクは、現場の技術者が行う手法である、実験データを内挿するカーブフィッティングの式としてプランクの法則を得ました。それも、当時あまり評判が良くなかったウイーンの式(1)の分母に (-1) を加えることによってプランクの法則の式(2)を生み出したのでした。なんと安易なことでしょうか。

$$E_b(\lambda) = \frac{a}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{b}{\lambda T}\right)} \quad (\text{ウイーン}) \quad (1)$$

$$E_b(\lambda) = \frac{8\pi c_0 h}{\lambda^5} \frac{1}{\exp\left(\frac{c_0 h}{k\lambda T}\right) - 1} \quad (\text{プランク}) \quad (2)$$

ただし、式(2)中の波長 λ と温度 T 以外のパラメータは、はじめ実験定数でした。

もし、プランクがこの実験式に満足してしまえば、彼は後生に名を残さなかったでしょう。プランクを偉大ならしめたのは、この「幸運にも見つけた内挿式」の発表後、彼の全能力を傾注した「不眠不休の数週間の後に」[4]エネルギー量子という考えに到達したことです。

プランクは、空洞内の電磁波は、空洞壁の定在波の集合としてとらえることができ、その定在波のエネルギーは、ボルツマンの法則に従うこと、さらに、振動数 ν の定在波のエネルギー強度（振幅）は、連続ではなく飛び飛びの値を取るという仮定を導入しました。ここで、波動の最小エネルギー単位 $h\nu$ を導入し、式(2)のプランクの法則を導出したのでした[1], [2]。

プランクは、式(2)中の h と k が普遍的な自然定数であることを発見しました。この定数は、後にプランク定数とボルツマン定数をいわれるものです。この導出は、プランクが1900年10月に内挿式を発表した、わずか2ヶ月後に発表されました。

4. エネルギー量子の概念はどうして生まれたか

プランクは、 h が自然定数であるという発見を身内には「コペルニクス以来最大の発見」と言っていたように[5]、この発見が大変重要なものであることを認識していました。

では、「自然は飛躍せず」という当時の古典的な基本原理を破る最小エネルギー単位に、プランクはどうしてたどり着いたのでしょうか。以下に、著者の独断と偏見による推測を展開します。

当時、空洞内のふく射が、定在波の集合として表すことができることは、既に知られていました。後に、ジーンズが、この仮定とエネルギー連続の仮定の下に、レーリー・ジーンズの式を導いています。プランクもこの仮定を採用しました。

当時、連続であると考えられていたエネルギーが飛び飛びの値を取ることに気付いたのは、プランクが、若いときに没頭した音楽理論が影響していると考えます。つまり、音も定在波が存在しますが、定在波は元々飛び飛びの値を取り、中間の音程は存在しません。エネルギーが飛び飛びの値を取りうるということは、定在波の理論からも類推できたのではないのでしょうか。そのことは、エネルギー最小単位が $h\nu$ と表され、プランク定数

と振動数との積で表されることから想像できます。

ちなみに、空洞放射はプランクが導出したエネルギー量子の概念に加えて、「空洞が放射電磁波の波長に比べて著しく大きい」という仮定が暗黙に入っています。波長に比べて大きくない空洞から放射される熱ふく射は、プランクの法則を満足しません[6]。

5. プランク定数

プランクは学者として真摯で控えめの人でした。彼が発見した新しい定数 h と k を”Hierbei, sind h und k universelle Constante”と述べていますが、名前は付けていません。彼が後年表した著書でも、 h は「the quantity」として記述されています[7]。

定数 h をプランク定数と呼ぶようになったのは、後生の研究者達です。

伝熱の分野では、抜山四郎先生が発見したプール沸騰の特性を Nukiyama's pool boiling curve として外国の教科書でも紹介されています。でも、なぜか日本の沸騰伝熱研究者はこの言葉を使いたがりません。日本の伝熱が世界に問うた業績を日本の研究者が継承しないのは何となく寂しい感じがします。こんなことを感じているのは東北大に所属する私だけでしょうか。ちなみに、私は抜山先生の弟子ではありませんが。

参考文献

- [1] 日本機械学会, JSME テキストシリーズ「伝熱工学」, 第4章, (2005) 102.
- [2] 円山重直, 光エネルギー工学, 第2章, 養賢堂 (2004), 17.
- [3] 天野清, 熱輻射論と量子論の起源, 大日本出版, (1943).
- [4] 朝永振一郎, 量子力学(1), 東西出版社, (1948), 38.
- [5] A. ヘルマン, プランクの生涯, 東京出版社, (1977), 39.
- [6] Maruyama, S. et al., Applied Physics Letters, **79-9**, (2001), 1393.
- [7] Planck, M., The Theory of Heat Radiation, P. Blakinston's Son & Co., (1914).

行事カレンダー

行事カレンダー

本会主催行事

| 開催日 | | 行事名 (開催地, 開催国) | 申込締切 | 原稿締切 | 問合せ先 | 掲載号 |
|-------|-----------------|-----------------------------------|----------|----------|--|-----|
| 2005年 | | | | | | |
| 6月 | 6日(月)～ 8日(水) | 第42回日本伝熱シンポジウム (仙台国際センター, 仙台市) | '05.1.29 | '05.3.14 | 〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1 東北大学大学院工学研究科 化学工学専攻 内 第42回日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局 Fax: 022-217-6165 E-mail: thermo42@tranpo.che.tohoku.ac.jp | |

本会共催, 協賛, 後援行事

| 開催日 | | 行事名 (開催地, 開催国) | 申込締切 | 原稿締切 | 問合せ先 | 掲載号 |
|-------|-------------------|--|----------|-----------|---|-----|
| 2005年 | | | | | | |
| 4月 | 17日(日)～ 21日(木) | 6th World Conference on Experimental Heat Transfer Fluid Mechanics and Thermodynamics (Hotel Taikanso, Matsushima, Miyagi, Japan) | | '04.12.15 | 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学大学院工学系研究科 笠木 伸英 TEL:03-5841-6417 FAX:03-5800-6999 kasagi@thtlab.t.u-tokyo.ac.jp 〒980-8577 仙台市青葉区片平2-1-1 東北大学流体科学研究所極限流研究部門 圓山 重直 TEL/FAX: 022-217-5243 maruyama@ifs.tohoku.ac.jp URL: http://pixy.ifs.tohoku.ac.jp/exhft6/index.html | |
| 4月 | 20日(水)～ 22日(金) | 第5回2005熱設計対策技術シンポジウム(幕張メッセ 千葉) | | | 〒105-8522 東京都港区芝公園3-1-22 社団法人 日本能率協会 産業振興本部 産業情報推進部 熱設計・対策技術シンポジウム事務局 新井・加藤 TEL:03-3434-1410 FAX:03-3434-3593 | |
| 4月 | 20日(水)～ 22日(金) | 第39回空調和・冷凍連合講演会 (東京海洋大学 東京都) | | | 〒169-0074 東京都新宿区北新宿1-8-1 中島ビル3階 社団法人 空気調和・衛生工学会 事業グループ 高柳 嘉治 TEL:03-3363-8261 FAX:03-3363-8266 e-mail: takayanagi@shase.or.jp | |
| 4月 | 23日(土) | 日本混相流学会「インターナショナル・レクチャー・コース」 混相流実験の進展(噴霧・気泡流動・沸騰現象の本質に迫る) (東京電力技術開発センター 横浜市) | | | 〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1 東京工業大学 原子炉光学研究所 木倉宏成 Tel:03-5734-3063 Fax:03-5734-2959 E-mail: kikura@nr.titech.ac.jp | |
| 5月 | 10日(火)～ 11日(水) | P I V (粒子画像流速計)の基礎と応用 (工学院大学 東京都) | | | 〒114-0034 東京都北区上十条3-29-20-103 社団法人 可視化情報学会 TEL:03-5993-5020 FAX:03-5993-5026 E-mail: info@vsj.or.jp URL: http://www.vsj.or.jp | |
| 5月 | 14日(土) | 第22回睡眠環境シンポジウム (アルカディア市谷 東京都) | '05.2.28 | '05.3.31 | 〒171-0022 東京都豊島区南池袋3-18-40 SHIMA ビル2F ヤカタ(株)第22回睡眠環境シンポジウム実行委員会 TEL:03-5960-7756 FAX:03-5960-7785 E-mail: info@sleepsupport.info | |
| 5月 | 18日(水)～ 19日(木) | 日本機械学会関西支部第275講習会 「構造・強度設計における数値シミュレーションの基礎と応用」 (大阪科学技術センター 大阪市) | | | 〒550-0004 大阪市西区靱本町1-8-4 大阪科学技術センタービル内 社団法人 日本機械学会関西支部 TEL:06-6443-2073 FAX:06-6443-6049 E-mail: jsme@soleil.ocn.ne.jp | |
| 7月 | 6日(水)～ 7日(木) | 日本機械学会 No.05-50 講習会 流体力学基礎講座 (日本機械学会会議室 東京都) | | | 〒160-0016 東京都新宿区信濃町35 信濃町煉瓦館5階 社団法人 日本機械学会 事務局 小阪雅裕 TEL:03-5360-3505 FAX:03-5360-3509 E-mail: kosaka@jsme.or.jp | |

行事カレンダー

| | | | | | | | |
|-------|-------------------------|---|-----------|-----------|---|--|--|
| 7月 | 14日(木) ～ 15日(金) | 日本機械学会関西支部第277回講習会 「設計に使える熱流体解析の基礎と応用」(大阪科学技術センター 大阪市) | | | 〒550-0004 大阪市西区靱本町1-8-4 大阪科学技術センタービル内 社団法人 日本機械学会関西支部 TEL:06-6443-2073 FAX:06-6443-6049 E-mail:jsme@soleil.ocn.ne.jp | | |
| 7月 | 25日(月) ～ 27日(水) | 第33回可視化情報シンポジウム(工学院大学 東京都) | *05.2.25 | *05.5.13 | 〒114-0034 東京都北区上十条3-29-20-103 社団法人 可視化情報学会 事務局 柿沼 肇 TEL:03-5993-5020 FAX:03-5993-5026 E-mail: info@vsj.or.jp URL: www.vsj.or.jp | | |
| 8月 | 1日(月)～ 3日(水) | 日本混相流学会 年会講演会 2005(東京)(工学院大学 東京都) | *05.3.31 | *05.6.6 | 〒192-0015 東京都八王子市中野町2665-1, 工学院大学工学部機械工学科伝熱工学研究室 室内 日本混相流学会年会講演会 2005 実行委員会事務局 大竹浩靖 TEL:0426-28-4172 FAX:0426-27-2360 E-mail: at10988@ns.kogakuin.ac.jp URL:http://www.jsmf.gr.jp/meet2005 | | |
| 8月 | 3日(水) | 第24回混相流シンポジウム(工学院大学 東京都) | | | 同上 | | |
| 8月 | 8日(月)～ 9日(火) | エコトピア科学に関する国際シンポジウム 2005(ISET05) (名古屋大学 名古屋市) | *05.2.15 | *05.6.30 | 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学エコトピア科学研究機構 ISET05事務局 総務担当 長谷川 豊 E-mail: iset05@esi.nagoya-u.ac.jp TEL: 052-789-2711 FAX: 052-789-3910 | | |
| 9月 | 2日(金) | 日本熱電学会 熱電講習会 2005—熱電変換の基礎と応用— (名古屋大学野依記念学術交流館カンファレンスホール 名古屋市) | | | 〒464-8603 名古屋市千種区不老町名古屋大学大学院工学研究科 河本邦仁 Tel:052-789-3327 Fax:052-789-3201 E-mail: morita@mail.apchem.nagoya-u.ac.jp | | |
| 9月 | 5日(月)～ 7日(水) | 日本流体力学会年会 2005(工学院大学新宿校舎) | *05.4.30 | | 〒152-0011 東京都目黒区原町1-16-5 社団法人 日本流体力学会 TEL:03-3714-0427 FAX:03-3714-0434 E-mail:jsfm@rf7.so-net.ne.jp | | |
| 9月 | 12日(月) ～ 15日(木) | 第3回人間—生活環境系国際会議(文化女子大学 東京都) | *04.11.20 | *05.3.31 | 〒151-8523 東京都渋谷区代々木3-22-1 文化女子大学 被服衛生学研究内 第3回人間—生活環境系国際会議事務局 Tel&Fax: 03-3299-2336 e-mail: iches2005@bunka.ac.jp URL: http://jhes-jp.com/iches05 | | |
| 10月 | 20日(木) ～ 21日(金) | 第9回スターリングサイクルシンポジウム(海上技術安全研究所 三鷹市) | *05.5.27 | *05.9.9 | 〒160-0016 東京都新宿区信濃町35番地 信濃町煉瓦館5階 社団法人 日本機械学会 担当 滝本 TEL:03-5360-3504 e-mail: takimoto@jsme.or.jp | | |
| 10月 | 31日(月) ～ 11月1日(火) | 可視化情報学会全国講演会(新潟2005) (朱鷺メッセ 新潟市) | | | 〒950-2181 新潟市五十嵐2の町8050 Tel:025-262-6726 Fax:025-262-6726 E-mail: fujisawa@eng.niigata-u.ac.jp 藤澤延行 Tel:025-262-7266 Fax:025-262-7268 E-mail akabayas@cc.niigata-u.ac.jp 赤林伸一 | | |
| 11月 | 5日(土), 6日(日) | 熱工学コンファレンス(岐阜大学 岐阜市) | *05.6.10 | *05.9.9 | 〒501-1193 岐阜市柳戸1-1 岐阜大学工学部機械システム工学科 熱工学コンファレンス 2005 実行委員会 熊田 雅彌, 檜和田 宗彦 Tel:058-293-2530(熊田), -2531(檜和田) Fax:058-230-1892 URL:http://flame.mech.gifu-u.ac.jp/thermal2005/index.html | | |
| 12月 | 8日(木) ～ 9日(金) | The Fifth International Symposium on Advanced Fluid Information (AFI2005) | | | 東北大学 流体科学研究所 AFI2005 実行委員 太田 信 Tel:022-217-5309 Fax:022-217-5311 E-mail:ota@fmail.ifs.tohoku.ac.jp | | |
| 2006年 | | | | | | | |
| 9月 | 17日～ 21日 | The Seventeenth International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-17) | | *06.03.18 | 〒939-0398 富山県射水郡小杉黒河 5180 富山県立大学工学部 機械システム工学科 教授 石塚 勝 Tel:0766-56-7500 Fax:0766-56-6131 e-mail: ishizuka@pu-toyama.ac.jp | | |

IHTC-13: CALL FOR PAPERS Sydney, Australia 13 - 18, August

The International Heat Transfer Conference series has existed for over 40 years, with conferences being held every four years since 1962.

It is the most prestigious forum for the exposure and exchange of ideas, methods and results in all branches of heat and mass transfer.

We are pleased to announce that IHTC-13 will take place in Sydney, Australia, at the Convention and Exhibition Centre, from 13-18 August, 2006.

There will be invited keynote lectures, contributed poster presentations, discussion panels and an open forum for research in progress.

In parallel with the conference, ARBS-2006: The Air Conditioning, Refrigeration and Building Services Exhibition will take place in the adjacent Exhibition Centre.

ARBS is the largest HVAC & R and Building Services trade exhibition in the Southern Hemisphere and in 2006 will be expanded to include all types of heat transfer equipment.

The Organising Committee now invites abstracts on all aspects of heat and mass transfer: fundamental and applied; analytical, computational and experimental.

The closing date for submission of abstracts is 31 July 2005.

For more information on the Conference, and to submit an abstract, please visit the website:

<http://www.ihtc-13.com>



Conference Organisers:

Graham de Vahl Davis, Chair:

Tel: +61 2 9327 5706

Fax: +61 2 9327 5710

Email: ihtc-13@unsw.edu.au

Eddie Leonardi, Secretary:

Tel: +61 2 9385 4252

Fax: +61 2 9663 1222

Email: e.leonardi@unsw.edu.au

Conference Managers:

Tour Hosts Pty. Ltd.

Tel: +61 2 9265 0700

Fax: +61 2 9267 5443

Email: ihtc-13@tourhosts.com.au



事務局からの連絡

1. 学会案内と入会手続きについて

【目的】

本会は、伝熱に関する学理技術の進展と知識の普及、会員相互及び国際的な交流を図ることを目的としています。

【会計年度】

会計年度は、毎年4月1日に始まり翌年3月31日までです。

【会員の種別と会費】

| 会員種 | 資格 | 会費(年額) |
|------|--|-----------------------|
| 正会員 | 伝熱に関する学識経験を有する者で、本会の目的に賛同して入会した個人 | 8,000円 |
| 賛助会員 | 本会の目的に賛同し、本会の事業を援助する法人またはその事業所、あるいは個人 | 1口 30,000円 |
| 学生会員 | 高専、短大、大学の学部および大学院に在学中の学生で、本会の目的に賛同して入会した個人 | 4,000円 |
| 名誉会員 | 本会に特に功労のあった者で、総会において推薦された者 | 8,000円 但し、70才以上は0円 |
| 推薦会員 | 本会の発展に寄与することが期待できる者で、当該年度の総会において推薦された者 | 0円 |

【会員の特典】

会員は本会の活動に参加でき、次の特典があります。

1. 「伝熱」, 「THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」を郵送します。

(本年度発行予定：5, 7, 9, 11, 1, 3月号)

- ・正会員、学生会員、名誉会員、推薦会員に1冊送付
- ・賛助会員に口数分の冊数送付

2. 「日本伝熱シンポジウム講演論文集」を無料でさしあげます。

- ・正・学生・名誉・推薦の各会員に1部、賛助会員に口数分の部数(但し、伝熱シンポジウム開催の前年度の3月25日までに前年度分までの会費を納入した会員に限る)

【入会手続き】

正会員または学生会員への入会の際は、入会申込用紙にご記入の上、事務局宛にファックスまたは郵送で送り、郵便振替にて当該年度会費をお支払い下さい。賛助会員への入会の際は、入会申込用紙にご記入の上、事務局宛にファックスまたは郵送でお送り下さい。必要があれば本会の内容、会則、入会手続き等についてご説明します。賛助会員への申込みは何口でも可能です。

(注意)

- ・申込用紙には氏名を明瞭に記入し、難読文字にはJISコードのご指示をお願いします。
- ・会費納入時の郵便振替用紙には、会員名(必要に応じてフリガナを付す)を必ず記入して下さい。会社名のみ記載の場合、入金の手続きができず、会費未納のままとなります。
- ・学生会員への入会申込においては、指導教官による在学証明(署名・捺印)が必要です。

2. 会員の方々へ

【会員増加と賛助会員口数増加のお願い】

個人会員と賛助会員の増加が検討されています。会員の皆様におかれましても、できる限り周囲の関連の方々や団体に入会をお誘い下さるようお願いいたします。また、賛助会員への入会申込み受付におきまして、A(3口)、B(2口)、C(1口)と分けております。現賛助会員におかれましても、できる限り口数の増加をお願いいたします。

【会費納入について】

会費は当該年度内に納入してください。請求書はお申し出のない限り特に発行しません。会費納入状況は事務局にお問い合わせ下さい。会費納入には折込みの郵便振替用紙をご利用下さい。その他の送金方法で手数料が必要な場合には、送金者側の負担にてお願い致します。フリガナ名の検索によって入金の手続きを行っておりますので会社名のみで会員名の記載がない場合には未納扱いになります。

【変更届について】

(勤務先, 住所, 通信先等の変更)

勤務先, 住所, 通信先等に変更が生じた場合には, 巻末の「変更届用紙」にて速やかに事務局へお知らせ下さい. 通信先の変更届がない場合には, 郵送物が会員に確実に届かず, あるいは宛名不明により以降の郵送が継続できなくなります. また, 再発送が可能な場合にもその費用をご負担頂くこととなります.

(賛助会員の代表者変更)

賛助会員の場合には, 必要に応じて代表者を変更できます.

(学生会員から正会員への変更)

学生会員が社会人になられた場合には, 会費が変わりますので正会員への変更届を速やかにご提出下さい. このことにつきましては, 指導教官の方々からのご指導をお願いします.

(変更届提出上の注意)

会員データを変更する際の誤りを防ぐため, 変更届は必ず書面にて会員自身もしくは代理と認められる方がご提出下さるようお願いいたします.

【退会届について】

退会を希望される方は, 退会日付けを記した書面にて退会届(郵便振替用紙に記載可)を提出し, 未納会費を納入して下さい. 会員登録を抹消します.

【会費を長期滞納されている方へ】

長期間, 会費を滞納されている会員の方々は, 至急納入をお願いします. 特に, 平成12年度以降の会費未納の方には「伝熱」「THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」の送付を停止しており, 近く退会処分が理事会で決定されます.

3. 事務局について

次の業務を下記の事務局で行っております.

事務局

《業務内容》

- i) 入会届, 変更届, 退会届の受付
- ii) 会費納入の受付, 会費徴収等
- iii) 会員, 非会員からの問い合わせに対する応対, 連絡等
- iv) 伝熱シンポジウム終了後の「講演論文集」の注文受付, 新入会員への学会誌「伝熱」, 論文集「THERMAL SCIENCE AND ENGINEERING」発送, その他刊行物の発送
- v) その他必要な業務

《所在地》

〒113-0034 東京都文京区湯島2-16-16
社団法人 日本伝熱学会
TEL, FAX : 03-5689-3401
E-MAIL: htsj@asahi-net.email.ne.jp
HP: <http://www.htsj.or.jp>
(土日, 祝祭日を除く, 午前10時~午後5時)

(注意)

- 1. 事務局への連絡, お問い合わせには, 電話によらずできるだけ郵便振替用紙の通信欄やファックス等の書面にてお願いします.
- 2. 学会事務の統括と上記以外の事務は, 下記にて行なっております.

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1
東京大学大学院工学系研究科機械工学専攻
笠木 伸英
TEL: 03-5841-6417 FAX: 03-5800-6999
E-Mail : htsj@thtlab.t.u-tokyo.ac.jp

「伝熱」会告の書き方

大きさは, 縦 115mm 以内, 横 170mm 以内に収まるようにしてください.
この範囲に入らないものは, 「伝熱」原稿の書き方に従ってください.

「伝熱」会告の書き方のテンプレート (MS-WORD) は, 下記の伝熱学会のホームページよりダウンロードできます.

伝熱学会のホームページ : http://www.htsj.or.jp/den_guide.html

日本伝熱学会正会員・学生会員入会申込み・変更届出用紙

(右の該当に○を記入)

1. 正会員・学生会員入会申込書
2. 変更名 (書面による届出のみ受付け)

(注意)

- ・楷書体で明瞭に記入
・通信文は余白に記入
・氏名にふりがなを付す
・申込時に郵便振替にて会費納入

| | | | | | | |
|----|------------------|--------|--------------------|---|---------------|-------|
| 0 | 申込年月日 | | 年 | 月 | 日 | |
| 1 | 会員資格 | 正・学 | | | | |
| 2 | 氏名 | | | | | |
| 3 | ふりがな | | | | | |
| 4 | 生年月日 | 1 9 | 年 | 月 | 日 | |
| 5 | * 勤務先・学校 | 名称 | | | | |
| 6 | | 〒 | — | | | |
| 7 | | 所在地 | | | | |
| 8 | | TEL | | | | |
| 9 | | FAX | | | | 共通・専用 |
| 10 | | 電子メール | | | | |
| 11 | 自宅 | 〒 | — | | | |
| 12 | | 住所 | | | | |
| 13 | | TEL | | | | |
| 14 | | FAX | | | | |
| 15 | 通信先** | 勤務先・自宅 | 自宅情報を会員名簿に記載しない... | | | |
| 16 | 学位 | | | | | |
| 17 | 最終出身校 | | | | | |
| 18 | 卒業年次 | T・S・H | | | | |
| 19 | 分専 | 基礎的分野 | | | ←(下記の専門分野の番号) | |
| 20 | 野門 | 応用分野 | | | | |
| 21 | 学生会員の場合:指導教官名*** | | | | | 印 |

※専門分野

基礎的分野

- 1: 強制対流 2: 自然対流 3: 表面張力駆動対流 4: 沸騰・蒸発・凝縮 5: 混相流
6: 融解・凝固 7: 熱伝導 8: 放射 9: 反応・燃焼 10: 物質移動
11: 多孔質伝熱 12: 極低温 13: 熱物性 14: 計測・可視化 15: 数値シミュレーション
16: EHD・MHD 17: 混合物 18: マイクロ伝熱 19: 分子スケール伝熱 20: その他 ()

応用分野

- 1: 熱交換器 2: 畜熱 3: 冷凍・空調 4: 電子機器・情報機器 5: ヒートパイプ・熱サイフォン
6: 航空・宇宙機器 7: 海洋機器 8: 火力発電プラント 9: ガスタービン 10: 地熱
11: 燃料電池 12: 熱電変換 13: エネルギー貯蔵 14: 原子力発電プラント 15: 製鉄
16: 材料・加工 17: 流動層 18: 廃棄物処理 19: 生体・人間熱科学 20: バイオ・食品
21: エンジン 22: 住環境 23: 都市環境 24: 地球環境 25: 建築・土木
26: MEMS 27: レーザー 28: グリーンエネルギー・小型分散エネルギー 29: その他 ()

*) 学生会員入会申込者は学校名, 学部, 学科, 研究室名, 学年 (M2, D3 など) を記す.

**) 郵送物発送先として通信先を必ず記入する.

***) 学生会員入会申込者は, 指導教官の署名・捺印を受ける.

****) 会員名簿等作成時に自宅情報の掲載を希望しない場合はレ点をつける.

広告
センサテクノス

広告
テクノオフィス

広告
日本カノマックス

◇編集後記◇

福岡西方沖地震，JR の列車事故など，最近はあまりいいニュースがありません．特に，今まで他人事と思っていた大きな地震にはびっくりしました．大学では窓ガラスや壁にヒビが入って，現在修復が行われています．人間関係にもヒビが入っていますが，こちらは以前からのものなので，放っておくことにしています．

さて，早いもので，編集出版部会を担当してから2年が経過しました．今月号が最後の担当となります．この間，編集委員を初め，多数の方々のご協力を賜りました．厚くお礼申し上げます．7月号からは，第44期の新メンバーでの編集となります．新編集長は，まさにこの仕事をするために生まれてきたようなアイデア抜群の方です．今後の「伝熱」に大いに期待してください．

本誌への投稿，また，本誌に対するご意見・ご要望などがございましたら，編集出版事務局または第44期編集出版部会委員までお寄せください．

| | | |
|--------------|-------|----------|
| 副会長 | 増岡 隆士 | 九州大学 |
| 部会長 | 高田 保之 | 九州大学 |
| 委員 | | |
| (理事) | 北村 健三 | 豊橋技術科学大学 |
| | 平田 哲夫 | 信州大学 |
| | 森 治嗣 | 東京電力 |
| (評議員) | 栗山 雅文 | 山形大学 |
| | 稲田 茂昭 | 群馬大学 |
| | 平澤 茂樹 | 神戸大学 |
| | 白樫 了 | 東京大学 |
| | 吉田 英生 | 京都大学 |
| | 田坂 誠均 | 住友金属 |
| | 石黒 博 | 九州工業大学 |
| (事務) | 久保田裕巳 | 九州大学 |
| TSE チーフエディター | | |
| | 西尾 茂文 | 東京大学 |
| TSE 出版担当 | | |
| | 永井 二郎 | 福井大学 |

2005年 5月 10日

編集出版事務局：〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1
九州大学 大学院工学研究院 機械科学部門
高田 保之 / 久保田裕巳
Tel : 092-642-3398 / -3402
Fax : 092-642-3400
e-mail: takata@mech.kyushu-u.ac.jp

複写される方に

本誌に掲載された著作物を複写したい方は、日本複写権センターと包括複写許諾契約を締結されている企業の従業員以外は、著作権者から複写権等の委託を受けている次の団体から許諾を受けて下さい。なお、著作物の転載・翻訳のような複写以外許諾は、直接本会へご連絡下さい。

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 3F
学術著作権協会 (Tel / Fax : 03-3475-5618)

アメリカ合衆国における複写については、次に連絡して下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.(CCC)
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA
Phone : +1-978-750-8400 Fax : +1-978-750-4744

Notice about photocopying

In order to photocopy any work from this publication, you or your organization must obtain permission from the following organization which has been delegated for copyright for clearance by the copyright owner of this publication.

Except in the USA

The Copyright Council of the Academic Societies (CCAS)
41-6 Akasaka 9-chome, Minato-ku, Tokyo 107-0052 Japan
Phone / Fax : +81-3-3475-5618

In the USA

Copyright Clearance Center, Inc. (CCC)
222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA
Phone : +1-978-750-8400 Fax : +1-978-750-4744

伝 熱

ISSN 1344-8692

Journal of the Heat Transfer Society of Japan
Vol. 44, No. 186

2005年5月発行

発行所 社団法人 日本伝熱学会
〒113-0034 東京都文京区湯島 2-16-16
電話 03(5689)3401
Fax. 03(5689)3401
郵便振替 00160-4-14749

Published by

The Heat Transfer Society of Japan
16-16, Yushima 2-chome, Bunkyo-ku,
Tokyo 113-0034, Japan
Phone / Fax : +81-3-5689-3401