

日本伝熱学会
創立50周年記念特別号

伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692 Vol. 51, No. 214
2012. 1

HTSJ

◆特集：創立50周年を迎えて

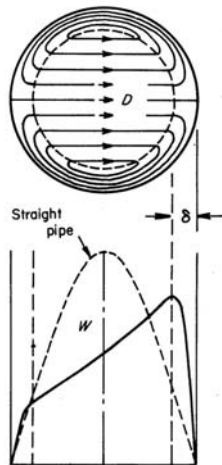


FIG. 3. Velocity distribution.

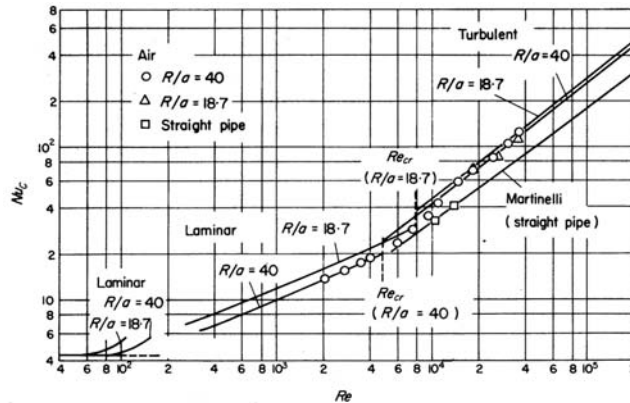


FIG. 9. Nusselt number in curved pipes of $R/a = 40$ and 18.7 .

(a) Laminar region

$$Nu_c = \frac{0.864}{\zeta} K^{1/2} (1 + 2.35K^{-1/2})$$

(b) Turbulent flow (For gases)

$$Nu_c = \frac{Pr}{26.2(Pr^{2/3} - 0.074)} Re^{4/5} \left(\frac{a}{R}\right)^{1/10} \times \left[1 + \frac{0.098}{\left\{ Re \left(\frac{a}{R}\right)^2 \right\}^{1/5}} \right]$$

Max Jakob 賞受賞者アーカイブ : 森 康夫教授

Max Jakob Memorial Award Archive : Professor Yasuo Mori

STUDY ON FORCED CONVECTIVE HEAT TRANSFER IN CURVED PIPES
(3RD REPORT, THEORETICAL ANALYSIS UNDER THE CONDITION OF
UNIFORM WALL TEMPERATURE AND PRACTICAL FORMULAE)

YASUO MORI and WATARU NAKAYAMA

Department of Mechanical Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan

Abstract—In the authors' previous reports, the theoretical and experimental studies on flow and temperature fields in a curved pipe were made under the condition of uniform heat flux. In the former part of the present report, a theoretical analysis is made about temperature field far downstream from the pipe inlet under the condition of uniform wall temperature, following the same procedure as in the previous papers. Nusselt number is found to be remarkably affected by a secondary flow due to curvature. The result shows that in the first-order approximation the Nusselt number of heat transfer in a curved pipe does not differ for uniform wall temperature or uniform heat flux case, in both laminar and turbulent regions.

In the latter part, the formulae of Nusselt numbers obtained by the authors' study are arranged so as to have simpler expression for a practical use.

It is also investigated what temperature should be chosen in calculation of physical properties when these Nusselt number formulae are used.

【*Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 10, pp. 681-695 (1967). より抜粋】

東京工業大学名誉教授森康夫先生は1988年度Max Jakob賞を受賞された。同賞の受賞にも深く関連する先生の代表的業績の一つが、ここに紹介した曲り管内の二次流れによる熱伝達に関する研究である。

井上 剛良 (東京工業大学)

Takayoshi INOUE (Tokyo Institute of Technology)

伝 熱

目 次

〈日本伝熱学会創立 50 周年記念〉

日本伝熱学会半世紀の歩み 1

〈50 周年記念伝熱セミナー報告〉

日本伝熱学会創立 50 周年記念伝熱セミナーの報告

.....宇高 義郎 (横浜国立大学), 大久保 英敏 (玉川大学)
 荒木 拓人 (横浜国立大学), 酒井 清吾 (横浜国立大学)
 浅岡 龍徳 (青山学院大学), 津島 将司 (東京工業大学) 16

〈特集 : 創立 50 周年を迎えて〉

沸騰研究の 50 年庄司 正弘 (神奈川大学) 21
 伝熱機器 50 年の進展中山 恒 (名誉会員) 30
 持続可能なイノベーション創出能力強化に貢献する伝熱工学と教育のすすめ
柘植 綾夫 (芝浦工業大学) 51

〈エデュケーションQ〉

エンリコ・フェルミ(1901~1954)の功績塩見 淳一郎 (東京大学) 55

〈国際活動・会議報告〉

第 4 回マイクロスケールの熱流動に関する国際会議高橋 厚史 (九州大学) 61

〈巻頭グラビア〉

Max Jakob 賞受賞者アーカイブ : 森 康夫教授井上 剛良 (東京工業大学) 表紙裏

〈行事カレンダー〉

..... 63

〈お知らせ〉

抜山記念賞募集のご案内 64
 第 49 回日本伝熱シンポジウムのご案内 66
 優秀プレゼンテーション賞 (第 49 回日本伝熱シンポジウム) について 70
 第 3 回国際伝熱フォーラムのご案内 71
 編集出版部会からのお知らせ 72
 編集出版部会ノート 77

Vol. 51, No. 214, January 2012

CONTENTS

<The 50th Anniversary>

The Fifty Years of the Heat Transfer Society of Japan	1
---	---

<Heat Transfer Seminar of HTSJ 50th Anniversary>

Report on the Heat Transfer Seminar of HTSJ 50 th Anniversary Yoshio UTAKA ¹ , Hidetoshi OHKUBO ² , Takuto ARAKI ¹ , Seigo SAKAI ¹ Tatsunori ASAOKA ³ , Shohji TSUSHIMA ⁴ (1 Yokohama National Univ., 2 Tamagawa Univ., 3 Aoyama Gakuin Univ. 4 Tokyo Inst. of Tech.)	16
--	----

<Special Issue>

A Review of Boiling Research in the Past Fifty Years Masahiro SHOJI (Kanagawa University)	21
Advances in Heat Transfer Equipment in Fifty Years Wataru NAKAYAMA (Honorary Member)	30
Thermal Engineering & Education Contributing to Sustainable Innovation Capability Ayao TSUGE (Shibaura Institute of Technology)	51

<Education Q>

A Meritorious Deed of Enrico Fermi (1901-1954) Junichiro SHIOMI (The University of Tokyo)	55
--	----

<Report on International Conference>

Report on the 4th International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale Koji TAKAHASHI (Kyushu University)	61
--	----

<Opening-page Gravure:heat-page>

Max Jakob Memorial Award Archive : Professor Yasuo Mori Takayoshi INOUE (Tokyo Institute of Technology)	Opening Page
--	--------------

<Calendar>	63
------------------	----

<Announcements>	66
-----------------------	----

<Note from the Editorial Board>	77
---------------------------------------	----



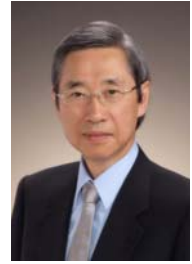
創立50周年記念
日本伝熱学会
半世紀の歩み

HTSJ

社団法人 日本伝熱学会

日本伝熱学会 50 周年を迎えて 第 50 期会長 笠木 伸英

1961 年 11 月に当時黎明期にあった伝熱学分野のフロンティアらによって組織化された日本伝熱研究会は、我が国の高度成長期から、オイルショックを経て世界一の省エネルギー国家を築いて今日に至るまで、伝熱学、伝熱技術の発展を支え、優れた人材を育て、世界の研究者との交流においては我が国を代表する学会として中心的役割を果たしてきました。この間、1994 年 9 月に(社)日本伝熱学会として法人化され、さらに来年には新公益法人として生まれ変わろうとしています。こうして本日、めでたく創立 50 周年を迎えたことは、誠にご同慶の至りでございます。未踏の科学技術に果敢に挑戦した多くの先達に学び、夢に胸を膨らませる若者を巻き込んで、領域を越えて学術の方向性を展望し、戦略的な学会活動を企画する良い機会と思います。我々、科学技術にたずさわる者は、恵まれたことに、公的資源を享受しながら研究開発に情熱を注ぎ、社会に役立つ確かなものを生み出す機会を与えられています。このような特権は、当然のことながら社会に対する重い責任も伴います。新世紀の日本伝熱学会は、そうした責任を自覚し、社会が期待する科学技術の継承と研究開発の役割を着実に果たしていく学会であって欲しいと願うところです。



ここに、全ての会員と共に、本学会が伝熱学を含め広く熱科学分野のリーディングソサエティとしての活動を一層充実させて、我が国の、そして世界の健全な発展に貢献するよう、英知を結集し、誠実さとチャレンジング精神をもって邁進することを誓います。

祝 辞 Minnesota 大学教授 Richard J. Goldstein

I am pleased to send greetings to the Heat Transfer Society of Japan on the occasion of your 50th anniversary.

I have had many interactions with Japan's heat transfer community dating back to the mid '60's when I made my first visit to Japan. Since then I have returned many times including a stay at the University of Tokyo with a grant from the JSPS. I have also had many excellent graduate advisees from Japan, all of whom returned to either teach, or work in industry or government labs.



My respect for Japanese heat transfer research dates back many years. Recently I re-read (in English translation) the elegant, classic and precise 1934 paper on the boiling curve by Shiro Nukiyama. Of course I have used many other excellent works by Japanese researchers. I have also been privileged to interact with such international luminaries in the thermal sciences as Professors Niichi Nishiwaki, Yoshiro Katto, Yasuo Mori, Masaru Hirata and Kenjiro Suzuki.

I am honored to send my hearty congratulations on this particular occasion and wish you many more years of continued success.

Sincerely,

Richard J. Goldstein



INTERNATIONAL CENTRE FOR HEAT AND MASS TRANSFER

On behalf of the International Centre for Heat and Mass Transfer, I am pleased to send greetings to the Heat Transfer Society of Japan, the representative organisation of the Japanese heat transfer research community, on the occasion of its 50th anniversary. In those 50 years, the Society has built an enviable reputation for the size and quality of its symposia and publications, as well as the number and professionalism of its membership. The Society's publications - Thermal Science and Engineering, now in its 19th volume, and the Journal of Thermal Science and Technology, now up to volume 6 - are read widely within and outside Japan for the high quality papers they contain.

ICHMT has had a long and cordial cooperation with HTSJ. We have co-sponsored some of the meetings organized by HTSJ and their members have regularly attended ICHMT meetings, both in Turkey and away. We warmly and strongly promote each other's professional activities.

We are delighted to congratulate HTSJ on this happy anniversary.

Graham de Vahl Davis
President, ICHMT



AIHTC

ASSEMBLY FOR INTERNATIONAL HEAT TRANSFER CONFERENCES

The Assembly of International Heat Transfer Conferences (AIHTC) is delighted to congratulate the Heat Transfer Society of Japan on celebrating its 50-year jubilee. The AIHTC was founded in Chicago in 1966, to sustain a worldwide forum for the presentation, discussion, and identification of future direction and priorities in the various domains of thermal science and engineering. Since its earliest days, the HTSJ has been a stalwart member of the AIHTC, participating in hosting the 5th International Heat Transfer Conference in Tokyo in 1974 and, along with the other 23 national organizations, nurturing and expanding international cooperation in thermal science and engineering. The invited Keynote lectures and numerous presentations by HTSJ members in the quadrennial IHTC's, along with the annual HTSJ National Heat Transfer Symposium of Japan and HTSJ's Thermal Science and Engineering journal, have defined Japan as one of the major international centers for heat transfer and thermal engineering research and development and contributed in a most profound way to the goals of the AIHTC.

Following the highly successful IHTC-14 in Washington DC, the AIHTC looks forward to an outstanding IHTC-15 in Kyoto in 2014, Chaired by Prof. Nobuhide Kasagi, current President of HTSJ, and to continuing contributions on the world stage by the Heat Transfer Society of Japan.

Avram Bar-Cohen, President
Assembly for International Heat
Transfer Conferences



祝 辞 名誉会員 西川 兼康

日本伝熱研究会が発足してから今年で 50 周年になることを報らされ、早くも 50 年が経過したかと正に今昔の感がある。

日本における伝熱学のはしりは、1931 年岩波書店より発刊された北海道大学大賀恵二教授の著書「傳熱諸論と其適用」であろう。研究面では東北大学抜山四郎教授の「沸騰特性曲線の研究(1934)」および九州大学山縣清教授の「非等温流体の管内層流熱伝達の研究(1940)」が日本の伝熱研究の黎明とすることができる。これら日本の伝熱学の先達に続いて伝熱の本格的な研究を推進されたのは東京大学 橘藤雄教授であろう。日本機械学会で「熱に関する講演会」が 1953 年初めて東京で開催されたのも橘藤雄教授の尽力によるものであり、熱の大家の教授と若手の研究者が一堂に会し、討論主体の講演会が実施され、日本の伝熱研究を刺激し、その後この熱に関する講演会が日本伝熱研究会発足の足掛かりとなった。

日本伝熱研究会が発足したのは 1961 年であり、日本伝熱研究会主催の第一回の伝熱シンポジウム（実行委員長 京都大学 水科篤郎教授）が 1964 年京都で開催され、上述の討論主体の形式で行われ、現在まで年 1 回日本各地で開催されている。1966 年には日本学術会議熱工学研究連絡委員会に伝熱分科会が設置され、国内組織の確立と国際対応の役割を果たした。日本伝熱研究会の設立は我が国の伝熱研究の急激な進展を促し、基本的な伝熱形態の解明に力が注がれ、1974 年には第 5 回国際伝熱会議（第 1 回は 1951 年にロンドンで開催）を東京で開催するまでに日本の伝熱研究のレベルが上がった。

日本伝熱学会創立五十周年を契機として、本学会がさらなる国際化を推進し、初心を忘れることなく、着実に進展することを期待する。



祝 辞 名誉会員 一色 尚次

思えば五十年前の更に数年前より、機械学会の熱部門の中で、橘藤雄先生、西脇仁一先生、内田秀雄先生等の東京大の先生方や、西の水科篤郎先生、佐藤俊先生、菅原菅雄先生、等々、更には東北方の抜山四郎先生、棚沢泰先生、坪内為雄先生、他にも名を挙げれば数名以上の活発な先生方があちこちでよく集会をされ、熱部門の中でも当時新しい研究部門であった熱伝達部門において、是非一つの小学会的な会合を作ろうではないか、という議論が活発になって来た。始めは東西北別々であったが、特に橘先生の御努力で、どうせなら日本全体で一つになろうということが進み、上記の先生方とそれ以外の甲藤好郎、森康夫、植田辰洋、平田賢、青木成文等若い先生方も協力して約半年間の折衝の上、遂に日本伝熱研究会を作ることが全会一致となり、本会が設立された。私も若い方の一員として努力できた事を誇る。



発足 (1961)

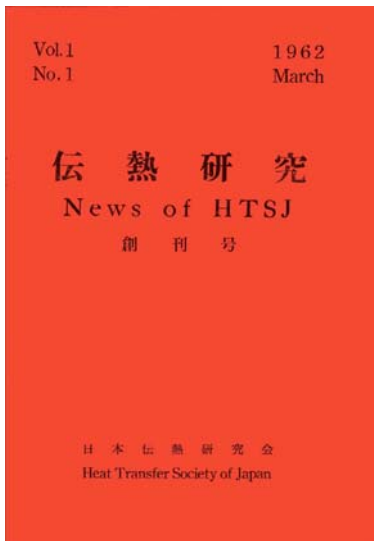
経緯 「日本伝熱研究会の設立の頃」甲藤 好郎 (伝熱研究第 41 号) より

1960 年 6 月 24 日	第一回世話人会	学士会館別館
1960 年 10 月 8 日	第二回世話人会	学士会館別館
1960 年 10 月 14 日	関西地区で研究会	
1960 年 12 月 2 日	全国的な調整のための会合	学士会館別館
1961 年 4 月 4 日	発起人会	慶応義塾大学三田
1961 年 11 月 22 日	日本伝熱研究会第 1 回総会	学士会館別館

会則

日本伝熱研究会会則	会 告																																																																																															
<p style="text-align: center;">日本伝熱研究会会則</p> <p>第 1 章 総 則</p> <p>第 1 条 本会は、日本伝熱研究会 (Heat Transfer Society of Japan) と称する。</p> <p>第 2 条 本会は、伝熱に関する学理技術の振興を促進すると共に、会員相互および国際的な連絡を計ることを目的とする。</p> <p>第 3 条 本会は、前条の目的を達成するため次の活動をおこなう。</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 研究会、講演会などの開催 2. 伝熱に関する連絡 (連絡誌の発行を含む) 3. 日本学術会議に協力し伝熱に関し必要な国際連絡 4. その他本会の目的に合致した活動 <p>第 2 章 会 員</p> <p>第 4 条 本会の趣旨に賛成して入会したものを会員とし、個人会員、特別会員および維持会員の三種とする。</p> <p>第 5 条 維持会員は本会の事業に賛成する団体で、おのおのその指名する代表者若干名を特別会員とする。</p>	<p style="text-align: center;">会 告</p> <p>1. 設立総会</p> <p>昭和 36 年 11 月 22 日 (水) 午前 10 時～午後 2 時、東京都文京区学士会館分館で設立のための第一回総会を開催した。参加者約 50 名。</p> <p>初代会長に小林明博士を選出、その他下記の通り、第一期役員を選出した。</p> <p style="text-align: center;">会則を審議決定</p> <p style="text-align: center;">第一期役員 (五十音順)</p> <table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="width: 10%;">会 長</td> <td style="width: 10%;">小 林</td> <td style="width: 10%;">明</td> <td style="width: 10%;">(トヨタ中研)</td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> <td style="width: 10%;"></td> </tr> <tr> <td>副 会 長</td> <td>橋</td> <td>藤</td> <td>雄</td> <td>(東大生研)</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="2">幹 事</td> <td>栗野</td> <td>誠</td> <td>(日 大)</td> <td>一色</td> <td>向次</td> <td>(運 研)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>内田</td> <td>秀雄</td> <td>(東 大)</td> <td>岡崎</td> <td>卓郎</td> <td>(東 大)</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>小笠原</td> <td>光信</td> <td>(阪 大)</td> <td>甲藤</td> <td>好郎</td> <td>(航技研)</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>国井</td> <td>大蔵</td> <td>(東 大)</td> <td>辻</td> <td>広</td> <td>(航 研)</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>西脇</td> <td>仁一</td> <td>(東 大)</td> <td>原</td> <td>朝茂</td> <td>(鉄 研)</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>水科</td> <td>篤郎</td> <td>(京 大)</td> <td>森</td> <td>康夫</td> <td>(東工大)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>連絡委員</td> <td>齋藤</td> <td>武</td> <td>(北 大)</td> <td>坪内</td> <td>為雄</td> <td>(東北大)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>〃</td> <td>佐藤</td> <td>俊</td> <td>(京 大)</td> <td>西川</td> <td>兼康</td> <td>(九 大)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>監 査</td> <td>柳 町</td> <td>政之助</td> <td>(柳町太陽エネルギー研)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>〃</td> <td>長 野</td> <td>悌 介</td> <td>(日 本 冷 蔵)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	会 長	小 林	明	(トヨタ中研)					副 会 長	橋	藤	雄	(東大生研)				幹 事	栗野	誠	(日 大)	一色	向次	(運 研)		内田	秀雄	(東 大)	岡崎	卓郎	(東 大)			小笠原	光信	(阪 大)	甲藤	好郎	(航技研)			国井	大蔵	(東 大)	辻	広	(航 研)			西脇	仁一	(東 大)	原	朝茂	(鉄 研)			水科	篤郎	(京 大)	森	康夫	(東工大)		連絡委員	齋藤	武	(北 大)	坪内	為雄	(東北大)		〃	佐藤	俊	(京 大)	西川	兼康	(九 大)		監 査	柳 町	政之助	(柳町太陽エネルギー研)					〃	長 野	悌 介	(日 本 冷 蔵)				
会 長	小 林	明	(トヨタ中研)																																																																																													
副 会 長	橋	藤	雄	(東大生研)																																																																																												
幹 事	栗野	誠	(日 大)	一色	向次	(運 研)																																																																																										
	内田	秀雄	(東 大)	岡崎	卓郎	(東 大)																																																																																										
	小笠原	光信	(阪 大)	甲藤	好郎	(航技研)																																																																																										
	国井	大蔵	(東 大)	辻	広	(航 研)																																																																																										
	西脇	仁一	(東 大)	原	朝茂	(鉄 研)																																																																																										
	水科	篤郎	(京 大)	森	康夫	(東工大)																																																																																										
連絡委員	齋藤	武	(北 大)	坪内	為雄	(東北大)																																																																																										
〃	佐藤	俊	(京 大)	西川	兼康	(九 大)																																																																																										
監 査	柳 町	政之助	(柳町太陽エネルギー研)																																																																																													
〃	長 野	悌 介	(日 本 冷 蔵)																																																																																													

伝熱研究発刊

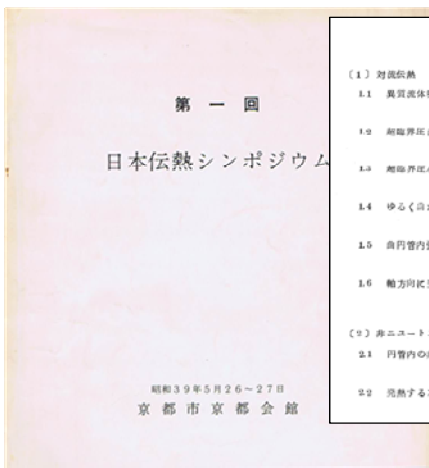


「伝熱研究」の発刊にあたりて.....	小林 明	1
日本伝熱研究会の発足に当つて.....	橋 藤雄	3
日本伝熱研究会・会則.....		5
論 説		
自動車工学における熱伝達の動向.....	小林 明	7
	藤掛賢司	
ニ ュ ー ス		
§ 1. 日本機械学会講演会ニュース.....		14
§ 2. 地方グループの活動.....		15
北海道グループ.....	齋藤 武	15
東北グループ.....	坪内為雄	17
関西グループ.....	佐藤 俊	19
§ 3. 外国ニュース		
"International Journal of Heat and Mass Transfer" への投稿について.....		21

10年まで (1961~1970)



第1回日本伝熱シンポジウム (1964年5月26日~27日, 京都)



目次	
(1) 対流伝熱	
1.1 異質流体吹き出し層流境界層の熱伝達	1
小野俊郎, 西郷仁一, 平田 賢	
1.2 層流境界層の自由対流熱伝達の解析	5
長谷川 祐, 吉岡啓介	
1.3 層流境界層内の管内乱流熱伝達に関する考察	9
山根 博	
1.4 ゆらぐ渦が渦管内の発達した層流熱伝達	13
河川 博	
1.5 自然対流強制対流熱伝達に関する研究(第2報:乱流域)	17
森 康夫, 中山 恒	
1.6 軸方向に空気の流れのある同心円管での回転体表面熱伝達率	21
山村龍男, 山崎正治	
(2) 非ニュートン流体への伝熱	
2.1 円管内の非ニュートン流動熱伝達	25
小竹 浩, 八田隆三	
2.2 発熱するスラリの熱伝達の研究(第5報:円管内乱流)	29
鼓美 裕, 松本隆一	

第2回国際伝熱会議

1961年8月28日~9月1日
 米国・コロラド・ボールダー
 論文総数 125編 (うち日本 11編)
 (および, 1962年1月, ロンドン)

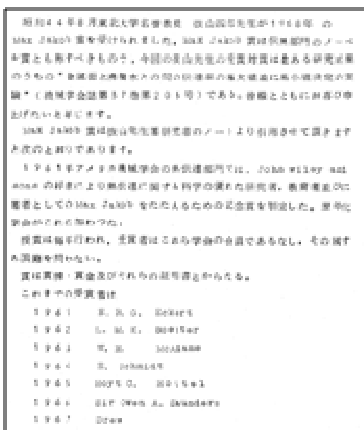
第3回国際伝熱会議

1966年8月8日~12日
 米国・シカゴ
 論文総数 177編 (うち日本 12編)

第4回国際伝熱会議

1970年8月31日~9月5日
 フランス・ヴェルサイユ
 論文総数 355編 (うち日本 17編)

抜山 四郎先生 Max Jakob 賞受賞 (1968)



第1回伝熱セミナー (1967年7月29~30日, 八王子)

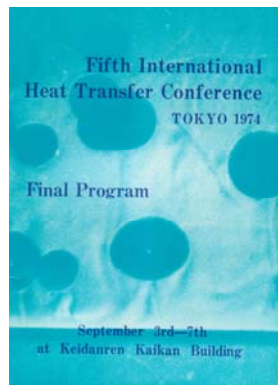
○話題と司会者・話題提供者	
1. 強制対流 (oddy diffusivity ϵ_H, ϵ_M について)	
司会 森 康夫 (東工大)	
	伊藤龍象 (京大) 加藤洋治 (東大)
2. 自然対流 (層流・乱流遷移について)	
司会 藤井 智 (九大)	
	赤木新介 (三菱) 内田 豊 (東工大)
3. 物質移動を伴う熱伝達 (境界層の構造について)	
司会 甲藤好郎 (東大)	
	鳥居 薫 (東大), 前田裕幸 (都立大), 吉川進三 (同志社大)
4. ふく射 (輝度のふく射)	
司会 国井大蔵 (東大)	
	越後亮三 (九大), 園友 孟 (京大), 玉木昭平 (船研)
5. 沸騰 (気泡の初生の機構)	
司会 一色富次 (船研)	
	秋山 守 (東大), 千葉徳男 (電力中研) 成合英樹 (船研), 鼓美 裕 (京大)

20 年まで (1971~1980)



第 5 回国際伝熱会議

日米セミナー (1980 年 9 月 29 日~10 月 2 日, 東京)



1974 年 9 月 3 日~7 日

東京・経団連会館

議長 西脇 仁一

水科 篤郎

米国側出席者 : W. Aung, R. J. Goldstein, E. R. Lady, N. Lior, W. M. Rohsenow, F. W. Staub, B. K. H. Sun, C.-L. Tien, R. Viskanta, D. L. Vrable, R. L. Webb, J. W. Westwater, W.-J. Yang (13 名)

日本側出席者 : 57 名

西脇 仁一先生 Max Jakob 賞受賞 (1979)

第 6 回国際伝熱会議

1978 年 8 月 31 日~9 月 5 日

カナダ・トロント

論文総数 395 編(うち日本 36 編)



30年まで (1981~1990)



日本伝熱学会学術賞・技術賞創設 (1989)

「日本伝熱研究会学術賞・技術賞」の創設にあたって

第21期会長 平田 賢 (東大)

昭和63年4月1日付書簡により、日本伝熱研究会第17期会長森康夫先生から、「日本における伝熱研究のますますの発展を鼓舞する」ため、伝熱に関する優れた学術研究論文の表彰を目的とする「或百万円」の拠金のお申し出を受けた。かねてより、このような賞の存在を夢に描いていた者として、早速幹事会にお諮りした。当初、森先生からは、1) 寄付者の名前を公表しないこと、11) 論文は伝熱現象を主体とするものに限定すること、などの御要望も寄せられていたが、越後事務局担当副会長の御努力により、幹事会の意向との調整がはかられ、最終的に平成元年1月の「伝熱研究」誌上に発表された公募要綱 (Vol. 18, No. 108, p. 197) のような形にまとまった。本研究会にとっては初めてのことであり、今後細部の変更等は予想されるものの、実行に移すことを急いだわけである。同時に、前年度、ある民間の研究所より寄付頂いた「百万円」を基金に、技術賞も併設することとし、極めて望ましい形の日本伝熱研究会賞が創設されたと考えている。

要綱にあるように、学術賞の対象は、「原則として日本伝熱シンポジウムにおいて発表され、国内外の審査のある論文集に掲載された優秀な伝熱研究論文」とし、また技術賞は「原則として、日本伝熱シンポジウムにおいて発表された優秀な伝熱技術」とする。選考は、無任所の副会長を主査とする、副査1名、委員4名の「表彰選考委員会」(任期1年)を構成して行われ、第21期は藤掛副会長が選考委員長となって、多数の応募の中から以下の2件を選び、総会の席上、論文賞副会長賞状と、技術賞に賞状お贈りされた。

森 康夫先生 ASME Heat Transfer Memorial Award 受賞 (1982), A. V. Luikov 記念賞受賞 (1988), Max Jakob 賞受賞 (1988)



伝熱セミナー



(写真は1989年、関東地区サマースクール、青梅)

第7回国際伝熱会議

1982年9月6日~10日
ドイツ・ミュンヘン工科大学
論文総数 454編(うち日本44編)
キーノート 22編

第8回国際伝熱会議

1986年8月17日~22日
米国・サンフランシスコ
論文総数 451編(うち日本46編)
キーノート 28編

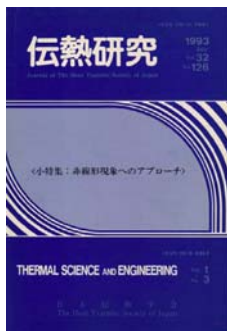
第9回国際伝熱会議

1990年8月26日~31日
イスラエル・エルサレム
論文総数 415編(うち日本46編)
キーノート 30編

40年まで (1991~2000)



Thermal Science and Engineering 創刊 (1993)



チーフエディタ

- 小竹 進 (1993~1996, 1997~2001)
- 土方 邦夫 (1996~1997)
- 西尾 茂文 (2001~2005)
- 河村 洋 (2005~2008)
- 門出 政則 (2008~)

名誉会員の顕彰 (1996~)

FILGAP 委員会設立 (1994)

学生会委員会設立 (2000)

キッズ・エネルギーシンポジウム (1996~)



第10回国際伝熱会議

1994年8月14日~18日

英国・ブライトン

論文総数 505編 (うち日本75編)

キーノート30編

第11回国際伝熱会議

1998年8月23日~28日

韓国・慶州

論文総数 525編 (うち日本94編)

キーノート22編

中山 恒先生 ASME Heat Transfer Memorial Award 受賞 (1992)

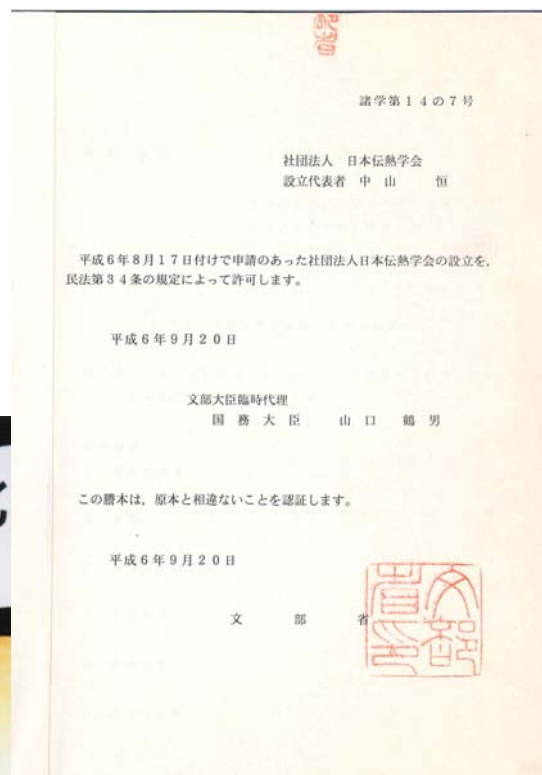


奨励賞の創設 (2001, Wen-Jei Yang 教授の寄附による)



社団法人化

- 将来問題検討委員会設置 (1987)
- 日本伝熱学会への名称変更 (1991)
- 財政基盤強化のための募金事業 (1993)
- 設立総会 (1994年5月19日)
- 社団法人化 (1994年9月20日)
- 記念講演会 (1994年10月11日)



最近の10年 (2001~2011)



学生優秀プレゼンテーション賞 (2001~)
 創立40周年記念講演 (2002年6月4日)
 会誌CD-ROM化 (2002)



TSE の日本機械学会英文誌 (J. Thermal Science and Technology) への合流 (2006~)



庄司 正弘先生 Nusselt-Reynolds 国際賞
 受賞 (2005)



国際伝熱フォーラム (IFHT)

第1回 2004年11月24日~26日
 京都リサーチパーク 議長 円山 重直
 論文数 150編, キーノート8編



第2回 2008年11月24日~26日
 東京大学生産技術研究所 議長 石塚 勝
 論文数 121編, キーノート7編

平田 賢先生 フランス熱学会国際賞受賞 (2002)
 A. V. Luikov 記念賞受賞 (2004)



笠木 伸英先生 William Begel メダル受賞 (2010)



第 46 回日本伝熱シンポジウム懇親会, 京都 (2009)



伝熱学会改革のための会長セッション(第 45 回日本伝熱シンポジウム, つくば, 2008 年 5 月 22 日)



第 12 回国際伝熱会議

2002 年 8 月 18 日～23 日
フランス・グルノーブル
論文総数 512 編 (うち日本 89 編)
キーノート 30 編

第 13 回国際伝熱会議

2006 年 8 月 23 日～28 日
オーストラリア・シドニー
論文総数 657 編 (うち日本 95 編)
キーノート 33 編

第 14 回国際伝熱会議

2010 年 8 月 8 日～13 日
米国・ワシントン DC
論文総数 854 編 (うち日本 103 編)
キーノート 31 編

第 15 回国際伝熱会議

2014 年 8 月 10 日～15 日
日本・京都



声 明

社団法人 日本伝熱学会

社団法人日本伝熱学会はエネルギー社会の学術基盤である伝熱学の進歩普及を通して、わが国と世界の発展に寄与する目的で集った学術・産業界の研究者および技術者の組織であり、創立以来約 50 年間にわたり、伝熱に関する学理および応用技術において世界をリードすると共に、それを支える人材を輩出してきた。

今夏、わが国では先進主要国による北海道洞爺湖サミットが開催され、エネルギー・環境問題が議論される予定である。この例を引くまでもなく、エネルギー・環境問題は地球レベルでの持続的発展の要として認識されるにいたっているが、当学会の担う伝熱学ないし熱学は本問題の解を追求する上で最も重要な科学技術の基礎をなす学理であり、当学会および会員はこれらを社会と世界に還元する使命を持つ。この使命の遂行にあたり、当学会が開催する日本伝熱シンポジウムや、刊行する学会誌・論文集を通じて発信・蓄積してきた膨大な知見と知識が、関連する学術・科学技術分野の発展をもたらし、かつ産業と行政によって積極的に活用されることを期待する。

同時に当学会は、エネルギー・環境社会における学会の社会的使命を一層自覚し、これまでの学理究明に加え、知の創造を社会的価値に結びつけることにより社会の要求に一層応え得るよう、公益への寄与度をさらに高めていくよう努める。その一環として、次代を担う子ども達の教育を重視し、行政と産業の支援の下に「キッズ・エネルギー・シンポジウム」の一層の充実等を通して、初等・中等教育段階からのエネルギー教育の充実に貢献する。

当学会は、前身である日本伝熱研究会の発足から数え、3 年後に創立 50 周年を迎える。こうした伝統と成果を背景に、関連学協会相互の連携の強化と併せ、社会からの多様な要求に応え得るよう学会内のサービス体制整備を積極的に進め、以て伝熱学・熱学の普及・向上を通じて日本及び世界の持続的発展の実現に向け責務を果たすことを公約するものである。

以上

2008 年 5 月 22 日

日本伝熱学会（研究会）データ

年度	正会員	学生会員	名誉会員	賛助会員	収入	日本伝熱シンポジウム							
						開催地	開催場所	実行委員長	論文数	参加人数			
設立				3社	3口								
S37					20								
38					24								
39					28	円	京都	京都 京都府会館	水科 篤郎	29	235		
40					32	713,245	東京	日本都市センター	内田 秀雄	38	233		
41					30	679,281	仙台	宮城県民会館	坪内 為雄	52	170		
42					36	782,573	名古屋	愛知県産業貿易館	杉山 幸男	57	297		
43					38	807,762	福岡	福岡市天神ビル	西川 兼康	71	255		
44					39	797,358	札幌	日本生命ビル講堂	斎藤 武	72	215		
45					40	1,414,786	東京	学士会館本館	一色 尚次	78	300		
46					39	1,335,610	大阪	大阪科学技術センター	小笠原 光信	106	385		
47					41	1,428,467	広島	中国新聞社ビル	頼実 正弘	118	351		
48					43	1,816,070	仙台	宮城県民会館	前田 四郎	107	363		
49					42	2,363,126	名古屋	愛知県中小企業センター	牧 忠	137	398		
50				35	43	3,969,544	福岡	電気ビル本館	長谷川 修	154	425		
51				35	45	3,684,134	神戸	兵庫県民会館・兵庫県私学会館	赤川 浩爾	173	505		
52				34	44	5,597,502	東京	日本都市センター	植田 辰洋	151	487		
53				33	43	5,831,663	札幌	北海道厚生年金会館	関 信弘	161	379		
54	910	48		32	43	6,301,282	広島	新八丁堀会館	頼実 正弘	167	501		
55	903	73		33	48	6,697,236	金沢	ホリデイ・イン金沢	平井 英二	198	431		
56	910	70		31	48	4,783,274	仙台	ホテル白萩	武山 斌郎	184	490		
57	910	76		33	50	8,201,028	名古屋	愛知厚生年金会館	高浜 平七郎	183	567		
58	950	86		31	49	6,132,399	福岡	福岡サンパレス	藤井 哲	193	559		
59	942	61		31	50	6,894,671	京都	国立京都国際会館	岐美 格	224	670		
60	991	64		32	53	6,860,863	東京	日本都市センター	片山 功藏	198	677		
61	996	75		32	53	6,720,592	札幌	北海道大学学術交流会館	石黒 亮二	249	499		
62	1,019	91		38	55	8,675,232	松山	愛媛県民文化会館	二神 浩三	232	615		
63	1,055	98		39	52	7,741,903	金沢	石川県厚生年金会館	林 勇二郎	296	746		
H1	1,083	125		39	52	7,550,617	仙台	宮城第一ホテル	永井 伸樹	280	739		
2	1,081	115		40	52	7,674,551	名古屋	愛知県厚生年金会館	架谷 昌信	351	982		
3	1,159	129		47	61	9,528,915	福岡	福岡リーセントホテル	伊藤 猛宏	303	802		
4	1,196	138		50	67	12,231,186	大阪	大阪国際交流センター	高城 敏美	427	1046		
5	1,194	108		51	60	12,781,459	横浜	横浜市開港記念会館	前田 昌信	349	943		
6	1,233	102	8	54	60	15,634,215	札幌	北海道大学百年記念会館・学術交流会館	福迫 尚一郎	404	762		
7	1,181	92	97	67	76	25,546,585	山口	山口県教育会館・山口県福祉会館	宮本 政英	432	935		
8	1,216	94	101	67	75	27,485,347	新潟	新潟県民会館・メルパルク新潟・土地改良会館	前川 博	437	897		
9	1,195	83	110	65	72	26,204,529	仙台	宮城第一ホテル	戸田 三朗	409	886		
10	1,190	79	116	65	70	30,369,067	名古屋	名古屋国際会議場	藤田 秀臣	487	1040		
11	1,184	89	110	59	64	40,803,656	熊本	KKRホテル熊本・熊本厚生年金会館	井村 英昭	414	780		
12	1,184	80	108	54	59	33,765,992	神戸	神戸国際会議場	藤井 照重	510	1092		
13	1,211	110	103	53	58	29,225,054	さいたま	ソニックシティー	望月 貞成	454	933		
14	1,214	125	103	50	55	29,707,158	札幌	厚生年金会館	工藤 一彦	420	725		
15	1,192	109	114	49	54	40,812,593	広島	広島国際会議場	菊地 義弘	405	770		
16	1,172	100	106	49	53	44,499,594	富山	富山国際会議場・富山県民会館	竹越 榮俊	414	780		
17	1,167	119	110	46	50	34,904,591	仙台	仙台国際センター	三浦 隆利	378	760		
18	1,174	127	106	45	47	33,945,501	名古屋	名古屋国際会議場	長野 靖尚	427	900		
19	1,164	124	99	47	49	30,235,741	長崎	長崎ブリックホール	茂地 徹	369	720		
20	1,128	153	107	44	46	35,620,274	つくば	つくば国際会議場	河村 洋	409	864		
21	1,098	169	108	44	47	29,691,574	京都	国立京都国際会館	牧野 俊郎	379	707		
22	1,094	160	109	44	47	28,142,666	札幌	札幌コンベンションセンター	近久 武美	364	698		
23	1,118	168	103	43	46		岡山	岡山コンベンションセンター	稲葉 英男	374	764		

歴代会長・副会長・理事

法人化前

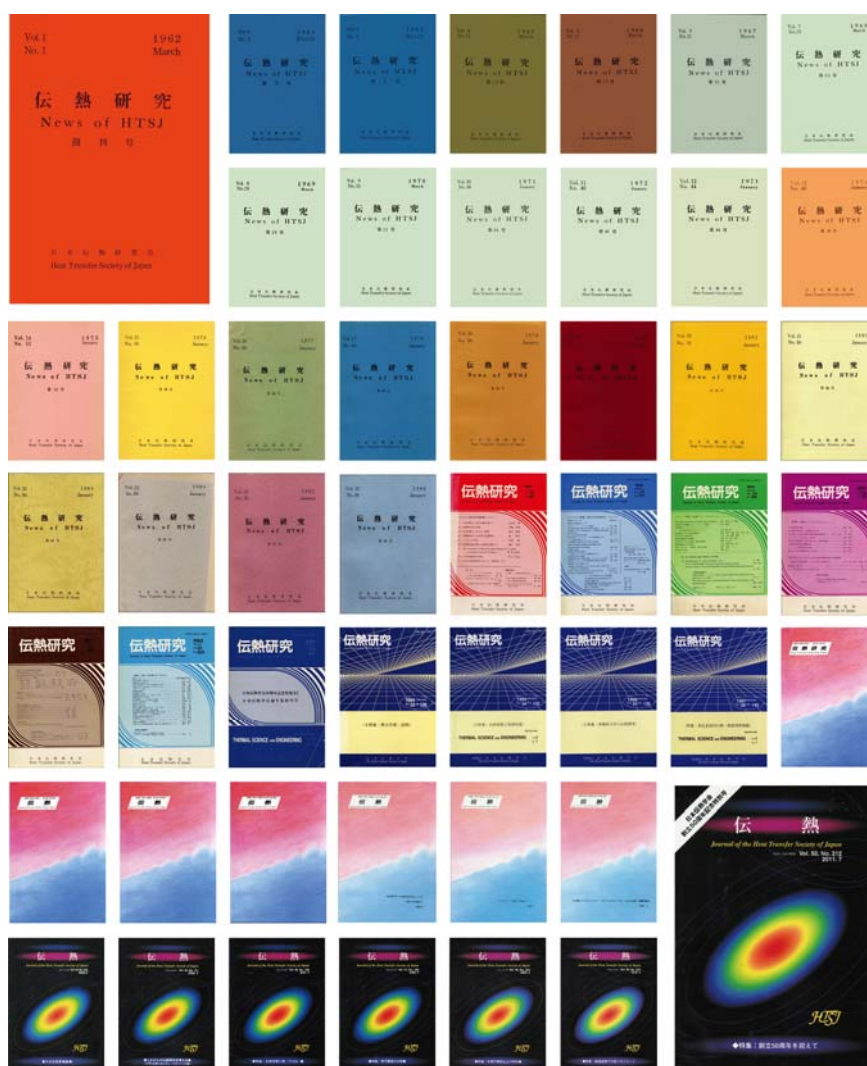
期	会長		副会長	
1	小林 明	橋 藤雄		
2	坂山 四郎	橋 藤雄		
3	矢木 栄	内田 秀雄		
4	棚沢 泰	内田 秀雄		
5	西脇 仁一	甲藤 好郎		
6	菅原 菅雄	水科 篤郎	甲藤 好郎	
7	山県 清	佐藤 俊	植田 辰洋	
8	坪内 為雄	西川 兼康	植田 辰洋	
9	橋 藤雄	一色 尚次	国井 大蔵	
10	斎藤 武	小笠原 光信	国井 大蔵	
11	小笠原 光信	頼実 正弘	平田 賢	
12	内田 秀雄	前田 四郎	平田 賢	
13	水科 篤郎	牧 忠	平田 賢	
14	杉山 幸男	甲藤 好郎	一色 尚次	
15	西川 兼康	泉 亮太郎	一色 尚次	
16	佐藤 俊	武山 斌郎	片山 功蔵	

期	会長		副会長	
17	森 康夫	長谷川 修	片山 功蔵	
18	甲藤 好郎	岐美 格	棚澤 一郎	
19	国井 大蔵	関 信弘	棚澤 一郎	
20	小林 清志	山家 謙二	秋山 守	
21	青木 成文	大谷 茂盛	秋山 守	
22	植田 辰洋	松本 隆一	斎藤 孝基	
23	武山 斌郎	藤井 哲	斎藤 孝基	
24	岐美 格	平田 賢	小竹 進	
25	長谷川 修	堀 雅夫	小竹 進	
26	大谷 茂盛	石黒 亮二	越後 亮三	
27	平田 賢	藤掛 賢司	越後 亮三	
28	藤井 哲	相原 利雄	黒崎 晏夫	
29	石黒 亮二	鈴木 健二郎	黒崎 晏夫	
30	小竹 進	架谷 昌信	井上 晃	
31	藤江 邦男	伊藤 猛宏	井上 晃	

法人化後

期	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
会長	棚澤 一郎	中山 恒	相原 利雄	越後 亮三	長島 昭	黒崎 晏夫	鈴木 健二郎	福迫 尚一郎	藤田 恭伸	塩治 震太郎
副会長	柳田 哲郎 坂口 忠司 土方 邦夫	坂本 雄二 福迫 尚一郎 土方 邦夫	鳥越 邦和 林 勇二郎 斎藤 彬夫	曾田 正浩 萩野 文丸 斎藤 彬夫	塩治 震太郎 藤田 恭伸 飯田 嘉宏	拓殖 綾夫 荒木 信幸 飯田 嘉宏	飯野 利喜 吉田 駿 庄司 正弘	大隅 正人 熊田 雅弥 庄司 正弘	河村 洋 森田 昭生 望月 貞成	本田 博司 長野 靖尚 望月 貞成
理事	庄司 正弘 芹沢 昭示 工藤 一彦 山川 紀夫 望月 貞成 加藤 征三 平田 哲夫 木本 日出夫 加藤 義生 増岡 隆士 福迫 尚一郎 中島 利誠 青木 博史 千葉 孝夫 高島 啓行	庄司 正弘 芹沢 昭示 杉山 憲一郎 山田 悦郎 河村 洋 加藤 征三 平田 哲夫 木本 日出夫 福葉 英男 増岡 隆士 宮本 政英 中島 利誠 水野 彰 伊藤 正昭 青木 博史	笠木 伸英 増岡 隆士 杉山 憲一郎 山田 悦郎 河村 洋 熊田 雅弥 青木 和夫 萩野 文丸 尾添 紘之 前川 博 金子 邦彦 水野 彰 伊藤 正昭 松木 健次	笠木 伸英 増岡 隆士 早坂 洋史 太田 照和 山田 幸生 熊田 雅弥 青木 和夫 中島 健 森岡 齋 尾添 紘之 戸田 三朗 金子 邦彦 松尾 篤二 松木 健次 五十嵐 喜良	西尾 茂文 熊田 雅弥 早坂 洋史 太田 照和 山田 幸生 辻 俊博 青木 和夫 中島 健 森岡 齋 井村 英昭 藤田 秀臣 満洲 邦彦 松尾 篤二 小澤 由行 五十嵐 喜良	西尾 茂文 熊田 雅弥 早坂 洋史 円山 重直 山田 幸生 岡崎 健 竹内 正紀 竹内 正紀 平田 雄志 井村 英昭 丸田 公一 満洲 邦彦 菱沼 孝夫 渡邊 激雄 小澤 由行	勝田 正文 菱田 公一 黒田 明彦 円山 重直 岡崎 健 中山 顕 平田 雄志 水 上 謙 今石 宜之 藤井 照重 望月 貞成 菱沼 孝夫 藤田 博之 藤田 博之 久角 喜徳	勝田 正文 菱田 公一 山田 雅彦 橋爪 秀利 宇高 義郎 中山 顕 小 林 睦夫 今石 宜之 望月 貞成 石塚 勝 藤田 博之 武石 賢一郎 久角 喜徳	小澤 守 瀧本 昭 山田 雅彦 橋爪 秀利 宇高 義郎 花村 克悟 岩城 敏博 岩城 敏博 門出 政則 工藤 一彦 菊地 義弘 石田 哲義 石田 哲義 石塚 勝	小澤 守 瀧本 昭 近久 武美 神永 文人 花村 克悟 岩城 敏博 藤井 照重 門出 政則 菊地 義弘 横山 孝男 石田 哲義 石田 哲義 高橋 修一 北村 邦彦
監事	飯田 嘉宏 岡田 孝夫	前田 昌信 岡田 孝夫	前田 昌信 塩治 震太郎	鳥居 薫 塩治 震太郎	鳥居 薫 大隅 正人	望月 貞成 大隅 正人	望月 貞成 横堀 誠一	太田 照和 横堀 誠一	太田 照和 山中 晤郎	有富 正憲 山中 晤郎

期	42	43	44	45	46	47	48	49	50
会長	萩野 文丸	荒木 信幸	庄司 正弘	望月 貞成	柘植 綾夫	河村 洋	長野 靖尚	林 勇二郎	笠木 伸英
副会長	小澤 由行 太田 照和 笠木 伸英	武石 賢一郎 増岡 隆士 笠木 伸英	久角 喜徳 勝田 正文 宮内 敏雄	康 倫明 牧野 俊郎 宮内 敏雄	横堀 誠一 門出 政則 森 康彦	横堀 誠一 瀧本 昭 森 康彦	小林 信雄 山田 幸生 宇高 義郎	青木 博史 小澤 守 宇高 義郎	森 治嗣 岡崎 健 飛原 英治
理事	門出 政則 高田 保之 近久 武美 円山 重直 北村 健三 平田 哲夫 藤井 照重	門出 政則 高田 保之 池川 昌弘 円山 重直 北村 健三 平田 哲夫 竹中 信幸	佐藤 勲 吉田 英生 池川 昌弘 円山 重直 辻 俊博 青木 和夫 竹中 信幸	佐藤 勲 吉田 英生 工藤 一彦 稲村 隆夫 辻 俊博 青木 和夫 中部 主敬	中部 主敬 近久 武美 工藤 一彦 稲村 隆夫 廣田 真史 姫野 修廣 吉田 篤正	中部 主敬 近久 武美 田部 豊 青木 秀之 廣田 真史 姫野 修廣 千田 衛	円山 重直 花村 克悟 田部 豊 青木 秀之 板谷 義紀 石塚 勝 吉田 篤正	円山 重直 花村 克悟 坂下 弘人 廣瀬 宏一 板谷 義紀 石塚 勝 西村 伸也	近久 武美 高松 洋 坂下 弘人 廣瀬 宏一 大久保 英敏 田川 正人 多田 幸生 西村 伸也
監事	有富 正憲 伊藤 正昭	工藤 一彦 伊藤 正昭	工藤 一彦 青木 博史	山田 幸生 青木 博史	山田 幸生 大原 敏夫	神永 文人 大原 敏夫	神永 文人 松野 孝充	小泉 安郎 松野 孝充	小泉 安郎 藤岡 恵子



平成 23 年 11 月 26 日

〒101-0047 東京都千代田区内神田 1-18-11

社団法人 日本伝熱学会

Tel. 03-3259-7919

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

※ 本資料は伝熱学会学会誌「伝熱」の記事などを元に作成しておりますが、事実と異なる記載がある可能性もございます。その際は、是非学会事務局までお知らせ下さいますようお願い致します。

日本伝熱学会創立 50 周年記念伝熱セミナーの報告

Report on the Heat Transfer Seminar of HTSJ 50th Anniversary宇高 義郎¹, 大久保 英敏², 荒木 拓人¹, 酒井 清吾¹, 浅岡 龍徳³, 津島 将司⁴

(1 横浜国立大学, 2 玉川大学, 3 青山学院大学, 4 東京工業大学)

Yoshio UTAKA¹, Hidetoshi OHKUBO², Takuto ARAKI¹, Seigo SAKAI¹, Tatsunori ASAOKA³, Shohji TSUSHIMA⁴

(1 Yokohama National Univ., 2 Tamagawa Univ., 3 Aoyama Gakuin Univ., 4 Tokyo Inst. of Tech.)

1. セミナー概要

日本伝熱学会創立 50 周年記念伝熱セミナーが平成 23 年 9 月 30 日, 10 月 1 日に横浜市開港記念会館およびメルパルク横浜にて開催されました。企画・実行担当として, はじめに概要を報告させていただきます。

本学会恒例行事の伝熱セミナーは 20 年ほど前から各支部にて実施されています。今回は, それ以前に行われていた全国版伝熱セミナーの形を借りて, 50 周年記念に相応しい全国版セミナーを実施したいと考えました。50 周年記念事業実行委員会の支部記念セミナーを統括する小澤支部小委員会委員長とも意見が一致し, 50 周年記念事業実行委員会および理事会にて, 企画内容および横浜での開催を了承いただきました。早速横浜近郊の若手の先生方を中心に実行委員会を構成し, 準備に入りました。

講演内容としては, 「・・・(分野) 50 年の進展」のタイトルの下, 学会創立から今日まで伝熱学の中心に位置する分野に焦点を当て, それらを総括し, かつ今後の伝熱学の進展に資する内容とすることが創立 50 周年行事の一つとして相応しいものと考えました。しかし, 特別な業績を重ねられた先生方でも, 長期間にわたる内容をわかりやすくまとめることはかなり大きな負担であり, 講師をお引き受けいただけるかどうか心配でした。幸い先生方のご厚意により可能になりました。

学会 50 周年を記念するという事で, セミナーの規模として 100 名程度を設定しました。とはいえ, これだけの豪華講師陣を擁する特別な記念講演を用意し, 講演会場も十分な余裕があることから, 開催側としてはそれらに相応しい多くの参加者数を期待しておりました。結果として, 講演会には 2 倍に近い 189 名, 懇親会にも 142 名の参加をいただきました。本セミナーではこのように多

くの方にご参加いただき, 7 名の講師による丸 1 日の講演においては, 皆様とともに伝熱学(会)の伝統の重みを感じながら大いに勉強をさせていただくことができました。さらに懇親会および徹底討論会を通じて, 普段は一緒になりにくい広い世代にわたる会員の知的な交流の場として意義深かったと考えております。特に 5 室に分かれての分野別の徹底討論会ではアルコールをいただきながら, 講師と進行役の先生方を中心に深夜まで多くの若手・中堅・ベテラン混合の研究論議は格別なものでした。また, 学会では初めての WEB によるライブ配信を実施し, 参加が難しい方々にも対応いたしました。

大役を果たしていただきました講師の先生方に深く感謝いたします。また, セミナーの企画から実施にわたり, 適切なアドバイスをいただいた林勇二郎前会長, 笠木伸英会長, 共催として主に講演会場の便宜を図っていただいた横浜市経済局, および徹底討論の進行役をお引き受けいただきました先生方に厚くお礼申し上げます。また, ご参加の皆様とともに大変楽しい機会を持つことができたこと, 実行委員一同感謝いたします。以下に, 本セミナーのプログラムおよび実施組織を記します。

日本伝熱学会創立 50 周年記念伝熱セミナー
主催 日本伝熱学会
共催 日本伝熱学会関東支部, 横浜市経済局

プログラム

9 月 30 日 講演会 (横浜市開港記念会館)

10:15~10:30

開会: 実行委員会委員長 大久保 英敏
挨拶: 第 50 期会長 笠木 伸英

10:30~12:00 沸騰・凝縮伝熱研究の 50 年

庄司 正弘 (東京大学名誉教授, 神奈川大学教授)
 本田 博司 (九州大学名誉教授)

12:00~12:45 ふく射伝熱研究の50年
 越後 亮三 (東京工業大学名誉教授)
 休憩

14:00~15:30 強制・自然対流伝熱研究の50年
 長野 靖尚 (名古屋工業大学名誉教授)
 尾添 紘之 (九州大学名誉教授)

15:45~16:30 バイオ伝熱研究の50年
 谷下 一夫 (慶應義塾大学教授)

16:30~17:15 伝熱機器50年の進展
 中山 恒 (東京工業大学名誉教授)

17:15~17:30 閉会
 休憩・移動

18:30~20:30 懇親会 (メルパルク横浜)
 20:30~ 伝熱徹底討論会 (メルパルク横浜)

10月1日 7:00~ 朝食

実施組織

企画

(創立50周年記念事業実行委員会支部小委員会)

小澤 守 (関西大)

圓山 重直 (東北大)

(創立50周年記念事業実行委員会)

宇高 義郎 (横国大)

(創立50周年記念セミナー実行委員会)

大久保 英敏 (玉川大)

実行委員会

大久保 英敏 (玉川大) 委員長

荒木 拓人 (横国大) 幹事

酒井 清吾 (横国大) 幹事

浅岡 龍徳 (青学大) 委員

宇高 義郎 (横国大) 委員

小澤 守 (関西大) 委員

寺岡 喜和 (金沢大, 元中央大) 委員

津島 将司 (東工大) 委員

圓山 重直 (東北大) 委員

森 昌司 (横国大) 委員

徹底討論進行担当

吉田 英生 (京都大)

宗像 鉄雄 (産総研)

門出 政則 (佐賀大)

鶴田 隆治 (九工大)

牧野 俊郎 (京都大)

花村 克悟 (東工大)

高松 洋 (九州大)

白樫 了 (東京大)

石塚 勝 (富山県立大)

高田 保之 (九州大)

(宇高義郎)

2. ホームページ・参加登録

今回、WEBによるセミナーのライブ配信を行いました。配信はUSTREAMにより行い、実行委員会としてアカウントを取得しました。会場でのインターネットへの接続は実行委員会準備したWi-Fiにより行いました。視聴については、講師の先生方のご快諾のもと、学会理事会にて広く公開するという方針が決定され、パスワードなどによる視聴制限は設けずに配信を行いました。図1が実際に配信された画面です。常時、20人程度の方に視聴していただいております。より高解像度での配信についてご要望をいただくなど、少なからぬ反響をいただき、今後、学会のアクティビティを広く公開していくためのツールとしての利点と課題も明らかになりました。写真およびビデオによる撮影と記録についても行いました。昼食前には参加者による記念撮影も行いました(図2)。これらの記録、とくにセミナーでの講師の先生方によるご講演などは、大変、貴重なものであり、今後、アーカイブ化していくことなどについても、検討を進めていきます。



図1 WEBによるライブ配信画面



図2 記念撮影の様子

今回のセミナーでは、できるだけ広い世代の方に講師の先生方のお話を聞いていただきたいという思いがありました。そのための取り組みとして、普段こういったセミナーに足を運ぶ機会の少ない学生の皆さんにも参加を呼びかけ、少しでも参加しやすくなるよう参加費を一般よりも安く設定しました。また、一般からも多くの方に参加していただくため、講演会のみ参加費は無料としました。その成果もあり、講演会には広い世代にわたってたくさんの方にご参加いただくことができました。実行委員一同大変嬉しく感じております。

セミナー当日は、講演会から懇親会、徹底討論会まで、混雑や混乱もなくスムーズに行うことができました。参加者の皆様には、本セミナーに好意的にご協力くださいましたこと、また、参加登録の際には、お忙しい中事前の登録と参加費のお振込にご協力くださいましたことに、改めてお礼を申し上げます。また、このセミナーを運営するにあたり、スタッフの学生さんたちが、前日から準備し、当日は早朝から受付、クローク、案内な

ど大変活躍してくれました。彼らの協力に対してもこの場でお礼をいわせていただきたいと思います。



図3 受付の様子

(津島将司, 浅岡龍徳)

3. 講演資料

50周年の進展をお話しいただく二度と無い貴重なご講演であり、できる限りしっかりした資料を用意したいということで、当日の資料には抜粋

版ではなく講演資料に準ずるものを印刷・製本し、配布させていただくこととしました。お忙しいなか、講師の先生方には原稿を早めに送付いただいたため、当日にすべての講演の資料を用意することができました。改めまして講師の先生方に厚く御礼申し上げます。

講師の先生方に用意していただいた原稿の内容は素晴らしく、これからの次の50年も参加者の皆様のお手元に置いていただけるだけの価値のあるものになったかと思えます。

(荒木拓人)

4. 講演会

記念セミナーの大きな柱である講演会は、横浜市開港記念会館の講堂で行われました(図4)。笠木伸英会長の挨拶の後、7名の講師の先生方から、「相変化伝熱」、「ふく射伝熱」、「対流伝熱」、「バイオ伝熱」、「機器伝熱」の各分野における半世紀にわたる進展をお話いただきました。



図4 講演会の様子

半世紀の進展をそれぞれの切り口で、個性豊かに話をされた講師の先生方の話引き込まれていく中で、先人たちの残された足跡の大きさを知ることができ、このセミナーの目的の一つである50年の成果を巡ることが果たせたと思っています。講師の先生方には、今回の講演のために多くの時間を割いていただいたことに改めてお礼申し上げます。

講演の内容は(全国から参加していただいた方々が持ち帰った)冊子にまとめましたが、「伝熱」10月号(Vol.50, No.213)には、「凝縮伝熱の50年」と「自然対流伝熱研究50年の回顧」が掲

載されており、他の講演に関しても、順次「伝熱」に掲載される予定です。

(大久保英敏)

5. 懇親会

横浜市開港記念会館での創立50周年記念伝熱セミナー講演会の終了後、場所をメルパルク横浜に移し、懇親会が行われました。

実行委員会大久保委員長の司会進行で、当初の予定通り18:30に始まりました。はじめに、実行委員会を代表して企画を担当した宇高委員ならびに笠木会長からご挨拶をいただき、続いてセミナー実行委員会の若手メンバーを紹介いただきました。紹介後、若手メンバーが司会を引き継ぎ、中山恒東京工業大学名誉教授に乾杯の音頭をご発声いただいて、約50分間の懇談と会食に移りました。その後、創立50周年を振り返るために、各支部からご提供いただいた写真をフォトアルバムとしてスクリーンに年代順に映し、セミナー実行委員会の宇高先生、小澤先生、圓山先生より、写真中の先生方の紹介や撮影の際のエピソードなどをお話いただきました。貴重な写真をご提供いただいた方々に、厚く御礼申し上げます。フォトアルバムの紹介終了後、セミナーでご講演いただいた先生方を代表して本田先生からメッセージをいただきました。さらに、荒木元伝熱学会会長からもメッセージをいただき、最後に、早稲田大学・勝田先生による創立50周年記念式典のご案内と小澤先生のメッセージの後、ほぼ予定通りの20:30に閉会宣言によって懇親会を終えました。

懇親会参加者は142名と、講演会に引き続き多くの方にご参加いただき、盛会であったと感じております。フリードリンクとなっておりますので、飲み物は十分ご提供できたのではないかと思います。料理は当初予想の量では若干足りず、乾き物を追加することで対応させていただきました。

(酒井清吾)

6. 徹底討論会

アカデミックなものから様々なテーマを硬軟取り混ぜて議論する、この伝熱学会の良き伝統をぜひこのセミナーでも続けたく、懇親会の後に自由な議論ができるような徹底討論会を企画しました

(表1). 徹底討論会は講演会講師の先生方に「対流」、「沸騰・凝縮」、「ふく射」、「バイオ」、「伝熱機器」の5室に分かれていただき、また、講師の先生から若手までスムーズな対話ができるよう、各部屋2名の専門分野に見識の深い先生に「進行担当」をお願いしました。

当日はいずれの部屋もほぼ満室であり、ドリンク類が足りず途中で大量に追加購入するなど盛り上がった様子でした。全体として、議論を温かく

迎える雰囲気があり、若手や学生が積極的に発言していたことが印象に残りました。

講師の先生方には昼間の講演と懇親会の後ということもあり、ご負担は大きかったかと存じますが、皆様に夜遅くまでご参加いただきました。ありがとうございました。また、討論会全体に気を配っていただいた、進行担当の先生方にも御礼申し上げます。

(荒木拓人)

表1 日本伝熱学会創立50周年記念伝熱セミナー徹底討論
(会場：メルパルク横浜)

実施担当 (敬称略)

分野および講師	部屋	進行担当	事務進行
強制対流・自然対流 長野靖尚 (名工大名誉教授) 尾添絃之 (九州大名誉教授)	412 (和室)	吉田英生 (京都大) 宗像鉄雄 (産総研)	寺岡喜和 (金沢大)
沸騰・凝縮 庄司正弘 (東京大名誉教授, 神奈川大教授) 本田博司 (九州大名誉教授)	413 (和室)	門出政則 (佐賀大) 鶴田隆治 (九工大)	森 昌司 (横国大)
ふく射 越後亮三 (東工大名誉教授)	401 (DX-Twin)	牧野俊郎 (京都大) 花村克悟 (東工大)	酒井清吾 (横国大)
バイオ 谷下一夫 (慶應大教授)	501 (DX-Twin)	高松 洋 (九州大) 白樫 了 (東京大)	浅岡龍徳 (青学大)
伝熱機器 中山 恒 (東工大名誉教授)	601 (DX-Twin)	石塚 勝 (富山県立大) 高田保之 (九州大)	津島将司 (東工大)

全体進行：宇高義郎 (横国大)、大久保英敏 (玉川大)、荒木拓人 (横国大)

7. 記念伝熱セミナーを振り返って

創立50周年記念事業は、「過去から未来を訪ねる」旅でもあると思います。横浜の1泊2日の旅は満足していただけたでしょうか。

昨年度、50周年記念事業の一つとして全国版の伝熱セミナーを実施することが決まり、幾度となく横浜で委員会を開き、委員会の後は中華街で話し合いました。心配の種は尽きないもので、9月21日に(東日本に上陸した台風では戦後最大級の)台風15号が関東を通過し、他学会の講演会が中止になったニュースを聞いた時には、当日の天気不安になりました。幸い、天候にも恵まれ、横浜市開港記念会館からメルパルク横浜への移動も、講演会の余韻を楽しみながら、横浜の街を歩いていたのではないかと考えています。

会場となった横浜市開港記念会館は大正期の代表的な建築物の一つであり、国の重要文化財にも指定されています。講演会の会場となった講堂はこの会館のメインホールであり、歴史的価値のある会場で“伝熱研究の50年”を話していただけたことを嬉しく思っております。講師の先生方の熱い思いは参加者に伝わり、徹底討論会では、深夜まで熱い議論が交わされました。飲んで、食べて、熱く語る伝統(?)は健在であり、食べ物も飲み物も実行委員会の若手メンバーが補充に走りになり、嬉しい悲鳴をあげることになりました。

最後に、今回の記念伝熱セミナーにかかわっていただいたすべての皆様に、改めてお礼申し上げます。

(大久保英敏)

沸騰研究の 50 年

A Review of Boiling Research in the Past Fifty Years

庄司 正弘 (神奈川大学)

Masahiro SHOJI (Kanagawa University)

e-mail: shoji@kanagawa-u.ac.jp

1. はじめに

抜山の論文[1]を沸騰研究の嚆矢とみれば、歴史はおよそ 75 年である。その最初の 20 数年は、論文の発表は散発的で、言ってみれば研究の助走区間である。論文が数多く現れ始めたのは 1960 年に入ってからであり、それは今から約 50 年前である。この意味で沸騰研究と我が伝熱学会の歴史は時期を共有している。

沸騰は日常生活で馴染みの見慣れた現象であると同時に、工学的に興味深いものであり、また工業的にも重要なものである。そして後に示すように、今日までに沸騰をキーワードとして出された学術論文の数は、20 数万編に及ぶ。工学に限定しても 2 万数千編、論文題名に「沸騰(boiling)」を含むものに限定しても、その数は優に 1 万編を越える。本記事で筆者に与えられた宿題は、それら沸騰の研究を概観し、その内容の概要を記すことである。難問である。しかし幸いにも個人的には、1960 年代を大学生、大学院生として過ごし、その頃から恩師(甲藤好郎教授)の沸騰研究を身近に眺め、以来、微力ながらも沸騰研究の一端を担ってきた。また、国内外の学会で、幾人もの名立たる研究者に接することができた。このように私的な研究期間が沸騰研究の歴史期間とほぼ合致している。本稿は、そのような人間の沸騰研究に関する個人的な記憶と印象を基に記したものであることを、先ず最初にお断りしておきたい。そして内容は、沸騰の基礎をレビューの対象として話題はプール沸騰に限り、それも飽和沸騰を念頭に置いてサブクール沸騰については触れていない。

編修者からは、頁数は問わないとの意向を伺った。しかし、前記のように膨大な数の研究を、その一部を紹介するとしてもかなりの紙数が必要である。幸いにも学会 30 周年記念の際も、今回と同様の特集記事執筆の依頼があり、「沸騰研究の過去、現在、未来」と題した拙文記事を残した。そ

こで、重複を避け、頁数の低減を目的に、本稿は、主としてその後の 20 年に注目した内容の記事とすることとした。参考にした論文も多数に上るため、紙数の節約から、文献 [2] で記載したものはその参考文献番号のみを記すこととした。また、内容に関してであるが、文献 [2] 以降も 1996 年に「沸騰伝熱研究の将来課題」と称する拙文 [3] を載せている。その中でも当時の沸騰研究を概観している。本稿では内容の面でも既報との重複を避けるよう努めた。また、図表は極力用いないこととした。図表については前稿あるいは今回の学会創立 50 周年記念セミナー [4] の資料を参照願いたい。要するに本稿は、それ自体では完結、綴じた形となっていない。こうした記載方法を採用することに予め了解を得ておきたい。また、沸騰は相変化現象の一つであり、「沸騰熱伝達」は沸騰現象の特性の一つ、一側面に過ぎない。沸騰には気泡力学など他の多くの側面がある。従って、編集者から与えられた課題名は「沸騰熱伝達研究の 50 年」であったが、それを本稿記載の題名に変えさせていただいた。これに関してもお断りしておきたい。

2. 沸騰研究の歴史的推移

研究内容をまとめる前に、これまでの論文数や研究対象その他関連事項の年代別推移を見ておきたい。次頁の図 1 にその推移を示す。筆者はこれまで漠然と、沸騰の研究は 1970 年から 1980 年がピークであって、研究活動はその後停滞気味であり、論文数は減少の傾向にあると思っていた。しかし図 1 を見る限り、実際はそうではないことがわかる。我が国における沸騰の研究の成果は多くの場合、先ず伝熱シンポジウムで講演発表されている。そして、その発表論文の数は確かに近年減少傾向にある。この点では筆者の受ける印象と同じである。しかし国際的に見ると、事情は全く異

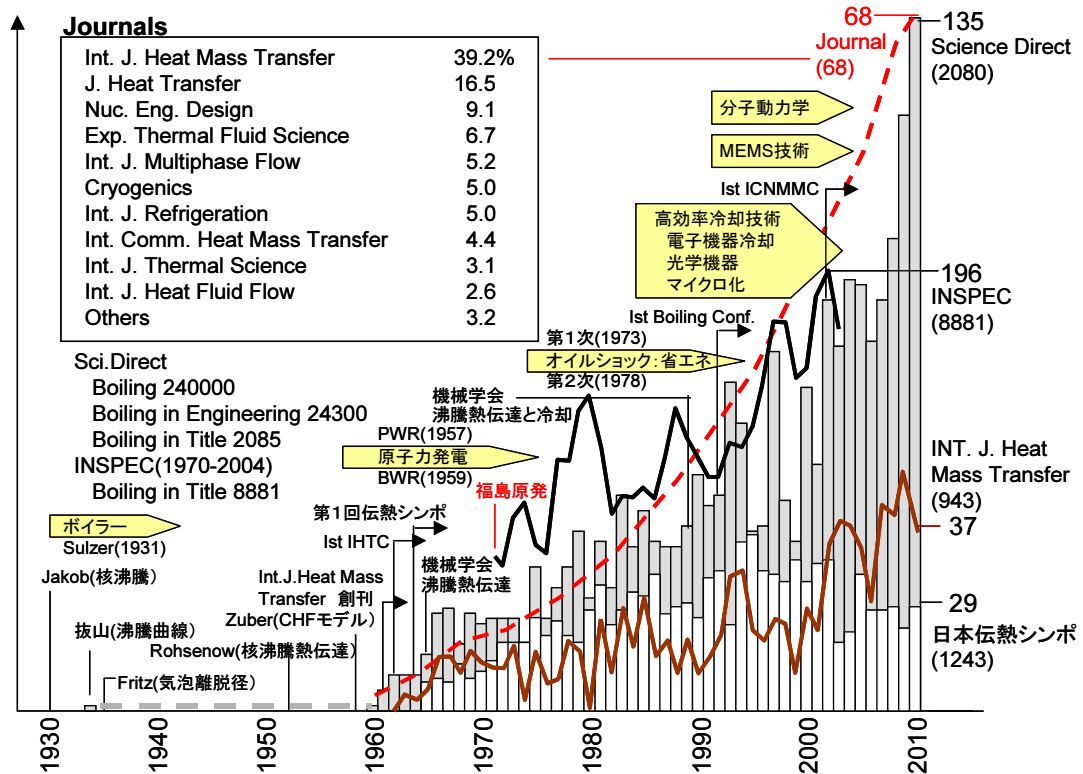


図1 沸騰研究（論文数及び関連事項）の年代推移

なっている。すなわち、学術誌に発表される沸騰関係論文の数は、近年顕著に増加している。図1のデータはWeb検索で得たものであり、その数は使用した検索サイトによって異なると思うが、学術誌、検索サイトによらず、論文数は年代と共に、明らかに増加傾向にある。その理由は、沸騰の応用が高効率冷却やマイクロ熱デバイス、ナノ・マイクロ現象解析と言った従来に無い多種、多方面に及んでいるためと思うが、しかし一方、気がかりな関連も指摘できる。すなわち近年、国際学術誌の数も急激に増えており、これに連動して論文数が増えているのではないかと考えられる。これが論文数増加の主たる原因とすれば、論文数の増加傾向は直ちに研究の発展と結びつけることに疑問が生まれる。

雑誌(Source)に関連し、論文の約半数近くが2つの主要学術誌、すなわち International Journal of Heat and Mass Transfer, か Journal of Heat Transfer に掲載されていることがわかる。近年、情報が過多で、その把握に困難さのある状況下において、この事実は、ある意味有り難いものである。上記

の2誌に注目しておけば、少なくとも沸騰研究の進展状況は大方読み取れるであろうからである。ともあれ、図1から、沸騰研究の進展（あるいは盛衰）に関し、いろいろのことが見て取れる。

3. 沸騰研究を知る情報源

若い学生や研究者から、沸騰の学習に際し、関連文献があまりにも多く、どれを勉強すれば良いかわからない、については必要最低限の文献を紹介してくれないかと相談されることがある。また、研究論文について、10編程度の重要にして代表的な論文を示してくれないか、との相談も受ける。難しい依頼であり相談である。これだけ難解で研究の多い現象である。疎にして漏らさない成書は少なく、知識を整理したものばかり、との指摘はよく理解できる。これには多分に沸騰現象の特異性が原因してしよう。つまり、沸騰の理解には先ず筋立て（ストーリー）の理解が必要であり、複雑な現象であるだけに、理解の仕方も人によってまちまちである。したがって、小説を書くくらいの思い切りが無いと、平易で尚且つ抜けのない書

物など書けるものではない。沸騰は、そう言っても過言ではない類の現象だからである。それでも過去には、優れたレビュー論文や記事、書籍は数多く出版されている。そこで、本稿末尾に付録として、筆者の知る範囲で、それら文献情報をまとめて示してある。勉学や学習の際の参考になると思う。

4. 代表的な沸騰のモデルと整理式

沸騰は、核沸騰、遷移沸騰、膜沸騰の3つのモード(形態)に大別され、そのモードの境界に限界熱流束 CHF (Critical Heat Flux) と極小熱流束 MHF (Minimum Heat Flux) が存在するとして、知識の整理や理解がなされてきた。限界熱流束は、過って「バーンアウト熱流束」と呼ばれていたが、高融点金属の場合などでは必ずしもその点で焼き切れが生じないことから、現在では限界熱流束と呼ぶのが常用となったことは周知のことである。また、極小熱流束に対応して限界熱流束を「極大熱流束」と呼ぶことも可能であろうが、あまり用いない。応用上、機器の破損に結びつく熱流束という特殊性のためである。

沸騰の各モードの熱伝達については、これまで多くのモデルや整理式が提案されてきたが、現在、広く知られ用いられているのは、以下のモデルや整理式である。核沸騰では、沸騰開始に関する Hsu-Graham [5] の考えと式、気泡の離脱に関する Friz [6] の式、核沸騰熱伝達の整理式である Rohsenow [7], Kutateladze [8], Nishikawa-Yamagata [9], 西川-藤田 [10] の式、限界熱流束に対する Zuber の流力モデルと理論式 [11], Kutateladze [8] の無次元整理式、甲藤-横谷-原村のマクロ液膜モデルと提案式 [12][13], 遷移沸騰熱流束に対する Kalinin の表現式[14], 極小熱流束と膜沸騰についての Berenson モデル[15], 加熱円柱に対する Bromley の式 [16] 等である。

上記のいずれもプール飽和沸騰を対象としたものに限っており、強制流動沸騰(外部流, 内部流)は除いている。また、上記の多くのものは沸騰研究の初期あるいは中期に提案された古いものであるが、限界熱流束, 遷移沸騰, 極小熱流束を除き、その後新規な提案やモデルは出されていない。なお、限界熱流束, 遷移沸騰, 極小熱流束に関する研究の新たな発展については、後に章を設け紹介

する。

5. 核沸騰：研究の進展と到達点

核沸騰は低温度差で高い熱輸送が可能であることから、応用上もっとも多用される沸騰形態であるが、3つの形態の中でもっとも複雑難解である。そのため課題も尽きず、研究も多い。

核沸騰の素過程は込み入っており複雑で、未解決の部分も多く残されているが、以下の事項についてはある程度共通認識が得られている。すなわち、表面粗さと核生成に必要な過熱度の関係、孤立気泡と合体気泡の存在、気泡の成長や離脱の条件、伝熱機構としての気泡攪乱機構、気液交換機構、薄液膜蒸発機構、液サブクールや加熱面の粗さや濡れ性、姿勢、寸法などの因子の影響、限界熱流束モデルとしての流体力学モデル (Zuber モデル) とマクロ液膜消耗モデル (甲藤・横谷・原村モデル) 等に関することである。こうした事項についての理解は沸騰の初期段階において明らかにされたものがほとんどであるが、不明で残された課題は現在でもなお未解決で残っているものが多い。たとえば、加熱面性状の科学的把握や表記法、上記各種伝熱機構の相対的寄与度、気泡核の相互干渉と発泡点密度などの問題である。限界熱流束に関しても、上記の代表的なモデルに対する形で幾つかの新しい考えやモデルが提案されている。こうした問題については後に改めて取り上げることにする。

なお、核沸騰の素過程や伝熱モデルに関する代表的な研究として次のものが挙げられる(以下、研究者と内容を年代順に列記)。Friz (離脱気泡径) [6], Rohsenow (熱伝達整理式) [7], Kutateladze (CHF 実験整理式) [8], Rohsenow-Griffith (気泡充満 CHF モデル) [17], Zuber (流力 CHF 理論モデル) [11], Nishikawa-Yamagata (熱伝達整理式) [9], Moore-Mesler (ミクロ液膜の存在発見) [18], Berenson (加熱面性状の影響実験) [19], Gaertner (気泡挙動の観察と分類) [20], Graham-Hendricks (伝熱機構の寄与度調査) [21], Katto-Yokoya (マクロ液膜の存在と消耗) [12], Nishikawa-Fujita (熱伝達整理式) [22], Bhat ら(マクロ液膜厚さ測定)[23][24][25], Haramura-Katto (マクロ液膜 CHF モデル) [13], Nishikawa ら (加熱面姿勢の影響) [26], Liaw-Dhir (CHF ユニファイモデル) [27][28],

Shoji (沸騰カオス) [29]等々であり、その他多い。

6. 限界熱流束：各種モデル

研究初期に提案された考えは、気泡が加熱面を覆い乾燥（液の欠乏）状態に至る結果、限界が生じるとする Rohsenow-Griffith [17]に代表される気泡充満モデルである。あるいは支配方程式から次元解析によって整理式を導き、実験的に定数を定めた Kutateladze の経験式 [8]がよく知られる。その後、Zuber[11] によって流体力学的不安定に基づいた理論モデルが提案され、その理論的美しさと、結果的に前記 Kutateladze の式が見事に導かれたことから、広く信奉され、水平円柱への適用など積極的に使用、展開された[30][31][32]。一方、甲藤-横谷[12] は、高速度写真による長年の詳細な観察から、実際の限界熱流束点の沸騰状況が Zuber の言う状態となっていないこと、合体気泡底に存在する液膜（核沸騰液層）の消耗によって限界が生じている可能性を指摘、原村-甲藤[13] はその考えを定式化して所謂マクロ液膜モデルを構築した。このマクロ液膜モデルは限界熱流束に限らず、高熱流束核沸騰熱伝達や遷移沸騰熱伝達も説明できること、円柱系や垂直加熱面系、さらには流動沸騰系への拡張も可能であることから現在では広く信じられるものとなっている。

上記 Zuber の流力モデルと甲藤-横谷-原村のマクロ液膜モデルが限界熱流束モデルの二つの旗頭であった。しかし比較的最近になって、新たな考えやモデルが提出されている。前期の流力モデルとマクロ液膜モデルは、沸騰挙動を時間発展的に捉えるものであるが、加熱面上の沸騰現象を液体と気泡の空間分布の問題として捉え、その分布の有り様が核沸騰伝熱は勿論、限界熱流束も定めるとする考え（ユニファイモデル）が Dhir-Liaw [27][28] によって唱えられた。また、西尾-永井-田中[33][34] は、サファイア加熱面の裏面からの現象観察から、加熱面上の気固液 3 相界面の境界長さが限界を定めるとした考えを、また趙-増岡-鶴田[35][36] は、その 3 相界面の高い熱流束は、1 次気泡底部に存在するマイクロ液膜の蒸発が支配しているとの説を出している。こうした新しい提案を受け、いずれのモデルが妥当であるかは、現在議論の渦中にあるが、各モデルにはそれぞれ問題はあるとしても、いずれも同一の現象を扱ってお

り、それぞれ理のある主張であり、必ずしも多者択一である必要は無い。加熱面上の現象挙動を捉えるとしても、それぞれが違った位置や違ったスケールで現象を眺めている。加熱面から離れた位置での流体挙動に注目したもの、加熱面上の液残量をマクロに捉えようとしたもの、マイクロに細かく捉えたもの、様々である。お互いのモデルを比較検討して、統一的に止揚する心構えが必要かもしれない。

限界熱流束の発生については、他にも残された課題がある、従来のモデルのいずれも、濡れ性などの加熱面性状の影響は含まれていない。しかし、実験的には限界熱流束は加熱面の濡れの程度によって大きく変化する[37]。一方、マクロ液膜モデルについて言えば、液膜の構成メカニズム自体が明確でなく、原村-甲藤[13] は気液界面の流体力学的不安定によるとしているが、最近の実験研究では 1 次気泡の合体によるとの見方が強い [23][24][25][38][39][40]。いずれにしても、沸騰研究の目玉とも言える限界熱流束に関し、未だ完全に理解できているとは言い難い。

7. 遷移沸騰：メカニズムと問題点

通常、沸騰曲線において遷移沸騰特性は、限界熱流束点と極小熱流束点を結ぶ形で表現される。しかし現象的に言えば、この表現は形式的なものであって厳密さに欠ける。遷移沸騰現象は固液の接触が時間的に激しく変動する非定常性の強い不安定なものである。周知のように沸騰曲線による表現には時間的要素を含まない。したがって、沸騰曲線では、せいぜい破線表現によって平均的な値の程度を示すのが限界であって、沸騰曲線上に遷移沸騰を表現することは原理的に不可能なことである。

遷移沸騰熱伝達をよく知られた表現として次の Kalinin の式がある[41][42]。

$$q = q_N \cdot F + q_F (1 - F) \quad (1)$$

ここに q_N 、 q_F はそれぞれ沸騰熱流束、膜沸騰熱流である。 q_N 、 q_F としていかなる値を採用するかについては議論が多い。 q_N として限界熱流束をとり、 q_F として極小熱流束をとる考え、あるいは遷移沸騰過熱度に対応した核沸騰延長曲線の値と膜沸騰延長曲線の値を取る考えがある。遷移沸騰における加熱面温度と熱流束の時間的値を詳

細に測定した結果[43][44]によれば、後者の考えに近いものの、加熱面温度も時々刻々変化しており、それを正しく表現するのは難しい。なお、 F の値については、これまで多くの測定がなされ、おおよその値はわかっている[45][46][47]。

一方、接触角の多値性（前進接触角と後退接触角）に由来して、遷移沸騰曲線にも多値性（2本の曲線）が現れるとの主張が Lienahard -Wittei により提出され[48]、一時期それを支持する研究も出された[49][50]が、その後の詳細な測定によって、その仮説が否定された[51][52]。その結果、遷移沸騰の多値性についての議論は近頃あまりなされない。

遷移沸騰は、どのような条件で液体が加熱面に接触できる（濡らす）のか、どのような条件になると液体が加熱面を濡らさなくなるのかと言う、液体の物性にも関連した難解な固液接触の問題と強く関連している。この意味で、沸騰の研究において「濡れ」の問題は解明に長い時間を要するかも知れない。

なお、遷移沸騰に関するこれまでの代表的な研究を列挙すると次のようなものがある。熱伝達に関するもの[14][19][53][54][55]、固液接触に関するもの[45][46][47]、表面性状など影響因子に関するもの[56][57][58]等である。

8. 極小熱流束：メカニズムと問題点

極小熱流束を定める考えに、大きく言って2つがある。その一つは Berenson[59] に代表される熱流束支配モデルであり、他の一つは Spiegler[60] や西尾[61] に代表される温度支配モデルである。周知のように前者の考えは、膜沸騰の蒸気膜を保持するには、加熱面から液体へ最低限の熱の供給が必要で、その最小の値が極小熱流束とするものである。これに対し後者の考えは、液体の過熱限界とも関連し、ある温度で液体は物性的に高温面には接触し難く（濡れ難く）、その温度で極小熱流束点が定まり、熱流束はその温度における膜沸騰熱伝達に相当するとするものである。このどちらが正しいか、残念ながらいずれの考えに立っても、おおよそ似た値が予測され甲乙つけ難いのであるが、後者の方が簡明で理解し易い。

一方、系の圧力を変えて沸騰の実験を行った Sakura ら[62][63]によれば、低圧での極小熱流束

は前者のモデルによる値に近く、系の圧力が上がるにつれ、後者のモデルによる値に近づくとの指摘がある。極小熱流束は膜沸騰が崩壊して発生するものである。膜沸騰が崩壊するには、そのトリガーとなる理由（場所と瞬間）がなくてはならない。通常、極小熱流束の測定実験は有限の大きさの加熱面、加熱体（球や細線）を用いて行われる。加熱面が有限であれば、必ずその境界があり、ここでは普通、加熱面は液体にぬれている。従ってその部分がトリガーとなって膜の崩壊が起こる、と考えることが出来よう。実際、加熱面の境界の温度を高く保持する工夫、あるいは特殊な手法で加熱面の濡れを防いでやると、極小熱流束の値は大きくなる[64][65]。さらには、液体のテイラー波長（危険波長）をはるかに越えた大きな加熱面、あるいはぬれ難い加熱面では、極小熱流束点は低温側に大きく移動し、従って極小熱流束の値が非常に小さくなるとの報告もある[66]。このように、極小熱流束発生の問題も固体の接触の問題が関与しているため、現在でも未解決の問題が少なからず残されている。

極小熱流束点は、応用に関して言えば、蒸気爆発の発生や、急速冷却におけるクエンチ温度に関係する。こうした応用問題は、非定常沸騰の問題であるため、問題はより複雑なものとなり、解決すべき事項は多く残されている。

9. 膜沸騰：熱伝達の機構

膜沸騰は、液体の加熱限界をはるかに超えた加熱面温度で生じるものである。そのため、液体は蒸気層を挟む形で存在する。すなわち、加熱面と液体の直接的な接触はなく、液層、蒸気層が分離独立した形の伝熱形態であるため、核沸騰や遷移沸騰に比べ、状況ははるかに単純であり、実験観察においても想定通りであるため、特段の議論もなく、残された問題も少ない。こうした単純な形態であるため、沸騰熱伝達の比較的早い段階でなされた Berenson 他（水平加熱面）[67][68][69][70] や Bromley 他（垂直加熱面や水平円柱）[16][17][71][72][73][74]、Hendricks-Baumeister（球状加熱体）の研究[75]等の成果が今日でもそのままの形で用いられている。ただし、垂直加熱面の場合は、蒸気層界面の不安定波長にも関係して、連続的に様な蒸気膜は形成されず、ユニットが

出来るとのモデル[76][77]が出されているが、基本的には異質の問題ではない。

このように膜沸騰は比較的理解しやすい沸騰形態であるが、極小熱流束に近づくと、程度の差はあれ固液の接触が実際には生じ始める。それがどのように熱伝達に結びつくのか、あるいは極小熱流束の発生と関連するのか、詳しいことはよくわかっていない。

10. 新しい視点：沸騰のカオスの視座

周知のように 1970 年代から、数理物理の学問分野で複雑性の科学（非線形カオス力学とフラクタル幾何学）が生み出され、コンピュータの発達と連動する形で、その分野は急激に発展してきた。沸騰は時間空間的に大変複雑な非線形熱流体現象である。そして、1990 年の始め、数理物理の研究者から突然、予想もしない形で斬新な沸騰の物理モデルが発表された[78]。そのモデルは金子邦彦の時空間カオス[79]に基づいており、考えの基本は、極めて簡単明瞭である。つまり、沸騰は難解と言えど、それを支配している物理法則は高々有限個であり、その物理則を出来るだけ単純な数学的表現で表わせば、基本的な挙動は容易に数値的に再現できるとの考えである。実際、柳田[78]らは、熱伝導と相変化、浮力効果を微分方程式の形ではなく、単純な代数表現で表わし、それを時間発展の形で解を求め、簡単な計算（写像）の繰り返しで沸騰曲線が再現できることを示した。このモデルは斬新ではあったが、定性的で実際的なものではなかった。周知のように沸騰には、上記 3 つの物理法則のみでなく、気泡の発生は加熱面の気泡核からも生じること、気液の界面には不安定現象が存在する。柳田のモデルには、それらが欠落していた。そこで筆者らは、それらの要素を加味し、沸騰シミュレータとしてモデルの再構築を行った。その単純なモデル計算の結果は、驚くべく実際の現象や関連因子の影響を再現できるものであった[80]。一方、そうしたモデル構築と同時に、実際の沸騰現象がそもそもカオス挙動であるか否かについて疑問があったため、微小細線による実験とカオス診断(温度変動アトラクタの構築)を行ってみたところ、確かにカオスの挙動を示した[81]。折りしも、米国のロスアラモス研究所では Nelson を中心に、高熱流束核沸騰の精緻な時空

間解析モデルを思考中であり、またオックスフォード大学では Kenning を中心に、加熱面温度の詳細な時空間計測を行っていたため、3 者が共同で沸騰の複雑性の研究を行うこととなった。共同研究は数年継続され、その成果はレビュー論文[82]として報告した。その結果をまとめると、カオス診断によって確かに沸騰の複雑性を定量的に評価でき現象の理解は進んだが、残念ながらカオス力学と言えど、あくまで一つの解析ツールに過ぎず、それを以って問題が直ちに解決できるものではないことが判明した。観測ツールとしての高速度カメラの発達が、そのまま現象の解明に連がらないのと事情は全く同じである。要するに研究とは、あくまで各人のアイデアや考察が基本である。

11. 最近の研究トピックス

近年は電子機器回路の集積度の増加やレーザ等光学機器の温度制御の緻密化、あるいは各種機器の微小化（マイクロ化）に伴う熱輸送や温度制御の技術要請のため、伝熱効率の高い沸騰への期待が広がっている。このため MEMS やマイクロチャネルを用いた熱デバイスの開発や性能向上に向けた沸騰伝熱の研究、あるいはヒートパイプ内や微小重力下における沸騰、高熱負荷にある微小流路への応用を考えた微細化沸騰 MEB (Micro Bubble Emission Boiling)、伝熱性能向上のために自己湿潤液体などの混合液を用いようとする沸騰伝熱の研究などが話題となって、沸騰研究が活気づいている。これらのトピックについては研究が現在進行中であり、その成果をまとめる段階とはなっていない。今後の成果を期待したい。

12. 沸騰研究に残された課題

近年の沸騰研究は、各種応用上の要請があつて賑わいを見せているが、学術的、基礎的な問題について言えば、残された大きな課題として以下の 3 つを挙げる事が出来る。第 1 は粗さやキャビティ形状など気泡の発生と核の生成にかかわる加熱面性状の的確で科学的な把握（表記）の問題である。この問題は沸騰現象の解明にとって最大にして最重要の未解決な問題である。第 2 は固液の接触、濡れ現象に関する物理的解明である。この問題の解決なくして遷移沸騰や極小熱流束の正しい理解はありえない。第 3 は沸騰のシミュレーシ

ョン, その研究への援用の問題である. これには, 上記の加熱面性状の問題ばかりでなく, 気泡核の干渉や気液界面の条件 (気泡の合体条件や影響因子の理解) が必要不可欠であり, 難しい問題ではあるが, 数値計算は数値実験として活用でき, 測定 of 難しい量や事項が得られ, それによって沸騰の理解が格段に進むことが期待できる. 将来のある若い新進の研究者に期待するところである.

1 3. むすび

本稿はプール沸騰に限り, それも飽和沸騰のみを念頭に, まえがきに記したように, ここ 20 年の沸騰研究を概観した. 多分に自分よがり, 勉強不足の部分が多いに違いない. 正直言えば, 本稿を準備するに, 公私ともに多忙の時期と重なり, 満足に時間が取れなかった. しかし, これが能力の限界と言うものであり, 申し訳なく, お詫びしたい.

[付録 A : 沸騰に関する書籍]

- 1) Tong, L.S., Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow, John Wiley & Sons (1965).
- 2) 沸騰熱伝達, 日本機械学会 (1965).
- 3) Hahne, E. and Grigull, U., Heat Transfer in Boiling, Academic Press (1977).
- 4) Van Stralen, S. and Cole, R., Boiling Phenomena, Hemisphere (1979).
- 5) Delhaye et al., Thermodynamics of Two-Phase Systems for Industrial Design and Nuclear Engineering, McGraw-Hill (1981).
- 6) 沸騰熱伝達と冷却, 日本機械学会, (1989).
- 7) Lahey, R.T. ed., Boiling Heat Transfer, Elsevier (1992).
- 8) Carey, V.P., Liquid-Vapor Phase-Change Phenomena, Hemisphere Publishing Co. (1992).
- 9) Tong, L.S. and Tang, Y.S., Boiling Heat Transfer and Two-Phase Flow, Taylor and Francis (1997).
- 10) Kandlikar, S.G., Shoji, M. and Dhir, V.K., Handbook of Phase Change, Boiling and Condensation, Taylor & Francis (1999).

[以下は書籍の個別の章]

- 11) Jakob, M., Heat Transfer, Chap.26: Local Boiling, 1957, 580-584.
- 12) Holman, J.P., Heat Transfer, 7th Edition, Chap.9:

Condensation and Boiling Heat Transfer, 507-540.

- 12) 西川・藤田, 伝熱工学の親展, 第 2 巻, 核沸騰, 養賢堂 (1974), 1-115.
- 14) 伝熱学, 理工学社 (1982), 第 9 章: 沸騰, 210-254.
- 15) 甲藤他 3 名, 伝熱学特論, 第 4 章: 相変化, 養賢堂(1984), 125-182.

[付録 B : 沸騰に関するレビュー記事]

以下, いずれも Advances in Heat Transfer, Academic Press の Annual Review 記事

- 1) Leppert, G. and Pitts., C.C., Vol.1(1963), Boiling, 185-267.
- 2) Siegel, R., Vol.4 (1967), Effects of Reduced Gravity on Heat Transfer, 144-228.
- 3) Jordan, D.P., Vol.5 (1968), Film and Transition Boiling, 55-128.
- 4) Clark, J.A., Vol.5 (1968), Cryogenic Heat Transfer, 325-518.
- 5) Cole, R., Vol.10 (1974), Boiling Nucleation, 86-166.
- 6) Afgan, N.H., Vol.11 (1975), Boiling Liquid Superheat, 1-50.
- 7) Sprieger, G.S., Vol.14 (1978), Homogeneous Nucleation, 281-346.
- 8) Thome, J.R. and Shock, A.W., Vol.16 (1984), Boiling of Multicomponent Liquid Mixtures, 60-157.
- 9) Cooper, M.G., Vol.16 (1984), Heat Flow Rates in Saturated Nucleate Pool Boiling, 158-241,
- 10) Katto, Y., Vol.17 (1985), Critical Heat Flux, 2-64.
- 11) Kalinin et al., Vol.18 (1987), Transition Boiling Heat Transfer, 241-323.
- 12) Nishikawa, K. and Fujuita, Y., Vol.20 (1990), Nucleate Boiling Heat Transfer and Its Application, 1-82.
- 13) Wolf, D.H. et al., Vol.23 (1993), Jet Impingement Boiling, 1-132,
- 14) Dhir, V.K., Vol.29 (1997), Heat Transfer from Heat Generating Pools and Particulate Beds, 1-58.
- 15) Yagoobi, S.Y. and Bryan, J.E., Vol.33 (1999), Enhancement of Heat Transfer and Mass Transport in Single-Phase and Two-Phase Flows with Electrohydrodynamics, 95-186.
- 16) Ghiaasian, S.M. and Khalik, S.I.A., Vol.34 (2001),

Two-Phase Flow in Microchanells, 145-255.

17) Straub, J., Vol.35 (2001), Boiling Heat Transfer and Bubble Dynamics in Microgravity, 58-172.

引用文献

以下の文献に記す番号 Ref(***) は伝熱研究, Vol.32, No.124 (1993)の学会創立 30 周年記念特集号「沸騰研究の過去, 現在, 未来」に記載の文献番号(***)を示す.

- [1] Nukiyama, S., The maximum and Minimum Values of the Heat Transmitted from Metal to Boiling Water under Atmospheric Pressure, J. Japanese Society of Mechanical Engineers, 37(1934), 367-374. or Int. J. Heat Mass Transfer, 9 (1966), 1419-1433.
- [2] 庄司, 「沸騰研究の過去, 現在, 未来」, 伝熱研究, 32-124(1993), 193-104.
- [3] 庄司, 「沸騰研究の将来課題」, 伝熱研究, 34-137(1995),16-17.
- [4] 庄司, 「沸騰研究の 50 年」, 日本伝熱学会 50 周年記念講演セミナー予講集, 横浜開港記念館, (2011-10). 学会 Web で公開予定.
- [5] Hsu, Y.Y. and Graham, R.W., Ref-(23)
- [6] Friz, W., Maximum Volume of Vapor Bubbles, Physic. Zeitsch., 36(1935), 379-354.
- [7] Rohsenow, W.M., Ref-(24)
- [8] Kutateladze, S.S., Ref-(25)
- [9] Nishikawa, K. and Yamagata, K., Ref-(26)
- [10] 西川・藤田, 伝熱工学の進展, 第 2 巻, 養賢堂, 1974, p.104.
- [11] Zuber, N., Ref- (53)
- [12] Katto, Y. and Yokoya, S., Ref- (32)
- [13] Haramura, Y., Ref- (50)
- [14] Kalinin, E.K. et al., Ref- (80)
- [15] Berenson, P.J., Experiments on Pool Boiling Heat Transfer, Int.J. Heat Mass Transfer, 5(1962), 985-999.
- [16] Bromley, L.A., Ref- (101)
- [17] Rohsenow, W. and Griffith, P., Ref- (52)
- [18] Moore, F.D. and Mesler, F.D., Ref- (27)
- [19] Berenson, P.J., Ref- (70)
- [20] Gaertner, R.F., Ref- (19)
- [21] Graham, R.W. and Hendricks, R.C., Ref- (28)
- [22] Nishikawa, K. and Fujita, Y., Ref- (45)
- [23] Bhat, A.M. et al., Ref- (33)
- [24] Bhat, A.M. et al., Ref- (34)
- [25] Bhat, A.M. et al., Ref- (35)
- [26] Nishikawa, K. et al., Ref- (21)
- [27] Liaw, S. P. and Dhir, V.K., Ref- (41)
- [28] Dhir, V.K. and Liaw, S.P., Ref- (42)
- [29] Shoji, M., et al., Chaos in boiling on a small-size heater, Proceedings of the Fourth ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Maui, vol.2, 1995, pp.225-232.
- [30] Sun, K.H. and Lienhard, J.H., Ref- (54)
- [31] Lienhard, J.H. and Dhir, V.K., Ref- (55)
- [32] Lienhard, J.H. and Eichorn, R., Ref- (56)
- [33] 西尾・永井, 「沸騰熱伝達における固液接触現象の研究」, 日本伝熱シンポ, 新潟, F232, 511-512(1996)
- [34] 田中・西尾, 「高熱流束沸騰における固液接触構造」, 日本伝熱シンポ, 熊本, D313, 611-612(1999)
- [35] 趙, 増岡, 鶴田, 「マイクロ・マクロ液膜モデルによる非定常沸騰熱伝達の理論的研究」, 日本伝熱シンポ, 新潟, F112, 249-250(1996)
- [36] Zhao, Y.H., A Comprehensive Model for Critical Heat Flux, 日本伝熱シンポ, 名古屋, H312, 911-912(1998)
- [37] Liaw, S.P. and Dhir, V.K., Ref- (83)
- [38] 庄司・黒木, Ref- (63)
- [39] Kumada, T. and Sakashita, Ref- (59)
- [40] Kumada, T. and Sakashita, Ref- (64)
- [41] Kalinin, E.K. et al., Ref- (11)
- [42] Kalinin, E.K. et al., Ref- (80)
- [43] 庄司・川上, 「膜および遷移沸騰における加熱面温度変動と熱伝達機構に関する研究」, 日本伝熱シンポ, 2989, C333(1989), 806-808.
- [44] Shoji, M. et al., Measurement of Liquid-Solid Contact Using Micro-Thermocouples in Pool and Transition Boiling of Water on a Horizontal Copper Surface, AJ, Reno, Vol2. 1991, 333-338.
- [45] Lee, L.Y. et al., Ref- (65)
- [46] Shoji, M. et al., Ref- (82)
- [47] Maracy, M. and Winterton, R.H.S., Ref- (75)
- [48] Witte, L.C. and Lienhard, J.H., Ref- (72)
- [49] Ramilison, J.M. and Lienhard, J.H., Ref- (74)
- [50] Bui, T.D. and Dhir, V.K., Ref- (73)
- [51] Auracher, H., Ref- (76)
- [52] Haramura, Y., Ref- (77)

- [53] Drew, T.B. and Mueller, C., Ref- (68)
[54] Westwater, J.W. and Santangelo, J.C., Ref- (69)
[55] Kalinin, E.K. et al., Ref- (80)
[56] Lin, D.Y.T. and Westwater, J.W., Ref- (89)
[57] Peyayopanakul, W. and Westwater, J.W., Ref- (90)
[58] Irving, M.E. and Westwater, J.W., Ref- (91)
[59] Berenson, P.J., Ref- (93)
[60] Spiegler, P. et al., Ref- (95)
[61] 西尾, Ref- (96)
[62] Sakurai, A., Ref- (16)
[63] Sakurai, A. and Shiotsu, M., Ref- (17)
[64] 庄司・河田, 「水平加熱円柱の飽和膜沸騰と極小熱流束に関する研究」, 日本伝熱シンポ, 1986, B211, 217-219.
[65] 西川ら, Ref- (98)
[66] 庄司・金子, 「水平加熱面上の飽和膜沸騰と極小熱流束に関する研究」, 日本伝熱シンポ, 1986, B222, 220-222.
[67] Berenson, P.J., Ref- (101)
[68] Ruckenstein, E., Ref- (102)
[69] Lao, Y.J., Ref- (103)
[70] Chang, Y.P., Ref- (104)
[71] Sakurai, A. et al., Ref- (123)
[72] Bromley, L.A., Ref- (109)
[73] Bromley, L.A., Ref- (118)
[74] Bromley, L.A. et al., Ref- (124)
[75] Hendricks, R.C. and Baumeister, K.J., Ref- (128)
[76] Bui, T.D. and Dhir, V.K., Ref- (116)
[77] Nishio, S. and Ohtake, K., Ref- (117)
[78] Yanagita, T., Coupled Map Lattice Model of Boiling, Physical Letters. A, 165 (5/6) (1992) 405-408
[79] Yanagita, T. and Kaneko, K., Coupled Map Lattice Model for Convection, Physical Letters. 175A (1993) 415-420.
[80] Shoji, M., Boiling Simulator, A Simple Theoretical Model of Boiling, KN paper 3rd ICMF'98, Lyon, CD-ROM
[81] Shoji, M., Chaos in Boiling on a Small-Size Heater, Proc. Fourth ASME-JSME Thermal Joint Conference, Maui, 2(1995), 225-232.
[82] Shoji, M., Studies of Boiling Chaos, A review, Int. J. Heat Mass Transfer, 47(2004), 1105-1128.
-

伝熱機器 50 年の進展

Advances in Heat Transfer Equipment in Fifty Years

中山 恒 (名誉会員)

Wataru NAKAYAMA (Honorary Member)

e-mail: watnakayama@aol.com

1. はじめに

伝熱学会 50 周年記念事業の一環としてセミナーが横浜で開かれ、そこで表題の話をする仕事を頂いた。筆者が指名された背景には日立製作所で各種熱交換システムの研究開発に携わっていたことがあるかと思う。引き受けてみたものの、まともに考えると大変難しい仕事である。どのように話を纏めたらよいか、次のことごとについて考えてみた。

(1) 伝熱機器とは？

熱の移動を制御する機器は全て伝熱機器と呼べるが、これでは対象範囲が広すぎる。考えつくだけでも各種規模のボイラー、炉、単相および相変化する作動流体の熱交換器、太陽温水器と集熱器、蓄冷熱器、充填層、ヒートシンクと呼ばれるフィン付き冷却器、ヒートパイプ、サーモサイフォン、熱電子変換器、等々多数にのぼる。

(2) 進展を表す指標は？

伝熱機器の設計は、複数の相反する因子を秤にかけて妥協点を探る多面的な作業である。例えば空気熱交換器で価格が多少高くなっても小型化を追求する、あるいは寸法が多少大きくなっても大直径のファンを低速で回転させ低騒音を追求する、などが例である。また、研究段階で優れた性能や機能が実証されながら、実用に至らなかったものは数多くある。これらのなかには発表当時に関心を集め、さらに研究を盛り上げたものもあるが、果たして進展と捉えるべきか迷うところである。一般的に言えば、実用になっている機器の進展は多面的に捉えて然るべきものである。例えばボイラーや高温用途の熱交換器では安全性の向上が進展指標の一つである。熱交換器の設計に使うツールの進歩、生産技術の進歩、なども進展指標である。また、実用化にはコストの壁を超えねばならない。優れた技術であってもコストの壁を超えられなかったものは多い。しかし、これらのうちの

あるものは、コスト高を許容する用途が出現して実用化された。なかには生産量の拡大とともにコストが下がり、更に用途を広げると云う好循環に入ったものもある。コスト高を許容する用途は、エネルギー危機やエレクトロニクス市場の拡大など社会経済環境が齎すものである。従って、時代背景を抜きにして伝熱機器の進展を語ることは出来ない。

(3) 話に期待されるものは？

歴史を顧みる作業の目的は、現在から将来へかけての展望を拓くことにある。但し、展望で望むところは各人各様である。企業の人たちにとっては伝熱機器の研究開発をどのように進めたらよいかに関心事であろう。大学その他の研究機関で基礎研究に携わる人たちは、新しい物理現象の研究から実用上のインパクトがある成果を得たい、それにはどのような課題設定をすればよいか糸口を得たい。さらに学会や研究行政機関にとってはこれからどの分野に力を注ぐよう流れを作るかについての展望が欲しい。

さて、このように多面性ある主題は考えただけでも気が遠くなる。よしんば他の人たちの協力を得て纏めることが出来ても、短時間のうちに聴衆に伝える、あるいは原稿の分量を適当な範囲に収めることは難しい。そこで次の方針を採用ことにした。

- これまでの伝熱シンポジウムのプログラム、「伝熱研究」「伝熱」誌その他の文献を参照しつつ、我が国の伝熱機器に関する研究開発と時代背景の概説を試みる (2 節)。
- いくつかの機器を対象とし、各機器に関する話のなかで伝熱機器開発に関わる諸要因に触れる (3-7 節)。
- 筆者の回想を軸に記すので、引用例に偏りがあるが読者の容赦を乞う。

2. 伝熱機器の研究開発と時代背景：

先の 50 周年記念寄稿[1]のなかで、伝熱研究にとっての環境が年代とともに変化してきた様を記した。伝熱機器の研究開発にもこれは当然当て嵌まる。伝熱学会（伝熱研究会）が発足した 1960 年代以降の技術発展はあらまし次のようになろう。今日の状況に繋がる事項も記してある。図 1 は伝熱シンポジウムで発表された論文の総数と伝熱機器に関連する論文の数の推移を示したものである。

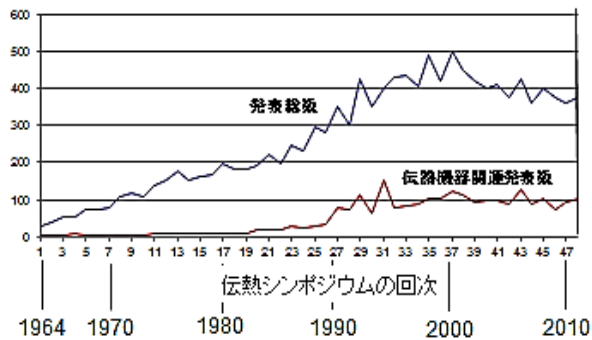


図 1 伝熱シンポジウムにおける発表数の統計

26 回伝熱シンポジウム (1989 年) 以前の状況に関しては小竹進先生が纏められた詳しい調査資料 [2]がある。この時点以降の伝熱機器関連の発表数は筆者が勘定したもので、恣意的な選択が含まれている。広く捉えれば殆ど全ての研究が伝熱機器に関連している。また、年代が進むに従って狭義の熱交換器以外の伝熱機器が増えている。こうしたことから、発表の分類が曖昧になるのは避けられない。それでも傾向は図 1 に表れており、近年では発表総数の約 1/4 が機器関連の発表である。以下に、我が国の伝熱機器開発の概況、世界の状況、今日の課題との関連などを 10 年ごとに区切り、伝熱学会誌、シンポジウムプログラム、その他の資料を参照しつつ纏めてみた。

● 1960 年代

発電プラント、石油化学プラントなど大規模システムの構成要素である熱交換器に直接または間接に関連する研究が多くなされた。超臨界圧ボイラーの水管、原子炉燃料棒表面における臨界熱流束の予測は極めて重要な課題であった。バーンアウト点に達すると水管または燃料棒被覆が過熱し破損する確率が高くなる。この例に見られるように伝熱研究の多くは大規模システムの安全設計と

密接に関連していた。「伝熱研究」2 巻 8 号には国内産業界が抱える伝熱研究へのニーズを纏めた報告[3]が見られる。1960 年代初期における企業の関心は、主としてボイラー、蒸気タービン、ガスタービンの強度信頼性向上と材料開発にあり、伝熱研究はこれら研究開発努力を補完する役割であったことが伺える。但し、研究テーマのなかには燃料電池、MHD 発電、通信機器の冷却に関するものが既に登場していた。

伝熱研究会の初期に見られる研究には今日に至るまで継続されているものがいくつかある。例えば自動車用熱交換器に関する伝熱研究のニーズは早くから提起されており[4]、技術の進展状況はその後もしばしばレビューされてきた。また、機器の安全性に関連する伝熱研究課題は今日も新しい環境のもとで登場している。例えば普及が進んでいる小型ボイラーでは体積当たりの熱負荷が増大しており、臨界熱流束の予測は依然として研究課題である[5]。二相流伝熱に関する初期の研究は、今日の研究を進めるうえで貴重な知的資産になっている。これらのほか、冷却塔、コンパクト熱交換器、乾燥機、製鉄冶金などに関する話題は 1960 年代後半の夏季セミナーなどで取り上げられている。1968 年に出版された坪内為雄先生編の「熱交換器」[6]は熱交換器の設計理論を習得する参考書であった。

世界の状況、とりわけ我が国における初期の伝熱研究が深い影響を受けた米国と英国の状況を記しておく。熱交換器のなかでも高温高压用途に適した管胴型 (シェル・アンド・チューブ) 熱交換器の設計手法と、熱交換器内部の物理現象に関する研究が盛んに行われた。米国では企業コンソーシアムである Heat Transfer Research, Inc. (HTRI) が 1962 年に発足し、基礎研究から設計コードの開発まで幅広い活動を始めた。英国では Atomic Energy Research Establishment (AERE) が二相流伝熱と熱交換器設計の基盤データを生み出していた。米国機械学会 (ASME) と米国化学工学会 (AIChE) が共催する National Heat Transfer Conference (NHTC) では HTRI と AERE からの発表が盛んであった印象がある。ところで会議 (NHTC) の方は近年低調になってしまったが、HTRI はエネルギー、材料、化学、などの産業で高まっている熱交換器への需要を反映して業績堅調のようである。現在の企業

メンバーには 77 社の日本企業(または日本法人企業)の名が見られる。化学プロセス装置用シェルアンドチューブ熱交換器に関する比較的近年の状況に関しては[7]に報告されている。

● 1970 年代

我が国は戦後の高度成長期から 1973 年のオイルショックを経て、安定成長期と呼ばれるフェーズに入った。原子力発電は試験段階から商業発電へと軌道に乗り始めた。更なる高効率発電と燃料サイクルの完成を目指した研究が着手されている。多目的高温ガス炉、高速増殖炉、核融合炉などに関する研究である。一方、原子力プラントに用いる電力機器は大容量化し、体積当たりの発熱密度が増大、高性能冷却技術が求められるようになった[8]。

この年代の特徴は冷凍空調機器と自動車の急激な普及と言えよう。これらの製品は既に 1960 年代半ばには成長を始めていたが、一般家庭の所得増大と企業活動の拡大を反映して生産量が大幅に増えた。統計[9]を見ると、空調機生産量は 1970 年から 1980 年の 10 年間に 5 倍になっている。自動車の生産量は同じ 10 年の間に約 2 倍である。一般消費者向けの製品開発では大規模機器の場合に比べ開発者の創意工夫を入れやすい。冷凍空調用熱交換器、自動車のラジエータ、カークーラーなどに様々な考案が組み込まれた。とくに我が国では狭隘な居住スペースとオフィススペースの事情から熱交換器の小型化に力が注がれた。種々の微細構造を伝熱面に設けて伝熱促進を図る試みがなされ、あるものは実用化された。

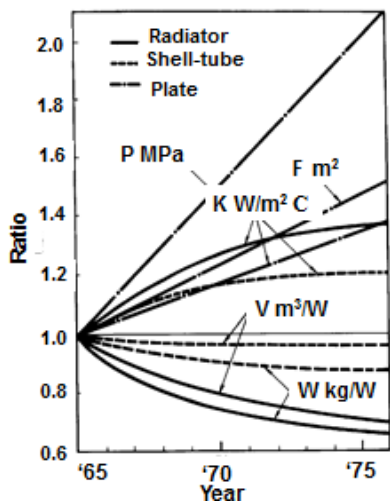


図 2 各種熱交換器の性能指標[10]

1970 年代後半には高性能熱交換器に関する話題がセミナーなどで取り上げられている。また、泉亮太郎先生[10]、藤掛賢司氏[11]によるレビューが見られる。図 2[10]は各種熱交換器の伝熱面積(F)、熱通過率(K)、圧力損失(P)、熱交換量当たりの容積(V)、同重量(W)を 1965 年時の値との比にしてまとめたものである。1960 年代から 1970 年代半ばの間に進んだ、熱交換器の小型高性能化の状況が見てとれる。自動車メーカーにおけるラジエータ高性能化の努力は 1950 年代から始められており、図 3[11]に示すように 1970 年代には既に飽和レベルに達していた。更なる高性能化には原理的ブレークスルーが必要との認識が高まり、伝熱研究界へのテーマ提起がなされている。

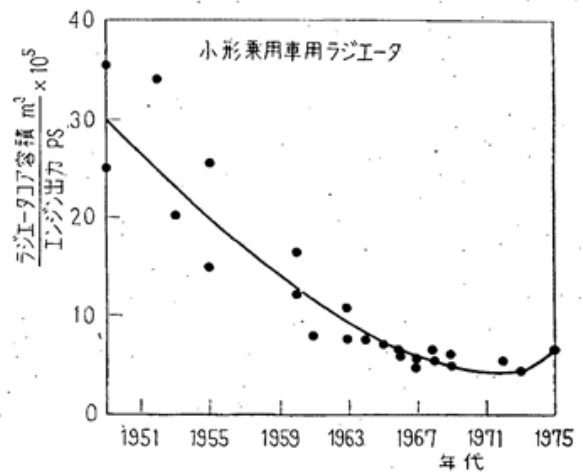


図 3 自動車用ラジエータの小型化[11]

1973-1974 年のアラブ諸国による石油禁輸はオイルショックと呼ばれる経済成長への減速効果を齎した。同時にエネルギー問題に関する関心を高める効果を齎した。省エネルギー、太陽エネルギー、海洋温度差など再生可能エネルギー源利用のための技術開発が奨励された。通産省工業技術院は 1974 年にサンシャイン計画、1978 年にはムーンライト計画を発足させ、技術開発を助成した。新エネルギー、省エネルギーに関する研究が活発になり、「伝熱研究」、伝熱シンポジウムプログラムには蓄冷熱器、低温度差熱交換器、高性能伝熱面、太陽エネルギー利用に関する発表が増えた。今日ふたたび再生可能エネルギーに対する関心が高まっているが、注目されているエネルギー源と利用技術は既に 1970 年代に検討されたものが殆

どである。大きく変わっていることは、その後の電子技術の発達が発したエネルギーの開発と利用のための制御技術の進歩である。象徴的な例はスマートグリッドによるエネルギー総合利用効率の向上であろう。ソーラーセルの品質向上と価格低下は半導体の生産技術の発達に負うところが大きい。

1970年代末は第二次オイルショック（1978年）に見舞われ、再びエネルギー問題への対応に迫られた。1980年に新エネルギー総合開発機構（NEDO）が発足し、工業技術院に代わってエネルギー技術の開発研究をより強力に助成するようになった。これは周知のように今日まで続いている。

また、1970年代には環境問題に目が向けられ始めた。トランスなど電気機器の冷却流体として用いられてきたポリ塩化ビフェニール(PCB)の毒性が明らかになり、我が国では1975年に生産が禁止になった。さらに1970年代末は、オゾン層破壊の可能性が指摘され始めた時期でもある。この問題はその後空調機用冷媒の変更を促すことになる。化学工業における公害と伝熱の関連は既に1969年の伝熱研究誌上で注意が喚起されている[12]。また、1974年の夏季伝熱セミナーのテーマとして熱公害の問題が取り上げられている。

更に1970年代にはヒートパイプが関心を集め始めた。一色尚次先生が記録された1977年の夏季伝熱セミナー放談会ではトピックの一つになっている[13]。この記録のなかに次のやりとりが見られる。

“司：ヒートパイプのうまれたいきさつは？
TN：ヒートパイプは日本へは5～6年前に入ってきた。米国では10年前にあった。（O氏：昭和38年に入っていた。）私が知ったのは44年か45年で、研究をはじめたのは5～6年前です。熱伝導が銅の数十倍あるというので驚いた。しかしヒートパイプは便利なようで不便だ。実際の使い道がない。棒に比べて伝熱がよいが、最終的にはコストにかかっているの、ドタンバで使われない場合が多い。”

このあと、東大の5月祭で鯛焼きにヒートパイプを使った話が出てくるが、我が国ではまだ好奇心の対象の域を出ていなかったようである。関心を高めた要因の一つは、1977年に完成したアラス

カ縦断石油パイプラインで、永久凍土を保持するのにヒートパイプが使われたことがある。ヒートパイプに関しては更に5節で述べる。

● 1980年代

1980年代で特記すべきことの一つは電子計算機の発達である。電子計算機の大容量化と演算速度の向上は伝熱研究と伝熱機器設計に大きな影響を及ぼした。数値シミュレーション技法と商用コードが発達し、熱交換器内部の伝熱流動に関する詳細解析が可能になった。一方、計算機内部の発熱密度が上昇し、冷却技術が計算機の進歩に大きな影響を及ぼすようになった[14, 15]。

また、環境問題は更に大きな関心を集めるようになった。1970年代から指摘され始めたオゾン層の減少とフロン冷媒の関連は、1980年代に入ってほぼ確定的になった。国際的な取組が始まり、オゾン層保護のためのウィーン条約（1985年）、オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書（1987年）に纏められた。我が国でもこれに対応してオゾン層保護法が施行された。規制強化により冷凍空調機用冷媒の成分変更を迫られることになった。冷媒の変更は熱力学特性と熱輸送物性の変更を齎し、熱交換器の設計に大きな影響を及ぼす。最初に規制対象に上がった製品のなかにカークーラー用冷媒R-12がある。カークーラーの開発担当者は「やがて空気を冷媒にせざるを得ないのではないか？」と真剣に考えていた。また、フロン冷媒登場以前の冷凍機ではアンモニア冷媒が用いられていた。「またアンモニアに戻ざるを得ないのではないか？」もよく耳にした問いかけである。今日、冷媒に関する課題は地球温暖化傾向の環境下でさらに厳しさを増している。

NEDOによる研究開発推進もあってエネルギー問題に関する関心は更に高まった。太陽熱、海洋温度差、深部地熱の利用に関してはパイロットプラントによる試験検討が行われている。これらの研究開発は伝熱研究誌上、夏季伝熱セミナーなどで報告されている。このような背景を反映して拙著「熱交換技術入門」[16]を出版した。エネルギー有効利用の観点から見た熱交換器の性能評価法に関する荻野文丸先生による提案も見られる[17]。

伝熱促進技術はエネルギーの利用効率にインパクトを与える。また、各種熱交換器の小型化を齎す。1970年代から高まりを見せていた伝熱促進の

研究は 1980 年代に入ると実を結び始めた。とくに空調機用熱交換器の薄型化が顕著になった。空冷熱交換器の高性能化に関する基礎研究も充実し、メーカーからも多数の発表が見られるようになった。プレートフィンチューブ熱交換器の性能計算法に関するレビューが瀬下、藤井両氏によりなされている[18]。また、鳥越氏らは伝熱促進技術が各種熱交換器に及ぼすインパクトをレビューしている[19]。

研究トピックスとして関心を集めたものの中に、電場付与による伝熱促進がある[20]。電場による伝熱促進効果は浅川勇吉先生が 1976 年に Nature 誌上で発表し[21]、浅川効果と呼ばれることになった。浅川先生は伝熱シンポジウムでも数回にわたりこのテーマについて講演された。電場による伝熱促進にはその後多くの研究者が取り組んだ。

1980 年代は宇宙関連の研究開発が盛んになった年代でもある。1990 年代に本格化する大型ロケットの打ち上げと宇宙ステーション建設へ向けて研究が始められた[22,23]。

● 1990 年代

1990 年代は様々な面で転換を迫られる時期であった。1980 年代後半のバブル経済は 1990 年代初めに失速した。国内経済の停滞は企業の体力を削ぎ、企業内の基礎研究部門にしわ寄せが及んだ。企業内の伝熱機器開発研究にも影響が及び、伝熱研究陣の増強がそれまでほどには見込めなくなった。さらに、熱交換器など従来型の伝熱機器に関する技術も飽和域に入った。加えて伝熱工学の新しい適用対象として登場した高速電子計算機の世界でも変化が生じた。1980 年代まで大型高速電子計算機に使われてきたデバイスは大きな電力消費を伴うバイポーラトランジスタであった。バイポーラトランジスタの対極にあったのが CMOS デバイスで、CMOS は電卓など専ら民生用品に使われていた。CMOS は本質的に低速デバイスで、大型計算機には不向きであると見られていた。しかしながら、パソコンその他の広い用途の展開に促され CMOS 技術は徐々に改良され、バイポーラと太刀打ちできるほどになった。CMOS の利点は電力消費が少ないことで、1990 年代に入ると大型計算機メーカーはバイポーラから CMOS へと転換を始めた。バイポーラを使う計算機の冷却コストが高くなりすぎたことも転換を促した。計算機の

発生熱量は著しく低くなり、高性能冷却法に関する研究は多くの計算機メーカーで中止を余儀なくされた。しかし、1990 年代後半になると電子機器の発熱問題は再び大きくなった。この件に関しては更に 6 節で述べる。

一方、パソコンと各種機器の制御に用いられるマイクロコントローラ（マイコン）の普及は急速に進んだ。これらのエレクトロニクス技術の発達は広範囲で深い影響を社会に及ぼすようになった[24]。パソコンとマイクロプロセッサの起源は 1960 年代末から 1970 年代半ばに遡るが、20～30 年を経て情報社会を支える基本要素に成長した。マイコンは空調冷凍機器をはじめあらゆる機器に組み込まれるようになり、機器の多機能化とエネルギー効率の向上を促した。空調機ではインバーター制御、ファジィ制御などがきめ細かく行われ、省電力と静音化の効果を齎した。

インターネットの普及が仕事や生活にインパクトを与え始めたのも 1990 年代である。電子メールやファイル転送が急速に便利になった。これは製品仕様の決定に関する情報交換を容易にし、また設計に必要なデータの転送を迅速にし、工業製品の設計や開発の生産性の向上を齎した。熱交換器をはじめ各種機器の設計に必要な時日は短縮された。とりわけ数値流体解析（CFD）コードを用途に適合するように開発し、技術サービスとともに設計者に提供するベンダーが増えた。数値流体解析はかつて、大規模システム開発のためのツールであったが、パソコンや冷蔵庫など身近な製品の設計ツールとしても普及した[25, 26]。

エレクトロニクス技術を支える半導体製造技術は、機械的機能を有する MEMS デバイスをも生み出した。MEMS が登場したのは 1980 年代であるが、1990 年代に入ると MEMS 製品の生産量が伸び始めた。MEMS 技術の発達は冷却デバイスへの適用を促し、マイクロチャンネル冷却器への関心が高まった。

先にも記したように[1]、1990 年代には多くの指標が、量的拡大時代の終焉を示している。伝熱学会誌と伝熱シンポジウムに見られる伝熱研究のテーマを一覧すると、多様化が進んでいることがわかる。従来からのエネルギー開発研究は NEDO などの助成もあって連綿と続けられている。コージェネレーション、エネルギー効率の向上を目指す吸

収式ヒートポンプなどが関心を集めた。熱交換器の小型高性能化は引き続き関心を集めたテーマで、特集号が組まれている[27]。環境問題も永続テーマで、とりわけ地球の温暖化傾向が顕著になり、関連するテーマへの取り組みが強化された。冷熱サイクルのための新冷媒と熱交換器性能の関連が重要テーマになった。小山繁、藤井哲両先生が混合冷媒の熱交換に関する詳しいレビューを行っている[28]。一方、従来から関心は払われてはいたが少数派であったテーマに関する発表が増えた。生体、食品、農業などに関連するテーマである。

1990年代の伝熱研究に見られるもう一つの特徴は、それまで主として理学の範疇にあったテーマに関心が集まったことである。小竹進先生が主導された分子動力学の伝熱領域への応用は1990年代に急速に進んだ。カオス理論、熱力学第二法則などの応用も興味を集めた。伝熱機器に直接関連するテーマのなかで大きな関心と呼んだのはドリームパイプと自励振動式ヒートパイプである。ドリームパイプはKurzwegとZhaoの論文[29]に端を発し、熱流体デバイスの新原理と受け止められた。ドリームパイプに関するレビューは小澤守先生が行っている[30]。自励振動式ヒートパイプは気泡と液塊が混在する閉蛇行管内で発生する振動流を熱輸送に利用するもので、赤地久輝氏の特許と開発が関心を喚起した[31]。これらテーマのレビューは西尾茂文先生が行っている[32]。

● 2000年代

伝熱研究に見られる2000年代の特徴は、これまでのテーマに対する研究の深化である。伝熱学会誌と伝熱シンポジウムのプログラムからテーマ名を一覧すると、燃料電池、電子機器冷却、蓄冷熱装置、高性能熱交換器、小型ガスタービン、高温ガス炉、中型軽水炉、吸収式ヒートポンプ、充填層、太陽熱利用、等々これまでに登場したものが多く、宇宙開発も軌道に乗り、微小重力環境下の伝熱問題も取り上げられている。また、アイデアは既にあつたが、環境問題への取り組みに促され、改めて取組の対象になっているものも見られる。CO₂などノンフロン冷媒を作動媒体にした冷凍・ヒートポンプサイクルの試作研究が行われた[33]。テーマ名は変わらなくても、研究開発に用いるツールの発達には目を見張るものがあり、今日も続いている。これにはエレクトロニクス技術の広範

囲にわたる浸透が支えとなっている。

解析と設計計算に用いるツールとしてのCFDコードはより充実し、また大規模数値問題の解法にも進展があつた[34]。加えてマイクロプロセッサ技術の進展は著しく、かつて大型計算機で行っていた熱流体シミュレーションが、デスクトップパソコン、更にノートブックパソコンでも行えるようになった。CFDコードベンダーも増え、ベンダー間の競争はコードの使いやすさを増すとともに、コードユーザー人口を急速に拡大した。シミュレーションツールの普及は一方で設計解析に際し物理的洞察を省いてしまう弊害も招いている。

計測ツールの発達も伝熱機器の研究開発を深化させた。例えば、PEFC燃料電池の電極構造に関する設計課題がある。空気電極で生成する水が滞留すると電池性能が低下する。水の除去を容易にするための電極構造設計は性能を長期間にわたり維持するのに重要である。伝熱研究誌に燃料電池内部での含水量や電解液の挙動を調べる計測法が解説されている[35]。このような情報は燃料電池技術の進歩に重要である。こうした計測システムは、センサーからの大量のシグナルを高速処理するマイクロプロセッサの進歩に負うところが大きい。このほか機器内部の複雑な流れの計測にPIV計測が普及した。PIV計測は動画像からの情報を処理するもので、これもマイクロプロセッサの発達なしには叶わぬものである。しかも信号処理技術とマイクロプロセッサは今日も急速に発達している。伝熱機器内部の熱流動に関し日々豊富な情報が得られ、機器性能の向上に役立てられている。

一方、マイクロプロセッサとこれを基本エレメントとする各種電子機器の高速高機能化が進み、発熱問題が再び研究課題になった。ノートパソコン筐体の薄型化が競争で進められ、制約された空間のなかで熱輸送と放熱の経路を設けねばならなくなった。デスクトップその他のクラスのコンピュータでも、程度の差はあれ、冷却に使える空間は縮小した。これとともに、小型高性能冷却デバイスの研究開発が進められた。伝熱誌に「小さな伝熱機器」特集が生まれ、ヒートパイプ、ペルチェ冷却器、マイクロチャンネル熱交換器などの状況が解説されている[36]。また、別の特集号[37]では、民生機器や宇宙機器などにおける電子デバイス発熱問題と熱設計例が報告されている。電子

機器冷却セッションは伝熱シンポジウムの常連セッションになった。

2000 年代には経済のグローバル化が進み、国内における製造業の空洞化が懸念され、この懸念は今日も続いている。「ものづくり」の魅力を若い世代の人たちに訴え、生産業の国内定着を目指す努力が必要である。こうした努力は学会、官、企業による共同作業である。伝熱学会誌では「ものづくり」特集[38]、「生産技術と熱」特集[39]、「製造現場での熱マネジメント」特集[40]が組まれている。伝熱シンポジウムでも生産技術関連の発表が増えた。

さて、上記は伝熱機器に関する研究開発の進展を、時系列で概観したものである。次の数節では伝熱機器の種類ごとに、技術の実用化に関する要因の概説をする。

3. 空気熱交換器：コストの制約のなかでの工夫

空気熱交換器の代表的な形態は、自動車用ラジエータ（図 4(a)）とフィン・チューブ熱交換器（同 (b)）である。ラジエータでは扁平チューブに金属帯を折り曲げてろう付けしてフィン（コルゲートフィン）とし、フィン面には伝熱促進用の切り起こし（ルーバ）構造を設けてある。真鍮チューブと銅フィンの組み合わせが一般的である。アルミニウムを用いれば軽量になるが、自動車の環境では耐久性に懸念があった。最近ではアルミラジエータの耐久性向上に進展が見られる。図 5 はラジエータの技術動向を示すもので[41]、図 3 とほぼ同じ時期、すなわち 1950 年代末から 1970 年代半ばまでのデータである。但し、図 5 では小型軽量化に寄与した因子を記してある。1963 年頃までの小型軽量化にはプレートフィンの薄肉化とチューブの細径化が寄与していた。1965 年の少し前からコルゲートフィンが用いられるようになり、1957 年時点の値と比べ重量で 40%近い減量、容積で 50%近い小型化を得ている。また、耐圧構造の強化により冷却水の圧力を高め、水温と大気温との差を大きくしたことも小型化に大きく寄与した。その後、ラジエータ幅の減少、ルーバフィンの採用などにより小型軽量化の努力が払われた。

自動車用の空調システムを構成するコンポーネントのうち、蒸発器は乗客スペースに接して置かれる。従って蒸発器に対して小型化の要求が最も強い。図 6 に自動車用エアコンの蒸発器が小型化

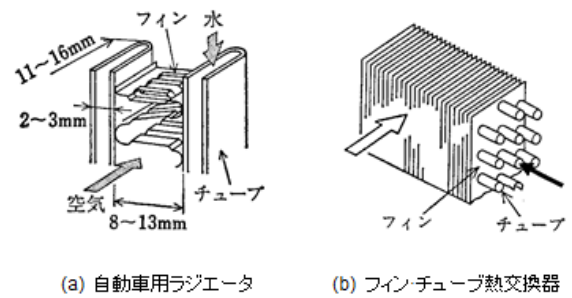


図 4 空気熱交換器の代表的形態

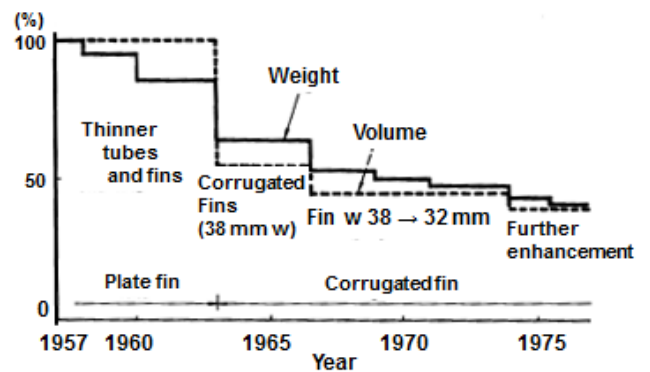


図 5 自動車用ラジエータの小型軽量化[41]

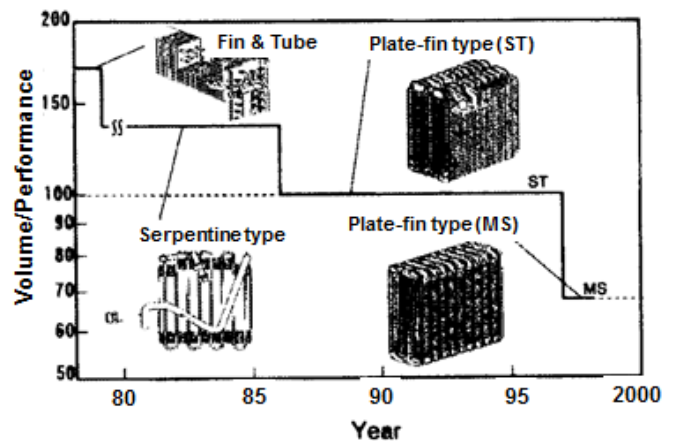


図 6 自動車空調用蒸発器の小型化[42]

されてきた趨勢を示す[42]。当初は、通常の空調機と同形態の円管とプレートフィンの組み合わせであった。その後、扁平チューブとコルゲートフィンの組み合わせ、すなわちラジエータ形態が採用された。さらに冷媒側の伝熱促進、冷媒パスの改良などにより小型化が進められた。

熱交換器の形態を決める要因は、生産コストとコンパクト化の要求との相対比であると見ることが出来る。自動車用ではコストも勿論重要な因子

であるが、コンパクト化の要求が強くなり、ラジエータ形態が広く採用されている。扁平チューブは空気流に対する抵抗が少ない。フィンとチューブの接合にもろう付けが一般的である。これに比べ、一般の空調機ではコスト低減の要求が厳しい。熱交換器の製法は図 7 に示すように、孔あきアルミフィンを重ね、銅管を孔に通し、管を機械的に

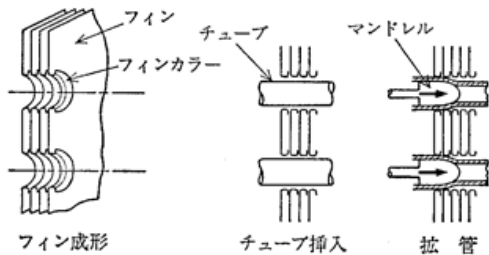


図 7 空調用熱交換器の製造工程

広げてフィンと密着させる。機械拡管方式と呼ばれ、最も安価な製法である。機械拡管方式であると冷媒通路は円管に限られる。他の方法、例えば水圧拡管を用いると扁平チューブでも拡管できるが、機械拡管法に比べ設備費がかかり普及していない。結局、空調用熱交換器の性能向上には円管とフィンの組み合わせが前提となる。また、円管とフィンとの間の接触熱抵抗も計算に入れなければならない。こうした制約のもとで、様々な性能向上策が採られてきた。まずフィン面上で空気流れの境界層を分断するための各種表面構造が検討された。図 8 に 1970 年代に検討された表面構造の例を示す[43]。これらのなかで左から 2 番目のスリットフィンと呼ばれる形態が採用された(図 11)。その後、スリットの寸法(幅 2 mm → 1 mm)と配置、フィンピッチの縮小(2 mm → 1.5 mm)、円管の細径化(9.5 mm → 7 mm)と配置などの改良策が採られ、図 9 に示すように空気側の伝熱性能向上に寄与した[44]。こうした改良が進んだ背景には数値流体解析ツールの発達がある。図 10 に例[45]を示すように、フィンの微細構造が齎す伝熱促進効果を、実験を行うことなく調べられるようになった。数値流体解析ツールの効用は、空調機内部での熱交換器の配置最適化、冷媒流分岐の設計など多方面に及んでいる。

また、冷媒通路である管内にも伝熱促進構造が

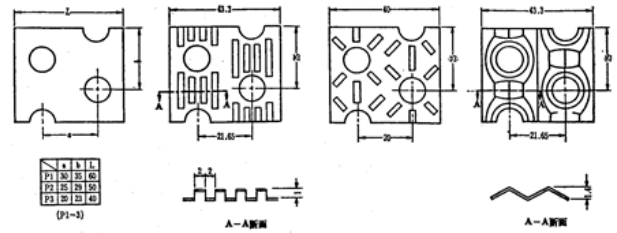


図 8 フィン面の伝熱促進に関する初期の研究[43]

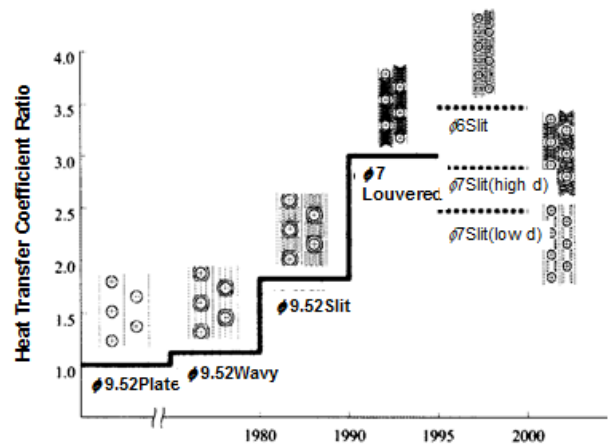


図 9 フィンチューブ熱交換器の性能向上[44]

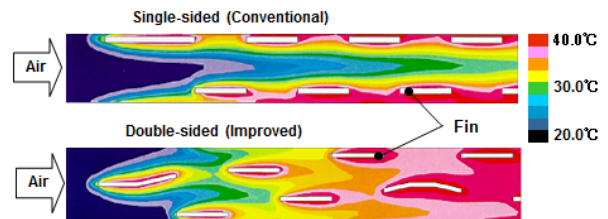


図 10 フィン微細構造を決めるための数値流体解析例[45]

設けられるようになった。内面溝付き管と呼ばれ、初期の溝構造[46]と最近の非共沸冷媒に対応する構造[47, 48]を図 11 に示す。

これら各種の伝熱促進構造の開発には生産技術が大きな役割を果たしている。コスト低減の要求からフィンの厚さは漸次減少し、1973 年に 0.20 mm から 0.18 mm、1975 年に 0.15 mm、1980 年に 0.13 mm、2003 年には 0.105 mm までになった[49, 45]。薄肉フィンは、組み立て時および使用時のフィン変形に対する保護策を必要とした。内面溝付き構造は機械拡管の際、機械的抵抗が少なく、拡

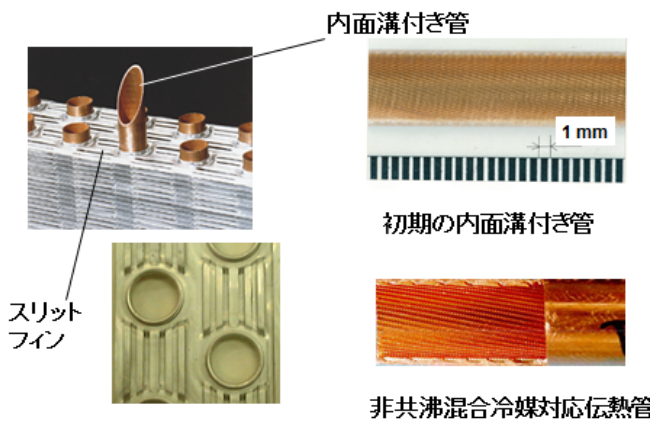


図 11 空調用熱交換器における
伝熱促進技術[46, 47, 48]

管後に著しく変形しないものを選ぶ必要があった[50]。また、アルミ表面の処理技術も進歩し、耐久性と蒸発器フィン表面の親水性が改良されている[51]。

4. 冷凍機用熱交換器：市場環境とのマッチング

ビル空調用の冷凍機には大別して蒸気圧縮を伴うターボ冷凍機と吸収式冷凍機がある。本節で述べるのはターボ冷凍機の熱交換器用に開発した伝熱管である。研究開発の経緯に関しては既に「伝熱」47巻200号[52]に詳しく記したので、ここでは要約と補足を記す。

開発を促した要因には 1970 年代初頭のオイルショックと、同時期に生じた高層ビルの空調需要があった。オイルショックはエネルギー利用効率の向上を最優先課題に押し上げた。通商産業省工業技術院が省エネルギー技術開発の後押しをすることになり、熱交換器の性能向上が重要テーマの一つになった。高層ビル関連の需要は、冷凍機の冷凍能力と占有床面積の比を重要な尺度にした。とくに新宿副都心のように土地価格が高い場所では、コンパクトでしかも冷凍容量の大きい冷凍機に対する需要が強い。同様なニーズは鉱山の坑道にも見られる。採掘場所の深度が増す一方、作業環境の改善が望まれ、これに伴いコンパクトで強力な冷凍機に対する需要が増えた。こうした需要は海外で強まり、冷凍機メーカーにとって輸出市場が広がった。

こうした背景のもとに冷凍機用熱交換器に関す

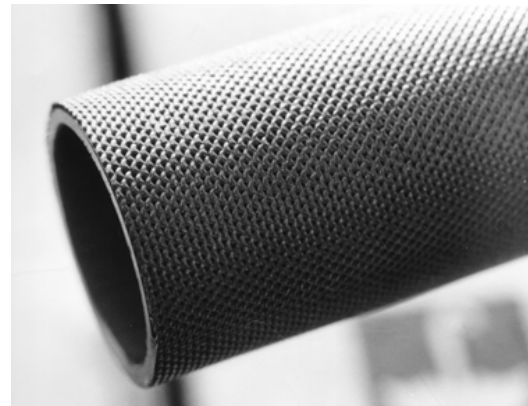


図 12 沸騰伝熱管「サーモエクセル E」

るプロジェクトが立ち上げられた。研究開発に必要な人、モノ、カネを揃えるには、様々な人たちの理解と支援を求めなくてはならない。これら支援する立場の人たちは冷凍空調の技術に必ずしも詳しくない。工業技術院の担当官には日参して技術説明をした。国から省エネルギー開発補助金が交付されると、研究開発に本腰が入ると云う副次効果も見込まれた。こうして開発された伝熱管には「サーモエクセル」なる商品名が付けられ、蒸発器用伝熱管には「E」、凝縮器用伝熱管には「C」なるサブ記号を用いた。図 12 は「サーモエクセル E」の外観写真である。管外表面の微細構造により冷媒の核沸騰熱伝達が促進され、管内を通る水を冷やす。

図 13 に管外に微細構造を設ける加工工程を示す。まず、円管の外面に浅い溝を設け(knurling)、次に切削バイトでフィンを切り起こす(bit cutting)。この工程で「サーモエクセル C」が出来る。更にロールでフィンの先端を寝かせる(rolling)と、「サーモエクセル E」が出来る。図 14 に、表面構造の断面拡大写真を示す。

研究開発は当初、蒸発器用の沸騰伝熱管を対象に始められた。冷凍機構成要素のなかで蒸発器が最大の容積を占めるものであったからである。当時、沸騰促進構造を設けた伝熱管にはユニオンカーバイド社の High Flux チューブがあった。これは管外表面に金属粉末の焼結層を設けたもので、焼結層は多数の気泡発生核を内包する多孔構造になっている。図 15 に表面構造の説明図を示す。High Flux はプロセスプラントの蒸発器に用いられており、ユニオンカーバイド社の先行開発は「サ

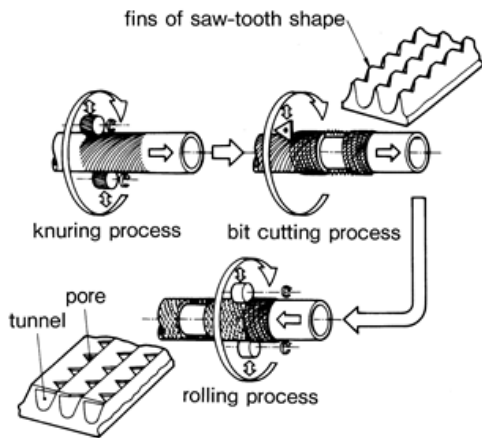


図 13 サーモエクセル構造の加工工程

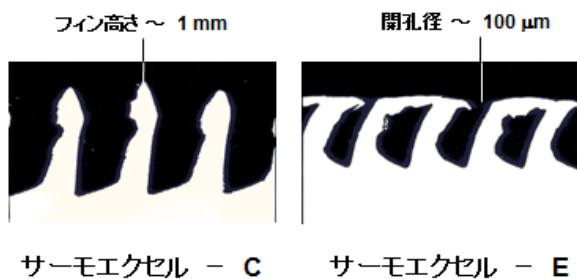


図 14 サーモエクセル構造の断面写真

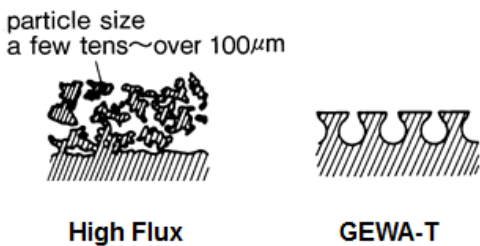


図 15 High Flux と GEWA-T 管の表面断面構造

「サーモエクセル」の開発に際して参考になった。但し、焼結工程に要する設備費と経費は大型プラント用途ならともかく、空調用途には過大である。図 13 のサーモエクセル加工工程は銅製品の機械加工を長年にわたり手掛けてきた（株）日立電線ならでの着想であった。しかも大きな利点は、一つの加工設備で凝縮器用と蒸発器用の伝熱管を製造出来ることにあった。

サーモエクセルが実用になり話題を呼ぶと、同種構造の研究開発が他社でも活発になった。Wieland 社（独）からは GEWA-T チューブが発表

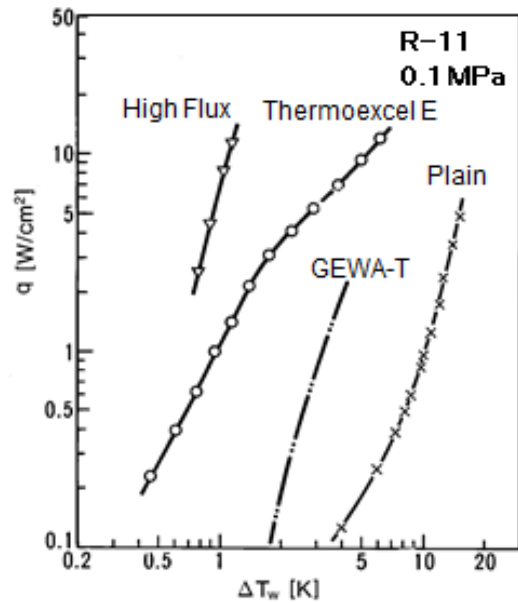


図 16 各種表面構造で得られた沸騰曲線 (R-11, 0.1 MPa)

された。これまで一般に使われてきたローフィンチューブの先端を、図 15 に断面を示すようにロールで潰したものである。サーモエクセルと異なり、表皮化の空洞と冷媒側とは連続した溝でつながっている。図 16 に各種表面構造で得られた沸騰伝熱性能を示す。サーモエクセル E と GEWA-T の性能の差には開孔形態が影響していると考えられる。サーモエクセル E では互いに独立した開孔が多数並んでおり、気泡の成長離脱と表皮下空洞内への冷媒液吸引を分担している[53]。一方 GEWA-T の連続開孔では蒸気泡発生の動サイクルが異なり、伝熱性能に影響しているのかも知れない。凝縮器用伝熱管サーモエクセル C の性能はローフィン管（18 fins/inch）に比べ、熱伝達率にして 3 倍から 4 倍である[54]。

図 17 に冷凍機の容積を縮小した例を示す。冷凍機の小型化には管外面構造のほか、水が通る管内にもリブを設けて伝熱促進を図り、さらに圧縮機を改良したことも寄与している。また、圧縮機から冷媒に溶出する潤滑油が伝熱管性能に及ぼす影響も調べた。微細表面構造には実使用時に目詰まりするのではないかとの懸念が一般にはある。幸い、空調機に使われる冷媒、石油化学プラントで扱われる流体は溶媒としての性質を有しており、

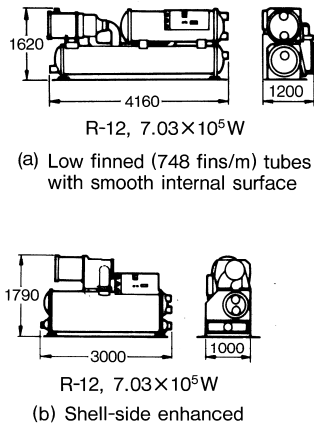


図 17 サーモエクセルの採用による冷凍機容積の縮小

目詰まりの危険は極めて低い。

「サーモエクセル」の開発は本節冒頭にも述べたように、オイルショックとコンパクト冷凍機に対する需要の増大に促されたものであった。こうした環境要因なしに新規アイデアの実用化は難しい。実用化には多くの人たちの参加と支援が必要であり、市場での大きな需要が見込まれないと開発に必要なリソースを集めることが出来ない。一方、このような環境要因が形成された時期に、伝熱研究者として居合わせたことは僥倖であったと言える。サーモエクセルの開発に携わった多くの研究者、技術者が僥倖を分かち合った。

5. ヒートパイプ：大量生産適用対象の出現

ヒートパイプのアイデアは 1944 年、Gaugler が特許出願した[55]。その後、注目されずに過ぎたが、NASA の宇宙開発のなかで掘り起こされた。微小重力環境下で用いる熱輸送デバイスとして注目された。1964 年出版の Grover らの論文[56]が現在のヒートパイプの出発点としてよく引用されている。1977 年後半には先にも記したように、アラスカ縦断パイプラインに大量に使われ話題を集めた。その頃の我が国でのヒートパイプ研究の対象は宇宙機器か、先に触れた「鯛焼き」の例のようにホビー応用であったと思う。半導体の冷却応用に検討されもしたが、当時の半導体の使用環境はヒートパイプを必要とするものではなかった。筆者の記憶にはローストビーフに差し込むピンをヒー

トパイプにして、中まで熱が良く通るようにした例がある。実際に販売されていた。

ヒートパイプにとって広い用途が開けたのは 1990 年代半ばから始まったパソコンの普及である。図 18 は我が国における電子計算機の生産量統計である[9]。パソコンのほかサーバー、ワークステーションなどの計算機が多様な目的に使われ始め、電子機器は経済、産業と市民生活の隅々に浸透した。1996 年の日経エレクトロニクス誌には「パソコン支配の構図が固まる」との記事があり、1996 年のパソコン生産台数は対前年比 31.3%増、1997年には同 22.6%になるだろうと予測している[57]。

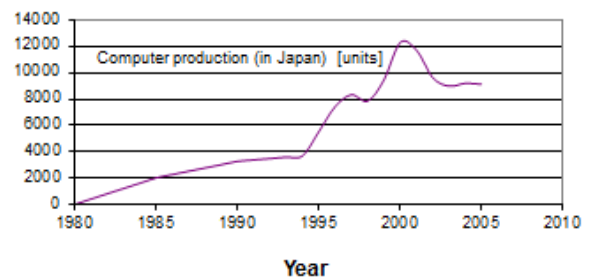


図 18 国内における電子計算機生産量の推移[9]

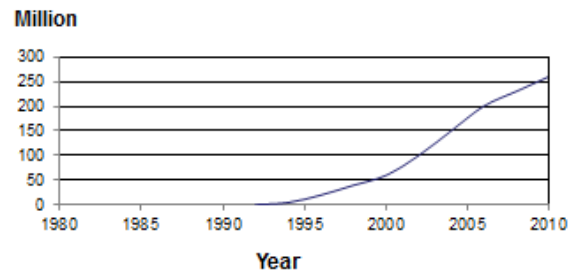


図 19 世界におけるヒートパイプ生産量
(株)フジクラ 望月正孝氏推計

なかでもノートパソコンの成長は目覚ましく、薄型化がメーカー間の競争の焦点になった[58]。システム筐体の厚さが減る一方、CPU チップの性能は向上し、これとともに発熱量が増えた。CPU の周辺はメモリ、グラフィックス、入出力など各種のデバイスが密集する場所で、発生熱は冷却空気を通しやすい場所まで導く必要がある。ここに熱輸送デバイスであるヒートパイプの用途が拓けた。また、ノートパソコンに限らず、デスクトップやサーバーでも場所をとらないコンパクトな製

品が歓迎される。これらの計算機が如何にコンパクトになっているかは、今日でも計算機を更新するたびに感じることである。こうしたコンパクト機器への応用にヒートパイプが使われるようになった。図 19 は (株) フジクラ 望月正孝氏の推計で、世界におけるヒートパイプの生産量が 1990 年代半ばから急速に上昇していることがわかる。図 20 はヒートパイプと空冷ヒートシンクを組み合わせた製品例である。

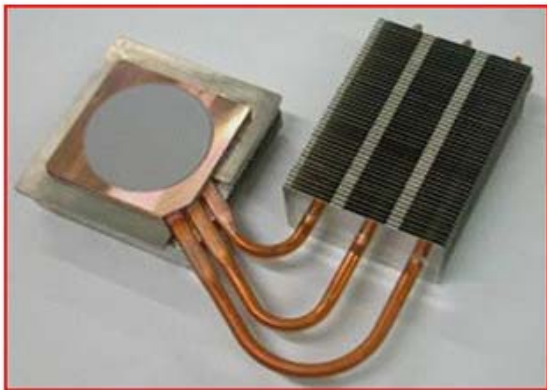


図 20 ヒートパイプ・ヒートシンクの製品例
(株) フジクラ 望月正孝氏提供)

電子機器へのヒートパイプの適用はフジクラ、住友軽金属、古河電工、日立電線、昭和アルミニウム（現昭和電工）など日本のメーカーが先導した。ヒートパイプは大量に使われる用途の出現により価格が下がり、さらに使用を促すと云う好循環に入った。しかし、価格競争に入ると韓国、台湾、中国などの海外メーカーが参入した。先発メーカーは付加価値の高い製品に力を入れるようになる。高付加価値製品の一例は熱負荷が高いサーバー計算機やスーパーコンピュータのためのヒートパイプである。ベーパーチャンバーと呼ばれる板状ヒートパイプと空冷ヒートシンクの組み合わせ、さらにヒートシンクのフィンにヒートパイプ機能を持たせたものが作られている。但し、こうした高付加価値製品は価格も高く、ユーザーはサーバーなど上位機種メーカーに限られる。これらのメーカーがどこまで冷却コストの上昇を許すか、将来は流動的である。一方、ヒートパイプメーカーの技術的蓄積が進んだ結果、電子機器以外の用途が開けつつある。工作機械、医療機器、調理機器その他の多様な用途に適用が進んでいる。

6. 電子計算機の冷却：

冷却コストの上昇が逃げ道探索を促す

電子計算機の発達と冷却技術は表裏一体の関係にある。図 21 は 1970 年代から 1990 年代初頭にかけて生産された大型汎用電子計算機の発熱量と部品面積のデータを纏めたものである[59]。富士通、NEC、日立各社の発表データで、空冷機のデータは白抜き印、水冷機のデータは黒塗り印で示してある。チップ、パッケージ（モジュール）、プリント母基板の構成レベル別に、部品面積を横軸にとってある。1980 年代後半から 1990 年代初頭にかけて、空冷から水冷へと移行した。図 22 は最後の空冷機と呼ばれた計算機の基板で、2 種のフィンヒートシンク付きパッケージが配列されている。およそ 20 cm×40 cm の基板から放熱される熱量は約 500W であった。図 23 は水冷コールドプレートを付けたマルチチップモジュールと母基板前の水配管の写真である。モジュールは約 10 cm 角のセラミック基板に 36 個のチップを載せたもので、発熱量は最大 720W であった。発熱密度の増大に対処するには冷却流体に水が必要となったのは明らかである。

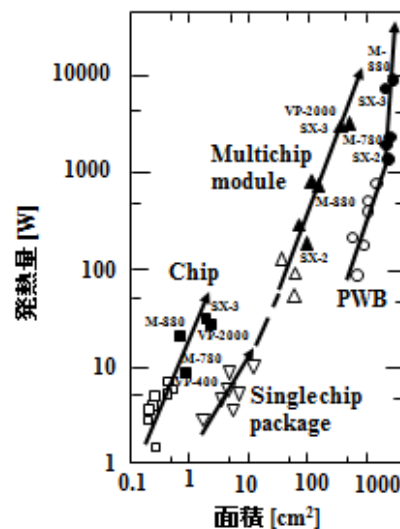


図 21 1980 年代前後における国産大型計算機の発熱データ（白抜き印は空冷機、黒塗り印は水冷機）[59]

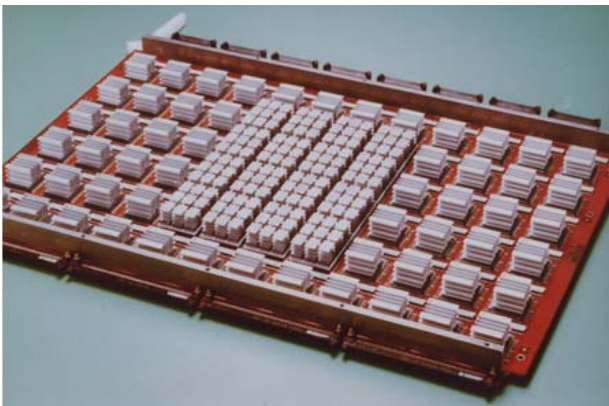


図 22 大型空冷ボード
(日立 M680, 1985 年発表) [60]



1980年代に開発された
水冷デバイス例



図 23 水冷マルチチップモジュールと母基板前
の水配管 (日立 M880, 1990 年[60])

1980 年代には冷却技術が計算機の将来を握っているとの認識が高まり、計算機冷却は伝熱研究の主要テーマの一つになった。図 24 は IBM の Okaty らが 1986 年に著した記事[61]の中の図で、高集積回路 (VLSI) チップ上の熱流束がやがて太陽表面の熱流束に近づくと予測したものである。IBM の支援もあって、特に米国の伝熱研究界で高性能冷却に関する研究が盛んになった。また、我が国の計算機メーカーも研究を進めた。図 24 は伝熱研究のミッションを象徴するものとして、後にしばしば引用されることになった。

ところで、この頃までの大型計算機に使われていたトランジスタはバイポーラトランジスタ (略称、バイポーラ) であった。バイポーラをスイッチデバイスとする回路は高速で動作するが、電力

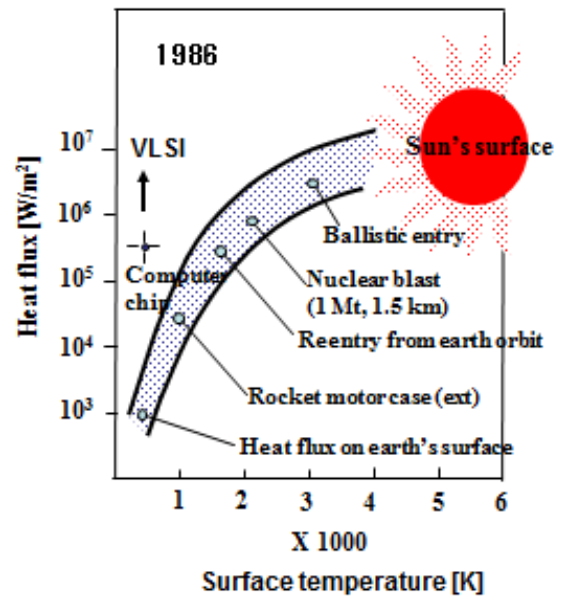


図 24 1986 年におけるチップ発熱量の予測[61]

消費が大きいと云う特性を有する。より多くの電力を供給すれば、より速く動作する。一方、電卓など民生用品に使われていた CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 回路は、消費電力は少ないが動作原理から見ると速度は遅い。当時、計算機の専門家は、技術の推進役はバイポーラと決めていた節があった。しかし、CMOS が多様な用途に向けて大量に使われているうちに、CMOS の改良に注がれた人的リソースと投資は巨大になった。CMOS の性能は向上し、やがて大型電子計算機にも使えるレベルになった。電力消費と冷却コストの増大に悩んでいた大型計算機メーカーは 1990 年代に入るとバイポーラか

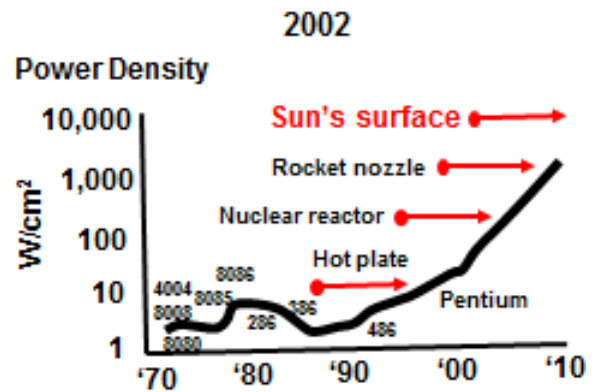


図 25 2002 年におけるインテルマイクロプロセッサの発熱量予測[62]

ら CMOS へと乗り換え始めた。これには並列計算技術の進展と、CMOS をベースにしたマイクロプロセッサの発達も大きく与っている。マイクロプロセッサは当初パソコン用途に開発されたが、パソコンの普及とともに進化し、価格も下がった。大型電子計算機での CMOS への転換は、チップの消費電力、すなわち発熱量を抑制し、高性能冷却の研究は勢いを失った。しかし、一息つけたのは数年の間で、マイクロプロセッサの動作速度向上とともに発熱量が増し、2000 年代には再び冷却の問題がクローズアップされるようになった。図 25 はインテル社のマイクロプロセッサの発熱量データと 2002 年時点の予測である。「チップ上の熱流束が太陽表面の熱流束に近づく」との予測が再び登場している。今日では大型計算機の代表は大規模データセンタを構成するサーバーと、大規模科学計算用のスーパーコンピュータである。これらの計算機のチップ冷却には、前節で触れたベーパーチャンバ・ヒートシンク、さらに水冷方式が用いられている。図 26 にベーパーチャンバ・ヒートシンクの例を示す。

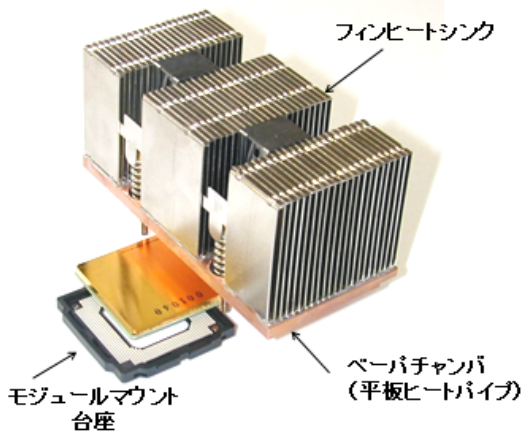


図 26 ベーパーチャンバ・ヒートシンク [63]

さて、発熱量の増大とともに冷却コストの上昇が再び懸念されるようになった。チップ発熱量を抑制するための対策が検討されている。また発熱量抑制策は、チップ上で過度の局所温度上昇が発生しないようにするホットスポット抑制策と一体である。チップにセンサを埋め込んで温度をモニターし、温度が閾値を超えたらクロック周波数を下げる。回路計画の際、熱源が集中しないように

配置する。演算処理を行うコアを複数設け熱源を分散する (マルチコアプロセッサ)。一つのコアが過熱したらジョブを低温のコアに移す。これらの対策のうちあるものは既にマイクロプロセッサに取り込まれているが、研究段階のものが多い。有効な対策法を確立するには電子回路の動作と熱拡散が密接に絡んだ問題に取り組む必要がある。

電子・熱複合問題はチップの温度制御に限らず、電子機器のパッケージ、基板、システムの各構成レベルにも見られる [60]。複合の度合いは機器のコンパクト化に伴い強まっており、一方、機器コンパクト化の要求は携帯機器などに限らずサーバー、スーパーコンピュータでも強まっている。この傾向は、電子回路と冷却の研究が新たな局面を迎えたことを物語っている。図 27 はこの事情を説明するためのものである。これまでは図 27(a)に示す実装形態が一般的であり、巨視的観点で見ると電気の流れと熱の流れは分離している。この形態であると、電子回路の研究と伝熱研究は分離され、伝熱研究者はひたすらヒートシンクの性能向上に専念すればよかった。

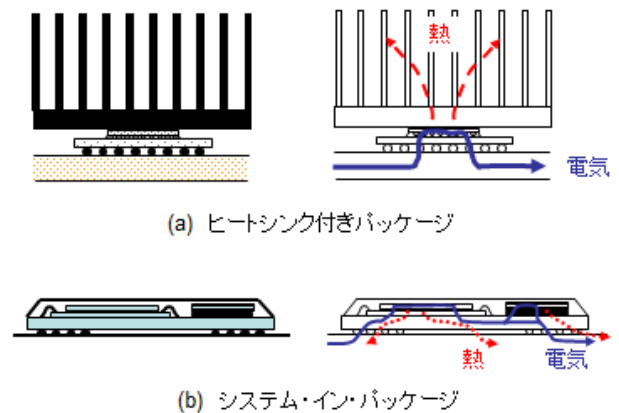


図 27 集積度の向上と熱・電気経路の近接

しかし、図 27(b)の例のように、機器のコンパクト化が進むとヒートシンクを設けるスペースが限られるようになる。パッケージレベルの集積度が上がるに伴い、熱と電気の経路は近接するようになる。電子回路の設計に初めから伝熱経路の計画を入れなければならない。このニーズは電子回路研究者が既に認識していて、電子回路と伝熱の複合問題に関する研究発表が近年増えている。しかし、伝熱解析に関する基本理解が不足していて、

未だ満足できる知識体系に纏められていない。一方、伝熱研究者のほうは、図 27(a)の分離型問題のほうが取りつき易く、研究結果は伝熱専門誌に載せやすい。このような境界領域には未解決の課題が多い[64].

冷却コストの問題はスーパーコンピュータで最も深刻になってきている。現在の技術を単純に延長適用して Exa Flops (毎秒 10^{18} 浮動小数点演算)の演算速度を達成しようとする、スーパーコンピュータセンターに隣接して 1.5 GW レベルの原子力発電所が必要になるとの試算がなされている[65]. 現在のスーパーコンピュータでもメガワットレベルの電力を必要としており、その半分は冷却その他補助用の電力である。演算に必要な電力を画期的に下げる必要は明らかである。それには 1990 年代に経験したバイポーラから CMOS への転換と同様の基本的転換をせざるをえない。現在のトランジスタに代わるものとして量子スピン、カーボンナノチューブ、カーボングラフィンなどをベースにするデバイスが研究されている。将来本命になる技術が何れかは予断を許さない。一つ明らかなことは、ミクロスケールあるいはナノスケールでの温度制御が必要になる。さらに、微小スケールの世界では、デバイスの動作に熱エネルギーが密接に関わってくる。その関わり方は現在のトランジスタに見られる様態とはオーダーが異なると表現してよいであろう。伝熱研究が旧来の領域に閉じこもっていることは許されなくなる。

7. マイクロチャンネルデバイス：

半導体製造技術の大きな副産物

半導体の製造工程には微細幾何パターンの光学投影、レジスト膜の形成、選択的エッチングが含まれる。このプロセスを応用してシリコンチップに微細な冷却用チャンネルを設けることが出来る(図 28 [66]). アイデアを最初に提案したのはスタンフォード大の博士課程学生であった Tuckerman と指導教授の Pease で、1981 年のことであった[67]. 試作品は 1 cm 角のシリコンチップに高さ 300 μm 、幅 50 μm のチャンネルを、50 μm 厚シリコンフィンを隔てて設け、裏面にヒーターエレメントを蒸着して熱源としたものである。ヒーター温度と水入口温度が 71°C のとき 790 W の熱を除去できることを実験により証明した。また、

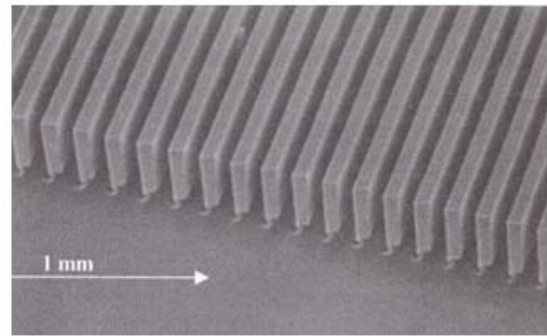


図 28 シリコン片にエッチングで形成されたマイクロフィン (またはチャンネル) [66]

管路入口-出口間の圧力差を与えたとき、伝熱量が最大になるチャンネル幅は 50~60 μm であることを、層流を仮定した簡単な計算により示した。この計算はその後他の研究者により、流れと温度発達域を考慮したり、乱流域に入る場合を考慮したりして改良された。しかし、最適チャンネル幅は熱源の寸法と関連しており、最適幅が μm のスケールになるのは熱源の寸法が 1 cm 程度の場合であることに変わりはない。熱源の寸法が大きくなれば、最適チャンネル幅も増大し、やがてマイクロクロチャンネルではなくなる。

1980 年代初頭には大型電子計算機の冷却に变革が必要になるだろうと予測された。Tuckerman と Pease の論文は注目を浴び、爾来マイクロチャンネル冷却に関する研究論文には必ず引用されるようになった。しかし、前節で述べたように 1990 年代に生じた大型計算機の世界での変化により、マイクロチャンネル冷却に関する研究は一時下火になった。しかし、これも先に触れたように CMOS チップの発熱量が増大するにつれ、マイクロチャンネル冷却の研究は再び勢いを増し今日に至っている。また、集積回路チップの冷却のみならず、小型の燃料電池、冷凍機ほか様々な適用対象が検討されている。我が国における研究活動は 1990 年代後半には盛んになっており、その様子は機械学会熱工学部門ニューズレターの特集号[68]から伺い知ることが出来る。

半導体製造技術の応用はマイクロチャンネル冷却デバイスのほか、微細機械要素を組み合わせた様々なシステムの製作を可能にした。MEMS(Micro-Electro-Mechanical-Systems)デバイスと一括して呼ばれる製品の生産は年を追って増え

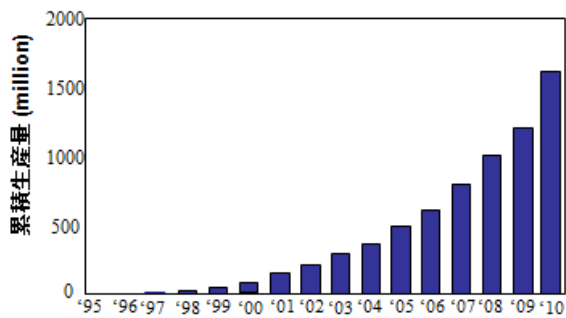


図 29 MEMS 製品の累積生産量[69]

続けている (図 29). このなかで熱流体现象の制御を伴うデバイスはバイオ, エネルギー, 材料開発の分野で成長が期待されている[70, 71]. これら熱流体制御を伴う MEMS デバイスをマイクロチャンネルデバイス (冷却のみでなく) と呼ぶことにする. 一般にマイクロチャンネルデバイスでは, チャンネル内の流動 (microfluidics) とマイクロヒーターを併用して温度, ひいては化学反応などを制御する. 制御に必要なセンサーとマイクロエレクトロニクスが集積された伝熱システムである.

マイクロチャンネルデバイスで, 温度制御対象あるいは温度制御領域が更に微細化すると, 以下に述べる工学課題に取り組む必要が強まるであろう. 制御対象の寸法スケールが急速に小さくなる一方, これを支える周辺構造のスケールはそれほど小さくならない. デバイスのユーザーあるいは受益者は私たちであり, 人間の寸法スケールは変わらない. 従って, デバイスが含む最小スケールと外部世界のスケールは開いてゆく. 制御に必要な例えば温度に関する情報は, 制御対象から離れて設置したセンサーから求めることになる. センサー情報から制御対象領域の温度を推定するには, 対象から周辺支持構造への熱漏洩, センサーが齎す温度場への影響などをシミュレーションしなければならない. しかも, 用途によってはシミュレーションをリアルタイムで行う必要がある. 非定常熱制御では制御対象の熱容量タイムスケールと周辺構造のタイムスケールの間のギャップが影響する. このように寸法と時間のスケールが複数含まれる問題, 即ちマルチスケール問題は, 既に研究室におけるマイクロ伝熱の実験でも取り組まなければならない課題になっている[72]. マルチスケールシステムでスケールギャップが開くほど, 制御

のためのシミュレーション問題は複雑になる. そして, これを解くために必要な計算リソースは増してくる. しかし実用機器に組み込む制御アルゴリズムは短いものでなくてはならない. 本来複雑な解析プロセスを圧縮して短いアルゴリズムにまとめる必要がある. ここでは複雑伝熱系のモデル化が重要なステップの一つになる. 従来の伝熱機器も複雑伝熱系で, 伝熱解析にはモデル化が必要であった. しかし, 系統的なモデル化手法あるいはアルゴリズムは確立されていない. と云うより, モデル化方法論やアルゴリズムの構築に取り組む伝熱研究者が殆どいない. こうした抽象ロジックに関する研究は伝熱現象を対象とする本筋の研究から外れているからである. 同様なマルチスケール問題は伝熱以外の分野でも増えており, マルチスケール解析手法の構築を組織的に進めている分野もある[73].

ところで, マクロ世界に住む私たちがマイクロ世界の現象をコントロールすること自体はとくに新しいことではない. 例えば集積回路の生産工程では目に見えない世界での熱拡散や化学反応を制御している. バブルジェットプリンターでは微細な気泡発生・消滅サイクルを制御している[74]. これらマイクロ対象の制御技術が何故実用化に至っているのか, 今後の伝熱機器, とりわけ流体の相変化を伴うマイクロチャンネルデバイスの将来に関わることなので以下に節をあらためて考察を加えておきたい.

8. 気泡発生を利用するマイクロ伝熱機器の将来

核沸騰の熱伝達率は流体の物性, 伝熱面の材質, 伝熱面上の気泡発生点の数密度, 壁面過熱度, 熱流束の関数で表される. 西川兼康先生, 藤田恭伸先生らが導かれた沸騰熱伝達整理式[75]から, 過熱度と熱流束に対応する発泡点密度を求めることができる. 筆者らは高性能伝熱面に関する実験プログラムの一部で, 種々の面粗さを与えた銅面上で R-11 を沸騰させ, 発泡点数を求めた[76]. 結果は西川先生らの式とよく一致した. これによると過熱度が 5 ~ 10 K, 熱流束がおおよそ 0.4 W/cm^2 のとき, 発泡点密度は $1 \sim 10 \text{ cm}^{-2}$ の範囲であった. 発泡点密度の数値は, 与えられた面積の伝熱面上で気泡が発生する確率を示唆している.

冷凍機用蒸発器に見られる伝熱面は m^2 を単位

として測る総面積を有している。例として面積 1 m^2 の伝熱面を考えると、この伝熱面上の発泡点の総数は、上記の数値例を参考にすれば少なくとも 10,000 であろう。一方、発泡点が伝熱面上で一様に分布していれば、面積 1 cm^2 の部分に注目したとき、発泡点は 1 個あることになるが、実際には一様分布の確率は低い。発泡点が全く無いか、数個あるか、発泡点存在確率に依存する。伝熱面積が十分に大きい機器の場合、適度に縮小した試験片を用いて求めた沸騰熱伝達率をそのまま機器の設計に用いることができる。試験片と実機器の双方で発泡確率が十分に高い場合で、設計計算に確率因子を持ち込む必要がない。このことはボイラー、蒸発器、軽水炉燃料棒などの設計解析で暗黙のうちに了解されていた。しかし、シリコンチップの冷却に核沸騰を用いるには発泡確率が問題になってくる。まず、伝熱面積が小さく $1 \sim 4 \text{ cm}^2$ である。チップ面（集積回路面が設けられていないほうの面）の表面粗さ（算術平均）はラップ仕上げの場合 $0.1 \sim 0.4 \text{ }\mu\text{m}$ の範囲にある。押出し引抜き工程で製造された伝熱管の表面粗さはおよそ $2 \text{ }\mu\text{m}$ のレベルであるから、チップ面上の発泡核存在確率はこれだけでもかなり低いと推測出来る。更に、直接浸漬冷却に用いる作動流体であるフロリナートは固体面との親和力が大きく、発泡核は消滅しやすい。チップ上の熱流束は先に例として挙げた数値よりも大きいから、発泡点数は増えるものの、発泡確率に関する懸念は消えない。チップの冷却方式に A と B があつたとしよう。A は熱伝導と対流伝熱によるもので、伝熱解析の予測確度が高い。B は沸騰冷却で冷却性能は高いと期待出来るものの、実際に高い熱伝達率が得られる確率は不明確であるとする。この場合、機器設計者は A 方式を選択する。沸騰冷却が集積回路チップ冷却に用いられた実例はスーパーコンピュータ ETA-10 以外には無い[77]。ETA-10 は電子回路の動作速度が極低温環境下で向上する特性を利用したもので、冷却には液体窒素の沸騰を用いた。技術的にはかなり意欲的な設計がされており、東工大のコンピュータセンターに採用された時期（1990 年代初め）があつた。その後、製造元が経営不振に陥り ETA-10 は退場した。

発泡確率に起因する実用化への障壁を除くには、チップ面に発泡を促す微細表面構造を設ける方法

が考えられる。微細構造により発泡が促進されれば熱伝達も促進される。こうした目標へ向けて種々の表面構造が多数の研究者により考案されてきた。筆者らの研究[78]、本田博、高松洋先生らの研究[79]は多数のアイデアのなかの例である。ところで沸騰伝熱を実機器に用いる際、設計データを求めるための実験は欠かせない。先にも述べたように、これまでは実機器が十分に大きく、縮小モデルを用いた実験からデータを得ることが出来た。しかし、集積回路チップに代表されるマイクロ伝熱機器では実寸法の試験片で実験せざるをえない。ここで先にも触れたこと[72]と同質の課題があり、この課題はチップの沸騰冷却に限らない。今日盛んになっているマイクロチャンネル内の二相流熱伝達に関する実験研究の課題でもある。

マイクロチャンネル内の二相流伝熱に何か未知のメカニズムが働いているようだと言った Peng と Wang の論文[80]は、その後このテーマに関する研究論文に必ず引用されるようになった。よく読んでみると、最初の気泡発生が試験チャンネルと前後にある液溜めとの間の接触場所にあると記されている。同じ頃、筆者の研究室でもマイクロチャンネルを用いた実験をしていて、マイクロチャンネルと液供給マニフォールドの接点からの発泡が先行し、これでは論文にはならないかと思つた。後日論文にはしたが[81]、不確かさに対する懸念が残つた。模擬チップからの沸騰伝熱を調べた本田先生らの報告[79]には、チップの周辺でリードワイヤを半田付した箇所から発泡が始まったとある。このような観察の報告は重要であるが、論文審査の段階で実験上の不備ではないかと指摘される確度が高く、伏せてしまう論文も多いと思われる。しかし、このような外部要因(extraneous factor)が実験結果に大きな影響を及ぼす問題は、マイクロさらにナノスケールの伝熱制御機器の実用化に関わる本質的な課題である。難しくても正面から取り組むべき課題であると考え。

さて、マイクロ伝熱制御機器で実用になっているものの代表例はヒートパイプとバブルジェットプリンタである。ヒートパイプは作動開始前から液はウイックに、蒸気は中心部スペースにと分離して保持されているので、気泡発生確率の問題は無い。バブルジェットプリンタにおける気泡発生は高い密度のエネルギーをパルスで与え、伝熱局面

所温度は短時間のうちに 300°C を越えると推定されている。気泡発生は **homogeneous nucleation** で、伝熱面上のくぼみ核の役割は小さく、従って気泡発生の再現性が極めて高いと解釈されている[82]。常温近くで動作するチップ冷却デバイスやバイオチップでは、**homogeneous nucleation** は利用出来ない。

ここで、近年関心が寄せられてきた自励振動熱輸送デバイス[31, 32]についても触れておきたい。閉ループ内で液体と蒸気の柱の列が循環して加熱部から冷却部へ熱輸送する。蒸気柱の加熱部での膨張と冷却部での収縮が循環流に振動効果を齎して、熱輸送能力を高めると云う原理に基づいている。通常のヒートパイプと同様に動作前から気相と液相は分離しているが、基本的な違いもある。前者では気液は加熱部でパイプの軸に沿って一様に分離されており、加熱が始まるとウィックに保持された液表面から蒸発が始まる。自励振動デバイスの場合、加熱部における液相と気相の柱の分布パターンが初期の振動流駆動エネルギーを決めると考えられる。そうだとすると、動作を止めた直後、あるいは動作を開始する直前に、気液の柱が加熱部でどのようなパターンで存在するかがデバイスの動作に影響する因子となろう。ここに確率要因が入ってくる。実際の機器冷却に広く用いられるようにするには、確率要因を實際上無くす工夫が必要となる。また、自励振動デバイスが他の熱輸送デバイスに比べ圧倒的に優位に立つ用途が出てくれば、これまでの研究の蓄積が生きてこよう。

常温近くの動作温度でも、気泡発生核の存在場所と気泡成長開始時間を指定できるような技術が開発されれば、気泡発生を伴うマイクロデバイスの用途は広がるであろう。実際、MEMS 電極間の水素バブルの発生を、気泡成長機構の研究に利用する案が実証されている[83]。この例が示唆するように、MEMS、センサー信号に基づくシミュレーション、制御エレクトロニクスを複合させた技術の開発がマイクロ伝熱機器の将来を拓くと考えられる。

9. おわりに

伝熱学会の発展に関する一般的考察を記した原稿[1]と異なり、この度の仕事は伝熱機器と云う限

定された対象に関する記述である。対象を限ったがために、種々の資料にあらためて目を通す必要を感じた。しかし時間的制約と筆者の読解スピードの制約があり、十分に調べ上げたとは到底言えない。それでも学会誌とシンポジウムプログラムから得られた印象がある。

伝熱機器に関するテーマは大学での基礎研究と産業界での応用を結ぶ、即ち産学連携テーマである。伝熱学会が産学連携に如何に心を砕いてきたか、伝熱研究誌の 1 巻 1 号から、その後繰り返し収録されている諸先輩の論説や特集などから強く感じた。それでもなお「十分でない」と些か自虐的とも思える反省が繰り返されているように思えた。筆者自身は産学連携促進の FILGAP なる看板だけ思いついたが、実際には多数の方々を検討作業を通じて産学連携の問題提起をしてくださった。産学連携が意識される背景には、本学会で理学的基礎研究と実用機器対象の応用研究が共存している事情がある。この状況は今後も変わらないと思うし、むしろ本学会の特徴とも云えるので続けていかななくてはならない。「役に立つ研究」「役に立たない研究」を巡る議論は本学会がユニークであることの証左と取ってもよいのではなかろうか。肝心なことはどちらの部類の研究にしても、面白くのめりこむ種を秘めていることであろう。面白い研究は未来を示す。大学では学生が未来を求めて伝熱研究室に集まり、伝熱学会に加わる。企業の技術者、研究者は技術の将来像を求めて学会に参集する。企業経営者は企業発展のための技術知見を得る場所として学会をサポートする。‘伝熱’はエネルギー、エレクトロニクス、バイオ、ナノテクノロジーなどあらゆる技術分野を横断的に結ぶ包括的知識体系である。伝熱学会は 21 世紀に必要な境界領域学会へと成長してゆく潜在力を秘めている。

本稿で割愛せざるを得なかった伝熱機器に関する話題は多数ある。伝熱シンポジウムのプログラムを見ると、充填層、蓄冷熱、燃料電池、宇宙応用機器などに関する研究発表が多数見られる。これらの研究は連綿と続けられており技術蓄積の豊かさを伺わせる。また、本稿で対象とした機器に関する研究でも、言及した研究のほかに多数の重要な研究がなされている。氏名を挙げさせて頂いた研究者のほかにも重要な貢献をされた研究者は

多数居られる。伝熱機器に関する研究は多面的で多様な機器を対象にしており、本稿は筆者の狭いウインドウから覗いた印象記に過ぎない。多くの方々のご容赦を願う次第である。

謝辞

50 周年記念伝熱セミナーを組織する労をとられた横浜国立大学宇高義郎先生はじめ組織委員の先生方に厚く御礼申し上げます。また、本稿を著すにあたり、次の方々から資料の提供または写真等の引用許可を頂いた。(株)日立製作所 近藤義広氏、(株)フジクラ 望月正孝氏、(株)富士通 魏杰氏。

参考文献

- [1] 中山恒, 伝熱学会 50 年：回顧と展望, 伝熱, **50-212** (2011) 22.
- [2] 小竹進, 伝熱研究の動向に関する調査について, 伝熱研究, **29-115** (1990) 8.
- [3] 山家譲二, 民間企業における熱・熱力学に関する研究動向について, 伝熱研究, **2-8** (1963) 1.
- [4] 小林明, 藤掛賢司, 自動車工学における熱伝達の動向, 伝熱研究, **1-1** (1962) 7.
- [5] Ozawa, M., Solved and Unsolved Thermal-Hydraulic Problems in Boiler Systems: Learning from Accidents, Heat Transfer Engineering, **23-3** (2002) 13.
- [6] 坪内為雄編, 熱交換器, 朝倉書店, 1968.
- [7] 澤崎俊昭, 中村和仁, 小畑一義, 化学工業における伝熱, 伝熱研究, **32-125** (1993) 72.
- [8] 中山恒, 電気機械の冷却技術, 日本機械学会誌, **81-711** (1978).
- [9] 数字でみる日本の 100 年, 日本国勢図会, (2006).
- [10] 泉亮太郎, 機械工学最近 10 年の歩み-創立 80 周年記念出版, 2 章, 日本機械学会編, 1977.
- [11] 藤掛賢司, 自動車用熱交換器の最近の進歩, 日本機械学会誌, **81-714** (1978) 18.
- [12] 篠原久, 公害と伝熱, 伝熱研究, **8-29** (1969) 1.
- [13] 一色尚次, 伝熱セミナー自由討論放談会の記録, 伝熱研究, **16-60** (1977) 5.
- [14] 中山恒, 電子デバイスの冷却技術, 日本機械学会誌, **88-802** (1985) 48.
- [15] 中山恒, エレクトロニクスと伝熱工学, 日本機械学会論文集(B 編), **52-476** (1986) 1439.
- [16] 中山恒, 熱交換技術入門, オーム社, (1981).
- [17] 荻野文丸, 熱交換器性能評価の一手法, 伝熱研究, **24-95** (1985) 32.
- [18] 瀬下裕, 藤井雅雄, プレートフィンチューブ熱交換器の研究, 伝熱研究, **26-102** (1987) 84.
- [19] 鳥越邦和, 川端克宏, 川添政宣, 熱交換器における対流伝熱促進, 伝熱研究, **28-108** (1989) 40.
- [20] 矢部彰, 伝熱における先端領域をめざして-電場による伝熱技術, 伝熱研究, **25-96** (1986) 5.
- [21] Asakawa, Y., Asakawa Effect, Nature, **261** (1976) 220.
- [22] 新野正之, 熊川彰長, 国産大型ロケットと伝熱問題, 伝熱研究, **24-93** (1985) 32.
- [23] 桑原啓一, 塩冶震太郎, 宇宙関連機器の熱的制御, 伝熱研究, **25-96** (1986) 11.
- [24] 中山恒, 技術予測論, 日科技連出版, (1998).
- [25] 久野勝美, 小型管体熱解析手法のノートパソコンへの応用, 伝熱研究, **34-132** (1995) 75.
- [26] 多久島朗, 周防五月, 冷蔵庫内構造検討への数値解析の適用, 伝熱研究, **35-139** (1996) 85.
- [27] 小特集：熱交換器の高性能化-先進技術とその応用, 伝熱研究, **32-127** (1993).
- [28] 小山繁, 藤井哲, 非共沸混合冷媒を作動媒体とした蒸気圧縮式熱交換機の成績係数に及ぼす熱交換器の伝熱性能の影響, 伝熱研究, **32-127** (1993) 2.
- [29] Kurzweg, U. H. and Zhao, L., Heat Transfer by High-Frequency Oscillations 'A New Hydrodynamic Technique for Achieving Large Effective Thermal Conductivities', Phys. Fluids, **27** (1984) 2624.
- [30] 小澤守, 伝熱研究, **36-142** (1997) 46.
- [31] 赤地久輝, 日本機械学会 71 期通常総会講演論文集, III (1994) 606.
- [32] 西尾茂文, 気泡駆動型熱輸送管, 伝熱研究, **36-142** (1997) 53.
- [33] 特集：冷凍空調でのノンフロン化, 伝熱, **49-208** (2010).
- [34] 河村洋, 伝熱数値シミュレーション：この 10 年間の進展, 伝熱, **41-166** (2002) 17.
- [35] 小川邦康, NMR・MRI 計測 -計測原理と燃料電池, ハイドレート水和物の内部計測事例-,

- 伝熱, **47-200** (2008) 27.
- [36] 「小さな伝熱機器」, 伝熱, **44-186** (2005).
- [37] 特集：電子機器の冷却, 伝熱, **47-199** (2008).
- [38] 特集：ものづくり, 伝熱, **41-171** (2002), **42-172** (2003), **42-173** (2003).
- [39] 特集：生産技術と熱, 伝熱, **45-193**(2006), **46-195** (2007).
- [40] 特集：製造現場での熱マネジメント, 伝熱, **49-207** (2010).
- [41] 太田和宏, 鈴木良弘, 最近におけるラジエータの動向 (解説), 自動車技術, **32-8** (1978) 758.
- [42] 大原敏夫ほか, カーエアコン用熱交換器の最新技術, デンソーテクニカルレビュー, **4-2** (1999) 22.
- [43] 千秋隆雄, 畑田敏夫, 石羽根久平, 熱交換器用フィン表面熱伝達率, 冷凍, **54-615** (1979) 11.
- [44] 笠井一成, 空調用熱交換器の変遷, 冷凍, **75-878** (2000) 14.
- [45] 工藤光夫ほか, 空調用熱交換器の実装時性能簡易予測手法の開発 (第 1 報, 省メッシュ解析モデルの提案), 日本機械学会論文集 (B 編), **69-677** (2003) 94.
- [46] 伊藤正昭, 木村秀行, 内面らせんみぞ付管の沸騰熱伝達と圧力損失, 日本機械学会論文集 (B 編), **45-389** (1979) 118.
- [47] 鹿園直毅ほか, 非共沸混合冷媒対応伝熱管の高性能化 (第 1 報：理論的検討), 伝熱シンポジウム論文集, **34-1** (1997) 299.
- [48] 内田麻里ほか, 非共沸混合冷媒対応伝熱管の高性能化 (第 2 報：実験的検討), 伝熱シンポジウム論文集, **34-1** (1997) 301.
- [49] Mori, Y. and Nakayama, W., Recent Advances in Compact Heat Exchangers in Japan, ASME HTD, **10** (1980) 5.
- [50] 伊藤正昭, 伝熱促進管の開発にたずさわって, 伝熱, **42-174** (2003) 31.
- [51] 柴田豊, 空調用熱交換器の高性能化における研究開発, 日本機械学会熱工学コンファレンス, **07-5** (2007).
- [52] 中山恒, 高性能沸騰伝熱管「サーモエクスセル」: 研究開発回顧と展望, 伝熱, **47-200** (2008) 53.
- [53] Nakayama, W., Daikoku, T., and Nakajima, T., Effects of Pore Diameters and System Pressure on Nucleate Boiling Heat Transfer from Porous Surfaces, ASME Journal of Heat Transfer, **104-2** (1982) 286.
- [54] Nakayama, W., Takahashi, K., Senshu, T., and Yoshida, H., Heat Transfer Analysis of Shell-and-Tube Condensers with Shell-Side Enhancement, Trans. ASHRAE, **90-1** (1984) 60.
- [55] Gaugler, R., Heat Transfer Devices, US Patent 2350348 (1944).
- [56] Grover, G. M., Cotter, T. P., and Erickson, G. F., Structures of Very High Thermal Conductance, Journal of Applied Physics, **35-6** (1964) 1990.
- [57] 日経エレクトロニクス, **11-4** (1996) 96.
- [58] Nakayama, W., Recent Japanese Thermal Solutions for Portable Computers, Electronics Cooling, **4-3** (1998) 14.
- [59] Nakayama, W., Japanese Supercomputers in Thermal Perspective, Chapter 4 of HIGH PERFORMANCE COMPUTING IN JAPAN, ed. Mendez, R., John Wiley & Sons Ltd. (1992) 55.
- [60] Nakayama, W., Heat Transfer Engineering in Systems Integration: Outlook for Closer Coupling of Thermal and Electrical Designs of Computers, IEEE Trans. Components, Packaging, and Manufacturing Technology – Part A, **18-4** (1995) 818.
- [61] Oktay, S., Hannemann, R., and Bar-Cohen, A., High Heat from A Small Package, ASME Mechanical Engineering, **108-3** (1986) 36.
- [62] 日経バイト, 5 月号 (2002) 75.
- [63] Jie W., Challenges in Cooling Design of CPU Packages for High-Performance Servers, Heat Transfer Engineering, **29-2** (2008) 178.
- [64] 中山恒, 伝熱研究の未踏領域：物性ならざる物性に関する研究, 伝熱, 48-205 (2009) 1.
- [65] Kogge, P., The Tops in Flops, IEEE Spectrum, **48-2** (2011) 44.
- [66] Kandlikar, S. and Grande W. J., Evolution of Microchannel Flow Passages – Thermohydraulic Performance and Fabrication Technology, Heat Transfer Engineering, **24-1** (2003) 3.
- [67] Tuckerman, D. B. and Pease, R. F. W., High-Performance Heat Sink for VLSI, IEEE

- Electron Device Letters, **2** (1981) 126.
- [68] 特集：マイクロチャンネル内の流動と熱伝達, 日本機械学会熱工学部門ニュースレター, THERMAL ENGINEERING No.27.
- [69] Marek, J., Top 30 MEMS companies: The big get bigger, MEMS' Trends, April, Issue 6 (2011).
- [70] 特集：マイクロリアクター, 伝熱, **47-201** (2008).
- [71] Jain, A. and Goodson, K. E., Thermal Microdevices for Biological and Biomedical Applications, Journal of Thermal Biology, **36** (2011) 209.
- [72] 中別府修, ミクロ熱工学の世界, 伝熱, **47-198** (2008) 40.
- [73] Editorial: Special Issue on Multiscale Modeling and Analysis in Computational Biology and Medicine – Part 1, IEEE Trans. Biomedical Engineering, **58-10** (2011) 2936.
- [74] 浅井朗, バブルジェットプリンタの開発, ながれ, **24** (2005) 603.
- [75] 西川兼康, 藤田恭伸, 松尾篤二, 発泡点密度を考慮した核沸騰熱伝達の整理式について, 日本機械学会論文集, **41-347** (1975) 2141.
- [76] Nakayama, W., Daikoku, T., Kuwahara, H., and Nakajima, T., Dynamic Model of Enhanced Boiling Heat Transfer on Porous Surfaces, Part – I: Experimental Investigation, ASME Journal of Heat Transfer, **102-3** (1980) 445.
- [77] Carlson, D. M., Sullivan, D. C., Bach, R. E., and Resnick, D. R., The ETA-10 Liquid-Nitrogen-Cooled Supercomputer System, IEEE Trans. Electron Devices, **36-8** (1989) 1404.
- [78] Nakayama, W., Nakajima, T., and Hirasawa, S., Heat Sink Studs Having Enhanced Boiling Surfaces for Cooling Microelectronic Components, ASME Paper No. 84-WA/HT-89 (1984).
- [79] Honda, H., Takamatsu, H. and Wei, J. J., Enhanced Boiling of FC-72 on Silicon Chips With Micro-Pin-Fins and Submicron-Scale Roughness, ASME Journal of Heat Transfer, **124** (2002) 383.
- [80] Peng, X. P. and Wang, B. -X., Forced Convection and Flow Boiling Heat Transfer for Liquid Flowing Through Microchannels, Int. Journal of Heat and Mass Transfer, **36-14** (1993) 3421.
- [81] Mizunuma, H., Behnia, M. and Nakayama, W., Heat Transfer from Micro-Finned Surfaces to Flow of Fluorinert Coolant in Reduced-Size Channels, IEEE Trans. Components, Packaging, and Manufacturing Technology – Part A, **20-2** (1997) 138.
- [82] Asai, A., Bubble Dynamics in Boiling Under High Heat Flux Pulse Heating, ASME Journal of Heat Transfer, **113** (1991) 973.
- [83] 丹下学, MEMS 伝熱面を用いた沸騰機構の解明, 伝熱, **48-202** (2009) 8.

持続可能なイノベーション創出能力強化に貢献する伝熱工学と教育のすすめ

Thermal Engineering & Education Contributing to Sustainable Innovation Capability

柘植綾夫（芝浦工業大学）

Ayao TSUGE (Shibaura Institute of Technology)

e-mail: president@shibaura-it.ac.jp

1. はじめに

21 世紀も早、はじめの 10 年が過ぎ、世界は環境・エネルギー・経済、および政治と社会システム、さらには教育も含めて激しいイノベーションの潮流の真っ只中にある。その中で日本だけが大きく取り残され、負のスパイラル構造に陥って沈みゆく危機感の共有が、研究と教育の社会的使命を持つアカデミアに今、求められている。

さらに、東日本大震災と福島原発事故という国難に遭遇した日本は、明治維新、敗戦後の戦後復興に次ぐ第三の国創りの重大変革期にあるといえる。少子高齢化と労働人口が確実に減少する 21 世紀の日本の活路を切り拓くには、持続可能な科学技術駆動型のイノベーション創出能力の強化と、それを実現する人材育成が不可欠である。

そのためには、個別の科学的知の創造（認識科学）人材と科学的知の創造を統合して、社会経済的価値の創造（設計科学）を担う人材の育成を並行して実現せねばならない。[1]

認識科学に立脚した設計科学とも言うべき伝熱工学は、その学術そのものの進展とともに、20 世紀の日本と世界の発展と、それを牽引した産業界と教育研究界及び行政における多様な人材の育成にも貢献してきた誇るべき歴史がある。日本伝熱学会の創立 50 周年を機に、工学の原点に立ち戻って「持続可能なイノベーション創出に貢献する伝熱工学と教育」について考える。

2. 工学の原点への回帰の必要性

2.1 21 世紀に工学が遭遇する三つの拡散と教育の重大危機

工学と科学技術革新の成果が社会と生活に深く浸透した 21 世紀の今、技術の体系化としての工学は三つの拡散に遭遇している。[3]

第 1 はターゲット（目標）の拡散である。工学が目標とする社会経済的価値は、人間・生活・社会・

世界と地球、宇宙、さらには生命にまで広がっている。

第 2 はスコープ（守備範囲）の拡散である。より早く、安く、安全で高効率に加えて、安心や心の満足までも守備範囲が広がっている。さらに工学は、純粋科学の細分化に伴い社会経済的価値化に向けた知と価値の統合役の役割まで、その守備範囲が拡大している。

第 3 はディシプリン（学問分野）の拡散である。これらの拡散は要素還元的な指向の学術の宿命といえるが、問題は、教育を担う学術界の使命である「21 世紀の自由市民育成を目指した教育」と、「社会のための科学技術の実現」への学術・教育界のミッション観が希薄になっていることである。

その結果、わが国の教育において次のような負のスパイラル構造と危機的様相が起きている。

- ①初等・中等教育における理数教育と社会および技術教育との乖離・・・科学技術と生活・社会との連関教育の欠落
- ②中学生の理工学への進学意欲の衰退
- ③文系・理系ともに科学技術リベラルアーツ教育効果の低下・・・高度知識基盤社会における自由市民としての素養の劣化
- ④理工系大学院教育の質と効果の低下・・・産業の要求とのミスマッチ、ポストク問題の顕在化、博士課程進学低下・・・日本の高度知識基盤社会づくり能力喪失の危機
- ⑤高度知識基盤社会の自由市民として豊かに生きる新リベラルアーツ素養の低下と、子ども達への負の連鎖

このような状況では「国を挙げた科学技術立国創り」が砂上の楼閣となる恐れがある。

工学の原点は「工」の字が表わすように「人間による天と地の空間における、価値あるものの創造の営み」と言える。高度知識基盤社会と高付加価値ソフト・ハードのものづくり産業を支える人

材育成と教育のこのような現状は、まさに国創りの危機的状況と認識せねばならない。学術界特に工学分野の大学教員は、この視座に立った 21 世紀の自由市民育成を目指した教育と、社会のための科学技術実現への使命感を一層強くし、それを教育と研究及び社会貢献に実践することが喫緊の課題である。

2.2 真の科学技術創造立国創りの要

人材以外に資源に貧しい日本にとって真の科学技術創造立国を創ることは、国の存亡に関わる極めて重要な国策課題であることは論を俟たない。換言すれば、持続可能な科学技術駆動型イノベーション創出能力を如何に構築し強化し続けていくか国創りの要である。その要を図 1 に示す。社会経済的価値の創造の基盤には、科学技術的知の創造能力を育む基礎研究と目的基礎・応用研究能力を育む政策目的研究が重要であることは言うまでもないが、これらの価値評価が相違するそれぞれの能力と価値創造活動を、結合・統合し社会経済的価値を創造する能力の研究と人材育成も工学の研究と教育に求められていることを再認識せねばならない。

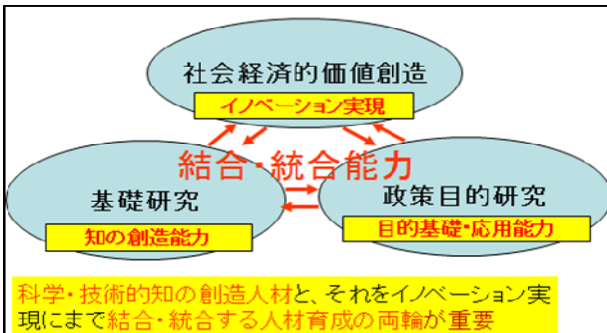


図 1 真の科学技術立国づくりの要
～持続可能なイノベーション能力構築～

工学、特に伝熱工学は 20 世紀においてはこの認識のもとで、教育と研究とイノベーションへの参加の三位一体的な実践によって、幅広い人材を育成し、同時に学術の発展と社会への貢献を実行してきたことを、21 世紀の今、私たち伝熱工学の研究と教育に責を持つものは再認識して、その継続的実践と一層の強化を心がけねばならない。前述の工学が遭遇する 3 つの拡散現象に流されて、伝熱工学の研究教育界はこの使命を忘れてはなら

ない。

一方、20 世紀のキャッチアップ型からフロントランナー型に入った 21 世紀の日本のイノベーション創出の実現は、図 2 に示すごとく益々難しくなっている。その背景には、21 世紀のイノベーションが実現を目指す巨大複雑化する社会経済システム創りに必要な科学技術のスペクトル幅がますます広がる傾向がある。さらに、求められる技術群の高性能化、高信頼性化、さらには安心の様に心の満足までも満たすことが求められていることにある。まさに、フロントランナー型イノベーション創出の要は、巨大複雑系社会経済システムを構成する「個別の科学技術創造」と、それらの「統合化能力」の両方の能力が不可欠である。社会を支える工学、特に伝熱工学の教育と研究は、この「統合化能力の研究と人材育成」を強化することが求められている。[2]、[3]

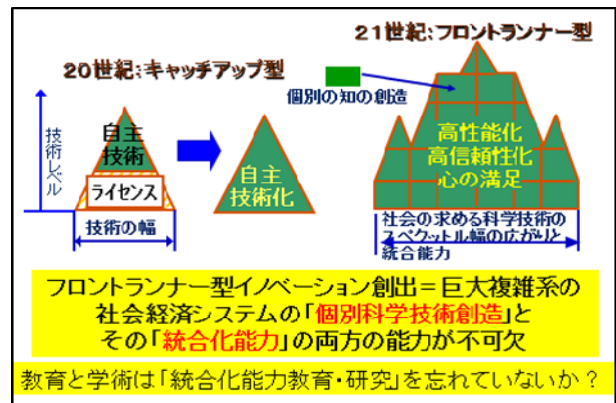


図 2 フロントランナー型イノベーション創出の難しさ

2.3 フロントランナー型イノベーションを実現する人材像

21 世紀のフロントランナー型イノベーション創出を担う人材像を明確にし、その育成に向けた教育プログラムやカリキュラム体系を具体化し、それを学習する学生・生徒にも見える化することが重要であるが、教育現場での実態は初中等教育及び高等教育においても不十分な状況にある。初中等及び高等教育の現場にも活用されることを期待して、世界をリードするフロントランナー型イノベーションの構造と育成すべき人材像を図 3 に示す。

まず、トップランナー型イノベーションの重要

な要素技術に Differentiator 技術がある。差異化技術と訳することが出来るが、“持っているとは必ず競争に勝てる技術”とも定義できる。

この Differentiator 技術を生み出す人材を Type-D 型人材と呼ぶ。どちらかというところ“あるものを探求する認識科学指向の人材と言えよう。“何のために探求するか？”と問うべきではない純粋科学も是に位置づけられよう。知的好奇心による基礎研究の成果が、たまたまイノベーションの源になる事例を忘れてはならない。

一方、先端計測技術等の様に、今までは不可能であったことを可能にする Enabler 技術（可能化技術と訳することが出来る）の創造を担う人材を Type-E 型人材と呼ぶ。認識科学と、社会が求めるべきものを探求する設計科学の両輪を併せ持つ人材と言えよう。

更に、これらの知の創造の成果を社会経済的価値を有するハード・ソフトや社会システムに形づくる、いわゆる高付加価値創造型ものづくりを担う基盤的（Base）人材を Type-B 人材と呼ぶ。我が国の産業を支えているハード・ソフト及びシステムの製造現場を担う重要な産業基盤的人材である。

更に忘れてはならない人材として、様々な価値と知を統合・結合して新たな社会経済的価値を創造（イノベーション）する人材を、「数学の総和：Σ」と関連づけて Σ-型統合能力人材と呼ぶ。

要素還元的な学術は Type-D 型及び Type-E 型の研究を志向せざるえぬ状況下で、初中等教育から高等教育現場において、Type-B 人材と Type-Σ の教育と人材育成機能が弱体化、希薄化している。また、教育と科学技術行政においても、この視点に立った教育と科学技術振興政策と投資が希薄であることに危機感を持つ。[2]

工学はその原点に、社会経済的価値の創造を目的とする。20 世紀においてはその実現のため、産業界と教育界は協働しながら Type-B 型や Type-Σ 型人材の教育と育成機能を陰に陽に持っていた。特にエネルギー・環境分野のイノベーションを担う人材を多数輩出してきた伝熱工学は、この先頭に立った教育・研究の実践の誇るべき歴史を持つことを忘れてはならない。

21 世紀の今、伝熱工学の教育・研究者は、工学が遭遇する 3 つの拡散に流されること無く、温故

知新のもと、工学の原点に立った教育と研究と社会貢献活動（イノベーションへの参画）の三位一体的実践のロールモデルを示すことが求められている。

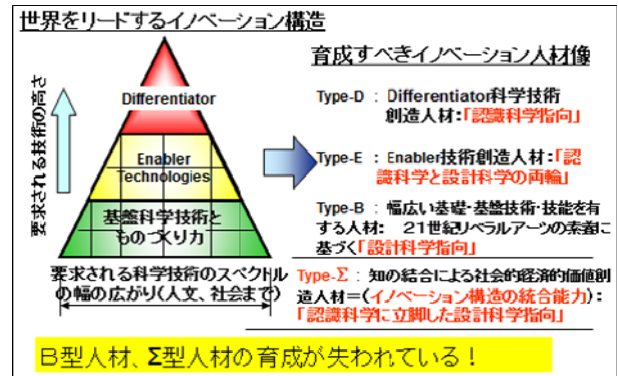


図 3 フロントランナー型イノベーションを実現する人材像

2.4 工学教育・研究の原点回帰を促す潮流

以上の問題意識と教育・研究の現状に対する危機感、およびその復元に向けた潮流は既に顕在化していることは伝熱教育・研究者は注目せねばならない。

筆者が主査を務める文部科学省科学技術・学術審議会人材委員会は、その第 4 次提言において、上述した教育の危機の認識に立って「提言：知識基盤社会を牽引する人材の育成と活躍の促進に向けて」[4]を公表し、平成 23 年 8 月から開始された第 4 期科学技術基本計画への具体的な反映を行った。第 4 期科学技術基本計画[5]においては、科学技術政策とイノベーション政策を両輪とし、それを支える人材育成政策の強化を謳っている。その政策には、本年 3 月に発生した東日本大震災と福島原発事故からの日本の新生に向けた重要かつ喫緊の社会的課題の解決に向けたイノベーション政策も盛り込まれた。

まさに我が国の科学技術政策の基本において、その社会的使命をイノベーション創出すなわち社会経済的価値の創造と位置づけていることは画期的と言える。同時に今までの科学技術政策と教育政策では不十分であったことを可能にすることの困難さと、すでに日本は世界の潮流に遅れているという緊急性の面からの国家的重要課題を改めて浮き彫りにしている。

この認識に立って、筆者も委員として参加して

いる文部科学省科学技術・学術審議会は今後の科学技術・学術政策の検討の視点として、次の基本方針を打ち出した。[6]

1. 東日本大震災についての科学技術・学術の観点からの検証

2. 課題解決のための学際研究や分野間連携

社会が抱える様々な課題の解決のために個々の専門分野を越えて、様々な領域にまたがる学際研究や分野間の連携がなされているか。特に自然科学者と人文・社会科学者との連携がなされているか。

また、社会が抱える様々な課題を的確に把握するための方策は何か。課題解決のための学際研究や分野間連携を行うためにはどのような取り組みが必要か。

さらに、これらを支える人材育成のための方策として何が必要か。(以下省略)

これらの科学技術・学術界及び関連政策の変化は、社会のための価値創造と人材育成・教育を使命とする工学、特に伝熱工学の原点回帰とその実践にあたり、大変心強い潮流と言えよう。

同時に、伝熱工学はその社会的使命の原点に立って改めて振り返ると、個別の学術ディシプリンに立脚しつつも、巨大複雑系社会経済システムの創成を担う総合工学であることを改めて認識する。換言すると、伝熱工学は真理を探究する認識科学として進展させることの重要性以上に、巨大複雑系社会経済システムを創成する 21 世紀のフロントランナー型イノベーション力を支える総合工学[7]として位置づけて、教育と研究と社会貢献を強化する時期にあると言える。

3. むすび

日本伝熱学会の創立 50 周年を機に、20 世紀の日本と世界の持続可能なイノベーションに貢献し、同時にその実現を担う産学官界の幅広い人材を教

育し、輩出してきた伝熱工学の誇るべき歴史を再認識したい。

同時に、伝熱工学の研究者・技術者及び教育者は、21 世紀の日本の持続可能な発展に向けた教育・研究・イノベーション創出の三位一体推進という社会的使命が益々重くなっていること、さらにその実践の難しさの確認と新たな覚悟と挑戦が求められている

“勝負はこの 10 年、改革と挑戦は今！”の覚悟を持って、日本伝熱学会の新たな 10 年の歴史を築こうではありませんか。

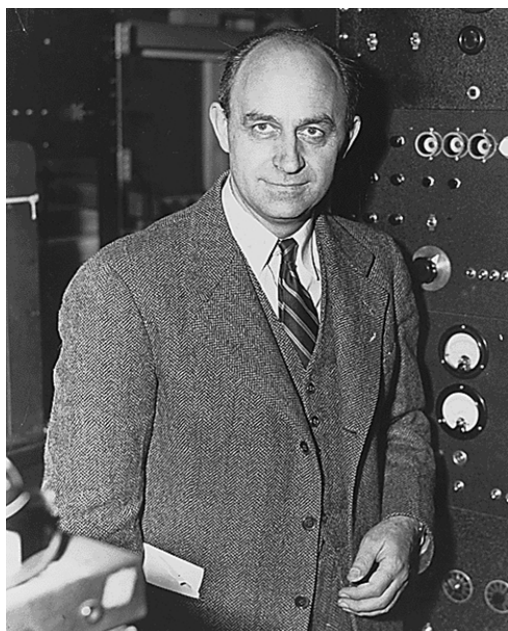
参考文献

- [1] 日本学術会議，科学者コミュニティと知の統合委員会，提言「知の統合—社会のための科学に向けて」，(2007 年)
- [2] 柘植綾夫，持続的イノベーション創出能力強化による日本新生に向けて，Beyond Innovation 「イノベーションの議論」を超えて，丸善プラネット社，第 2 章，p29，(2009)
- [3] 日本学術会議総合工学委員会報告，巨大複雑系社会経済システムの創成力強化—科学技術駆動型イノベーション創出力強化に向けて，2011 年 8 月
- [4] 文部科学省科学技術・学術審議会人材委員会，知識基盤社会と牽引する人材の育成と活躍の促進に向けて，平成 21 年 8 月 (2009) .
- [5] 第 4 期科学技術基本計画，平成 23 年 8 月閣議決定 (2011)
- [6] 文部科学省科学技術・学術審議会決定，東日本大震災を踏まえた今後の科学技術・学術政策の検討の視点，平成 23 年 5 月 31 日
- [7] 柘植綾夫，巨大複雑系社会経済システムの創成力を考える—フロントランナー型イノベーションの創成力—，学術の動向，2010 年 12，p40

エンリコ・フェルミ(1901~1954)の功績

A Meritorious Deed of Enrico Fermi (1901-1954)

塩見 淳一郎 (東京大学)

*Junichiro SHIOMI (The University of Tokyo)*e-mail: *shiomi@photon.t.u-tokyo.ac.jp*

エンリコ・フェルミ

1. はじめに

エンリコ・フェルミは、量子統計力学や原子核物理学を始めとする様々な分野で輝かしい業績を収めており、20世紀を代表する科学者の1人に数えられます[1]。また、理論と実験の両方を超一流にこなす「完璧な物理学者」とも評されます。加えて、教育者として次の世代の優れた研究者を育てており、人望が厚く人格者として敬愛されていたようです[2]。そういった総合的な評価の影響もあるのか、「フェルミ」の名が付くものは非常に多く、賞、研究所、天文観測所、原子炉、エネルギー、粒子、小惑星、元素、法則、パラドックスなど数えきれません。

フェルミの携わった研究としてまず思い浮かぶのは1938年のノーベル物理学賞[3]の受賞対象になった、減速中性子線照射による誘導放射能の研究でしょう。一方、「伝熱」という観点から見るとフェルミ・ディラック統計[4,5]の発見がフェルミ

の最大の功績であるかも知れません。これによって、例えば金属の比熱や熱伝導などの微視的な理解が格段に進みました。もちろん、これは伝熱に限らず、電子の振る舞いから宇宙の成り立ちまでの理解に繋がる熱力学の根幹を為す理論です。フェルミ・ディラック統計の発見に関しては、フェルミの伝記などでは数ページで済まされてしまうのが常ですが(何と言ってもフェルミが25歳までに仕上げた研究成果です)、本稿では重点的に触れることにします。

2. フェルミが育った時代

科学者を語る上で、その人が育った時代背景を知ることは欠かせません。特にフェルミが生きた20世紀前半は科学にとって特別な時代でした。フェルミがイタリアのローマで生まれたのは1901年であり、マックス・プランクが黒体放射の式を発表した翌年、アルベルト・アインシュタインの「Annus Mirabilis (奇跡の年)」の4年前です。プランクがエネルギーの量子性を導入して黒体放射の謎[6]を解いたのをきっかけに、それまで自然の真理とされていた古典力学に取って代わる新しい真理の探究が始まり、前期量子論が幕を開けたまさに革命の時代でした。

また、フェルミの研究の核となる放射能が発見されたのもその少し前です。1895年にヴィルヘルム・レントゲンによってX線が発見された翌年、アンリ・ベクレルによってウランの放射能が発見されています(その後ピエール・キュリーとマリイ・キュリーによって他の元素についても観測されました)[7]。そしてこれらから射出される放射線はアーネスト・ラザフォードやポール・ヴィラールによってアルファ、ベータ、ガンマの三種類に分けられました[8]。

放射線を用いた実験が可能になったことで、原子の正体を解明する研究も急速に進展しました。

1911年にラザフォードはアルファ線を金箔に照射することによって、中心に核が存在する現在の原子像（ラザフォードの原子模型）を見い出しています。後述のように、フェルミの研究はまさにこれらの知見や技術の発展の流れに乗ることによってスタートすることになります。

3. 学生・ポスドク時代

フェルミは幼少期から類まれなる記憶力を持ち、負けず嫌いで根気もあり、科学者になる適正を兼ね備えていたと言われていました[2]。幼いころに兄を亡くしてから猛烈に勉学に打ち込むようになり、みるみる才能を開花させ、いわゆるエリートコースを歩んで行きます。イタリアでは最難関とされるピサの高等師範学校（Scuola Normale Superiore in Pisa）に入学し全寮制教育を受けました。秀でた学生として有名であったようで、早くも量子力学を修得し、物理学の急速な進歩について行けなくなった物理学科の教授に依頼されて、当時アルベルト・アインシュタインによって発表されたばかりの相対性理論のレクチャーを行ったそうです[2]。そして、1921年（20歳）には大学3年生ながら早くも最初の学術論文を発表しています。

フェルミは理論物理で優れた業績を収める一方で、博士論文研究ではX線の実験をテーマに選びました。すでにこのころから実験と理論を両立するフェルミの研究スタイルを垣間見ることができます。1922年に21歳で博士号を取得し、1922年から23年にかけてゲッティンゲンやライデンでポスドクを行っています。フェルミ・ディラック統計に繋がる研究を始めたのはこのころであり、1926年にローマ大学の教授に就任した年に、有名なフェルミ・ディラック統計力学の論文[4]を発表しています。実に、フェルミは弱冠25歳でした。

4. フェルミ・ディラック統計

フェルミはパウリの排他律原理に従う量子気体の新しい統計[3]を明らかにしました。同時期にポール・ディラックも同じ統計分布を独立に導き出したため、「フェルミ・ディラック統計」と呼ばれます。なお、ディラック自身が後に「フェルミ統計」と呼んだため、「フェルミ統計」と呼ばれることも多いようです。ディラックは非常に謙虚な人柄だったようで、このように他の研究者にクレジ

ットを譲った例がいくつもあるようです（例えば、状態間の遷移確率を与える「フェルミの黄金律」も実際にはディラックが導出したものです）。やがて、電子、陽子、中性子に代表されるフェルミ・ディラック統計に従う粒子を総称してフェルミ粒子又はフェルミオンと呼ぶようになります。

一般的な物理の教科書に載っている内容と重複する部分もありますが、ここでフェルミ・ディラック統計の導出について少し触れることにしましょう。フェルミ・ディラック統計は、平衡状態にある同種類のフェルミ（パウリの排他律に従う）粒子に対して適用されます。加えて、粒子同士の相互作用が無視できるとします。これは、 N 粒子系が単一粒子のエネルギー状態の足し合わせによって記述できることを意味します。

さて、フェルミの導出方法ですが、1926年の論文の英訳[4]を読むと、数学より物理的意味を重んじるフェルミらしい文に行き当たります。

“Reserving publication of the mathematical details of this theory to another occasion, we limit ourselves in this Note to showing the principles of the method and the results.”

と宣言した上で、

“Let us suppose now that we have to distribute among our N molecules the total energy $W=Eh\nu$ ($E=$ integer number); and let us label with $N_s < Q_s$ the number of molecules of energy $sh\nu$. It is easy to find that the most probable values of N_s are”

として、フェルミ・ディラック分布関数

$$N_s = \frac{\alpha Q_s}{e^{\beta s} + \alpha} \quad (1)$$

が記述されています（ α と β は W と N に依存する定数）。これは確かに「簡潔」ですが、本稿での解説に用いるにはいささか簡潔過ぎるように思えますので、ここでは独立に同じ結果を得ているディラック[5]の助けを借りて、フェルミ・ディラック分布関数の導出を追って見ることにします（なお、必要に応じて、変数の呼び名を原著から変えています）。

全粒子数が N 、全エネルギーが E の系を考えます。系が有する波動関数（又は状態）を同じエネルギーを持つグループに分け、 s 番目のグループに属する波動関数の数を A_s 、そのエネルギーを E_s 、それを占める粒子数を N_s とします。すると、 A_s

個の波動関数の中から N_s 個の粒子が占めるものを、重複を許さずに選ぶ組み合わせの数は、

$$W = \prod_s \frac{A_s!}{N_s!(A_s - N_s)!} \quad (2)$$

と表せます。従って、エントロピーは（スターリングの公式を用いて）、

$$\begin{aligned} S &= k_B \log W \\ &= k_B \sum_s \{A_s(\log A_s - 1) - N_s(\log N_s - 1) \\ &\quad - (A_s - N_s)[\log(A_s - N_s) - 1]\} \end{aligned} \quad (3)$$

で与えられ、これが平衡状態では極大を取ることより、

$$\begin{aligned} 0 &= \delta S = k_B \sum_s \{-\log N_s + \log(A_s - N_s)\} \delta N_s \\ &= k_B \sum_s \log\left(\frac{A_s}{N_s} - 1\right) \delta N_s. \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、全体の粒子数とエネルギーは変化しないので、

$$\sum_s \delta N_s = 0, \quad \sum_s E_s \delta N_s = 0. \quad (5)$$

これをラグランジュの未定乗数法を用いて解くことにより、以下の式が得られます。

$$\log\left(\frac{A_s}{N_s} - 1\right) = \alpha + \beta E_s \quad (6)$$

さらに、未定乗数 α 及び β は熱力学的物理量と関係づけることができ、温度 T と化学ポテンシャル μ を用いて

$$N_s = \frac{1}{e^{(E-\mu)/k_B T} + 1} \quad (7)$$

が導出されます。これがフェルミ・ディラック分布関数です（図 1）。

フェルミ・ディラック分布は例えば金属の比熱や熱伝導率を理解する上で多に役立ちました。それまではパウリ・ドルーデによる自由電子を気体運動論的に表したモデルが知られていましたが、このモデルの最大の問題点は、古典論に基づく電子の速度や比熱を用いていることでした[9]。それに対して、1933年にアルノルド・ソンマーフェルトはフェルミ・ディラック分布関数を用いて電子の比熱を求めることで、古典論では比熱が 100 倍程度過大評価されることを示しました[10]。それ

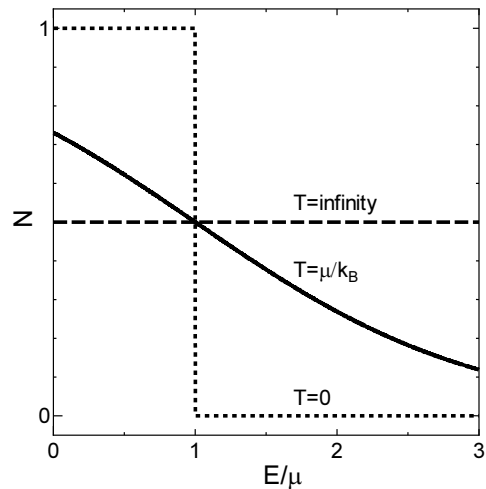


図 1 フェルミ・ディラック分布のエネルギー(E)及び温度(T)依存性。

までに金属であっても格子の比熱だけで凡そ説明が付くことが実験を基に分かっていましたが、フェルミ・ディラック統計によってその理由が初めて明らかになりました。

なお、上述の違いにも関わらず、ドルーデのモデルが熱伝導率やローレンツ数を比較的良く再現するのは偶然であることが知られています。ドルーデのモデルでは、比熱を過大評価すると同時に、電子速度を 10 倍程度過小評価したため、それらが相殺され、求める物性によってはソンマーフェルト理論で得られる結論とあまり変わらないのです[11]。

フェルミ・ディラック統計が役立つスケールの大きい例としては、白色矮星の安定性が有名です。白色矮星として知られるシリウス伴星（シリウス B）の質量は太陽のそれと凡そ等しい一方で、その半径は非常に小さく太陽の約 1/100 であることが 1990 年ごろまでに観測されていました。そうすると、太陽の密度は地球上の水と同程度ですので、白色矮星の密度は極めて高く、表面重力は太陽の何千倍、地球の何万倍であることになります。このような状態で、矮星が形を保っている理由がアーサー・エディントンをはじめとする天文学者の間でパラドックスとして議論されていました。

その答えは、パウリの排他則を満たすフェルミ・ディラック統計が与えることになります。このような高密度の星では原子は完全にイオン化して、電子は原子核から離れて電子気体として振る

舞います。フェルミ・ディラック統計に従うと、これらの電子はエネルギーの小さい状態から縮退しながら占めて行きますが、そのいくつかはエネルギーの高い状態を占めなければなりません。これによっていわゆる「縮退圧」が生じ、これによる圧力勾配と星自身の重力が釣り合って白色矮星はその形を保っていられます[11]。

5. フェルミ研究室

前述の通り、25歳にしてフェルミは早くも物理学の教授になりました。そのころのイタリアでは、まだ新しい現代物理学への抵抗感があり、フェルミはそれを打開するのに腐心したようです[2]。イタリアの若い世代に現代物理学を伝えることが重要と考え、1928年に「*Introduzione alla Fisica Atomica (Introduction of atomic physics)*」というイタリアで初めてとなる現代物理学の教科書を執筆し、それを基に講義を行っています。

新しい研究分野だったこともあって、学生の勧誘に苦労したそうですが[2]、フェルミの研究室には後に名を馳せる面々（フランコ・ラセッティ、エミリオ・セグレ、エドアルド・アマルディなど）が集まりました。このフェルミの研究チームは「*Ragazzi via Panisperna*」（Panispernaは研究室があった通りの名前、「*Ragazzi*」はイタリア語で「Boys」の意味）という愛称で呼ばれていました。研究会では、フェルミが解説する形で、当時発表されたばかりのエルヴィン・シュレディンガーの波動学[12]を始めとする現代物理学を議論していたようです[2]。フェルミはシンプルな解法を導き出す才能に非常に長けていたようで、複雑な数学や論理を好まず、まずはいわゆる「*Back of the envelope*」計算で当たりを付けた上で、後から正確な解を導くというスタイルを好んだと言われています。

フェルミの伝記[2]では、フェルミの教育者としての資質についても多く触れられています。何よりも学生に教えるのが好きだったようで、教えたことを学生が理解できないと、もう一度教える機会が得られるからと言って喜んだといいます。また、決して勉学や研究一辺倒というわけではなく、研究室の活動はスポーツや遊びとのバランスが取れていたようです。こうした研究生生活の中で、フェルミの研究スタイルがチームに浸透し行き、その後の様々な革新的研究が展開される舞台が整っ

て行きます。

6. 中性子物理学の誕生

Ragazzi via Panisperna は理論と実験の両方を高いレベルで実践できる強みを持って、原子核物理の研究を進めて行きます。起点となったのはその少し前に起った原子衝突実験による中性子の発見です。1911年にラザフォードが、アルファ粒子の散乱実験から、原子の中心には正電荷を帯びた極めて小さな原子核が存在することを証明しました。そしてこれが、ラザフォードの学生であったジェームズ・チャドウィックによる中性子の発見[13]に繋がり、原子核は正電荷をもつ陽子と電気的に中性な中性子によりなることが明らかになりました。

なお、チャドウィックより前にイレーヌ・ジョリオ・キュリーとフレドリック・ジョリオ・キュリー夫妻が、アルファ粒子を照射したホウ素から得る中性子を観測したのですが、キュリー夫妻はそれをガンマ線だと考えてしまいました。このように、後少しのところでのキュリー夫妻は中性子を見出すことはできませんでしたが、人工放射性元素の発見で1934年にノーベル化学賞を受賞しています[14]。

これらの中性子と人工的な誘導放射能に関する発見を融合させたのがまさにフェルミの研究でした。フェルミは、ラドンから出るアルファ線をベリリウムに衝突させた際に生じる中性子をターゲット原子に衝突させることによって、放射能の誘導を実現しました[15]。驚くのは、フェルミらが様々な元素について網羅し、40以上の人工放射性同位元素を発見している点です。そして、放出された粒子の種類、エネルギー量、半減期などを測定する中で、照射を行う台が木製の場合と大理石の場合で放射能の強度が異なることを見つけました。フェルミらは、この原因が材質によって中性子が減速される度合いが異なるからであると推測し、より効果的に中性子を減速させるパラフィンを用いて実験を行うことによって、速度の遅い中性子の方が効果的に誘導を引き起こすことを明らかにします。この成果をきっかけに中性子物理学という新たな学術分野が誕生し、フェルミは1938年にノーベル物理学賞を受賞します[3]。

実は、一連の実験の中でフェルミは中性子がウ

ラン原子を分裂させ、小さな原子になっている手掛かりを観測していたようですが[16]、この時点ではそれが核分裂であることを知りませんでした。どうやら（恐らく **Back of the envelope** 計算をもとに）中性子がそれよりも重い原子を分裂させるだけのエネルギーを持てるとは思っていなかったようで、イダ・ノダックの指摘[17]にも関わらずその可能性を除外していました。

ノーベル賞の受賞対象となった研究の他にも、フェルミは様々な成果をこの時期にあげています。その1つとして有名なものに、「ニュートリノ」の概念を導入したベータ崩壊の理論に関する研究があります。当時、ベータ崩壊の際のエネルギー保存則が満たされないことが議論されており、それを説明するために、発生したエネルギーが全て電子のエネルギーとなるのではなく、一部が「ニュートリノ」のエネルギーとなると説明したのです。しかし、この研究を *Nature* 誌に論文として投稿したところ、エディターから“*it contained speculations which were too remote from reality*”とリジェクトされてしまったと言われています[2]。それによってこの論文はイタリア語とドイツ語ではすぐ（1934年）に発表されたにも関わらず[18]、英語での発表は1939年まで遅れたそうです。歴史を見ると、新しい粒子の存在の提唱には苦勞が伴うことが多いようですが、フェルミもまたその洗礼を受けたようです。

7. アメリカ時代

1938年にフェルミはノーベル賞の受賞式のためにストックホルムを訪れた際に家族とともにアメリカに亡命します。当時台頭してきたムッソリーニのファシズムによる迫害を恐れてのことでした（フェルミの妻ラウラ・フェルミはユダヤ系でした）。これを機に、フェルミはコロンビア大学で研究を始めます。同年に、オットー・ハーンとフリッツ・シュトラスマンがウランに中性子線を照射することによってバリウムが生成されることを観測し、翌年にレーゼ・マイトナーとオットー・フリッシュが、それが核分裂であることを示します。このニュースがニール・ボーア[17]を介してフェルミらに伝わり、コロンビア大学の研究者チームにより核分裂の実験が盛んに行われました。そして、自身の研究の実用化や応用に携わること

に興味がなかったと言われるフェルミですが[2]、初の原子炉（シカゴパイル-1）の開発を通じて自立的な核連鎖反応を実現し、これによってマンハッタンプロジェクトの中核的な役割を担うこととなります。

8. おわりに

本稿では、基礎科学に関する業績が集中しているフェルミの研究人生の前半を主に取り上げました。アメリカ時代以降のフェルミの活動については、当時の政治的背景と絡めて書かれた伝記や資料が多数ありますので、そちらに譲ることにします。また、フェルミのスタイルに従い、本稿ではなるべく数学を使わないように努めました。より厳密な式や議論については、多数ある物理学の教科書をご参照ください。

参考文献

- [1] Snow, C., *The physicists: A generation that changed the world*, Little Brown (1981).
- [2] Cooper, D., *Enrico Fermi: And the revolutions of modern physics*, Oxford Portraits in Science, Ed. Gingerich O., Oxford University Press, Inc. (1999); ダン・クーパー著、梨本治男訳、エンリコ・フェルミ、原子のエネルギーを解き放つ、オックスフォード科学の肖像シリーズ、大月書店(2007).
- [3] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1938/.
- [4] Fermi, E., *Sulla quantizzazione del gas perfetto monoatomico*, *Rendiconti Lincei*, 145 (1926). Zannoni, A., *On the quantization of the monoatomic ideal gas*, arXiv:cond-mat/9912229 (英訳).
- [5] Dirac, P. A. M., *On the theory of quantum mechanics*, *Proc. Royal Soc. London Ser. A*, 112-762, 661 (1926).
- [6] 花村克悟, マックス・プランクの功績, 伝熱, 48-205, 32 (2009).
- [7] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1903/.
- [8] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1908/.
- [9] Drude, P., *Zur Elektronentheorie der metalle*,

- Annalen der Physik* 306, 566 (1900). Drude, P., "Zur Elektronentheorie der Metalle; II. Teil. Galvanomagnetische und thermomagnetische Effecte, *Annalen der Physik*, 308, 369 (1900).
- [10] Sommerfeld, A., Bethe H., Elektronentheorie der Metalle, Handbuch der Physik, 24, 333, Springer Verlag, Heidelberg (1933).
- [11] Kittel, C., Kroemer, H., Thermal physics, W. H. Freeman Company (1980).
- [12] 芝原正彦, エルヴィン・シュレディンガーの功績, 伝熱, 49-209, 72 (2010).
- [13] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1935/.
- [14] http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1935/.
- [15] Fermi, E., Amaldi, E., D'Agostino, O., Rasetti, F., Segrè E. Radioattività provocata da bombardamento di neutroni III, *La Ricerca Scientifica*, 5, 452 (1934).
- [16] Fermi, E., Possible Production of Elements of Atomic Number Higher than 92, *Nature*, 133, 898 (1934).
- [17] Noddack, I., On Element 93, *Zeitschrift für Angewandte Chemie*, 47, 653 (1934).
- [18] Fermi, E., *Z. Physik*, 88, 161 (1934).
- [19] 村上陽一, ニールス・ボーアの功績, 伝熱, 49-206, 25 (2010).
-

第4回マイクロスケールの熱流動に関する国際会議

*Report on the 4th International Conference on Heat Transfer
and Fluid Flow in Microscale*

高橋 厚史 (九州大学)

Koji TAKAHASHI (Kyushu University)

e-mail: takahashi@aero.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

標記会議（略称 HTFFM）は熱工学分野においてマイクロチャンネル内の熱流動が脚光を浴び始めた2000年10月にBanff（カナダ）で始まった国際会議です。その後、2005年はLucca（イタリア）、2008年はWhistler（カナダ）と3年毎に開催されています。これまでの3回はイタリアのCelata博士が会議の議長を務めてきましたが、今回初めて日本の主導によって、また日本伝熱学会の50周年事業の一つとして、2011年9月4日(日)から9月9日(金)の日程で福岡市のヒルトン福岡シーホークホテル（図1）にて行われました。

2. 会議の内容

マイクロ/ナノスケールにおける熱と流れをテーマにした本会議がカバーする内容は、単相流、二相流、相変化、伝熱機器、燃料電池、燃焼、CFD、分子動力学、計測技術と幅広く、また、シングルセッション形式で5日間にわたって徹底討論することから当該研究の現状を網羅的に理解することができるものです。

今回発表された一般講演論文は68件と前回の47件を大幅に上回り、この分野の盛り上がりとも

に我が国のアクティビティの高さを示す結果となりました。これらがオーラル14セッションとポスター1セッションに分かれて討議され、加えてキーノート7件と特別招待講演1件が行われました。参考までにキーノートの一覧を表1に示しますが、これらの中には割り当てられた時間の過半をレビューに費やす講演も多く、参加者にとって有益な情報になったことと思います。

今回の参加者は14か国から総勢100名を数え、日米欧以外にもインドやイランからの発表もあって国際色豊かな会議となりました。ちなみに、会場（図2）はホテルの宴会場をスクール形式としたもので、学生の発表者には国内会議と異なる格式が若干緊張を与えたかもしれません。シングルセッションゆえにどの発表も参加者全員に聴講されることとなり、オーガナイザーの先生方から時には厳しく時には励ましの質問が間断なく浴びせられていたのが印象的でした。投稿論文のうち優れたものはJournal of Thermal Science and TechnologyおよびComputational Thermal Sciencesにて特集号が組まれて出版される予定になっています。また、ポスターセッションからはベストポスター賞が2件の論文に対して授与されました。



図1 会場ホテルを背景に



図2 会場内の様子

表1 キーノート講演一覧

講演者	タイトル
<i>Khellil Sefiane</i> (Univ. Edinburgh, UK)	Fundamental studies of nanofluid solutions two phase heat transfer and phase change
<i>Tomoaki Kunugi</i> (Kyoto Univ., Japan)	Visualization and numerical simulation on subcooled pool boiling
<i>Peter Stephan</i> (Darmstadt Univ. of Tech., Germany)	Characteristics of evaporative heat transfer in the vicinity of a 3-phase contact line
<i>Naoki Shikazono</i> (The Univ. of Tokyo, Japan)	Liquid film in micro tube two phase flow systems
<i>Xing Zhang</i> (Tsinghua Univ., China)	Study on the thermal, electrical and thermoelectric properties of nanofilms
<i>Kenneth S. Breuer</i> (Brown Univ., USA)	Contact line dynamics at the nanoscale with and without evaporation
<i>Stephane Colin</i> (Univ. of Toulouse, France)	Experimental techniques for the analysis of gaseous microflows

3. 実行委員会の立場から

今回の会議は昼食を毎日提供する方式でした。アメリカのようにサンドイッチのみというのは日本の高級ホテルではありえず、昼食だけで一人一回あたり数千円が請求されます。実行委員会としては、スポンサー収入と予想参加者数をもとに参加登録料をギリギリの線で設定したため、万が一参加者が大きく減少すると大きな赤字が発生する可能性があることは覚悟していました。そこに、あの震災の発生です。スポンサーの中には資金援助の条件が海外からの参加者割合が一定以上であることを要求するものもあり、どのくらいのキャンセルがあるのか、議長の高田保之先生とともに気をもむ時期がかなりありました。

震災前に締め切った概要募集には130件の投稿がありましたが、論文取り下げの連絡が断続的に入り、結局、採択されても投稿されなかった論文が50件近くに上りました。ただし、どうやら「お国柄」があるようで例えばフランス人は原発事故をさほど気にしないのかキャンセルはほとんどなく、結果として海外勢としては中国と並んで最大の参加者を記録しました。

また、今回は福岡というどこへ行こうと楽しめる土地柄ということもあってエクスカージョンは設定しなかったのですが、ビーチに近いロケーシ

ョンと瀟洒なランチビュッフェ以外にも、レセプションやバンケット（図3）を大いに満喫していただきながら国際的ネットワークの構築が進んだものと推察しています。

本会議の成功は共同議長の笠木伸英先生はじめ組織委員各位の惜しめない協力の賜物であり、例えば、Gian Luca Morini先生(Univ. Bologna, Italy)は急病のStephane Colin先生の代役で急遽キーノートをこなした上にバンケットも盛り上げていただきました（図4）。本会議は日本伝熱学会の後押しのおかげで国内からも予想以上の参加者を集めることができ、さらに、日本学術振興会、九州大学カーボンニュートラル国際研究所(I2CNER)、九州大学水素エネルギー国際研究センター、International Center for Heat and Mass TransferそしてEngineering Conferences Internationalからもご支援をいただきました。三年後のHTFFM-Vも再び多くの参加者を得て、有意義で楽しい情報交換の場となることを祈っています。



図3 バンケットにて



図4 Gian Luca Morini先生

行事カレンダー

本会主催行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2012年					
5月～ 6月	日本伝熱学会創立50周年記念 第49回日本伝熱シンポジウム	2012.1.20 事前参加 申込締切 2012.4.13	2012.3.16	第49回日本伝熱シンポジウム実行委員会 富山県立大学 工学部 機械システム工学科 機械エネルギー工学講座内 Fax: 0766-56-6131 E-mail: nhsts49@ml.pu-toyama.ac.jp	Vol.50, No.213 2011.10
11月	第3回 国際伝熱フォーラム 3rd International Forum on Heat Transfer	事前参加 申込締切 2012.8.31	2012.7.31	〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1 九州工業大学大学院工学研究院機械知能工学 研究系 IFHT2012 実行委員会事務局 宮崎康次 Tel/Fax:093-884-3168 E-mail:miyazaki@mech.kyutech.ac.jp	Vol.50, No.213 2011.10

本会共催、協賛、後援行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2012年					
1月	GTSJ ガスタービンセミナー(第40回) (開催場所: ㈱IHI 横浜事業所)			(社)日本ガスタービン学会 〒160-0023 東京都新宿区西新宿 7-5-13-402 Tel:03-3365-0095 Fax:03-3365-0387 E-mail:gtsj@pluto.dti.ne.jp URL:http://www.gtsj.org	
1月～ 2月	Mate2012:18th Sympojium on "Microjoining and Assembly Technology in Electronics" (開催場所: パシフィコ横浜 会議センター)	2011.9.5	2011.11.22	〒103-0027 東京都中央区日本橋 1-13-1 日鐵日本橋ビル5階 トップツアー株式会社 東京法人東事業部内 Mate2012 事務局 Mate2012 担当 福田, 滝田 E-mail:mate2012@toptour.co.jp URL:http://www.toptour.co.jp/conv/3903/ mate2012/ Tel:03-3516-2669	
5月	第17回計算工学講演会 (開催場所: 京都教育文化センター)	2012.1.23	2012.3.23	社団法人 日本計算工学会 事務局 石塚弥生 講演会担当者 高野直樹 Tel:03-3868-8957 Fax:03-3868-8957 E-mail:office@jsces.org naoki@mech.keio.ac.jp URL: http://www.jsces.org/koenkai/17/index.htm	

The Nukiyama Memorial Award

The Nukiyama Memorial Award has been established by the Heat Transfer Society of Japan to commemorate outstanding contributions by Shiro Nukiyama as an excellent heat transfer scientist. Nukiyama addressed the challenges of the boiling phenomena and published a pioneering paper which clarified these phenomena in the form of the Nukiyama curve (boiling curve). This epoch-making work was done in 1930s, when heat transfer research was in an early stage and Nukiyama himself was young, under forty years old. The Nukiyama Memorial Award shall be bestowed to a scientist under/ about fifty years of age, once every two years in the field of Thermal Science and Engineering.

Biography: Shiro Nukiyama

Shiro Nukiyama was born in 1896 in Tokyo, Japan. He graduated from Tokyo Imperial University, and immediately started his professional career as a Lecturer of Tohoku Imperial University (currently Tohoku University). He was appointed Associate Professor in 1921. He visited England, Germany, Switzerland and the United States in 1922~24. He was appointed Professor in 1926. In subsequent years he actively conducted boiling heat transfer research.



In 1934, Nukiyama published a pioneering paper*) which was entitled “The Maximum and Minimum Values of the Heat Q Transmitted from Metal to Boiling Water under Atmospheric Pressure”. This paper clarified and provided an overview of the boiling phenomena in the form of the Nukiyama Curve (boiling curve).

In this work, Nukiyama made an excellent experiment using a metallic wire or a metal wire⁺, in which temperature and heat flux are evaluated accurately, and found that the relation between degree of superheating and heat flux is not monotonous, and that a maximum heat flux points appears in the nucleate boiling region and a minimum heat flux point appears in the film boiling region. He also found the hysteresis behavior that occurs in the transition region between the nucleate boiling and film boiling. Furthermore, he suggested that the boiling curve can be drawn even in the transition region if the state of the boiling water can be changed quasi-statically.

This was an epoch-making work which clarified the physics of boiling phenomena first. It has been highly appreciated in the international academic world of heat transfer. Also, it has become a guideline to heat transfer engineering for the design and control of combustion boilers and/or steam generators, and as such it has laid the foundation of modern energy technology. The Nukiyama Curve appears in every textbook of heat transfer today. Nukiyama is a great person in the international academic world of heat transfer.

In 1956 Nukiyama retired from Tohoku University, and was granted the title of Professor Emeritus. He served as the President of Heat Transfer Society of Japan in 1963~64. He received the Max Jacob Memorial Award in 1968. In 1983, he passed away in Sendai, Japan.

*) : *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, vol. 37, no. 206, pp. 367-374, June 1934. The English translation was published twice in *International Journal of Heat and Mass Transfer*, in vol. 9, pp. 1419-1433, 1966 and in vol. 27, pp. 959-970, 1984.

Call for Nominations - The Nukiyama Memorial Award

Sponsored by

The Heat Transfer Society of Japan

The Nukiyama Memorial Award has been established by the Heat Transfer Society of Japan on its 50th anniversary to commemorate the land-mark contributions by Shiro Nukiyama as an outstanding heat transfer scientist. Nukiyama addressed the challenges of the boiling phenomena and published an epoch-making paper, which provided an overview of the phenomena in the form of the Nukiyama curve (boiling curve). This pioneering work was made in the 1930s, when heat transfer research was in its infancy and Nukiyama himself was young: still under forty years old. The Nukiyama Memorial Award shall be bestowed to *a scientist, preferably under 50 years of age, every two years in the field of Thermal Science and Engineering.*

The Award shall be bestowed for outstanding scientific and engineering contributions and eminent achievements in the field of Thermal Science and Engineering. These contributions and achievements should yield a deeper insight into the relevant phenomena or should yield significant technological advances. In addition to research, the recipient should have made outstanding contributions to the field through teaching, design, or a combination of such activities. The Award is based on achievement *through publications in the field of Thermal Science and Engineering*, or achievement *through the application of Thermal Science and Engineering*. Nationality, gender, or society membership shall not be considered when evaluating the qualifications of candidates. A candidate must be alive at the time of designation as a recipient of the Award.

The Award consists of a plaque, an embossed certificate and an honorarium of 500,000 Japanese Yen. The Award is administered by the Board of the Nukiyama Memorial Award. The deadline for accepting nominations for the Award is January 31 2012. The Award will be bestowed at the Third International Forum on Heat Transfer (IFHT2012) during November 13-15, 2012 in Nagasaki, Japan, where the recipient of the Award will present an Award Lecture.

Nominators can obtain further information and download the nomination form from a webpage at

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

Five reference letters from professionals of at least two different countries who are familiar with the contributions of the nominee are requested.

Professor Nobuhide Kasagi, Chairperson
Board of the Nukiyama Memorial Award
Department of Mechanical Engineering
The University of Tokyo
Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan
Tel. +81-3-5841-6417; Fax. +81-3-5800-6999
kasagi@thtlab.t.u-tokyo.ac.jp

日本伝熱学会創立 50 周年記念
第 49 回日本伝熱シンポジウムのご案内

第 49 回日本伝熱シンポジウム実行委員会
委員長 石塚 勝
幹事 坂村芳孝

開催日：平成 24 年 5 月 30 日（水）～6 月 1 日（金）
会場：富山国際会議場（大手町フォーラム）(<http://www.ticc.co.jp/>)
所在地 〒930-0084 富山県富山市大手町 1 番 2 号 電話 076-424-5931
ANA クラウンプラザホテル富山 (<http://www.anacrowneplaza-toyama.jp/>)
所在地 〒930-0084 富山県富山市大手町 2 番 3 号 電話 076-495-1111
アクセス JR 富山駅より市内環状線セントラムで約 7 分 国際会議場前下車 徒歩 0 分
富山空港よりタクシーで約 20 分

講演申込締切：平成 24 年 1 月 20 日（金）
講演論文原稿提出締切：平成 24 年 3 月 16 日（金）
事前参加申込締切：平成 24 年 4 月 13 日（金）

ホームページ URL：<http://nhts49.pu-toyama.ac.jp/>

【シンポジウムの形式】

- ・ 講演発表形式として
 - a) 通常の一般セッション（口頭発表）
 - b) オーガナイズドセッション（口頭発表）
 - c) 学生および若手研究者を対象とする優秀プレゼンテーション賞セッションを実施します。
- ・ 1 講演あたりの割当時間は、一般セッションでは 15 分（発表 10 分、個別討論 5 分）で、各セッションの最後に総合討論の時間（5 分×セッション内の講演件数）を設ける予定です。オーガナイズドセッションについては、オーガナイザーの指示に従ってください。
- ・ 優秀プレゼンテーション賞セッションについては、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞（第 49 回日本伝熱シンポジウム）について」をご参照ください。

【参加費等】

- ・ シンポジウム参加費
 - 一般（事前申込：12,000 円、会場申込：14,000 円）
 - 学生（事前申込：5,000 円、会場申込：6,000 円）
- ・ 講演論文集
日本伝熱学会会員：無料（電子版はウェブ上で事前に公開します。参加者には当日印刷版・CD-ROM 版を配布します。参加されない会員のうち希望者には CD-ROM 版を事後にお送りします。）
非会員：8,000 円（印刷版）。会場受付にて日本伝熱学会に入会を申し込まれる場合は無料となります。

【懇親会】

- ・ 開催日：平成 24 年 5 月 31 日（木）
- ・ 会場：ANA クラウンプラザホテル富山
- ・ 参加費：
 - 一般（事前申込：8,000 円、会場申込：10,000 円。同伴配偶者無料）
 - 学生（事前申込：4,000 円、会場申込：5,000 円）

【交通と宿泊】

- ・ 交通と宿泊につきましては、本シンポジウムのホームページをご参照ください。

講演申込方法、講演論文集、執筆要綱

【講演申込み方法】

- ・ 原則としてウェブによる申込みに限らせていただきます。本シンポジウムで準備するウェブサイトから必要なデータを入力してください。ウェブによる申込みができない場合には、実行委員会事務局にお問い合わせください。
- ・ 申込みの際に、一般セッション、オーガナイズドセッション、優秀プレゼンテーション賞セッションのいずれで発表するかを選択してください。優秀プレゼンテーション賞セッションにお申込みの場合には、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞（第49回日本伝熱シンポジウム）について」をご参照ください。
- ・ 発表申込み時に、論文のアブストラクト（日本語で200~250字）を入力してください。講演論文集の抄録として科学技術振興機構（JST）のデータベースに登録します。
- ・ 講演発表申込みは、講演者1名につき1題目とさせていただきます。
- ・ 講演の採否およびセッションへの振分けは、実行委員会にご一任ください。

【講演論文集】

- ・ 講演論文集として、オフセット印刷版（白黒）と電子版（CD-ROM版）を作製します。講演論文集（電子版）はウェブ上で公開する予定です。会員には学会誌2012年4月号においてパスワード情報を通知し、電子版をウェブ上で閲覧できるようにする予定です。パスワードによる閲覧は、会員が当該講演論文のちに原著論文として学術論文誌等に投稿されることを考慮し、本講演論文集が限られた範囲に配布されたものであることを明確にするものです。
- ・ 講演論文集の印刷版とCD-ROM版は参加いただいた会員に配布します。なお、CD-ROM版は参加できなかった会員にも希望があれば配布しますので、シンポジウム終了後に実行委員会事務局にお申し込みください。
- ・ 印刷版の講演論文の長さは1題目あたりA4サイズで2ページとします。講演論文の作成様式は、前回と同様の2段組×片側26字×60行とする予定です。
- ・ 電子版には、オフセット印刷版と同じものか、または8ページ以内のフルペーパーを掲載することができます。電子版の様式は印刷版と同じですが、カラーの使用が可能です。ファイル容量は最大で2MBまでとし、動画は含まないものとします。
- ・ 原稿は、本シンポジウムで準備するウェブサイトから提出してください。
- ・ 電子版に掲載された講演論文は、本学会の論文誌“Thermal Science and Engineering”（以下、TSEと略す）にそのまま投稿することができます。ただし、掲載の可否は通常の査読プロセスを経て決まります。
- ・ TSEへの投稿を希望する場合、ホームページから原稿を提出する際に、論文投稿画面中のチェックボタンをONにしてください。その際、TSEの投稿規程をご一読願います。査読は、電子版に掲載された論文をもとにTSE編集委員会において担当エディタを定め、通常の手続きに従って行います。オフセット印刷版と同じ2ページでもTSE原稿として受け付けますが、8ページ以内でより詳細に執筆いただくほうが、その後の査読が円滑に進みます。掲載可となった後には、TSEの論文形式に沿った原稿を提出していただきます。この場合のTSE論文の受理日は、シンポジウム実行委員会での原稿受付日になります。
- ・ 講演論文原稿は、講演論文を電子化するためにPDFファイルで提出していただきます。
- ・ 原稿提出締切日までに提出されなかった講演論文は、講演論文集（印刷版・CD-ROM版）およびウェブに掲載されません。十分ご注意ください。

【執筆要綱】

○講演論文原稿の書き方

- ・ 講演論文は以下に従って作成して下さい。また、書式の詳細ならびにテンプレート用の電子ファイルは、シンポジウムのホームページをご参照下さい。

表題部分の書式： 原稿は、以下の四角囲い部に示すように、和文表題、和文副題、英文表題、英文副題、和文著者名（会員資格、著者名、所属の略記）、英文著者名、英文所属機関・所在地、英文アブストラクト、英文キーワードの順に、段組をせず幅150mmに収まるようにレイアウトして下さい。連名者がある場合には、講演者の前に*印をつけ、英文の所属機関・所在地についても上付き数字で区別して下さい。

論文表題および著者名は、講演申込時のデータと同じものを同じ順序で書いて下さい。講演申込時のデータと異なる場合には、目次や索引に反映されないことがあります。

150mm

<p>第 49 回日本伝熱シンポジウム原稿の書き方 (和文表題 : Gothic 14pt) MS-Word の場合 (和文副題 : Gothic 12pt) Guide for the manuscripts (英文表題: Times New Roman 12pt) The case of MS-Word (英文副題: Times New Roman 12pt) (1 行あける) 伝正 *伝熱 太郎 (伝熱大) (会員資格 著者名[講演者には*印] (所属略称) : 明朝体 12pt) (1 行あける) Taro DENNETSU (英文著者名 : Times New Roman 10pt) Dept. of Mech. Eng., Dennetsu Univ., 1-2, Ohtemachi, Toyama 930-0084 (1 行あける) (文頭に半角スペース 5 つを挿入する) English abstract (英文アブストラクト : Times New Roman 10pt, 100 語程度) (1 行あける) Key Words : Heat Transfer (英文キーワード : Times New Roman 9pt, 3~5 個程度) (1 行あける)</p>
--

表題部分の書式

本文の書式: 第 1 ページで, 本文は 9 ポイント明朝体の 2 段組 (片側 1 行 26 文字程度) で作成して下さい。第 2 ページ以下では, 先頭から 2 段組とし, 片側 60 行を目安として作成して下さい。

図表: 図表中の記号およびキャプションは英語で書いて下さい。なお, 電子版原稿はカラー表示が可能ですが, オフセット印刷版原稿は白黒で印刷されます。

参考文献: 参考文献は, 本文中の引用箇所の右肩に小括弧をつけた番号⁽¹⁾で表し, 本文の末尾に次のようにまとめて列記して下さい。

(番号) 著者名, 雑誌略称, 巻-号(発行年), 先頭ページ番号。

例 : (1) 伝熱・他 2 名, 機論(B), 12-345(2006), 1234.

PDF ファイルへの変換: PDF ファイル作成のためのファイル変換時には, 「フォントの埋め込みを行う」よう設定して下さい。変換後の PDF 原稿は, 提出前に, 必ず, 印刷したものを確認して下さい。

【講演論文の公開日】

- 講演論文は, 会員を対象に, シンポジウム開催日の 1 週間程前からウェブ上で公開します。したがって, 特許に関わる公知日はシンポジウム開催日よりも早くなりますので, ご注意ください。

【参加費等の支払い方法】

- シンポジウムのホームページから事前参加登録を行った後に, 本誌に挟み込まれた「払込取扱票」を用い, 以下の記入例を参考にしてお支払い下さい。
- 払込みをもって「事前申込完了」とします。ホームページからの登録だけでは「完了」ではありません。払込みが平成 24 年 4 月 14 日以降になった場合は当日登録扱いとし, 会場受付にて差額をお支払いいただきます。
- 銀行より振込まれる場合は, 下記のゆうちょ銀行口座にお振込み下さい。その際, 必ず 1 件ずつとし, 氏名の前に参加登録 ID 番号を付けて下さい。

店名 (店番) : ○七九 (ゼロナナキュウ) 店 (079)

預金種目 : 当座

口座番号 : 0108512

口座名称 (漢字) : 第 49 回日本伝熱シンポジウム実行委員会

口座名称 (カナ) : ダイヨンジュウキュウカイニホンデンネツシンポジウムジッコウイインカイ

- 記入例 -

登録IDは参加申込時に発行される「4桁の数字(予定)」です。

お支払いいただく項目を○で囲んで下さい。

振込手数料はご負担下さい。

「通信欄」の合計金額をこちらにご記入下さい。

払込取扱票		振替払込請求書兼受領証	
口座記号・番号はお間違えないよう記入してください。		口座記号・番号はお間違えないよう記入してください。	
00	00750	1	108512
金額		金額	
34000		34000	
加入者名 第49回日本伝熱シンポジウム実行委員会		加入者名 第49回日本伝熱シンポジウム実行委員会	
参加登録ID 0001		参加登録ID 0001	
参加者氏名 伝熱 太郎		参加者氏名 伝熱太郎 (伝熱大学)	
内容(該当に○) シンポ(懇親会)		内容(該当に○) シンポ(懇親会)	
金額 20,000円		金額 20,000円	
0002		0002	
岡山 花子		岡山 花子	
シンポ(懇親会)		シンポ(懇親会)	
金額 9,000円		金額 9,000円	
0003		0003	
富山 二郎		富山 二郎	
シンポ(懇親会)		シンポ(懇親会)	
金額 5,000円		金額 5,000円	
事前払込×切: 4月13日(金)		事前払込×切: 4月13日(金)	
合計金額 34,000円		合計金額 34,000円	
富山県富山市〇〇〇△△△ 伝熱大学 工学部 伝熱工学科		富山県富山市〇〇〇△△△ 伝熱大学 工学部 伝熱工学科	
伝熱 太郎		伝熱太郎 (伝熱大学)	
代表者の方のお名前をご記入下さい		代表者の方のお名前をご記入下さい	

1枚の用紙で複数の参加者の登録が可能です。本登録の代表者の方のご所属の連絡先・お名前・電話番号を「ご依頼人」の欄にご記入下さい。

【ご注意】

- ・ 講演申込みの取消および講演論文原稿の差替えは、シンポジウムの準備と運営に支障をきたしますのでご遠慮ください。
- ・ 論文題目と著者名が、講演申込み時と論文提出時で相違しないように特にご注意ください。
- ・ 口頭発表用として実行委員会事務局が準備する機器は、原則として液晶プロジェクタのみとさせていただきます。パーソナルコンピュータは各自ご持参ください。
- ・ 参加費、懇親会費等は参加取消しの場合でも返金いたしません。
- ・ 本シンポジウムに関する最新情報については、随時更新するホームページでご確認ください。
- ・ その他、ご不明な点がありましたら、実行委員会事務局までE-mailまたはFAXでお問い合わせください。

【お問い合わせ先】

第49回日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局
 富山県立大学 工学部 機械システム工学科
 機械エネルギー工学講座内
 E-mail: nhts49@ml.pu-toyama.ac.jp
 FAX: 0766-56-6131

優秀プレゼンテーション賞（第49回日本伝熱シンポジウム）について

日本伝熱学会 学生会委員会
委員長 齊藤卓志

第49回日本伝熱シンポジウムでは、下記の要領で、学生および若手研究者を対象とした優秀プレゼンテーション賞セッションを設けます。日頃の研鑽の成果を披露するチャンスとして、奮ってご応募下さい。

- 開 催 日：平成24年5月30日（水） シンポジウム第1日
- 発 表 形 式：発表者1名あたり3分程度のショートプレゼンテーションと60分程度のポスタープレゼンテーションを行う形式をとる予定です。詳細については、決定し次第、シンポジウムのホームページに掲載いたします。
- 対 象：企業・大学・研究機関等の技術者・研究者で、平成24年3月31日現在で28歳以下の者、または、申込当日に学生である者（ただし、社会人大学院生を除く）。
- 応 募 資 格：発表時（審査時）に、日本伝熱学会の会員（正員・学生員）であること、または入会申込中であること。なお、本セッションで発表する方は、応募資格を必ず満たす必要があります。また、過去に本賞を受賞された方は応募することはできません。
- 応 募 件 数：指導教員または研究グループ長等あたり、1名（1件）とします。
- 応 募 方 法：第49回日本伝熱シンポジウム発表申込時に、本号掲載の研究発表申込方法に従って、“優秀プレゼンテーション賞”の項目を選択し、“指導教員または研究グループ長等の所属・氏名・電子メールアドレス”を入力してください。なお、講演論文原稿の様式については一般セッションと同様のものとします。
- 審査・選考方法：複数名の審査員による評価に基づいて選考し、受賞者を決定します。
- 表 彰：受賞者はシンポジウム第2日の学会総会で表彰されます。

日本伝熱学会主催 第3回 国際伝熱フォーラム
International Forum on Heat Transfer (IFHT2012)

趣旨

日本伝熱学会は、世界最大かつ最もアクティブな伝熱の研究者・技術者集団として、世界中の研究者が集い、新しい伝熱研究のトレンドを生み出す国際伝熱フォーラムを開催します。2004年に京都でフォーラムがスタートし、2008年には東京で第2回のフォーラムが開催され、毎回150件を超える発表で盛り上がりを見せています。第3回は、2012年に長崎でエネルギーをテーマとしてフォーラムを開催します。エネルギー分野の最先端を走る研究者によるキーノート講演、今回新たに国際賞として設立された抜山記念賞の受賞者発表と講演が企画されています。一般セッションでは伝熱の広い分野から発表を募集します。多くの方々のご発表及びご参加をお願い致します。

開催日時・場所 2012年11月13日(火)～15日(木)・長崎ブリックホール
参加費 (事前申込み8月31日締切) 一般：50,000円, 学生30,000円
(当日申込み) 一般：60,000円, 学生40,000円

キーノート講演 (予定)

Gang Chen	Massachusetts Institute of Technology, USA
Takemi Chikahisa	Hokkaido University, Japan
Sung Jin Kim	Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea
Kim Choon Ng	National University of Singapore, Singapore
Mamoru Tanahashi	Tokyo Institute of Technology, Japan
Peng Zhang	Shanghai Jiao Tong University, China

フォーラム構成

- ・キーノート講演
- ・ポスターセッション (150件を予定：ショットガン形式の口頭発表+ポスター)
- ・The Nukiyama Memorial Award (公募締切：2012年1月31日) 贈呈式ならびに受賞講演

スケジュール

2012年	2月29日(水)	ショートアブストラクトの締切
	3月31日(土)	講演要旨の受理通知
	7月31日(火)	印刷用原稿の締切 (2～6ページ)
	8月31日(金)	事前参加申込締切

ホームページ <http://www.ifht2012.com>

問い合わせ先 組織委員会委員長 高田 保之
〒819-0395 福岡市西区元岡 744
九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門
Tel: 092-802-3100, FAX: 092-802-3098 E-mail: takata@mech.kyushu-u.ac.jp
実行委員会委員長 宮崎 康次
〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1
九州工業大学 大学院工学研究院 機械知能工学研究系
Tel&FAX: 093-884-3168 E-mail: miyazaki@mech.kyutech.ac.jp



編集出版部会からのお知らせ —各種行事・広告などの掲載について—



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

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

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

【連絡先】

- ・総務部会長：大久保英敏（玉川大学）：ohkubo@eng.tamagawa.ac.jp
- ・編集出版部会長：高松洋（九州大学）：takamatsu@mech.kyushu-u.ac.jp
- ・広報委員会委員長：津島将司（東京工業大学）：tsushima@mech.titech.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐評議員：党超鋌（東京大学）：dangcb@k.u-tokyo.ac.jp
- ・事務局：倉水裕子：office@htsj.or.jp

【注意】

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

事務局からの連絡

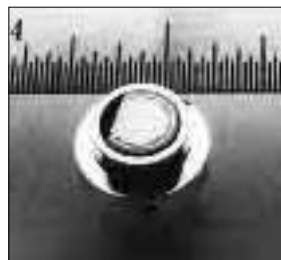
第 50 期入会 (2011.8.15~2011.10.27) 正 4 名・学生 2 名

資	氏 名	所 属	資	氏 名	所 属
学	高橋 佑弥	東北大学大学院工学研究科	正	月山 陽介	新潟大学
正	神保 淳	(株) インダストリアル・ヒス・インターナショナル	正	北岡 徹	ヤンマーエネルギーシステム株式会社
学	小針 達也	東北大学大学院工学研究科	正	北 英紀	独立行政法人産業技術総合研究所

熱流束センサー

熱流束センサーは、熱エネルギーの移動密度 (W/cm^2) に比例した直流電圧を出力します。弊社の製品は米国バージニア工科大学が開発した新しい技術をVatell社で商品化したもので、大変手軽に高速・高精度で熱流量の測定をすることができます。特に応答速度の早いこと、センサーからの出力レベルが高いことが特徴で、熱流束マイクロセンサー (HFM) では、応答速度最高6マイクロ秒を達成しています。

熱流束マイクロセンサー



特徴

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

使用例

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

ガードン型円形フォイルセンサー



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

使用例

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

シート状熱流束センサー



センサーは銅とニッケルのサーモパイルから構成されており、測定対象物に貼付けて使います。センサーは厚さが0.2mmと薄いので、柔軟性に富んでおり、直径1インチの円筒形に湾曲させる事が出来ますので、パイプなどに貼り付けてお使いになるには最適です。

使用例

- 電気・電子機器内の発熱・放熱状態測定
- 熱交換器の効率測定
- パイプの放熱状況測定

熱流束センサー 校正サービス

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

センサテクノ株式会社

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

URL www.senstech.jp

E-mail senstech@td6.so-net.ne.jp



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

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

CAPTEC 社(フランス)

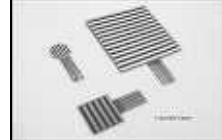
CAPTEC(キャプテック)社は、独自の高度技術により、低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化しても感度は常に一定で、熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。
輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

熱流束センサー



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

輻射センサー



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

MEDTHERM 社(アメリカ)

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

熱流計/輻射計



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

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

*応答速度は、熱流束レンジによって異なります。

超高速応答同軸熱電対

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



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

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

ITI 社(アメリカ)

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

高温用熱流板



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

水冷式 火災強度熱流計



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

当社取扱製品の適用分野

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

有限会社 テクノオフィス

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

編集出版部会ノート Note from the Editorial Board

本号は50周年記念特集号の第3弾です。11月26日に執り行われた50周年記念式典の報告等は次号掲載となりますが、当日の配布用に作成された「日本伝熱学会半世紀の歩み」を本号に掲載しておりますので、会員の皆様にはこれをご覧になり50年の歴史を振り返っていただければ幸いです。また、9月30日の50周年記念伝熱セミナーでお話いただいた中山恒先生には伝熱機器50年の進展、庄司正弘先生には沸騰研究の50年と題してご寄稿いただきました。さらに、柘植綾夫先生からは、これから求められる人材像とその育成についてのご意見をいただきました。研究だけでなく教育も学会のメンバーの大部分が責任を負う最も重要な問題のひとつでありますので、じっくりお読みいただければと思います。

前号に引き続き私事で恐縮ですが、父親が心不全で倒れ、50周年記念伝熱セミナーへの出席を急遽取りやめざるを得なくなりました。幸い、ペースメーカーのおかげで今はほぼ元通りの生活に戻っていますが、病床で譫妄がひどくなった際には、教育の大切さ、結果を性急に求めない覚悟など、教育論をひたすら宙に向かって語っていました。教育において最も重要なことは、この熱意であることを改めて感じた次第です。しかし、以前よりずっと気になっていたことがあります。それは、いろんな場で様々な方が教育の内容や方法について批評あるいは提案されているのを耳にしますが、そのご本人の受けてきた教育と、その結果として存在する今のご自分の評価を明らかにされていない場合が結構あることです。もちろん、時代は進化し求められるものも変わってくるでしょうが、将来のことを考えるためには、まず、これまでの総括が重要だと思います。50周年記念特集は残すところあと1号です。

高松 洋 (九州大学)

Hiroshi Takamatsu (Kyushu University)
e-mail: takamatsu@mech.kyushu-u.ac.jp

副会長 岡崎 健 (東京工業大学)	部会長 高松 洋 (九州大学)
委員	
(理事) 加藤泰生 (山口大学)	坂下弘人 (北海道大学)
田川正人 (名古屋工業大学)	西村伸也 (大阪市立大学)
安田俊彦 (日立造船)	
(評議員) 小原 拓 (東北大学)	木下 泉 (電力中央研究所)
藏田耕作 (九州大学)	伏信一慶 (東京工業大学)
上野一郎 (東京理科大学)	梅川尚嗣 (関西大学)
奥山正明 (山形大学)	佐々木直栄 (日本大学)
佐藤恒之 (秋田工業高専)	野村信福 (愛媛大学)
堀部明彦 (岡山大学)	森 昌司 (横浜国立大学)
TSE チーフエディター 門出政則 (佐賀大学)	
編集幹事 石田賢治 (佐賀大学)	

編集出版事務局：

九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門 高松 洋
〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地
Tel&Fax: 092-802-3123, takamatsu@mech.kyushu-u.ac.jp