

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. 50, No. 213
2011. 10

HSTJ

◆特集：創立50周年を迎えて

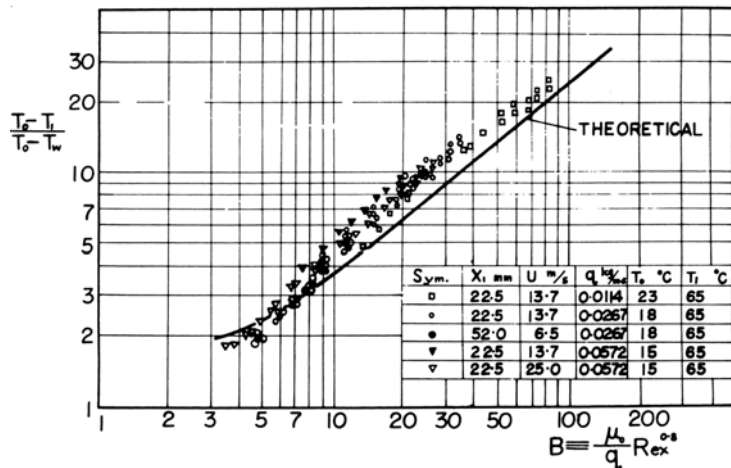


FIG. 12 - ADIABATIC WALL TEMPERATURES FOR FILM COOLING.

Max Jakob 賞受賞者アーカイブ：西脇 仁一教授

Max Jakob Memorial Award Archive : Professor Niichi Nishiwaki

4. Conclusions

Velocity and temperature measurements were made in the boundary layer on a flat plate covered by air film. The coolant air was injected from the preceded porous section. Based on those measurements, a theoretical equation for the effectiveness of film cooling was derived by approximating the velocity and temperature profile with simple curves.

The theoretical equation for the effectiveness of film cooling in turbulent region is

$$\frac{T_0 - T_1}{T_0 - T_w} = 0.0877B(16 - 11m\delta)m\delta$$

Where $m\delta$ is a root of the next equation:

$$(m\delta)^3 - 1.5(m\delta)^2 + 0.0417 + \frac{1.14}{B} = 0 \quad 0 < m\delta < 1$$

$$B \equiv \left(\frac{\mu_0}{q}\right) \cdot Re_x^{0.8}$$

The measured adiabatic wall temperature well agreed with this theoretical result.

【Niichi Nishiwaki, Masaaru Hirata and Akira Tsuchida, "Heat Transfer on a Surface Covered by Cold Air Film," Proc. Int. Heat Transfer Conference, Part IV, 1961, pp. 675-681. より抜粋】



Max Jakob 賞盾

東京大学名誉教授西脇仁一先生が1979年度Max Jakob 賞を受賞された。この賞は、米国機械学会の伝熱分科会(ASME Heat Transfer Division)の中に設けられた選考委員会が推薦した候補者に、ASMEが贈るものであるが、1961年度に米国ミネソタ大学のE. R. G Eckert教授を選んで以来、国際的視野で授賞してきているので、伝熱学分野では最高の権威のある賞と言えよう。西脇先生に心からのお祝いを申し上げますと同時に、日本の伝熱学界の、世界に対する貢献が認められたものとして、広く日本伝熱学会の皆様とも喜びを分かちたい。(以下、省略)

【平田賢, 「西脇仁一先生のMax Jakob 賞受賞を祝して」, 伝熱研究, Vol. 19, No. 72, pp.1-3.より抜粋】

笠木 伸英 (東京大学)

Nobuhide KASAGI (The University of Tokyo)

伝 熱

目 次

〈追悼 藤井哲先生〉

学問一筋に生きられた藤井哲先生との思い出

| | | |
|--|--|---|
|上原 春男 (NPO 法人海洋温度差発電推進機構) | 1 | |
| Tetsu Fujii – Personal reflections | John Rose (University of London) | 4 |

〈特集：創立 50 周年を迎えて〉

| | | |
|--------------------|--------------------------------------|----|
| 凝縮熱伝達の 50 年 | 本田 博司 (元九州大学) | 5 |
| 自然対流伝熱研究 50 年の回顧 |尾添 紘之 (元九州大学), 岩本 光生 (大分大学) | |
| | 平野 博之 (岡山理科大学), 田川 俊夫 (首都大学東京) | |
| | 桑木 賢也 (岡山理科大学), 金田 昌之 (大阪府立大学) | 15 |
| 原子力発電プラントと伝熱 | 成合 英樹 (筑波大学) | 28 |

〈プロジェクトQ〉

| | | |
|----------------------|-----------------------|----|
| エコキュートの開発・誕生秘話 | 斎川 路之 (電力中央研究所) | 36 |
|----------------------|-----------------------|----|

〈海外レター〉

| | | |
|------------------------------|---------------------|----|
| Edinburgh 大学での長期滞在レポート | 濱本 芳徳 (九州大学) | 41 |
| ミネソタ大での研究滞在記 | 森 昌司 (横浜国立大学) | 43 |

〈巻頭グラビア〉

| | | |
|-----------------------------------|--------------------|-----|
| Max Jakob 賞受賞者アーカイブ：西脇 仁一教授 | 笠木 伸英 (東京大学) | 表紙裏 |
|-----------------------------------|--------------------|-----|

〈行事カレンダー〉

45

〈お知らせ〉

| | |
|--|----|
| 平成 23 年度日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞候補者推薦募集のお知らせ | 47 |
| 創立 50 周年記念講演会と記念式典のお知らせ | 51 |
| 第 49 回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集 | 52 |
| 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 | 54 |
| 日本伝熱学会主催 第 3 回 国際伝熱フォーラム | 55 |
| 編集出版部会からのお知らせ | 56 |
| 編集出版部会ノート | 61 |

CONTENTS

<Memorial>

Memory of Professor Tetsu Fujii
Haruo UEHARA (Organization for the Promotion of Ocean Thermal Energy Conversion) 1
Tetsu Fujii – Personal reflections
John Rose (University of London) 4

<Special Issue>

A Review of Japanese Research on Condensation Heat Transfer
Hiroshi HONDA (Formerly Kyushu University) 5
Review on natural convection studies in these 50 years
Hiroyuki OZOE¹, Mitsuo IWAMOTO², Hiroyuki HIRANO³, Toshio TAGAWA⁴,
Kenya KUWAGI³, Masayuki KANEDA⁵
(1 Formerly Kyushu University, 2 Oita University, 3 Okayama University of Science,
4 Tokyo Metropolitan University, 5 Osaka Prefecture University) 15
Nuclear Power Plants and Heat Transfer
Hideki NARIAI (University of Tsukuba) 28

<Project Q>

Development of Eco-cute
Michiyuki SAIKAWA (CRIEPI) 36

<International Letter>

A Report on a Visiting in the University of Edinburgh
Yoshinori HAMAMOTO (Kyushu University) 41
Research experiences of bio transport at University of Minnesota
Shoji MORI (Yokohama National University) 43

<Opening-page Gravure:heat-page>

Max Jakob Memorial Award Archive : Professor Niichi Nishiwaki
Nobuhide KASAGI (The University of Tokyo) Opening Page

<Calendar> 45
<Announcements> 47
<Note from the Editorial Board> 61

学問一筋に生きられた藤井哲先生との思い出

Memory of Professor Tetsu Fujii

上原 春男 (NPO 法人海洋温度差発電推進機構)

Haruo UEHARA (Organization for the Promotion of Ocean Thermal Energy Conversion)

e-mail: uehara@opotec.jp

私の敬愛する藤井哲先生が、2011年3月21日15時に永眠された。先生のご息女である俊子さんから「父が亡くなりました。父の遺言により葬儀は身内のみで行いますので、誰にも知らせないでください。」という連絡があった。私は、「分かりました。先生の遺志を尊重して、私たちはお邪魔しませんので、皆様によろしくお伝えください。」と言って電話を切った。途端に私の目からは涙が止めどもなく流れ落ち、全身の力が抜けてしまった。

藤井先生が体調を崩され、かなり危険な状態であることを俊子さんからの連絡で知り、私たち夫婦と佐賀大学の池上康之准教授は、2月19日に先生が入院されていた福岡の病院へお見舞いに伺った。

病室に入ると、先生はかなりやせられていて、もう言葉が十分に出ない状態であった。私はびっくりして先生の手を握ると、先生は私の手をしっかり握り返してこられた。私は、「長い間お世話になりながら、何のお返しもできず申し訳ありません。先生は必ず回復されますよ。」と言った。先生は、奥様がお持ちの文字盤を見られ、それを奥様が指されて、「ありがとう」と言われた。そして、しばらくすると「疲れた」と合図され、休まれた。私たちは、静かに病室を後にした。

私たちは廊下に出て、ご家族に「何事にも冷静に立ち向かわれる先生ですから、きっと回復されます。」と伝えたが、奥様は「今回はもうだめでしょう。自分の死後は葬儀や追悼式は一切しないでほしいと主人が言っておりますので、その意思に従うことをご了承ください。」と言われた。

本来私には藤井先生が亡くなったことを各方面に連絡する責務があったが、このような事情で、本田博司氏（九州大学名誉教授）以外にはお知らせしなかった。会員の皆様には大変申し訳なく、お詫びを申し上げます。どうか先生の遺志をお酌み取りいただき、ご容赦いただきたく存じます。



九州大学退官時の藤井先生（1995年）

私自身も納得したつもりであったが、遺言とはいえ葬儀に参列して直接お別れをいうことができず、何とも言えない寂しさだけが残っている。しかしながら、葬儀を行わないというのは、まさに藤井先生らしい最期であった。そして今回九州大学の高松洋氏から追悼文の依頼があったが、追悼文では先生の遺志に反すると思い、先生との研究生生活を振り返りながら、思い出を綴ることにした。

私にとって藤井先生は、まさに恩師であり、私の人生そのものであった。また、先生は私の良き理解者でいてくださった。私は、若い時から権威主義者というものにかかなり対抗心を持っていたので、他の教授達との間で激しい議論になることが多かった。しかし、先生はいつも私の味方で、「君は間違っていない。相手がおかしいよ。」とかばってくださった。私を信じ応援してくださる先生に支えられ、私は今日まで頑張ってきたのだと

思う。

藤井先生の母校は、旧制山口高校（現山口大学）で、かくいう私も山口大学出身である。藤井先生は、私の大学の恩師の下瀬教授の弟子で、私の兄弟子にあたる。そして私と藤井先生との出会いは、藤井先生が下瀬先生の所へ助手募集にいらっしやった時の昭和37年まで遡る。私は下瀬先生から、「藤井先生はとても優秀な人で、素晴らしい実績がある若手の学者だよ。藤井君の助手をやってみないか。」と勧められた。しかし、私は当時別の大学の大学院に入って「核融合」の研究をするつもりだったので、一旦はお断りした。

その後、第一希望の大学院を受験したが合格できなかったもので、第2希望の大学院を受験すべく、推薦状をいただきに下瀬先生を訪ねたところ、「上原君、その大学の大学院に行くより、藤井先生の助手になりなさい。藤井君は、君の面倒を全面的にみるといつてきたのだよ。」と言われた。そこで私は、その翌日九州大学の藤井先生を訪ね、面接を受けた。

藤井先生は、極めて民主的な人で革新的な思想の持ち主であった。「研究者同士は年齢に関係なく対等で、年下の人を君づけで呼ぶべきではない」と、私を「上原さん」と呼ばれた。そして、先生は「僕は君の研究には一切口出ししないよ。自分の好きにやっついていいよ。」と言われた。私はそれを聞いて、「なんと素晴らしい人だろう。先生こそ真の学者だ。」と思った。私は迷うことなく「よろしくお願ひします。」と頭を下げ、藤井先生の助手となる決心をした。昭和38年4月1日から実に半世紀近くにわたって、私は藤井先生から指導を受けたが、一度たりとも私の研究に口を挟まれることなく、温かく見守っていただいた。

私は、九州大学に赴任した昭和38年からしばらくの間、核融合の研究をすべく文献を探しては独り読んでいた。その頃、藤井先生は九州大学に建設された大型実験装置で「超臨界圧流体の熱伝達」の実験を朝早くから夜遅くまで行われていた。その忙しさの中でも、朝と夕方は私のところに必ず立ち寄って、「どう？何か分かった？」と声をかけてくださった。

なにしろ、核融合の研究をやっている人は九州大学に誰もいなかったもので、私は日に日に焦りだして憂鬱な日々を過ごしていた。そんなある日、

先生がいらっしやって、「上原さん、今度九大にも電子計算機が入るから、電子計算機で微分方程式を解いてみない？」と言われ、先生が発表された『水平の線熱源および点熱源における自然対流』の論文をポンと机の上に置いて行かれた。早速私はこの論文を読み、その数値解析に取り組んだ。この研究で、私は自分の目的の研究を置き去りにして、知らず知らずのうちに先生の研究分野に引き込まれていった。こうして先生との自然対流の研究が本格的に始まった。

その後、自然対流の研究チームには、竹内正紀氏（福井大学名誉教授）など、多くの研究者が加わり、数多くの論文を発表された。この研究の過程でも、先生はいつものように静かに見守ってくださった。時々私たちが行き詰っているのを見ると、実に的確な指示で解決の方向に導いてくださった。

私たちが研究成果を持って先生の研究室を訪ねると、一目見るなり、「すばらしい結果だ。早速論文を書き上げよう。」と言って、即座に論文の作成に取り掛かれた。その集中力とスピードはすさまじく、ほとんど休むことなく進められた。私の記憶では、年に5~6編のペースであったと思う。当時はパソコンなど無く、すべて図面は手書きであったので、驚異的スピードであった。これらの研究によって、藤井先生は「自然対流の藤井哲」として、不動の地位を築かれた。1970年のInternational Journal of Heat and Mass Transferに掲載された34ページの論文は、伝熱工学の歴史に残るものであると思っている。この論文によって、先生は日本機械学会賞を受賞された。

1967年（昭和42年）のある日、突然先生から話があるから部屋に来てほしいと言われた。部屋に入ると、「上原さん、今度新しいテーマに取り組んでみようと思うが、どう思う？」と尋ねられた。どんなテーマですかと聞くと、「復水器の研究をやると思う。この分野はほとんど研究されていないようだ。誰にやってもらおうかと考えているところだよ。」と言われて、私は即座に「私にやらせてください。」と言った。これが藤井先生と私との「凝縮熱伝達」の研究の始まりであり、苦難の始まりでもあった。

藤井先生は、私にテーマを与えられたが、しばらくは具体的な指示を出されることは無かった。

私は、凝縮関係の論文や伝熱工学のテキストの凝縮部分を読みあさった。しかし、1916年にドイツ人の Wilhelm Nusselt が書いた凝縮の論文にすべてが網羅されていて、どこにも研究の課題は見つからなかった。このことを先生に伝えると、「どこから手をつけるかね。」と考え込まれた。

そんなある日、先生が唐突に「上原さん、発電所と同じ条件で実験できる実験装置を作ろう。予算は研究所長に掛け合ってくるから。」と言われた。そして、数か月後、先生の働きかけにより、当時としては大きな予算が文科省からつくことになった。私たちは早速、実験装置の設計・製作を開始した。それが、その後多くの研究成果を生むことになる「低圧水蒸気凝縮の実験装置」(1967年)である。この装置の系内圧力は、実機の復水器と同じ 0.0019MPa と極めて低い真空状態にしないといけないので、空気の漏れを防ぎ、全管群の表面を膜状凝縮にするのに苦労した。

実験は、週2回徹夜をしながら行った。徹夜のたびに先生は実験の様子を見に来られて、「大丈夫か、無理するなよ。」と優しく言われた。実験をしながら、人間は立ったまま寝言を言うこともできるのだと知った。今思うと、どうしてあんな無茶な実験をしたのかと思う。当時は、世界に誇れる正確なデータを取らなければという思いで、研究員や学生達と必死に頑張った。これらの実験の結果は、藤井先生と私たちによって次々に論文として発表された。そして今では、これらの結果が実機の設計に利用されている。かくて藤井先生は、凝縮の分野でも「凝縮の藤井哲」の名を後世に残すことになった。

私は、これらの凝縮熱伝達の論文によって、藤

井先生の主査第1号の博士号を授与された。その頃、私はいくつかの大学から助教授としてお誘いを受けていたので、先生にアドバイスをいただき、1973年4月に佐賀大学で教鞭をとることになった。その後も先生とはしばしば連絡を取り合い、多くの教示をいただいた。

今でも忘れ得ぬ一日がある。ご息女の俊子さんが、佐賀大学の博士課程で研究されていた頃、学位論文を私が指導していたのであるが、研究に関して妥協を許さない先生と、解析結果について意見が合わず、かなり議論を重ねていた。最終的にその是非を実験で確かめることになり、2004年の正月に伊万里市の佐賀大学の研究センターに3人が集まった。それぞれの主張する結果を得ることが目的であったのに、先生と私は実験自体に夢中になり、二人とも45年前の若い頃を思い出してはしゃいでしまった。久しぶりに研究者として共に過ごしたあの日が、かけがえのない思い出となった。

藤井先生の学問への情熱は、終生失われることはなかった。入退院を繰り返される中でも、2005年には歴史的な「膜状凝縮熱伝達」を著わされた。あの時の学問に対する取り組み方、考え方、態度を見習うべきと思うが、私は到底及ぶものではない。

温かいまなざしと優しさをお持ちであった先生を永遠に失った悲しみは、言葉にすることができない。藤井先生、長い間大変ご苦労様でした。私たちを導いてくださり、本当にありがとうございました。先生と出会うことができ私は本当に幸せでした。心より感謝を申し上げます。どうか安らかに眠りください。

Tetsu Fujii – Personal reflections

John Rose (University of London)

e-mail: j.w.rose@qmul.ac.uk

It was with great sadness that I learned of the death of my long-time colleague and friend, Professor Tetsu Fujii. Over the past 40 years, dating from the international heat transfer conferences in Paris and Tokyo, we have met continually in Japan, China, UK, USA and elsewhere. During this time our common research interests in fundamental aspects of natural convection and condensation heat transfer developed into a bond of friendship. I became more closely acquainted with Tetsu in 1986 when I visited Kyushu University having been invited by Professor Ichiro Tanasawa to spend some months in Japan, under the auspices of JSPS. Professor Fujii was director of the Institute of Advanced Material Sciences of Kyushu University at that time. My wife, daughter and I remember well his and his wife Hiroko's kindness. A particularly memorable occasion was when Tetsu and several of his colleagues took us to Mount Aso. Setting out in warm spring sunshine we were all ill equipped for the bitterly cold conditions at the summit.

I have always regarded Professor Fujii as a true scholar and have sought his advice on many occasions, not only on technical matters. Others, I am sure, will write of his many prestigious accomplishments and honours. I was particularly impressed by his fundamental approach to scientific problems together with his detailed and clearly expressed descriptions of both experimental and theoretical work as exemplified by his book *Theory of Laminar Film Condensation* and by a short paper "Overlooked factors and unsolved problems in experimental research on condensation heat transfer" *Experimental Thermal and Fluid Science* **5**, 652-663. The former treats the problem with great clarity and in exhaustive detail. An aspect of the latter, of particular interest to me, was

that "mixed mean temperature" cannot be measured accurately in transition flow. I had encountered this problem in my PhD work on dropwise condensation many years before.

It is through Tetsu Fujii and Ichiro Tanasawa that I came to know many of their colleagues, associates and former students. I am glad to say that I am still in close contact with many of them and visit Japan as frequently as I can and always receive a warm welcome.

It has been an honour and privilege to have known Tetsu over many years. He will be sadly missed by his colleagues and friends as well as by the worldwide heat transfer community. His wife and family have my sincere condolences.



The Great Wall, China, October 1985 – with Professor and Mrs Fujii

凝縮熱伝達の 50 年

A Review of Japanese Research on Condensation Heat Transfer

本田 博司 (元九州大学)

Hiroshi HONDA (Formerly Kyushu University)

e-mail: hhonda@pb4.so-net.ne.jp

1. はじめに

凝縮は逆方向の相変化現象である沸騰に比べて伝統的に研究者が少ない。これは、膜状凝縮に関してはすでに 1916 年に Nusselt⁽¹⁾の理論が発表され、それが実用的にも有用であったことと、沸騰における限界熱流束のように、伝熱装置の安全性に決定的に重要な現象が凝縮にはないことが主な原因であると考えられる。とはいえ、各種の動力・化学プラント、空調機には蒸発器と凝縮器が対になって使用されるので、凝縮に関しても現象の解明や機器の高性能化をめざした研究が数多く行われてきた。本報では、この 50 年間に日本で行われた凝縮熱伝達に関する研究を概観する。引用文献の選択は Web of Science, Scopus および手持ちの資料によったが、筆者の手落ちにより重要な研究の見落としがあるかもしれない。前もってお断りしておきたい。

2. 膜状凝縮

2.1 純蒸気の鉛直平板上の凝縮

Nusselt⁽¹⁾は鉛直平板上および水平円管上の静止純蒸気の層流膜状凝縮について理論解析を行い、熱伝達率の解析解を得た。この理論は多くの仮定を含んでおり、その後この理論で考慮されていない諸要因を考慮した解析が多数発表された。最も影響の大きい要因は、蒸気流によるせん断力と液膜流の層流からの逸脱である。Fujii-Uehara⁽²⁾は鉛直下向きの蒸気流が存在する場合の層流膜状凝縮の二相境界層方程式を積分法によって解き、平均熱伝達率について次の近似式を得た。

$$\frac{Nu_m}{Re_L^{1/2}} = \left\{ 0.790 \left(\frac{Pr_l}{FrH} \right) + 0.656 \left(1.20 + \frac{Pr_l}{RH} \right)^{4/3} \right\}^{1/4} \quad (1)$$

ここに Nu_m は平均ヌセルト数、 Pr_l は液のプラントル数、 R は $\rho\mu$ 比、 H は顕微熱比、 Re_L は二相レイノルズ数、 Fr はフルード数である。この式は体積力対流凝縮に対する Nusselt⁽¹⁾の解と強制対流凝縮の解とを滑らかにつなぐ簡明な形になっている。

平板上の凝縮液膜は不安定であり、凝縮の進行につれて層流、波状流、乱流へと遷移する。熱伝達率

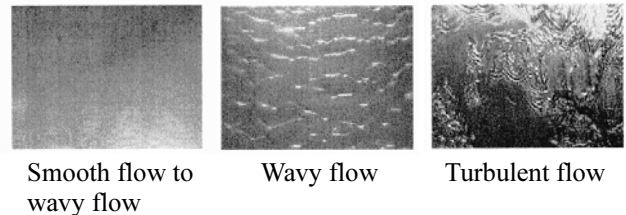


Fig. 1 Condensate flow pattern on a vertical flat plate⁽³⁾

は凝縮液流量の増大につれてはじめは減少し、乱流域になると増大する。上原らは鉛直平板上の静止蒸気の凝縮に関する一連の実験を行い、熱伝達率の経験式を得た。図 1 は上原・木下⁽³⁾が高さ 2.98 m の伝熱面を用いて観察した凝縮液の流動様相を示す。

流動様相の遷移は、液膜上の微小擾乱が次第に増幅することによって起こる。Stuhlträger ら⁽⁴⁾は鉛直平板上の静止蒸気の凝縮について、Nusselt⁽¹⁾の解を初期条件として二次元非定常流の数値解析を行い、波状流域までの解を得た。Miyara⁽⁵⁾は気液界面条件などを厳密にした数値解析を行った。層流から波状流への遷移膜レイノルズ数は Pr_l が大きいほど小さく、遷移位置の下流では波が急激に発達した。

Nakaoka-Uehara⁽⁶⁾はひだ付鉛直板よりなるプレート凝縮器の実験を行い、熱伝達率の経験式を得た。

2.2 純蒸気の水平管上および水平管群内の凝縮

シェル・チューブ凝縮器内の凝縮は蒸気流速と落下凝縮液の複合効果を受ける。蒸気流速の影響に関して、まず鉛直下降蒸気流を受ける水平管上の凝縮について理論的研究がなされた。Sugawara ら⁽⁷⁾は蒸気流によるせん断力が単相流と同一であると仮定して層流膜状凝縮の数値解を求めた。Fujii ら⁽⁸⁾は蒸気流をポテンシャル流と仮定して層流二相境界層方程式の積分法による数値解析を行い、式(1)と同形の平均熱伝達率の近似式を得た。

水平管上の凝縮におよぼす蒸気流方向の影響に関して、Honda-Fujii⁽⁹⁾は気液界面せん断力を吸い込み効果で近似した理論解析を行った。平均熱伝達率は鉛直下降流から水平流までは変化が小さく、鉛直上昇流で最小となり、減少率は共存対流凝縮領域で最大となった。Honda-Fujii⁽¹⁰⁾は管外蒸気から管内冷却水への複合熱伝達の理論解析を鉛直下降流と水

平流，水と冷媒の組み合わせについて行った．熱伝導率の大きい水の場合，壁面過冷度の周方向変化が蒸気流速の増大につれて顕著になり，平均熱伝達率は一樣壁温の解よりも大幅に低下するのに対して，熱伝導率の小さい冷媒では変化が小さかった．

実験的研究として，Fujii ら⁽¹¹⁾は低圧水蒸気の水平流に直交する水平管上の凝縮実験を行い，熱伝達率は蒸気流速の増大につれて一樣壁温の解よりも低い側にずれることを見出した．Honda ら⁽¹²⁾は冷媒 R113 蒸気の鉛直下降流を受ける水平管上の凝縮実験を行い，液膜流の可視化を行った．凝縮液膜は蒸気流速の増大につれて層流，波状流，乱流に遷移し，熱伝達率は水の場合とは逆に一樣壁温の解よりも高い側にずれることを見出した．

平滑管群内の凝縮に関して，Fujii ら⁽¹³⁾は低圧水蒸気の水平流の基盤目管群および千鳥管群内での凝縮実験を行い，式(1)の無次元量による熱伝達の経験式を得た．藤井・小田⁽¹⁴⁾は上と同一の管群について鉛直下降流および鉛直上昇流の実験を行い，水平流の結果と比較した．下降流と水平流の熱伝達率の差は小さく，上昇流では共存対流域で熱伝達率が顕著に低下した．Honda ら⁽¹⁵⁾は R113 の鉛直下降流の基盤目管群および千鳥管群内での凝縮実験を行い，従来のデータも含めて蒸気流速と凝縮液流量の影響を考慮した熱伝達率の経験式を得た．Shida ら⁽¹⁶⁾は凝縮器管群内の流動・伝熱の有限要素法による解析手法を開発し，小型管群の実験結果と比較して良好な一致を得た．Sato ら⁽¹⁷⁾は既存の計算コードを用いて大型管群内の熱流動解析を行い，管配置の最適化によって 30% の伝熱性能改善を得た．

その他の研究として，Yanadori ら⁽¹⁸⁾は下向き水平円板上の凝縮実験を行い，円盤直径が Taylor 不安定の限界波長の 2 倍のときに熱伝達率が最大なることを見出した．

2.3 純蒸気の管内凝縮

純蒸気の管内凝縮については，液膜内の乱れの構造や水平管における重力と蒸気流せん断力の相互作用，過熱蒸気の凝縮などについて研究された．藤井ら⁽¹⁹⁾は冷媒過熱蒸気の水平管内凝縮に関する実験を行い，過熱蒸気相の熱伝達と液膜の熱伝達に関する経験式を組み合わせた熱伝達の計算法を提案した．Mizushina ら⁽²⁰⁾はベンゼンの過熱蒸気の鉛直管内凝縮実験を上昇流と下降流について行い，蒸気相の熱伝達は膜理論によって説明出来ることを示した．Ueda-Inoue⁽²¹⁾は水蒸気の鉛直下降流および水平流について局所熱伝達率を環状液膜理論の予測値と比較した．そして液膜流の乱流遷移レイノルズ数は単相流よりも大きいことを見出し，このことを考慮した熱伝達率の計算法を提案した．Hashizume ら⁽²²⁾は水平凝縮管の出口における冷媒の過冷度が 10K 以上に達することを見出し，その理論的予測を

行った．原口ら⁽²³⁾は 3 種類の冷媒の水平管内凝縮実験を行い，強制対流凝縮と体積力対流凝縮に対する局所熱伝達率の経験式 Nu_F と Nu_B を組み合わせた形の一般式

$$Nu = (Nu_F^2 + Nu_B^2)^{0.5} \quad (2)$$

を提案した．

2.4 多成分蒸気および空気を含む蒸気の凝縮

復水器の流入蒸気は微量の空気を含むので，凝縮の進行につれて濃縮され，熱伝達率が低下する．蒸留・精留などのプロセス工業では多成分蒸気の凝縮が問題となる．非共沸二成分混合冷媒は沸騰・凝縮の進行につれて平衡温度が単調に変化する．この性質を利用してヒートポンプ・冷凍機にローレンツサイクルを実現し，高性能化を図る研究が行われた．

蒸気中に不凝縮ガスが含まれると，吸い込み効果によって凝縮面近傍に蓄積され，熱伝達率の低下をきたす．多成分混合蒸気の場合には低沸点成分が同様の挙動を示す．この現象の基礎研究として，平板に沿う自由対流および強制対流の層流膜状凝縮に関する積分法による解や相似解が多数発表された．小山ら⁽²⁴⁾は自由対流凝縮について，また藤井ら⁽²⁵⁾は強制対流凝縮について，相似解を近似する連立代数方程式を導き，これを解いて熱・物質伝達率を求める方法を提案した．Fujii ら⁽²⁶⁾は自由対流および強制対流凝縮について，従来提案されている蒸気相の熱・物質伝達率の近似式を比較し評価した．

空気を含む静止蒸気の鉛直平板上の層流膜状凝縮に関して，Mori-Hijikata⁽²⁷⁾は蒸気境界層内での液滴発生を考慮した積分法による理論解析を行った．不凝縮ガスの密度がバルク混合気の密度より小さい場合には，蒸気境界層は上向きに発達し，相似解は存在しない．この場合について土方ら⁽²⁸⁾は数値解析を行い，浮力の絶対値をとれば相似解による平均熱伝達率が使用出来ることを示した．Hijikata ら⁽²⁹⁾は不凝縮ガスを含む蒸気の間二相サーモサイホン内凝縮について二次元の数値解析を行い，ガス充填量が少ないほど半径方向ガス拡散の影響が強くなることを示した．

Mori ら⁽³⁰⁾は密度の大小関係が異なる二種類の蒸気と不凝縮ガスの組み合わせについて，閉空間内に置かれた鉛直平板上の凝縮実験を行い，境界層内の蒸气流方向が供給蒸気の方向と同じ場合には主流中で蒸気とガスの分離が起こり，逆の場合には均質になることを見出した．土方ら⁽³¹⁾は R11/R113 を用いた二相サーモサイホンの運転特性について研究した．低沸点成分の R11 は冷却部に蓄積されて不凝縮部を形成し，その長さが熱流束によって変化することによって定温運転特性が得られた．

相互溶解性の二成分混合蒸気が水平管上で凝縮する際には，液膜内の濃度分布による表面張力の勾

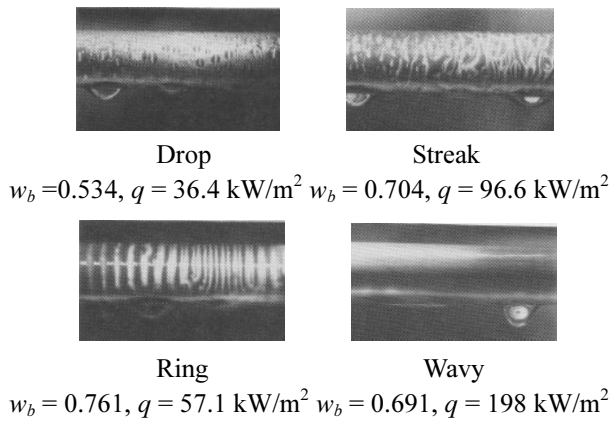


Fig. 2 Condensation modes of ethanol/water mixture on a horizontal tube⁽³⁴⁾. w_b and q denote mass fraction of ethanol and heat flux, respectively.

配によってマランゴニ対流が発生する場合がある。Goto-Fujii⁽³²⁾は空気/R114, R114/R11, R12/R114 の混合気について実験を行い、空気/R114 と表面張力差が小さい R12/R114 では膜状凝縮となるのに対して、表面張力差の大きい R114/R11 ではリング状の液膜パターンが現れ、リングの動きの激しい領域では熱流束が層流の解よりも 30-60 % 高くなることを見出した。藤井ら^{(33),(34)}はこの問題について一連の研究を行った。図 2 はエタノール/水の凝縮モードを示す。蒸気相の拡散抵抗を層流の解で見積もり、液膜の熱伝達率を求めると、その値は二次流れのパターンによって Nusselt⁽¹⁾の解の 1.3-7 倍になることを見出した。宇高・寺地⁽³⁵⁾はエタノール/水の鉛直平板上の凝縮について壁面過冷度 60 K までの実験を行った。凝縮様式は膜状、筋状、滴状、遷移、膜状と変化し、これに対応して熱伝達率は滴状凝縮の凝縮曲線に類似の挙動を示した。Utaka-Nishikawa⁽³⁶⁾はレーザー吸光法を用いて鉛直石英ガラス面上のエタノール/水凝縮液膜の局所厚さを測定し、同時に現象の顕微鏡観察を行った。熱伝達率が極大になる壁面過冷度付近では、液滴による伝熱面掃除後に約 1 μm 厚さの液膜が取り残され、その値は過冷度の増大につれて減少した。

Hijikata ら⁽³⁷⁾は水平面上の二成分系の凝縮についてマランゴニ対流の安定性解析を行い、表面張力が温度とともに増大する場合にのみ擬似滴状凝縮が現れることを示した。

Mochizuki ら⁽³⁸⁾は数種類の非共沸 2 成分混合蒸気の鉛直管内凝縮実験を行い、層流および乱流凝縮熱伝達に関する半理論モデルを提案した。望月ら⁽³⁹⁾は R11/R113 混合蒸気の水平管内凝縮実験を行い、諸量の管軸方向分布を調べた。また凝縮区間の平均熱伝達率の経験式を提案した。Ebisu-Torikoshi⁽⁴⁰⁾は R22 の代替候補である R32, R134a と R32/R134a の水平管内凝縮実験を行い、R32 と R134a の熱伝達率は R22 より高く、R32/R134a は低いことを見出した。

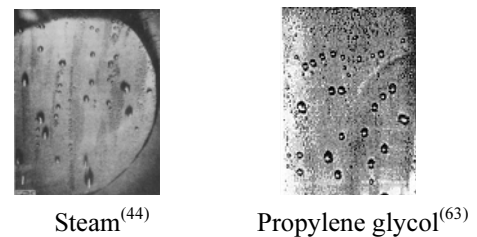


Fig. 3 Dropwise condensation on a vertical surface

Ebisu-Torikoshi⁽⁴¹⁾は R410A の水平管内凝縮実験を行い、局所熱伝達率が従来の経験式と良く合うことを見出した。Afroz ら⁽⁴²⁾は環境保全型の新冷媒 DME と CO₂/DME の水平管内凝縮実験を行い、液膜の熱伝達の式と蒸気相の拡散抵抗の式を組み合わせた伝熱計算法を提案した。

Ogino ら⁽⁴³⁾は水と炭化水素の混合物を鉛直平板、鉛直管、水平管上で凝縮させる実験を行い、その熱伝達率は水と炭化水素が分離して流下すると仮定して Nusselt⁽¹⁾の式より求まる値に近いことを報告した。

3. 滴状凝縮

3.1 水蒸気の滴状凝縮

Schmidt ら⁽⁴⁴⁾はクロムメッキの鉛直円板上で水蒸気を凝縮させる実験を行い、滴状凝縮を観察した。そして、その熱伝達率が膜状凝縮の 4-8 倍に達すると報告した。その後、より正確な測定によって熱伝達率は膜状凝縮の 20-30 倍に達することが明らかになり、高い熱伝達率が得られる滴状凝縮の機構解明と、滴状凝縮の実用化を目指した研究が行われた。高い熱伝達率が得られる原因としては、冷却面上にきわめて薄い液膜が形成され、その厚さが限界値に達すると分裂して液滴を形成するとする説と、液滴間の冷却面上では凝縮は起こらず、熱伝達の大部分は液滴を通して行われるとする説が唱えられた。滴状凝縮を実現する方法としては、オレイン酸等の促進剤の塗布、シリコン樹脂等の撥水材による被覆、金メッキやクロムメッキなどが行われた。

滴状凝縮の実用可能性に関する基礎研究として、Mizushina ら⁽⁴⁵⁾は 7.5 μm 厚さのテフロン被覆をした管としない管上の水蒸気、四塩化炭素、メタノールの凝縮実験を行い、水蒸気とテフロン被覆面の組み合わせだけについて滴状凝縮を観察した。この場合にも、テフロン層の熱抵抗が大きいために熱通過率の増加は 24-53%にとどまった。

滴状凝縮の機構解明を目指した研究として、Sugawara-Katsuta⁽⁴⁶⁾はシリコン樹脂を塗布したガラス面上の凝縮液膜または液滴の変化を干渉顕微鏡で観察し、限界液膜厚さを測定した。Tanasawa-Ochiai⁽⁴⁷⁾は鉛直銅円板上の滴状凝縮に及ぼす蒸气流速、伝熱面傾斜の影響を調べた。また高速度カメラによる撮

影を行い、液滴径分布と離脱限界径および液滴成長速度のデータを得た。棚沢ら⁽⁴⁸⁾は蒸気流速と遠心力を用いて液滴の離脱径を変化させ、熱伝達率は離脱径の -0.31 乗に比例することを見出した。Tanaka⁽⁴⁹⁾は表面状態の異なる 2 種類の鉛直円板上の滴状凝縮について過渡的な液滴径分布を測定し、そのデータおよび時間平均液滴径分布に関する既存のデータが後述の Tanaka⁽⁶⁷⁾の理論と合うことを示した。Hatamiya-Tanaka⁽⁵⁰⁾は銅円柱の表面に金メッキ、クロムメッキなどの 5 種類の処理を施した鉛直面について 1-100kPa の圧力範囲にわたる水蒸気の凝縮実験を行い、現象の顕微鏡観察を行った。そして、低圧領域では熱伝達率は核生成点密度に影響されないことを見出した。Tanaka-Tsuruta⁽⁵¹⁾は低圧水蒸気の凝縮過程を顕微鏡観察し、液滴初生後の成長速度から局所熱伝達率を求めた。そして、観測結果に基づいて伝熱面が液滴に完全に覆われているものと仮定し、熱伝達率の測定値と気液界面の物質伝達に関する理論式から導かれる熱伝達率の式を等値することによって凝縮係数を求め、0.45-0.5 を得た。Tsuruta ら⁽⁵²⁾は銅円柱に厚さ 1.5mm の石英ガラス、ステンレス鋼、炭素鋼の円盤を接着した伝熱面上に微細な薄膜抵抗温度計を作成し、低圧水蒸気の凝縮時における壁温変動を測定した。熱伝達率は伝熱面材質の熱伝導率が高いほど高く、その値は液滴による狭窄熱抵抗を考慮した彼らの理論⁽⁶⁹⁾の予測とよく合うことを示した。Haraguchi ら⁽⁵³⁾はガラス面上の滴状凝縮の様相を 3 種類の方法で顕微鏡観察し、初生液滴は 0.1-0.3 μm の薄液膜から成長すると推論した。

Takeyama-Shimizu⁽⁵⁴⁾は円錐台形伝熱ブロックの端面を伝熱面とし、液体窒素を冷却材として使用して壁面過冷度 250 K までの実験データを得た。凝縮形態は壁面過冷度の増大につれて滴状、遷移、膜状、氷状に変化し、それに対応して熱流束は増大、減少、ついで増大した。彼らはこの曲線を凝縮曲線と名づけた。Tanasawa-Utaka⁽⁵⁵⁾は球殻の一部を切り出した形の伝熱ブロックを用いて一次元熱流を正確に実現し、蒸気流速を変化させて凝縮曲線に及ぼす離脱径の影響を調べた。図 4 に凝縮曲線の測定結果を示す。泉ら⁽⁵⁶⁾は水平方向研磨痕を有する鉛直面について凝縮曲線を測定し、粗さの増大につれて熱流束が減少することを見出した。

熱伝達の促進をめざした研究として、Yamauchi

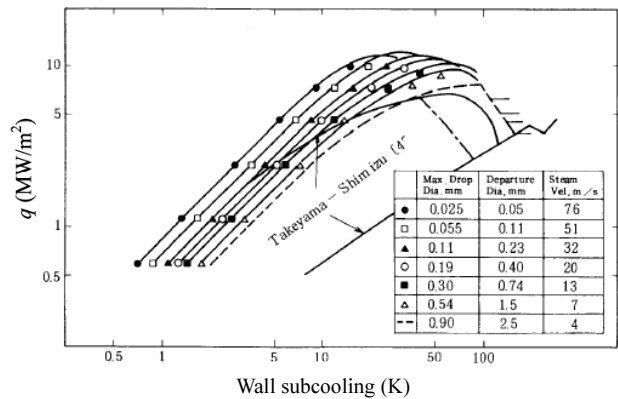


Fig. 4 Condensation curves for steam⁽⁵⁵⁾

ら⁽⁵⁷⁾は直径 15mm の円錐台形伝熱ブロックの端面の 50%に種々のパターンの金メッキを施し、滴状凝縮と膜状凝縮が混在する面の伝熱特性を調べた。そして、細かい放射状パターンのときに全面滴状凝縮の場合よりも高い熱流束が得られる領域があることを見出した。Haraguchi ら⁽⁵⁸⁾は 0.05-0.5 μm 厚さのポリ塩化ビニリデン薄膜をつけた鉛直円板の凝縮曲線を測定した。厚さが 0.05 μm の場合、壁面過冷度 8K までは金メッキ面よりも高い熱伝達率が得られた。また薄膜の耐久試験を行い、10 μm 厚さの薄膜付き面が 21,600h 後も滴状凝縮を維持していることを確かめた。

千葉ら⁽⁵⁹⁾はノズルによって鉛直伝熱面の先端に液滴を加え、滴状凝縮におよぼす落下液滴の影響を調べた。熱伝達率は落下液量の増大につれて増大し、最大値をとった後に減少するが、液滴を加えない場合より低くなることはなかった。斉藤・棚沢⁽⁶⁰⁾は供試水平管の上列に液滴下管を設けることによって縦管列を模擬し、膜状凝縮と滴状凝縮の実験を行った。膜状凝縮では下方列ほど熱伝達率が低下したが、滴状凝縮の場合には 10 列目程度までは熱伝達率の低下は起こらなかった。

3.2 有機物の滴状凝縮

有機物の滴状凝縮に関する研究として、Utaka ら⁽⁶¹⁾はテフロン被覆した鉛直銅円板上のプロピレングリコールの凝縮実験を行い、2 種類の圧力と 2 種類の離脱液滴径の組み合わせについて凝縮曲線を測定した。凝縮曲線の形状は水蒸気の場合に似ているが、極大熱流束点から膜状への遷移は水蒸気の場合と異なり連続的であった。Utaka ら⁽⁶²⁾は促進剤で処理した鉛直銅円板上のプロピレングリコール、エチレングリコール、グリセロールの凝縮について凝

縮曲線を測定した。熱伝達率はテフロン被覆面に比べて高く、極大熱流束点から膜状への遷移は不連続になる場合があった。宇高ら^{(63),(64)}は熱的にほぼ独立した6個の伝熱ブロックよりなる高さ69mmの鉛直面上のプロピレングリコールおよびエチレングリコールの凝縮実験を行い、落下液が凝縮曲線におよぼす影響を調べた。落下液の影響により、凝縮モードは滴状、膜状の中間にリブレット状が現れた。熱伝達率は下流側ほど低く、その値はリブレット部を膜状凝縮とみなして求めた滴状部と膜状部の面積平均熱伝達率と一致した。

3.3 滴状凝縮の理論

滴状凝縮の熱伝達は液滴径分布、液滴の成長と離脱、液滴の合体などによって支配される。Tanasawa-Tachibana⁽⁶⁵⁾はこれらを考慮した凝縮過程の計算機シミュレーションを行ったが、計算可能な凝縮点密度の制約(最大3200個/cm²)のため、得られた熱伝達率は実験値よりも一桁小さかった。Tanasawaら⁽⁶⁶⁾は1個の液滴の合体成長挙動を計算機シミュレーションし、その結果を用いて熱伝達率を推定する方法を考案した。Tanaka⁽⁶⁷⁾は裸の伝熱面上で滴状凝縮を開始した後の滴径分布密度と液滴成長速度の時間変化を記述する2元連立微積分方程式を導いた。そして、液滴間の等価すきま半径が最近接液滴発生点間の平均距離 D に等しく、液滴の凝縮成長速度は熱伝導によって定まると仮定し、滴径分布の初期条件、最大液滴半径 R_{max} 、最小液滴半径 R_{min} 、 D を与えて上述の式を数値的に解き、滴径分布の解を得た。この分布は液滴径の大きい領域に相似形の山が現れる点に特長がある。また、定常状態の熱伝達率 α について次式を得た。

$$\alpha R_{max} / \lambda = 5.3(R_{max} / D)^{0.7} \quad (3)$$

ここに λ は液の熱伝導率である。Tanaka⁽⁶⁸⁾は上述の理論の最小液滴半径を熱力学的限界値まで拡張して理論を一般化した。

上述の理論は一様壁温を仮定しているが、伝熱面上には時々刻々と変化する液滴分布に対応する局所熱流束の分布があり、局所壁温はこれに対応して変化する。この熱流束の不均一により、一様壁温の場合に比べて余分の熱抵抗(狭窄熱抵抗)が発生し、平均熱伝達率は低下する。この問題に関して、Tsuruta-Tanaka⁽⁶⁹⁾は伝熱ブロック内の熱伝導応答速度は液滴配置の変化速度に比べて十分大きいと仮

定して熱抵抗の液滴径による変化を記述する微分方程式を導き、これを数値的に解いて熱抵抗の時間変化と時間平均熱抵抗を求めた。そして、熱抵抗は伝熱面の熱伝導率の減少につれて増大し、その結果熱伝達率が低下することを示した。

4. 直接接触凝縮

非溶解性の冷却液中で蒸気を直接凝縮させるタイプの凝縮器は、製造の容易さや所要温度差が小さいことなどの利点があり、海水淡水化プラントやバイナリー地熱発電プラントへの応用をめざして研究が行われた。また、冷却水と水蒸気を直接接触させる凝縮器が原子炉の緊急冷却用に開発された。

Mori⁽⁷⁰⁾は非溶解性液中に存在する蒸気相と液相からなる平衡二相気泡の形状を二液の表面張力と液間界面張力の相互関係によって4タイプに分け、相変化による形状変化について議論した。Kalman-Mori⁽⁷¹⁾は溶解性および非溶解性の冷却液中における蒸気の凝縮実験とデータ解析を行い、一般性のある抗力係数と熱伝達率の経験式を得た。

Hijikataら⁽⁷²⁾は蒸気中を落下する過冷液滴への凝縮について研究し、従来の理論による予測の4倍以上の熱伝達率を得た。そこで、実験的に観察された落下液滴の変形振動を考慮した理論解析を行い、実験値と良好な一致を得た。中島・棚沢⁽⁷³⁾はR113の蒸気中を落下する過冷水滴への凝縮について研究した。水滴上に凝縮したR113は界面張力の作用によっていびつな形状となり、熱伝導支配の解に比べて熱伝達率が増大した。

原子炉の緊急冷却に関連する研究として、福田⁽⁷⁴⁾は水蒸気をベント管から過冷水プール中に放出する実験を行い、蒸気質量流束の大きい凝縮振動領域に対する熱伝達率の経験式を得た。Aya-Nariai⁽⁷⁵⁾は水平管内蒸気流への冷却水注入実験を行い、伝熱量は冷却水流量の増大につれて最初増大するが、ある流量以上では冷却水の過冷度によって定まる一定値をとることを見出した。より基礎的な研究として、Murataら⁽⁷⁶⁾は水平管内を流れる蒸気と冷却水の成層界面における熱伝達について理論的に研究し、3種類のモデルによる予測と従来の実験結果を比較した。

5. 凝縮熱伝達の促進

1970年代以降、凝縮熱伝達の促進が大きな研究

テーマとなった。微細加工技術の進展によって管内・外面に微細なフィン加工することが可能になり、コンパクト熱交換器の小型化が進んだ。また、フロン系冷媒の規制が強化され、代替冷媒の凝縮熱伝達特性のデータが求められた。

5.1 フィンによる管外凝縮の促進

フィンの伝熱促進要因の第一は表面積の拡大効果であるが、微細なフィン付面上の凝縮液膜には表面張力による圧力が作用して局部的に薄液膜部と厚液膜部が形成され、このことによっても伝熱が促進される。Hirasawa ら⁽⁷⁷⁾は鉛直フィン付管のフィン間溝部の液膜流について、表面張力を考慮した数値解析を行い、液流量が少ない場合には溝部に薄液膜部と厚液膜部が形成されることを見出した。また、流下液膜による模擬実験によってこれを確認した。Mori ら⁽⁷⁸⁾は三角形、波状、放物線形の3種類のフィン形状について縦フィン付鉛直管上の凝縮の理論解析を行った。フィン上については表面張力支配の、またフィン間溝部については重力支配の液膜流の基礎式を解き、熱流束の予測値が R113 による実験と良く合うことを示した。さらにフィン寸法の最適化計算を行い、フィン先端径が非常に小さく、溝が広い放物線形フィン付管に凝縮液排除用の円板を一定間隔で取り付けられた管が最適であり、その熱伝達率は平滑管の10倍に達することを示した。

Hijikata ら⁽⁷⁹⁾は鉛直フィン付面上の混合冷媒の体積力対流凝縮について理論解析と実験を行った。熱伝達率は凝縮温度差が小さい場合には純冷媒に比べて一桁低く、凝縮温度差の増大につれて純冷媒に近づいた。この現象はフィン間の拡散層厚さの減少によることが理論解析によって示された。ついで Hijikata ら⁽⁸⁰⁾直交蒸気流を受ける鉛直フィン付管上の凝縮を取り上げた。基本的な凝縮特性は体積力対流凝縮の場合と同様であるが、蒸気流速の増大につれて蒸気相の拡散抵抗が減少した。

Nozu ら⁽⁸¹⁾は下向き面上の凝縮におよぼす傾斜角の影響を平滑面とフィン付面について調べた。フィン付面の伝熱促進率は傾斜角の増大につれて水平面の2.5倍から鉛直面の12倍に変化した。

水平フィン付管の場合、管下部のフィン間溝部には表面張力によって凝縮液が保持される。この部分の面積割合はフィン間隔の減少につれて増大し、熱伝達を阻害する。Arai⁽⁸²⁾は鋸刃状フィンを有する高性能凝縮管を開発し、そのフィン間隔には凝縮物

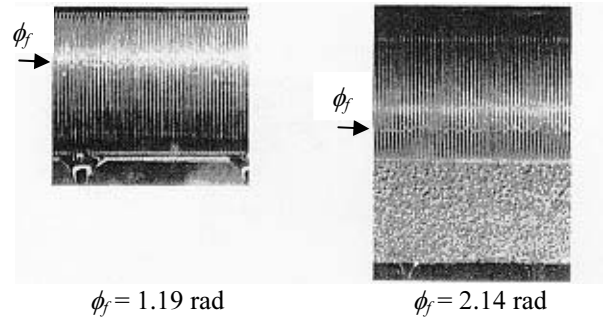


Fig. 5 Condensation of R113 on low-finned tubes with and without a drainage strip⁽⁸³⁾

質に応じた最適値があることを見出した。Honda ら⁽⁸³⁾はローフィン管のフィン間に保持された凝縮液内外の圧力バランスから、液充満角度 ϕ_f の式

$$\phi_f = \cos^{-1}(4\sigma \cos \theta / \rho ds - 1) \quad (4)$$

を導いた。ここに σ は表面張力、 θ はフィンの半頂角、 ρ は液密度、 d は管直径、 s はフィン間隔である。またフィン付管の下端に多孔質の排液板を取り付けることによって ϕ_f が増大し、伝熱が促進されることを見出した(図5参照)。Honda-Nozu⁽⁸⁴⁾はローフィン上の凝縮液膜について表面張力支配流れの数値解を求め、その結果を近似する局所熱伝達率の式を作成した。ついでこの式を ϕ_f より上部と下部の領域に適用して蒸気から管内冷却水への複合伝熱を記述する代数式を解き、平均熱伝達率を求める方法を提案した。Honda ら⁽⁸⁵⁾は上述の問題について表面張力・重力共存対流凝縮の数値解を求め、一般性のある伝熱計算法を提案した。

Zhu-Honda⁽⁸⁶⁾は角部が円弧の矩形、放物線形および新形状(フィン先端部で曲率が単調増加し、根元部の厚さは一定)の3種類のフィンを有する水平ローフィン管上の凝縮について、フィン内熱伝導も考慮した数値解析を行い、新形状フィンの優位性を示した。Honda-Makishi⁽⁸⁷⁾は上述の新形状フィンの側面に1個または2個の周方向リブを有する管上の凝縮に関する数値解析を行い、リブがない場合に比べて熱伝達率がそれぞれ1.27倍、1.58倍になることを示した。

5.2 水平フィン付管群内の凝縮

復水器以外のシェル・チューブ凝縮器の多くはフィン付管を使用している。この場合の熱伝達は蒸気流速と落下凝縮液に加えてフィン形状の影響を受け、複雑になる。

静止蒸気中に置かれた水平ローフィン管の縦管

Table 1 Experimental condition for condensation of refrigerants in staggered bundles of finned tubes

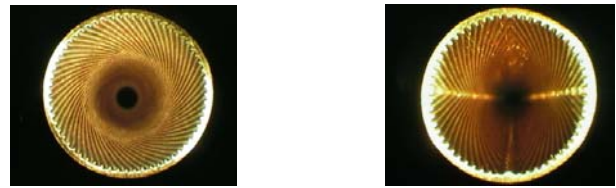
| Reference | Refrigerant | Fin shape |
|-----------|-------------|-------------------------------|
| 92 | R113 | Two low fins Four 3D fins |
| 93 | R123 | Four low fins |
| 94 | R134a/ R123 | Four low fins |
| 95 | R134a | Two low fins Three 3D fins |
| 96 | R407C | Two low fins Three 3D fins |

列に関する研究として、Honda ら⁽⁸⁸⁾は管列を流下する凝縮液の流動様式を調べた。流動様式は流量の増大につれて液滴、液柱、液柱・液シート混在、液シートに変化し、その遷移は特定の無次元数に依存することを見出した。Honda ら⁽⁸⁹⁾は単管に関する伝熱モデル⁽⁸⁵⁾に上述の流動様式を組み込み、ローフィン管の縦列の凝縮伝熱計算法を提案した。Honda ら⁽⁹⁰⁾は新形状と従来型のローフィン管の管群に上述の凝縮伝熱計算を適用し、R11 と R123 に関する実験結果と比較して良好な一致を得た。Murata-Hashizume⁽⁹¹⁾は蒸気流速が無視できるローフィン管群内の凝縮モデルを提案し、3 種類の管に関する R11 と R114 の実験結果と比較して良好な一致を得た。

Honda らは種々の冷媒についてフィン付管群内の凝縮実験を行い、蒸気流速、落下凝縮液およびフィン形状の複合効果を調べた。千鳥管群に関する研究⁽⁹²⁾⁻⁽⁹⁶⁾を Table 1 にまとめて示す。これらの研究によれば、寸法を最適化した新形状ローフィン管が最も高い伝熱性能を示した。三次元フィン管は単管の伝熱性能は高いが、落下凝縮液の影響により伝熱性能が低下しやすい。非共沸混合冷媒は純冷媒に比べて伝熱性能が低下するが、フィン形状による差は減少した。Nosetani ら⁽⁹⁷⁾は 500 MW 級復水器の上部、側面、下部の管列の伝熱性能を平滑管とローフィン管について計測した。熱通過率は上部、側面、下部の順に低下し、ローフィン管は平滑管に比べて 1.18-1.51 倍の伝熱促進率を示した。

5.3 水平内面溝付管内の凝縮

代表的な内面溝付管を図 6 に示す。螺旋溝付管内の凝縮熱伝達について、Yu-Koyama⁽⁹⁸⁾は 3 種類の純冷媒の溝付管内凝縮実験データが式 (2) の形の経験式によってまとめられることを示した。鹿園ら⁽⁹⁹⁾は式(2)を基礎とし、体積力対流項に表面積の拡大



(a) Spiral microfin (b) Herringbone microfin

Fig. 6 Two types of microfin tubes

率と重力効果を表すボンド数を導入した経験式を提案した。

Nozu-Honda⁽¹⁰⁰⁾は環状流モデルによる螺旋溝付管内凝縮の理論解析を行った。フィン上の凝縮液は表面張力駆動流によってフィン間溝部に集まり、ついで蒸気流によるせん断力で溝に沿って流れるものと仮定し、基礎式を数値的に解いた。熱伝達率の計算値は溝部に液が充満するまでの領域で実験値と良好な一致を示した。Honda ら⁽¹⁰¹⁾は成層流モデルによる理論解析を行った。気液界面位置を断熱二相流のモデルで決定し、管上半部のフィン上の凝縮は環状流モデルと同様に取り扱い、下半部には溝付き管内強制対流の式を適用した。そして熱伝達率の予測値を実験データと比較し、高蒸気流速域以外では良好な一致を得た。Wang ら⁽¹⁰²⁾は環状流モデルの蒸気流によるせん断力の評価法を修正し、また成層流モデルの気液界面形状におよぼす表面張力の影響を考慮した。そして両モデルによる熱伝達率の高いほうを採用することにより、全領域の実験値と良好な一致を得た。

実験的研究として、Koyama ら⁽¹⁰³⁾は R22, R114 および R22/R114 の螺旋溝付管内凝縮実験を行い、純冷媒および混合冷媒に対する平均熱伝達率の経験式を提案した。Shizuya ら⁽¹⁰⁴⁾は R22 と 3 種類の低沸点冷媒の混合冷媒およびこれら 4 種類の純冷媒の平滑管および螺旋溝付管内凝縮実験を行い、結果を比較した。沸点差の大きい混合冷媒は純冷媒に比べて熱伝達率が低下するが、溝付管を用いることによって伝熱性能が改善された。Ebisu-Torikoshi⁽¹⁰⁵⁾は R407C のヘリンボーン溝付管内凝縮実験を行い、熱伝達率は螺旋溝付管に比べて最大 200%増大することに対して、圧力降下の増大は 60%にとどまることを見出した。Miyara ら⁽¹⁰⁶⁾は R410A の凝縮特性を平滑管、螺旋溝付管、ヘリンボーン溝付管について比較した。また、管出口の流動様相の観察を行い、ヘリンボーン溝付管の溝は高流量時に凝縮液を合流部へ集めて流す働きをし、その結果高い熱伝達率が

得られることを明らかにした。Miyara ら⁽¹⁰⁷⁾は5種類のヘリンボーン溝付管について同様の実験を行い、フィン形状の影響を調べた。高質量流束ではヘリンボーン溝付管の熱伝達率は螺旋溝付管の 2-4 倍に達するが、圧力降下は 2.3 倍以下であった。

その他の研究として、Honda ら⁽¹⁰⁸⁾はワイヤーフィン付管を内管とする水平二重管環状部での R11 と R113 の凝縮実験を行い、低蒸気流速域と高蒸気流速域に適用できる半理論解を組み合わせた経験式を提案した。Nozu ら⁽¹⁰⁹⁾は上述の凝縮器について R114/R113 の凝縮実験を行い、液膜の伝熱抵抗を Honda ら⁽¹⁰⁸⁾の式で見積もって混合気相の拡散抵抗を求め、その整理式を導いた。

5.4 マイクロチャンネル内の凝縮

マイクロチャンネル内の凝縮は表面張力の影響を受け、伝熱が促進される。Koyama ら⁽¹¹⁰⁾は縦型プレートフィン凝縮器内の液膜流の近似解析を行い、実験と比較した。Wang ら⁽¹¹¹⁾は矩形断面の水平マイクロチャンネル内の液膜流に溝付管内凝縮の解析手法を適用し、局所液膜厚さの分布を求めた。

Koyama ら⁽¹¹²⁾は水力直径が 1mm 前後の2種類の水平多孔管内での R134a の凝縮実験を行い、圧力降下と局所熱伝達のデータを従来の経験式と比較した。Koyama ら⁽¹¹³⁾は4種類の水平多孔管について同様の実験を行い、新しい圧力降下と局所熱伝達の経験式を提案した。

5.5 電場付与による凝縮促進

Yabe ら⁽¹¹⁴⁾は水および R113 の液面上に針状電極を配置し、数 kV の高電圧をかけると、電場の効果によって液面が不安定になり、液面と電極間に液柱が形成されることを見出した。ついで鉛直凝縮管に 1.8mm の間隔で針状のペア電極を取り付け、電場をかけると R113 の凝縮液が電極に向かって引き出され、熱伝達率が電場がない場合の 2.24 倍に増大した。Yabe ら⁽¹¹⁵⁾は水平平板上のシリコンオイル薄膜に対向して平板電極を設置し、一様電場をかけると、液膜に滴状凝縮類似のパターンが発生し、薄膜部と厚膜部ができることを見出した。ついで鉛直凝縮管上の R113 液膜に電場付与によって擬似滴状凝縮を起こさせ、電場がない場合の 4.5 倍の熱伝達率を得た。Yabe ら⁽¹¹⁶⁾は鉛直凝縮管のまわりに螺旋電極を配置し、高電圧をかけることによって 95% の凝縮液が管から引き出され、熱伝達率が 2.8 倍に達することを見出した。

Chu ら⁽¹¹⁷⁾は水平ローフィン管の下部に小間隔で線電極を配置し、1300V までの直流電圧をかけて水蒸気の凝縮におよぼす効果を調べた。電場の作用によって液充填角度が増大し、熱伝達率は電圧をかけない場合の 2.4 倍に達した。Chu ら⁽¹¹⁸⁾は線電極を部分的に被覆することによって消費電力を削減し、3 倍までの伝熱促進率を得た。また、電場による圧力変化を考慮した液充填角度の理論式を導いた。

5.6 スクレーパーによる凝縮促進

Yamashita ら^{(119),(120)}は鉛直凝縮管および水平管凝縮管を回転させ、スクレーパーで凝縮液をかきとることによって凝縮伝熱を促進する方法を提案し、液膜流の理論解析を行った。そして、鉛直管、水平管ともに静止した管に比べて 4 倍程度の熱伝達率が得られることを示した。Maeda ら⁽¹²¹⁾はこの系について R11 を用いて凝縮実験を行い、鉛直管と水平管についてそれぞれ 2 倍と 2.5 倍の熱伝達率を得た。

6. おわりに

この 50 年間の凝縮熱伝達に関する研究を概観した。大学などの研究機関では研究者の自由な発想に基づく研究が幅広い分野で行われ、一方企業ではその時々ニーズに基づいた研究が行われた。

膜状凝縮については、実験的研究とあいまって、熱流動の基礎式を解析的または数値的に解く研究が進められ、現象の解明と熱伝達率の予測法の確立、さらには伝熱促進法の開発が進んだ。膜状凝縮に関しては、まだ研究が不十分な分野は残っているものの、基本的に未解決の問題は残されていない。

滴状凝縮についてもマイクロな現象の解明が進み、独創的な理論が確立された。問題は、実用的に使用可能な伝熱面処理法や伝熱面がいまだに開発されていないことである。それが可能になるためには、固気液三相界面の挙動に関わるマイクロな現象の解明と、他分野の研究者との協力が必要であろう。

本稿では研究の進展を客観的に述べるように勤め、研究の評価には立ち入らなかった。Web of Science や Scopus の論文引用件数は、ある意味での研究評価になっていると考えられる。

参考文献

- [1] Nusselt, W., Zeit. Ver. Deut. Ing., **60** (1916) 541, 569.
- [2] Fujii, T. and Uehara, H., Int. J. Heat Mass Transf., **15-2** (1972) 217.

- [3] 上原春男, 木下英二, 日本機械学会論文集 B 編, **60-577** (1994), 3109.
- [4] Stuhlträger, E. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **38-15** (1995), 2715.
- [5] Miyara, A., *J. Heat Transf.*, **123-3** (2001), 492.
- [6] Nakaoka, T. and Uehara, H., *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **1-3** (1988), 275.
- [7] Sugawara, S. et al., *Proc. 6th Japan Nat. Cong. Appl. Mech.* 1956, (1957), 385.
- [8] Fujii, T. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **15-2** (1972), 235.
- [9] Honda, H. and Fujii, T., *Proc. 5th Int. Heat Transf. Conf.*, **3** (1974), 299.
- [10] Honda, H. and Fujii, T., *J. Heat Transf.*, **106-4** (1984), 841.
- [11] Fujii, T. et al., *Condensation Heat Transfer*, ASME (1989), 35.
- [12] Honda, H. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **29-3** (1984), 429.
- [13] Fujii, T. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **15-2** (1972), 247.
- [14] 藤井哲, 小田鶴介, 日本機械学会論文集 B 編, **48-436** (1982), 1062.
- [15] Honda, H. et al., *Heat Transf. Jap. Res.*, **18-6** (1989), 31.
- [16] Shida, H. et al., *Proc. 7th Int. Heat Transf. Conf.*, **6** (1982), 347.
- [17] Sato, K. et al., *JSME Int. J.*, **41-3** (1998), 752.
- [18] Yanadori, M. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **28-10** (1985), 1937.
- [19] 藤井哲, 本田博司, 野津滋, 川上修二, 冷凍, **52-596** (1978), 553.
- [20] Mizushima, T. et al., *Int. Chem. Eng.*, **18-4** (1978), 672.
- [21] Ueda, T. and Inoue, M., *Bull. JSME*, **20-147** (1977), 1174.
- [22] Hashizume, K. et al., *Heat Transf. Eng.*, **13-1** (1992), 19.
- [23] 原口英剛, 小山繁, 藤井哲, 日本機械学会論文集 B 編, **60-574** (1994), 2117.
- [24] 小山繁, 藤井哲, 渡部正治, 日本機械学会論文集 B 編, **52-474** (1986), 827.
- [25] 藤井哲, 小山繁, 渡部正治, 日本機械学会論文集 B 編, **53-486** (1987), 541.
- [26] Fujii, T. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **36-1** (1993), 27.
- [27] Mori, Y. and Hijikata, K., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **16-2** (1973), 2229.
- [28] 土方邦夫, 森康夫, 宇都宮一生, 日本機械学会論文集 B 編, **46-408** (1980), 1514.
- [29] Hijikata, K. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **20-8** (1984), 1319.
- [30] Mori, Y. et al., *J. Heat Transf.*, **99-2** (1977), 257.
- [31] 土方邦夫, 長谷川浩巳, 長崎孝夫, 日本機械学会論文集 B 編, **55-513** (1989), 1469.
- [32] Goto, M. and Fujii, T., *Proc. 7th Int. Heat Transf. Conf.*, **5** (1982), 71.
- [33] 藤井哲, 小山繁, 清水洋一, 渡部正治, 中村芳郎, 日本機械学会論文集 B 編, **55-509** (1989), 210.
- [34] Fujii, T. et al., *Condensation and Condenser Design*, ASME (1993), 171.
- [35] 宇高義郎, 寺地宣明, 日本機械学会論文集 B 編, **61-583** (1993), 1063.
- [36] Utaka, Y. and Nishikawa, T., *J. Enhanc. Heat Transf.*, **10-1** (2003), 119.
- [37] Hijikata, K. et al., *J. Heat Transf.*, **118-1** (1996), 140.
- [38] Mochizuki, S. et al., *J. Heat Transf.*, **106-3** (1984), 531.
- [39] 望月貞成, 井上剛良, 富永守, 日本機械学会論文集 B 編, **54-503** (1988), 1796.
- [40] Torikoshi, K. and Ebisu, T., *ASHRAE Trans.*, **99-pt.2** (1993), 90.
- [41] Ebisu, T. and Torikoshi, K., *ASHRAE Trans.*, **104-2** (1998), 556.
- [42] Afroz, H.M.M. et al., *Int. J. Refrig.*, **31-8** (2008), 1458.
- [43] Ogino, F. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **31-2** (1988), 245.
- [44] Schmidt, E. et al., *Techn. Mech. Thermodynamik.*, **1-2** (1930), 53.
- [45] Mizushima, T. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **10-7** (1967), 1015.
- [46] Sugawara, S. and Katsuta, K., *Proc. 3rd Int. Heat Transf. Conf.*, **2** (1966), 354.
- [47] Tanasawa, I. and Ochiai, J., *Bull. JSME*, **16-98** (1973), 1184.
- [48] 棚沢一郎, 落合淳一, 宇高義郎, 塩冶震太郎, 日本機械学会論文集 B 編, **42-361** (1976), 2846.
- [49] Tanaka, H., *J. Heat Transf.*, **97-3** (1975), 341.
- [50] Hatamiya, S. and Tanaka, H., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **30-3** (1987), 497.
- [51] Tanaka, H. and Tsuruta, T., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **27-3** (1984), 327.
- [52] Tsuruta, T. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **34-11** (1991), 2787.
- [53] Haraguchi, T. et al., *Heat Transf. Jap. Res.*, **21-6** (1992), 573.
- [54] Takeyama, T. and Shimizu, S., *Proc. 5th Int. Heat Transf. Conf.*, **3** (1974), 274.
- [55] Tanasawa, I. and Utaka, Y., *J. Heat Transf.*, **105-3** (1983), 633.
- [56] 泉正明, 新村利治, 磯部佳明, 山川紀夫, 大谷茂盛, *Westwater, J.W.*, 化学工学論文集, **12-6** (1986), 647.
- [57] Yamauchi, A. et al., *Heat Transf. Jap. Res.*, **15-5** (1986), 50.
- [58] Haraguchi, T. et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **34-12** (1991), 3047.
- [59] 千葉陽一, 鈴木睦, 大谷茂盛, 化学工学論文集, **11-5** (1985), 520.

- [60] 齊藤真秀, 棚沢一郎, 日本機械学会論文集 B 編, **53-488** (1987), 1270.
- [61] Utaka, Y. et al., Bull. JSME, **28-240** (1985), 1150.
- [62] Utaka, Y. et al., Bull. JSME, **29-258** (1986), 4228.
- [63] 宇高義郎, 齊藤彬夫, 西村浩, 金子隆之, 日本機械学会論文集 B 編, **57-534** (1991), 661.
- [64] 宇高義郎, 石井賢一郎, 久保良一, 日本機械学会論文集 B 編, **60-571** (1994), 946.
- [65] Tanasawa, I. and Tachibana, F., Proc. 4th Int. Heat Transf. Conf., **6** (1970), Cs. 1.3.
- [66] Tanasawa, I. et al., Bull. JSME, **16-99** (1973), 1367.
- [67] Tanaka, H., J. Heat Transf., **97-1** (1975), 72.
- [68] Tanaka, H., J. Heat Transf., **101-4** (1978), 603.
- [69] Tsuruta, T. and Tanaka, H., Int. J. Heat Mass Transf., **34-11** (1991), 2779.
- [70] Mori, Y.H., Int. J. Multiph. Flow, **11-4** (1985), 571.
- [71] Kalman, H. and Mori, Y.H., Chem. Eng. J., **85** (2002), 197.
- [72] Hijikata, K. et al., Int. J. Heat Mass Transf., **27-9** (1984), 1631.
- [73] 中島宏, 棚沢一郎, 日本機械学会論文集 B 編, **55-509** (1989),
- [74] 福田真一, 日本原子力学会誌, **24-6** (1982), 466.
- [75] Aya, I. and Nariyai, H., Proc. ASME-JSME Therm. Eng. Joint Conf., **3** (1983), 417.
- [76] Murata, A. et al., Int. J. Heat Mass Transf., **35-1** (1992), 101.
- [77] Hirasawa, S. et al., Int. J. Heat Mass Transf., **23-11** (1980), 1471.
- [78] Mori, Y. et al., J. Heat Transf., **103-1** (1981), 96.
- [79] Hijikata, K. et al., Proc. 8th Int. Heat Transf. Conf., **4** (1986), 1621.
- [80] Hijikata, et al., JSME Int. J., **30-270** (1987), 1951.
- [81] Nozu, S. et al., Heat Transf. Jap. Res., **21-1** (1992), 91.
- [82] Arai, N. et al., ASHRAE Trans., **83-Pt. 2** (1977), 58.
- [83] Honda, H. et al., Proc. ASME-JSME Therm. Eng. Joint Conf., **3** (1983), 289.
- [84] Honda, H. and Nozu, S., J. Heat Transf., **109-1** (1987), 218.
- [85] Honda, H. et al., JSME Int. J., **31-4** (1988), 709.
- [86] Zhu, H.R. and Honda, H., Heat Transf. Jap. Res., **22-4** (1995), 372.
- [87] Honda, H. and Makishi, O., J. Enhanc. Heat Transf., **2-4** (1995), 307.
- [88] Honda, H. et al., Proc. 1987 ASME-JSME Therm. Eng. Joint Conf., **1** (1987), 517.
- [89] Honda, H. et al., J. Heat Transf., **111-2** (1989), 525.
- [90] Honda, H. et al., J. Enhanc. Heat Transf., **1-2** (1994), 197.
- [91] Murata, K. and Hashizume, K., Exp. Heat Transf., **5-2** (1992), 115.
- [92] Honda, H. et al., J. Heat Transf., **114-2** (1992), 442.
- [93] Honda, H. et al., Int. J. Refrig., **19-1** (1996), 1.
- [94] Honda, H. et al., J. Heat Transf., **121-2** (1999), 405.
- [95] Honda et al., Int. J. Refrig., **25-1** (2002), 3.
- [96] Honda, H. et al., J. Heat Transf., **125-4** (2005), 653.
- [97] Nosetani, T. et al., ASME HTD, **108** (1989), 97.
- [98] Yu, J. and Koyama, S., Proc. 1998 Int. Refrig. Conf., (1998), 325.
- [99] 鹿園直毅, 伊藤正昭, 内田麻理, 福島敏彦, 畑田敏夫, 日本機械学会論文集 B 編, **64-617** (1998), 196.
- [100] Nozu, S. and Honda, H., J. Heat Transf., **122-1** (2000), 80.
- [101] Honda, H. et al., J. Heat Transf., **124-1** (2002), 94.
- [102] Wang, H.S. et al., Int. J. Heat Mass Transf., **45-7** (2002), 1513.
- [103] Koyama, S. et al., Int. J. Refrig., **13-4** (1990), 256.
- [104] Shizuya, M. et al., J. Heat Transf., **117-2** (1995), 538.
- [105] Ebisu, T. and Torikoshi, K., ASHRAE Trans., **104-2** (1998), 1044.
- [106] Miyara, A. et al., Int. J. Refrig., **23-2** (2000), 141.
- [107] Miyara, A. et al., Int. J. Refrig., **26-4** (2003), 417.
- [108] Honda, H. et al., Exp. Therm. Fluid Sci., **2-2** (1989), 173.
- [109] Nozu, S. et al., J. Heat Transf., **114-1** (1992), 201.
- [110] Koyama et al., J. Enhanc. Heat Transf., **5-3** (1998), 191.
- [111] Wang, H.S. et al., Chem. Eng. Res. Des., **82-4** (2004), 430.
- [112] Koyama, S. et al., Int. J. Refrig., **26-4** (2003), 425.
- [113] Koyama, S. et al., Proc. Int. Conf. Microchannels Minichannels, **1** (2003), 193.
- [114] Yabe, A. et al., Proc. 7th Int. Heat Transf. Conf., **5** (1982), 189.
- [115] Yabe, A. et al., Proc. 8th Int. Heat Transf. Conf., **6** (1986), 2957.
- [116] Yabe, A. et al., Heat Transfer Science and Technology, Hemisphere (1987), 812.
- [117] Chu, R. et al., Heat Transf. Asian Res., **29-4** (2000), 269.
- [118] Chu, R. et al., J. Enhanc. Heat Transf., **8-4** (2001), 215.
- [119] Yamashita, H. et al., Bull. JSME, **28-239** (1985), 860.
- [120] Yamashita, H. et al., Bull. JSME, **28-239** (1985), 868.
- [121] Maeda, H. et al., Bull. JSME, **28-235** (1985), 94.

自然対流伝熱研究 50 年の回顧

Review on natural convection studies in these 50 years

尾添 紘之 (元九州大学), 岩本 光生 (大分大学), 平野 博之 (岡山理科大学)
 田川 俊夫 (首都大学東京), 桑木 賢也 (岡山理科大学), 金田 昌之 (大阪府立大学)
Hiroyuki OZOE (Formerly Kyushu Univ.), Mitsuo IWAMOTO (Oita Univ.)
Hiroyuki HIRANO (Okayama Univ. of Science), Toshio TAGAWA (Tokyo Metropolitan Univ.)
Kenya KUWAGI (Okayama Univ. of Science), Masayuki KANEDA (Osaka Prefecture Univ.)
 e-mail: hozoe@osu.bbiq.jp

1. はじめに

日本伝熱学会の創立 50 周年記念伝熱セミナーで、50 年の研究回顧のうち、自然対流関係を担当せよと仰せつかったが、当初感じた以上にこれは難題であり、尾添一人ではとてもできないと、共著者の各位に協力をお願いした。著者の一人の田川の調査により、Elsevier 社の Scopus というインターネットの検索サイトを使えば、日本機械学会論文集 B 編を含めて、世界の多くの雑誌から文献をリストアップしてくれる。検索用語による違いを表 1 に示す。重複はあると思われるが、約 3 万件近くある。参考までに日本機械学会論文集 B 編における検索結果も併記する。機械学会論文集では自然対流が圧倒的であり、和文では自然対流という用語で考える。次に自然対流関係の発表論文数の多い雑誌名のリストを表 2 に上位 10 誌だけを示す。伝熱関係の重要誌がランクされている。

表 1 Scopus と日本機械学会論文集 B 編による文献数 (検索用語別)

| 検索用語 (上段 Scopus, 下段 機論 B) | Scopus | 機論 B(1979 年以降) |
|----------------------------------|---------|----------------|
| Natural convection 自然対流 | 16.0 千件 | 1040 件 |
| Free convection 自由対流 | 5.5 千件 | 78 件 |
| Thermal convection 熱対流 | 3.6 千件 | 104 件 |
| Buoyancy driven conv. 浮力対流 | 0.4 千件 | 11 件 |
| Double-diffusive conv. 二重拡散対流 | 0.7 千件 | 37 件 |
| Combined convection 共存対流 | 0.4 千件 | 124 件 |

表 2 Scopus において Natural convection を検索用語とした場合に出てくる 1.6 万件の論文の発表雑誌名の上位 10 誌

| 雑誌名 | 件数 |
|---|---------|
| International Journal of Heat and Mass Transfer | 1556 |
| ASME Heat Transfer Division HTD +ASME papers | 730+238 |
| ASME Journal of Heat Transfer | 605 |
| Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, part B | 410 |
| International Communications in Heat and Mass Transfer | 401 |
| Numerical Heat Transfer, Part A | 352 |
| Heat and Mass Transfer Wärme- und Stoffübertragung | 233 |
| International Journal of Thermal Sciences | 227 |
| International Journal of Heat and Fluid Flow | 206 |
| Journal of Fluid Mechanics | 156 |

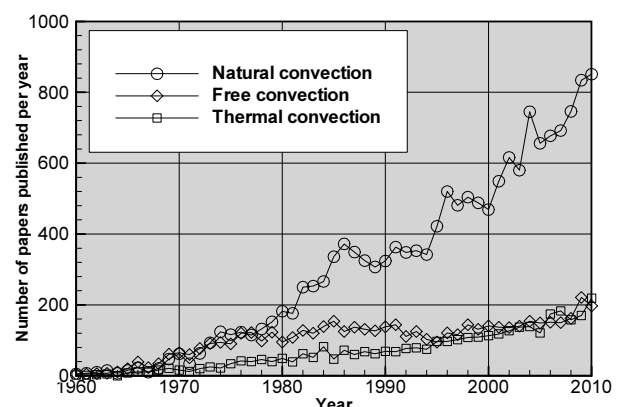


図 1. Key word に依存した論文数の推移

日本機械学会論文集が 4 位 (ASME をままとめると 3 位) にあり、ある程度全体的傾向を代表するも

のと考えられる。また、Scopus によれば自然対流関係の各年毎の論文数のリストがあり、図 1 にこれを示す。Natural convection, Free convection, および Thermal convection の三つの用語に対する出版論文数を縦軸に、横軸がこの 50 年である。興味深いのは、1980 年以前は Natural convection と Free convection がほぼ拮抗していて、年によっては Free convection が多い。恐らく、境界層近似が成立する鉛直加熱平板沿いの自由対流関係の論文が多いことを示すものと思われる。

さらに Scopus では各論文の被引用件数の順位が示されているので、表 1 の検索用語のどれかに対応する論文の上位 15 件を表 3 に示す。表 3 の 1 位は物理関係、2,3 位は海洋関係、4 位は数値計算法、5 位は de Vahl Davis のベンチマーク問題で、やっとなじみのあるものが出てきた。6,7 位は気象関係、8 位は Rayleigh-Benard 対流、9 位はバイオ化学、10 位はマントル対流である。11 位にやっとな International Journal of Heat and Mass Transfer 誌が出てくる。固液相変化を伴う対流問題である。12 位に Churchill and Chu の乱流域を含む Nu 数の相関式。13,14 位はマントル対流。15 位は電気化学である。

表 3 Scopus による被引用件数上位論文(Natural convection, Free convection, Thermal convection, Buoyancy convection, Double diffusion, Combined convection のどれかに対応)

1. Cross, M. C., Hohenberg, P. C., Pattern formation outside of equilibrium, Review of Modern Physics, **65-3** (1993) 851-1112, cited 3291 times.
2. Turner, J. S., Buoyancy effects in fluids, Cambridge University Press (1973), cited 1177 times.
3. Large, W. G., McWilliams, J. C., Doney, S.C., Oceanic vertical mixing; A review and a model with a nonlocal boundary layer parameterization, Review of Geophysics, **32-4**, (1994) 363-403, cited 908 times.
4. Chorin, A. J., A numerical method for solving incompressible viscous flow problems, Journal of Computational Physics, **2-1**, (1967) 12-26, cited 861 times.
5. de Vahl Davis, G., Natural convection of air in a square cavity; A bench mark numerical solution, International Journal for Numerical Methods in Fluids,

3-3 (1983) 249-264, cited 695 times.

6. Zhang, d, Anthes, R. A., A high-resolution model of the planetary boundary layer-sensitivity tests and comparisons with SESAME-79 data, Journal of Applied Meteorology, **21-11** (1982) 1594-1609, cited 454 times.
7. Wheeler, M., Kiladis, G. N., Convectively coupled equatorial waves: Analysis of clouds and temperature in the wavenumber-frequency domain, Journal of Atmospheric Science, **56-3** (1999) 373-399, cited 385 times.
8. Castaring, Bernard et al., Scaling of hard thermal turbulence in Rayleigh-Benard convection, Journal of Fluid Mechanics, **204** (1989) 1-30, cited 382 times.
9. Thomas, P. E., Ryan, D., Levin, W., An improved staining procedure for the detection of the peroxidase activity of cytochrome P-450 on sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gels, Analytical Biochemistry, **75-1**, (1976) 168-176, cited 380 times.
10. Montelli, R. et al, Finite-Frequency tomography reveals a variety of plumes in the mantle, Science, **303-5656**, (2004) 338-343, cited 363 times.
11. Voller, V. R., Prakash, C., A fixed grid numerical modeling methodology for convection- diffusion mushy region phase-change problems, International Journal of Heat and Mass Transfer, **30-8**, (1987) 1709-1719, cited 321 times.
12. Churchill, S. W., Chu, H. H. S., Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate, International Journal of Heat and Mass Transfer, **18-11**, (1975) 1323-1329, cited 292 times.
13. Phillips, O. M., Flow and reactions in permeable rocks, (1991), cited 284 times.
14. Glatzmaier, G. A., Roberts, P. H., A three-dimensional convective dynamo solution with rotating and finitely conducting inner core and mantle, Physics of the Earth and Planetary Interiors, **91-(1-3)**, (1995) 63-75, cited 275 times.
15. Yi, J. S., Nguyen, T. Y., An along-the-channel model for proton exchange membrane fuel cells, Journal of the Electrochemical Society, **145-4**, (1989) 1149-1159, cited 264 times.

このように、被引用件数の上位はほとんど伝熱関係以外であり、表 2 の雑誌との間には何か割り切れないギャップを感じる。そこで、1961 年以降、各 10 年分づつの被引用件数の上位リストを *natural convection* をキーワードとして検索した結果を表 4 に示す。1961-1970 年においては、伝熱、流体力学関係の論文だけがリストアップされてくるが、1971-1980 年においてはマントル対流を含む物理関係の論文が 4 件出てきた。さらに 1981-1990 年においては、海洋気象関係とか電気化学が出てくる。しかし伝熱関係がほとんどである。ところが、1991-2000 年になると、伝熱関係が激減し、海洋気象、宇宙関係が共に増加して来る。さらに 2001-2010 年では、海洋気象関係が最多となり、ミクロ、ナノ関係、数値計算法などの新しい項目が多数出てきた。この結果はこの 20 年において、自然対流の研究分野が大きく拡大し、さらに研究対象が大きく変化していることを伺わせる。

表 4 Scopus において *Natural convection* をキーワードとして検索した場合に出てくる被引用件数の上位 30 件（各 10 年間）の論文の研究分野毎の論文件数。

| 研究分野 | 1961 -1970 | 1971 -1980 | 1981 -1990 | 1991 -2000 | 2001 -2010 |
|--------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 伝熱関係 | 30 | 25 | 25 | 9 | 2 |
| 物理関係 | | 4 | | 3 | 1 |
| 材料関係 | | 1 | 2 | 2 | |
| 海洋気象 | | | 1 | 8 | 11 |
| 電気化学 | | | 2 | 2 | 1 |
| 宇宙 | | | | 6 | 1 |
| ナノ,ミクロ | | | | | 5 |
| 磁場 | | | | | 2 |
| 蛋白, 生理 | | | | | 2 |
| 数値計算法 | | | | | 4 |
| 沈降 | | | | | 1 |

2. 自然対流について

自然対流という現象そのものは、例えば重力下で、熱や物質移動の結果生じる流体中の密度差により、流体が流動するもので、その原理そのものについては、最早何ら議論の対象とはならない。一般に自然対流そのものを対象とした報告をみると、大略二つの系に分けられる。一つは、加熱あるいは冷却鉛直板（垂直板とも言う）に沿う上昇

あるいは下降流を対象としたもので、これは部屋の暖房などに使われる放熱フィンを想定したものと思われる。もう一つは、水平流体層の下の水平面が加熱され、上の水平面が冷却された場合の自然対流で、Benard[1]が初めて油の表面張力流による流れの写真を撮り、ついで上下の温度差がある一定値以上に成って初めて自然対流が生じることを解析的に見出した Rayleigh[2]の名前をとって、Rayleigh-Benard 対流とも呼ばれるものである。これら以外に、閉じた空間内の流体の自然対流の問題が見られる。これについては私事で恐縮だが尾添が 1968 年にペンシルベニア大学の Stuart W. Churchill 教授の研究室に配属された時に教わった。同教授の下では当時急速に発展し始めたデジタル計算機を用いた自然対流他の数値解析が進められていた。閉空間内の自然対流研究の端緒は Churchill 教授の前任地の Michigan 大学の博士課程学生 William R. Martini 氏が大学院に来る前に経験した、水の電気分解でできる水素と酸素の爆発の対策法を（稀な例だが）自らの研究テーマとして現れたことに始まる由である[3,4]。Martini 氏のテーマは、水素と酸素が爆発濃度に達する以前に、圧縮機やモーターのような回転機構なしで、触媒を用いて水素と酸素を再結合させてできる水を液化リサイクルする反応器を設計することであった。反応器のモデルとして、対向する水平円筒の右半分壁は触媒壁で反応により発熱し、左半分壁は水で冷却し、円筒内のガスが加熱冷却を受けて、自然対流を生ずる。内部の流体はそのような状況下では水平軸の周りに全体が剛体回転をするのではないかと当初予想されたが、可視化によると壁沿いの境界層流れと静止コア部の温度成層からなる。境界層流解析だけの当時に 2 次元場の連立保存方程式を IBM650 という極めて初期の digital computer でこれを解こうとした由である。なお残念ながらこの反応器はその後実現されたかどうか不明である。また水平円筒を正方形断面にして、一つの鉛直面を加熱し、対向する鉛直面を冷却し、水平上下面を断熱した場合が、de Vahl Davis[5]のベンチマーク問題として広く知られている。私の学生当時 Churchill 教授を彼が尋ねてきたことを思い起こす。ところで、自然対流の全貌は極めて多岐に渉る。たとえば大気や湖水の流れ、マントル対流、太陽表面のガス流れなどの大きな自然現

象から、工学の対象とする種々の装置内外の温度差や濃度差に起因する種々の流れ、さらにはマイクロな現象や、新しい加速度場（回転や磁場勾配など）での現象などである。そのような個々の現象が我々の生活、快適さなどに有用あるいは有用と期待されるのであれば、工学の分野では最適な装置の設計や操作のために、この現象の詳細を明らかにしようという動機が生じる。つまり自然対流現象は個別の境界条件や物性の違いによって直感的にはその特性を予測できないことが多いので、必要とされた時点で実験なり、数値解析なりをせざるを得ないものと理解している。また、沸騰や凝縮、強制対流や輻射など伝熱学の他の分野の現象に付随して大なり小なり発生している。従って原理の分かったものであってもいまだに多くの研究がなされているように理解される。

さて前節でみたように、Scopus のデータを見て世界全体の傾向はある程度伺えるが、日本の伝熱研究 50 年の回顧にはあまり適合しないように思われる。そこで以下では、我が国の研究者の大多数が投稿してきたと考えられる日本機械学会論文集 B 編を対象として各研究者グループの報告の概要を各 10 年単位で共著者が分担紹介を試みる。なお、著者らの研究成果は残念ながら下記にはほとんど出てこないが、これは海外の英文誌に主に発表したため、他にもそのような方の成果はここには出てきていないことをお詫びしておきたい。

3. 日本機械学会論文集（または B 編）に基づく自然対流関係論文の推移

1961 年から 1970 年までの 10 年間（岩本）

この 10 年では、鉛直加熱平板沿いや、鉛直加熱円柱沿いの自由対流に関する研究が多く、傾向として前半は解析的研究や、解析と実験との比較が多く報じられている。また後半になるとコンピュータを用いた数値解析による報告が見られ始めている。

この年代の主な一連の報告についてみていくと、馬淵らは平板の自然対流に関する報告として、強制対流を伴う場合(1961)[6]、熱負荷一定の場合(1961)[7]、吹き出し、吸い込みの影響(1962)[8]、磁場中の導電性流体(1963)[9]、さらに水平細線からの伝熱に及ぼす振動効果実験(1967)[10]がある。

また相原は、フィンに関する問題についての一

連の報告を行い、垂直平行平板間流れのシュリーレン実験(1963)[11]、垂直平板形放熱器のフィン効率の解析(1967)[12]、垂直凹状面基板（フィン列）(1968)[13]、フィン周端部からの放熱(1970)[14]、フィン平面部からの放熱実験式(1970)[15]、不等温フィン列の場合(1970)[16]がある。赤木は水平円柱まわりの曲率の影響についての摂動解(1965)[17]、非ニュートン流体の解析解(1966)[18]を報告した。藤井哲らは傾斜平板角度の影響についての解析解(1966)[19]、垂直円筒面沿い(1966)[20]、鉛直円筒面から液体への熱伝達の物性値代表温度による整理(1969)[21]、粘性係数の温度変化のみを考慮した整理(1969)[22]、円筒面上の突起の影響(1970)[23]、スピンドル油を用いた種々の可視化実験(1970)[24]等の一連の報告がある。加藤と伊藤は水平楕円円柱まわりの実験(1967)[25]、傾斜円柱まわりの数値解(1968)[26]がある。甲藤と増岡は水平多孔質層の対流発生限界(1966)[27]、増岡は多孔質層と垂直加熱面間(1968)[28]、泉らは、直列フィン付き面への角度などの影響の実験(1968)[29]、垂直円管内流の数値解(1969)[30]、垂直ならびに 45 度傾斜平板熱伝達への振動の影響の実験(1970)[31]がある。

これら以外にも坪内、岐美、加藤、中井、西川らなど多くの報告が行われている。

1971 年から 1980 年までの 10 年間（平野）

この 10 年を象徴する出来事として、1979 年 (Vol.45, No.389) より、日本機械学会論文集から日本機械学会論文集 A, B, C 編へと分冊となり、分野の細分化および多様化が進んだといえる。また分野的に繋がりのある化学工学論文集においても Vol.1, No.1 (1975) から自然対流に関する論文が登場した。

この年代の主な一連の報告のうち、自然対流あるいは自由対流という用語を含む論文についてみていくと、藤井 哲らによる自然対流に関する報告として、非ニュートン流体への自然対流熱伝達研究(1972)[32,33]、一様加熱の下向き面に沿う自然対流(1973)[34]、鉛直面上の乱流自由対流に関する数値解析(第 1 報: 1977[35]、第 2 報 1978[36])、鉛直細線からの自由対流(1978)[37]、水平円柱まわりの層流自由対流(1978)[38]、一様発熱鉛直面から空気への層流自由対流熱伝達(1978)[39]、鉛直細線か

ら空気への自由対流熱伝達に関する実験(1979)[40], 球から空気への層流自由対流熱伝達(1979)[41]などがある。

西川・伊藤らは超臨界圧流体の自由対流熱伝達(第2報:1972[42], 第3報:1974[43]), 自由対流表面膜沸騰の研究(第2報)(1972)[44], 一様熱流束壁における自然対流熱伝達の変物性問題(1975)[45], 自然対流の安定性に関する一問題(1976)[46]がある。ほかにも, 越後らによるふく射が共存する自然対流熱伝達の実験的研究(1973)[47], 中村らによる結霜時(1973)[48], 平行四辺形チャンネル内(1980)[49], 任意形状断面の水平柱(1977)[50]の自由対流熱伝達, 二神・阿部による傾斜円管内強制-自然複合対流熱伝達(第1, 2報)(1972)[51], (1975)[52], 田中らによる鉛直円管内強制対流乱流熱伝達における自然対流および加熱熱膨張による加速の影響(1973)[53], 小野・川野らによる垂直加熱板を用いた自然対流による熱面発火(1975)[54], 五十嵐らによる密閉空間内自然対流の振動現象(1975)[55](1977)[56], 菊地らによる直流高圧電界に関するもの(1978)[57](1979)[58], 増岡らによる多孔質層内の研究(1980)[59,60]など多くの報告が行われている。この10年間に於いて自然対流あるいは自由対流という用語を含む論文は40編程ある。

1981年から1990年までの10年間(田川)

この年代になると, 自由対流よりも自然対流という用語が多く見受けられる。研究対象は, 鉛直平板, 密閉容器内, 水平円管あるいは円柱を基本としたものが多いが, 乱流境界層, 対流発生限界, 表面張力と浮力の重畳, 平行四辺形容器, 傾斜や仕切り板の影響, 多孔質体内, 高粘性流体に関するものなど多岐に渡る。以下には幾つかの研究グループにしぼり概説する。

まず乱流境界層に関連するものとして, 菱田・長野・辻らのグループは, 鉛直平板の自然対流乱流境界層を熱線風速計により実験的に計測し, また $k-\epsilon$ モデルにより数値解析を行っている[61-65]。一方で宮本らのグループは, レーザ流速計を用いて, 乱流境界層を調べている[66,67]。

対流発生限界に関するものとして, 日向野は, 液体層の熱的不安定性について, 界面張力と浮力のそれぞれが単独あるいは重畳する場合について

理論的に研究している[68-70]。鳥居・中山は, 下部を加熱された狭い垂直環状空間内の自然対流を調べている[71-73]。前川・棚沢は, 密度差と表面張力差によって駆動される水平流体層内の自然対流に関して研究しており[74,75], さらに鉛直磁場の影響[76]も調べている。後に, 宗像・棚沢[77,78]は, 結晶育成過程における自然対流の研究を行っており, 密度差, 表面張力差, 磁場の効果が加味されている。

密閉容器内の自然対流に関するものとして, 浅古・中村[79-81]や, 前川・棚沢[82]は, 平行四辺形チャンネル内の自由対流を扱っている。稲葉らのグループ[82-91]は, 矩形容器の傾斜, 仕切り板, 多孔質, 密度逆転層などの影響を調べている。また部谷・竹内・木村らのグループ[92-101]は, 仕切り板や傾斜の影響, 異種流体が密閉容器内で成層する場合などを調べている。増岡らのグループ[102-104]は, 多孔質層と傾斜について調べている。多孔質については, 中山・児玉[105,106]でも研究されている。

円管内や円柱まわりの自然対流に関するものとして, 藤井ら[107]の水平細線まわりの自由対流に関する理論と実験, 佐古ら[108]の水平円柱からの非定常自然対流の数値計算, 赤木ら[109]の高粘性流体中における水平円柱まわりの非定常自然対流熱伝達, 木本・桃瀬[110]の加熱水平円柱近傍上方の自然対流, 齊藤ら[111]の水平円管群の自然対流熱伝達の実験的研究, 山辺ら[112]の水平円柱からの層流自由対流, 福迫ら[113]の成層をなす水平円管内流体の自然対流熱伝達などがある。鉛直円管に関連するものとして, 木枝ら[114]の円管内助走区間の層流熱伝達, 藤井ら[115]の鉛直円管内の層流自由対流, 相原・円山[116,117]の鉛直管路内の自由対流熱伝達に及ぼす物性値の温度依存性がある。球に関するものとして, 高松ら[118]の球まわりの自由対流について数値解析, 持丸[119]の球状キャビティにおける過渡自然対流, 椎名[120], 椎名・藤村[121]の半球内の自然対流の解析と実験がある。

北村らのグループは, 密閉容器内の自然対流の振動現象[122], 剥離をともなう自然対流[123-125]を, また三田地らは, 凝固と発熱を伴う水平管内自然対流熱伝達[126-130]を扱っている。能登らは, 鉛直板まわりの自然対流の三次元解析[131], 水平

線熱源からの浮力ブルームの揺動[132], カルマン渦列の崩壊と発達[133]について論じている. 長谷川らは, 環状多孔質内の自然対流について, 実験的研究[134], ガラキン解析[135], 安定性解析[136], 液晶による可視化実験[137]を行っている. 石黒らは, 固体と流体との熱連成場のための変分原理[138,139]について研究している.

1991 年から 2000 年までの 10 年間 (桑木)

この年代の特筆すべき点は数値解析の飛躍的な進歩とそれに伴う解析例の増加であろう. 自然対流場を Navier-Stokes 式とエネルギー式を離散化して数値計算で解く場合, 非常に高い計算機能力が必要となり, それ以前の年代では主に大型計算機が用いられていた. しかし, 1990 年前後から数百万円程度のワークステーションが登場し, 研究室規模でも数値計算の実行が可能となった. さらに, 計算機の能力はムーアの法則にしたがって飛躍的に向上していき, 同時に価格も非常に安価なものとなっていった. この年代が終わる頃にはワークステーションとパソコンの区別もはや意味をなさないようになり, 簡易な自然対流の数値解析はパソコンでも可能となっていった. 日本機械学会論文集での自然対流の数値解析に関する論文数を見てみると, 1991 年から年毎に 1, 2, 2, 7, 4, 4, 6, 2, 4, 7 となっている. 1994 年の増加はワークステーションが研究室規模で使用可能となった時期, 2000 年はパソコンが使用可能なレベルになった時期とほぼ重なっている.

一方, この年代は数値解析ばかりでなく計測・可視化技術に関しても大きな進歩が見られた時期であり, モアレ干渉法による自然対流温度場の計測(1997)[140], 自然対流場における速度場の三次元画像計測(2000)[141]などの報告がなされている.

次に研究内容毎に見ていく. 乱流・カオスでは関連する論文は 14 件が報告されていた. 例えば稲垣・小森による垂直平板に沿う自然対流乱流熱伝達に関する研究(1992)[142], 石田らによる自然対流場におけるカオスに関する研究(1999)[143]などが挙げられる. 放射伝熱が関連する研究に関しては, 工藤らの放射・対流共存伝熱解析(1995)[144]や山口らの多孔質層内の自然対流-輻射複合熱伝達に関する研究(1997)[145]など 5 件が報告されていた. 多孔質・粒子充填層内の自然対流に関して

は, 木村らが 6 件((1991)[146]など), 稲葉・尾崎らが 4 件((1993)[147]など)と精力的に研究を行っており, それ以外を含めて全体として 16 件が数えられた. 二重拡散問題に対しては西村らが 3 件((1996)[148]など), 氷層問題に対して菅原らが同じく 3 件((1997)[149]など)報告しており, 全体として 7 件の論文があった. ベナール問題に対しては, 小泉・細川がベナール渦の生成制御に関する研究を行なっている(1992)[150]. また鄭らは数値解析による解析を行なっている(2000)[151]. この年代は棚橋らによる研究に代表されるように電磁場における自然対流解析が多くなったのも特徴といえる((1993)[152]など). 棚橋らによる研究を含めて 9 件が報告されている.

この年代以前から行なわれていた研究に関しても, 引き続き活発に行なわれているものが多く, 特に熱伝達問題は自然対流研究で最も重要なものの一つであるため, この年代だけで 48 件が報告されていた. また, 円管・二重円管に関する研究は 8 件, 自然対流境界層に関する研究は 3 件が見られた.

応用研究では, 多田らのコロナ放電を利用した対流伝熱の促進(1991)[153], 中里らによる電子機器筐体内の解析(1995)[154], 宗像・棚澤による FZ 法の融液内対流に関する研究(1998)[155], 塩澤らによる自動車用ヘッドランプ内の自然対流解析(2000)[156]などが挙げられる. また地球規模の自然対流場に関する研究として, 梅村による大規模マントル対流に関する研究(1991)[157], 佐田による大気対流境界層を模擬するための風洞実験を行なった研究(1992)[158]もある.

なお, 上述の分類は今回便宜上設けたものであり, 自然対流の多種多様な研究を全てこれだけで分類するには不十分である. 実際, この年代でこれらの分類に入れるのが難しい論文も 26 件あった.

2001 年から 2010 年までの 10 年間 (金田)

21 世紀に入ってからも, 先の 10 年で見受けられた流れがさらに顕著となる. すなわち, 研究対象の多様化, 実験手法の発展, そしてコンピュータの高性能化に伴う数値解析の発達である.

研究対象としてはこれまでも活発に研究されてきた鉛直円筒まわりの自然対流(2001) [159],

(2002)[160]，平行平板(2001)[161][162]，(2002)[163][164]，(2007)[165]や，二重円筒問題(2002)[166]，(2003)[167][168]，(2004)[169]，(2006)[170]が挙げられるとともに，電子機器内の伝熱(2002)[171]，(2006)[172]や，形状記憶合金を壁面に用いた実験(2001)[173]が見受けられる．さらに，作動流体においても多様性を見ることができる．例えば水蒸気と空気の混合気体(2001)[174][175]，多孔体内部自然対流(2003)[176]，(2007)[177]，固液懸濁液(2002)[178]，マイクロカプセルスラリー(2003)[179]やマイクロバブル(2007)[180]，(2008)[181]が挙げられる．これは実験手法の発達に伴う部分，特に可視化技術の発展に依るところが大きい．レーザー光を用いた PIV，PTV が急速に発展し，さらに高速度ビデオカメラの発達により現象を詳細に観察できるようになった．さらに，不透過流体の計測においては超音波流速計測法が発展し，液体金属内の自然対流現象の可視化に成功している(2006)[182]．

一方で計算機の更なる高性能化ならびに低価格化が進み，数値解析による研究が際立ってきた．2001 年からの 10 年間の自然対流関連研究の統計を取ると，実験のみの論文が 37 件なのに対し，数値解析のみでは 26 件，両者による研究は 12 件となった．数値解析においては，既存の手法以外に新しい解析手法を導入した研究も見受けられる．格子ガスオートマトン法(2001)[183]では複雑形状流路内の自然対流について報告し，CIP 有限要素法(2002)[184]では乱流域での解析妥当性を示している．さらに格子ボルツマン法(2003)[185]においても温度場を妥当に扱えることが示されている．このような流れは多孔体をはじめとする複雑形状内解析に大きく寄与することが予想される．

なお，この期間では自然対流 62 件，自由対流 2 件，熱対流 9 件，混合対流 2 件があった．

4. おわりに

この 50 年を 5 人で分担したが，必ずしも同じ観点から整理された訳でもなく，読みにくいところもあったと思う．いずれにしろ，今回の回顧は，各分担者の担当部分で，偶々目に留まった論文をリストアップしたものであり，また近年は論文件数が増えたため，むしろここに記載してないものが大多数である．各位の御了解をお願いする．

参考文献

- [1] Benard, H., Les Tourbillons cellulaires dans une nappe liquide, *Revue generale des Sciences pures et appliquees*, **11**, (1900) 1261-71 and 1309-28.
- [2] Rayleigh, L., On convective currents in a horizontal layer of fluid when the higher temperature is on the under side, *Phil.Mag.*, **32**, (1916) 529-546.
- [3] Churchill, S. W., personal communication.
- [4] Martini, W. R., Natural convection inside a horizontal cylinder, Ph.D. thesis, (1956) The University of Michigan.
- [5] de Vahl Davis, G., Natural convection of air in a square cavity; A bench mark numerical solution, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, **3-3**, (1983) 249-264.
(以下全て日本機械学会論文集または B 編)
- [6] 馬淵幾夫, 藤掛賢司, 垂直加熱平板に沿う低レイノルズ数の流れにおける熱伝達, **27-180** (1961) 1299-1305.
- [7] 馬淵幾夫, 熱負荷一定の垂直円筒面よりの自然対流による層流熱伝達, **27-180** (1961) 1306-1313.
- [8] 馬淵幾夫, 垂直平板からの自然対流熱伝達に及ぼす吹出し, 吸込みの影響, **28-192** (1962) 921-929.
- [9] 馬淵幾夫, 磁場におかれた垂直平板からの電導性流体の自然対流, **29-204** (1963) 1336-1344.
- [10] 馬淵幾夫, 田中敏雄, 水平細線からの自然対流熱伝達におよぼす振動効果に関する実験的研究, **33-245** (1967) 96-103.
- [11] 相原利雄, 垂直平行平板の自然対流による放熱実験, **29-201** (1963) 903-909.
- [12] 相原利雄, 垂直平板形自然空冷放熱器の性能推定法, **33-245** (1967) 77-86.
- [13] 相原利雄, 垂直長方形フィン列からの自然対流熱伝達:(第 1 報, 垂直凹状面基板からの熱伝達), **34-261** (1968) 915-926.
- [14] 相原利雄, 垂直長方形フィン列からの自然対流熱伝達:(第 2 報, フィン周端部からの熱伝達), **36-282** (1970) 239-247.
- [15] 相原利雄, 垂直長方形フィン列からの自然対

- 流熱伝達:(第 3 報,フィン平面部からの熱伝達), **36-282** (1970) 248-257.
- [16] 相原利雄,垂直長方形フィン列からの自然対流熱伝達:第 4 報,不等温フィン列の伝熱特性, **36-292** (1970) 2077-2086.
- [17] 赤木新介,水平円柱まわりの自由対流における曲率の影響, **31-229** (1965) 1327-1335.
- [18] 赤木新介,非ニュートン流体の自由対流熱伝達, **32-238** (1966) 919-929.
- [19] 藤井 哲,竹内正紀,斜面に沿う層流境界層流れにおよぼす浮力の影響, **32-236** (1966) 646-651.
- [20] 藤井 哲,上原春男,竹内正紀,直円筒伝熱面からの自然対流熱伝達, **32-236** (1966) 652-657.
- [21] 藤井 哲,竹内正紀,上原春男,井村英昭,鉛直円筒面から液体への自然対流熱伝達の実験:第 1 報,物性値代表温度による整理, **35-280** (1969) 2381-2389.
- [22] 藤井 哲,竹内正紀,藤井丕夫,鉛直円筒面から液体への自然対流熱伝達の実験:第 2 報,粘性係数の温度変化のみを考慮した整理, **35-280** (1969) 2390-2394.
- [23] 藤井 哲,竹内正紀,藤井丕夫,小さい突起をもつ鉛直円筒面から液体への自然対流熱伝達, **36-286** (1970) 994-999.
- [24] 藤井 哲,竹内正紀,藤井丕夫,自然対流境界層の流動状態と温度分布について, **36-288** (1970) 1349-1357.
- [25] 加藤清雄,伊藤 博,自然対流によるだ円柱の表面熱伝達(第 2 報), **33-246** (1967) 257-263.
- [26] 加藤清雄,伊藤 博,自然対流による傾斜円柱の表面熱伝達, **34-264** (1968) 1430-1436.
- [27] 甲藤好郎,増岡隆士,水平多孔質層内の自然対流発生限界, **32-243** (1966) 1708-1717.
- [28] 増岡隆士,多孔媒質と垂直固体壁面間の自然対流熱伝達の研究, **34-259** (1968) 491-500.
- [29] 泉 亮太郎,中村公之,直列フィン付伝熱面の自然対流熱伝達, **34-261** (1968) 909-914.
- [30] 影山 学,泉 亮太郎,垂直円管内における自然対流熱伝達, **35-275** (1969) 1482-1493.
- [31] 泉 亮太郎,杉浦俊二,垂直平板に振動を与えた場合の熱伝達, **36-291** (1970) 1918-1921.
- [32] 藤井 哲,宮武 修,藤井丕夫,田中宏史,村上憲太郎,非ニュートン流体への自然対流熱伝達の実験的研究, **38-315** (1972) 2891-2896.
- [33] 藤井 哲,宮武 修,藤井丕夫,田中宏史,サタバイ模型非ニュートン流体への自然対流熱伝達の数値解析, **38-315** (1972) 2883-2890.
- [34] 藤井 哲,本田博司,森岡 斎,一様加熱の下向き面に沿う自然対流, **39-317** (1973) 258-268.
- [35] 藤井 哲,藤井丕夫,鉛直面上の乱流自由対流に関する数値解析:第 1 報,空気の場合, **43-374** (1977) 3825-3834.
- [36] 藤井丕夫,藤井 哲,鉛直面上の乱流自由対流に関する数値解析:第 2 報,乱流の長さスケール,プラントル数および伝熱面加熱条件の影響, **44-384** (1978) 2797-2807.
- [37] 藤井 哲,小山 繁,鉛直細線からの自由対流, **44-377** (1978) 118-125.
- [38] 藤井 哲,藤井丕夫,松永 崇,水平円柱まわりの層流自由対流:グラスホフ数が比較的小さい場合の差分解, **44-387** (1978) 3826-3831.
- [39] 藤井 哲,藤井丕夫,田中宏史,藤山重生,一様発熱鉛直面から空気への層流自由対流熱伝達:固体ふく射を考慮した場合, **44-387** (1978) 3832-3837.
- [40] 藤井 哲,小山 繁,藤井丕夫,鉛直細線から空気への自由対流熱伝達に関する実験, **45-394** (1979) 833-841.
- [41] 藤井 哲,藤井丕夫,本田知宏,球から空気への層流自由対流熱伝達, **45-395** (1979) 993-1001.
- [42] 西川兼康,伊藤猛宏,山下宏幸,超臨界圧流体の自由対流熱伝達:第 2 報,伝熱面材質の影響, **38-308** (1972) 842-847.
- [43] 西川兼康,宮部喜代二,超臨界圧流体の自由対流熱伝達:第 3 報,伝熱面寸法の影響, **40-340** (1974) 3459-3466.
- [44] 西川兼康,伊藤猛宏,松本健一,黒木虎人,自由対流表面膜沸騰の研究:第 2 報,伝熱面直径および系圧力の影響, **38-308** (1972) 848-857.
- [45] 山下宏幸,伊藤猛宏,西川兼康,一様熱流束壁における自然対流熱伝達の変物性問題, **41-344** (1975) 1219-1225.
- [46] 伊藤猛宏,山下宏幸,西川兼康,自然対流の安定性に関する一問題, **42-363** (1976) 3515-3522.

- [47] 長谷川 修, 越後亮三, 宮崎芳郎, 田中芳久, 高橋英幸, 福田研二, ふく射が共存する自然対流熱伝達の実験的研究, **39-317** (1973) 250-257.
- [48] 中村 博, 結霜時における鉛直平板からの自由対流熱伝達, **39-324** (1973) 2522-2529.
- [49] 中村 博, 浅古 豊, 平行四辺形チャンネル内の熱伝達: 第 1 報, 自由対流熱伝達, **46-403** (1980) 471-481.
- [50] 中村 博, 浅古 豊, 任意形状の断面をもつ水平柱からの層流自由対流熱伝達, **43-371** (1977) 2649-2661.
- [51] 二神浩三, 阿部文明, 傾斜円管内強制 - 自然複合対流熱伝達 : 第 1 報, 層流域, **38-311** (1972) 1799-1811.
- [52] 二神浩三, 阿部文明, 傾斜円管内強制・自然複合対流熱伝達 : 第 2 報, 乱流域, **41-347** (1975) 2107-2118.
- [53] 田中宏明, 柘植綾夫, 平田 賢, 西脇仁一, 鉛直円管内強制対流乱流熱伝達における自然対流および加熱熱膨張による加速の影響 : 影響の発生限界および影響発生後の速度・温度分布, **39-327** (1973) 3394-3408.
- [54] 小野信輔, 川野英昭, 仁保 博, 福山五郎, 垂直加熱板を用いた自然対流による熱面発火, **41-350** (1975) 2960-2970.
- [55] 五十嵐 保, 加田昌司, 密閉空間内自然対流の振動現象 : 第 1 報, 水平円筒内加熱細線の場合, **41-345** (1975) 1500-1507.
- [56] 五十嵐 保, 密閉空間内自然対流の振動現象: 第 2 報, 水平長方形柱内線熱源の場合, **43-374** (1977) 3839-3847.
- [57] 菊地健太郎, 直流高圧電界の自然対流熱伝達におよぼす影響: 第 1 報, 実験的研究, **44-384** (1978) 2808-2816.
- [58] 菊地健太郎, 直流高圧電界による自然対流熱伝達の促進, **45-395** (1979) 1002-1002.
- [59] 増岡隆士, 坂本直樹, 勝原哲治, 環状多孔質層内の自然対流熱伝達, **46-405** (1980) 919-926.
- [60] 増岡隆士, 横手洋一郎, 勝原哲治, 垂直多孔質層内の自然対流熱伝達, **46-410** (1980) 1993-1999.
- [61] 菱田幹雄, 長野靖尚, 辻 俊博, 金子 功, 垂直平板上の自然対流乱流境界層 : 第 1 報, 乱流境界層内の速度と温度および乱流諸因子, **47-419** (1981) 1260-1268.
- [62] 菱田幹雄, 辻 俊博, 垂直平板の自然対流熱伝達, **47-424** (1981) 2314-2323.
- [63] 辻 俊博, 長野靖尚, 自然対流乱流境界層の基本特性, **54-507** (1988) 3204-3213.
- [64] 殷 耀晨, 長野靖尚, 辻 俊博, 自然対流乱流境界層の数値解析, **55-514** (1989) 1623-1630.
- [65] 辻 俊博, 長野靖尚, 田川正人, 青山睦朗, 自然対流乱流境界層の時空間構造, **56-527** (1981) 2019-2026.
- [66] 宮本政英, 岡山正義, LDV による垂直平板上空気の乱流自由対流境界層の研究, **48-427** (1982) 490-498.
- [67] 加藤泰生, 宮本政英, 栗間諄二, 兼安信太郎, 鉛直平行平板間の乱流自由対流熱伝達, **53-495** (1987) 3370-3376.
- [68] 日向野三雄, 液体層の熱的不安定性 : 第 1 報, 界面張力による場合, **47-413** (1981) 105-112.
- [69] 日向野三雄, 液体層の熱的不安定性 : 第 2 報, 浮力による場合, **47-413** (1981) 113-120.
- [70] 日向野三雄, 液体層の熱的不安定性 : 第 3 報, 浮力と界面張力が共存する場合, **47-420** (1981) 1571-1577.
- [71] 鳥居卓爾, 中山 恒, 下部を加熱された狭い垂直環状空間内自然対流 : 第 1 報, 対流発生限界の解析, **47-417** (1981) 812-820.
- [72] 鳥居卓爾, 中山 恒, 下部を加熱された狭い垂直環状空間内自然対流 : 第 2 報, 非線形数値解析, **47-421** (1981) 1792-1800.
- [73] 鳥居卓爾, 中山 恒, 下部を加熱された狭い垂直環状空間内自然対流 : 第 3 報, 各種要因が対流発生に及ぼす影響, **49-447** (1983) 2418-2426.
- [74] 前川 透, 棚沢一郎, 容器内水平流体層における密度差・表面張力差共存自然対流の不安定問題, **51-465** (1985) 1468-1474.
- [75] 前川 透, 棚沢一郎, 密度差および表面張力差によって駆動される水平流体層内自然対流に関する研究, **51-465** (1985) 1475-1482.
- [76] 前川 透, 棚沢一郎, 水平流体層内の自然対流発生に及ぼす鉛直磁場の影響, **52-474** (1986) 881-885.

- [77] 宗像鉄雄, 棚沢一郎, 凝固を伴う密度差・表面張力差共存自然対流の研究, **52-474** (1986) 876-880.
- [78] 宗像鉄雄, 棚澤一郎, 融液よりの結晶育成過程における自然対流に対する磁場の効果, **54-505** (1988) 2545-2549.
- [79] 浅古 豊, 中村 博, 平行四辺形チャンネル内の熱伝達: 第2報,同形状のチャンネルが無限に積み重なった場合の自由対流, **48-425** (1982) 105-112.
- [80] 浅古 豊, 中村 博, 平行四辺形チャンネル内の熱伝達: 第3報,ふく射を考慮した自由対流, **48-425** (1982) 113-121.
- [81] 浅古 豊, 中村 博, 平行四辺形チャンネル内の熱伝達: 第4報, 仕切り板内部での熱伝導を考慮した自由対流, **49-446** (1983) 2154-2162.
- [82] 前川 透, 棚沢一郎, 平行四辺形密閉空間の自然対流熱伝達に関する研究, **49-438** (1983) 449-455.
- [83] 稲葉英男, 関 信弘, 粒子充てん長方形密閉容器内の非定常自然対流熱伝達, **49-440** (1983) 859-868.
- [84] 稲葉英男, 金山公夫, 傾斜長方形容器内の自然対流熱伝達, **49-448** (1983) 2838-2846.
- [85] 稲葉英男, 福田武幸, 関 信弘, 福迫尚一郎, 水の密度逆転層を有する傾斜長方形容器内の自然対流熱伝達, **50-451** (1984) 743-751.
- [86] 稲葉英男, 福田武幸, 菅原征洋, 底面加熱を受ける長方形くぼみ内の強制および自然対流共存熱伝達, **51-467** (1985) 2414-2419.
- [87] 稲葉英男, 福田武幸, 菅原征洋, 球状粒子充てん傾斜空気層内の自然対流熱伝達, **51-471** (1985) 3766-3771.
- [88] 稲葉英男, 福田武幸, 等熱流束加熱条件下における傾斜矩形容器内の自然対流熱伝達, **52-473** (1986) 85-93.
- [89] 稲葉英男, 福田武幸, 傾斜多孔質層内の自然対流熱伝達, **52-473** (1986) 94-101.
- [90] 菅原征洋, 稲葉英男, 厨子浩嗣, 最大密度を中にもつ水平含水多孔層内の自然対流熱伝達挙動, **53-489** (1987) 1568-1572.
- [91] 稲葉英男, 貞森克也, 福田武幸, 菅原征洋, 球状粒子充填矩形くぼみ強制自然対流熱伝達に関する研究: 第1報,低修正レーレー数領域の理論的研究, **55-510** (1989) 457-462.
- [92] 部谷尚道, 竹内正紀, 木村照夫, 仕切板をもつ密閉容器内の自然対流熱伝達: 数値解析, **50-451** (1984) 724-732.
- [93] 木村照夫, 部谷尚道, 竹内正紀, 磯見英明, 互いに混ざり合わない流体が存在する密閉容器内の自然対流熱伝達, **51-464** (1985) 1251-1259.
- [94] 竹内正紀, 部谷尚道, 木村照夫, 田中義樹, 断面長方形の物体からの自然対流熱伝達, **51-462** (1985) 674-680.
- [95] 木村照夫, 部谷尚道, 竹内正紀, 臼井滝雄, 仕切板をもつ密閉容器内の自然対流熱伝達: 鉛直加熱壁に仕切板をもつ場合, **51-462** (1985) 681-687.
- [96] 竹内正紀, 部谷尚道, 木村照夫, 上向き水平面よりの自然対流の数値解析: 局所的に一樣加熱される場合, **51-462** (1985) 600-606.
- [97] 木村照夫, 部谷尚道, 竹内正紀, 磯見英明, 異種流体が密閉容器内で成層する場合の自然対流熱伝達現象, **52-474** (1986) 617-625.
- [98] 木村照夫, 部谷尚道, 竹内正紀, 臼井滝雄, 断面台形の密閉容器内の自然対流熱伝達: 実験的研究, **52-474** (1986) 870-875.
- [99] 竹内正紀, 部谷尚道, 木村照夫, 高松正仁, 水平発熱面上の自然対流熱伝達: 発熱面上方にある物体の影響について, **52-474** (1986) 886-893.
- [100] 木村照夫, 竹内正紀, 田中数則, 傾斜密閉容器内における成層流体の自然対流熱伝達: 第1報,数値計算による一考察, **54-504** (1988) 2067-2074.
- [101] 木村照夫, 竹内正紀, 田中数則, 傾斜密閉容器内における成層流体の自然対流熱伝達: 第2報,流れが境界層的となる場合の実験, **54-504** (1988) 2075-2082.
- [102] 増岡隆士, 河村 洋, 岡本芳三, 多孔質内自然対流における速度の壁面すべりについて, **47-423** (1981) 2157-2161.
- [103] 増岡隆士, 下村寛昭, 岡本芳三, 高温垂直多孔質層内の自然対流に及ぼす物性値変化の影響, **48-430** (1982) 1104-1110.
- [104] 増岡隆士, 榑崎浩二, 鶴田隆治, 遠田椿治, 積層構造をもつ鉛直多孔質層内の自然対流,

- 52-474 (1986) 866-869.
- [105] 中山 顕, 児山 仁, 温度成層化した多孔質層における加熱フィンまわりの自然対流, 52-481 (1986) 3282-3286.
- [106] 中山 顕, 児山 仁, 多孔質内の任意形状物体まわりの自然対流, 53-486 (1987) 566-572.
- [107] 藤井 哲, 藤井 丕夫, 本田 知宏, 空気の水平細線まわりの自由対流に関する理論と実験, 48-431 (1982) 1312-1320.
- [108] 佐古光雄, 柳田 昭, 千葉徳男, 水平円柱からの非定常自然対流の数値計算, 48-434 (1982) 2005-2012.
- [109] 赤木新介, 武村資文, 黒岩 正, 粘性変化を考慮した高粘性流体中における水平円柱まわりの非定常自然対流熱伝達, 50-460 (1984) 3024-3032.
- [110] 木本日出夫, 桃瀬一成, 加熱水平円柱近傍上方の自然対流場に関する一研究, 52-482 (1986) 3529-3536.
- [111] 斉藤 図, 岸浪紘機, 戸倉郁夫, 長沢聡也, 垂直ダクト内における縦一列水平円管群の自然対流熱伝達予測に関する実験的研究, 52-484 (1986) 4036-4040.
- [112] 山辺春雄, 武本行正, 山田日出夫, 一様加熱, 水平円柱からの層流自由対流, 53-490 (1987) 1807-1811.
- [113] 福迫尚一郎, 高橋正人, 岡垣 理, 成層をなす水平円管内流体の自然対流熱伝達, 55-514 (1989) 1631-1639.
- [114] 木枝茂和, 千々木亨, 島岡清重, 鈴木健二郎, 佐藤 俊, 鉛直円管内助走区間層流熱伝達：自然対流の共存効果, 48-430 (1982) 1111-1119.
- [115] 藤井 哲, 小山 繁, N. Buenconsejo Jr, 鉛直円管内の層流自由対流：平均速度の測定と理論的予測, 53-495 (1987) 3329-3337.
- [116] 相原利雄, 円山重直, 壁面熱流束一様の鉛直管路内層流自由対流熱伝達：定物性解と変物性解の統一表示, 51-461 (1985) 361-364.
- [117] 相原利雄, 円山重直, 崔 準燮, 壁温一様な鉛直管路内の層流自由対流熱伝達に及ぼす物性値温度依存性の影響, 51-471 (1985) 3582-3588.
- [118] 高松 洋, 藤井 丕夫, 藤井 哲, 球まわりの自由対流に関する数値解析：対流空間およびプラントル数の影響, 53-488 (1987) 1314-1319.
- [119] 持丸義弘, 球状キャビティにおける過渡自然対流, 53-494 (1987) 3070-3075.
- [120] 椎名保顕, 半球の内面に沿った自然対流熱伝達の解析, 53-496 (1987) 3742-3747.
- [121] 椎名保顕, 藤村 薫, 半球内自然対流熱伝達の実験的研究, 55-518 (1989) 3129-3135.
- [122] 北村健三, 込山公一, 斎藤 武, 密閉容器内自然対流の振動現象について, 50-451 (1984) 845-851.
- [123] 三角利之, 北村健三, ステップ後方はく離を伴う自然対流の流動および熱伝達, 53-487 (1987) 1072-1078.
- [124] 三角利之, 北村健三, 水平仕切板を設置した垂直伝熱面の自然対流熱伝達について, 54-504 (1988) 2083-2089.
- [125] 三角利之, 北村健三, ステップ後方はく離を伴う自然対流の流動および熱伝達：ステップ面加熱の場合, 56-521 (1990) 115-121.
- [126] 三田地紘史, 青木克之, 北村健三, 小松哲敏, 内部発熱流体の水平管内自然対流熱伝達, 51-472 (1985) 3989-3995.
- [127] 三田地紘史, 青木克之, 北村健三, 古内正美, 凝固と発熱を伴う水平管内自然対流熱伝達, 51-472 (1985) 3996-4003.
- [128] 三田地紘史, 五十嵐睦典, 発熱性流体の水平管内非定常自然対流熱伝達, 53-485 (1987) 169-175.
- [129] 三田地紘史, 五十嵐睦典, 寺野哲浩, 凝固と発熱を伴う水平管内自然対流熱伝達：第2報, 非定常の場合, 54-499 (1988) 655-660.
- [130] 三田地紘史, 寺野哲浩, 亀谷 博, 五十嵐睦典, 発熱性流体の水平管内非定常自然対流熱伝達：第2報, 流体の熱発生率が消滅する場合, 54-507 (1988) 3200-3203.
- [131] 能登勝久, 松本隆一, 高さと幅の小さい鉛直板周りの自然対流の三次元解析, 50-453 (1984) 1431-1437.
- [132] 能登勝久, 山崎善弘, 石田仁志, 松本隆一, 水平線熱源からの浮力ブルームの揺動：層流域内の揺動スペクトルおよび揺動諸因子, 50-457 (1984) 2179-2188.
- [133] 能登勝久, 松本隆一, 自然対流によるカルマン渦列の崩壊と発達, 50-460 (1984) 3015-3023.

- [134] 高田保之, 福田研二, 長谷川 修, 傾斜環状多孔質層内の自然対流熱伝達に関する実験的研究, **50-451** (1984) 832-838.
- [135] 饒 燕飛, 福田研二, 長谷川 修, 水平環状多孔質内非定常三次元自然対流のガラキン法による解析, **54-500** (1988) 938-947.
- [136] 饒 燕飛, 福田研二, 長谷川 修, 水平環状多孔質内二次元自然対流の安定性解析, **54-508** (1988) 3501-3505.
- [137] 守田幸路, 三木康臣, 中村陽一郎, 近藤哲也, 福田研二, 長谷川 修, 饒 燕飛, 水平環状流体層内自然対流の液晶懸濁法による可視化実験, **55-509** (1989) 146-151.
- [138] 亀ヶ谷 博, 浅野直輝, 石黒亮二, 固体と流体との熱連成場解析のための変分原理：第 1 報, 定常自然対流熱連成場について, **54-505** (1988) 2560-2567.
- [139] 亀ヶ谷 博, 浅野直輝, 石黒亮二, 固体と流体との熱連成場解析のための変分原理：第 2 報, 非定常自然対流熱連成場について, **56-530** (1990) 3071-3079.
- [140] 石原 勲, 村上 巧, 南 秀一, モアレ干渉法による自然対流温度場の計測, **63-614** (1997) 3370-3374.
- [141] 篠木政利, 小澤 守, 岡田年史, 木村一郎, 自然対流場における速度場の三次元画像計測, **66-645** (2000) 1462-1469.
- [142] 稲垣照美, 小森勝夫, 垂直な平板に沿う自然対流乱流熱伝達のモデル化に関する一考察, **58-546** (1992) 522-526.
- [143] 石田秀士, 久禮一樹, 木本日出夫, 鉛直平行平板間の自然対流場の準定常性とカオス性, **65-630** (1999) 761-767.
- [144] 工藤一彦, 黒田明慈, 谷口 博, 大高 円, 牛島哲洋, 小幡正一, 非灰色ガス噴流の放射・対流共存伝熱解析, **61-586** (1995) 2235-2240.
- [145] 山口義幸, 浅古 豊, FAGHRI Mohammad, ハニカムコアで仕切られた鉛直多孔質層内の自然対流-ふく射複合熱伝達：第 1 報, 数値解析, **63-610** (1997) 2119-2126.
- [146] 増田善雄, 木村繁男, 林 一夫, 流体物性が著しく変化する場合の多孔質体内自然対流熱伝達, **57-538**, (1991) 2065-2069.
- [147] 稲葉英男, 尾崎公一, 野津 滋, 比較的大きな球状粒子を充填した下面加熱・上面冷却を受ける水平粒子層の対流熱伝達, **59-560** (1993) 1194-1201.
- [148] 西村龍夫, 井本 勉, 若松幹生, 密閉容器に満たされた二成分ガス系の二重拡散対流に関する数値的研究, **62-593** (1996) 271-277.
- [149] 菅原征洋, 藤田 忠, 氷層の温度・濃度複合融解：第 2 報, 対流の可視化観察による数値予測の進展, **63-612** (1997) 2784-2792.
- [150] 小泉博義, 細川 巖, 下面加熱の水平長方形管内複合対流中のベナード渦の生成制御に関する研究：カオス特性を中心として, **58-547** (1992) 891-897.
- [151] 鄭 忠孝, 大萱見吾, 棚橋隆彦, GSMAC 有限要素法による印加磁場下の Rayleigh-Benard 対流の解析, **66-648** (2000) 1959-1966.
- [152] 沖 良篤, 棚橋隆彦, GSMAC 有限要素法による内部発熱を伴う電磁熱流体の正方形 Cavity 内自然対流解析：第 1 報, 誘導加熱項の評価 (小特集 電磁力関連流体工学), **59-562** (1993) 1835-1842.
- [153] 多田幸生, 滝本 昭, 植田大作, 林 勇二郎, コロナ放電を利用した対流伝熱の促進：流れと平行なワイヤ電極配置に対する実験, **57-533** (1991) 217-222.
- [154] 中里典生, 平沢茂樹, 森 利行, 大黒崇弘, 電子機器きょう体内フィン付鉛直基板の自然対流冷却, **61-587** (1995) 2677-2682.
- [155] 宗像鉄雄, 棚澤一郎, 高周波加熱 FZ 法によるシリコン単結晶育成時の融液内対流に関する研究, **64-621** (1998) 1478-1485.
- [156] 塩澤藤一郎, 津田宜久, 佐賀徹雄, 内田喜八郎, 後藤周一, 小林敏雄, 自動車用ヘッドランプ内の自然対流解析：SHT 法による部品表面温度の予測, **66-652** (2000) 3100-3107.
- [157] 梅村 章, 大規模マントル対流の生成機構, **57-543** (1991) 3859-3866.
- [158] 佐田幸一, 大気対流境界層を模擬するための風洞実験, **58-556** (1992) 3677-3684.
- [159] 砂盃祐司, 末次賢司, 服部直三, 鉛直円柱からの自然対流伝達, **67-653** (2001) 300-303.
- [160] 井上 健, 服部直三, 鉛直円柱群からの強制・自然混合対流熱伝達, **68-674** (2002) 2850-2855.
- [161] 姫野修廣, 日向 滋, 成田裕一, 渡辺雅邦,

- 鉛直二平板間安定密度成層内の自然対流熱伝達：等温加熱条件下での初期温度の影響，**67-655** (2001) 781-788.
- [162] 三角利之，北村健三，両端が開放されたスロット内自然対流の流動と伝熱，**67-655** (2001) 789-797.
- [163] 池田雅弘，平田 賢，水平平行二平板間自然対流における対向壁面への熱伝達：第 1 報上壁よどみ点における伝熱特性 **68-667** (2002) 806-812.
- [164] 三角利之，蒲池雅樹，北村健三，垂直な加熱平板列まわりに生じる自然対流の流動と伝熱，**68-671** (2002) 2106-2113.
- [165] 姫野修廣，辻井隆也，金丸 智，長田真巳，鉛直二平板間密度成層内の自然対流熱伝達に及ぼす伝熱面間距離の影響，**73-731** (2007) 1534-1540.
- [166] 姫野修廣，日向 滋，小室秀文，増田千尋，二重円管内密度成層中での自然対流熱伝達：内管加熱・外管冷却の場合，**68-668** (2002) 1198-1205.
- [167] 舟渡裕一，鈴木立之，水平環状空間内の水の密度逆転を伴う 3 次元自然対流熱伝導 **69-680** (2003) 881-887.
- [168] 姫野修廣，日向 滋，増田千尋，二重円管内密度成層中での自然対流熱伝達：外管加熱・内管冷却の場合，**69-685** (2003) 2099-2106.
- [169] 稲葉良知，張 佑杰，武田哲明，椎名保顕，鉛直同心二重円筒内高温気体の自然対流熱伝達に関する研究，**70-694** (2004) 1518-1525.
- [170] 姫野修廣，増田千尋，二重円管内密度成層中での自然対流熱伝達に及ぼす内管径の影響：内管径が大きい場合の影響，**72-716** (2006) 993-1000.
- [171] 小林 孝，大串哲朗，藤井雅雄，自然換気型電子機器筐体の熱設計手法の研究(発熱密度の異なる鉛直平行基板群を有する筐体内の自然対流熱伝達特性)，**68-669** (2002) 1553-1560.
- [172] 矢澤和明，西野泰史，中川慎二，石塚 勝，電子機器チャンネル壁自然対流冷却の PIV 実験計測と数値解析，**72-714** (2006) 420-427.
- [173] 谷川洋文，増岡隆士，小松直樹，井上達哉，感温スクリーンによる熱対流制御に関する研究，**67-660** (2001) 2068-2074.
- [174] 藤井 哲，田代光男，眞喜志 治，水蒸気-空気混合気の細い鉛直管外面への自由対流層流膜状凝縮，**67-657** (2001) 1191-1196.
- [175] 藤井 哲，田代光男，眞喜志 治，水蒸気-空気混合気の細い鉛直管外面への自由対流凝縮，**67-662** (2001) 2503-2509.
- [176] 増岡隆士，谷川洋文，山崎祐光，積層多孔質層内自然対流のカオス挙動，**69-680** (2003) 938-945.
- [177] 椎名保顕，石川広太，菱田 誠，空けき率の高い水平多孔質層内の自然対流熱伝達，**73-728** (2007) 1045-1051.
- [178] 上田忠雄，小河原加久治，佐伯壮一，固液懸濁自然対流場における固相偏析に関する数値実験，**68-674** (2002) 2735-2740.
- [179] 稲葉英男，松尾幸一，堀部明彦，対向垂直加熱・冷却壁を有する矩形密閉容器内の潜熱マイクロカプセルスラリーの熱伝達，**69-685** (2003) 2122-2129.
- [180] 北川石英，小菅桂太，内田健司，萩原良道，微細気泡注入による層流自然対流場の伝熱促進，**73-732** (2007) 1687-1695.
- [181] 北川石英，内田健司，萩原良道，サブミリバブルによる層流自然対流熱伝達の促進に対する気泡径の影響，**74-748** (2008) 2621-2629.
- [182] 田坂裕司，柳澤孝寿，山岸保子，吉田将隆，武田 靖，超音波流速分布計測法による液体金属流動計測：第 2 報液体ガリウム層における熱対流運動の可視化，**72-718** (2006) 1559-1565.
- [183] 松隈洋介，阿部 豊，格子ガスオートマン法による複雑形状流路内の自然対流解析，**67-654** (2001) 313-320.
- [184] 三好市朗，槇原孝文，棚橋隆彦，CIP 有限要素法を用いた $Ra=10^9$ における立方体キャビティ内自然対流解析，**68-666** (2002) 309-316.
- [185] 川崎泰一，葛原道久，格子ボルツマン法による回転および成層流体中での自然対流のシミュレーション，**69-684** (2003) 1776-1783.

原子力発電プラントと伝熱 *Nuclear Power Plants and Heat Transfer*

成合 英樹 (筑波大学)

Hideki NARIAI (University of Tsukuba)

e-mail: hdnariai@mail1.accsnet.ne.jp

1. はじめに

原子力平和利用の分野は広いが、本稿では日本の原子力発電と伝熱流動との係わりにつき、特に軽水炉に焦点を絞って 50 年にわたる歴史を記す。ここでは大きく 10 年毎に時代を分けて、主に筆者の経験をベースに各時代及び原子力伝熱流動における進展や特徴を記すこととする。

2. 原子力開発と伝熱流動研究の黎明期 (1960~70 年)

2.1 原子力平和利用の始まり

1953 年 12 月の国連での米国アイゼンハワー大統領の演説「Atoms for Peace」により、原子力の平和利用が始まった。その 3 ヶ月後には日本でも原子力予算 2 億 3 千 5 百万円が計上されて、54 年 4 月に決定した。この 3 月にはビキニ環礁での水爆実験による第五福竜丸の被災（久保山愛吉さんが半年後に亡くなる）があったが、それまで原子力の平和利用に反対してきた学術会議も、民主・自主・公開の 3 原則を提言してこれを容認した。この提言は原子力基本法に盛り込まれた。

これにより日本の各機関で原子力に係わる推進方策の検討と勉強が始まった。早速 54 年度に、国費により米国への第一回原子力留学生在が派遣され、翌 55 年には原子力基本法、原子力委員会法、原子力設置法のいわゆる原子力 3 法が成立し、日本原子力研究所(原研)の設置もなされた。

産業界の動きも活発で、57 年には日本原子力発電(原電)が設立され、当時既に建設されていた英国のコールダーホール型ガス冷却炉の導入が決定された。安全確保のための議論が活発になされたが、特に日本の地域特性から耐震性の問題が検討された。一方その頃、米国では軽水冷却型炉として、原子力潜水艦用に開発された加圧水型炉(PWR, Pressurized Water Reactor)を改良したものと、新たに直接原子炉内で蒸気を発生させる沸騰水型炉(BWR, Boiling Water Reactor)の開発が進められて

おり、産官学で活発な研究がなされていた。我国でも軽水炉である動力試験炉 JPDR (Japan Power Demonstration Reactor) が導入され、原研に建設されて 63 年 10 月 26 日に初発電に成功した。60 年頃にはこの軽水炉の商業炉としての導入が本格的に検討され始めた。

2.2 沸騰分科会

この頃日本の各大学でも原子力の利用に対する関心が高かった。そして機械学会で一色尚次先生(当時船舶技研)を主査として「沸騰熱伝達に関する調査研究分科会」が 61 年 4 月~64 年 3 月まで行われた。一色先生はまだ 30 歳台後半で若かったが、MIT で Heat Transfer Lab. 創設者の Rohsenow 教授の研究室に留学し、沸騰の研究をしてきたばかりであった。筆者は 62 年 4 月に大学院へ進学したが、冷凍機伝熱管の沸騰伝熱の実験をしていたこともあり、指導教官の内田秀雄教授の代理でこれに参加した。米国では戦後、原子炉の開発に必要な燃料棒の冷却に関して抜山曲線を含む沸騰の研究が盛んであり、Rohsenow, Forster, Zuber 等の研究や、強制流動における Tong, Jens & Lottes 等の研究が進められていた。ソ連の Kutateladze の研究もあった。日本でも一色先生のシュリーレン写真による沸騰気泡の現象観察や九州大学の山県・西川のプール核沸騰の式、東大の西脇仁一研究室の林のプール沸騰バーンアウト理論等もあった。委員会では主に外国の論文紹介とそれをベースにした議論が活発になされた。大学の研究者は主にプール核沸騰のメカニズムに関心を持った。一方産業界からは東芝・日立・三菱等の若い研究者が出席しており、管内流動沸騰の実験について寄与した。いずれにしても委員である内田、西川兼康先生等も 40 歳台前半、橘藤雄先生も 50 歳前ということで、若い研究者による活発な議論がなされた。

この成果は 65 年 6 月に機械学会より、「沸騰熱伝達」[1]として出版された。超臨界領域、液体金

属、有機液体等の沸騰についても載せられている。また、委員会での主な議論が詳細に載せられているのも特徴で、これを読むと現在でも共通する議論も多い。いずれにしても一色先生の情熱を感じる委員会であった。

2.3 パーンアウト分科会

沸騰分科会の後、これを引き継ぐ形で 64 年 4 月より 2 年間行われたのが機械学会のパーンアウト分科会である。強制流動沸騰のパーンアウト（沸騰限界熱流束）データが、実験者・試験装置によりばらつく要因を明らかにしようということで、橋藤雄先生を主査、鳥飼欣一先生を幹事として科学技術庁の予算により行われた。すなわち、同じ寸法のテストピース（ステンレス管）を用いて各機関で強制流動沸騰限界熱流束の実験を行い、データのばらつき具合を調べ、その要因を究明しようとしたものである。実験の結果はやはり各機関でばらついた。各機関の試験装置のループの硬さ加減が影響しているように思えた。この実験は各大学・試験研究機関が参加したので、内田研から参加した筆者にとっては各大学等に多くの友人ができた。

2.4 SAFE プロジェクト

米国からの軽水炉の導入が考えられていた 63 年に、軽水型動力炉の「冷却材喪失時の工学的安全防護装置の有効性」の研究が、SAFE (Safety Assessment and Facilities Establishment) Project として、科学技術庁の原子力平和利用研究委託費により行われた。米国で開発された軽水炉の反応度制御や事故対応などは米国で多くの研究がなされた。しかしシステムとして考えた時、大きな冷却系配管の破損による冷却水の喪失に備えた非常用冷却系等の安全防護装置が必要である。そのためには配管破断時の現象把握と安全防護装置の有効性確認が重要であるが、米国では LOFT (Loss of Fluid Test) という大型試験の計画があるだけの段階であった。この研究を提案して委員長を務めた内田先生は、「水をかければ冷えるのは当たり前なのに何を研究するのか」という意見を説得するのが大変だったという事である。この研究は東京電力(東電)も熱心で、日立・東芝・三菱の 3 社を中心に実験が行われた。私は内田先生から幹事として議事録を取るように言われ出席した。具体的には「高圧容器からの高温高圧水の流出挙動」、「コアスプレイの冷却効果」、「格納容器スプレイ冷却とヨウ素除去効果」、「ケーブル等貫通部の機

密性」等の大型の実験が行われた[2]。この成果として、燃料棒のリウエット特性に係わる山内の式、非凝縮性ガス混在時の凝縮熱伝達に関する内田式・田上式・佐川式等、長く原子炉の安全解析で用いられた式が出された。特に凝縮熱伝達率の低下に関する内田式は、近年の次世代炉評価でも利用された。ブローダウン（高温高圧水の流出）時の臨界流に対する小笠原の理論もあった。当時は電気試験所もブローダウン試験を行っていたが、電気試験所の電子技術総合研究所への衣替えもあって、安全研究は原研で継承されることとなった。

2.5 黎明期の伝熱研究の状況

軽水炉の導入が考えられ始めた 1960 年当時は、まだ計算尺と手回しのタイガー計算機、そして必要ならアナログ計算機による解析が行われていた。実験的研究が主流であり、教科書も実験式が書いてある McAdams の著書が実用的な書として用いられていた。しかしこの頃、境界層理論の適用により单相流が半理論的に扱えるようになっており、少し理論的な研究が増えてきた。各大学の熱の研究室では実際の物に係わる研究が多く、单相流、沸騰・凝縮、熱輻射そして熱物性を総合的に扱っていた。

伝熱研究会が設立されたのは沸騰分科会が始まったのと同じ 61 年のことで、新しい研究の促進が図られた。そして第 1 回日本伝熱シンポジウムが 64 年に京都で開催された。この時は 1 研究室 1 発表ということで、いろいろな分野の研究を皆で議論しようという意図があったと思われる。

当時は現在のような電子計算機がなかったが、伝熱計算には Re の 0.8 乗とか、 Pr 数の 1/3 乗等の計算が必要である。この計算も計算尺とタイガー計算機及び指数表を用いて行った。後に機械学会の伝熱工学資料の改定の時、この指数表はもういらぬのではないか、と主査の平田賢先生がおっしゃられて削除することになったが、確か甲藤好郎先生が残念がられていたのを思い出す。この表を使う計算では、桁数を頭に置いて概略を理解する訓練にもなるという思いでもあったろう。

いずれにしても、SAFE プロジェクトでは冷却水喪失時の圧力容器と格納容器内の過渡事象の全過程を計算する計算方法も産業界は未経験で、内田先生が自ら手法を提示されたことを思い出す。

3. 軽水炉の導入と伝熱流動 (1970~80 年)

3.1 軽水炉の導入

60 年代の所得倍増論に象徴される経済復興によ

り、70 年代前半に円の切り上げがなされた。米国からの軽水炉の導入は、General Electric 社(GE)の BWR と Westinghouse 社(WH)の PWR であった。65 年頃の正式発注で、初号機として BWR は原電敦賀発電所の 1 号機、PWR は関西電力(関電)美浜発電所の 1 号機で大阪万博で賑わう 70 年であった。続いて 71 年 3 月には BWR の東電福島第一原子力発電所 1 号機が営業運転を開始した。当初のプラントは、ターンキー契約で、米国の設計通りに製作を行い、電力会社はただ運転のキーを回せば良いというものであった。すなわち、完全な導入技術と言ってよい。機器の製作を行った日立・東芝・三菱は、米国の図面通りに製作図面をつくらねばならないが、フートポンド単位の図面をメートル単位に直すのに気を使ったということである。その後の 2 号機からは日本のメーカーが主になって製作したが、いずれにしても、米国等のように厳しい実験を重ねての軽水炉開発の経験が日本にはなく、導入技術であることを忘れてはならない。

70 年代は、73 年のオイルショックでエネルギー対策が重要な時期であった。産業界の省エネルギーに対する努力も大きかったが、70 年代に 20 基の軽水炉プラントが営業運転を開始して電力供給に貢献したのも国の発展には大きかった。

3.2 改良標準化と研究開発

運転開始したプラントは、しかし当初から初期トラブル、特に SCC(Stress Corrosion Crack, 応力腐食割れ)問題で苦勞し、そのための対策で稼働率も低かった。それらの経験を踏まえて第一次・第二次改良標準化が行われ、プラントの性能向上や運転性能の向上がなされた。また 80 年代に入る前から開始された第三次改良標準化では、改良沸騰水型炉 ABWR と改良加圧水型炉 APWR の開発がなされ、日本の大型プラントとして優れたものをつくりあげた。

この間、電力・メーカーは大型試験装置による実証試験を進めたが、76 年に国と産業界とで設立した原子力工学試験センター(NUPEC, Nuclear Power Engineering Test Center)の試験研究が大きく貢献した。特に耐震のための多度津の振動台はその後の日本の耐震技術向上に貢献した。また、伝熱に係わるものとしては燃料集合体の開発がある。特に BWR の燃料棒の限界熱流束値は燃料支持格子の構造に依存するため、格子の形状を工夫した実物大の試験を行って実証データを取得したが、

その詳細な格子構造は企業機密ともなっている。

3.3 安全研究の進展

大型発電用軽水炉の安全研究は、SAFE プロジェクトのあと原研で、冷却材喪失事故対応のための ROSA (Rig of Safety Assessment)計画として進められた。高温高压水の破断配管からのブローダウン特性に焦点を絞った ROSA-1 は 70 年より試験を開始した。米国では LOFT 計画のための計算コード開発を目的として、圧力容器に発熱長 23cm の電気加熱棒及び 1 ループの冷却系をつけたブローダウン試験装置によるセミスケール(Semiscale)実験が行われていたが、71 年の 1 月に、想定通りに炉心に水が流れないという問題が生じた。複雑な流体の挙動であるからその挙動を解明しようというのが実験の目的なので当然の結果でもある。しかしこのことが安全問題を世間に知らしめることとなって、原研の安全研究の促進につながった。ROSA 計画の拡大が図られ、73 年には反応度事故に係わる原子炉安全性研究炉 NSRR (Nuclear Safety Research Reactor)による研究と日・米・独が共同して行う大型再冠水試験が開始された。そして原研の安全研究を中心に、安全研究の現状を記した「原子炉安全工学」が村主進氏編著で 75 年に発行された[3]。また 75 年に日本における冷却材喪失事故 LOCA (Loss of Coolant Accident)時の炉心冷却系に対する非常用炉心冷却系 ECCS (Emergency Core Cooling System)の性能評価指針の制定にもつながった。

なお LOFT 計画は、電気出力 1100MWe 級の PWR を想定し、実炉を約 1/60 にした熱出力 5 万 5 千 kW のモデル装置である。この装置は約 10 年かかって 76 年に完成し、5 回の加熱実験を行った後、78 年に実際の核燃料による実験を行い、ECCS の有効性の確証を行った。83 年からは OECD の計画として国際協力の下に実験が進められ、89 年に終了した。

このように本格的な安全研究が始まったが、大きく分けると、67~71 年をブローダウン時代、71~79 年を ECCS 時代とすることが出来る。この ECCS 時代は原研の安全研究の活性期で、上記に記した以外に、格納容器スプレイ、BWR 格納容器の動荷重に係わる圧力抑制試験等が行われ、また国際的な活動も増加した。

また 70 年代は LOCA/ECCS 研究に関する電力共同研究の全盛時代でもあった。様々な分離効果試験やシステム挙動試験が実施された。産業界と原

研の交流も盛んであった。これら産業界と原研の研究成果の多くは 78 年の ECCS 性能評価指針の改定時に反映された。

3.4 安全解析コードの進展

以上のような実験的な挙動解明と共に、注目すべき点は安全解析コードの進展である。複雑な原子炉内の熱流動過渡事象を精度良く解析するためには大型の解析コードが必要である。米国の Idaho 国立研究所で 68 年に開発された RELAP コードは気液混相の熱流体の流動挙動を解析するためのもので日本にも導入された。しかし巨大なシステム内の流れを模擬するために、システム内をボリュームに分け、それをジャンクションで結ぶこと、伝熱や圧力損失等に実験式等を用いること、などの基本的なモデル化があり、特に後者は現在まで続く課題である。77 年には Los Alamos 国立研究所で TRAC コードが開発された。これらはその後計算機や技術の進展と共に改良が加えられつつ、現在まで軽水炉の安全解析に用いられている。

このような安全解析においては、解析で用いる実験式の妥当性が結果に大きく影響する。そこで機械学会では、78~81 年に原研の山崎弥三郎氏を主査として「原子炉安全解析に関する実験式の調査検討分科会」を設置し、実験式とその使われ方の妥当性等を調査・検討した。

3.5 原子力開発と規制の改革

74 年に原子船「むつ」の洋上での出力上昇試験中に放射線漏れトラブルがあり、約 50 日間の漂流となった。当時船舶技研の原子力船部に所属していた筆者は、幹部より放射線と放射能の違い等を聞かれたことを思い出す。これを契機に国の原子力体制の見直しがなされて、78 年 10 月に原子力安全委員会が設置され、一次審査が行政庁（発電炉は通産省）、二次審査が原子力安全委員会という体制となった。その半年後の 79 年 3 月に米国で TMI 事故が発生した。

4. 科学技術の高度進展と原子力（80~90 年）

4.1 日本の好景気と科学技術の発展

80 年代は、科学技術の発展が進むと共に経済も順調に発展しており、日本はいわゆるバブルの時代であった。原子力は TMI 事故やチェルノブイリ事故にも係わらず 16 基の軽水炉プラントが営業運転を開始した。高度科学技術社会となり、85 年の日航ジャンボ機事故、86 年のチャレンジャー号事故とチェルノブイリ事故等の問題を抱えつつも、

先端技術・次世代技術・マイクロ伝熱等へと進んでいった。

4.2 TMI 事故・チェルノブイリ事故と安全対策

79 年 3 月に、炉心溶融となったスリーマイル島 (TMI) 原子力発電所 2 号機の事故が発生した。TMI2 号機は PWR で、事故の発端は二次冷却系の給水ポンプの停止という単純な事象であったが、一次冷却系の圧力が上昇し、加圧器逃し安全弁が開いた。この安全弁が開いたまま固着したことに運転員が気がつかなかったため、小さな開口からの冷却材喪失事故と同じことになり、さらに運転員の操作の誤りもあって、炉心上部が露出して燃料の破損溶融となったものである。この事故は、これまでの最大想定事故を中心に対策を施してきた安全研究に影響を与えた。すなわち、75 年頃から確率論的リスク評価 (PRA, Probabilistic Risk Assessment) が MIT のラスムッセン等により行われた。その報告では最大配管の破断想定より、小破断の冷却材喪失事故の方が確率的に大きなリスクとなりうるというものが含まれており、小破断相当の漏洩から始まった TMI 事故に相当するものであった。このことが PRA (確率論的安全評価 PSA, Probabilistic Safety Assessment ともいう) の有効性を世に知らしめることとなった。それと共に、安全確保に係わる多くの指摘がなされ、シビアアクシデント (SA) に係わる安全研究が進められた。原研の ROSA 計画も従来の最大配管の破断事故から小破断事故事象に対する研究へと進んだ。しかし、SA 研究を直接本格的に進めようとする計画は日本ではそれほど大きくはならず、原研で主に国際研究への参加等を行うにとどまった。

しかし、86 年のチェルノブイリ事故は国際原子力機関 IAEA を始め多くの国の関心を一層高めた。さすがに日本でも SA の重要性が国及び産業界でも認識され、87 年 7 月に原子力安全委員会の原子炉安全基準専門部会に共通問題懇談会（共通懇）が設けられて検討を開始した。同時に当時の通産省の意向で NUPEC で SA 研究がスタートした。また原研も 88 年にアルファ計画による SA 研究を開始した。

4.3 膜沸騰及びクエンチ挙動調査研究分科会

沸騰伝熱の分野では、沸騰分科会から 20 年が経過したこともあり、「膜沸騰およびクエンチ挙動調査研究分科会」を 82 年に機械学会に設置し、鳥飼欣一主査のもとで、その後の沸騰分野の研究の進展をレビューした。その成果をベースに、89 年

に「沸騰熱伝達と冷却」が日本工業出版より出版された[4]。これは基礎編と応用編からなるもので、特に応用編では、伝熱促進技術や原子炉の安全に係わる蒸気爆発、デブリベッド冷却、再冠水冷却等も含まれている。沸騰分科会から 20 年の日本における沸騰研究の進展が見て取れる。

4.4 熱流動数値解析の進展

80 年代には、先端技術・マイクロ伝熱等が進展した時代であり、コンピュータの大型化・高速化が進んだ。これに伴い各分野で計算技術が進んだが、原子力分野においても熱流動数値解析の進展がなされた。原子炉の単相流と二相流に対する数値解析も進展し、原研・動燃・電力中央研究所(電中研)等、そして産業界でも過度な保守性をもった許認可安全解析コードに代わっての 70 年代の研究成果をベースにした現実的な許認可安全解析コード体系の開発を目指した新たな取組みがなされた。すなわち原研を中心とする軽水炉の過渡二相流現象解析、動燃・電中研での高速増殖炉のナトリウムの流動を対象とする単相流解析、そして産業界での実用的な安全解析コードの開発である。原子力学会で 83 年より 91 年まで、熱流動数値解析委員会でこれらの議論を行った。その成果をベースに、二相流について「気液二相流の数値解析」[5]が出版された。

当時の日米の熱水力安全解析コードの状況に対する筆者の印象は以下の通りであった。すなわち、米国では大学の実験研究といえど、大型解析コードへの適用を念頭においており、大学・研究機関・メーカー・ソフト会社が協力分担して開発している。一方、日本では大型解析コードは海外から導入する。従って実験屋と解析屋が協力して開発する基盤が弱く、従って解析コードを使いこなすのに時間がかかる。そして実験屋は現象把握のみに関心があり、解析コード屋はコードの運用に精一杯で実現象に関する知識が余りない。このことは長い間の日本の弱みでもあった。

4.5 気液二相流の流動不安定現象

沸騰水型軽水炉においては、核的な動特性が炉物理の主要課題であり、開発当初から研究されていた。しかし、核的な変動がなくとも長い二相流路においては熱流動的に不安定流動が生ずることがあり、特に核特性と熱流動特性がカップリングした不安定流動問題が米国で問題視されていた。このことは沸騰分科会の頃でも産業界の委員から指摘されていたが、日本の熱流体研究者はそれほ

ど関心を示さなかった。流動変動の不安定流動は機械力学的振動問題として扱われていたこともあるが、基本的にはシステムの基本的開発を独自に行っていなかったことも要因であると考えられる。欧米では 60 年代後半にこの解明がなされた。

日本で熱水力不安定問題に広く関心がもたれたのは、動力炉核燃料開発事業団(動燃)で検討された高速増殖原型炉の貫流型蒸気発生器における不安定流動特性で、これにかかわる多くの研究が進められた。

80 年代後半に La Salle2 号炉での炉心が一体的に振動する炉心安定性や Caorso 炉での炉心の領域で逆位相の振動をする領域振動などが問題となり、進展した計算技術を駆使しての大型原子炉における安定性解明へと結びつくこととなる。この安定性の評価では、密度波振動と呼ばれる不安定流動であるチャンネル(熱水力的)安定性と核熱特性の効果である炉心安定性の両者を満足することを安定条件としてきたが、その後、炉心の領域で相互に変動を繰り返す領域安定性の評価が計算で行えるようになり、現在はこれら 3 つの条件で評価がなされている。

日本原子力学会では、研究専門委員会を設置してこれらを審議検討し、後に「BWR 核熱水力安定性評価の現状と課題」としてまとめた[6]。

5. 情報化社会とシビアアクシデント (90~2000 年)

5.1 情報化社会の進展

高度技術の発展は 90 年代に入り情報化社会をグローバルに進展させたが、これは 91 年のソ連の崩壊をもたらした。また日本のバブルも崩壊した。日本は混迷状態になり失われた 10 年と言われ、さらに続くその後の 10 年を合わせて現在では失われた 20 年と言われている。

5.2 原子力プラントの事故トラブルの続発

軽水炉プラントは 90 年代に 15 基が営業運転を開始し、原子力の役割は引き続いて重要であった。注目されることは第三次改良標準化プラントとして我国が主導して開発した ABWR と APWR である。このうち ABWR は東電柏崎刈羽原子力発電所の 6, 7 号機として 96 年と 97 年に営業運転を開始した。

しかし丁度この時期には大きな事故・トラブルが続発した。89 年の東電福島第二 3 号機再循環ポンプ破損事故、92 年の関電美浜発電所 2 号機蒸気

発生器細管破断事故，95 年の動燃もんじゅ 2 次系ナトリウム漏洩事故，97 年の動燃アスファルト固化処理施設火災爆発事故，99 年の JCO 事故等である。これらの事故は，それぞれ重要な反省点を事業者・規制側にもたらしたが，同時に情報化社会の進展により社会的な問題となったことも大きい。特に JCO 事故は作業者の死者 2 名を出すという事態となり，規制制度を含む改革へと進んだ。

5.3 原子炉の SA 対策と受動型安全炉の開発

原子力安全委員会は 87 年に共通懇を設置して検討していた SA 対策として，92 年 5 月に「発電用軽水型原子炉施設における SA 対策としてのアクシデントマネージメント(AM)」を決定した。この要点は，事業者が効果的な AM を自主的に整備して万一の時に的確に実施できるよう強く奨励するものである。特にこれは規制的な措置ではなく，通産省は PSA の結果等からその技術的有効性を評価するものとした。そして民間では，民間自主基準としての「次世代軽水炉の格納容器設計における SA の考慮に関するガイドライン」を 99 年に作った。一方 NUPEC では，水素燃焼，放射性物質挙動，格納容器耐性，溶融炉心と冷却材・構造材・コンクリートとの相互作用の実験や解析評価，そして海外との研究協力を進めた。また，秋山守先生等の大学研究者は，SA 時の問題とも係わる蒸気爆発現象に関し 93 年から 5 年間研究を進めた。

このような SA については，91 年より日本原子力学会で専門委員会が設置され，現状調査や SA 時の熱流動現象評価等が行われた[7]。しかし，90 年代後半より研究費の減少もあり新しい研究者が少なくなりつつあった。

90 年代の世界の新型炉開発の潮流は，SA 対策を強化した受動型安全炉の開発であった。自然力を利用したコアキャッチャーや静的格納容器冷却系の研究が盛んに実施された。日本でも全交流電源喪失時でも格納容器の健全性を維持できる静的格納容器冷却系の大規模な実験が産業界や原研で実施され，その適用性が実証された。しかしこれを採用するまでには至らなかった。伝熱流動研究も実機開発に直接係わる大型実験は減り，コンピュータの進展に伴って発達したエンジニアリングワークステーションを活用したシミュレーションへと変わっていったが，大学の研究に顕著であった。そして重要なことは，原研において 80 年代後半より基礎科学重視へと方向が転換されて従来までの安全研究が縮小されたことで，これにより長

年培われた高度な安全技術の継承に支障が出たように思えることである。

5.4 計測技術の進展

軽水炉の熱流動挙動の理解の基本はその正確な計測による現象把握である。長年の研究の成果や新しい技術の発展によりボイド率や流速のような基本的な量のみならず，液滴や液膜，気泡の大きさ等，現象の詳細なモデル化において必要な量の計測技術も進展した。日本原子力学会では 99 年より小泉安郎主査の下でこの検討を行ったが，その成果は 2003 年に森北出版より「混相流計測法」[8]として出版された。X 線やガンマ線を用いた CT (コンピュータトモグラフィ)，中性子ラジオグラフィ等を利用したボイド率計測等も載せられている。

6. グローバリゼーション時代 (2000~2010 年)

6.1 JCO 事故後の原子力

JCO 事故後の規制改革として，01 年 1 月に中央省庁再編により原子力安全・保安院が設置された。失われた 10 年を取り返すべく規制の合理化等の検討がなされた。しかし 02 年 8 月に東電問題の発生があり，原子力安全基盤機構 (JNES) の設置と定期事業者検査及び定期安全管理審査の導入等がなされたが，これは努力してきた合理化とは逆の方向という印象もあった。それにより規制の改革はさらに遅れ，リスク評価に基づく規制やバックフィットの考え方の改善等において海外規制との乖離が目立つようになった。

6.2 新規プラントの建設と海外への活動

2000 年代の軽水炉プラントは，女川 3 号機，東通 1 号機，浜岡 5 号機，志賀 2 号機，泊 3 号機の 5 基が営業運転を開始した。また，島根 3 号機と大間発電所が建設中である。そして APWR としては初めての原電の敦賀 3 号機と 4 号機が安全審査中である。その意味ではいろいろな課題を抱えつつも比較的順調に建設を粛々と進めてきたと言える。

ところで，国の発展にはエネルギーが必要であり，米国の計画と共に中国・インドは勿論であるが，発展途上国を含め世界的に原子力プラントを新規に建設しようとする動きが活発になった。原子力ルネッサンスと呼ばれ，IAEA にも特に発展途上国が数多く助力を求めるようになった。石油産油国も長期的に見て石油に代わるエネルギーとして原子力を考えていることは注目される。それを

念頭に、05 年頃より日本のメーカーである東芝・日立・三菱は海外メーカーとの統合や協力体制を組んで、これらに対する受注を目指して海外展開を図った。

この動きにも関連するが、日本では ABWR と APWR の開発以来止まっていた炉の開発として、大型軽水炉が考えられ、次世代軽水炉として研究開発を進めようとしている。

6.3 米国依存の基本的技術

日本は原子力プラントを米国より導入したが、米国は親切に教えてくれた。以前は教えたがり屋の米国と学びたがり屋の日本、という構図であった。しかし 20 年ほど前より、教えられた日本が中国や韓国に教えたがった。当時は学びたがり屋の韓国とその後中国であったが、最近では韓国も自信を持つようになった。いずれにしても、規格基準や安全解析コードなど、基本的なことで問題がおこるようになった。日本の技術による製品を輸出していくには、このような基本的な問題を解決していく必要がある。

一つは安全解析コードの問題である。日本では安全解析等の大型計算コード (RELAP, TRAC, TRACE, MELCOR 等) を導入してきた。それらのコードはメーカー、規制側等で整備され、解析結果の不確かさの影響を考慮する統計的安全評価手法のベースコードとなっている。また、その信頼性を評価する方法論についての技術的なガイドの作成が学会レベルで進められている。しかし最近、米国では有料でもソースコードの自由な使用を渋るようになった。現在、日本でも信頼性をより強化させ、近年の計算機性能の向上を踏まえた独自計算コード開発等の対応を検討中である。

他の一つは規格基準類の問題である。日本では米国機械学会 (ASME) の原子力の構造設計規格を用いることとして、国の告示に用いてきた。85 年頃より ASME も無料での使用を渋るようになり、国は困った。このことが、日本の機械学会・原子力学会・電気協会で規格基準を独自に作成することの動機となった。

6.4 シビアアクシデント対応の問題

2000 年に入り、SA 対応は 2 つの局面を迎えていた。一つは、SA に対する検討の委員会と研究の推進である。99 年に民間自主基準として、次世代炉に対するガイドラインの案がつけられたが、原子力学会では実験的な放射性物質移行に係る熱流動評価や SA 時の現実的ソースターム評価の委員

会を継続して昨年度まで行い、民間ガイドラインの調査や研究結果の評価・検討を行った[9]。しかし研究費はますます減少し、それに伴い研究者も育たず、ついに「絶滅危惧種」と自嘲の言葉が出る状態であった。

他の一つは、日本企業の海外進出である。海外プラントは設計段階から SA を想定して対応することを求めているので、これに対応しないと受注は出来ない。このため各企業は SA 対応をせざるを得ない状況であり、そのための若手の技術者がわずかだが増える傾向にあった。また、我国の SA 対応をどうすべきか原子力安全・保安院でも数年前より検討し、本格的な対応へ向けて動き出そうとしていたところである。

6.5 研究ロードマップの作成

原子力学会では数年前より、原子力各分野の研究を今後どう進めるか、かつ若手技術者への技術継承を図るという視点から、産学官の研究者により研究ロードマップの検討を始めた。原子力の伝熱流動に係わる研究もその一つである。新型炉として次世代軽水炉や自然循環炉の開発、原子力プラントの性能向上としての出力向上や燃料の高度化の問題、新たな安全解析手法の問題、SA 対応の問題、火災等の事故対応の問題、等々が挙げられている。これにより世界の新しい原子力の動きに対して、日本の技術力の更なる向上が図られ、研究を進めることが出来ると期待される。

7. 福島事故以後

7.1 大震災と福島第一原子力発電所の事故

2011 年 3 月 11 日に、東日本を大地震・大津波が襲い特に福島第一原子力発電所が炉心損傷を伴う SA 事故となった。慎重に対策が採られていたとはいえ、人類の経験した歴史上 4 番目に大きな地震と、想定以上の大津波は大変な破壊力であった。全交流電源喪失と全ヒートシンク喪失という状態での事故であり、プラントの安定化に時間がかかっている。全世界もこの事故の結果を大変注目している。この事故から得られる教訓は数多い。この経験を生かし、日本を含め世界のこれからの原子力の安全確保に貢献していくことが重要である。

7.2 これからの原子力と伝熱流動

では、これからのエネルギーとしての原子力はどうなるであろうか。一部に脱原子力の動きはあるが、世界的に見てグローバル化した現在の世界におけるエネルギーとしての原子力が、スローダ

ウンはあれ全体的になくなる方向をとることは考えられない。その理由は、世界のエネルギー獲得競争がさらに熾烈になるからである。発展途上国であればなおさらである。その際に、しっかりした技術力がなくプラントを導入し、運転マニュアルだけを勉強して運転すれば大丈夫ということでは大変心もとない。世界には日本では経験しないような気象条件等があり、先進国が行うプラント建設時には想定出来ないようなことも起こりうる。世界の原子力の建設にこの面からの貢献が、特に今回の事故を経験した日本にとっては重要である。日本国内では、この事故を契機に、長年進まなかった規制体制や法令・指針・基準類の改革を一気に進めると共に、導入技術から出発した日本の弱みを改めて考え、強化する必要がある。基本的・本質的な点を十分理解した技術者・研究者の育成が重要である。特に、シビアアクシデント対応のような複雑な事象の研究と理解を進めなければならない。伝熱流動の面から言えば、大変複雑な現象で、多様な物質、多様な相形態、多様な反応、多様な温度形態をとる複雑な現象への挑戦である。最近の優れた計算技術を活用し、適切な実験とを組み合わせ、現象把握とプラントの設計・評価技術を向上させることが期待される。

福島炉心溶融炉は廃炉になる。通常の運転を終了したプラントでも、廃炉措置が全て終了するには 20 年はかかる。まして今回の事故を起こした

炉は 30 年はかかるであろう。これから長年の労苦が待っているが、この間多くのことを学びつつ原子力の再構築が図られることを期待する。

参考文献

- [1] 日本機械学会沸騰熱伝達に関する調査研究分科会編，沸騰熱伝達，日本機械学会(1965).
- [2] SAFE プロジェクト小委員会報告書一軽水型動力炉の後備安全防護装置の研究一，日本原子力産業会議(1966).
- [3] 村主進編著，原子炉安全工学，日刊工業新聞社(1975).
- [4] 日本機械学会編，沸騰熱伝達と冷却，日本工業出版(1989).
- [5] 日本原子力学会熱流動部会編，気液二相流の数値解析，朝倉書店(1993).
- [6] 日本原子力学会核熱水力安定性研究専門委員会編，BWR 核熱水力安定性評価の現状と課題，日本原子力学会(2001).
- [7] 日本原子力学会熱流動部会編，シビアアクシデント熱流動評価，日本原子力学会(2001).
- [8] 日本原子力学会編，混相流計測法，森北出版(2003).
- [9] 日本原子力学会熱流動部会編，シビアアクシデント時の格納容器内の現実的ソースターム評価，日本原子力学会(2010).

エコキュートの開発・誕生秘話

Development of Eco-cute

齋川 路之 (電力中央研究所)

Michiyuki SAIKAWA (CRIEPI)

e-mail: saikawa@criepi.denken.or.jp

1. はじめに

家庭用自然冷媒 (CO₂) ヒートポンプ給湯機：愛称“エコキュート”が2001年5月に商品化されて早10年が経過した。省エネ・環境問題への意識やオール電化住宅への関心の高まり、メーカーの市場参入などにより、順調に出荷台数を伸ばしており、この原稿が掲載される頃には、累積普及台数が300万台を突破していると思う。開発者の一人として、非常に嬉しいことであり今後もその普及に向けて、新型機の開発や性能評価など、微力ながら努力していきたいと思っている。

さて、電中研では、エコキュートを開発する以前に、給湯ヒートポンプの研究開発を進めてきたが、商品化には至らなかったことが2度ある。そこで、今般は、当所における給湯ヒートポンプの研究開発や私自身の経緯・視点から、技術的な話を含めつつ、エコキュート誕生までの経緯を紹介したい。伝熱とは少し？かけ離れた話になってしまうが、しばしお付き合い願えればと思う。

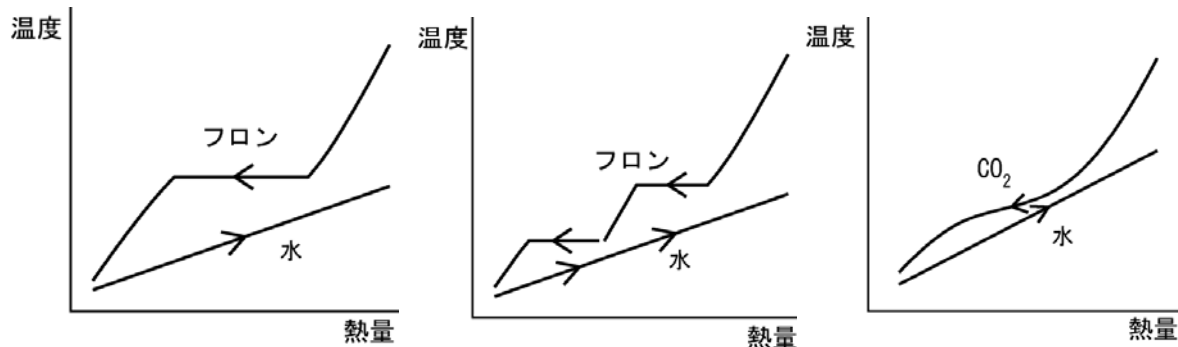
2. 電中研におけるヒートポンプ研究開発の経緯

当所のヒートポンプに関する研究開発は、1984年(昭和59年)、国の計画によりSHP(スーパーヒートポンプ)研究組合が設立され、当所が研究を受託したことから始まった。ヒートポンプは原理的には火力発電と同じであるため、火力から分野転向した私の4つ上の先輩が中心になってこの研究に取り組むことになった。さらに、この受託がきっかけで、新人を採用することになり、私がたまたま電中研に入所することとなった。1986年のことである。今でも鮮明に覚えていることであるが、人所していきなりその先輩から、「俺もヒートポンプのことは良くわからないから、おまえも一緒に考えろ」と言われたときには正直言ってビビった。研究開発は、当然、先輩の指導で進めるものと思い込んでいたのだ。

さて、当所としては、受託研究を行うだけでなく当所オリジナルの研究を立ち上げるために、ヒートポンプ導入による省エネ効果が大きいところはないか、ということで調査研究を始めた。よくよく調べてみると、給湯分野は民生用(家庭・業務)エネルギー消費の約3割を占めるにもかかわらず、その9割は化石燃料の直接燃焼によって賄われており、もし高効率なヒートポンプを開発・導入できれば、省エネルギーが格段に進むことが分かった。給湯分野に狙いを定めたのだ。

狙いを定めたのはよいが、格段に高効率化が狙える給湯ヒートポンプを可及的すみやかに考案し、開発に着手しなければならない。私は新人だったのでまだ気楽?だったが、先輩のプレッシャーは相当なものだった。そのプレッシャーの中から、先輩が火力発電サイクルの知見を活かしつつ、「2段圧縮式カスケード加熱給湯ヒートポンプ」という新方式を考案した。この方式は後に特許登録された[1]。

フロンなど通常の冷媒では、サイクルの高圧側で一定の温度で凝縮することにより水や空気を加熱する。このため、空調向けのように、水や空気の加熱温度幅が小さい場合には効率が高くなる。一方、給湯用では、例えば10°Cの水を65°Cまで加熱する必要があり、昇温幅の大きい加熱が必要となる。この65°Cのお湯をフロンによる単純なヒートポンプサイクル(単段圧縮サイクル)で作った場合の加熱の様子を図1(a)に示す。図は、水を加熱してお湯を作る熱交換器内(凝縮器)における冷媒と水の温度と交換する熱量の変化を示したもので、温度-熱量線図である。図に示すように、フロンの場合、20°C程度の低温の水を70°C程度の凝縮温度で加熱する部分があり、無駄が大きくなる。20°Cの水を加熱するのであれば、30°C程度の熱があれば十分である。フロンによる単純なサイクルでは、熱交換温度差が大きくなり、これによ



(a)フロンの単段圧縮サイクル (b)フロンの2段圧縮サイクル (c)CO₂の単段圧縮サイクル

図1 冷媒・サイクルの違いによる給湯加熱方式の比較

る不可逆損失が大きく効率が低くなる。

当所が考案した「2段圧縮式カスケード加熱給湯ヒートポンプ」は、フロンを使うが、圧縮を2段とすることで2つの凝縮圧力をつくり、それぞれの凝縮温度で水と熱交換を行うことで温度レベルに応じた加熱を実現し、不可逆損失の低減を狙ったものである(図1(b))。机上検討の結果、この2段圧縮式では、通常のサイクルに比べ、3割程度の成績係数(COP)の向上が期待できることが分かった。なお、COPとは、ヒートポンプの性能を表す指標で、熱出力(例えば給湯出力)を圧縮機入力(電力)で割った値である。

次に、考案した2段圧縮式が実際に成立するのか、要素技術はどのようなものにすればよいのかという検討が必要になった。そこで、図2に示す2段圧縮式の原理試作機を手作りで作製し、サイクルの成立性を検証した。その結果、COPが格段に向上するという手ごたえが得られた。

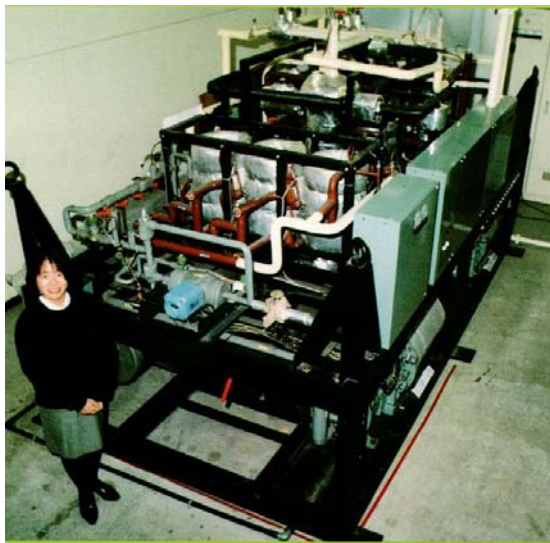


加熱能力4kW, 1987年設置
図2 2段圧縮式原理試作機

ただし、当所だけでは、製品は作れないし、売ることもしない。そこで、当所が考案し高効率化が期待できることを検証した2段圧縮式給湯ヒートポンプをベースに、電力・メーカーと共同で、家庭用冷暖房給湯ヒートポンプの開発を行った。1988年～1992年のことである。要素技術開発等、順調に進み、フィールドテスト機的设计・製作と実際のフィールドテストまで進展した。しかしながら、給湯の効率が期待されたほど達成できなかったこと、効率も含めて価格や大きさなど商品としての魅力に乏しいことなどの理由から商品化までは至らなかった。冷暖房給湯という多機能機の開発を目指したわけであるが、まずは、一番重要な給湯単機能で高効率なものを目指すべきだったという反省が残った。

それならば、ということで、家庭用ではなくホテルや各種施設など業務分野向けに2段圧縮式給湯機を開発を進めた。1990年～1996年のことである。図3に示す試作機を作り、要素技術の開発も含めて業務用としての基本方式を確立後、メーカー、ゼネコンと共同研究を行って商品化を目指した。しかしながら、オゾン層破壊によるフロン問題などにより、商品化を断念した。業務用については、給湯専用機ということもあって、期待された効率も達成でき、技術的にも良いものができたが、開発のタイミングが悪かった。

以上、共同開発を2回行ったが、2回とも商品化を達成することはできなかった。当時は、後輩も2人入所し、先輩と合わせて4人で研究開発を進めていたし、研究開発費も投入していたので、「ヒートポンプの研究はどうするのだ」と、所内の厳しい状況に追い込まれた。



熱出力 150kW, 1991 年設置
図 3 業務用 2 段圧縮式試作機

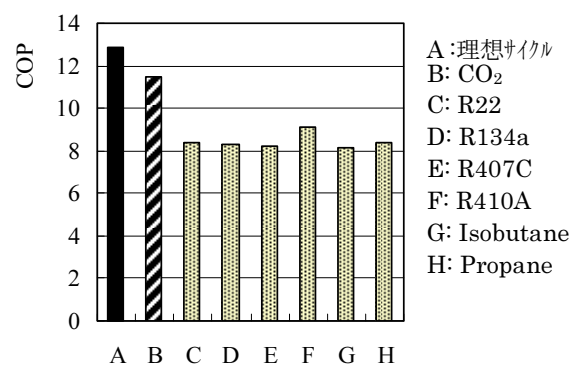
3. 自然冷媒の調査と CO₂ 冷媒との出会い

2 段圧縮式を考案し、共同研究を進めて商品化を目指したが、2 回も商品化に失敗した。しかし、ヒートポンプは、省エネルギーの推進に欠かせない技術であることは間違いない。そこで、再び原点に帰って、今後の研究開発の方向性について、皆で議論した。業務用の 2 段圧縮式が商品化に至らなかった大きな理由の一つはフロン問題である。当時、オゾン層を破壊するフロン系の冷媒は使えなくなる状況にあった。これには、エアコンの冷媒として主流であった HCFC22 (ハイドロクロロフルオロカーボン, (R22)) という冷媒も含まれており、この代替冷媒の開発が急務であった。いろいろと調べてみると、代替冷媒としては、日本やアメリカでは、同じフロンであるが塩素を含まないのでオゾン層を破壊しない HFC (ハイドロフルオロカーボン) 系の冷媒が有力になっていた。一方、ヨーロッパでは、「フロンは化学合成品であり、同じフロン系から代替冷媒を探しても、またオゾン層破壊のような問題が起こるかもしれない、それならば、フロンができる前に使われていた自然界にもともと存在する冷媒、自然冷媒を今の技術で見直すほうがよい」という考えが主流になっていた。そこで当所では、フロン系の代替冷媒はメーカーに任せておいて、長期的な視点で自然冷媒の検討を進めるべきだろうとの考えで調査を開始した。1993 年のことである。

自然冷媒には、アンモニア、ヒドロカーボン、CO₂、水、空気などがある。各冷媒の詳細はここでは省略するが、それぞれ長所・短所があり万能ではない。当たり前のお話である。優れた特性を有するフロンが開発されて、ほぼ駆逐された冷媒だからである。

当所としては、これら自然冷媒の中でも、毒性、可燃性もなくユニークな特徴を有する CO₂ に着目し、その基礎研究を 1995 年に開始した。実際に検討を進めると、CO₂ は、お湯を作る場合、他の冷媒に比べて理論的に最も高い COP が得られることが分かった。その理由を先ほど示した図 1 で説明する。図 1(c)を見てみると、CO₂ はフロンのように凝縮することがなく、水の加熱に伴って CO₂ の温度が徐々に低下し、水と CO₂ が小温度差を保ちながら熱交換していることがわかる。CO₂ は、臨界温度が低く (31°C)、サイクルの高圧側が超臨界圧条件になるため、熱交換による不可逆損失が小さくなり、フロンに比べ高い COP が達成できる。

図 4 に各種冷媒による損失のないサイクルの COP (各冷媒の上限 COP) を試算した結果を示す。図中の理想サイクルは、高温熱源の温度が比熱一定で変化し、そのほかの過程は逆カルノーと同じとしたサイクルである。水の比熱を一定とみなせば、このサイクルが給湯用 COP の上限を決めるサイクルと考えられる。図から、各冷媒の中で、CO₂ が最も COP が高く、理想サイクルの値に近いことがわかる[2]。



熱源温度 16°C, 給水温度 17°C, 給湯温度 65°C

図 4 各種冷媒の給湯 COP の上限値

CO₂ は給湯用には高い効率が得られる可能性があることは分かったが、実は、フロンに比べて非常に高い圧力で作動する。CO₂ ではサイクルの低

圧側が 3MPa (大気圧の 30 倍) 程度、高压側は 10MPa 程度になるが、フロンではそれぞれ、0.5MPa, 2.5MPa 程度である。当時、CO₂冷媒に関する研究開発は、ヨーロッパでは行われていたが、日本ではまだ行われていなかった。ちゃんと実物として作動するのか示す必要がある。そこで、当所では、1996年3月にCO₂ヒートポンプ基礎実験ループ(図5)を設計・製作・設置し、実験を開始した。当時、このような圧力で作動する圧縮機はなかった。このため、高压ガスのプロセスを扱う、小さいがプロの会社を探し出し、無理矢理お願いして、圧縮機を作ってもらった。この実験ループを使って、サイクルの成立性や制御方法、CO₂の伝熱を調べた。その結果、CO₂は冷媒として使えるという確信が得られた。しかも給湯には有望である。



熱出力 6kW, 1996 年設置
図 5 CO₂ ヒートポンプ基礎実験ループ

4. エコキュートの共同開発

CO₂冷媒が使えること、給湯には有望であることがほぼ分かった1998年3月、東京電力の営業の方が空調用自然冷媒技術に関する調査でたまたま当所へ来所された。来所された方は、業務用の2段圧縮式給湯ヒートポンプを売り込みに行った時に対応してくれた方だった。当所でヒートポンプの研究開発をやっていることを分かっていたのだ。空調用にはあまりよいものがないが、給湯用にはCO₂がよいという話をしたところ、筋がよさそうなのでやってみますかという話になり、開発に向けたお互いの社内調整が始まった。話が進むときは早いものである。さて、実際に物を作れるのはメーカーであり、共同開発のメーカーを捜す

必要がある。

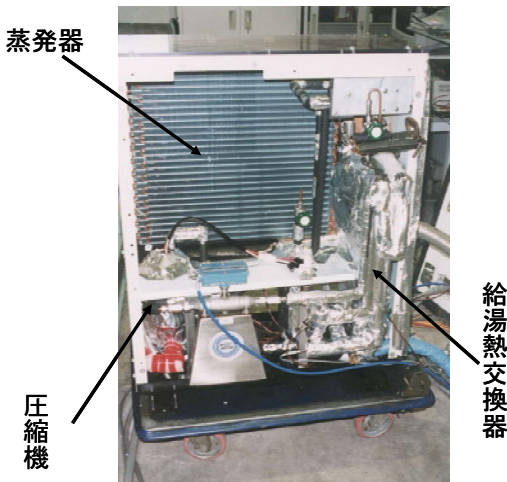
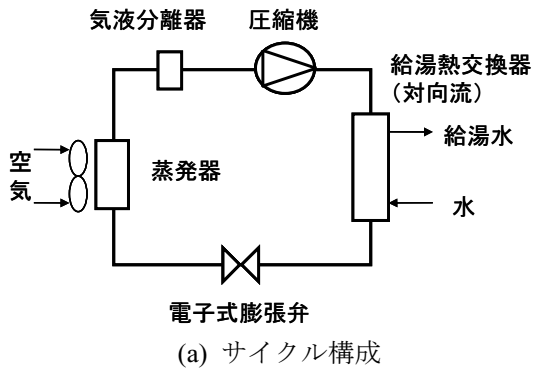
同じ年の5月、ヨーロッパで自然冷媒の国際会議があった。当所もCO₂冷媒に関する基礎研究の成果を発表したが、デンソーがCO₂冷媒を使ったカーエアコンの開発について発表していた。その発表を聞きながら、これだ!と思った。学会は3日間だったと思うが、その間、デンソーの方といろいろ話をさせてもらった。7月に、東京電力がデンソーを訪問、共同開発を打診する。当初は、給湯機?という感じだったと聞いているが、開発技術の展開として、デンソーが手を挙げてくれた。これでメンバーは揃った。実質的な共同開発は10月からスタートし、3者の役割は、東電は「商品企画」、デンソーは「技術開発・製品化」、当所は「基礎研究・評価」であった。

技術的な課題としては、高压・高差圧・低圧縮比で作動する高効率圧縮機、水を効率よく加熱できるコンパクトな給湯熱交換器、ヒートポンプユニット及びシステム全体(含む貯湯ユニット)の高効率運転制御方式であった。

共同開発の中で、当所は図6に示す試作機試験風洞を設置(1999年)し、図7に示す試作機の試験を行って、効率把握・分析・評価、開発課題の抽出、性能改善方策の検討を実施した。要は、デンソーから改良部品が送られてきてそれを試作機に組み込んで評価試験を行い、その結果をフィードバックして、また改良部品を組み込んで試験を繰り返すということを行った。一時、改良部品が次から次へとデンソーから来てしまい、担当の後輩が試験に追われるという状況もあった。最終的に、開発した技術で当初設定した目標をクリアできることを確認した[3]。



加熱・冷却能力 5kW, 1999 年設置
図 6 試作機試験風洞



(b) 外観

加熱能力 4kW

図7 CO₂給湯ヒートポンプ試作機の概要

3 者の打ち合わせも、朝から晩までということもよくあったように記憶している。皆、格段に効率のよい給湯機を世に送り出すのだ、という思いで熱くなっていた。ここでは、当所の話しかしていないが、それぞれ、大変な苦労があったと思う。

いろいろな山や谷を乗り越えて、2001年5月、世界で初めて、家庭用自然冷媒（CO₂）ヒートポンプ給湯機“エコキュート”を世に送り出すことができた。当所にとっては3度目の正直であり、2回の商品化失敗という経験が十分に活かされた開発だったと思っている。

自慢話になってしまうが、開発機は、その優れた省エネ性・環境性が高く評価され、伝熱学会技術賞をはじめ、多くの賞を受賞した。極めつけは、2010年7月30日、関連する共同出願特許で、最高の荣誉である「恩賜発明賞」を受賞したことである。なお、伝熱学会技術賞の内容については、学会誌「伝熱」2006年4月号の「プロジェクトQ」

で、詳しく紹介されている[4]。

5. おわりに

エコキュートの開発・誕生秘話ということであるが、どうもエコキュート以前の苦労話を中心になってしまった。電中研や私自身からみた開発の経緯ということでご容赦願いたい。エコキュートの開発を振り返ると、本当にタイミングよく人と人がつながって開発がスタートし、それぞれが同じ志を持ち、それぞれの役割を果たした結果、良いものができたのではないかなと思う。エコキュートの開発に携わることができて本当に幸せだった。このような開発がまたできるかどうかかわからないが、今後とも、省エネルギー推進・地球温暖化防止に向けてヒートポンプの研究開発を進めて行きたい。最後に、自宅に設置したエコキュート（図8）を紹介して本稿の結びとしたい。開発者として責任を取り、購入して使用している。今のところ、故障もせず、せっせとお湯を作ってくれています。



加熱能力 6kW, 貯湯タンク 460ℓ, 2003年モデル

図8 自宅のエコキュート

参考文献

- [1] 岩坪哲四郎, 斎川路之他, 特許登録番号: 2709073 (1997)
- [2] 斎川路之, 日本機械学会論文集 B 編, **74-738** (2008) 255.
- [3] 斎川路之, 橋本克巳他, 日本冷凍空調学会論文集, **18-3** (2001) 225.
- [4] 山本憲, 沖ノ谷剛, 日本伝熱学会誌, **45-191** (2006) 44.

Edinburgh 大学での長期滞在レポート

A Report on a Visiting in the University of Edinburgh

濱本 芳徳 (九州大学)

Yoshinori HAMAMOTO (Kyushu University)

e-mail: y-hama@mech.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

平成 22 年 4 月下旬から翌 2 月上旬までの約 10 ヶ月間に Edinburgh 大学に長期滞在する機会を得た。ここに恥を含めた拙文の記述に対し容赦願いつつ、少しでも参考になる情報提供を心掛けた。

2. エジンバラでの研究と生活

2.1 エジンバラはどこにある？ 出発準備編

著者は歴史やサッカーなどに全く興味がないので知らなかったが、英国は、イングランド、ウェールズ、スコットランドおよび北アイルランドからなり、ウェールズを除き各国で独自に紙幣が発行されるなど、国間で主張が強い連合王国である。

スコットランドは、イングランドの北側に位置している。図 1 に周辺地図を示す。エジンバラはスコットランドの首都であり、町並みが世界遺産に登録された観光と金融の街である。グラスゴーは工業や商業で栄える大都市、図中「スコットランドの中心」より北側（上側）は特にウイスキーで有名なハイランド地方、南側がローランド地方である。恐竜伝説で有名なネス湖や、北海油田の基地であるアバディーンがある。最近、英国全体では 2020 年までにエネルギーの 30% を再生可能エネルギー源で賄うことを、スコットランドでは現状 31% から 50% に引き上げる計画をそれぞれ目標に掲げ、洋上風力、特に油田基地の建設技術を活かし、沿岸から 23 km、水深 50 m の深海条件における洋上風力開発に注力している[1]。

著者は、渡航前、Edinburgh 大学の生物系を学びに行く計画を立てたが変更し、縁あってもう少し工学寄りであるが限りなく科学を好む Dr. Khellil Sefiane 先生から受入許可をもらった。

あとは学術訪問者向けの 1 年間有効なビザの取得である。預金通帳の“英訳証明書”付き写しの準備に予想以上に労力を要し、大阪まで申請に向かい、ビザが手元に届いたのは出国直前だった。



図 1 スコットランド内のエジンバラの位置

2.2 滞在先での研究生活と日常生活

エジンバラ到着後 1 週間で Flat (アパート) を探して入居した。契約時は数十ページの書類に目を通してサインした。不安と緊張で倒れそうになったが、「いざとなったら金を払えば、命までは取られない。」と、変に開き直って契約を完了した。

Edinburgh 大学は、主に文系、理系および医学系のキャンパスを有し、22 の学科から構成される総合大学である。著者は、工学部内の 5 つの研究所の一つ Institute for Materials and Processes (IMP) に所属した。ここには、物質科学、合成とプロセス、製造の各分野の研究者が集まり、省マテリアル、生体医療、炭素回収などを対象としたスケールメカニズムの解明、物質設計、極限状態科学および混相流れなどの研究が行われている。

著者は、固体壁面上の単一液滴の蒸発過程における液滴内の流動特性の解明をテーマに、マイクロ PIV による時系列流動計測、液滴の形状および温度計測を実施した。進め方は、週一回、Dr. Khellil

(液滴蒸発のプロ)と Dr. John Christy (流体計測のプロ)との僅か30分間のミーティングにおいて進捗確認と方針を打ち合わせるとともに疑問をぶつけ合って議論した。後はひたすら PIV 実験を一人で行った。液滴の形状や温度の計測では、院生が使用している装置を貸してもらった。このような素晴らしい研究環境の中で「ひたすら学ぶ」、「トライアル&エラー」、「ひるまずにチャレンジ」を継続実行できたのは何よりの幸せであった。

従来、理論的に考えられていた水滴内の流動現象を実験により初めて確認[2]できたり、混合物液滴では段階的に生じる流動特性を発見[3]できたり、充実した成果を得た。今後のマイクロスケールの伝熱流動現象の解明に有用な基礎知識と計測技術も少し習得できた。



図2 Flat (写真左。キャンパスまで徒歩20分)と研究室がある Sanderson Building (写真右)



図3 Dr. Khellil グループの博士課程の学生と

ランチタイムの楽しみは、日本に居る家族とのビデオ通話であり、単身渡航の寂しさが紛れた。

まわりは、主にスペインや中国からの博士課程の留学生であり、彼らは熱心に研究に励み、時間がくれば研究室からさっさと帰った。頼りになる「先生方がメリハリつけて帰るからかな?」。

エジンバラの季節は、5月~8月に「春のような夏」が、9月から「冬」がやって来る。帰国前の1月下旬、Dr. Khellil から「ハイランドに遊びに行ったか」と問われ、「まだ」と答えると、週末に「極

寒のハイランド」を案内してくれた。ローランドとハイランドの断層を見たあと、Hart of Scotland と呼ばれる Callander の街を訪れ、食材を調達し、Loch Venahar の湖畔でサンドイッチを作った。Dr. Khellil は、「夏にここへ家族とハイキングに来るが、寒い中に来るのは初めてだ。」と、やや呆れ気味にこぼしながらも、温かいコーヒーを自宅から持参して下さり、手厚いホスト精神を学べた。



図4 湖面が凍った Venahar 湖 (写真左), その奥の貯水用 Katrine 湖にて Dr. Khellil と (写真右)

2.3 雑感と謝辞

主たる旅費の出所がなくても大学には「出張扱い」してもらえた。三菱電機(株) 殿からの本研究に関連する寄付金の一部を活用し、さらに九大水素エネルギー国際研究センターから3週間の調査旅費を得た。ここに記して謝意を表す。最終的には出費の半分以上が自己負担であった。そして、帰国後に強く有難く感じたことは、滞在中、九大機械の先生方が授業等の仕事を免除してくれたことだ。先生方に感謝する。長期滞在は、大学・家族・自分にとって「投資」であると再認識した。

3. むすび

滞在中で感じ得た一部を紹介した。(1) 共同研究では各プロが分業して仕事を淡々と進める関係を築くことが重要。(2) 自分の仕事を見つけて努力すれば、相手はその意義を認める。(3) 暇さえ与えられれば、旅費がなくても長期滞在できる。

参考文献

- [1] 技術カタログ, *Wind energy in Scotland*, Scottish Development International (2010).
- [2] Hamamoto, Y. et al., *Phys. Rev. E* **83** (2011) 051602.
- [3] Christy, R.E. J. et al., *Phys. Rev. Lett.* **106** (2011) 205701.

ミネソタ大での研究滞在記
*Research experiences of bio transport
at University of Minnesota*

森 昌司 (横浜国立大学)
Shoji MORI (Yokohama National University)
e-mail: morisho@ynu.ac.jp

1. はじめに

2009年2月15日、期待と不安を胸にミネアポリス空港に降り立ちました。目的は、2年間、Visiting scholarとしてミネソタ大学のJohn C. Bischof先生とBio-transport分野の仕事をするためです。私は学生の時から二相流、横浜国大に移ってからは、多孔質体を用いた熱機器の高性能化についても研究を行ってきました。バイオに関する知識は全くありません。しかし、長期間の研究留学をするならこれまで行ったことがなく、海外に行かなければ絶対体験できない興味有るテーマを選定したいと考えていました。そこで九大の高松先生に相談し、Bio-transport分野で有名なミネソタ大学機械工学科のJohn C. Bischof先生を紹介して頂きました。本項では、日本学術振興会の海外特別研究員としての2年間、米国で行った研究生生活について書かせて頂きたいと思います。

2. ミネソタ

ミネソタ州はカナダ国境に位置し、州の東にスペリオル湖があります。人口は、約530万人で約90%が白人です。ですから郊外のレストランに入るとアジア人などいませんので希有な目で見られます。がミネソタ州のどこにいても非常に親切にしてもらえたのが印象的でした。Itasca State Parkには、ミシシッピ川の源流があり、大人が13, 14歩で歩いて渡ることができる風光明媚な場所があります(図1)。

ミネソタといえば極寒のイメージが先行しますが、実はその通りで -20°C 以下になることも度々あります。しかし、そこでしか見られない興味深いもの(例えば、ダイヤモンドダスト、湖上の天然リンクでのスケート、雪の結晶の美しさなど)を沢山見ることができました。ミネソタ州以外にもアメリカには非常に美しい国立公園が沢山あり、



図1 Itasca State Parkにあるミシシッピ川の源流



図2 数ある国立公園の中でも一番感動したYellow stone National Park

映画でしか見たことのないようなアメリカを間近で体験することができました(図2)。

3. ミネソタ大学 機械工学科

ミネソタ大学はミネアポリスにあり、大学を東西2つに分けるようにミシシッピ川が学内を流れています。この機械工学科と言えば、昔から熱工学が有名です。現在は、従来の分野に加えて、プラズマやBio transport分野の先生が多くなっているようでした。大学院生の出身国は、米国:64%、中国:14%、インド:10%、韓国:2%、イラン:2%、その他:8%でした。残念ながら、日本からの学生・教職員は1人もいませんでした(一方、

韓国やイランの学生が多いのに驚きました). また, 多くの研究室は, 最低週 1 回 (多いところは週 3 回) は, 研究報告会を行っていました. その中で研究の進捗状況, 問題点などを報告・議論するのですが, 毎週のように研究成果を要求する (学生には給料が支払われているので当然かもしれませんが) ことは, 私にとっては衝撃的で, 米国の研究のスピードが早い理由が垣間見えたような気がしました.

4. Bio heat and Mass Transfer Lab における研究内容

Bischof 先生のやられている研究は, 組織レベルから細胞・分子レベルまで非常に広く, 主に(1) Nanomedicine, (2) Thermal Therapies, (3) Cryo and Biopreservation および (4) Thermal/Mechanical Properties. に関して行っています⁽¹⁾. 動物実験 (in vivo) という複雑な現象解析から, それらに関連する Bio transport 現象を解明するために, 素過程にまで単純化した体系での実験 (in vitro) ・解析を行っていました. 最近では Gold-nano particle を用いた温熱療法に特に力を入れているようです. また, このような現象を解析するに当たり, DSC, FTIR, および顕微ラマン分光計などの分析機器を駆使し, 新しい観点から現象理解を深めようとしています.

筆者が, ミネソタ大で行った主な研究は, (1) DSC を用いた細胞凍結時の Water Transport および Intracellular Ice Formation の定量化, (2) FTIR を用いた Chemical ablation によるタンパク質の変性の定量化, です. (1)の DSC を用いた研究は,

当初, 予想と異なる結果が出てしまい苦労しましたが, 最終的には興味深い新しい知見を見出すことができました. この時, 強く感じたのは, 分野が変わっても問題を解決していくプロセスは同じで, 過去の苦労した経験 (特に学生時代) と日本人的な感性が役立つような気がしました. もう一つ行った研究(2)も, 筆者にとっては興味深い研究でした. 特に FTIR, Raman 分光計などの化学分析機器はこれまで扱ったことがなく, 非常に新鮮で, 全く新しい視点で現象を解析できることを知りました. 今回, 初めて Bio transport に関する研究を行いました, 各現象の解明には分子レベルの検討を行う価値ある興味深い研究が多く残されていることもよくわかりました.

5. おわりに

最後にいろいろな方々のお陰で 2 年間のミネソタ大学での研究を無事に遂行することができました. お世話になったすべての方々にお礼を述べさせていただきます. 特に Bischof 先生には, 大変お忙しい中, ディスカッションの時間を沢山取って頂き有意な suggestion を毎回頂きました. また, 共同研究者である横浜国大, 奥山邦人先生には, 私が海外にいた 2 年間, 私が担当すべき講義・学内業務などの多くを代わりに行って頂きました. この場をお借りして両先生にお礼申し上げます.

参考文献

- [1] Bio heat and Mass Transfer Lab at UMN ([http : // www.me.umn.edu /labs/bhmt/index.shtml](http://www.me.umn.edu/labs/bhmt/index.shtml))



図 3 研究室でバーベキューに行ったときの写真
(研究室の学生は, 8 つの国々から来ていて国際色豊かでした)

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 |
|------------|---------------------|---|--|-----------|--|------------------------------|
| 2011年 | | | | | | |
| 9月～ 10月 | 30(金) ～1(土) | 日本伝熱学会創立50周年記念 伝熱セミナー | 2011.8.26 | | 伝熱セミナー実行委員会 E-mail: dks@htsj.or.jp | Vol.50, No.211 2011.4 |
| 11月 | 12(土) | キッズエネルギーシンポジウム 2011 | | | キッズエネルギーシンポジウム 2011 実行委員会 E-mail: kids2011@htsj.or.jp | |
| 2012年 | | | | | | |
| 5月～ 6月 | 30(水) ～1(金) | 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: nhts49@ml.pu-toyama.ac.jp | Vol.50, No.213 2011.10 |
| 11月 | 13(火) ～ 15(木) | 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 | |

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 |
|-----------|---------------------|---|------------|-----------|--|-----|
| 2011年 | | | | | | |
| 8月～ 9月 | 30(火) ～1(木) | 日本実験力学会 2011年度年次講演会 (開催場所:奈良県文化会館) | 2011.6.7 | 2011.7.12 | 〒558-8585 大阪市住吉区杉本 大阪市立大学大学院工学研究科 加藤健司・脇本辰郎 Tel:06-6605-2665・06-6605-2965 Fax:06-6605-2953 E-mail:editjsem@mech.eng.osaka-cu.ac.jp | |
| 9月 | 7(水) ～9(金) | 日本流体力学会年会 2011 (開催場所:首都大学東京 南大沢キャンパス) | 2011.5.23 | 2011.7.18 | 日本流体力学会年会 2011 実行委員会 E-mail:nenkai2011com@aero.sd.tmu.ac.jp | |
| 9月 | 14(水) ～16(金) | 2011年度 日本冷凍空調学会年次大会 (開催場所:東京大学 本郷キャンパス) | 2011.6.7 | 2011.8.3 | 年次大会実行委員会 幹事 大宮司啓文 〒277-8563 千葉県柏市柏の葉 S-1-5 新領域環 境棟 360号室 Tel:04-7136-4658 Fax:04-7136-4659 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 人間環境学専攻 日本冷凍空調学会 事務局長 関田真澄 〒160-0008 東京都新宿区三栄町8 三栄ビル4階 Tel:03-3359-5231 Fax:03-3359-5233 E-mail:jsrae11@jsrae.or.jp | |
| 9月 | 18(日) ～19(月) | 2011年度 計算力学技術者(CAE技術 者)資格認定事業【上級アナリスト】認 定試験 | 2011.7.8 | | 〒160-0016 東京都新宿区信濃町35番地 信濃 町煉瓦館5階 一般社団法人 日本機械学会 事業企画 G 関根 Tel:03-5360-3506 Fax:03-5360-3509 E-mail: sekine@jsme.or.jp | |
| 9月 | 26(月) ～27(火) | 可視化情報全国講演会(富山 2011) (開催場所:富山国際会議場) | 2011.6.17 | 2011.7.22 | 石塚勝: 実行委員長 富山県立大学工学部 機械システム工学科 〒939-0398 富山県射水市黒河 5180 Tel:0766-56-7500 内線 387 Fax:0766-56-6131 E-mail:ishizuka@pu-toyama.ac.jp 中川慎二: 幹事 富山県立大学工学部 機械システム工学科 〒939-0398 富山県射水市黒河 5180 Tel:0766-56-7500 内線 386 Fax:0766-56-6131 E-mail:snakagaw@pu-toyama.ac.jp | |
| 10月 | 3(月) ～6(木) | 第4回人間-生活環境系国際会議 (開催場所:北海道大学) | 2011.3.31 | 2011.7.31 | 人間-生活環境系国際会議組織委員会事務局 〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目 北海道大学大学院工学研究科環境人間工学研 究室 Tel/Fax:011-706-6280 E-mail: iches2011@eng.hokudai.ac.jp | |
| 10月 | 27(木) ～ 28(金) | 日本機械学会関西支部第316回講習会 「応力計測の基礎とその応用(計測デ モンストラーション付き)」 (開催場所:大阪科学技術センター) | 2011.10.21 | | 日本機械学会 関西支部事務局 〒550-0004 大阪市西区鞠本町1-8-4 大阪科学技術センタービル内 Tel:06-6443-2073 Fax:06-6443-6049 E-mail: info@kansai.jsme.or.jp | |

行事カレンダー

| | | | | | |
|-----|---------------------|---|-----------|------------|---|
| 10月 | 29(土) ～ 30(日) | 熱工学コンファレンス 2011 (開催場所：静岡大学 浜松キャンパス) | 2011.7.1 | 2011.9.9 | 2011年熱工学コンファレンス実行委員会事務局 〒432-8561 浜松市中区城北 3-5-1 静岡大学工学部機械工学科 実行委員長 中山颯 Tel/Fax:053-478-1049 E-mail:tmanaka@ipc.shizuoka.ac.jp 幹事 桑原不二朗 Tel/Fax:053-478-1046 E-mail:tmfkuwa@ipc.shizuoka.ac.jp |
| 11月 | 3(木) ～5(土) | The 6th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (6th ISEM'11-Sendai) (開催場所：関西空港会議場) | | 2011.9.20 | 林(岡山理科大学工学部機械システム工学科内 日本実験事務局) 〒700-0005 岡山市北区理大町 1-1 Tel/Fax:086-256-9615 E-mail:office-jsem@mech.ous.ac.jp |
| 11月 | 9(水) ～ 11(金) | The Eleventh International Symposium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration (AFI/TFI-2011) (開催場所：ホテルメトロポリタン仙台) | 2011.10.3 | | 東北大学流体科学研究所 AFI/TFI-2011 実行委 員会 流体科学研究所研究支援室 増田 Tel/Fax:022-217-5883 E-mail:shien-staff@fmail.ifs.tohoku.ac.jp |
| 11月 | 13(日) ～ 18(金) | 第10回国際ガスタービン会議 (IGTC'11 Osaka) (開催場所：大阪国際会議場) | 2011.1.31 | 2011.4.30 | Yoshinobu Tsujimoto (Osaka Univ.) E-mail: tsujimoto@me.es.osaka-u.ac.jp Fax: 06-6850-6165 |
| 11月 | 21(月) ～ 23(水) | 第32回日本熱物性シンポジウム (開催場所：慶應義塾大学 日吉キャンパス) | 2011.7.1 | 2011.9.2 | 〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1 慶應大学理工学部システムデザイン工学科 長坂・田口研究室 Tel:045-566-1809(田口) Fax:045-566-1735 E-mail:jstp2011@naga.sd.keio.ac.jp |
| 12月 | 5(月) ～7(水) | 第49回燃焼シンポジウム (開催場所：慶應義塾大学 日吉キャンパス) | 2011.7.22 | 2011.9.16 | 第49回燃焼シンポジウム事務局 〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1 慶應大学理工学部機械工学科内 Tel:045-566-1496 Fax:045-566-1640 E-mail:sympo49@combustionsociety.jp |
| 12月 | 7(水) ～8(木) | 第14回スターリングサイクルシンポ ジウム (開催場所：日本科学未来館) | 2011.7.1 | 2011.10.21 | 実行委員長 大高敏男(国士館大学) Tel:03-5481-3334 Fax:03-5481-3253 E-mail: otaka@kokushikan.ac.jp 日本機械学会 加藤佐知子(事務局職員) Tel:03-5360-3503 Fax:03-5360-3508 E-mail: kato@jsme.or.jp |
| 12月 | 10(土) | 2011年度 計算力学技術者(CAE技術 者)資格認定事業【1・2級】認定試験 および付帯講習 | 2011.8.31 | | 〒160-0016 東京都新宿区信濃町35番地 信濃 町煉瓦館5階 一般社団法人 日本機械学会 事業企画 G 関根 Tel:03-5360-3506 Fax:03-5360-3509 E-mail: sekine@jsme.or.jp |
| 12月 | 19(月) ～20(火) | 第20回微粒化シンポジウム (開催場所：広島大学医学部 廣仁會館) | 2011.9.30 | 2011.10.28 | 日本液体微粒化学会 事務局 ㈱学術出版印刷 事務局長 近藤 健 〒554-0022 大阪市此花区春日出中 2-14-9 Tel:06-6466-1588 Fax:06-6463-2522 E-mail: info@ilass-japan.gr.jp |

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～ 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 | |

平成 23 年度 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞候補者推薦募集のお知らせ

日本伝熱学会では本年度も各賞の表彰を実施いたします。つきましては、下記の要領に従って本年度の学術賞、技術賞、および奨励賞の候補者推薦募集を行いますので、自薦、他薦を問わず、多数ご応募下さい。

1. 対象となる業績

- (1) 学術賞の対象は、原則として、最近 3 年間の **Thermal Science and Engineering** 誌に掲載された、あるいは、最近 5 回の日本伝熱シンポジウムにおいて発表し、国内外で審査のある学術論文集に掲載された伝熱に関する優秀な研究論文とします。なお、受賞対象研究課題名は、必ずしも論文題目と一致する必要はありません。また、**Thermal Science and Engineering** 誌に掲載された論文は、日本伝熱シンポジウムにおける発表の有無にかかわらず、受賞の対象となります。
- (2) 技術賞の対象は、公表された優秀な伝熱技術を開発した者とします。
- (3) 奨励賞の対象は、原則として、最近 3 回の日本伝熱シンポジウムのいずれかにおいて優秀な論文を発表した若手研究者（発表時に 30 歳程度以下の者）とします。
- (4) 学術賞および奨励賞の対象資格は、原則として本会会員に限ります。
- (5) 贈賞数は、学術賞 2 件程度、技術賞 1 件程度、奨励賞 4 件程度とします。

2. 選考方法

- (1) 各賞の選考は、「表彰選考委員会」が「日本伝熱学会賞審査・選考方法内規」によって行います。
- (2) 表彰選考委員会は、公募の他に、各賞の候補を推薦することが出来るものとします。

3. 提出書類

- (1) 申請書・推薦書 1 通
 - ・ 申請書・推薦書の書式は、学会ホームページからダウンロードしてご使用下さい。
 - ・ 学術賞、技術賞、奨励賞それぞれに申請書・推薦書の書式が異なりますので、ご注意ください。
- (2) 論文抜刷または技術内容参考資料 6 部
- (3) 日本伝熱シンポジウム講演論文集抜刷 6 部（学術賞、奨励賞のみ）

4. 提出期限

平成 23 年 12 月 16 日（金）

5. 提出先および問い合わせ先：

〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1-i6-23

東京工業大学 大学院理工学研究科 機械制御システム専攻 岡崎 健 宛

E-mail : okazakik@mech.titech.ac.jp Tel & FAX : 03-5734-3335

平成 23 年度 日本伝熱学会賞

学術賞 申請書・推薦書

注記：日本伝熱学会賞「学術賞」は以下のように規定されています。申請・推薦にあたってはご注意ください。

1. 学術賞は、原則として、最近 5 回の日本伝熱シンポジウムにおいて発表し、Thermal Science and Engineering 誌、またはその他の国内外で審査のある論文集に掲載された優秀な伝熱に関する研究を主体的に行った研究者とその共同研究者を対象とする。なお、受賞研究課題名は日本伝熱シンポジウムでの発表論文名と厳密に一致することを要しない。
2. 学術賞の受賞資格者は原則として本会会員に限る。

申請者・推薦者名 _____ 印
所属 _____
連絡先 〒 _____
電話 _____ e-mail _____

受賞候補者（※共同研究者欄は適宜増減してください。申請書・推薦書が 2 頁にわたってもかまいません）：

研究代表者

氏名（ふりがな） _____

所属 _____

職名 _____

会員資格 正会員 学生会員 名誉会員

連絡先 〒 _____

電話 _____

e-mail _____

共同研究者

氏名（ふりがな） _____

所属 _____

職名 _____

会員資格 正会員 学生会員 名誉会員

連絡先 〒 _____

電話 _____

e-mail _____

共同研究者

氏名（ふりがな） _____

所属 _____

職名 _____

会員資格 正会員 学生会員 名誉会員

連絡先 〒 _____

電話 _____

e-mail _____

受賞対象研究課題名：

関連研究の日本伝熱シンポジウム発表（※原則として最近の 5 回に限る。別刷またはそのコピー 6 部添付）：

論文題名 _____

著者名 _____

第 _____ 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，第 _____ 巻，_____ - _____ 頁，_____ 年

受賞対象研究内容の発表業績（※別刷またはそのコピー 6 部添付）：

論文題名 _____

著者名 _____

掲載誌 _____

第 _____ 巻，第 _____ 号，_____ - _____ 頁，_____ 年

申請・推薦理由：

平成 23 年度 日本伝熱学会賞

技術賞 申請書・推薦書

注記：日本伝熱学会賞「技術賞」は以下のように規定されています。申請・推薦にあたってはご注意ください。

1. 技術賞の対象は、公表された優秀な伝熱技術を開発した者とする。

申請者・推薦者名 _____ 印
所属 _____
連絡先 _____
電話 _____ e-mail _____

受賞候補者（※共同研究者欄は適宜増減してください。申請書・推薦書が2頁にわたってもかまいません）：

研究代表者

氏名（ふりがな） _____
所属 _____
職名 _____ 会員資格 正会員 名誉会員 その他 _____
連絡先 _____
電話 _____ e-mail _____
技術開発への寄与の内容 _____

共同研究者

氏名（ふりがな） _____
所属 _____
職名 _____ 会員資格 正会員 名誉会員 その他 _____
連絡先 _____
電話 _____ e-mail _____
技術開発への寄与の内容 _____

共同研究者

氏名（ふりがな） _____
所属 _____
職名 _____ 会員資格 正会員 名誉会員 その他 _____
連絡先 _____
電話 _____ e-mail _____
技術開発への寄与の内容 _____

受賞対象技術名：

受賞対象技術の内容（※技術の内容を説明する資料6部添付）：

申請・推薦理由：

平成 23 年度 日本伝熱学会賞

奨励賞 申請書・推薦書

注記：日本伝熱学会賞「奨励賞」は以下のように規定されています。申請・推薦にあたってはご注意ください。

1. 奨励賞の対象は，原則として，最近 3 回の日本伝熱シンポジウムのいずれかにおいて優秀な論文を発表した若手研究者（発表時に 30 歳程度以下の者）とする。
2. 奨励賞の受賞資格者は原則として本学会員に限る。

申請者・推薦者名 _____ 印
所属 _____
連絡先 _____
電話 _____ e-mail _____

受賞候補者：

氏名（ふりがな） _____
所属 _____
職名 _____ 会員資格 正会員 学生会員
連絡先 _____
電話 _____ e-mail _____

受賞対象研究課題名：

関連研究の日本伝熱シンポジウム発表（※原則として最近の 3 回に限る。別刷またはそのコピー 6 部添付）：

論文題名 _____
著者名 _____
第 _____ 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，第 _____ 巻， _____ - _____ 頁， _____ 年
発表時の年齢 _____
発表時の身分 _____

申請・推薦理由：

(社) 日本伝熱学会
創立 50 周年記念講演会と記念式典のお知らせ



創立 50 周年記念実行委員会
委員長 笠木 伸英

日本伝熱学会の会員皆様にはますますご清栄のこととお喜び申し上げます。さて、当学会は 1961 年に前身の日本伝熱研究会として発足してから本年 11 月で満 50 年を迎えます。

すでに会員皆様には封書にて詳細をご連絡申しあげましたが、下記のとおり特別講演会とそれに続いて記念式典、パーティーを開催いたしますので、ご来場を賜りますようご案内申し上げます。

記

期 日 2011 年 11 月 26 日 (土) 14 時から 18 時 30 分まで
場 所 経団連会館 (東京都千代田区大手町 1-3-2)

式次第

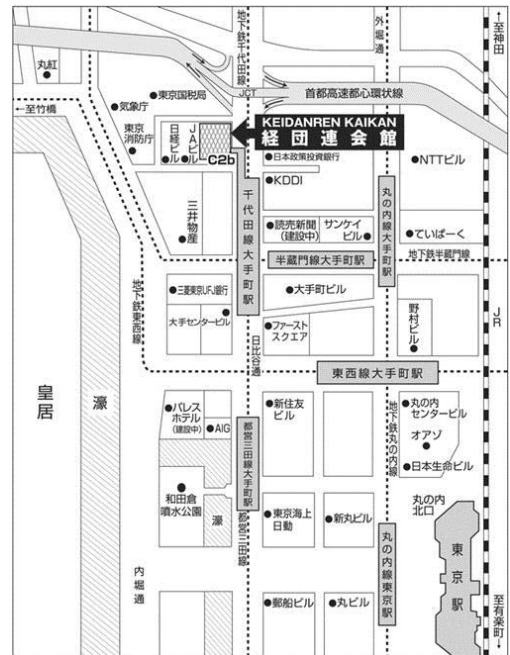
1. 記念講演会 (14:00~14:55) 国際会議場 (経団連会館 2 階)
長島 昭 (第 36 期会長, 慶應義塾大学名誉教授)
「学会のライフサイクルとサステナビリティー ー日本伝熱学会の半世紀」
2. 記念式典 (15:15~16:25) 国際会議場 (経団連会館 2 階)
各学会のご来賓からご祝辞を賜り, 功労者を表彰いたします。
3. 祝賀パーティー (16:45~18:30) ダイヤモンドルーム (経団連会館 4 階)

参加費 10,000 円 (同伴者は無料)

会員各位によるお申込みは、返信葉書による方式を原則としてお願いしていましたが、新たにお申し込みいただく場合には、電子メール (shikiten@htsj.or.jp) でも受け付けますのでご利用ください。なお、参加費の振込みを以て申込完了とさせていただきます。10 月 31 日 (月) までにお申し込みいただきますようお願いいたします。

【参加費振込口座】

みずほ銀行 本郷支店 普通預金口座 2840024
口座名：社団法人日本伝熱学会
(振込手数料は各自でご負担願います)



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研究発表論文募集

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。

【研究発表申込み方法】

- ・ 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。会員にはパスワードを配布して、電子版をウェブ上で閲覧できるようにします。なお、会員が当該講演論文を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ために、パスワードは近い将来には公開しません。
- ・ 講演論文集の印刷版と CD-ROM 版は参加者に配布します。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。
- ・ 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”にそのまま投稿することができます。詳細は会誌1月号の「お知らせ」に掲載します。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。
- ・ 執筆要綱は、会誌1月号の「お知らせ」および本シンポジウムのホームページに掲載します。
- ・ 講演論文原稿は、講演論文を電子化するために、原則として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。

【講演論文の公開日】

- ・ 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】

- ・ 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。

【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氏名”および“研究分野の分類番号”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も企画しています。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

キーノート講演

欧米アジア各国から、エネルギーに関わる8件の招待講演を計画しています。

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)

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30日(金) | 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ファイルをお願いします。
- ・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。

第 50 期入会 (2011.6.10~2011.8.1) 正 4 名・学生 2 名

| 資 | 氏 名 | 所 属 | 資 | 氏 名 | 所 属 |
|---|-------|--------------|---|--------|-------------------|
| 正 | 范 勇 | 電力中央研究所 | 正 | 甲斐田 武延 | 財団法人 電力中央研究所 |
| 学 | 是澤 亮 | 横浜国立大学大学院工学府 | 正 | 三田 泰之 | 三菱電機株式会社 生産技術センター |
| 学 | 山下 隼平 | 横浜国立大学大学院工学府 | 正 | 村上 信太郎 | 舞鶴工業高等専門学校 |

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



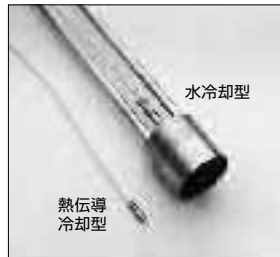
特徴

- 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。

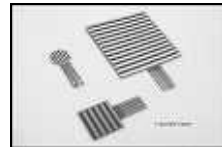
輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

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2弾となります。本年9月30日の50周年記念伝熱セミナーから、まず、本田博司先生と尾添紘之先生のご講演の内容を掲載させていただきました(原稿を頂いたのはご講演の前です)。お二人の先生が歴史をまとめられた凝縮、自由対流の分野は、本号で追悼文を掲載させていただいた藤井哲先生が長年にわたり中心的な役割を果たしてこられた分野です。私事で恐縮ですが、助手としてお世話になった藤井哲先生の追悼文を、編集出版部会長として編集を実質的に行う初めての本号に掲載せねばならないことを大変残念に思います。本号の50周年特集には成合英樹先生にも「原子力発電とプラントと伝熱」と題してご寄稿いただきました。3.11の後、日本のエネルギー政策の再検討が迫られているなか、その根幹に据えられてきた原子力研究の50年を振り返るのは意味のあることだと思います。

今、我々は時代の転換期を迎えているのかもしれませんが、日本伝熱学会にとっても今年は節目の年です。伝熱研究会25周年の際には甲藤好郎先生を委員長とした将来問題検討委員会が設置され、学会の活動や運営に関する答申が出されました。50周年を迎え、今期の笠木伸英会長のお考えの元、日本伝熱学会将来検討委員会が設置され、これからの伝熱研究および日本伝熱学会の方向について検討が始められようとしています。委員あるいは理事会メンバーに留まらず、多くの方々による実のある議論を期待しています。

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