

# 伝 熱

*Journal of the Heat Transfer Society of Japan*

ISSN 1344-8692 Vol. 49, No. 209  
2010. 10

*JHSJ*

◆特集：相変化する，ということ

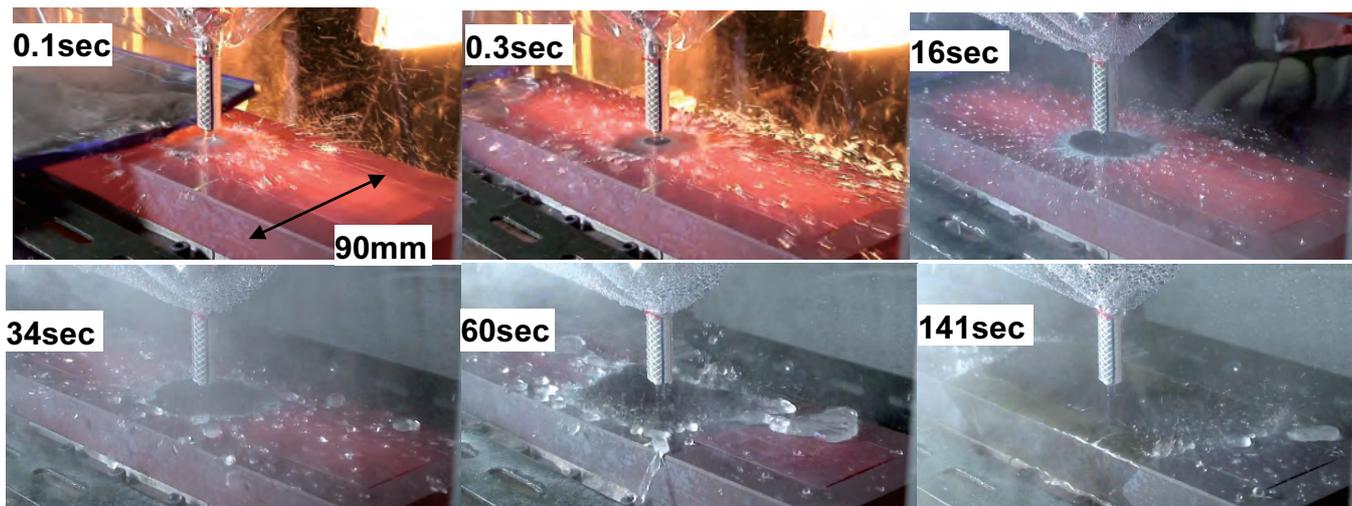


図1 衝突噴流による非定常沸騰冷却（鉛直方向上向き面）

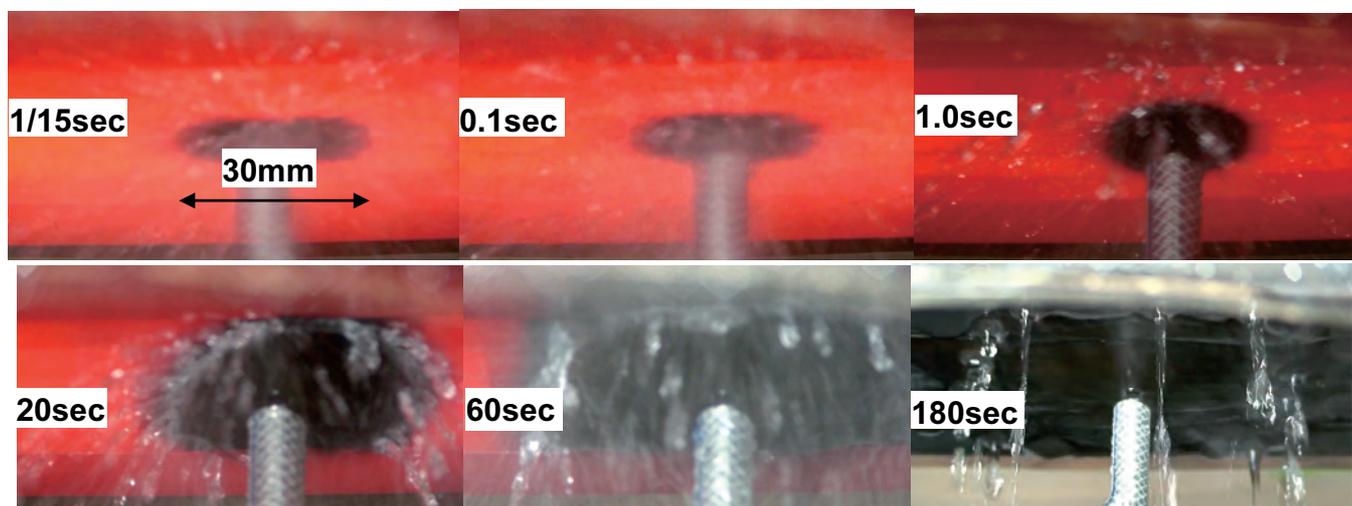


図2 衝突噴流による非定常沸騰冷却（鉛直方向下向き面）

## 衝突噴流による高温金属面の沸騰冷却

*Boiling Heat Transfer with Impinging Liquid Jet*

白樫 了（東京大学）

Ryo Shirakashi (The University of Tokyo)

e-mail: aa21150@iis.u-tokyo.ac.jp

上図は熱間圧延の冷却プロセスを模擬しておこなった衝突噴流による加熱平板の非定常沸騰冷却の様子である。1080℃程度まで加熱した SUS304 の平板に常温のイオン交換水の噴流を流量 1.25L/min で衝突させ、衝突点近傍の様子を時間変化を撮影した。図 1 は鉛直方向上向き、図 2 は鉛直面下向き加熱面の冷却状況を示し

ており、図中に衝突後のおおよその経過時間を記載した。この実験で用いた噴流ノズルの内径は 4.3mm、加熱面からノズル先端までの距離は 8mm である。但し、ノズル先端部が輻射により過熱されることを防ぐ為に、ホースで覆いをした。

黒い部分は、伝熱面と冷却水が接触している固液接触領域、その縁の白濁した部分は、遷移沸騰あるいは核沸騰領域と思われる。時間が進むにつれて、この黒い領域が広がっていく様子が見られる。これらの図は、第 45 回日本伝熱シンポジウムで発表された研究の一部である。加熱平板表面の熱流束等の詳細なデータは、同シンポジウムの講演論文集Ⅱ+Ⅲ, pp.776(上村, 山神, 白樫)を参考頂きたい。

# 伝 熱

## 目 次

### 〈第 14 回国際伝熱会議〉

#### 論文委員会報告・概要

|                 |                              |   |
|-----------------|------------------------------|---|
| 日本地域論文委員会報告     | 宮内敏雄 (東京工業大学), 佐藤 勲 (東京工業大学) | 1 |
| 第 14 回国際伝熱会議の概要 | 吉田英生 (京都大学)                  | 3 |

#### レビュー

|   |                     |    |
|---|---------------------|----|
| Conduction                              | 鳥居修一 (熊本大学)         | 7  |
| Jet Impingement                         | 後藤田 浩 (立命館大学)       | 8  |
| Melting/Solidification                  | 高木洋平 (静岡大学)         | 9  |
| Nano Interfaces and Misc. Nano          | 芝原正彦 (大阪大学)         | 10 |
| Convection                              | 中村 元 (防衛大学校)        | 11 |
| Electronic Cooling                      | 阿部宜之 (産業技術総合研究所)    | 13 |
| Fuel Cells                              | 宇高義郎 (横浜国立大学)       | 14 |
| Boiling Heat Transfer                   | 古谷正裕 (財団法人 電力中央研究所) | 15 |
| Heat Transfer Measurement Technology    | 丹下 学 (芝浦工業大学)       | 17 |
| Heat Transfer Equipment 1 and 2         | 小田 豊 (大阪大学)         | 18 |
| Bio Heat Transfer                       | 小宮敦樹 (東北大学)         | 19 |
| Combustion                              | 酒井清吾 (横浜国立大学)       | 20 |
| Natural Convection and Mixed Convection | 辻 俊博 (名古屋工業大学)      | 22 |
| Porous Media                            | 中曾浩一 (九州大学)         | 23 |
| Evaporation                             | 永井二郎 (福井大学)         | 25 |
| Radiation                               | 赤堀匡俊 (長岡技術科学大学)     | 26 |
| Thermodynamic Fundamentals and Systems  | 勝田正文 (早稲田大学)        | 28 |
| Heat Exchanger                          | 竹中信幸 (神戸大学)         | 29 |

### 〈特集：相変化する、ということ〉

|   |               |    |
|---|---------------|----|
| 相変化研究会の立ち上げと沸騰伝熱の話題                           | 小泉安郎 (信州大学)   | 30 |
| 「沸騰現象の把握と新たな計測法」                              | 門出政則 (佐賀大学)   | 33 |
| プール沸騰における Rohsenow の HTC モデルと Zuber の CHF モデル | 大川富雄 (大阪大学)   | 39 |
| 「西尾・田中の高熱流束プール沸騰モデル」の成り立ちとその評価                | 永井二郎 (福井大学)   | 45 |
| 原村・甲藤の限界熱流束モデルの概要とその特長                        | 原村嘉彦 (神奈川大学)  | 49 |
| プール沸騰における限界熱流束機構                              | 坂下弘人 (北海道大学)  | 53 |
| CHF に関する趙のマイクロ液膜モデル                           | 鶴田隆治 (九州工業大学) | 63 |

## 〈海外レター〉

イリノイ大学シカゴ校での研究活動報告 ……………角田直人（九州大学） …………… 70

## 〈エデュケーションQ〉

エルヴィン・シュレディンガー(1887-1961)の功績 ……………芝原正彦（大阪大学） …………… 72

## 〈国際活動・会議報告〉

ITherm2010 会議報告 ……………畠山友行（富山県立大学） …………… 78

## 〈特別寄稿：国内最大の地熱発電所紹介〉

九州電力株式会社・八丁原発電所の紹介 ……………白倉典幸（九州電力 八丁原発電所） …………… 80

## 〈巻頭グラビア:heat-page〉

衝突噴流による高温金属面の沸騰冷却 ……………白樫 了（東京大学） ……………表紙裏

## 〈行事カレンダー〉

…………… 85

## 〈お知らせ〉

平成 22 年度 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞の募集 …………… 87

日本伝熱学会創立 50 周年記念 第 48 回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集 …………… 91

優秀プレゼンテーション賞（第 48 回日本伝熱シンポジウム）について …………… 94

編集出版部からのお知らせ …………… 95

編集出版部会ノート …………… 99

CONTENTS

< The 14th International Heat Transfer Conference >

Paper Committee Report and Overview

|  |   |
|--|---|
| Japan Region Papers Committee's Report on the Fourteenth International Heat Transfer Conference<br>Toshio MIYAUCHI (Tokyo Inst. of Tech.), Isao SATOH (Tokyo Inst. of Tech.) | 1 |
| An Overview of the 14th International Heat Transfer Conference<br>Hideo YOSHIDA (Kyoto University)   | 3 |

Reviews

|  |    |
|--|----|
| Conduction<br>Shuichi TORII (Kumamoto University)  | 7  |
| Jet Impingement<br>Hiroshi GOTODA (Ritsumeikan University)   | 8  |
| Melting/Solidification<br>Youhei TAKAGI (Shizuoka University)  | 9  |
| Nano Interfaces and Misc. Nano<br>Masahiko SHIBAHARA (Osaka University)                                      | 10 |
| Convection<br>Hajime NAKAMURA (National Defense Academy)   | 11 |
| Electronic Cooling<br>Yoshiyuki Abe (AIST: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology) | 13 |
| Fuel Cells<br>Yoshio UTAKA (Yokohama National University)  | 14 |
| Boiling Heat Transfer<br>Masahiro FURUYA (CRIEPI)  | 15 |
| Heat Transfer Measurement Technology<br>Manabu TANGE (Shibaura Institute of Technology)                      | 17 |
| Heat Transfer Equipment 1 and 2<br>Yutaka ODA (Osaka University)   | 18 |
| Bio Heat Transfer<br>Atsuki KOMIYA (Tohoku University)   | 19 |
| Combustion<br>Seigo SAKAI (Yokohama National University)   | 20 |
| Natural Convection and Mixed Convection<br>Toshihiro TSUJI (Nagoya Institute of Technology)                  | 22 |
| Porous Media<br>Koichi NAKASO (Kyushu University)  | 23 |
| Evaporation<br>Niro NAGAI (University of Fukui)  | 25 |
| Radiation<br>Masatoshi AKAHORI (Nagaoka University of Technology)  | 26 |
| Thermodynamic Fundamentals and Systems<br>Katsuta MASAFUMI (Waseda University)                               | 28 |
| Heat Exchanger<br>Nobuyuki TAKENAKA (Kobe University)  | 29 |

## < Special Issue >

|   |    |
|---|----|
| Commencement of Research Group of Phase Change and Topic of Boiling Heat Transfer<br>Yasuo KOIZUMI (Shinshu University) .....       | 30 |
| Understanding of Boiling Phenomenon and New Measurement<br>Masanori MONDE (Saga University) .....                                   | 33 |
| Rohsenow's HTC Model & Zuber's CHF Model in Pool Boiling<br>Tomio OKAWA (Osaka University) .....                                    | 39 |
| Stories and Discussions on the Model for High Heat-Flux Pool-Boiling by Nishio and Tanaka<br>Niro NAGAI (University of Fukui) ..... | 45 |
| Outline and Merits of Haramura and Katto's model for Critical Heat Flux<br>Yoshihiko HARAMURA (Kanagawa University) .....           | 49 |
| Critical heat flux mechanism in pool boiling<br>Hiroto SAKASHITA (Hokkaido University) .....  | 53 |
| Zhao's micro-layer model on the CHF<br>Takaharu TSURUTA (Kyushu Institute of Technology) .....                                      | 63 |

## < International Letter >

|  |    |
|--|----|
| Report on Research Activities in the University of Illinois at Chicago<br>Naoto KAKUTA (Kyushu University) ..... | 70 |
|--|----|

## < Education Q >

|  |    |
|--|----|
| A meritorious deed of Erwin Schrödinger (1887-1961)<br>Masahiko SHIBAHARA (Osaka University) ..... | 72 |
|--|----|

## < Report on International Conference >

|   |    |
|---|----|
| Report of ITherm2010<br>Tomoyuki HATAKEYAMA (Toyama Prefectural University) ..... | 78 |
|---|----|

## < Contribution >

|   |    |
|---|----|
| Introduction of KYUSYU ELECTRIC POWER CO., INC HATCHOBARU GEOTHERMAL POWER STATION<br>Noriyuki SHIRAKURA (KEPCO HATCHOBARU PS)..... | 80 |
|---|----|

## < Opening-page Gravure:heat-page >

|   |              |
|---|--------------|
| Boiling Heat Transfer with Impinging Liquid Jet<br>Ryo Shirakashi (The University of Tokyo) ..... | Opening Page |
|---|--------------|

|                    |    |
|--------------------|----|
| < Calendar > ..... | 85 |
|--------------------|----|

|                         |    |
|-------------------------|----|
| < Announcements > ..... | 87 |
|-------------------------|----|

## 第 14 回国際伝熱会議：日本地域論文委員会報告

Report from the Japan Region Papers Committee of the  
14th International Heat Transfer Conference

宮内 敏雄 (東京工業大学)  
Toshio MIYAUCHI (Tokyo Inst. of Tech.)  
e-mail: tmiyauch@mes.titech.ac.jp

佐藤 勲 (東京工業大学)  
Isao SATOH (Tokyo Inst. of Tech.)  
e-mail: satohi@mep.titech.ac.jp

## 1. はじめに

第 14 回国際伝熱会議 (以下, IHTC-14) は, 2010 年 8 月 8 日 (日) ~13 日 (金) に, 米国 Washington D.C. の The Omni Shoreham Hotel で開催された. IHTC-14 の運営は, 会議委員長 A. Bar-Cohen 教授, 同事務担当 J. Kim 教授 (いずれも Univ. of Maryland), 実行委員長 Y. Jaluria 教授 (Rutgers Univ.) をはじめとする実行委員会が担い, ASME, AIChE, カナダ機械学会がホスト学会を務めた. 日本地域からの論文については, 日本地域論文委員会 (委員長: 宮内, 幹事: 佐藤) がハンドリングにあたった. ここでは, 同委員会の活動をご報告する.

## 2. 論文投稿と査読プロセス

例年同様, IHTC-14 の発表論文は, 18 の地域別論文委員会が分担してハンドリングを行った. ただし今回の会議では, 国際論文委員会として地域間を網羅した全体的な活動はなく, 論文のハンドリングは一切, 各地域の論文委員会に一任された. また, 最終的なプログラム構成も, 各地域からの最終論文が出そろった段階で実行委員会がまとめて行い, 地域論文委員会はコミットしていない.

日本地域論文委員会は, 34 名 (日本 32 名, 台湾 2 名) のメンバーで, 「Japan, Pakistan, other East Asian countries not specified elsewhere」の地域からの論文について, 査読・採否判定を担当した. 第 12 回までの IHTC では, 地域ごとに採択論文数の上限が設定されていたが, 前回に引き続き IHTC-14 ではこうした制限はなく, 「target number of posters」として目標値が設定されたのみであった. 各地域の目標値と実際の発表論文数の対比を表 1 にまとめる.

日本地域には 90 編の論文発表が期待されていたが, 実際にはそれを上回る 103 件の発表がなされた. 90 件の目標値は開催国である米国の 110 件

に次いで多く, 日本地域, 特に我が国の伝熱研究に大きな期待が寄せられていることがわかる.

一方, 発表論文数の実績を地域ごとに見ると, 米国が多いことはよく理解できるが, 中国からの論文投稿が際だって多くなっている. 実行委員会がまとめた参加者の地域別割合 (北米 38 %, アジア 31 %, ヨーロッパ・ロシア 25 %, 中東 4 %, 南米 1.5 %, その他 0.5 % : 参考までに国別の参加者数を表 2 に示す) から見るとやや突出している印象があるが, これも採択論文数上限を撤廃した影響かもしれない. これを含めても日本地域からの論文発表数は 3 番目 (国別参加者数では開催国である米国に次いで 2 番目) に多い数で, 国際伝熱会議における我が国の寄与は引き続き矚目すべきものがあるといえる.

日本地域論文委員会では, 申し込みがあったアブストラクトをもとに, まず IHTC のスコープに合致しているかの視点で採否を決め (2009 年 10

表 1 地域別論文数 (目標値と実績)

| 地域              | 論文<br>(目標値) | 論文<br>(実績) | 基調講演<br>(割当数) |
|-----------------|-------------|------------|---------------|
| Australia       | 25          | 18         | 2             |
| Brazil          | 10          | 21         | 1             |
| Canada          | 25          | 29         | 1             |
| China           | 30          | 149        | 2             |
| France          | 45          | 34         | 2             |
| Germany         | 35          | 39         | 2             |
| India           | 10          | 18         | 1             |
| Israel          | 15          | 7          | 1             |
| Italy           | 15          | 31         | 1             |
| Japan           | 90          | 103        | 3             |
| Korea           | 20          | 30         | 1             |
| The Netherlands | 10          | 19         | 1             |
| Portugal        | 2           | 3          | 1             |
| Russia          | 35          | 53         | 2             |
| South Africa    | 10          | 14         | 1             |
| Switzerland     | 10          | 5          | 1             |
| UK              | 50          | 64         | 3             |
| USA             | 110         | 217        | 5             |
| <b>Total</b>    | <b>547</b>  | <b>854</b> | <b>31</b>     |

表 2 国別参加者数

| 国名          | 参加者数 | 国名           | 参加者数 |
|-------------|------|--------------|------|
| Afghanistan | 1    | Lithuania    | 3    |
| Australia   | 9    | Malaysia     | 3    |
| Austria     | 3    | Mexico       | 1    |
| Belgium     | 9    | Morocco      | 1    |
| Benin       | 1    | Netherlands  | 7    |
| Bermuda     | 1    | Norway       | 2    |
| Brazil      | 14   | Poland       | 3    |
| Canada      | 32   | Portugal     | 2    |
| China       | 88   | Russia       | 37   |
| Czech Rep.  | 2    | Singapore    | 6    |
| Egypt       | 1    | Slovenia     | 1    |
| Finland     | 3    | South Africa | 7    |
| France      | 49   | South Korea  | 34   |
| Georgia     | 1    | Spain        | 7    |
| Germany     | 41   | Sweden       | 5    |
| Hong Kong   | 1    | Switzerland  | 7    |
| India       | 15   | Taiwan       | 9    |
| Iran        | 6    | Thailand     | 4    |
| Iraq        | 1    | Tunisia      | 1    |
| Ireland     | 8    | Turkey       | 9    |
| Israel      | 14   | USA          | 317  |
| Italy       | 22   | UAE          | 2    |
| Japan       | 120  | UK           | 22   |
| Lebanon     | 1    | Venezuela    | 1    |

～11 月), 採択されたものの論文に対して査読を実施した(～2010 年 4 月). 今回の IHTC は, ホスト学会が ASME であることもあって, 発表申込から査読, 採否通知, 最終原稿提出までが「ASME WebToolBox」と呼ばれるオンラインシステムで実施された. 幹事がこのシステムに不慣れであったこともあり, 採否通知等の日程管理には苦しめられたが, 著者への通知等がややぶっきらぼうなところはあるものの基本的にはよく練られたオンライン査読システムであり, 概ね滞りなく採否決定を行うことができたと思っている.

これからの IHTC (に限らず多くの国際会議)でも, 発表申し込み・査読・原稿提出がオンラインで行われることになろうと思われるが, 開催国(ホスト学会)ごとにシステムが異なるのは, 著者の立場でも, 採否をハンドリングする論文委員会にとっても, あまり望ましいことではなく, 統一的なシステムの構築が期待されるところである.

### 3. 基調講演

地域論文委員会のもう一つのタスクに, 基調講演候補の選定がある. 基調講演数には地域ごとに割当数(表 1 参照)があり, 日本地域には米国に次いで多い 3 件が指定された.

日本地域論文委員会では, 論文査読開始前の 2009 年 5 月に基調講演候補 4 件を推薦し, 実行委員会で各地域からの提案に基づき分野等を調整の結果, 笠木伸英教授(東大), 丸山茂夫教授(東大), 河村 洋教授(理科大)・西野耕一教授(横国大)の 3 件が選定された. これらの基調講演はいずれも我が国の伝熱研究の進展と広がりを示す成果として論文委員会が一致して推薦したものであり, 日本の伝熱研究のプレゼンスを世界にアピールすることができたと確信している.

### 4. おわりに

今回の会議では, 国際論文委員会としての全体的な活動や調整がないなど, 国際伝熱会議としてのまとまりにやや欠けていたきらいがあるが, 論文を発表された皆様の優れた成果をもって我が国の伝熱界のアクティビティーを示すことができた. 改めて各位に感謝申し上げたい.

また, こうして日本地区論文委員会が大過なく任務を終えられるのは, 以下にお名前を挙げる委員(アルファベット順, 敬称略, 所属は着任時)の皆様

様に査読等でご尽力をいただいたおかげである.  
委員: 青木和夫(長岡技科大), 近久武美(北大), 土橋 律(東大), 花村克悟(東工大), 飛原英治(東大), 平澤茂樹(神戸大), 菱田公一(慶應大), 井上剛良(東工大), 石塚 勝(富山県立大), 神永文人(茨城大), 片岡 勲(阪大), 勝田正文(早稲田大), 小林秀昭(東北大), 小森 悟(京大), 功刀資彰(京大), Duu-Jong Lee(国立台湾大), Tong-Miin Liou(台湾精華大), 牧野俊郎(京大), 圓山重直(東北大), 門出政則(佐賀大), 長坂雄次(慶應大), 中部主敬(京大), 中山 顕(静岡大), 岡崎 健(東工大), 大田治彦(九大), 小澤 守(関西大), 清水昭比古(九大), 武石賢一郎(阪大), 竹中信幸(神戸大), 瀧本 昭(金沢大), 谷下一夫(慶應大), 辻 俊博(名工大)

アセンブリー委員: 笠木伸英(東大), 吉田英生(京大)

さらに, 本委員会前委員長の笠木伸英教授, 同幹事の宇高義郎教授には, 地域担当論文委員会の活動方法等について丁寧なご指導をいただいた. ここに記して厚く御礼を申し上げる.

第 14 回国際伝熱会議の概要

*An Overview of the 14th International Heat Transfer Conference*

吉田 英生 (京都大学)

*Hideo YOSHIDA (Kyoto University)*

*e-mail: sakura@hideoyoshida.com*

1. はじめに

第 14 回の国際伝熱会議 (International Heat Transfer Conference, 以下 IHTC) が, 2010 年 8 月 8 日 (日) ~13 日 (金), 米国 Washington D.C. で開催された. 会場は F.D. Roosevelt 大統領以降, Washington での中心的な社交場としての伝統を誇る The Omni Shoreham Hotel (図 1) である. 筆者は, 4 年後に京都で開催予定の第 15 回国際伝熱会議 (IHTC-15) の実行委員会委員長を拝命していることから, 参加者の一人としての立場に加えて, これから 4 年後に主催側となる立場から今回の会議を観察した.

若い読者も多いと思うので, IHTC のあゆみを簡単に記しておこう. 表 1 に示すように, IHTC は第二次世界大戦後まもない 1951 年に始まった. 1966 年以降 4 年に一度開催されるようになり, 伝熱に関する最も大規模かつ権威のある会議, まさに伝熱分野におけるオリンピックとしての重要な役割を果たしてきた. オリンピックにたとえたついでに表 1 の右欄にはオリンピックの歴史も加えてみた. 科学技術に関する IHTC とスポーツに関するオリンピック — これらは本来別物であるはずだが, IHTC の開催都市とオリンピックの開催

都市を並べてみると, 意外にも結構な相関がある, すなわちオリンピックから少し遅れて IHTC が同じ都市あるいは近郊の都市で開催される場合が半数程度あることがわかる. その時々々の国の勢いがこれらの大きなイベントを招致する駆動力となると考えれば当然の結果ともいえよう.

今回は 4 年周期が定着してから数えても米国での 3 回目の開催となる. 議長は Maryland 大学の A. Bar-Cohen 教授, 幹事は同大学の J. Kim 教授, プログラム委員長は Rutgers 大学の Y. Jaluria 教授である. ホスト学会は, ASME の Heat Transfer Division, AIChE, Canadian Society for Mechanical Engineering である.

世界から多くの参加者を迎える国際会議では, 開催場所の魅力も無視できない要素である. その点, The White House, The Capitol Hill, The National Gallery of Art, The Smithsonian Institution などを擁する Washington は魅力十分であるが, 気候につい

表 1 IHTC とオリンピックの歴史

| 年            | IHTC                        | 年    | Olympic        |
|--------------|-----------------------------|------|----------------|
| 1951         | 1: London/<br>Atlantic City |      |                |
| 1961<br>1962 | 2: Boulder<br>London        | 1964 | 東京             |
| 1966         | 3: Chicago                  | 1968 | Mexico City    |
| 1970         | 4: Paris Versailles         | 1972 | München        |
| 1974         | 5: 東京                       | 1976 | Montreal       |
| 1978         | 6: Toronto                  | 1980 | Moscow         |
| 1982         | 7: München                  | 1984 | Los Angeles    |
| 1986         | 8: San Francisco            | 1988 | Seoul          |
| 1990         | 9: Jerusalem                | 1992 | Barcelona      |
| 1994         | 10: Brighton                | 1996 | Atlanta        |
| 1998         | 11: Kyongju                 | 2000 | Sydney         |
| 2002         | 12: Grenoble                | 2004 | Athens         |
| 2006         | 13: Sydney                  | 2008 | 北京             |
| 2010         | 14: Washington              | 2012 | London         |
| 2014         | 15: 京都                      | 2016 | Rio de Janeiro |
| 2018         | 16: 北京                      | 2020 |                |



図 1 会場の The Omni Shoreham Hotel

ては猛烈な暑さで、4 年後の京都の暑さを気にしていた筆者は、正直なところホットしたことを付記する。

## 2. IHTC-14 の統計

開催直前の 8 日午前に開催された The Assembly for International Heat Transfer Conference のミーティングで、Bar-Cohen 議長がプレゼンテーションを行った資料から、統計を以下に列挙する。(詳細情報は本特集の『日本地域論文委員会報告(宮内敏雄委員長・佐藤勲幹事)』を参照されたい。)

- ・キーノート/記念講演：38
- ・一般論文：854 (米 217, 中 149, 日 103, 英 64, 露 53, 独 39, 仏 34, 伊 31, 韓 30, 加 29, 伯 21, 蘭 19, 豪 18, 印 18, …) BRICs の勢いは伝熱分野でも顕著である。
- ・参加者(8月5日現在):950名, 48カ国(米 317, 日 120, 中 88, 仏 49, 独 41, 露 37, 韓 34, 加 32, 英 22, 伊 22, 印 15, 伯 14, イスラエル 14, …) なお、閉会式での Bar-Cohen 議長の発表によると、当日受付も含めると最終的な参加者は 1100 名を超えたとのことである。

## 3. 参加登録料と配布物

参加登録料は ASME 関連学会メンバー/発表者(バンケット含む) 725 ドル, ASME 関連学会学生メンバー 250 ドル(バンケット含まず)だが、たいていの参加者にとっては早期登録で 100 ドル割引した 625 ドルなので、日本人にとっては円高の好条件も加わり納得できる価格設定であったと思う。

参加者には、名札、レターサイズのプログラム冊子(全 112 ページ)とアブストラクト集(全 208 ページ)、CD-ROM、そして ASME のカバンが渡される。問題を感じたのはプログラム冊子で、めりはりがなく文字だけが並んだページからは、スケジュール全体を見渡すことが難しく、さらに発表者とセッション番号の対応は索引でわかっても、そのセッションがいつどこで開催されるのかは、容易にはわからない。これはあまりにも不親切で、どうして準備段階で改善できなかったのか疑問が残る。

なお、国際会議とはいうものの ASME の色がどうしても前面に出がちなのは否定しがたく、前

述の ASME 関連学会メンバー割引などの参加者に直接関係する事項に加え、その他の局面でも問題なしとはいかなかったようである。また、会場使用と参加者の一定数の宿泊をセットにして契約していることから、宿泊者数が伸び悩んだ開催直前に宿泊費がディスカウントされたため多少の混乱があったようだ。

いずれにせよ、世界のさまざまな国や人種を相手にして、読めない数字も多い中で、準備を行う主催者側の苦労は計り知れないと同情するとともに、次はわれわれがその番なのだ気を引き締める次第である。

## 4. セッションの構成

図 2 におおよそのタイムテーブルを示す(厳密には 5~10 分程度のズレがある箇所があるが無視していただきたい)。このような図がプログラム冊子には全くないため、参加者は全容を把握するのに困ったのである。

おおまかにいうと、ランチをはさんでキーノート・レクチャー、朝夕にポスター・セッションが配置されている。なお、ポスター・セッションではセッション開始時に部屋の一角で各論文当たり 1 分ずつのオーラル・プレゼンテーションの時間も設定された。IHTC-7 以来、すっかり定着したポスター・セッションではあるが、ポスターではや

|         | Mon. 9   | Tue. 10 | Wed. 11  | Thu. 12  | Fri. 13  |
|---------|----------|---------|----------|----------|----------|
| 8:30am  | Opening  |         |          | Pos. 6   |          |
| 9:30am  | KL 1     | Pos. 3  | Pos. 4   |          | Pos. 8   |
| 10:30am | KL 2-4   |         |          | KL 20-22 | KL 29-31 |
| 11:30am | Pos. 1   | KL 5-7  | KL 11-13 | KL 23-25 | KL 32-34 |
| 0:30pm  |          | KL 8-10 | KL 14-16 |          |          |
| 1:30pm  |          |         |          |          |          |
| 2:30pm  |          |         | KL 17-19 | KL 26-28 | KL 35-37 |
| 3:30pm  | Pan. 1-3 | Tours   | Pan. 4-6 | Pan. 7-9 | KL 39-40 |
| 4:30pm  |          |         | Pos. 5   |          | Closing  |
| 5:30pm  | Pos. 2   |         |          | Pos. 7   |          |
| 6:30pm  |          |         |          |          |          |

図 2 タイムテーブル

(KL: Keynote Lecture, Pos.: Poster, Pan.: Panel)

はり会議の緊張感を持続しにくいと感じる。もちろん、オーラルもポスターもそれぞれ長所と短所があるが、次回 IHTC-15 では、なんとしてもオーラル主体で実現したいと意を強くした。

### 5. キーノート・レクチャー

オープニングでのキーノート・レクチャーは前回 IHTC 議長の指定席となっているので、New South Wales 大学の G. de Vahl Davis 名誉教授がライフワークである自然対流の研究を振り返られた。以降のキーノート・レクチャーは 3 件並列なので、最大でも 13 件しか聴けないという問題がある。並行する 3 件のキーノート・レクチャーを何度かはしごして“入り”を確認してみたところ、大きな偏りが見られたこともあった。

日本からは、笠木伸英東京大学教授、西野耕一横浜国立大学教授、丸山茂夫東京大学教授が、いずれもインパクトの強い立派な講演をされた。なかでも笠木教授は、今回創設された、最も優れたキーノート・レクチャーを行った個人に対して与えられる The William Begell Medal の初代受賞者となられ、誠に喜ばしいことであった (図 3)。

### 6. ポスター・セッション

まず、全セッション名を以下に列挙する。現象面あるいは応用面からのセッション分けが併用されており、各セッションのキーワードも、わが伝熱シンポジウムの場合と大きく変わることはない。Bio Heat Transfer, Boiling Heat Transfer, Combustion, Computational Heat Transfer, Condensation, Conduction, Convection, Electronic Cooling, Evaporation, Fuel Cells, Gas Turbines, Heat Pipes, Heat Transfer Measurement Techniques, Heat Transfer Equipment, Jet Impingement, Melting and Solidification, Microchannels, Nano, Nanofluids, Natural Convection, Natural/Mixed Convection, Nuclear, Phase Change Materials, Porous Media, Radiation, Solar, Spray Cooling, Sustainable Environment, Thermodynamic Fundamentals and Systems, Thermoelectrics, Two-Phase Flow

実際にセッション・ルームに入って誰しもまず気付くのはノー・ショーの多さである。会議幹事の Kim 教授が調査されたところ、約 20%に達していることが判明した。とりわけ中国のノー・シ



図 3 バンケットの席で Hewitt 教授から The William Begell Medal を授与される笠木教授

ョーが多かったので、X. Zhang 清華大学教授に確認したところ、今回の作業スケジュールでは米国への入国ビザの発行が間に合わなかったため、やむを得なかったとのことである。

先にポスター・セッションでの緊張感の不足を問題にしたが、最終日のポスター・セッションでも比較的多くの参加者があり活発に討論が行われていたことは評価してよいと思う。とりわけ、若い研究者が熱心に参加していたことは、ポスター・セッションの利点がうまく機能しているといえるだろう。

### 7. バンケット

会議の中日 11 日 (水) 夜にバンケットが開催された。会場は開会式・閉会式やキーノート講演 (の一つ) を行う Regency Ballroom である。フル・レジストレーションをした参加者はバンケット込みであるから、バンケット出席者は 1000 名前後の膨大な数になる可能性がある。実際、巨大な Regency Ballroom には 10 人が着座できる円卓が 80 卓置かれていたので最高 800 名は収容できる計算だが、空席もほとんどなかったことを考えると、遅れて来た人は気の毒にも出席を断念したのではないかと想像する。

Maryland 大学で機械工学とジャズを専攻中の学生が率いるジャズカルテットがいかにもアメリカ的な BGM を奏でるなか、各テーブルでそれぞれ適宜乾杯をして始まる自由なバンケット。全テ

ーブルで食事が始まったころ Bar-Cohen 議長による開会の挨拶だけがなされ、その後 1 時間半ほど経過してから、前述の The 2010 William Begell Medal, The 2009 Hartnett-Irvine Award, The 2008 Luikov Medal, The 2010 Max Jacob Memorial Award 各賞の授与があった。そして最後に 4 年後の IHTC-15 の組織委員会を代表して笠木伸英委員長、筆者（副委員長）、円山重直副委員長が順に一言ずつ歓迎の辞を述べた。

なお、先ほどプログラム冊子については不満を述べたが、このバンケットの各テーブルにあらかじめ配布されていたリーフレットでは、The Capitol Hill と桜の美しい写真を表紙として、各賞受賞者の紹介がなされ、さらに裏側のページにはわたしたちの IHTC-15 に関する最新の情報が記載されていた。このリーフレットを準備された方の細やかな配慮に感激するとともに、わたしたちももっと学ぶべき・考えるべきところがあるなど自戒を込めて肝に銘じた。

#### 8. 国際会議における一見ささいな違い

蛇足かもしれないが、他に書く機会もなかなかないので、以下に若干書き添えさせていただく。

海外に出ると誰も民族性の違いを大小さまざまところで感じる。もちろん、このことは国際会議においても例外ではない。

今回の会議は、もともとポスター・セッションが主体なので基本的にはセルフサービスということになるが、キーノート講演においても、照明は常に明るくもなし暗くもなしという中間レベルで無調整の一定、質問時には（日本でならアルバイトの学生諸君が身を小さくかがめて遠慮がちに小走りでマイクを届けるが）質問者にマイクのところまで来させて発言させる。筆者は、無調整の照明についてはスライドが見えにくい場合も多くて感心しなかったが、学会の質問のときは原則として質問者にマイクまで来させる方式でよいと思う（そして、アルバイトの日本人学生諸君ももっと堂々とふるまっていたらいい）。総じて、日本では心配りが細やかでサービスがよいのは美質でもあるが、反面、自分達自身が一旦受け身の立場になると、とことんどこされることに甘んじてしまう面があり、この弊害はいろんなところで及んで無視できないと思う。

一方で、日本人が（国内で）自然に表現できないのは、講演後の拍手ではなかろうか。短時間の一般講演の後の拍手というまでもなく、比較的長時間の基調講演の場合でも、司会者が気を利かして誘導しない場合には、拍手なしにいきなり質問に移って、すべてが終わって降壇時に拍手という場合も少なくない。音楽家の茂木大輔さんの著書に音楽会での『拍手のルール』というのがあったが、拍手は言葉を越えた人類の共通語だと思っているので、学会での拍手のルールについても、われわれが日々心していくべきではないだろうか。

そのほかにも、国際会議における一見ささいな違いは無数にある。それらは、どちらが正しいという性質のものでは必ずしもないが、どちらがよりよい影響を及ぼしていくかという潜在性の点から、ささいなこと無視せず見直していくことが重要ではないかと思う。

#### 9. むすび — IHTC-14 から IHTC-15 に向けて —

IHTC-14 の閉会式は 100 名程度の参加者によって短く終わった。IHTC-14 は、Bar-Cohen 議長を中心とする多くの方々のご努力のおかげで、有意義かつ楽しいものであった。この IHTC ほど世界の伝熱関係者が一堂に会する機会是他になく、まずそのことだけでも目的の半分は達せられたといっても過言ではないと思う。それに言うまでもなく、発表内容も伝熱分野では最高レベルの会議であった。しかし、一方で IHTC の 60 年に及ぶ歳月の間に、周囲の状況変化を含めて、IHTC の存在意義が問われていることも事実であろう。

今や日本の伝熱研究は量的にも質的にも世界最高水準にあることは衆目の一致するところである。その日本で 4 年後に IHTC を再び開催するチャンスを得ることができたのは、他ならぬ日本伝熱学会の大先輩から現在の会員の皆様の総力によるものである。IHTC-5（東京）以来 40 年ぶりのチャンスを、今度は日本のというより世界の伝熱あるいは Thermal Science and Engineering を新時代に飛躍させるための場ととらえたいと思う。それが容易でないことは重々理解している。しかし、成熟度を増したどのような生命体や組織体も、それまでの流れを単に外挿するだけでは、いずれは死にいたることが必定である。日本伝熱学会の諸賢のご協力もお願いし、飛躍実現に邁進したいと思う。

## Conduction

鳥居 修一 (熊本大学)

*Shuichi TORII (Kumamoto University)*

8 月 12 日午前に企画されたトピック「Conduction」は、19 件の研究成果で構成され、当日ポスターを示して紹介されたのは 16 件であった。2 時間の限られた時間でのポスターセッションであったが、見物客は絶えることなく各ポスターを前にして活発に議論を行っていた。以下に各研究の内容を大別して概要を述べる。

- The Wave Propagation Equation of Heat Conductive in Crystal
  - Gaseous Conductivity Study on Silica Aerogel and its Composite Insulation Materials
  - Ballistic Diffusive Heat Conduction Model
  - Mass Nature of Heat and its Applications I: Motion of Thermomass Fluid and General Heat Conduction Law
  - Mass Nature of Heat and its Applications II: Non-Fourier Heat Conduction in Carbon Nanotubes
  - Mass Nature of Heat and its Applications IV: Thermal Wave and Periodic Temperature Oscillation in Metallic Films Heated by Ultra-Short Pulsed Lasers
- 上記の一連の研究は、非フーリエ熱伝導モデルの提案及びそのモデルを用いた数値解析を行っている。更に、パルスレーザー加熱によって電子温度振動が実験的に計測され、理論解析と比較検討している。
- Explosive Crystallization in Thin Amorphous Layers on Heat Conducting Substrates
- アモルファスから結晶化する際の伝播速度が数値解析によって求められている。
- Numerical Determination of the Temperature Dependent Thermophysical Properties in Solid Materials: Experimental Instrumentation
  - Integral Transforms, Bayesian Inference, and Infrared Thermography in the Simultaneous Identification of Variable Thermal Conductivity and Diffusivity in Heterogeneous Media

- Estimation of Location and Size of Defects in a Solid Body via Inverse Heat Conduction Problem

上記の一連の研究は、熱伝導の逆問題より、熱伝導率と比熱の温度依存性や固体媒体の精緻な検出サイズと位置を求める手法を提案している。

- The Application of Entropy Dissipation Theory in the Volume-to-Point Heat Conduction Problem
- On Uncertainty and Local Sensitivity Analysis for Steady-State Conjugate Heat Transfer Problems
- High Temperature Facility Under Vacuum for the Thermal Characterization of Anisotropic Materials
- Thermal Anisotropy in Injection Molded Polymer Composite Fins

上記の一連の研究は、非一様な熱源が存在する場合、定常状態のふく射と対流が複合する場合、材料やフィン内部が非等方性の場合の熱伝導問題を数値解析によって検討している。

- Influence of Surface Roughness on Contact Heat Transfer

接触熱抵抗における表面粗さが接触圧力を変えて実験され、経験式と比較検討されている。

- Thermal Conductivity of Biomorphic Porous SiC Based Ceramics
- Influence of Fiber Orientation and Aspect Ratio on the Effective Conductivity of Parallelepipedal-Cell Short-Fiber Composites
- Organic Compounds Thermal Conductivity in the Liquid Phase: A Prediction Method in the Temperature Range From the Melting Point to Near the Critical Temperature

- Preliminary Results for Estimating the Backside Heat Losses of a Composite Panel

上記の一連の研究は、セラミックベースのマイクロ構造の異なる多孔質体、カーボンファイバの方向性の異なった構造体、オーガニック複合体の熱伝導を計測している。

Jet Impingement  
Single-Phase Jets

後藤田 浩 (立命館大学)

Hiroshi GOTODA (Ritsumeikan University)

e-mail: gotoda@se.ritsumei.ac.jp

衝突噴流の単相流に分類されたポスターセッションは、会議 2 日目 8 月 10 日(火)の午前(8:30-10:30)に行われた。概要集に記載されている 20 件のポスター発表が予定されていたが、実際に発表が行われたのは 14 件であった。発表が行われた論文数を国別にみると、アメリカ 3 件(論文番号 22170, 22684, 22695), 日本 2 件(論文番号 22581, 22997), 中国 2 件(論文番号 22040, 22353), ドイツ 2 件(論文番号 22305, 22805), アイルランド 1 件(論文番号 22860), イタリア 1 件(論文番号 23149), イギリス 1 件(論文番号 23372), 韓国 1 件(論文番号 22584), チュニジア 1 件(論文番号 23355)であった。ポスターセッションでは多くの活発な議論が行われていたように思われる。日本から発表された 2 件は、いずれも衝突噴流を対象としたものでなく、2 次元噴流もしくは旋回噴流の渦構造が発表されたものであった。以下に、ポスターセッションで発表された研究内容の概要を述べる。

論文番号 22040: 銅ナノ粒子を水噴流に添加し、平板に衝突させときの平板表面における平均熱伝達率が実験的に調べられ、銅ナノ粒子の添加が平均熱伝達率を増加させることが示されている。

論文番号 22170: 高温に保たれた平板に衝突する旋回噴流の渦構造が数値解析的に調べられ、高スワール数で生じる再循環流が熱伝達の促進に有効であることが議論されている。また、6 個角形に配列された旋回噴流群を衝突させる場合についても検討されている。

論文番号 22305: 台形筒の壁面に設けられた円孔を通過する空気噴流の温度と壁面温度の時間変化が実験的に調べられ、噴流と壁面の温度差と壁面における熱流束との関係が示されている。

論文番号 22353: 加熱された空気噴流が基盤表面に衝突したときに、ピン/プレートフィンヒートシンク内の強制対流の温度場が数値解析的に調べられ、数値解析に用いられた多孔質媒体モデルの

有効性が議論されている。

論文番号 22305: 2 次元噴流の渦構造に及ぼすノズルリップ長さの影響が実験的に調べられ、渦挙動はリップ長さを代表寸法としたストロハル数とレイノルズ数を用いて整理できることが示されている。

論文番号 22584: 移動する平板上に複数の液体噴流群を衝突させたときの平板表面の熱流束分布が数値解析的に調べられ、平板の移動速度の低下による平板上の液層厚みの増加が平均熱流束を低下させることが明らかにされている。

論文番号 22684: ホロコーン、フルコーン、フラットファンの 3 種類の噴霧ノズルを用いた衝突噴霧の局所熱伝達率と局所圧力の相関関係が明らかにされている。

論文番号 22695: 加熱された空気噴流を透過性の繊維に衝突させたときの繊維表面の局所熱流束の時間変化が数値解析的に調べられている。

論文番号 22805: 加熱された油噴流を平板に衝突させたときの油噴流と周囲大気との界面の不安定挙動や平板上での衝突パターンが実験的に明らかにされている。

論文番号 22860: 加熱された旋回噴流を平板に衝突させたときのよどみ点軸上と半径方向のヌッセルト数の変化が実験的に調べられ、熱伝達の促進に及ぼすスワール数の影響が議論されている。

論文番号 22997: 密度差を伴う旋回噴流の渦挙動が実験的に調べられ、浮力が旋回噴流の渦構造に強い影響を与えることが示されている。

論文番号 23355: Cross flow 中に噴出された噴流の温度場に及ぼす噴流の個数の影響が数値解析的に調べられている。

論文番号 23372: 衝突液滴の変形に及ぼす平板温度の影響や、液体噴流の不安定化に及ぼす周囲大気の温度の影響が線形安定性理論によって明らかにされている。

## Melting/Solidification

高木 洋平 (静岡大学)

Youhei TAKAGI (Shizuoka University)

e-mail: tytakag@ipc.shizuoka.ac.jp

**Melting/Solidification** セッションの研究発表内容を報告する。本セッションでは要旨提出が 11 件あり、そのうち最終投稿論文が 7 件[1-7]、さらにそのうちポスター展示が行われたのは 4 件[1,3,5,6]であった。投稿論文の多くが数値計算によるものであり、ポスター発表が行われた研究について概要を述べる。

IHTC14-22516[1]は X80 鉄鋼パイプラインに点熱源を与えたときの溶融プロセスにおける温度分布を数値計算によって求めている。計算は ANSYS の有限要素法を用い、溶融経路(溶融範囲)を数ブロックに分け、各ブロックの温度分布を加熱時間、溶融時間などから求めている。温度が 800°C から 500°C まで減少する冷却時間が重要であり、流入熱量と熱源からの距離に比例して冷却時間が長くなるという結論が得られている。

IHTC14-22663[3]は半結晶性高分子スラブを射出したときの凝固時間を 1 次元モデルから解析的に計算する研究である。この 1 次元モデルでは固液界面を含む有限領域を考え、固相領域端点の温度を固定し、液相領域端点を断熱条件で端点位置が移動するものとしている。固相・液相どちらにおいても熱伝導方程式を解き、固液界面の位置は熱バランス式から求めている(パラメトリックモデル)。さらに高分子の結晶化動力学を組み合わせた計算も行っている(カップリングモデル)。この二つの解析手法の誤差は 5%以下であり、前者のパラメトリックモデルを用いて簡易に凝固時間を計算できることが示されている。

IHTC14-23025[5]は筆者らの研究であり、シリコンゲルマニウム (SiGe) 半導体結晶を育成する Travelling Heater Method (THM) における融液内対流を数値計算によって解析している。融液内では濃度差・温度差対流が発生するが、るつぼ回転と磁場印加による外力効果をうまく組み合わせることによって均質な結晶を育成可能であることを

示した。

IHTC14-23048[6]は円柱状鉄鋼のキャスト成形における凝固過程を数値計算によって解析している。計算は有限要素法ソフトウェア ABAQUS を用いて行われ、エネルギーバランス式とフーリエの法則から鋳物に溶融鉄鋼がキャストされたときの温度分布が求められている。温度分布から液相の移動速度が計算され、鉄鋼中の結晶構造が columnar (柱状) から equiaxed (等軸) に遷移する凝固時間が重要であることが示されている。

## 最終投稿論文リスト

- [1] Tong, L. et al., "Numerical Simulation of Temperature Field in Multi-pass Compound Groove Weld for High Strength Pipeline Steel X80", IHTC14-22516.
- [2] Trabelsi, H. et al., "Simulation of Forced Convection Ice Slurry Flow in a Heated Turbine", IHTC14-22633.
- [3] Sobotka, V. et al., "Parametric Model for the Analytical Determination of the Solidification and Cooling Times of Semi-Crystalline Polymers", IHTC14-22663.
- [4] Egorov, B. et al., "Cluster Mechanism of New Phase Formation on a Surface of Solid-state Body", IHTC14-22852.
- [5] Takagi, Y. et al., "A Numerical Simulation Study on the Effect of Crucible Rotation and Magnetic Field in Growth of SiGe by the Travelling Heater Method", IHTC14-23025.
- [6] Wolczynski, W. et al., "Columnar Equiaxed Structure Transition in Solidifying Rolls", IHTC14-23048.
- [7] Yu-Ting, W. et al., "Experimental Study on Thermal Performance of Mixed Nitrate and Carbonate Salts", IHTC14-23081.

## Nano Interfaces and Misc. Nano

芝原 正彦 (大阪大学)

Masahiko SHIBAHARA (Osaka University)

e-mail: siba@mech.eng.osaka-u.ac.jp

第 4 日目の午後に「18-1 Nano Interfaces and Misc. Nano」のセッションは行われた。座長の Professor Pamela Norris の指示によって個々の研究発表に対して PC を用いた各 1 分の発表内容概要説明が 25 分に渡って行われた。それに引き続き、95 分間のポスターセッションが行われた。本セッションに関しては、講演者の不在や No Show はほぼなかった。ポスターセッションの 95 分の間、個々のポスター前では絶え間なく見学者が訪れて、熱心にディスカッションが行われていた。なお、目次の分類では「Nano」関連のセッションとしては、本セッションの他に「18-2 Phonon Transport and Thermal Conductivity(19 件)」があった。また、別の分類で「19-1 Nanofluids (16 件)」があったが、個々の研究発表内容に対して適切なセッション分けが行われていたと考えられる。

本セッションの研究発表内容は実に多様であり、総括的に議論することは難しいために、以下にすべての発表の内容の概略を一言で記述する。

B56: 垂直配向炭素 CNT 列の光学特性 (CNT=炭素ナノチューブ)

B57: 固液界面熱抵抗へのナノ構造間隔の影響

B58: ナノ粒子のフィルター捕獲のモデリング

B59: 表面粗さと酸化層の界面熱抵抗への影響

B60: ナノ・マイクロ多孔質内の流動解析

B61: CVD 法による多層 CNT の成長条件

B62: 接触熱抵抗のモデリング

B63: メタマテリアルの近接場熱移動

B64: マイクロヒータのデザイン

B65: ナノ構造の接触熱抵抗の MD 解析 (MD=分子動力学解析)

B66: 加熱されたマイクロカンチレバーの特性

B67: 結晶内の挿入層が接触熱抵抗に及ぼす影響

B68: 接続処理後の CNT 列の特性

B69: フェムト秒レーザーによる金薄膜の相変化

B70: 単層グラフィンナノリボンの熱抵抗

B71: ナノチューブ内の熱物質移動解析

B72: 低温低圧条件における単層 CNT の成長

B73: 金属と半導体における熱移動のモデリング

B74: AFM による熱と力の相互作用計測

B75: 銅薄膜の電子ビーム加熱シミュレーション

B76: ダイヤモンド熱電対のバッチ式作成

B77: 金属-ダイヤモンド界面熱抵抗の計測

このようにスケールに対してはナノメートルスケールの熱物質移動に関する研究である共通点はあるが、研究目的、研究内容、研究手法は多様である。あえて「Nano Interfaces and Misc. Nano」のセッションの 22 件の発表をおおまかに分類すると、研究対象と研究目的に関しては、ナノスケールの現象そのものを研究対象とする研究は 5 件、ナノスケールの現象とそれらが時空間平均された現象の関連に関する研究は 17 件であった。また、研究手法としては、実験や計測 9 件、解析やシミュレーション 13 件であり、それらの中でも実験と解析・シミュレーションのスケールの一致が見られるようになってきている。さらに、研究内容について分類すると、AFM 関連が 2 件、炭素ナノチューブ関連が 6 件、界面熱抵抗 (コンダクタンス) 5 件、分子動力学解析 6 件であった。発表者の地域別の分類は、日本: 4 件、ヨーロッパ: 2 件、インド、韓国、中国: 3 件、米国、メキシコ: 13 件となっており、やや米国からの発表が多い傾向となっている。

まとめると、本セッションでは、界面の微小スケールで生じる特異な現象が時空間平均された場合にどのような伝熱現象を生じせしめるかに観点をおいた研究が多くなっており、研究対象においては、固体中界面あるいは固液界面熱抵抗や炭素ナノチューブを対象にしたものが比較的多かった。また、実験と解析や MD シミュレーションのスケールが合致するようになっており、その結果の定性的一致もみられるようになってきている。

## Convection

中村 元 (防衛大学校)

*Hajime NAKAMURA (National Defense Academy)**e-mail: nhajime@nda.ac.jp*

対流 (7. Convection) に分類された研究発表は、プログラム上では計 82 件、そのうち論文が DVD に収録されているものが計 71 件あった。本会議では、Convection の分類とは別に、Jet Impingement, Natural Convection, Natural/Mixed Convection という分類もあったので、ここでは主に強制対流 (衝突噴流以外) に関する研究がまとめられていた。ただし、分類はあまり厳密ではないようで、後述のように、他の分類に属すべき研究内容もいくつか含まれていた。なお、全ての発表を見て回ることが出来なかったことや、また筆者の理解力不足もあり、見落としや正確さに欠ける記述もあると思うが、その点はどうかご容赦いただきたい。

Convection の分類の中で特に多く見られた研究テーマは、渦発生による伝熱促進および抵抗低減に関するものであった。これらの研究は、以下に示すように 7-1 Enhanced Convection のセッションとしてまとめて発表された。これ以外の研究は、基礎的なものから実機への応用を主目的としたものまで非常に多岐にわたっていた。全体として数値計算を主とした研究が過半数を占めており、この分野の最近のトレンドを反映していたが、実験を主体とした研究も 24 件あり、比較的多く存在していたように思う。

論文数を第一著者の国別でみると、ロシア 13 件、日本 10 件、中国 8 件、米国 5 件、カナダ、イタリア、ブラジル、インドが各 4 件、南アフリカ 3 件、韓国、タイ、フランス、スペイン、トルコ、アラブが各 2 件、ドイツ、オランダ、イラン、エジプトが各 1 件と、非常に国際色豊かなセッションであった。

この分類は、さらに 7-1 から 7-4 までの 4 つの小分類に分けられ、それぞれ別の時間帯でポスターセッションが実施された。

**Enhanced Convection (7-1)**

このセッションは 3 日目 (8/11) の午前に実施

された。ここでは、渦発生体や流路の凹凸によって渦を発生させて伝熱促進や抵抗低減を行う研究が集められていた。発表された研究を伝熱促進法および実験/解析/数値計算に分類して以下に列挙する。なお、( ) 内に記した 5 桁の数字は論文番号 (IHTC14-□□□□□) を示している。

チャンネル底面にリブ列を設置した実験 (22367, 23219) および数値計算 (22048, 23224)、管路内に螺旋板を設置した実験 (22151, 22500, 22617) および数値計算 (22494)、チャンネル壁を波状にした数値計算 (22082)、壁面にディンプルを設けた実験 (22503) および数値計算 (22303, 22334)、チャンネル底面にウィングレットを設置した数値計算 (22216)、矩形フィンを設置した数値計算 (22670)、管路内のシート状ヒーターにねじりを付けた実験 (22978)、チャンネル底面におかれた凸型ヒーターの冷却の数値計算 (22906)、チャンネル内に脈動流を与えた数値計算 (22519)、管路内で物体を往復運動させた数値計算 (23028) などの研究発表が行われた。対象とされた流路形状や伝熱促進法は多種多様であったが、全般的に、形状や条件を何通りかに変化させ、その中で伝熱促進や抵抗低減が最適となる条件を調べる研究が多く見られた。

**Non-Newtonian Convection (7-2)**

このセッション(非ニュートン流体の対流伝熱)は、2 日目 (8/10) の午前に実施された。あいにく筆者のポスター発表と時間が重なったため、DVD に収録された論文を基に各研究発表の内容を列挙させていただく。

粘弾性流体によるキャビティー内の伝熱促進に関する数値計算 (22736)、粘弾性流体によるチャンネル乱流抵抗低減に関する数値計算 (23138)、粘弾性流体による円管内層流の伝熱促進の解析 (23224)、ポリマー混入による乱流抵抗低減に関する実験 (23197, 23199)、ノズル内の超臨界水の実験および数値計算 (22156)、超臨界 CO<sub>2</sub> の急拡

大流れの数値計算 (22464), 管路内の指数則流体の非定常解析 (22150), 磁場中における Oldroyd-B 流体の速度・温度場の解析 (22278) などの研究発表が行われた。

### Single Phase Convection 1 (7-3)

このセッションは 1 日目 (8/9) の午前に実施された。ここでは強制対流の基礎研究が中心に発表されたが, 研究内容は非常に多岐にわたっていた。

高主流乱れがはく離流の熱伝達に及ぼす影響を調べた実験 (22154), 遷移領域におけるチャンネル内非定常流の解析および数値計算 (22291), 遷移領域における管路流れの伝熱促進実験 (22338, 22340), 円柱群の挿入された流路内の物質伝達の数値計算 (22399), 強制対流冷却におけるチャンネル形状の最適化の数値計算 (22230), 渦発生体により生成された縦渦の強さと伝熱促進の関係を調べた数値計算 (22269), 凹面による伝熱促進および抵抗低減の数値計算 (22390), 平行流路内に設置されたピンフィン列による伝熱促進の数値計算 (23205), 内壁が回転する環状曲面拡大流れの数値計算 (22403), 衝突噴流による移動壁面の熱伝達の数値計算 (22168), 移動壁面上の乱流境界層における流れ場と物質伝達を詳細に調べた実験 (22394), 超音速流壁面をガス噴射で冷却する実験及び数値計算 (22922), 傾斜チャンネル内の相変化対流熱物質伝達の数値計算 (22221), 竜巻の生成と安定性に関する実験 (22279), カオスによる流体混合の数値計算 (22797), 熱的境界条件に依存しない熱伝達パラメータ (一般化された熱インピーダンス) の解析的導出 (23019) などの研究発表があった。

個人的には, 23019 の熱インピーダンスの導出に大変興味を持った。元来, 熱伝達率は一様かつ定常な熱移動を前提として定義された値であるため, 熱伝達に分布や変動があると, 流れ場が同一であったとしても, 熱伝達率は熱的境界条件に依存して大きく変化してしまう。一方, 最近は物体表面の熱伝達分布に加えて熱伝達の時間的な変動を扱う研究が多くなってきているので, 熱的境界条件に依存しない熱インピーダンスの導入は非常に有用であると感じた。ただし, フーリエ変換やラプラス変換を用いて導出されるこの値が現実的に実験データや数値計算結果の整理に使えるかどうかは, まだ良く理解できていない。

### Single Phase Convection 2 (7-4)

このセッションは 1 日目 (8/9) の午後に実施された。ここでは, 基礎から応用まで多彩な研究が含まれていた。また, Single Phase Convection の分類には入らない研究も多かった。

境界層の圧力勾配と熱伝達の間関係を調べた解析および数値計算 (22432), 曲がり矩形管路内伝達の数値計算 (22528), 鈍頭回転円板の強制対流熱伝達実験 (22558), くさび流れの熱伝達におけるプラントル数の影響の解析 (22955), 回転円柱の乱流物質伝達の数値計算 (23090), 部分的に加熱された二次元丘後流の速度場および温度場を詳細に調べた実験 (23117), 乱流促進体によるはく離流の熱伝達制御の実験 (22153), 管路内の周期的変動流の数値計算 (22696, 22858), 超音速流における凹面による伝熱促進実験 (22585), 透過壁上の境界層乱流熱伝達の数値解析 (22592), 瞬時の拡散場を可視化して物質拡散係数の濃度依存を評価する手法の開発 (22501), 熱物性値の温度依存を考慮した管路内乱流共存対流の数値計算 (22876), マランゴニ共存対流の解析 (22330), 発熱のある管路内における液体窒素の流れの解析および数値計算 (22897), ガスハイドレートの生成に関する解析 (22990), ヘリコプターのエンジン冷却に関する多因子分析 (23113), 化学蒸着 (CVD) 装置内の流れを想定した共存対流の実験 (22237), モンテカルロ法を基にした管路内の熱伝導の逆解析 (22462), 密閉容器熱対流による音響流の数値計算 (23376), 磁場によるプラズマ閉じ込めに関する実験 (22212) および数値計算 (22539), 反磁性流体の磁気熱対流に関する数値計算 (22781), 磁場中の多孔質チャンネル内導電性流体の解析および数値計算 (23323) などの研究発表があった。

### 雑感

国際伝熱会議では, 一般の発表はすべてポスター発表で行われるが, 口頭発表とは違い, 英語が苦手なもの同士であっても時間をかけてゆっくり話ができるというメリットがあり, 個人的には魅力を感じている。ただし, 最も興味のある発表が同一セッションに割り当てられることが多いため, 例えばセッションを前半と後半に分け, 半分は自分のプレゼンに専念し, 半分は自由に見て回れるといった工夫がなされると良いのではと感じた。

## Electronic Cooling

阿部 宜之（産業技術総合研究所）

Yoshiyuki Abe (AIST)

電子機器の冷却に関連した研究発表は、Boiling Heat Transfer, Convection, Heat Pipes, Microchannels 等の多岐に亘るセッションでなされたが、ここでは Electronic Cooling 1 および 2 の 2 つのセッションで発表された合計 38 件の研究内容に限定し、その概要のみを紹介する。ちなみに、他のセッションでは登録のみで発表、論文投稿がなされないケースが多数あったが、Electronic Cooling では、全件発表され、論文も投稿されていた。

研究発表の内容を大別すると、

- ・デバイス内熱問題 5 件
- ・ヒートスプレダー 3 件
- ・空冷ヒートシンク 13 件
- ・液冷ヒートシンク 9 件
- ・沸騰 2 相流 2 件
- ・サーモサイフォン 2 件
- ・データセンター等 4 件

発表論文の主要著者の国別では、米国 20 件、日本 6 件、アイルランド、韓国、中国各 2 件、スイス、ベルギー、フランス、南アフリカ、トルコ、台湾各 1 件となっている。

個々の発表内容(括弧内は論文番号)を見ると、デバイス内熱問題については、プリント基板をモデル化した複合材料の有効熱伝導率推算法(22870)、ハイパワーSi トランジスタアレイ内の 2 次元電力、熱分布(23010)、パワー素子における半田による接合状態の信頼性(23040)、MOSFET 内のマイクロ伝熱シミュレーション(23100)、GaN パワー素子内の伝熱現象等のモデル計算(23277)に関する報告があった。

ヒートスプレダーについては、CNT 被覆ナノ構造ウィックを有するペーパーチャンバー(22765)、CGA (Column Grid Array) インターコネクットの有効熱伝導率(22891)、高熱伝導性ナノ構造材料(グラフィンおよび CNT) を用いたヒートスプレダー(22918)に関する報告があった。

最も発表件数の多かった空冷ヒートシンクについては、大半が各種フィン構造(22136, 22347, 22728, 22808, 22890, 22968)、および空冷流路内伝熱(22146, 22786, 22898, 22979, 23326)に関する報告であり、この他、ピエゾ素子を用いたファン(22203, 22552)に関する報告もあった。

液冷ヒートシンクについては、磁性流体を用いた液冷ループ(22038)、パワー素子を対象とした液冷コールドプレートのモデル計算(22181)、マイクロチャネル流路パターンの評価(22234)、ホットスポットの冷却を目的とした SLC(Superlattice Cooler)とマイクロチャネルを組み合わせたハイブリッド冷却技術(23054)、液冷流路内マイクロピン・フィン効果(23171)、CMOS をターゲットとしたマイクロチャネル伝熱性能評価(23212)、3 次元構造マイクロチャネル流路の最適化、性能予測(22719, 22813)に関する報告があった。

沸騰 2 相流については、マイクロチャネル内沸騰熱伝達における冷媒種による寸法効果(22770)、沸騰 2 相流における不安定性のアクティブな制御手法(22919)、ホットスポット冷却用薄液膜蒸発を利用した冷却技術(23015)に関する報告があった。

サーモサイフォンについては、屋外通信基地での利用を想定したサーモサイフォンの過渡特性(22218)、蒸発部に銅を焼結させたウィック構造を有するサーモサイフォンの起動、過渡特性(22843)に関する報告があった。

データセンター等の熱制御については、サーバーームの CRAC フリー化を目指した液冷ネットワークシステム(22045)、地理的に離れたデータセンター間の運用に伴う熱制御の効率化(22912)、冷熱蓄熱とヒートパイプを組み合わせたデータセンター冷却システム(23128)、通信基地局における省エネ化を図ったブローラ運用手法(23280)に関する報告があった。

Fuel Cells

宇高 義郎 (横浜国立大学)

Yoshio UTAKA (Yokohama National University)

e-mail: utaka@ynu.ac.jp

第 14 回国際伝熱会議も半ばの 8 月 12 日(水)午後の 2 時間にわたり, Fuel cells セッションのポスター発表が行われた. 全セッションで共通に実施された 1 件あたり 1-2 分のオーラルショートプレゼンが, セッション開始時の約 30 分程度ポスター発表会場にて実施された.

予定された 20 件のポスターのうち, ショートプレゼン 12 件, ポスター 14 件の発表がなされた. 表 1 に, ポスター発表がなされず, かつ論文集に掲載されていない 1 件を除いた 19 件を示した. 左欄に各論文の著者, 国名および実施されたプレゼンの種類 (S: ショートプレゼン, P: ポスター発表) を, 右欄には論文番号, タイトルおよび括弧内に簡単な内容分類を示した. 著者欄には筆者のわかる限りの発表者を記したが, 他の場合には第一著者とした. いささか正確さを欠いている可能性がある点はお許しいただきたい.

国別には, 米国 8 件, 日本 5 件, 中国 3 件, 南アフリカ共和国, ポーランド, シンガポール各 1 件であった. 今回の会議全体で中国の発表件数が大きく増加したことが本セッションにも反映されている.

研究対象としている燃料電池形式としては, 固体高分子形 (PEFC) に関するものが 12 件, 固体酸化物形 (SOFC) 4 件, 直接メタノール形 (DMFC) 3 件と, 近年の傾向を示している. 内容別には, 熱および物質伝達, 水分・ガスの流動を中心としている場合が多く, ガス拡散層 (GDL), ガスチャネル, 計測法, 寒冷条件下の問題など多岐にわたっている.

表 1 Fuel cells セッションの論文リスト

| 著者 (国)            | 論文番号: 論文題目(分類)  |
|-------------------|---|
| Ya-Ling He (中国) P | IHTC14-22102: Modeling of Heat Transport in a Direct Methanol Fuel Cell with Anisotropic Gas Diffusion Layers (DMFC, GDL) |
| Chao Zhang (中国)   | IHTC14-22180: Modeling on Transport Performance of Integrated-planar Solid Oxide Fuel Cell (SOFC,                         |

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
|                                      | 物質伝達)  |
| Y. Utaka, I. Hirose (日本) S, P        | IHTC14-22197: Microporous Layer Consisting of Alternating Porous Material with Different Wettability for Controlling Moisture in Gas Diffusion Layer of PEFC (PEFC, GDL) |
| Tunde Bello-Ochen de (南ア) P          | IHTC14-22233: Thermodynamic Optimization of PEM Fuel Cell Stack Gas Channel for Optimal Thermal Performance (PEFC, ガスチャネル)   |
| Kristopher Inman (米国) S, P           | IHTC14-22478: Development of Optical Thermal Sensor for PEM Fuel Cell Temperature Measurement Using Phosphor Thermometry (PEFC, 温度計測法)                                   |
| Masashi Kishimoto (日本) S, P          | IHTC14-22495: Quantitative Evaluation of Transport Properties of SOFC Porous Anode and Their Effect on the Power Generation Performance (SOFC, 多孔体内移動特性)                 |
| Kazuyoshi Fushinobu (日本) S, P        | IHTC14-22510: Potential Distribution Measurement in PEFC Electrolyte Membrane for Membrane Degradation Analysis (PEFC, 膜)  |
| Partha Mukherjee, (米国) S, P          | IHTC14-22703: Heat and Water Transport in a Polymer Electrolyte Fuel Cell Electrode (PEFC, 熱・水分移動)   |
| Yutaka Tabe (日本) S, P                | IHTC14-22757: Performance and Liquid Water Distribution in PEFCs with Different Anisotropic Fiber Directions of the GDL (PEFC, GDL)                                      |
| Janusz Szmyd (ポーランド) S, P            | IHTC14-22785: An Analysis of Heat Transfer Processes in an Internal Indirect Reforming Type SOFC (SOFC, 熱移動特性)   |
| Agus Pulong Sasmito (シンガポール)         | IHTC14-22787: Computational Study of Flow Reversal for Improved Thermal Management in a PEMFC Stack with Forced Air Convection Cooling (PEFC, 物質流動)                      |
| Katherine C. Hess (米国) S, P          | IHTC14-22928: Micron-Scale Diagnostics for Through-Plane Phenomena in Porous Electrodes (PEFC, 多孔質電極)  |
| Yun Wang (米国) S, P                   | IHTC14-23004: Cold Start Characteristics of Polymer Electrolyte Fuel Cells (PEFC, 寒冷スタート)  |
| Yun Wang (米国)                        | IHTC14-23005: Transient Characteristics of Polymer Electrolyte Fuel Cell and Hydrogen Storage Tank (PEFC, 水素タンク, 過渡特性)   |
| Yun Wang, Ken Chen (米国)              | IHTC14-23006: Through-Plane Water Distribution in a Polymer Electrolyte Fuel Cell at Various Operating Temperatures (PEFC, 水分分布)   |
| Hafez Bahrami, Amir Faghri (米国) S, P | IHTC14-23078: Methanol and Water Transfer Characteristics in a Passive DMFC Using Concentrated Methanol Solution (DMFC, 物質移動)  |
| Fang Ye (中国)                         | IHTC14-23130: Two-Phase Flow in Anode Serpentine Flow Field of a Direct Methanol Fuel Cell (DMFC, 二相流)   |
| Mina Nishi (日本) S, P                 | IHTC14-23182: Thermal and Electrochemical Cell Design and its Experimental Assessment for Micro SOFC System (SOFC, 熱・電気化学デザイン)   |
| Daniel Cassar, Xia Wang (米国) S, P    | IHTC14-23291: Design of a Climate Chamber to Study Transient Performance of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell at Near Freezing Temperatures (PEFC, 人工気象室)             |

## Boiling Heat Transfer

古谷 正裕 (財団法人 電力中央研究所)

Masahiro FURUYA (CRIEPI)

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

沸騰伝熱のポスターセッションでは、72 件の論文が発表された。図 1 に第一著者の所属機関の国別割合を示す。米国と日本が約 1/4 ずつを占め、次いで中国、ロシアの割合が大きい。

MEMS やナノ粒子コーティングなどにより伝熱面を微細加工し、沸騰熱伝達や限界熱流束を向上させる実験が増えている。また伝熱面の温度場を高い時間・空間分解能で計測する技術も提案され、沸騰熱伝達機構の考察が行われている。

流体は水以外の電子部品用途の冷媒が多く、二酸化炭素の伝熱研究が増えている。実験研究が大半であるが、数値解析との比較や伝熱モデルを検討している論文もあり、今後の進展が期待される。

表 1 に発表論文リストと概要を整理した。

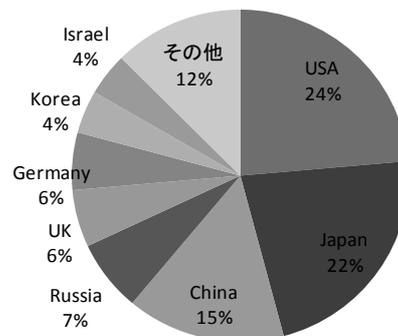


図 1 第一著者の所属機関の国別割合

表 1 発表論文リストと概要

| No.   | 第一著者               | 題名  | 国名      | 概要                          |
|-------|--------------------|---|---------|-----------------------------|
| 22024 | Hai T. Phan        | Flow Boiling of Water on Titanium and Diamond-Like Carbon Coated Surfaces in a Microchannel                               | France  | マイクロチャンネル沸騰伝熱               |
| 22054 | Oliver S. Knauer   | Measurement of Concentration and Temperature Gradients at Binary Mixture Boiling Bubbles                                  | Germany | 二成分系沸騰気泡の温度分布               |
| 22060 | Keiji Murata       | Forced Convective Boiling of Refrigerant HCFC123 in a Mini-Tube   | Japan   | ミニ管路の二相圧損と沸騰伝熱              |
| 22062 | Yaoyu Song         | An Estimation Method of Electric Field Forces on a Single Bubble  | China   | 孤立気泡の形状による電場測定法             |
| 22087 | Yasuo Koizumi      | Pool Boiling Characteristics of Heat Transfer Surface with Micro Structures Created by Using MEMS Technology              | Japan   | 微細加工伝熱面による気泡生成メカニズムとプール沸騰伝熱 |
| 22108 | Mohamed S. El-Genk | Saturation and Subcooled Boiling on Copper Nano-Dendrites Surfaces  | USA     | 銅ナノ樹状面上の飽和およびサブクール沸騰伝熱      |
| 22129 | Chao Liu           | Molecular Dynamics Simulation of Bubble Nucleation in Superheated Liquid  | China   | 過熱液相からの沸騰気泡の分子動力学解析         |
| 22142 | Bo-Feng Bai        | Vapor Embryo Nucleation in Near-Wall Region Under Pool Boiling Conditions   | China   | 分子動力学によるプール沸騰伝熱面からの気泡生成解析   |
| 22202 | Yury P. Ivochkin   | Experimental Study of the Vapor Film Behavior on a Highly Heated Surface Immersed into Subcooled Water                    | Russia  | 半球伝熱面上の膜沸騰クエンチによる圧力変動       |
| 22215 | Alexander T. Komov | Experimental Investigation of Boiling Heat Transfer and Pressure Drop in Swirl Flow under Conditions of One-Sided Heating | Russia  | 片側加熱旋回流の沸騰伝熱と限界熱流束、二相圧損     |
| 22225 | Koichi Hata        | Heat Transfer and Critical Heat Flux of Subcooled Water Flow Boiling in a SUS304-Tube with Twisted-Tape Insert            | Japan   | 旋回流のサブクール沸騰伝熱と限界熱流束         |
| 22267 | Saeid Vafaei       | Critical Heat Flux During Subcooled Flow Boiling of Alumina Nanofluids in a Narrow Channel                                | UK      | アルミナナノ流体の狭隙管路内限界熱流束         |
| 22282 | Y. F. Xue          | Experimental Study of Flow Boiling Heat Transfer Coefficient of FC-72 over Micro-Pin-Finned Surfaces                      | China   | 微小ピン伝熱面の強制対流沸騰熱伝達           |
| 22290 | Alexei Kryukov     | Non-Equilibrium Boundary Effects Influence on the Interface Surface Formation   | Russia  | 半球伝熱面上の膜沸騰解析                |
| 22300 | Ian A. Cosden      | The Surface Tension of Nanobubbles and the Effect of the Potential Cutoff Radius  | USA     | 分子動力学によるナノ気泡の表面張力効果         |
| 22339 | Alexander Ustinov  | Boiling Heat Transfer Enhancement by Controllable Tailoring of the TPL  | Germany | 微細加工伝熱面による沸騰伝熱促進            |
| 22349 | Shoji Mori         | Effect of Cell Size of a Honeycomb Porous Plate Attached to a Heated Surface on CHF in Saturated Pool Boiling             | Japan   | ハニカム板による飽和プール沸騰限界熱流束増大      |
| 22365 | Sehwan In          | Flow Boiling Heat Transfer of R123/R134a Mixture in a Micro-Channel   | Korea   | マイクロチャンネル内の二成分系沸騰伝熱         |
| 22376 | Victor V. Yagov    | Heat Transfer in Vapour-Liquid Flow at High Reduced Pressures   | Russia  | 高換算圧力域の二酸化炭素の熱伝達整理式         |
| 22406 | Manabu Tange       | Boiling Heat Transfer Surface Capable of Transient Heating and Nucleation Control   | Japan   | 局所加熱による発泡制御と温度分布計測          |
| 22458 | Masahiro Furuya    | Visual Observation of Fine-Scale Mixing Morphology During Vapor Explosion and Droplet Entrapping Processes                | Japan   | 蒸気爆発と液滴エンタラップ現象における微細混合の可視化 |
| 22550 | Junnosuke Okajima  | Cooling Characteristics of Ultrafine Cryoprobe Utilizing Convective Boiling Heat Transfer in Microchannel                 | Japan   | マイクロ管路を介した沸騰冷却特性            |
| 22560 | Takeyuki Ami       | Flow Pattern and Boiling Heat Transfer of CO2 at High Pressure in Horizontal Mini-Channels                                | Japan   | 水平ミニ管路内の二酸化炭素流動様式と沸騰伝熱      |
| 22565 | Yan Sun            | Subcooled Flow Boiling with Sintered Porous Coatings in Small Channel   | China   | 焼結金属微少管路内のサブクール流動沸騰伝熱       |
| 22567 | Mohammad N. Hasan  | Homogeneous Nucleation Boiling During Jet Impingement Quench of Hot Surfaces  | Japan   | 衝突噴流冷却下での均質核生成              |
| 22579 | Chang-Nian Chen    | Experimental Study on CHF Characteristics of R134a Flow Boiling in Horizontal Helically-Coiled Tubes                      | China   | 水平螺旋管内の限界熱流束                |
| 22586 | Chang-Nian Chen    | Study on Fluid-to-Fluid Modeling of CHF of R134a-Water in Horizontal Helically-Coiled Tubes                               | China   | 水平螺旋管内の限界熱流束の次元解析           |
| 22603 | Kazem Arrdaneh     | Study of Flow Instabilities in a Natural Circulation Boiling System   | Iran    | 沸騰自然循環ループの安定性               |

表 1 発表論文リストと概要(続き)

| No.   | 第一著者                    | 題名  | 国名      | 概要                                 |
|-------|-------------------------|---|---------|------------------------------------|
| 22608 | K. Spindler             | Single Phase and Flow Boiling Heat Transfer of Water and Ethanol in a Mini-Channel Array  | Germany | ミニ流路内の水とエタノールの単相・沸騰伝熱              |
| 22650 | Mordechai Baikin        | Flow Rate Maldistribution in Multi Heated Parallel Pipes  | Israel  | 並列管の流量分配                           |
| 22656 | Saptarshi Basu          | Heat Transfer Characteristics of Flow Boiling of R134a in Uniformly Heated Horizontal Circular Microtubes   | USA     | 水平細管内沸騰伝熱                          |
| 22657 | Payam Delgoshaei        | Microscale Heat Transfer Measurements during Subcooled Pool Boiling of Pentane: Effect of Bubble Dynamics   | USA     | 基盤状加熱・測面によるブール沸騰気泡下の熱伝達            |
| 22660 | Jong-Taek Oh            | Characteristics of Two-Phase Flow Boiling Heat Transfer and Pressure Drop of NH <sub>3</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> and CO <sub>2</sub> in Horizontal Circular Small Tubes | Korea   | 水平細管内沸騰伝熱と圧力損失                     |
| 22661 | Saptarshi Basu          | Study of CHF Condition for Flow Boiling of R134a in Circular Microchannels  | USA     | 水平再管の限界熱流束                         |
| 22664 | Alexey A. Eronin        | The Influence of External Electric Field on Heat Transfer at Boiling on Non-Uniform Surfaces  | Russia  | 複雑形状伝熱面への電場が沸騰伝熱に及ぼす影響             |
| 22682 | Rishi Raj               | Heater Size and Orientation Effect on Pool Boiling of FC-72   | USA     | 伝熱面姿勢と加熱面積が沸騰に与える影響                |
| 22723 | Kripa K. Varanasi       | Controlling the Nucleation of Water Using Hybrid Hydrophobic-Hydrophilic  | USA     | 親水面と撥水面の組み合わせによる発泡点制御              |
| 22725 | David M. Christopher    | Bubble Growth during Nucleate Boiling in Microchannels  | China   | 沸騰気泡成長のVOF解析                       |
| 22735 | Tailian Chen            | Enhanced Heat Transfer for Boiling of a Refrigerant on a Micro-Structured Cylindrical Surface and Effect of Saturation Temperature  | USA     | 積層円筒伝熱面による沸騰伝熱向上                   |
| 22737 | Takashi Sakai           | Heat Transfer Enhancement Observed in Nucleate Boiling of Alcohol Aqueous Solutions at Very Low Concentration   | Japan   | 低濃度アルコール水溶液での伝熱向上機構                |
| 22741 | S. J. Penley            | Sub-Atmospheric Pressure, Sub-Cooled, Flow Boiling of Water on Screen Laminated Enhanced Surfaces   | USA     | 網状伝熱面での減圧下サブクール流動沸騰伝熱              |
| 22750 | Chin Pan                | Mechanism of Critical Heat Flux for Convective Boiling of FC-72 in a Diverging Microchannel Heat Sink   | Taiwan  | マイクロ拡大流路での流動沸騰限界熱流束                |
| 22773 | Carlo Bartoli           | Heat Transfer Enhancement From a Circular Cylinder to Distilled Water by Ultrasonic Waves at Different Subcooling Degrees   | Italy   | 超音波照射によるサブクール沸騰伝熱促進                |
| 22779 | Satoru Momoki           | Experiments on Flow Boiling Heat Transfer of Ammonia/Water Mixture Inside an Internally Spirally Grooved Horizontal Tube  | Japan   | 螺旋溝付き水平伝熱管内の二成分系沸騰伝熱               |
| 22794 | Tomohide Yabuki         | Study on Heat Transfer Mechanism of Isolated Bubble Nucleate Boiling with MEMS Sensors  | Japan   | 微細温度計測による孤立気泡の熱伝達機構                |
| 22809 | T. Netz                 | Incipient Flow Boiling in a Vertical Channel with a Wavy Wall   | Israel  | 波状鉛直流路の沸騰開始点                       |
| 22840 | X. Yang                 | Pool Nucleate Boiling of Acetone and Acetone/Ethanol Mixture on Magnesium Alloy Surface   | UK      | 二成分系ブール核沸騰伝熱                       |
| 22863 | Hiroyasu Ohtake         | Mechanism and Modeling of Rewetting Initiation of Hot Dry Surface in Saturated and Subcooled Film Boiling   | Japan   | 膜沸騰における乾き面からの濡れ開始機構                |
| 22866 | Masroor Ahmad           | Effect of Heat Flux on Droplet Entrainment Using Annular Flow Dryout Model  | UK      | 管状流ドライアウトモデルに基づく液滴エントレインメントの熱流束影響  |
| 22887 | A. Luke                 | Heat Transfer Mechanisms of Propane Boiling on Horizontal Steel Tubes with Smooth and Enhanced Surfaces   | Germany | 水平管外部流れの表面形状と沸騰伝熱機構                |
| 22921 | Vijay Sathyamurthi      | Dynamics of Pool Boiling on Plain and Nanotube Coated Silicon Surfaces  | USA     | 沸騰伝熱面温度の時系列解析による非線形特性              |
| 22926 | Saeil Jeon              | Investigation of Flow Boiling on Nanostructured Surfaces  | USA     | カーボンナノチューブコーティング伝熱面のブールおよび流動沸騰伝熱   |
| 22950 | Aravind Sathyarayanan   | Pool Boiling of Mixtures for Electronics Thermal Management   | USA     | 銅ナノワイヤー伝熱面のブール沸騰伝熱                 |
| 23024 | In-Cheol Chu            | Bubble Lift-Off Diameter in Forced Convective Boiling Flow  | Korea   | 流動沸騰系の気泡離脱系                        |
| 23072 | Ziad Nahra              | Pool Boiling Heat Transfer of Dowtherm-A and Dowtherm-J on Smooth and Roughened Vertical Heater Surfaces  | Norway  | 熱媒Dowthermの垂直伝熱面ブール沸騰伝熱            |
| 23091 | G. Hetsroni             | Bubble Growth in Surfactant Solutions   | Israel  | 界面活性剤添加による沸騰気泡径の変化                 |
| 23107 | Arif B. Ozer            | A Method of Concurrent Thermographic-Photographic Visualization of Flow Boiling in a Minichannel  | USA     | サーモグラフィと高速度カメラによるミニチャンネル内温度・流動同時計測 |
| 23120 | Bruno Panella           | Test Facility to Study the Chill Down Phase of a Liquefied Gas Flow   | Italy   | 液体窒素流動による冷却特性                      |
| 23140 | Yu Y. Jiang             | Wall Thermal Conductivity Effects on Nucleation Site Interaction during Boiling: An Experimental Study  | Japan   | 銅およびステンレス鋼キャピタリーからの発泡特性            |
| 23145 | Kunihito Matsumura      | Nucleate Boiling Performance of Azeotropic Binary Mixtures in a Saturate Pool Boiling System  | Japan   | 二成分系のブール沸騰伝熱と限界熱流束                 |
| 23163 | Deoras Prabhudharwadkar | Assessment of Components of the Subcooled Boiling Model for CFD Simulations   | USA     | 二流体モデルと気泡生成相関式に基づくサブクールブール沸騰解析     |
| 23167 | Xi-Hui Sun              | Investigation of Carbon Dioxide Explosive Boiling in Single Evaporator of a Two-Phase Mechanically-Pumped Thermal Control Loop  | China   | 蒸発管内での二酸化炭素の突沸現象                   |
| 23189 | Chaobin Dang            | Study on Flow Boiling Heat Transfer of Carbon Dioxide with PAG-Type Lubricating Oil in Pre-Dryout Region Inside Horizontal Tubes  | Japan   | 水平管内での二酸化炭素の沸騰伝熱に及ぼす潤滑油添加の影響       |
| 23235 | Mehmed R. Özdemir       | Boiling Heat Transfer in Microtubes at High Flow Rates  | Turkey  | 細管内の高流速サブクール沸騰熱伝達                  |
| 23272 | Chuanhua Duan           | Evaporation Induced Cavitation in Nanochannels  | USA     | ナノ流路内の水のキャビテーション気泡成長               |
| 23276 | David M. Sykes          | Critical Heat Flux in Cooling Channels for Flow-Field Probes  | USA     | 高温場計測管内冷却水流の限界熱流束                  |
| 23330 | Yu Gan                  | An Exploration of the Effects of Dissolved Ionic Solids on Bubble Merging in Water and its Impact on the Leidenfrost Transition   | USA     | 気泡合体に及ぼす塩添加効果の実験と分子動力学解析           |
| 23336 | Yuan Wang               | Pressure Drop and Two Phase Flow During Boiling of FC-72 in a High Aspect Ratio Micro-Channel   | UK      | 高アスペクト比マイクロチャンネル内沸騰流の圧力損失と圧力変動     |
| 23386 | Irakli G. Shekrladze    | Investigation of Duration-Dependent Multifactoring During Boiling on Down-Facing Heating Surface  | Georgia | 下向き伝熱面の発達した核沸騰伝熱                   |
| 23401 | Dariusht Rostamifard    | The Prediction of CHF at Near Critical Pressures by High Order Neural Network (HONN)  | Iran    | ニューラルネットワークによる亜臨界域の限界熱流束予測         |
| 23415 | Chang-Nian Chen         | Dry-Out CHF Characteristics of R134a Flow Boiling in Horizontal Helically-Coiled Tubes  | China   | 水平螺旋管内限界熱流束                        |
| 23417 | Chang-Nian Chen         | Fluid to Fluid Modeling Scaling Factors of R134a-Water for Critical Heat Flux   | China   | 水平螺旋管内限界熱流束の次元解析                   |

## Heat Transfer Measurement Technology

丹下 学 (芝浦工業大学)

TANGE Manabu (Shibaura Institute of Technology)

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

熱物質輸送現象の新しい計測法に関するポスターセッションである「Heat Transfer Measurement Technology」には、発表取り止めになった 2 件を除き、15 件の発表があった。計測原理および計測対象が多岐にわたるため、以下では各ポスターについて概要を述べる。

**IHTC14-22449** I. Rudolph et al. (ドイツ) : サーモグラフィの温度分布から壁面剪断応力を求めている。壁面全体を加熱し強度分布を求める方法と、微小領域を加熱し方向を求める方法が示された。

**IHTC14-22504** S. Someya et al. (東大) : 蛍光粒子とパルスレーザーを用い、寿命法によって温度場を、PIV によって速度場を、1 台のカメラで同時に計測している。

**IHTC14-22672** T. Pierre et al. (フランス) : 紫外から可視光までの波長を用いて温度を計測する方法を提案し、実験との比較を行っている。

**IHTC14-22674** C. Ariyaratne et al. (UK) : 熱線流速計を用いて非定常流れにおける壁面剪断応力を計測している。特に流速が増加した瞬間の壁面剪断応力の増加を計測している。

**IHTC14-22726** H. Kyu Hyun et al. (韓国) : 温度と湿度の予報から、翌日の冷房による負荷を予測する簡易な数理モデルを提案している。病院と研究機関での実際の負荷と良い一致を示している。

**IHTC14-22753** H. Nakamura (防衛大) : サーモグラフィを用いて、後ろ向きステップにおける剥離・再付着流れの壁面における熱伝達率分布を計測している。

**IHTC14-22774** D. Schmeling et al. (ドイツ) : 感温液晶を PIV 粒子として用い、気体流れを対象として、カラー CCD カメラ画像の色情報から温度を、粒子の動きから速度場を求めている。

**IHTC14-22884** M. Kim and M. Yoda (米国) : 二つの蛍光染料の強度比から 1mm 角チャネルの定

常流における壁面温度とバルク流体温度を計測している。

**IHTC14-22885** M. Kim and M. Yoda (米国) : シリコンデバイス内部の冷媒温度計測を背景に、シリコンが赤外光を透過することを踏まえ、温度に依存して近赤外光を発する半導体量子ドットを用いて液相温度を計測する手法を提案している。

**IHTC14-22917** C. Weinschenk et al. (米国) : Directional Flame Thermometer を用いた火炎の熱流束計測を行っている。特に求める結果に誤差を許すことで熱流束の計算を簡単にし、実時間計測を可能にしている。

**IHTC14-22969** J. Christofferson et al. (米国) : CCD を用いた 800 ピコ秒時間分解能を持つ温度分布計測装置を開発し、パルス加熱による温度分布の時間変化を示している。

**IHTC14-23074** C. Kim et al. (韓国) : 径の異なる二つの熱電対が異なる放射特性を持つことを利用し、放射冷却の影響による温度計測バイアスを修正する方法を提案し、高温ガス流れの計測実験によって、その影響を議論している。

**IHTC14-23220** J. Castro et al. (スペイン) : PLIC-VOF 法における新しい表面張力項モデルを提案し、既存モデルと比較している。極座標系を用いた曲率の計算とカーネル関数を用いた界面のスムージングを行っており、検証のための計算対象は液滴および気泡である。

**IHTC14-23286** C. Herman (米国) : 熱音響効果による共鳴管の温度変化を高速カメラを用いたホログラフィ干渉法によって計測している。また、圧力がホログラフに与える影響を取り除く方法について検討している。

**IHTC14-23129** A. L. de Ramos and P. Vargas (ベネズエラ) : 食品を急激に加熱・冷却した際の温度応答に食品の物性値が与える影響について、数学モデルを構築し感度解析を行っている。

## Heat Transfer Equipment 1 and 2

小田 豊 (大阪大学)

Yutaka ODA (Osaka University)

e-mail: oda@mech.eng.osaka-u.ac.jp

下記に列挙する通り、本セッション（以下、HTE-1, 2）の対象は、製鋼プロセス、熱交換器（特にスケール付着）、冷却塔、各種炉内の伝熱・乾燥・燃焼・化学反応過程など広範囲にわたるため、専門の研究者・技術者が内容を推測し得るであろう最小限の情報をご提供することをレビュー方針とした。以下では、DVD 論文集で参照可能な論文 ID 「IHTC14-2\*\*\*\*」の下四桁の数字と第一著者（or 発表者）の所属国略称で各論文を引用させて頂く。また、計 37 件のうち No show が 9 件（多くはポスターのみの登録）あり、対象外とさせて頂いた。

HTE-1 では、溶鋼を模擬した定常通過流を有するガス攪拌式の取鍋内の気泡混合挙動を実験・理論的に調べたもの[2115, 米/日], Entransy 消散理論と遺伝的アルゴリズムに基づく熱交換器の最適化[2314, 中], 吸着天然ガス(ANG)充填容器内の吸着・脱着過程の数学モデルと無次元数の提案[2400, 伯], 製紙工場の乾燥過程に赤外ヒータを導入する新プロセスの提案と経済性評価[2727, 米], 周期加熱により誘起される部分混和性溶媒の相転移を利用した汚染堆積物の浄化法に関する実証研究[2856, Israel], 急速加熱処理時の薄膜太陽電池の周期加熱過程に関する解析モデルの提案[2927, 仏], 平面型のラビリンス流路を利用したマイクロミキサーに関する実験[2957, 米], 弾薬内の化学物質処理時の蒸発過程に関する解析モデルの提案[2964, 米], 強制通風冷却塔で生じる水蒸気からの水回収の実現可能性に関する数値解析と実験[3162, 伯], 製鉄・製鋼プロセスに関する CFD 結果の VR (Virtual Reality)による可視化の研究[3180, 米], 海水を用いた向流型冷却塔の性能評価を最新の海水物性値を用いて行った解析[3200, 米], 回転式冷却装置内の焼結金属粒子の冷却過程に関する解析モデルの構築[3278, 米]などがあつた。

HTE-2 では、熱交換器伝熱面へのスケール付着に対する表面エネルギーの影響を伝熱面（銅・ス

テンレス）上に PTFE 膜や単分子膜を形成して検討したもの[2058, 米], 直火式ロータリーキルン内の局所伝熱過程に関する解析モデルの構築と石英砂や銅ペレットを用いた実験[2086, 独], 流動層内の石炭粒子のガス化過程について二流体モデルに基づく解析モデルの構築を行ったもの[2123, 英], 充填粒子層の粒子に感温色素を塗布した実験と DEM（離散要素法）による解析により粒子の熱緩和過程を検討したもの[2200, 独], 流動層での固体粒子の乾燥過程について DEM に基づくオイラー・ラグランジアン法によって粒子内部の温度・含水量分布を含めて解析した研究[2292, 英], 伝熱面上のスケール形成に及ぼす金属イオンの影響について X 線回折と SEM による結晶構造、形態学的特徴の解析により検討したもの[2312, 中], 伝熱面の fouling 特性に及ぼす表面粗さや酸化膜の影響を実験的に検討し、酸化膜の形成を防止することが fouling の抑制に有効とした研究[2313, 中], 伝熱面への鉱物付着の緩和にパルス火花放電を適用し、X 線回折と SEM 観察によって効果を検討したもの[2392, 米], 冷却塔に用いるらせん状リブ付銅管の fouling 特性を記述するための、 $j$  因子と  $f$  因子を含む半経験的モデルの構築[2529, 中], 回転式ライムキルン内の鎖部の一次元伝熱モデルの構築とキルン内部のガス・壁面・石灰泥の温度予測[2531, 加], 石油パイプライン内壁でのワックス状物質の堆積に対してレオロジー特性が及ぼす影響をビンガム流体を仮定したワックス堆積 CFD により検討したもの[2952, 伯], 煨焼石油コークス炉の排ガスに含まれる炭素系物質の燃焼シミュレーション[3053, 米], シェルアンドチューブ熱交換器内の原油 fouling を予測するための解析モデルの提案と妥当性の検討[3158, 英], 回転式キルン内の過熱蒸気による食品乾燥過程のシミュレーション[3201, 印] などがあつた。

日本、韓国の発表が少ないのが印象的であつた。

## Bio Heat Transfer

小宮 敦樹 (東北大学)

Atsuki KOMIYA (Tohoku University)

e-mail: komy@pixy.ifs.tohoku.ac.jp

## 1. はじめに

生体伝熱セッションは前回のシドニーでの会議 (IHTC-13 in Sydney) のときに初めて設けられ、今回で 2 回目の開催となる。セッション自体は会議 3 日目の 8 月 11 日午前中に組み込まれ、約 20 件のポスター発表が行われた。朝一番のセッションではあったが、8 時 30 分のショートプレゼンテーション開始時刻には多くの聴衆が集まり、1-2 分の口頭発表を聴講していた。口頭発表後は各ポスターの前で、著者の詳細な説明および議論があった。本報告では 20 件のポスターセッションの概要と、筆者が感じた Bio Heat Transfer の動向について以下に記していく。

## 2. 発表の概要

まず発表件数であるが、前回のシドニー会議では 9 件のポスター発表であったが、今回のワシントン会議では 20 件のポスター発表と増え、この分野の発展の度合いが注目される結果となった。発表のあった 20 件の国別内訳を以下の表 1 にまとめる。表から明らかなように、中国からの発表数が他と比べて多く、この分野での中国の進展具合が評価される。また開催国の US を除けば、日本が中国に次いでこの発表数となっていた。その他、インド、韓国、イタリアからは 1 件の発表となった。発表内容は生体組織内の伝熱現象をモデル化する研究から医療応用に至るまで、多岐にわたっており、医工学にとどまらず、医療応用に関する研究発表もあった。

表 1 生体伝熱セッションでの国別発表数

|       |   |
|-------|---|
| China | 7 |
| India | 1 |
| Italy | 1 |
| Japan | 5 |
| Korea | 1 |
| US    | 5 |

これまで多くの研究発表においては、生体組織内の伝熱現象の記述には Pennes による生体伝熱方程式が主として使われてきているが、血流による項および発熱項を新たな視点からモデル化する研究発表も散見されるようになってきた。数値シミュレーションの技術が進歩したことにより、より詳細な数値計算の設定ができるようになった結果であると考えられる。つまりは、仮定を多く含んだこれまでのモデルに代わって、より精緻化したモデルを採用し、生体組織内伝熱現象を詳細に表現すべく研究に移行しつつあるということである。

医療応用に関する研究では、やはり冷凍治療、レーザー治療に関する研究が多く発表されていた。また超音波を利用した生体組織内への氷結晶生成や、ナノ粒子を用いたイメージング技術に関する詳細検討など、種々の医療技術に関する研究発表も行われていた。

さらには、人体の熱収支バランスの評価や、衣服の熱伝導を考慮した、『快適さ』を追求する生体伝熱の研究発表があった。

## 3. おわりに

生体伝熱というセッション名でのポスター発表であったが、生体内部組織の伝熱現象を扱っている研究もあれば、生体と環境の熱のやり取りに特化した発表もあり、一概に生体伝熱という言葉では表現しきれない研究発表が集まったセッションとなった。MEMS/NEMS 技術が進展する今、複雑な生体組織の非定常熱伝導を、これまで以上に正確に把握すべく実験的/数値解析的研究が展開されつつあることを実感することができたセッションであった。4 年後の IHTC-15 は京都開催が決定している。是非、生体伝熱という分野において、日本がリーダーシップをとっていけるよう、今後の研究展開を願っていききたい。

## Combustion

酒井 清吾 (横浜国立大学)

Seigo SAKAI (Yokohama National University)

e-mail: sakai@ynu.ac.jp

## 1. はじめに

燃焼のポスターセッションは、会議 2 日目の 11:00～13:00(3-1 Combustion 1)および 16:00～18:00(3-2 Combustion 2)の 2 回に分けて行われた。会議 1 日目はウェルカム・レセプションのみのため、会議 2 日目が本格的なセッション開始であり、キーノート・レクチャー後最初のポスターセッションということで、多くの参加者が訪れた。

3-1, 3-2 ともに 18 件の発表が予定されていたが、3-1 では 6 件、3-2 では 7 件、合計で 13 件の欠席があった。論文のファースト・オーサーの国別の内訳(カッコ内は欠席数)は、日本 8(0)、中国 7(4)、米国 6(3)、ロシア 4(3)、フランス 3(0)、ベルギー 1(0)、スペイン 1(0)、メキシコ 1(0)、ドイツ 1(0)、英国 1(0)、韓国 1(1)、インド 1(1)、インドネシア 1(1)であった。

## 2. 発表の概要

発表のあった各論文の番号と概要を以下にまとめる。

IHTC14-22116 では、垂直円管ノズルにより形成される亜音速の水素噴流拡散火炎でのリフトオフ抑制に関する実験および数値解析を行い、円管燃料噴射ノズル間の距離が火炎のリフトオフ抑制に影響することを示した。

IHTC14-22420 では、小型メタン改質器の燃焼ダクトにおける輸送現象および化学反応に関する 3 次元数値解析を行い、触媒燃焼反応は燃焼ガスの流れるダクトに近い極薄い多孔質触媒面に限定されること、燃料ガス種の輸送現象と温度分布は反応により大きく影響を受けることを示した。

IHTC14-22424 では、改良型オイル燃焼ボイラにおけるガス・オイルの同時燃焼過程およびサーマルノックス生成に関する数値解析を行い、空気過剰率 1.1 において燃焼効率、NO<sub>x</sub> 生成ともに最高値を取ることを示した。

IHTC14-22438 では、水素燃料の火花点火エンジンにおける熱移動モデルの計測による評価を行い、Annand および Woschni のモデル双方には、水素を燃焼させた場合の熱移動プロセスに影響を及ぼすガス又は燃焼の物性が欠如していることを示唆した。

IHTC14-22440 では、Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 触媒を用いたエタノール蒸気改質における流量および反応温度の影響について実験を行い、この触媒は従来に比べて低い温度でも高い性能を示すことなどを示した。

IHTC14-22446 では、束ねられた電気ケーブルの火災の危険性を把握するための実験を行い、熱放出率、火炎の広がりといった危険性を示す特性を測定して、それらの結果がより現実的なケーブル火災のモデル化に有効であることを示した。

IHTC14-22509 では、多孔質表面上の境界層における燃焼は多孔質板を介して供給される燃料と板周囲を流れている酸化剤の流速との比で特徴付けられるため、水素を燃焼させた場合、層流でのこの比に対する火炎前面の位置、熱物質移動および火炎の安定性の影響を実験的および数値解析的に調べた。

IHTC14-22553 では、セラミックス床上での不完全燃焼を用いた有機物熱分解に関して実験を行い、提案した熱分解機構が安全かつ経済的で、環境的に低エミッションであることを示した。

IHTC14-22658 では、現実的な運転条件における 2 サイクル内燃機関の環状フィンおよび球状フィンの最適化を 2 次元数値解析により検討し、エンジン諸元の小型化に取り組んだ。

IHTC-22742 では、部分酸化反応に注目してセラミックハニカムブロックを利用した熱再生による小型の管状メタノール改質器の実験を行い、効率の向上を示したことから、ハニカム構造の有用性を示した。

IHTC14-23121 では、水素改質炉において触媒管の温度制御が重要なことから CFD シミュレーションを行い、触媒管に過熱されている個所があり熱疲労をもたらすこと、バーナーの位置および触媒管の配置が熱疲労に大きく影響することを示した。

IHTC14-23155 では、CFD を用いて燃料組成の変化を考慮した combustor-transition piece 内の流れ解析を行い、transition piece 出口での流速分布および温度分布を求め、系に沿って熱くなる傾向にあることを示した。

IHTC14-22093 では、降下する燃料薄膜マイクロコンバスタの壁における煤堆積を数値解析的および実験的に調べ、空気の流れの主要燃焼室への管径や入口の方向を変化させ、流れ場の改良を行った。

IHTC14-22138 では、石炭チャーの炭素-灰分合成粒子雲における不均一なふく射特性を評価し、燃焼またはガス化において熱移動を予測するには石炭チャーもしくは灰分どちらのふく射物性が重要かを評価した。

IHTC14-22263 では、動いている石炭粒子 1 個の部分酸化におけるレイノルズ数の影響を数値解析的に評価し、粒子周囲の CO 分布を、ガス化、遷移、火炎シートの 3 つに特徴付けした。

IHTC14-22320 では、近年開発された、燃料油滴の加熱および蒸発を流体力学的にモデル化する手法および動的にモデル化する手法を検証し、ディーゼルエンジンへの応用を考えれば、油滴の加熱と蒸発に関する広い問題に応用可能であることを示した。

IHTC14-22668 では、燃焼している油滴の相互作用での熱移動における油滴間距離の影響を実験的および数値解析的に評価し、単一油滴のモデルと比較して、相互作用することで油滴の対流伝熱が大きく減少することを示した。

IHTC14-22777 では、バイオマス粒子内部の熱移動に着目してバイオマスの熱分解プロセスの実験的および数値解析的な研究を行い、粒子内部の熱移動のメカニズムは、低い加熱速度の場合と高い加熱速度の場合とで大きく異なることを示唆した。

IHTC14-22800 では、一定体積容器内の乱流予混合火炎の火炎-壁面間の相互作用と熱移動に関する DNS を行い、熱損失およびクエンチングを評価

した。側壁において壁面熱流束は最大値を示すが、全熱流束に対する側壁の寄与は小さかった。

IHTC14-22819 では、乱流火炎における煤生成とふく射熱移動のモデル化法を提案し、1 次元予混合層流火炎における燃焼反応と煤生成の詳細なモデリングの検証を行った。

IHTC14-22832 では、アルコールを添加した燃料ベースのエマルジョンの熱移動特性を実験的に評価した。低い沸点成分の拡散相としてエマルジョン化した水は、沸点より高い極近傍での熱移動を促進し、攪拌状態が良い場合には熱移動の促進は明確には現れないことなどを示した。

IHTC14-22938 では、メタン/空気の非予混合火炎の安定性に対する反応剤の予熱効果について実験を行った。火炎の付着高さは温度とともに大きく増加すること、安定性解析を行うことで火炎持上げの限界が大きく修正されることなどを示した。

IHTC14-23268 では、液体ナトリウム火炎の熱的挙動の理解について実験を行った。金属の火炎は、通常の火炎と異なり、一次生成物が金属表面に影響を与える金属酸化物であることから、その効果をモデル化し、液体ナトリウムとその周囲環境との熱的相互作用に着目したところ、既往の研究で用いられる断熱状態とは大きな差があることを報告した。

### 3. まとめ

以上、燃焼を専門としない筆者から研究概要を見ると、発表全体については、実験、数値解析双方において、基礎的な現象を対象としたいわゆるきれいな燃焼を扱うものが多く、身の回りで見られるような実現象を対象としたきれいでない燃焼に関する研究が少ないように感じられた。なお、前回の IHTC-13 の Combustion and Fire のセッションの報告と比較すれば、発表予定件数は大きく増加したものの、実際の発表件数はそれほど変わっておらず、欠席数が増加したことを意味する。今回のセッション参加者も多く、活発な議論が行われていたことから、非常に残念に感じられた。他のセッションの動向も見る必要があるが、次回の京都での会議においては、発表件数が増えるだけでなく、欠席者数も減少して、今回以上に多岐にわたる研究内容について更なる活発な議論が行われるよう期待したい。

## Natural Convection and Mixed Convection

辻 俊博 (名古屋工業大学)

Toshihiro TSUJI (Nagoya Institute of Technology)

e-mail: tsuji.toshihiro@nitech.ac.jp

会議初日の 8 月 9 日 (月) に、オープニングセッションとして、New South Wales 大学の Graham de Vahl Davis 氏による自然対流のレビューが行われたが、内容的には黎明期のコンピュータの話を含めて、氏自身のこれまでの研究経緯を中心に解説したものであった。その後、自然対流に関するポスターセッションが午前 (Natural Convection 1) および夕刻 (Natural Convection 2) に開催された。これらのセッションでは 27 件の発表が予定されていたが、実際にポスターが掲示されたのは 20 件であり、前回の会議 (Sydney) から半減した発表件数であった。

自然対流の研究テーマ (数字はポスター番号) を以下に列挙するが、殆どが数値解析で実験的研究は少なかった。Natural Convection 1 では、有限厚さの壁を持つ閉空間における熱と物質の二重拡散対流 (22335)、開放面を有する 2 次元空間の自然対流換気 (22404)、下面加熱の容器内非定常対流の特性と構造 (22439)、非定常ベナール・マランゴニ対流における遷移の初期条件に対する依存性 (22600)、正方形空間内の円柱状熱源からの浮力流の遷移と分岐 (22648)、円筒と回転円錐の隙間に生じる流れのパターン変化と熱伝達 (22648)、下面加熱された正方形キャビティ内の自然対流におけるエントロピー生成に及ぼす熱的境界条件の影響 (23112)、容器内の乱流自然対流に関する DNS と簡略方程式による解析の比較 (23267)、等温加熱面に沿う自然対流の乱流遷移における 3 次元乱れの成長 (23300) などの発表があった。

Natural Convection 2 では、レーザ干渉計による乱流自然対流の時間平均熱伝達率の測定 (22036)、空隙内の自然対流における薄膜蒸留プロセスの影響 (22083)、粒子の沈降を伴う懸濁液の自然対流 (22141)、鉛直加熱平板に沿う熱駆動流に対する主流速度の影響 (22167)、壁に埋め込まれた窓に沿う層流・乱流自然対流に及ぼす水平窓枠材の影

響 (22447)、鉛直等温壁面上の点熱源からの自然対流 (22508)、断熱面に取り付けられた傾斜等温正方形柱からの自然対流熱伝達 (22846)、等温水平円柱周りの自然対流に関する時間分解された熱伝達と流動特性 (22896)、加熱円盤上の自然対流の乱流特性 (23001)、ブルームによる汚染物質輸送に関する実験的特性評価と解析 (23151)、自然対流と輻射が複合する数値計算の並列化 (23211、ポスターのみ) などが発表された。

また、8 月 11 日 (水) の夕刻には、共存対流のポスターセッションが開催された。11 件のポスターが掲示され、実験的研究が比較的多かった。研究テーマは、ポアズイユ・レイリー・ベナード対流の不規則励起下の線形・非線形安定性解析 (22256)、閉空間内の水平加熱正方形柱周りに発生する浮力流の不安定性 (22259)、湿気を帯びた布で被覆した垂直加熱円筒とそれに直交する一様な流れの共存対流に関する水分輸送の効果 (22342)、加熱壁と断熱壁を持つ鉛直流路内の遷移・乱流共存対流におけるヌセルト数の整理 (22428)、市販解析コードによる鉛直等温加熱平板上の層流・乱流共存対流の熱伝達特性 (22428)、室内換気に関するベンチマーク問題に対する変物性を考慮した相似理論の適用 (22457)、DNS による平面流路内の共存対流の第 2 法則解析 (22619、ポスターのみ)、対向流を伴う傾斜平面流路内の共存対流に関する層流・乱流遷移域の熱伝達 (22871)、鉛直ダクト内の層流共存対流の圧力降下 (22923)、高レイノルズ数の鉛直円管内の共存対流 (23266)、直交流によって生じるブルームの逆方向回転渦対の形成 (23283) などの発表があった。

なお、他のポスターセッションでも、自然・共存対流に関するものはいくつかあった。例えば、千鳥配置の円管群における浮力流と熱伝達の数値モデル化 (22640)、鈍頭物体を過ぎる浮力ブルームに関する LES (22761) などが発表された。

Porous Media

中曾 浩一 (九州大学)

Koichi NAKASO (Kyushu University)

e-mail: knakaso@chem-eng.kyushu-u.ac.jp

1. 概要

本セッションは全部で 21 件の発表が 2 部に別れて行われた。後半のセッションは開催最終日であったため参加者は若干少なかったものの全体として活発な議論が行われていた。発表形式は発表者全員が 1 分間のショートプレゼンテーションで概略を説明した後、ポスター発表が行われた。

2. 分類と内容

表 1 に Porous Media のセッションで発表されたポスターのリストを示す。左側に論文番号と第一著者、右欄の論文題目および概略を示した。全体として多孔質体内の熱・物質移動に関する基礎研究、および多孔質体の実利用に関する内容が発表され、基礎から実利用と幅広い内容であった。

基礎研究では多孔質体の複雑な構造をモデル化して考慮し熱物性値を予測した研究が数多くみられた (IHTC14-22692, IHTC14-22209, IHTC14-22983, IHTC14-22792 など)。なかでも IHTC14-22209 は有効熱伝導率や透過率といった熱物質移動特性を求めるだけでなく、ヤング率や比誘電率を予測するなど非常に興味深い発表であった。一方、温度測定と圧力損失の実験結果に基づいて熱物質移動の相似性について議論を行った IHTC14-22037 は基礎研究に限らず多孔質の実利用に対しても大変有意義な研究である。

多孔質体の実利用に関する研究では、近年のエネルギー問題に関連して CO<sub>2</sub> の地下貯蔵に関する研究 (IHTC14-23365, IHTC14-23132) や水素吸蔵合金による水素貯蔵の研究 (IHTC14-22561)、粒子充填層内の伝熱促進 (IHTC14-23175)、廃タイヤを原料とした合成ガス製造に関する研究 (IHTC14-22190) などが発表され、これらの研究には、IHTC14-23132, IHTC14-22190 のようにコンピュータ断層撮影 (CT) を利用した多孔質体内部の構造の可視化に関する研究も見られた。特に

IHTC14-22190 は、廃タイヤを高温で処理する際の反応の進行によって変化する物性や空隙率などの影響を考慮するため、試料を熱処理して CT 計測を行い、その結果を基に多孔質体内部の空隙をモデル化し移動現象の特性を予測するなど大変興味深い発表であった。

表 1 Porous Media での発表論文

| 論文番号<br>第一著者                | 論文題目, 概略   |
|-----------------------------|--|
| IHTC14-22037<br>B. Dietrich | The L v que Analogy: Does it Work for Solid Ceramic Sponges Too?<br>(多孔質体の熱物質移動の相似性)   |
| IHTC14-22130<br>M. de Lemos | Laminar Heat Transfer on a Wall Covered With a Layer of Porous Material Simulated With a Two-Energy Equation Model<br>(多孔質体に覆われた面に対する噴流の熱伝達解析) |
| IHTC14-22133<br>M. de Lemos | Simulation of a Moving Porous Bed Reactor With a Two-Energy Equation Model<br>(移動する多孔質体内での乱流の熱伝達解析)  |
| IHTC14-22155<br>P. Vadasz   | Nusselt Number Data Scattering in Natural Convection in Porous Media<br>(多孔質体内の自然対流伝熱)   |
| IHTC14-22160<br>N. Dukhan   | Convection Heat Transfer Analysis for Darcy Flow in Porous Media: A New Two-Dimensional Solution<br>(多孔質体を流体で冷却する系の伝熱)                         |
| IHTC14-22171<br>P. Vadasz   | Weak Turbulence in Small Prandtl Number Convection in Porous Media<br>(多孔質体内での低プラントル数流体の弱乱流に関する解析)   |
| IHTC14-22354<br>D. J. Geb   | Non Intrusive Heat Transfer Coefficient Determination in a Packed Bed of Spheres<br>(粒子充填層内の熱伝達実験)   |

|                              |   |
|------------------------------|---|
| IHTC14-22561<br>D. Lazarev   | Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer in Metal Hydride Hydrogen Accumulators of Different Complex Designs<br>(水素吸蔵合金による水素貯蔵槽内の熱物質移動実験と解析)  |
| IHTC14-22764<br>S. Mancin    | Convective Air Heat Transfer Through 10 PPPI Aluminum Foams<br>(アルミニウム発泡体内を通過する流体の圧力損失と熱伝達の実験)  |
| IHTC14-23132<br>S. Uemura    | X-Ray Computed Tomography of CO <sub>2</sub> Behavior in Water Saturated Sandstone for Geological Storage<br>(水で飽和した砂岩内での CO <sub>2</sub> の X 線 CT 計測)                                      |
| IHTC14-23175<br>K. Nakaso    | Effects of Fin Configuration on Heat Transfer Rate in Packed Bed Reactors for Improvement of Their Thermal Characteristics<br>(粒子充填層内の伝熱促進解析)   |
| IHTC14-22190<br>S. Haussener | Tomography-Based Determination of Effective Transport Properties for Reacting Porous Media<br>(多孔質内の熱物質移動特性解析)  |
| IHTC14-22209<br>M. Wang      | Modeling of Thermal Transport Properties of Multiphase Porous Materials<br>(多孔質体の熱物質移動およびその他の特性の解析)   |
| IHTC14-22297<br>U. Gross     | Study on the Effective Thermal Conductivity of Macro, Mirco and Nano Porous Materials in the Light of the Knudsen Conduction/Radiation Coupling Effect<br>(多孔質体有効熱伝導率に及ぼすポアサイズと放射伝熱の影響, 実験) |

|                                |   |
|--------------------------------|---|
| IHTC14-22456<br>D. Liang       | Unsteady helical flows of a generalized Oldroyd-B fluid with fractional derivative in porous medium<br>(多孔質体中の Oldroyd-B 流体の螺旋流れ解析)                             |
| IHTC14-22532<br>P. De Jaeger   | A Transient Technique to Determine Thermal Conductivity and Thermal Contact Resistance of Porous Materials<br>(多孔質体の有効熱伝導率と接触熱抵抗の測定)                            |
| IHTC14-22692<br>J.M. Hugo      | From Pore Scale Numerical Simulation of Conjugate Heat Transfer in Cellular Material to Effectives Transport Properties of Real Structures<br>(多孔質体の熱物質移動特性の解析) |
| IHTC14-22792<br>O. M. Alifanov | Mathematical Model of Heat Transfer in High-Porous Materials<br>(多孔質体の有効熱伝導率および光学特性に関する実験と解析)   |
| IHTC14-22983<br>M. Hadavand    | Two Dimensional Simulation of Magnetohydrodynamic Two-Phase Flow in Random Porous Media Using the Lattice Boltzmann Method<br>(多孔質体内へ流入する磁性流体の流れ場解析)            |
| IHTC14-23070<br>Ra. Gorla      | Mixed Convection of Water at 4°C along a Wedge with a Convective Boundary Condition in a Porous Medium<br>(多孔質体内の自然対流および強制対流の解析)                                |
| IHTC14-23365<br>H.S. Choi      | The Characteristics of CO <sub>2</sub> Flow and Thermal Field in a Porous Media<br>(多孔質中の CO <sub>2</sub> 流れ・熱移動解析)   |

## Evaporation

永井 二郎 (福井大学)

*Niro NAGAI (University of Fukui)*

*e-mail: nagai@u-fukui.ac.jp*

### 1. 蒸発セッションの概要

会議期間 5 日間の最終日 (金曜日) の午前に最終ポスターセッション 8 が行われた。6 つの小セッションが並行して行われ、その内の 1 つが“Evaporation Heat Transfer”である。セッション冒頭には、持ち時間 1 分の short presentation が行われ、論文概要が紹介された。筆者はその座長を仰せつかった。最終日ということもあり来場者が少ないだろうと心配していたが、他のセッションと同程度の活況を呈した。なお、従来蒸発の研究は沸騰のセッションに含まれていたように思うが、なぜ今回別分類になったのかは分からない(元々、筆者の論文は manufacturing に分類されていた)。

この蒸発セッションには、プログラム上 19 件の論文が分類されたが、残念ながら内 2 件は“Poster Presentation Only (Abstract 集には載るが、Full paper が Proceeding DVD に載らない)”となってしまった。ところが、当日これら 2 件は short presentation も poster 発表もちゃんとなされていたのに対し、(どれとは言わないが) 別の 3 件が当日発表無しであった。

### 2. 論文リストと内容・コメント

表 1 に蒸発セッションの全論文をまとめた。最も目立ったのは、三相界線近傍の蒸発現象把握と MEMS 技術を活用した実験的研究 (22280, 22362, 22562, 22635, 22677, 22722, 22746, 22905, 23306) である。蒸発現象の応用を直接念頭においた研究も含まれるが、大多数は沸騰の基礎研究としての位置付けであるように思う。セッション分類分けの作業は難しいが、これらの論文は沸騰の基礎研究と同じ場で議論されると better のように感じた。他にも流下液膜蒸発 (22064, 22174, 23222) や溶液滴の蒸発 (23178, 22597) 等の研究も見られた。

三相界線蒸発や MEMS に関連して MIT の発表が 3 件もあり、Co-chair を務めた E.Wang 先生(MIT) に「一連の研究の goal と applications」について尋ねたが、「面白いから！」ということであった。研究者にとって最も大切な driving force を再確認させられ、個人的に有意義なセッションであった。

表 1 蒸発セッションのポスター発表リスト

| 発表著者(国)                       | 論文番号: 論文題目  |
|-------------------------------|---|
| Georg Dietze (Germany)        | IHTC14-22064: Capillary Flow Separation in 2- and 3-Dimensional Laminar Falling Liquid Films  |
| Aleksandr N.Pavlenko (Russia) | IHTC14-22174: Decay of the Falling Wavy Liquids Films at Nonstationary Heat Release   |
| Benjamin Sobac (France)       | IHTC14-22185: Heat Transfer and Flow Instabilities in Ethanol Sessile Drops under Evaporation   |
| Khalid Ibrahim (Germany)      | IHTC14-22280: Experimental Investigation of Micro-Scale Heat Transfer at an Evaporating Moving 3-Phase Contact Line                                   |
| Ming Hu (Switzerland)         | IHTC14-22362: Surface Functionalization Mechanisms of Enhancing Heat Transfer at Solid-liquid Interfaces  |
| Fei Duan (Singapore)          | IHTC14-22408: Experimental Study on Water Evaporation Enhanced by Surface Heating   |
| Xavier Nicolas (France)       | IHTC14-22467: Transient Evaporation of Liquid Water Films and Condensation of Humid Air at the Isothermal Walls of a Square Cavity                    |
| Loic Tachon (France)          | IHTC14-22562: Experimental Investigation of a Contact Line Dynamic Induced by Liquid Evaporation Heat and Mass Transfer                               |
| Niro Nagai (Japan)            | IHTC14-22597: Liquid-Solid Contact at Evaporation of Water Liquid Droplet Emulsified with Lubricant and Its Adhesion Situation                        |
| Ichiro Ueno (Japan)           | IHTC14-22635: Precursor Film Formation of Spreading Droplet   |
| Joel Plawsky (USA)            | IHTC14-22677: A Boundary Value Model for the Evaporation Meniscus on Rough Surfaces   |
| Kripa Varanasi (USA)          | IHTC14-22722: Wetting Hysteresis and Impact Phenomena on Textured Hydrophobic Surfaces  |
| Beibei Zhu (China)            | IHTC14-22746: Molecular Dynamics Simulation for the Impact of N-decanol Surfactants on the Liquid-Vapor Interface of Lithium Bromide Aqueous Solution |
| Rong Xiao (USA)               | IHTC14-22905: High-flux Thin Film Evaporation on Nanostructured Surfaces  |
| Carlo S. Iorio (Belgium)      | IHTC14-22916: Heat and Mass Transfer Control by Evaporative Thermal Patterning of Thin Liquid Layers  |
| L. Tadrist (France)           | IHTC14-23029: Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer of an Evaporating Pinned Sessile Drop: Influence of the Substrate Thermal Conductivity   |
| Koichi Nakaso (Japan)         | IHTC14-23178: Internal Flows in Microscopic Polymer Solution Droplets Evaporating on Flat Surfaces  |
| Dmitry Zaitsev (Russia)       | IHTC14-23222: Viscosity Effect on Thermocapillary Rupture of Falling Liquid Films   |
| Jacob Chung (USA)             | IHTC14-23306: Effect of Nano-structured Surface on Meniscus Evaporation at Nanoscale  |

## Radiation

赤堀 匡俊 (長岡技術科学大学)

Masatoshi AKAHORI (Nagaoka University of Technology)

e-mail: makahori@nagaokaut.ac.jp

## 1. セッションの概要

ふく射のポスターセッションは 8 月 11 日 (水) 午前の Poster Session 4 と 8 月 12 日 (木) 午前の Poster Session 6 の中で行われた。22 件の研究発表が予定されていたが、そのうち 2 件が欠席であった。発表論文のファースト・オーサーの国別の内訳は、中国から 4 件、日本、米国から各 3 件、ロシア、フランス、カナダ、インドから各 2 件、台湾、スペイン、ポルトガル、イランから各 1 件であった。内容的に大別すると、ふく射物性が 7 件、ふく射輸送・ふく射伝熱が 10 件、ふく射逆解析が 3 件であり、ふく射物性からふく射輸送までの広範囲にわたる研究発表が行われた。以下に発表された論文の内容を簡単に紹介する。

## 2. 発表論文の概要

IHTC14-22049(Y. Xuan et al., China)は、プロブスカイト酸化物(LSMO)製の三次元規則配列(3-DOM)マイクロ多孔体の放射特性を解析的に検討している。特に、3-DOM LSMO の表面構造パラメータの違いによる吸収率のスペクトル分布、さらには、単色吸収率の入射角依存性などを検討している。

IHTC14-22050(Y. Xuan et al., China)は、Ag/MgF<sub>2</sub>/Ag(Metal/Insulator/Metal)の多層構造を有する二次元矩形ホール配列(2DHAs)のスペクトル特性を解析的に検討している。特に、スペクトル特性に及ぼす周期構造、ホール比、フロント層(Ag)およびコア層(MgF<sub>2</sub>)の厚さ、入射角などの効果を検討している。

IHTC14-22157(L. A. Dombrovsky et al., Russia)は、原子炉(軽水炉)での仮想事故に関連する研究である。水中において炉心溶解が生じる場合の複雑な現象に対する新たな熱ふく射モデル(LCRM)が提案され、その現象が解析的に検討されている。

IHTC14-22179(P. Khantikomol et al., Japan)は、多

層オープンセルラー多孔質材料を用いたガスエンタルピー-ふく射変換の性能向上を目的とした理論的および実験的研究である。多層の多孔質プレートを用いた変換性能は単一の場合と比較して高性能であることが示され、また、ふく射輸送方程式に P<sub>1</sub> 近似を仮定した温度場解析の妥当性が実験データとの比較により検討されている。

IHTC14-22194(L. A. Dombrovsky et al., Russia)は、多次元異方性散乱媒体内のふく射伝達を解析する手法として、輸送近似を伴う P<sub>1</sub> およびモンテカルロ法を併用した 2 段階解析法を提案している。この精度を検討するため、輸送近似を伴うモンテカルロ法および異方性散乱特性を直接用いた完全モンテカルロ法との比較検討がなされている。

IHTC14-22226(A. Ambirajan et al., India)は、相互に照射・伝導するフィン性能に及ぼす指向放射表面物性の効果を解析的に検討している。金属表面(アルミニウムコート)と誘電体表面(酸化アルミニウムコート)の二つの異なる表面性状の効果が調査されるとともに、それら表面の表面粗さと二乗平均傾斜がフィン性能に与える影響についても検討されている。

IHTC14-22228(K. S. Ramanujam et al., India)は、雨の垂直方向構造のセンシングや降雨量の評価と関連した研究である。この論文では、逆解析の手法として、ニューラルネットワークを用いた ANN 法および AFFM 法を用いて、高速偏光マイクロ波放射モデルによる降雨状態を予測するための検索アルゴリズムが開発されている。また、実際の気象データを用いて、アルゴリズムのトレーニングおよびテスト解析がなされている。

IHTC14-22299(V. P. Solovjov et al., USA)は、非グレーのすすを伴う非等温・非均質ガス混合物におけるふく射熱伝達モデル(SLW-1)を新たに提案し、ベンチマーク解を用いて、既存の line by line 法、SLW 法および SNB 法との比較検討を行っている。

IHTC14-22301(A. Soufiani et al., France)は、大気圏再突入時に生じる衝撃層から宇宙船表面への放射に対する熱保護問題などと関連して、CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>プラズマの局所熱非平衡 2 原子分子におけるふく射伝達のための統計的ナローバンドモデル(SNB)を提案している。局所熱平衡および局所熱非平衡条件の下で SNB モデルの精度が調査されるとともに、既存のモデルとの比較により SNB モデルの妥当性が検討されている。

IHTC14-22461(P. J. Coelho, Portugal)は、乱流流れにおける時間平均ふく射輸送方程式のモデル化を理論的に検討している。このモデルが乱流ジェット拡散火炎(SANDIA flame D)に適用されるとともに、既存の OTFA を用いたモデルと比較検討されている。

IHTC14-22499(L.P. Wang et al, USA)は、非一様温度分布を有する多層構造体からの熱放射を解析的に検討している。非一様温度分布を有する多層構造体として非対称 Fabry-Perot 共振キャビティを解析対象としている。放射率解析のために、直接法および間接法の二種類の解析法が提案されるとともに、両解析法の等価性についても検討されている。

IHTC14-22538(Chang-Da Wen, Tainan)は、アルミニウム合金の放射率測定と多重スペクトル放射温度測定(MRT)の応用に関する研究で、五種類のアルミニウム合金の単色垂直放射率が測定されている。また、アルミニウム合金を対象として、LEM および LLE 放射率モデルを用いた多重スペクトル放射温度測定が実験的に検討されている。

IHTC14-22554(Q. Zhu et al., China)は、太陽熱収集器内におけるナノ流体のふく射輸送と熱伝達に関するモデル化を理論的に検討している。SiO<sub>2</sub>-water 系および TiO<sub>2</sub>-water 系のナノ流体を用いて、ナノ流体の吸収係数および温度分布が解析されるとともに、前報で得られた実験データとの比較検討が行われている。

IHTC14-22621(O. Balima et al, Canada)は、周波数領域における光トモグラフィの応用に関する研究である。周波数領域での平行照射の条件における逆解析法の開発のために、L-BFGS 法に基づく最小二乗有限要素定式化が提案されている。複雑な形状を有する場を対象に、ノイズを含まないデータおよび含むデータを用いた逆解析が実行される

とともに、定式化の検証もなされている。

IHTC14-22665(J. P. Luna-Abad et al., Spain)は、自由空間へ放射する矩形フィンの最適化に関する研究である。同一体積有する矩形フィンの最適形状を得るため、一次元および二次元モデルを用いて矩形フィン形状の最適化を解析的に検討している。

IHTC14-22718(T. Makino et al., Japan)は、熱ふく射におけるキルヒホッフの法則を実験的に検証することを目的とした研究であり、垂直入射半球反射率R<sub>NH</sub>と垂直放射率ε<sub>N</sub>のスペクトルを同時に測定することにより、非平衡システムでのε<sub>N</sub>+R<sub>NH</sub>=1の妥当性を検討することで、熱ふく射におけるキルヒホッフの法則を検証している。

IHTC14-22818(J. Boulanger et al., Canada)は、空間的に屈折率が変化する半透明媒体内の屈折率分布を予測するための逆問題に関する研究である。完全非定常ふく射輸送方程式(tRTE)を利用した逆解析法が提案されるとともに、半透明媒体中の屈折率分布が解析されている。

IHTC14-22967(A. C. Mossi et al., Brazil)は、二次元軸対称拡散火炎を研究対象として、燃焼過程でのふく射ソース項に及ぼすスペクトルガス吸収係数モデルの効果を解析的に検討している。この論文では、ふく射熱流束の発散が、(1)gray gas model, (2)WSGG, (3)SLW, (4)CW の四種類のモデルを用いて解析されるとともに、それぞれのモデルの比較検討がなされている。

IHTC14-23215(M. Akahori et al., Japan)は、我々の論文であり、矩形導波管内に形成される電磁場モードと表面構造の空間的な位置関係に着目して、マイクロ波加熱に及ぼす表面構造の効果を解析的に検討している。特に、表面凹凸構造の配列方向の違いがマイクロ波加熱に大きな影響を与えることを明らかにしている。

IHTC14-23218(B. Rousseau et al., France)では、所定の特性を有する仮想ポーラスアルミナセラミックスの熱放射特性（反射率、透過率、吸収率）を予測するために、モンテカルロレイトレーシング(MCRT)に基づく解析モデルが提案されている。アルミナセラミックスの空隙率や気泡サイズをパラメータとして、2μm-25μm のスペクトル範囲の放射特性が解析されている。

Thermodynamic Fundamentals and Systems

勝田 正文 (早稲田大学)

*Katsuta MASAFUMI (Waseda University)*

8月12日(木) 午後4時半から6時半

セッション座長 Laurent Pilon, UCLA, Calif. USA

同 Mingtian Xu, Shandong University, China

このセッションでは、当初12件のポスター発表が行われる予定のところ、2件(論文ID IHTC14-22027, 22350)がキャンセルとなり、計10件の発表となった。国別では、ドイツ1件、アメリカ2件、日本3件、中国4件であり、バンケットが前日夜であったにも拘らず、多くの参加者が訪れ、盛況であった。内容別に整理する。

① REYNOLDS, MAXWELL, AND THE RADIOMETER. REVISITED- Holger Martin-KIT Universitaet Karlsruhe, Germany

② FROM THE EXTREMUM PRINCIPLE OF ENTRANSY DISSIPATION TO STEADY BALANCE EQUATIONS OF FLUID MECHANICS-Mingtian Xu, Shandong Univ., China

③ Influence of Thermal Effects during Fast Filling Operations on Adsorption Capacity in a Hydrogen Cryo-adsorption Storage Tank, Petar Aleksic, NTNU, Norway

④ MASS NATURE OF HEAT AND ITS APPLICATION VII : COUPLED HEAT AND MASS TRANSFER OPTIMIZATION BASED ON THE ENTRANSY THEORY, Qun Chen, Tsinghua Univ., China

⑤ THE DEVELOPMENT OF PERFORMANCE PREDICTION METHODS FOR AN AUTOMOTIVE CO<sub>2</sub> AIR CONDITIONING CYCLE-M. Katsuta, Waseda Univ., Japan

⑥ PERFORMANCE OF HEAT - DRIVEN - TYPE WATER COOLER USING METAL HYDRIDE, Sangchul Bae, Waseda Univ., Japan

⑦ EXPERIMENTAL ANALYSIS OF AN AIR DEHUMIDIFICATION SYSTEM WITH LIQUID DESICCANT, Li Zhang, U-Tokyo, Japan

⑧ QUANTITATIVE STUDY ON MODEL AND BASIC CONCEPTS FOR THERMODYNAMIC SYSTEM, Zhiguo Wang, Daqing Petroleum Institute, China

⑨ OPTIMIZATION OF A PYROELECTRIC ENERGY CONVERTER FOR HARVESTING WASTE HEAT, Ashcon Navid,

UCLA, US

⑩ IMPROVED PYROELECTRIC ENERGY CONVERTER FOR WASTE HEAT ENERGY HARVESTING USING CO-POLYMER P(VDF-TrFE) AND OLSEN CYCLE. Hiep NGUYEN, UCLA, US

日本からの3件は、いずれも冷凍サイクルに関する性能予測(冷凍機オイルと二相流分岐効果を考慮できる)の提案、水素吸蔵合金(MH)による冷凍能力の炭素繊維混入による改善、東京大学は湿式(リチウムクロライド溶液)デシカント法の伝熱と夏季および冬季の除湿効率についての報告であった。プログラムからも分かるように、中国の発表のキーワードは ENTRANSY である。今回の発表だけで筆者は十分理解したとは言いがたいが、GUO らによって最近提唱されている物理量で、物体の伝熱性能を表しうるものとして定義されている。この物理量を、例えば熱と物質移動の同時最適化への応用など、様々な展開および適用を提唱する発表であった。アメリカからは UCLA が中心になって開発している Pyroelectric Material を用いた廃熱利用直接発電の数値解析による発電予測と、Olsen cycle による電荷対電圧表示および新材料による実験的な結果が報告された。ドイツカールスルーエからは Crookes の radiometer に関して creeping flow による現象説明を学生実験及び教育に応用しようとする試みが紹介された。

全体に1分間スピーチで研究内容を紹介し、その後訪問者を待ち議論を深めていく形式がとられていたが、ポスター形式では双方の緊張感の持続が2時間持つかと言うと、なかなか難しく、今後の(京都では)改善の必要性を感じている。このセッションは、比較的淡々と進んで訪問者も多数あったように思う。

以上

## Heat Exchanger

竹中 信幸 (神戸大学)

Nobuyuki TAKENAKA (Kobe University)

e-mail: takenaka@mech.kobe-u.ac.jp

本稿は、第 14 回国際伝熱会議で、8 月 9 日の午前の 14-3 Single Phase Heat Exchangers 1, 午後の 14-4 Single Phase Heat Exchangers 2 と 8 月 11 日午前の 14-5 Two-phase Heat Exchangers の 3 つのセッションにおいてポスターでなされた熱交換器に関する発表の報告である。

今回のプログラムでは、Convection や Jet についても Single phase, Two-phase という分類がなされていた。

予稿集では、14-1 Heat Transfer Equipment 1, 14-2 Heat Transfer Equipment 2 と合わせて、Heat Transfer Equipment の項目で掲載されている。ボード番号はついているが、ポスター発表のセッション毎のナンバーリングがなされておらず、さらに予稿集は、Heat Transfer Equipment 全体で論文番号順であるので、両者が入れ混じっているが、14-3~14-5 のセッションについての報告となる。Heat Transfer Equipment 14-1, 14-2 については、別の報告があるものと思う。今回の会議のプログラムは、その日の企画を時刻順に見ていく分にはあまり支障はないが、全体としては、甚だ見通しの悪いものである。

熱交換器 3 つのセッションの論文数は 14-3, 14-4 が各 18 編、14-5 が 16 編で、合計 52 編と多数になるので、全体の内容を報告することは、与えられた紙数では不可能である。今回発表の熱交換器研究の統計と興味をもった研究についての簡単な報告をする。

発表論文 52 編の国別の統計では、中国 15 編、アメリカ 7 編、ドイツ 6 編、南アフリカ 5 編で半数を超える。第 13 回国際伝熱会議での発表数は、京都大学の岩井氏の報告では、38 編中、韓国 8 編、アメリカ 7 編、中国 6 編、ドイツ 5 編、等であり、今回、韓国の発表は 1 編だけで、プログラム編成の仕方によると思うが、中国の増加と韓国の減少が際立っている。KAIST の教授に訊ねてみると、

韓国で熱交換器に関する研究が減ったわけではないが、ファンドや大学での研究は減って、企業の研究が多くなっており、企業の研究者が、この会議に興味を示さなかったからではないか、ということであった。中国の発表の多くがファンドによる大学での研究であり、次回の国別の統計は、変わったものになっているかもしれない。

オーソドックスな熱交換器に関する研究発表がほとんどであり、発表論文を研究対象の熱交換器の種類で大別してみと、単相流の研究では、プレート式が 7 編、シェルアンドチューブ式が 5 編、フィン付、フィン無、バンドルを含めたチューブ式が 11 編であり、二相流の研究では、プレート式が 3 編、シェルアンドチューブ式が 1 編、チューブ式が 4 編とサーモサイフォンが 2 編、クーリングタワーが 3 編であった。

単相流の研究では、実験では困難と思われる LES によるプレートフィン式熱交換器の温度分布計算(22030)、プリント基板で作製された超臨界二酸化炭素用熱交換器の実験(22880)、パワープラントでの実際の熱交換器に対する風の影響を評価した実験(23250)、二相流の研究では、冷媒を用いたプレート式熱交換器の性能特性(22095)、チューブバンドルで非凝縮性ガスの沸騰・凝縮熱伝達への影響に関する実験(22826)、クーリングタワーの特性に関するかなり詳細な研究(22789, 22791, 22793)に興味を持った。ただ、クーリングタワーに関する研究は南アフリカの同じ研究者による発表で、3 枚のポスターがボード番号を無視して並べられており、国際伝熱会議も随分様変わりしたものだと思う。

3 つのポスターセッションは、全て Ambassador 室で行われたが、地下一階であることから、ホテルの客室の温度設定 72°F (22.2°C) より、さらに温度が低いように感じられ、クールビズでは随分寒いおもいをした。

## 相変化研究会の立ち上げと沸騰伝熱の話題

*Commencement of Research Group of Phase Change and  
Topic of Boiling Heat Transfer*

小泉 安郎 (信州大学)

*Yasuo KOIZUMI (Shinshu University)*

*e-mail: koizumiy@shinshu-u.ac.jp*

### 1. はじめに

旧人類が地球上に現れたのは約 160 万年前，新人類は約 20 万年前と言われています。人類の火の使用開始は，おそらく旧人類の出現と同じくしているのではないかと思います。土器の出現は意外と新しく，発見されている最古の土器は，約 1 万 2 千年前の日本の豆粒文土器とされています。当時の人たちは土器を火にかけて煮炊きに用いたものと推測されます。火にかけて，食べ物がぐつぐつと煮える様子を喜びを感じつつ眺めていたことでしょう。この『ぐつぐつ』は，とりもなおさず沸騰現象そのものと言えます。人類は 1 万 2 千年の昔から，沸騰現象を眺めていたことになりす。さらに，160 万年前の旧人類達も，土器は無かったでしょうが，例えば採ってきた貝を火にかけて，調理して食べていたであろう事は十分に推測されます。火にかけられた貝から湯気が噴き出す様子をじっと眺めていたことでしょう。これも沸騰を見ていたことになりす。こう考えますと，何と 160 万年もの間我々人類は沸騰現象とつきあいをしてきたことになりす。沸騰は人類にとって根源的現象の一つと言うことができると思います。

一方で，沸騰現象が本格的に研究され始めたのはわずか約 80 年前ほどのことです。160 万年もの長いつきあいがあるにも拘わらずです。ただし，研究とした見方をした場合，80 年は相当に長い年月とも言えます。この 80 年の長きにわたる研究の結果として，我々人類はどこまで沸騰現象を理解することが出来ているのでしょうか？

### 2. 核沸騰現象理解の現状

何とはなしに我々はやかんに水を入れてガスコンロに載せ，火を付けて，お湯を沸かします。このとき，やかんの底の温度はせいぜい 130℃程度迄にしか上がらず，やかんは普通であれば溶けることはありません。ボイラーでは，蒸発管に水を

流し，それを油や石炭を燃やして加熱し，蒸気を作り出します。同じように，原子炉では，燃料棒被覆管の中に入れられたウランの発熱により，燃料棒周囲の水を加熱して，高温水や直接蒸気を作り出します。普通であれば，ボイラー蒸発管や原子炉燃料棒被覆管は溶けて壊れるようなことはありません。どの程度の加熱で，やかんの底や蒸発管，燃料棒がどの程度の温度になるかを知る術を持っているからによりす。この、『知る術』は 80 年の沸騰に関する研究の成果であることに議論の余地はありません。

さて，それであって，我々は沸騰現象を十分に理解していると言えるのでしょうか。我々はかなり精度で，やかんの底や，ボイラー蒸発管や，原子炉燃料棒の温度，すなわち伝熱面の温度を計算することができます。その計算手段は，一つではなく，かなりの数存在します。それら計算手段はそれぞれ違っていながら，結果として得られる伝熱面温度には大きな違いはありません。何とも不思議なことではあります。

通常，この計算手段は，経験，実験に基づいてまとめられた整理式になります。幾つかのタイプはありますが，そこで使われている整理変数は必ずしも同じではなく，或る整理式には含まれ，またある整理式には含まれずと，奇妙な状態です。例えば，プール核沸騰の整理式である Kutateladze や Rohsenow の整理式には重力加速度が含まれています。片や一方，Labountzov の整理式では，重力加速度が含まれていません。そうでありながら，それらの与える伝熱面温度には大きな違いはありません。更に不思議なことには，伝熱面が水平でも，垂直でも，我々は余り気にすることなく重力加速度を含むにも拘わらず Kutateladze や Rohsenow の整理式を適用しています。不思議と，整理式の伝熱面温度計算値は測定値に合っています。

これらの整理式は，沸騰現象を分解して，つまり，素過程に分解して，沸騰現象のストーリーを作り，モデル化を行い，導き出されています．結果としての整理式に上記のような違いがあることは，考えている素過程に違いがあり，各素過程への重要度の置き方に違いがあり，また，素過程同士の関連付け・影響の及ぼし方の取り扱いにも違いがあることを意味しています．こう考えると，160 万年もの間つきあって来ていて，また，80 年もの長き研究の歴史を持ちながら，意外と我々は沸騰現象を理解していないのではないかと感じざるを得ないこととなります．

近年の計算機の発達により，かなり複雑な現象でも，数値計算でそこそこに現象を再現できるようになってきています．そのような状況でありながら，多くの試みがあるものの，残念ながら沸騰現象を数値計算で再現できる状況にはなっていないように思います．せいぜい単一の沸騰気泡生成や境界条件，物理条件を設定しての結果に限られているのではないのでしょうか．キャビティーの中に沸騰核があり，その核が成長を開始し，伝熱面上に姿を現し，成長を続けつつ，近傍に存在する他のキャビティーからの沸騰気泡，或いは自らのキャビティーからの先行気泡と影響し合い，ついにはキャビティーから離脱して，次の沸騰気泡生成へ移ってっていく，このような一連の過程を数値計算で示した例は未だ目にするにはできていないのではないのでしょうか．

よしんば，これができたとしましょう．しかしながら，残念なことにその計算結果が正しいものか，確認する術を我々は持っていません．それは，その計算を行った条件の伝熱面を人為的に作って検証用データを得ることができないことにあります．沸騰現象は，これまでに多くの研究者により指摘が為されていますように，伝熱面の性状によって大きな影響を受けます．大きな影響を持つと言いつつ，これを人為的に制御することができず，実験者間でまちまちな状態で研究が為されています．そのことが，様々なモデルを生み出し，様々な整理式と提案に繋がっていると言えます．少なくとも，キャビティーの大きさ，深さ，形状，分布密度，気泡核取り込まれ状況を統一してかからなければ，基本現象の抽出，素過程の妥当性の検討はできないのではないのでしょうか．また，数

値計算との比較もなしえないものと考えます．

加えて沸騰現象考察での問題点は，実験の難しさがあります．多くの通常の，殆ど言っても過言ではありませんが，沸騰実験での測定は，面，空間のある大きさを持った領域の，ある時間間隔の平均値でしか測定ができません．素過程に分解しモデル化を行う場合，その正しさを検証するにはその素過程の瞬時の，局所の測定結果で検証するしかないわけですが，残念ながらそれができ得ていません．

### 3. 相変化研究会

日本は歴史的に見て沸騰研究が盛んな国で，現在も多く研究者がその研究に取り組んでいます．上記のような状況下で，沸騰現象に取り組む研究者が集まり，議論し合い，複雑な現象の本質を捉え，素過程への分解，各素過程の記述法の妥当性の検証を考え，また，沸騰の数値計算への情報提供を目的として，日本機械学会熱工学部門内に相変化研究会が設けられました．2007 年 11 月に設置され，3 年目を迎えています．今後，どのような手段で何を調べれば，沸騰現象の本質を捉え，研究者間で相互に矛盾の無い結論を導き出すことができるか，議論を重ねてきています．また，これまでに，伝熱学会日本伝熱シンポジウムや日本機械学会熱工学部門の熱工学カンファレンスの場をお借りして、『沸騰伝熱についての徹底討論』と題して講演会を継続的に実施してきています．

### 4. 本特集稿について

平成 22 年 5 月 25 日 (火)，第 47 回日本伝熱シンポジウムの前日になりますが，札幌コンベンションセンターで『「沸騰伝熱についての徹底討論 VII」～沸騰伝熱研究の過去，現在を整理し，未来を語る礎に～』が開催されました．そこでの講演話題は以下のようなものでした．

基調講演 「沸騰の数値計算」

講 師：功刀資彰（京都大）

Rohsenow 核沸騰モデル，Zuber の CHF モデル

講 師：大川富雄（大阪大）

趙・増岡・鶴田の CHF モデルの概要

講 師：坂下弘人（北大）

熊田・坂下論文

講 師：原村嘉彦（神奈川大）

西尾・田中の核沸騰～CHFモデルについて

講 師：鶴田隆治（九工大）

原村・甲藤モデル概要紹介と長所・短所

講 師：永井二郎（福井大）

功刀先生の沸騰の数値シミュレーションに関する御講演の後，核沸騰の中心的モデルに関し御講演を5名の方に頂きました。講師の方々は，核沸騰に関し優れたモデルをこれまでに提案してきている方々です。大川先生には，核沸騰と限界熱流束モデルの原点とも言える Rohsenow, また, Zuber のモデルについてご紹介を頂きました。次の4名の講師の方には，ご自身の関係された提案モデルではなく，他の方のモデルを見ていただい

てご紹介を頂きました。それらを等して『核沸騰～限界熱流束 CHF のプール沸騰モデルの相互評価と議論』を行うことを目的としておりました。御講演の後，活発な討論が為されました。今回の伝熱学会誌のこの、『相変化する，ということ』特集では，上記講演会での講師の方々に，大川先生には同様に Rohsenow 核沸騰モデル，Zuber の CHF モデルについてまとめていただきました。坂下先生，原村先生，鶴田先生，永井先生にはご自身の関わられた核沸騰モデルに関してまとめていただき，収録させていただきました。これらを通して，核沸騰モデルの現状と問題点，今後の研究の方向性の検討の一助としていただければと，大変幸甚に存ずる次第です。

---

## 「沸騰現象の把握と新たな計測法」

Understanding of Boiling Phenomenon and New Measurement

門出 政則 (佐賀大学)

Masanori MONDE (Saga University)

e-mail: monde@me.saga-u.ac.jp

### 1. はじめに

沸騰現象は、蒸気を発生する熱交換器では必ず現れる素過程であると同時に、その熱伝達率が非常に大きいことから各種機器の冷却にも広く利用されている。そのため、沸騰に関する研究は、古くから行われており、非常に多くの論文が公表されている。ここでは、筆者がこれまで主として行ってきた核沸騰の上限を規定する限界熱流束や最近注目している高温面の非定常急速冷却の研究で経験した挑戦や測定に述べる。

### 2. 沸騰熱伝達特性

#### 2.1 核沸騰曲線

発生した蒸気が、合体せず、孤立的な状況下にある熱流束域では、その熱伝達は、加熱面の表面状態、加熱面上の流れの状況（自然対流や強制対流など）や加熱面の向きなどに大きく支配されているが、ある熱流束以上（高熱流束域と呼ぶ）になるとそれらの影響を殆ど受けなくなり、いろいろな状況下で得られる沸騰曲線とはほぼ通常の飽和プール沸騰曲線の延長上に現れる。この沸騰状況は、一般に十分発達した核沸騰と呼ばれている。例えば、図1は飽和噴流沸騰系で得られた十分発達した沸騰域での沸騰曲線と飽和プール沸騰の熱伝達予測式を比較したものである。図1中の各直線の最大点がある流速での限界熱流束に対応している。そして、十分発達した沸騰域では噴流沸騰系の沸騰はプール沸騰と同じ性格を持ちながら限界熱流束点のみが、噴流速度の増加に伴って高熱流束側に延長されて行くという性格を持っている。

ところで、図1の沸騰曲線を求めるためには、加熱面の表面温度と熱流束を正確に測定する必要がある。図2は、飽和沸騰予備実験において、銅棒の中心軸に沿った温度勾配から推定された熱流束と加熱面で生成された蒸気を回収することによって求められた表面熱流束を実測することによ

て、測定された熱流束の正確さを検定する装置である。

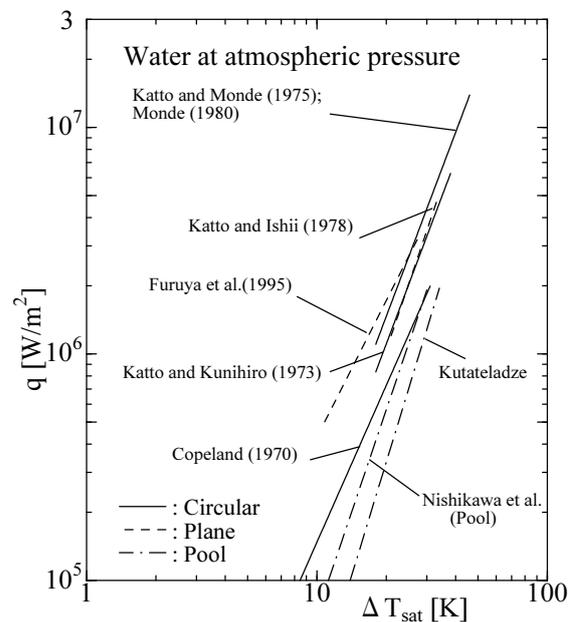


図1 沸騰曲線

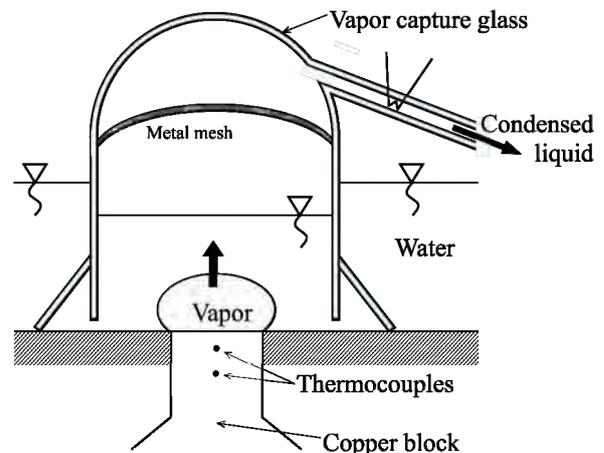


図2 熱流束の測定装置

熱電対の挿入位置が既知、かつ銅棒が完全に断

熱されていると、定常状態では、温度勾配と銅棒の熱伝導率の積から求められた熱流束  $q_m$  は、発生蒸気量から測定された熱流束値  $q_m$  と完全に一致する筈である。また、銅棒を電気加熱している場合には、電気加熱量から熱流束  $q_e$  を求めることが出来る。しかし、実際には、これらの3つの値は、一致する筈もなく、常に  $q_e > q_m$  すなわち  $q_{loss} = q_e - q_m$  となる。そして、いろいろな  $q_e$  に対して、 $q_e$  と  $q_m$  の相対的關係 (=  $q_{loss}/q_e$ ) が常に一定であるならば、この体系における銅棒からの熱損失が推定できることになる。そして、熱損失が数%程度の時には、 $q_m = -\lambda(T_1 - T_2)/(z_1 - z_2)$  と近似することが出来るだろう。しかし、熱電対の位置  $z_1, z_2$  は、実際にはずれているので、温度勾配の値も当然誤差が含まれている。銅の熱物性および測定温度の精度が3桁程度の正しさであれば、2つの熱電対間の距離のズレは推定できるが、位置は不明のまま残される。そして、表面温度を温度勾配から外挿して求めると、外挿された表面温度はかなりの誤差を含んだ値となる。それを避けるためには、表面に近い熱電対の位置を慎重に測定することが大切となる。

一方、限界熱流束は、表面温度が定常にならず、上昇するときの熱流束であるので、表面温度の測定値は不必要となる。ところが、限界熱流束の値は、図1に示されるように飽和プールの沸騰でも  $2 \text{ MW/m}^2$  という高熱流束で、衝突噴流では、1桁以上も大きい値となることもある。例えば、限界熱流束が、 $10^7 \text{ MW/m}^2$  で、銅棒を利用した加熱の場合、そこでの温度勾配は、 $dT/dz = 26.3 \text{ K/mm}$  となり、長さ  $10 \text{ mm}$  の銅棒の底部は、 $363 \text{ }^\circ\text{C}$  以上となる。従って、銅棒を用いた間接加熱方式では、限界熱流束を測定する実験は不可能となることも起こりうる。この結果、高熱流束実験をするためには、金属箔を直接通電加熱する方式となる。

直接通電加熱方式での熱損失を図2に示される装置を用いて検証すると、熱損失は、非常に小さいことが確認できる。図3は、ニッケル箔を通電加熱した時の定常状態での断熱材内の温度分布の数値計算結果の1例を示す。電極接続部近傍では、電極の影響で2次元的な熱移動となっているが、その影響は、 $1 \text{ mm}$  程度の範囲にとどまっている。衝突噴流冷却では、限界熱流束の発生位置、すなわちニッケル箔の切断位置は、常に電極手前  $1 \text{ mm}$

近傍となっていたという実験結果は、電極の影響によるものと考えられる。

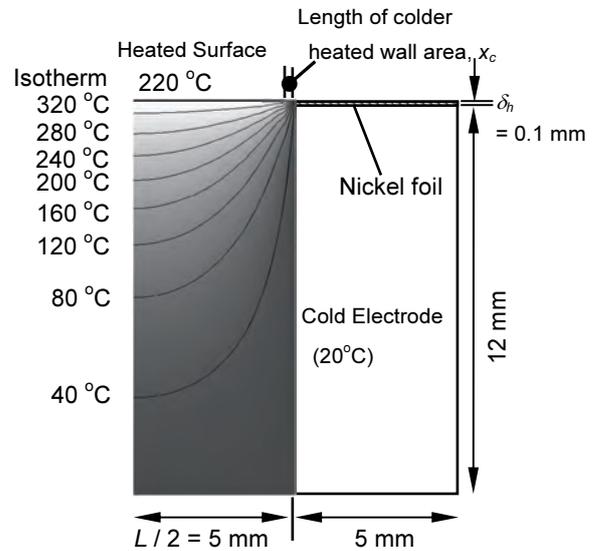


図3 ニッケル箔を直接通電加熱した時の断熱材内の定常温度分布 ( $q = 200 \text{ MW/m}^2, L = 10 \text{ mm}, \delta_h = 0.1 \text{ mm}, P = 0.8 \text{ MPa} (T_{sat} = 170.4 \text{ }^\circ\text{C}), \Delta T_{sat} = 50 \text{ K}$ )

図3から分かるように、温度の測定はここでは全く行われていない。また、測定しようとして、熱電対をニッケル箔の裏面に接合しても熱電対の接点の大きさを箔の厚さの  $1/10$  程度以下にする必要があることから、一般にこのような場合には温度の測定は諦めざるを得なくなる。従って、限界熱流束を測定するという場合のみに限定される。

一方、直接通電加熱で、熱流束と表面温度を測定したい場合には、温度-抵抗特性が比較的直線関係にある白金が加熱材として広く利用される。ただ、直接通電加熱法では、電気抵抗が小さい金属を使用することから大電流が必要になることから、加熱面の大きさが小さくなるという難点がある。抜山によって初めて得られた沸騰曲線は、細線を直接通電加熱する方法で得られている。通常の核沸騰とは異なるが、バブルジェットプリンターのアクチュエーターとして、自発核生成による気泡生成が利用されているが、これは微少な加熱面に  $200 \text{ MW/m}^2$  以上の熱流束をパルス的に印加することによって実現されている。

## 2.2 遷移沸騰について

限界熱流束は、安定な核沸騰の上限を規定する熱流束で、この熱流束以上になると加熱面から熱が安定に伝わらなくなり、温度が上昇し続け、別

な安定状態(膜沸騰)に推移することになる。この推移の時間は、直接通電加熱の場合一般に非常に短時間となるために遷移沸騰領域の存在は見逃しがちになる。一方、銅ブロックなどを利用した間接加熱方式では、銅ブロックの熱容量によって推移する時間が長くなる、換言すると不安定な遷移沸騰がより観察されやすくなる。さらに、緩やかな不安定 ( $dq/dT = (dq/dt)/(dT/t) < 0$ ) は、適切な加熱量の制御によって、安定な遷移沸騰を実現することが可能となる。Auracher や原村は、制御によって安定な遷移沸騰状態を得ている。そして、遷移沸騰領域では、加熱面温度の上昇に伴って安定な濡れ面積の平均的割合が減少するために、熱流束が減少する、即ち  $dq/dT < 0$  となることが確認されている。また、加熱側の温度が制御出来る場合、例えば過熱蒸気を用いて加熱する場合には、遷移沸騰域では、乾き面と濡れ面の共存が可能となり、加熱面上での共存率によって平均的熱流束が決定されていると考えられる。

遷移沸騰域では、濡れ割合の非定常的变化に伴う加熱面温度と熱流束の変化であるから、この非定常変化を追跡できる測定法があれば、遷移沸騰域での加熱面温度と熱流束の関係を求めることが可能になる。このような視点から、門出らは、固体内の温度変化の測定から表面温度と熱流束を正確に推定するために必要となる逆問題解析法を開発している。図4は、図2に示されるような銅棒を加熱し続けたときの固体内の2点の温度変化、及びこの温度変化から逆問題解析で得られた熱流束と温度の関係を示す。また、図5は、沸騰曲線上のある点における加熱面上の流動状況に対応した写真である。なお、図4中のAは、核沸騰域、 $B_1$ 、 $B_2$ は遷移沸騰域となっている。

図4、5の比較から、遷移沸騰領域では、加熱面過熱度の増加につれて発生している蒸気量が減少しているのがよく分かる。逆問題解を利用することによって、非定常変化中の温度や熱流束の測定が可能となり、更に変化を同期させた写真撮影によってより正確な現象把握が可能になる。

図6は、サブクール度  $30^{\circ}\text{C}$  で得られた遷移沸騰領域で偶然観察された興味ある現象を示す。図6から、番号  $1 \rightarrow 3$  では、蒸気生成量が減少し、そ

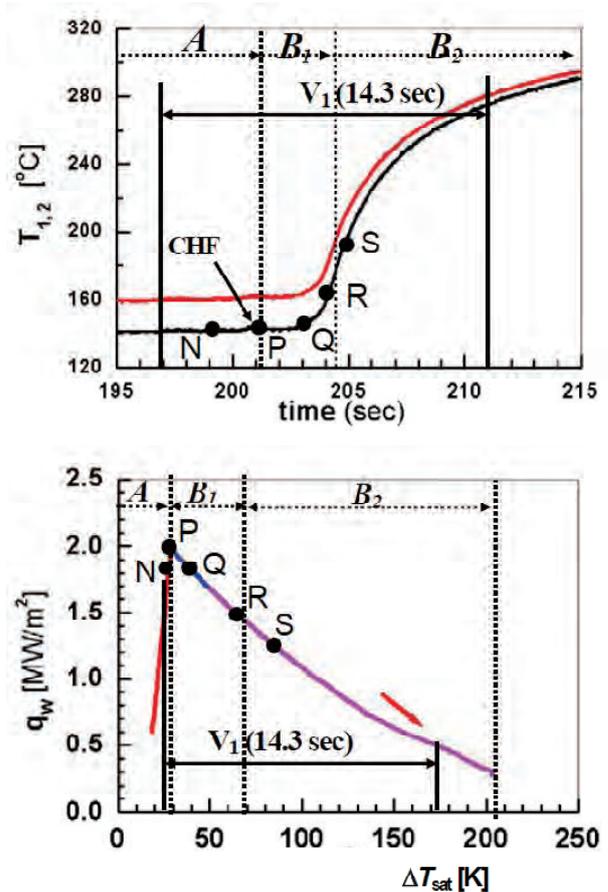


図4 熱を供給し続けたとき固体内の温度変化とその沸騰曲線

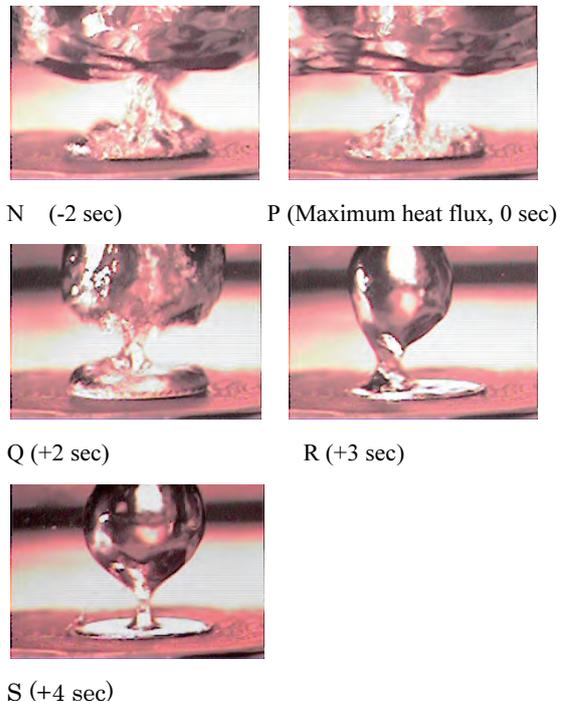


図5 図4の沸騰曲線上の点に対応した沸騰状況

れに伴って熱流束も減少しているが，番号3 → 5では，蒸気生成量の増加に伴って熱流束も増加している．番号1 → 3の変化は，濡れ面の割合が減少しているということで理解出来るが，なぜ，再び濡れ面が増加したのだろうかという疑問が残る．ただ，熱流束の大きさ，サブクール度 30°C および微細化された気泡の生成を考えると急速な固液の接触が起こった結果と考えることが出来る．なお，図6で観察されたサイクルは，安定な膜沸騰状態から加熱面温度が徐々に冷却され，遂に安定な膜沸騰状態が保持されなくなり，固液の接触が開始

された時に観察された現象である．このサイクルが4回継続した後，急激な温度降下と熱流束増加が生じ，限界熱流束点へと移行した．

ここでのサイクル変化は，加熱面の熱容量と濡れ面積割合が，加熱面上での熱移動に対するある種の振動系を形成していると考えられるが，いまだ未解明のままになっている．

遷移沸騰域での伝熱特性は，固液の接触問題がおおく関与していることは確かであるが，巨視的な意味で「安定な濡れ」が許される決定条件は，未定のままである．

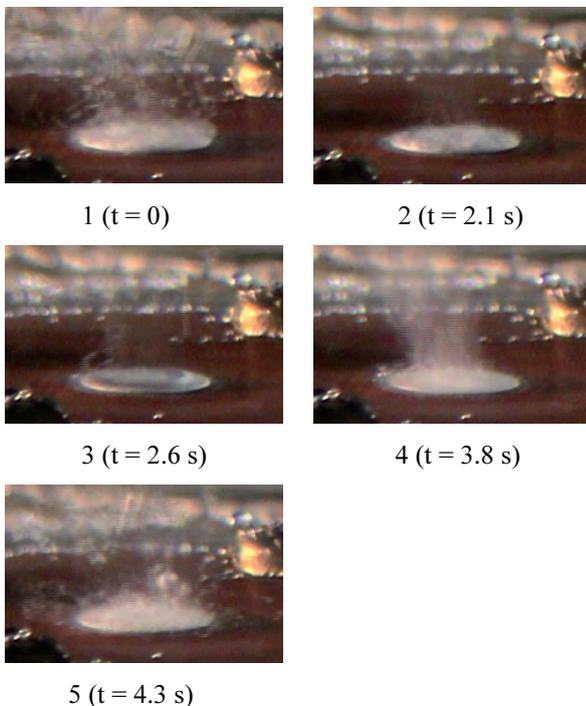
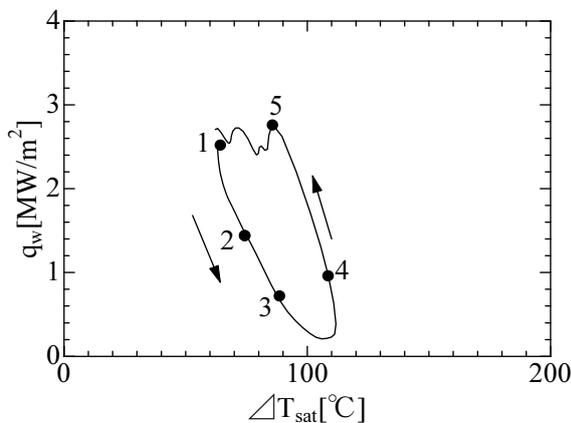


図6 遷移沸騰領域で観察された沸騰曲線上のサイクル

### 3. 高温面の急速冷却

高温面の急速冷却は，クエンチと呼ばれ古くから広く研究された冷却過程での研究課題の1つである．クエンチ過程は，図7に示されるように高温面の温度が時間の経過につれて徐々に降下し，その後急激な温度降下(噴流中心から5 mmの位置で測定)として示されている．冷却曲線での表示は，クエンチ中の表面温度と表面熱流束の正確な測定が困難であったためではなかろうかと思う．

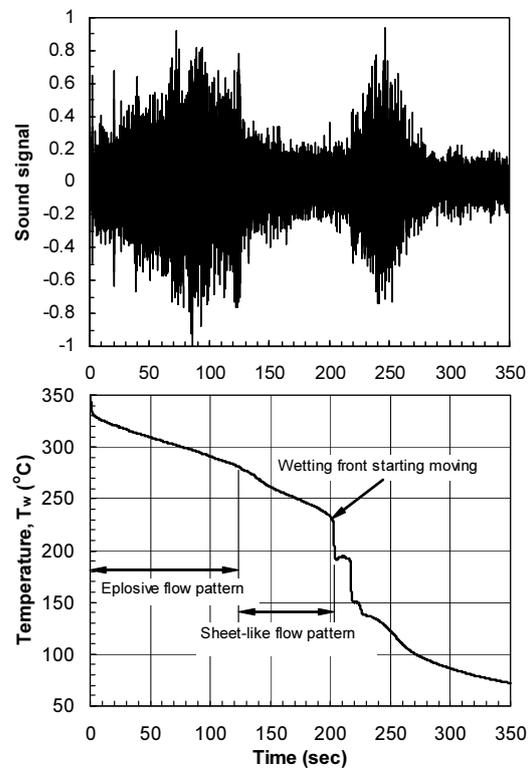


図7 クエンチ中の音の強さと温度変化 ( $T_w$  at  $r = 5$  mm, Cu,  $T_b = 350$  °C,  $\Delta T_{sub} = 50$  K,  $u = 3$  m/s)

### 3.1 衝突噴流系でのクエンチ過程

図7は，衝突噴流で高温面を冷却したときの温度変化と冷却過程中的音の強さの変化を示す。

図7から，表面温度が約300℃以上の範囲では，激しい音を伴っているが，300℃以下になると音の強さは弱まっている．そして，温度が約200℃になると再び激しい音を伴った冷却となっている．これらの変化と高温面上の流動状況の変化を重ね合わせると，表面温度が約300℃以上では，液は接触後直ちに飛散されている．約300℃と200℃の間では，固液の接触は安定に接触しているが，その接触面積が拡大せず，固液気の3相界面近傍での激しい蒸気生成による液滴の飛散が観察される。

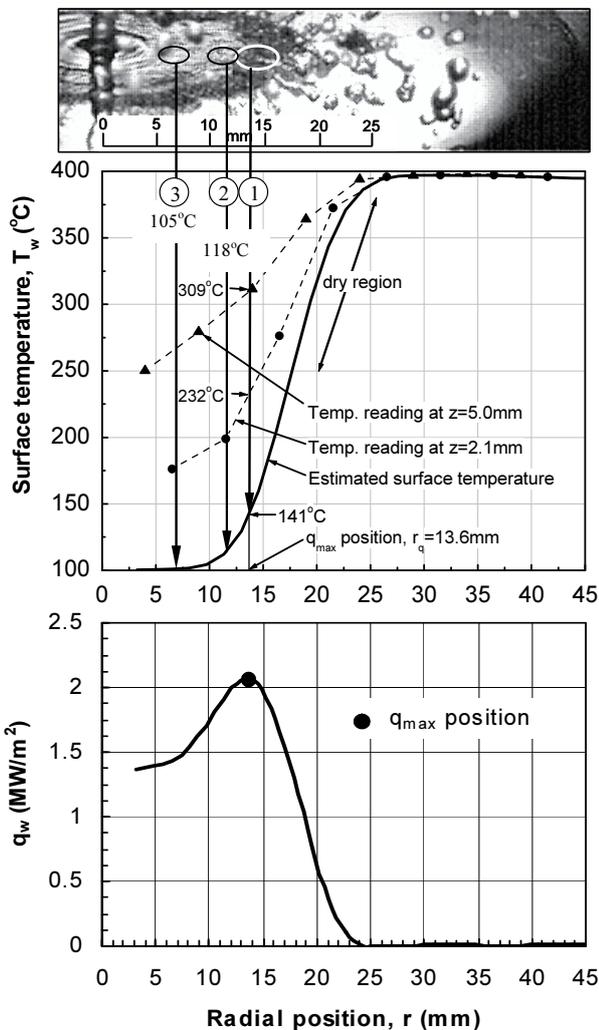


図8 3相界面移動中の沸騰状況，温度分布と最大熱流束分布(Steel:  $T_b=400^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{\text{sub}}=50\text{K}$ ,  $u=3\text{m/s}$ ,  $t=4.3\text{sec}$ )

そして，200℃以下になると3相界面の位置が拡大し始めた．この拡大によって，急激な冷却が起こり，表面温度が急降下することになる．

図8は，3相界面の位置が拡大しているときの流動状況，固体内の温度や表面温度の半径方向変化及び半径方向の熱流束変化を示す．図8から，最も強く冷却が生じている位置とその位置近傍の温度変化，更には流動状況はよく理解できる．また，最大熱流束が，半径方向に変化する様子を図9に示す．

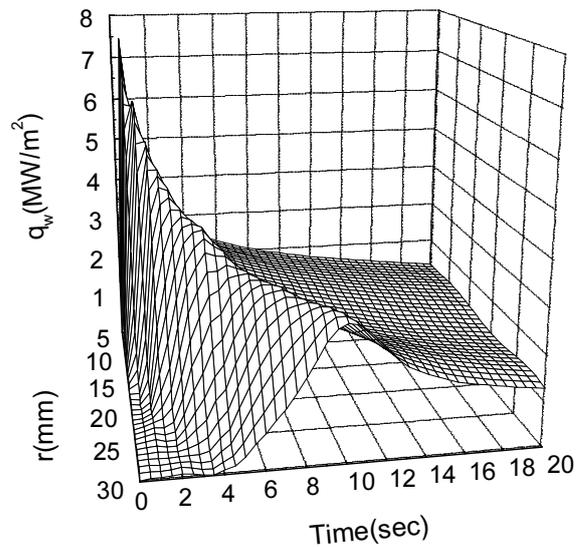


図9 3相界面移動中の熱流束変化 (Brass,  $T_b=400^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T_{\text{sub}}=80\text{K}$ ,  $u=15\text{m/s}$ )

図7の冷却曲線において，200℃付近で3相界面位置が拡大し始め，高温面の急冷が始まるが，定在していた，3相界面位置の拡大し始める条件については未解決のままになっているが，クエンチ冷却を理解するためには，拡大開始の条件の決定が最重要点であると思う．一方，図9に示されるように最大熱流束が3相界面位置の進行に伴って減少しているが，この最大熱流束と定常衝突噴流冷却での限界熱流束の関係は明らかにされている．

### 4. 測定法の開発

限界熱流束の測定においては，加熱面の温度が一定にならず，上昇し続ける時の熱流束の測定をすればよかったので，温度の測定よりもむしろ要求される熱流束の実現が重要であった．例えば，200

MW/m<sup>2</sup> レベルの熱流束を実現するためには，直接通電加熱法でも大変である．また，定常状態での沸騰熱伝達を対象とする場合には，温度や熱流束の測定は，比較的容易に行うことが出来る．

一方，クエンチ冷却の場合，表面温度と熱流束が非定常的かつ急激な変化であるため，正確な測定がなされていたとは言い難かった．そのような事情から，著者は，まず大きい変化を伴う表面温度と熱流束を正確に推定する方法として，非定常熱伝導の逆問題解について，検討し，熱電対の挿入位置や固体の熱物性から決定される応答性の範囲内(0.1 秒程度の平均値)で，表面温度と熱流束が固体内の測定温度から決定できることを示した．そして，逆問題解析の解を利用することによって，図 7 や図 9 に示される変化が得られるようになった．そして，衝突噴流によるクエンチ特性も明らかにされつつある．

## 5. おわりに

著者が対象として沸騰研究の内容を中心に記述したが，対象とする現象のより深い理解と新たな手法やより高度な測定法の開発は車の両輪のような関係である．例えば，高速ビデオのより高速度化(10<sup>6</sup> コマ/秒)やマイクロセンサーの開発は，沸騰現象の新たな理解につながる可能性があり，期待している．ただ，実験をすれば，必ずなんらかの測定値が得られるが，その値が実験者の意図した測定値と正確に対応しているかということの確認は実験者にとって最も大切なことである．

最後に，参考文献は記載しなかったが，氏名から WEB 上で関連の論文が容易に検索できるので省略させて頂いた．ご容赦ください．

## プール沸騰における Rohsenow の HTC モデルと Zuber の CHF モデル

*Rohsenow's HTC Model & Zuber's CHF Model in Pool Boiling*

大川 富雄 (大阪大学)

Tomio OKAWA (Osaka University)

e-mail: t-okawa@mech.eng.osaka-u.ac.jp

### 1. はじめに

プール沸騰，中でも液温が飽和温度にあるときの核沸騰は，沸騰熱伝達の中でも特に身近でかつ基本的な体系と言える．本稿では，この体系における熱伝達率(HTC)と限界熱流束(CHF)を対象として，古典的な現象モデル化の方法を紹介する．身近で基本的といっても，物理的に見れば十分に複雑な現象であるから，これまでに数多くのモデルが提案され，現在でもその努力が継続されていることは周知の通りである．そこで，典型的と考えられるモデルの手がかりをつかむため，簡易的な方法ではあるが，手元にある単行本[1-7]で特に重要な相関式として紹介されているものを調べてみた．結果を表1に示す．一見して，HTC相関式としてはRohsenowによるもの[8]が，CHF相関式としてはZuberによるもの[9, 13, 18]が多く紹介されていることがわかる．これらの相関式は，伝熱工学のテキスト[23]や沸騰に関する一般向けの冊子[24]でもとりあげられており，代表的な核沸騰の物理モデルとして位置付けられていると考えられる．

以下では，筆者の感想も多少交えながら，基本的には文献[8]と[13]に沿って，RohsenowのHTC相関式とZuberのCHF相関式を概観する．なお，表1からもわかるように，Zuberはいくつかの文献でCHF相関式を提示しており，例えば[9]と[13]では気液界面挙動の物理的なイメージも同一ではない．本稿では，後に出版されていることから，Zuberが最終的に至った考え方を最もよく反映していると仮定し，文献[13]を調査対象に選定した．

### 2. Rohsenow の HTC 相関式 [8]

#### 2.1 書き出し

論文冒頭で，本論文の結論である次式を提示するとともに，①本相関式が沸騰現象に関する論理的考察の結果として導かれものであること，②相

表1 文献で紹介されている核沸騰相関式

| 文献番号   | HTC 相関式  | CHF 相関式   |
|--------|--|---|
| [1]    | Rohsenow [8]   | Zuber [9]   |
| [2]    | Kutateladze [10]<br>Nishikawa [11]<br>Labountzov [12]      | Zuber [13]<br>Kutateladze [14]<br>Borishanskii [15] |
| [3]    | Rohsenow [8]   | Zuber [9]   |
| [4]    | Rohsenow [8]<br>Mostinski [16]<br>Cooper [17]              | Zuber [18]  |
| [5]    | Rohsenow [8]   | Lienhard [19]                                       |
| [6, 7] | Foster [20]<br>Rohsenow [8]<br>Stephan [21]<br>Cooper [17] | Kutateladze [22]<br>Zuber [18]                      |

関式中に含まれる  $C_{sf}$  が伝熱面と流体の組合せに依存する係数であることが強調されている．

$$\frac{c_l \Delta T_w}{h_{fg}} = C_{sf} \left[ \frac{q}{\mu_l h_{fg}} \sqrt{\frac{\sigma}{g \Delta \rho}} \right]^{0.33} \left[ \frac{c_l \mu_l}{k_l} \right]^{1.7} \quad (1)$$

なお，上式は“suggested relation”として提示されており，まだまだ改良の余地があると考えていたことが伺われる．

緒言には，式(1)に至る思考の過程が示唆されていて，興味深い．まず，次に示す3つの事項が示される．①非沸騰の強制対流熱伝達であれば，熱伝達率はNusselt数，Reynolds数，Prandtl数を用いて整理できる．②サブクール沸騰の可視化結果などによれば，加熱壁からの熱の大部分はまず液相に移動する．核沸騰域での高い熱伝達率は，主として気泡による液体のかく乱に起因すると考えられる．③強制対流沸騰の場合，発達した核沸騰域における熱伝達率は，管内径と流体速度に基づく通常のReynolds数にほとんど依存しない．以上

の考察に基づき，核沸騰の HTC 相関式に含まれるべき重要なパラメーターとして，次式で定義される気泡 Reynolds 数  $Re_b$  を導入する．

$$Re_b = \frac{G_b D_b}{\mu_l} \quad (2)$$

ここで， $G_b$  は伝熱面を離脱する気泡の質量流束， $D_b$  は気泡径である．通常の Reynolds 数が乱れの指標であるのと同様に， $Re_b$  は気泡が伝熱面近くの液相内に誘起するかく乱の指標と解釈する．

## 2.2 気泡 Reynolds 数の評価

熱伝達率を  $Re_b$  の関数として相関するという基本戦略は定まったが，式(2)右辺の  $G_b$  と  $D_b$  は自明ではない．このため，次に  $Re_b$  をいかに評価するかという技術的な問題に移る．まず，気泡径  $D_b$  は次の Fritz の式により評価する．

$$D_b = C_d \beta \sqrt{\frac{2\sigma}{g\Delta\rho}} \quad (3)$$

ここで，上式中に接触角  $\beta$  が含まれていることが後で重要になる．また，全壁面熱流束  $q$  と気泡による熱流束  $q_b$  の関係について詳細に議論を行った上で，気泡流量  $G_b$  と熱流束  $q$  の間に比例関係を仮定する．

$$q = C_q h_{fg} G_b \quad (4)$$

式(3)，(4)を式(2)に代入すれば，次に示す  $Re_b$  の評価式が得られる．

$$Re_b = C_R \beta \frac{q}{\mu_l h_{fg}} \sqrt{\frac{\sigma}{g\Delta\rho}} \quad (5)$$

ここで， $C_R$  はモデル定数 ( $C_R = \sqrt{2} C_d / C_q$ ) である．

## 2.3 その他の無次元パラメーター

強制対流熱伝達に関する知見より，核沸騰 HTC も Nusselt 数，Reynolds 数，Prandtl 数を用いて整理できると期待する．Reynolds 数  $Re_b$  の評価式は既に導いたので，残る課題は Nusselt 数と Prandtl 数である． $Re_b$  を導出する際の代表長さとして気泡径  $D_b$  を用いたのだから，Nusselt 数は次式で定義するのが自然であろう．

$$Nu_b = \frac{h D_b}{k_l} \quad (6)$$

式(3)を式(6)に代入すれば次式を得る．

$$Nu_b = C_n \beta \frac{h}{k_l} \sqrt{\frac{\sigma}{g\Delta\rho}} \quad (7)$$

壁面から流体に加えらるる熱はまず液相に伝えられるとしているので，HTC 相関式は液相の Prandtl 数  $Pr$  を含み，次の形式をとると期待できる．

$$Nu_b = \phi_1(Re_b, Pr) \quad (8)$$

## 2.4 いくつかの注意

実験データを用いて式(8)の具体的な関数形を定めたいところだが，これに先立っていくつかの注意が述べられる．

- ・ 物性値は，飽和状態で評価する．
- ・ 式(8)の適用範囲は，プール沸騰および強制対流沸騰中の発達した核沸騰域(the region of vigorous boiling)である．十分に激しくない強制対流沸騰では，通常の Reynolds 数など，他のパラメーターの影響を考慮する必要がある．
- ・ 接触角に関する情報は限られているため， $Re_b$ ， $Nu_b$  を計算する際に  $\beta$  は考慮しない．
- ・ 実験データによれば，HTC はサブクール度の影響をほとんど受けない．したがって，式(8)でもサブクール度の影響は考慮しない．
- ・ 次の関係式

$$\frac{Re_b Pr}{Nu_b} = \frac{c_l \Delta T_w}{h_{fg}} \quad (9)$$

を用いて  $Nu_b$  を消去すれば，式(8)を次の形式で書くことができる．

$$Re_b = \phi_2 \left( \frac{c_l \Delta T_w}{h_{fg}}, Pr \right) \quad (10)$$

$\Delta T_w$  と  $q$  の関係を見る上ではこちらの方が都合がよい．

## 2.5 関数形の決定

白金線を用いて得られた Addoms による水のプール沸騰実験に関するデータ[25]を用いて，ついに相関式の具体的な関数形である式(1)が定められる．相関式開発の基本となるデータの選定に際しては，0.1～17MPa ときわめて広い圧力条件でデータ収集が行われていることが決め手になったようである．なお，ここで物性値の評価法が詳述される．学生にこの手の練習問題を課すと，物性値評価はどうすればよいかよく質問を受けるが，今後はもっと丁寧に対応しようと反省している．この後，異なる流体や伝熱面を用いて収集された実験データを使用して，式(1)の妥当性が検証される．さらに，強制対流沸騰に関する2つのデータセットを用いて， $\Delta T_w$  の増加，すなわち核沸騰の激し

さが増すとともに，HTC が式(1)に漸近する傾向があることを確認する。

以上の手続きを通して，Rohsenow による HTC 相関式の開発と検証が一段落した。実験データをよく相関できるだけでなく，用いた無次元量の物理的意味が明確に与えられており，言うまでもなくその意義は大きい。しかしながら，以上に示した開発・検証の過程で，式(1)中の  $C_{sf}$  は残念ながら一定値とはならず，0.0027~0.015 とかなり広い範囲に分布することを見る。 $C_{sf}$  が約 6 倍異なり得るから，特に  $\Delta T_w$  を既知として  $q$  を求める問題では， $q$  は  $6^3 \approx 200$  倍程度も異なり得る。ここでさらに注意すべき点として， $C_{sf}$  は流体と伝熱面材料の組合せだけでなく，伝熱面の表面状態にも依存し，また一般的に伝熱面の表面状態は必ずしも既知ではないという点があげられる。おそらくはこれらの理由により，引き続き  $C_{sf}$  を中心に考察が継続される。

## 2.6 考察

過熱度や物性値の評価精度の影響も排除はしない。しかし， $C_{sf}$  が一定とならない最大の原因は，式(5)および式(7)を用いて  $Re_b$  と  $Nu_b$  を計算する際に接触角の影響を無視したことにあり，したがって，様々な伝熱面と流体の組合せに対して接触角に関する情報を収集することが今後きわめて重要であると指摘する。

これに引き続いて，HTC 相関式の自己評価を行う。この部分の記述によれば，式(1)に含まれている指数の値はもちろん，関数形そのものも決定版とは考えていなかったようである。実際，清浄でない伝熱面で得られたデータの場合，式(1)中の指数 1.7 が 0.8~2.0 の範囲で変化したことを指摘している。しかし，無次元数の組合せについては，“*Rather it is suggested that the dimensionless groups of Equation 1 are significant in correlation boiling heat transfer data.*”と記述しており，その妥当性を確信していたことが伺われる。

なお，式(1)を書き換えると，以下の表式が得られる。

$$Nu_b = \frac{1}{C_{sf}} Re_b^{0.667} Pr^{-0.7} \quad (11)$$

論文では，単相流の熱伝達率相関式との形式上の一致を指摘するのみであるが， $Pr$  の指数が負となっている。 $Pr$  が速度境界層厚さと温度境界層厚さ

の相対関係を与えるものとする，さらに物理的解釈を加える余地があるかもしれない。

## 2.7 結び

式(1)を再度提示するとともに，今後の課題が示される。「伝熱面と流体の組合せや圧力により，接触角と係数  $C_{sf}$  がどのように変化するかを明らかにする必要がある。」が最初の指摘である。さらに，①気泡径の評価に用いた Fritz の式，②気泡生成周期と気泡径の関係式，③熱流束と気泡流量の間に成立する関係式の妥当性についても，さらなる研究の必要性が指摘される。論文の出版から半世紀以上が経過しているが，Rohsenow が掲げた課題に対してまだ明確な回答は得られていないように思われる。なお，原論文の最後には，Jakob 等との討論が約 1.5 ページに渡って掲載されている。

## 3. Zuber の CHF 相関式 [13]

### 3.1 アブストラクト

本論文で提案する CHF 相関式の要点が簡潔に示される。

- コンセプト：核沸騰と気泡注入(gas bubbling)の類似性を議論し，Burnout が流体力学的な問題である Flooding に対応することを示す。
- 手法：CHF 相関式の定式化にあたり，流体力学的不安定に関する Taylor と Helmholtz の理論を用いる。

なお，Zuber の論文に倣い，以下では CHF 状態に至るという事象を Burnout と呼ぶことにする。

### 3.2 序論 (Historical resume)

プール沸騰 CHF に関わる歴史的背景が書かれていて興味深い。まず，1756 年に Leidenfrost の論文が出版されて以来，多くの研究者の興味の対象となっているが，Burnout の詳細説明が遅々として進んでいないと述べている。

次からが本題である。まず，本論文の基礎をなす「Burnout と Flooding の類似性」について議論が行われる。なお，この考え方に初めて言及したのは，1939 年の Elgin 等 [26] であり，特に斬新な考え方とは位置付けていない。Zuber の指摘する対応関係は以下の通りである。

- ガスの吹き込みに必要な圧力(overpressure)が過熱度に，吹き込みガス流量が蒸気流量あるいは熱流束に対応する。
- 以下に示すように，Sounders 等による Flooding 経験式と Rohsenow 等による CHF 経験式はよ

く似た形式をとる。

$$\text{Flooding: } U_c = C_1 \left[ \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right]^{0.5} \quad (12)$$

$$\text{Burnout: } \frac{q_c}{h_{fg} \rho_g} = C_2 \left[ \frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right]^{0.6} \quad (13)$$

さらに，Bonilla 等が，1941 年の論文[27]で Flooding と CHF の定量的な一致に言及していたことを詳述している。ただし，Bonilla 等が後にこの考え方を放棄したことが，Bonilla 教授のコメントとともに以下のように紹介されている。"In subsequent publications, however, they abandoned this approach because, as Professor Bonilla told us, additional data did not seem to agree with the original graphs."この後，Kutateladze が「Burnout は流体力学的な現象である」との仮定の下で，次元解析を通して導出した次の著名な CHF 関連式[28, 29]と，Borishanskii による修正式が示される。

$$\frac{q_c}{h_{fg} \rho_g} \left[ \frac{\rho_g^2}{\sigma g \Delta \rho} \right]^{1/4} = K = 0.16 \quad (14)$$

ここで，上式左辺の無次元量が，Bonilla 等が導いた無次元パラメーターとほとんど同じであることを指摘する。Kutateladze が式(14)を発表したのは1948年以降なので，上記の無次元数に辿り着いたのは，Bonillaの方が早かったことになる。

最後に，次元解析だけでは現象の理解に到達することは難しく，物理プロセスを合理的にモデル化する必要があることを暗示して緒言を終えるのだが，最後の一文に強い意志が感じられる。そのまま紹介する。"On the other hand, as is well known, there are other ways of looking at the problem and as long as the final equations are obtained through arguments based entirely on dimensional analysis there is always a chance that the right conclusions are being supported for the wrong reasons."

### 3.3 Burnout までの現象推移

比較的スローテンポだった序論とは打って変わって，Burnout に至るまでの物理的描像が一気に述べられる。およそ次のようである。「熱流束の増加に伴って，発泡核が増加するとともに，気泡はより急速に成長し，発生頻度も増加する。気泡が合体して蒸気塊が形成されるが，Taylor 不安定のために，蒸気塊は流体力学的に不安定である。気

泡の発生頻度が増加するから，気泡は先行気泡と衝突・合体し，連続的な蒸気柱を形成する。熱流束の増加とともに蒸気塊および蒸気柱の数は増えるが，際限なく増加できるわけではない。蒸気塊あるいは蒸気柱の存在する場所は，元々は液体が占めていた場所である。すなわち，Flooding と同じように，蒸気相と液相による空間の奪い合いが起きる。液体に与えられる断面積は狭くなる一方だから，液体はより速く加熱面に移動しなくてはならない。こうして，我々は，加熱面から立ち上がる蒸気ジェットと，ジェットの間に降下する液体を見る。Helmholtz 不安定により，この対向流はいつか流体力学的に不安定となる。このとき Burnout に至る。限界状態を超過すれば，蒸気が加熱面から液体を引き離すか，あるいは液体が加熱面に蒸気を押し付ける。いずれにしても熱伝達劣化せざるを得ない。」爽快である。

### 3.4 定式化

定式化も一気に述べられる。まず上向き伝熱面を考え，伝熱面と液体が蒸気相によって隔てられている瞬間を想定する。界面が不安定化するとともに，気液対向流が形成されなければ，液体は伝熱面に到達できない。ここで，伝熱面を一辺の長さが $\lambda_0$ の"unit cell"に区画する。界面不安定化が Taylor 不安定によるものとする，安定限界と最危険波長より $\lambda_0$ は次の程度と見積もられる。

$$\frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g \Delta \rho}{\sigma}} \lambda_0 = 1 \sim \sqrt{3} \quad (15)$$

界面波の変曲点より，各 unit cell に直径 $\lambda_0/2$ の蒸気柱が形成されると仮定する。これより，蒸気には $\pi/16$ ，液体には $1-\pi/16$ の割合で断面積が配分される。この結果，飽和沸騰の場合，蒸気速度 $U_g$ と熱流束 $q$ の間に次の関係が成立する。

$$q = \frac{\pi}{16} \rho_g h_{fg} U_g \quad (16)$$

水平伝熱面を想定しているから，蒸気の移動方向は鉛直上向きである。したがって，蒸気柱界面の安定性を考える上で重力の影響は無視できる。蒸気柱の安定限界は，Helmholtz の安定性理論より容易に導出でき， $\rho_g \ll \rho_l$ であれば次式となる。

$$U_g = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_g (\lambda_0 / 4)}} \quad (17)$$

なお，鉛直伝熱面を想定しても同じ結果が得られ

る。ここで、式(17)の導出過程で、界面波の波長 $\lambda_{KH}$ が $\lambda_0$ と同程度と仮定しているはずだが、論文中で特にコメントはしていない。とにかく、CHF 相関式の導出に必要な関係式は出揃った。式(15)と式(17)を式(16)に代入すれば、次式を得る。

$$\frac{q_c}{\rho_g h_{fg}} \left[ \frac{\rho_g^2}{\sigma g \Delta \rho} \right]^{1/4} = K = 0.12 \sim 0.15 \quad (18)$$

上式より計算される $q_c$ の下限と上限は、様々な流体について報告されている CHF データのばらつき範囲におよそ対応する。これより、Zuber がこれに先立つ論文[9]で導いたのと同じ値 $K = \pi/24 = 0.131$ が推奨値として示される。

この後、半無限物体の熱伝導に関する知見を応用して、式(18)をサブクール沸騰の場合にまで拡張し、論文を閉じる。本論文に結言はない。ここで、式(18)に辿りつくまでの過程を振り返ってみると、限界状態に関する明確な物理的イメージをもって現象をモデル化し、途中実験データに頼ってモデル定数を定めることなしに、最終形に至っている。したがって、Kutateladze あるいは Bonilla による経験則を機構論的 CHF モデルにまで高めることに成功したと言える。ただし、計算される CHF 値は実験データとの比較が行われるものの、相関式の導出過程で用いた個別の仮定、例えば蒸気柱の存在、数密度、界面波長等については実験検証がなされていない。したがって、もし他の解釈によって同様の結果に辿りつくことができるのであれば、これが沸騰限界に関する唯一の物理的解釈とは言えず、さらなる機構解明の道を残したことになる。事実、この方向の優れた研究が、現在進行形も含めて精力的に行われている。本特集の別の記事に詳述されるので、ぜひそちらを参照して頂きたい。

#### 4. おわりに

Rohsenow の HTC 相関式と Zuber の CHF 相関式を、多少の感想や意見を交えつつも、基本的には原論文[8, 13]に沿って紹介した。私の不勉強による間違いが含まれているかもしれない、というよりも含まれていると思うので、読者はぜひ原論文を参照されたい。表 1 に示したように、これら 2 つの相関式は、国内外を問わず実に多くの教科書でとりあげられている。したがって、学部あるいは大学院での講義が伝熱を学ぶ唯一の機会であっ

た学生の多くは、核沸騰熱伝達を Rohsenow や Zuber のイメージに沿って理解していると考えられる。この意味で、これらは沸騰熱伝達相関式のスタンダードと言える。本稿が、沸騰熱伝達について考える、あるいは本特集の別の記事に紹介されるより現代的な考え方を参照する際の一助になれば幸いである。

#### 参考文献

- [1] Hallman, J. P., Heat Transfer, 5th edition, McGraw-Hill (1981).
- [2] 甲藤好郎, 伝熱概論, 養賢堂 (1981).
- [3] Özisik, M. N., Heat Transfer, McGraw-Hill (1985).
- [4] Whalley, P. B., Boiling, Condensation and Gas-Liquid Flow, Clarendon Press (1987).
- [5] A. Bejan, Heat Transfer, John Wiley & Sons (1993).
- [6] Dhir, V. K., Kandlikar, S. G., Fujita, Y., Iida, Y., Heist, R., Nucleate Boiling, in: S. G. Kandlikar, M. Shoji, V. K. Dhir (Eds.), Handbook of Phase Change, Taylor & Francis (1999).
- [7] Haramura, Y., Critical Heat Flux in Pool Boiling, in: S. G. Kandlikar, M. Shoji, V. K. Dhir (Eds.), Handbook of Phase Change, Taylor & Francis (1999).
- [8] Rohsenow, W. M., A method of correlating heat-transfer data for surface boiling of liquids, Transactions of ASME 74 (1952) 969–976.
- [9] Zuber, On the stability of boiling heat transfer, Transactions of ASME 80 (1958) 711–720.
- [10] Kutateladze, S. S., Heat Transfer in Condensation and Boiling, 2nd edition, Mashgiz (1952); AEC Translation 3770, U.S. AEC Tech. Info. Service.
- [11] Nishikawa, N., Yamagata, K., On the correlation of nucleate boiling heat transfer, International Journal of Heat and Mass Transfer 1 (1960) 219–235.
- [12] Labunzov, D. A., Teploenergetika 7 (1960) 76–81.
- [13] Zuber, N., Tribus, M., Westwater, J. W., The hydrodynamic crisis in pool boiling of saturated and subcooled liquids, International Heat Transfer Conference 27 (1961) 230–236.
- [14] Kutateladze, S. S., Hydromechanical model of

- the crisis of boiling under conditions of free convection, *Zh. Tekh. Fiz.* 20 (1950) 1389–1392.
- [15] Borishanskii, V. M., An equation generalizing experimental data on the cessation of bubble boiling in a large volume of liquid, *Zh. Tekh. Fiz.* 26 (1956) 452–456.
- [16] Mostinski, I. L., Calculation of heat transfer and critical heat flux in boiling liquids based on the law of corresponding state, *Teploenergetika* 10 (1963) 66–71.
- [17] Cooper, M. G., Saturated Nucleate Pool Boiling—A Simple Correlation, 1st UK National Heat Transfer Conference (1984) 785–793.
- [18] Zuber, N., Hydrodynamic Aspects of Boiling Heat Transfer, AEC Report No. AECU-4439 (1959).
- [19] Lienhard, J. H., Dhir, V. K., Extended Hydrodynamic Theory of the Peak and Minimum Pool Boiling Heat Fluxes, NASA CR-2270 (1973).
- [20] Foster, D. E., Greif, R., Heat Transfer to a Boiling Liquid—Mechanism and Correlation, *Journal of Heat Transfer* 81 (1959) 43–53.
- [21] Stephan, K., Abdelsalam, M., Heat Transfer Correlation for Natural Convection Boiling, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 23 (1980) 73–87.
- [22] Kutateladze, S. S., Heat Transfer in Condensation and Boiling, USAEC Report AECU-3770 (1952).
- [23] 日本機械学会編，伝熱工学（JSME テキストシリーズ），丸善（2005）.
- [24] 甲藤好郎，沸騰の科学，佐賀印刷（2007）.
- [25] J. N. Addoms, Heat Transfer at High Rates to Water Boiling Outside Cylinders, D.Sc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology (1948).
- [26] Elgin, J. G., Weiss, F. B., Liquid holdup and flooding in packed towers, *Industrial and Engineering Chemistry* 31 (1939) 435–445.
- [27] Bonilla, C., Perry, C. W., Heat transmission to boiling binary liquid mixtures, *Transactions of AIChE* 37 (1941) 685–705.
- [28] Kutateladze, S. S., On the transition to film boiling under natural convection, *Kotloturbostroenie* 3 (1948) 10–12.
- [29] Kutateladze, S. S., A hydrodynamic theory of changes in a boiling process under free convection, *Izvestia Akademia Nauk Otdelenie Tekhnicheskii Nauk* 4 (1951) 529–536.
-

「西尾・田中の高熱流束プール沸騰モデル」の成り立ちとその評価  
*Stories and Discussions on the Model for High Heat-Flux Pool-Boiling by Nishio and Tanaka*

永井 二郎 (福井大学)  
 Niro NAGAI (University of Fukui)  
 e-mail: nagai@u-fukui.ac.jp

1. はじめに

2010年伝熱シンポジウム(札幌)の前日(5/25, 火)に、日本機械学会熱工学部門相変化研究会(主査:小泉安郎先生(信州大))が開催された。テーマは「沸騰伝熱についての徹底討論Ⅶ」である。今回は特に、9月にアメリカからJ.Kim教授(Maryland大)を招いて核沸騰~CHFプール沸騰モデルについて討論会を開催することもあり、事前に日本側で代表的な沸騰モデルを対象として相互評価を行うこととした。「相互評価」とは、その沸騰モデルの提案者・関係者が説明するのではなく、第三者が概要説明と評価を行うというユニークなものであった。

モデルの1つとして、「西尾・田中の高熱流束プール沸騰モデル[1,2]」が取りあげられ、鶴田隆治先生(九工大)が概要と特徴を分かり易く解説しモデルの評価を行った(ちなみに筆者は恐れ多くも原村・甲藤のプール沸騰CHFモデルの評価を担当した)。今回、伝熱編集出版部会から本記事の執筆を筆者が依頼されたのは、上記研究会の相互評価者ではなく、「なぜそのモデル構築に至ったのか」という機微等も含めた解説記事はモデル提案者もしくは関係者がふさわしいと判断されたからである。筆者は上記モデル論文[1,2]の共著者ではなく、本来本稿の執筆者には西尾茂文先生が最もふさわしいが、現在執筆が難しい状況であり、筆者は論文[1,2]へつながる前段階論文[3,4]の共著者であるため、西尾先生・田中宏明氏に代わって執筆することになった。

「西尾・田中モデル」の詳細はもちろん論文[1,2]に記載されているので、本稿では概要を述べるに留める。それよりも、そのモデル構築に至る経緯や西尾先生の思考過程について、(西尾研出身者としては思い切って)私なりの捉え方を述べたい。また、本モデルに対する他研究者からの評価についても私見を記す。

2. 「西尾・田中モデル」の概要[1, 2]

図1に示す装置により、大気圧下のR113, R141bおよびエタノールを用いて、飽和条件も含むサブクールプール沸騰実験を行い、主に高熱流束核沸騰からCHFにわたり沸騰面上の固液接触状況を可視化した。可視化の原理は光の全反射を利用したもので、観察画面上の明部が乾燥領域、暗部が固液接触領域に相当する。得られた典型的な画像を図2に示す。核沸騰領域において、過熱度が増大するに伴い、乾燥面数密度が増大し、乾燥面間を縫うネットワーク状固液接触状況が見られる。

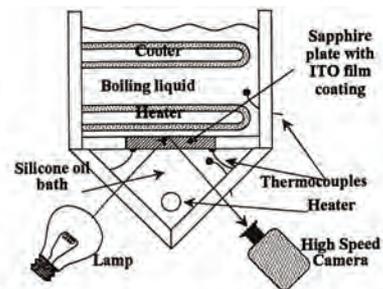


Fig.1 Experimental setup for observation of liquid-solid contact on horizontal flat plate.

図1 固液接触状況可視化装置[1]

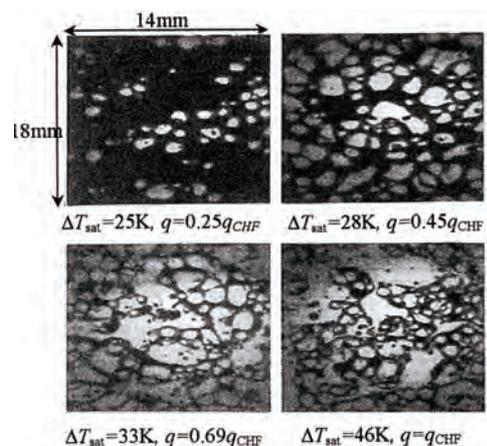


Fig.3 Typical pictures of liquid-solid contact of saturated ethanol on horizontal flat plate

図2 飽和エタノール沸騰時の固液接触状況[1]

ここで重要なことは，固液接触状況が CHF 点で drastic に変化するのではなく，過熱度の増大に伴い徐々に変化する点である。

これらの観察画像から，固液接触割合だけでなく，接触界線長さ密度（単位沸騰面積あたりの三相界線の長さ）や乾燥面直径分布を計測し，接触界線長さ密度の過熱度依存性が沸騰曲線に近いことを指摘した。つまり，接触界線長さ密度は CHF 点近傍で極大値をとった。このことから，接触界線長さ密度が沸騰熱伝達を記述する重要な量であると結論づけている。また，乾燥面直径分布の計測結果より，乾燥面数密度が滴状凝縮における液滴径分布での関係に近いことを指摘し，乾燥面の水平方向合体プロセスにより乾燥面直径分布が定まることを示唆した。

以上の観察・計測結果を基に高熱流束プール沸騰をモデル化した。詳細は論文[2]を参照頂くことにして，ここではごく定性的に概要のみ述べる。ある過熱度における熱流束を評価するために，接触界線長さ密度をモデル化により定式化する。得られた接触界線長さ密度に，Labuntsov らの研究成果から得られる「接触界線単位長さ当たりの伝熱量」を乗じて熱流束を評価する。

ある過熱度での接触界線長さ密度は，発泡点密度が既知であるとして，乾燥面の成長と合体プロセスおよび乾燥面があることによる失活する発泡点数を，滴状凝縮における液滴合体プロセスに関するモデル（滴径分布理論）を適用して定式化した（この定式化の部分は少々分かりにくい）。

このモデルによる計算結果の一例として，乾燥面直径分布の結果を図3に示す。

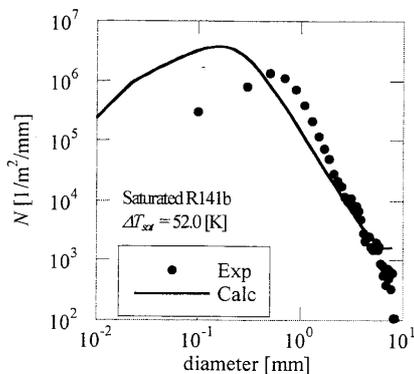


Fig.8 Calculated dry patch diameter distribution

図3 乾燥面直径分布の計算結果[2]

計算結果は計測結果とほぼ同様な傾向を示し，接触界線長さ密度を得る基となる乾燥面直径分布モデルの妥当性を示した。ただ残念ながら，最終結果である沸騰曲線に関しては，熱流束に明確なピークが現れていない（CHF 点が見えない）。接触界線近傍の伝熱量算出方法など，定量的な評価の面で課題が残されている。

### 3. 「西尾・田中モデル」へ至る経緯

以降，私見であるが，前述のモデルに至る経緯について述べたい。

ご承知の方も多いと思うが，西尾先生は 1990 年に独自に，沸騰の素過程とプール沸騰熱伝達の研究に関して，その到達点（何がなされて，何がどこまで明らかになったのか）と未解決点（何のどこが不明なのか）を取りまとめた資料[5]を作成した。この資料が素晴らしくかつ貴重なのは，単に過去の主要文献（といっても膨大な数になるが）を羅列・まとめたものではなく，沸騰という複雑な現象に対して1つの「捉え方」を提示し，その捉え方に立脚して到達点と未解決点をきれいに整理した点にある。ちなみに，先述の相変化研究会の場で，ある研究者の方から個人的に「沸騰の分野は数十年も研究をされていて，まだこんなこと（ほぼ完璧な CHF の沸騰モデル）すら分からないのですか」とお叱りの言葉を頂いたが，その要因の1つが，到達点と未解決点のコンセンサスを得ようとする努力が不足しているからではないかと感じた。現在進行中の相変化研究会の重要な役割の1つが，この整理をすることであると思う。

もう1つ，西尾先生の言葉の節々から感じたことは，甲藤先生の一連のプール沸騰 CHF に関する研究（1つの結論が原村・甲藤によるマクロ液膜消耗モデル）を大変高く評価していたことである。甲藤先生等は，まず現象の把握（＝観察）から始めて，そこで得られた描像を基に大胆な物理モデル（末葉の現象をカットして，最も重要と思われる現象にフォーカスした）を提案し，見事に成功している点である。

これらを背景として，まず西尾先生は，既存の知見（到達点）を用いて沸騰曲線全体がどの程度予測できるのかを検討した[3]。詳細は省くが，CHF 点～MHF 点までの遷移沸騰を含めて，ある程度は予測できることを確認したものの，高温面

での局所的濡れ発生のプロセスや、逆に熱流束の限界値 CHF が定まる要因の特定に課題を残した。そこで、甲藤先生の一連の研究のように、まずは沸騰面近傍の固液接触状況を可視化するところから研究を進めた（のだと思う）。

可視化の実験は、図1に示した装置と原理的には同じもので行った[4]。得られた画像は図2とほとんど同様のものではあった。当時筆者は博士課程在籍～中退後に福井大学着任の頃で、博士論文として成り立つかどうか瀬戸際のような状況であった。従来の研究成果が頭から抜けない筆者は、図2の観察画像から得られるものは、固液接触割合と乾燥面直径しか思い付かなく、それが計測されただけでは（西尾先生の言葉を借りれば）パンチが足りない。半年以上思い悩んだ頃に、西尾先生から提案されたのが、「接触界線長さ」の計測である。図4を用いて説明すると、それまでは固液接触面に関する諸量としては、乾燥面や固液接触面等の「面」に関する情報のみ扱っていた。それが沸騰熱伝達に直結すると考える研究例が多かった。しかし、図2のような動画を注意深く観察した西尾先生は、図4でいう「境界 boundary」に着眼し、それが沸騰熱伝達と密接な関連があるのではないかと感じ取ったのだと思う。そこからは、論文[4]に示したような各種結果が得られた。定常実験時には「接触界線長さ密度」の時間変動は小さくほぼ一定値であり、図5に示すように、その過熱度依存性が熱流束とほぼ等しく CHF 点近くで極大値を持つこと、等を報告した。この研究成果が西尾・田中モデルに結びついていったものとする。

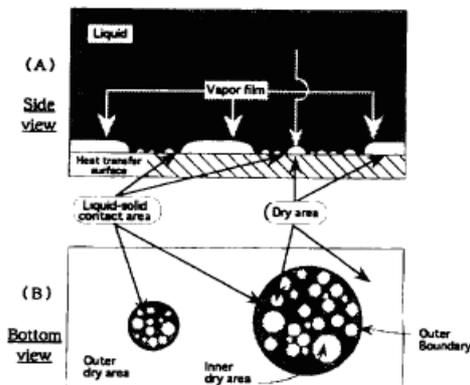


Fig.1 Terms relating to liquid-solid contact

図4 固液接触状況のポンチ絵[4]  
(固液接触割合と接触界線長さ密度の違い)

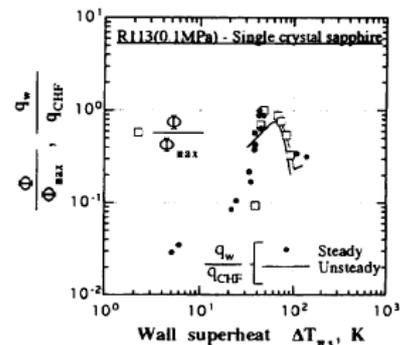


Fig.8 Contact-line length density

図5 沸騰曲線と接触界線長さ密度の関係[4]

#### 4. 「西尾・田中モデル」への評価

「西尾・田中モデル」は、2.で述べたように定量的には未完成な部分があり、他の研究者からも指摘されてきた。一方、つい先日国際伝熱会議の会場で、間もなく来日する J.Kim 教授から「スプレー冷却沸騰の観察実験を行ったが、沸騰面上の状況は正に Prof.Nishio が報告したものとほとんど同じだった。彼らが正しかった。」と聞かされた。筆者は「西尾・田中モデル」に関しての評価を直接的に聞いたのはこの程度であるが、その先行研究[4]に関する評価（問題点を含む）として次のような指摘を受けてきた。

- 得られた固液接触描像は、実験で用いた平滑表面（単結晶サファイア面）特有のものであり、通常金属面での沸騰現象は別ではないか？
- 接触界線の長さやその近傍の伝熱が重要と指摘しながら、接触界線のダイナミクスが考慮されていない。
- 「マクロ液膜モデルでは、explicit に表面濡れ性の影響が含まれていないから不足の点がある」と指摘しながら、接触界線長さ密度の伝熱モデルにも明確には濡れ性の影響が含まれていない。
- ある条件下では、合体気泡とその下部にマクロ液膜が存在する、という状況は観察されず、「接触界線長さ密度」の概念を支持する。

この研究結果[4]を初めて伝熱シンポで発表し、質疑応答時間が終わった休憩時間に、ある研究者が西尾先生と筆者に向かって「困るんだよね・・・こういう発表されると」とつぶやいたことが、未だに忘れられない（大方の評価はこの通りかも知

れない).

指摘された事項のほとんどは，筆者もその通りだと思う。つまり，「西尾・田中モデル」があらゆる条件下（あらゆる流体・圧力下で，あらゆる沸騰面種類で，任意の沸騰面表面条件下）で成り立つ汎用的なモデルであるとは思っていない。ある限られた条件下では，実験を行った本人としては正しいモデルと信じるが，少なくとも実験条件範囲外で正しいとは言い切れない。3.で少し述べたが，CHF プール沸騰モデルだけについて見ても，未だほぼ完璧なモデルと言えるものはなく，各モデルが正しい結果を表現する条件や範囲も明確にされていないと考える。そのためにも，到達点と未解決点のコンセンサスを得るまで，様々なデータを基に研究者間で議論を行う必要がある，と指摘して本稿を終えたい。

---

#### 参考文献

- [1] 西尾茂文，田中宏明，高熱流束プール沸騰における沸騰構造の可視化，日本機械学会論文集(B編)，**69-682** (2003)，1425.
- [2] 田中宏明，西尾茂文，高熱流束沸騰の固液接触構造のモデル化，日本機械学会論文集(B編)，**69-683** (2003)，1659.
- [3] 西尾茂文，永井二郎，飽和プール沸騰における沸騰曲線予測の試み，日本機械学会論文集(B編)，**58-549** (1992)，1490.
- [4] 永井二郎，西尾茂文，沸騰熱伝達における固液接触現象（接触界線長さ密度の概念の提案），日本機械学会論文集(B編)，**63-610** (1997)，2104.
- [5] 西尾茂文，沸騰熱伝達の基本構造と冷却制御工学への応用，生研セミナーテキスト，コース 159 (1990).

原村・甲藤の限界熱流束モデルの概要とその特長  
 Outline and Merits of Haramura and Katto's model for Critical Heat Flux

原村 嘉彦 (神奈川大学)  
 Yoshihiko HARAMURA (Kanagawa University)  
 e-mail: haramy01@kanagawa-u.ac.jp

1. はじめに

本稿では，Haramura と Katto[1]による限界熱流束モデル（原村・甲藤のモデル）の概要を示し，その特長を解説する。

原村・甲藤のモデルの根幹は，限界液膜厚さの概念である．核沸騰している伝熱面上では，発泡点から発生する蒸気が流れ出す小さな流路（蒸気茎）の気液界面にはヘルムホルツ不安定が発生し，その結果，伝熱面に接して存在できる液の厚さが，限界値

$$\delta_c = \frac{\pi}{2} \frac{\sigma(\rho_l + \rho_g)}{\rho_l \rho_g} \left( \frac{A_v}{A_w} \right)^2 \left( \frac{\rho_g \Delta h_v}{q} \right)^2 \quad (1)$$

までに制限されるという考え方である．

限界液膜厚さは，熱流束が増加すると急速に減少する傾向を示す．第2節では，そのような傾向を持つ限界液膜厚さを想定した状況下で限界熱流束を与える条件と最終的に限界熱流束を与える式を紹介する．次に第3節で，限界液膜厚さがどのような概念であるか，またそれをどのように定量的に与えたかを示す．最後に第4節で，与えられた限界液膜厚さと，液膜に相当すると考えられる液に富んだ層（通常，マクロ液膜と呼ばれる．）の厚さの測定値との関係を示す．

主な記号

- $A_v$ : 蒸気茎総面積,  $m^2$
- $A_w$ : 伝熱面面積,  $m^2$
- $g$ : 重力加速度,  $m/s^2$
- $q, q_c$ : 熱流束, 限界熱流束,  $W/m^2$
- $\Delta h_v$ : 蒸発潜熱,  $J/kg$
- $\delta_c$ : 限界液膜厚さ,  $m$
- $\rho_g, \rho_l$ : 蒸気密度, 液密度,  $kg/m^3$
- $\pi$ : 円周率

- $\sigma$ : 表面張力,  $N/m$
- $\tau_d$ : 気泡塊滞留時間,  $s$

2. さまざまな系に対する限界熱流束

2.1 上向き水平平板上のプール沸騰

十分広い水平上向き面（水平無限平板）におけるプール沸騰に対しては，図1のように，一定な間隔ごとに生じる気泡塊の滞留時間を成長しながら上昇する運動から定め，気泡塊生成初期にできた厚さ  $\delta_c$  の液膜が滞留時間  $\tau_d$  でちょうど乾燥する条件

$$\tau_d q_c A_w = \rho_l \delta_c (A_w - A_v) \Delta h_v \quad (2)$$

から限界熱流束  $q_c$  を求め，

$$\frac{q_c}{\rho_g \Delta h_v} \left/ \left[ \frac{\sigma g (\rho_l - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{1/4} \right. = func \left( \frac{A_v}{A_w}, \frac{\rho_g}{\rho_l} \right) \quad (3)$$

$$func \left( \frac{A_v}{A_w}, \frac{\rho_g}{\rho_l} \right) = \left( \frac{\pi^4}{2^{11} g^2} \right)^{1/6} \left( \frac{A_v}{A_w} \right)^{5/8} \left( 1 - \frac{A_v}{A_w} \right)^{5/16} \times \left[ \left( \frac{\rho_l}{\rho_g} + 1 \right) / \left( \frac{11}{16} \frac{\rho_l}{\rho_g} + 1 \right) \right]^{3/5} \quad (4)$$

を得ている．ここで限界液膜厚さ  $\delta_c$  には式(1)を使い，気泡塊滞留時間は，以下のように定める．

気泡塊は，テラー不安定の最危険波長（式(5)の{ }内）を一辺とした正方形部分から供給される蒸気によって一定体積成長速度

$$v_1 = \frac{q}{\rho_g \Delta h_v} \left\{ \sqrt{3} \times 2\pi \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_g)}} \right\}^2 \quad (5)$$

で成長するとし，気泡の浮上に関する運動方程式

$$\frac{d}{dt} \left[ \left( \frac{11}{16} \rho_l + \rho_g \right) V \frac{ds}{dt} \right] = (\rho_l - \rho_g) V g \quad (6)$$

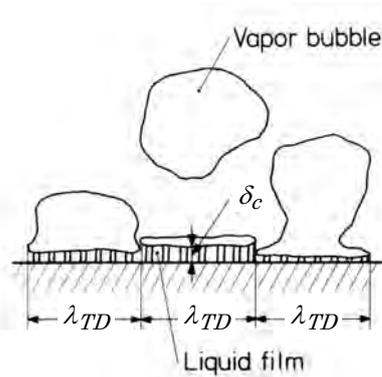


Fig. 1. Pool boiling at high heat fluxes on a horizontal, infinite plate.

において気泡体積を  $V = v_1 t$  と仮定し，初期条件  $t=0$  で  $s=0, ds/dt=0$  のもとに解き，離脱条件  $t = \tau_d$  で  $\frac{4\pi}{3}s^3 = v_1 \tau_d$  (気泡底面が原点に来るまで上昇する) を課して以下を得る。

$$\tau_d = \left(\frac{3}{4\pi}\right)^{\frac{1}{5}} \left[ \frac{4 \left(\frac{11}{16} \rho_l + \rho_g\right)}{g(\rho_l - \rho_g)} \right]^{\frac{3}{5}} \frac{1}{v_1^{\frac{1}{5}}} \quad (7)$$

小さな水平上向き面に対しては，周囲からの流入があり，無限平板に比べて限界熱流束が上昇することが自然であるとしている。

## 2.2 水平円柱上のプール沸騰

水平円柱面上のプール沸騰に対して，気泡塊の間隔 (1つの気泡塊の成長に関する伝熱面積を決定する) に関して，周方向の曲率の影響を

$$\lambda'_{TD} = \lambda_{TD} / \sqrt{1 + \frac{2\sigma}{d^2 g(\rho_l - \rho_g)}} \quad (8)$$

のように考慮して，限界熱流束を

$$\frac{q_c}{q_{c,Z}} = \left(\frac{\sqrt{3}}{R'}\right)^{\frac{1}{16}} \left[ 1 + \frac{1}{2(R')^2} \right]^{\frac{1}{32}} \quad (9)$$

と与えている。ただし  $R' = (d/2) / [\sigma / g(\rho_l - \rho_g)]^{1/2}$  であり， $q_{c,Z}$  は式(15)の  $q_c$  で与えられる。

式(9)は，図2に示すように，実験結果に比べてやや変化が小さいものの，伝熱面径が小さくなるにつれて限界熱流束が上昇する傾向を与える。

## 2.3 短い面上の強制流動沸騰

液体流に平行に置かれた長さ  $l$  の短い伝熱面に対する強制流動沸騰に関して，伝熱面を覆うよう

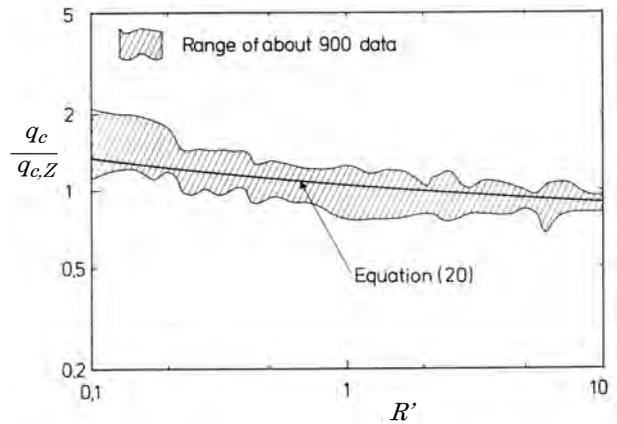


Fig. 2. Critical heat flux in pool boiling for horizontal cylinders.

に気泡塊が形成して伝熱面への液の流入を障害し，前縁から限界厚さで液体が流入すると仮定して，この液が下流端でちょうど蒸発し尽くす条件

$$q_c l = \rho_l \Delta h_v u \delta_c \quad (10)$$

から限界熱流束を

$$\frac{q_c}{\rho_l \Delta h_v u} = 0.175 \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.467} \left(1 + \frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\sigma}{\rho_l u^2 l}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

と与えている。ここで  $\delta_c$  は式(16)を利用している。

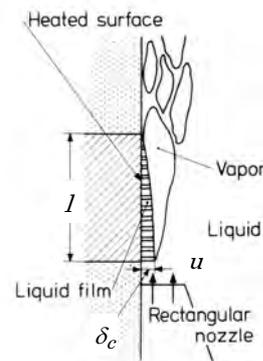


Fig. 3. Forced convection boiling at high heat fluxes on a flat plate in a parallel flow.

## 2.4 上向き流中に置かれた水平円柱面

続報[2]では，一様な上昇流中に置かれた水平円柱面上の限界熱流束を，蒸気の離脱様相が周期的でプール沸騰に近い状況と，蒸気がシート状に定期的に離脱する状況とに分類して求めている。前者では，蒸気塊の運動方程式(6)に流れの影響を加

えて滞留時間を定め，限界熱流束に対して速度の弱い関数を求めている．一方後者では，2.3節と同様に，前方よどみ点から厚さ $\delta_c$ の液膜内に主流速度 $u$ で液が供給され，後方よどみ点でちょうど乾燥する条件から限界熱流束を決定し，限界熱流束が流速の1/3乗に比例する式を求めている．

### 2.5 円管内のサブクール強制流動沸騰

Katto[3]は，低クオリティ領域における管内の強制流動沸騰では，発生気泡が管壁近くに集中していることに着目して，この気泡底部に厚さ $\delta_c$ の液膜が形成され，気泡塊に長時間覆われるとこれが乾燥して限界熱流束に至るという考えを示している．限界熱流束は，速さ $U_B$ で流れている長さ $L_B$ の気泡が伝熱面上を通過する時間 $L_B/U_B$ で，厚さ $\delta_c$ の液膜がちょうど乾燥することをその条件として

$$q_c(L_B/U_B) = \delta_c \rho_l \Delta h_v \quad (12)$$

で与える．ここで $L_B$ は， $U_B$ で流れる気相とほぼ静止している液相の間のヘルムホルツ不安定から決まる． $U_B$ は，管内（均質流とする）の一般速度分布をもとに壁から $\delta_c$ の距離における速度を求め，それに以下の係数 $k$ を掛けたものとして定める． $k$ は，次報[4]でボイド率 $\alpha$ の関数として

$$k = \frac{242[1 + K_1(0.355 - \alpha)][1 + K_2(0.100 - \alpha)]}{[0.0197 + (\rho_g/\rho_l)^{0.733}][1 + 90.3(\rho_g/\rho_l)^{3.68}]} \times Re^{-0.8} \quad (13)$$

と与えている．ここに， $\alpha > 0.355$ のとき $K_1 = 0$ ， $\alpha < 0.355$ のとき $K_1 = 3.76$ ， $\alpha > 0.100$ のとき $K_2 = 0$ ， $\alpha < 0.100$ のとき $K_2 = 2.62$ である．

### 2.6 原村・甲藤のモデルの優位点

原村・甲藤のモデルの優位点として，2点が挙げられる．第1に，プール沸騰の限界熱流束が式(3)，(4)で与えられ，限界熱流束の特性を表す形をしていることである．第2は，プール沸騰だけでなく，強制流動沸騰に対しても適用可能な限界液膜厚さの概念を導入していることである．

### 3. 限界液膜厚さ

伝熱面に向かって速度 $u_l$ で流れる液と伝熱面から離れる向きに $u_v$ で流れる蒸気との界面では，ヘルムホルツ不安定が生じ，その臨界波長は

$$\lambda_H = \frac{2\pi\sigma(\rho_l + \rho_g)}{\rho_g \rho_l (u_v + u_l)^2} \quad (14)$$

と表される．界面に $\lambda_H$ より波長の長い波が存在すれば界面は不安定になるので， $\lambda_H$ より長い波が存在できないように界面の長さは短く抑えられる．その結果，隣接する発泡点からの蒸气流路は接合して気泡塊が形成され，その底部に厚さ $\delta_c$ の液が残される．これは，限界熱流束に限らず，高熱流束核沸騰（干渉域）で一般に生じる状況である．論文[1]では， $\delta_c = (1/4)\lambda_H$ ， $u_l = u_v$ として式(1)が導かれている．なお，最終的にはプール沸騰の限界熱流束を表すように定数を定めているので，1/4は式(16)の $\delta_c$ に影響を与えない．

また，「液膜」という表現を使っているため，きれいな膜を想像する人も多いが，形成の状況を考えて，隣接した気泡が接合したときに生じる，かなりでこぼこがあり，しかも中心に乾燥部を持つ発泡点が多数存在している液を想定すべきであることを付記しておく．

上向き無限平板上のプール沸騰限界熱流束は

$$\frac{q_c}{\rho_g \Delta h_v} \left/ \left[ \frac{\sigma g (\rho_l - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{1/4} \right. = 0.131 \quad (15)$$

と与えられる．これを満たすように式(4)の右辺を定め， $\rho_g = \rho_l$ の場合の $\rho_g/\rho_l$ と $A_v/A_w$ の関係をを用いて，限界液膜厚さ $\delta_c$ は以下で表される．

$$\frac{\delta_c (q/\Delta h_v)^2}{\sigma \rho_g} = 0.00536 \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.4} \left( 1 + \frac{\rho_g}{\rho_l} \right) \quad (16)$$

### 4. 限界液膜厚さとその実測値との関係

式(16)が与える限界液膜厚さは，実測値に比べ薄いという批判があった．原村[5]は，限界液膜厚さと気泡滞留時間が統計的に分布することを考慮すれば，図4のように実験値に合致する式(16)の2倍の限界液膜厚さ(図の破線)を仮定して，式(15)の限界熱流束が与えられることを示している．以下，この考えを簡単に説明する．

まず，以下の仮定に基づいて過熱度に対する時間平均熱流束を計算する．

- (i) マクロ液膜の初期厚さと気泡塊滞留時間が正規分布を持つ．
- (ii) 気泡塊離脱後，直ちに次の気泡塊が形成し，平

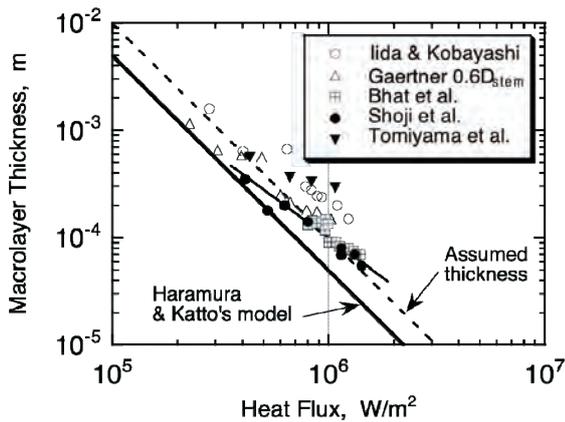


Fig. 4. Measured and predicted thickness of Macrolayer

均的に式(16)の2倍の厚さマクロ液膜が形成される。

- (iii) マクロ液膜が存在する間は，一定の核沸騰熱流束で液膜が消耗して気泡塊の体積が一定速度で変化し，乾燥すると蒸発が止まりその時点の体積が維持される。
- (iv) 気泡塊の運動は式(6)で与えられる。
- (v) 核沸騰熱流束は，過熱度の3乗に比例する

その結果は，図5に例示するように，平均値に対する標準偏差の値が増加すると，限界熱流束点近傍で丸みを帯びた特性になり，標準偏差の増加とともに限界熱流束が減少する。ここで， $\bar{\tau}_E$  はマクロ液膜厚さを，指定した過熱度に対する熱流束で蒸発するのに要する時間で表したものの平均， $\bar{\tau}_H$  は気泡塊滞留時間の平均であり， $\sigma_E$ ， $\sigma_H$  はそれぞれの標準偏差を表す。結局，限界液膜厚さを2倍にしても， $\sigma_E/\bar{\tau}_E = \sigma_H/\bar{\tau}_H = 0.38$  (式(15)の右辺を0.149とする $q_c$ を得るには0.16)の分布幅があればよいことを示した。また $\sigma_E/\bar{\tau}_E = \sigma_H/\bar{\tau}_H = 0.2 \sim 0.4$  に対応する乾燥時間割合を6~14%と計算している。

なお，上記の検討において，正規分布のほか対数正規分布など合計4つの分布関数について調べて，分布関数の形が結果にほとんど影響を与えないことを確認している。また，気泡の体積成長速

度の変化についても核沸騰熱流束が離脱まで継続する場合と平均熱流束で離脱まで継続する場合について調べ，限界熱流束が $\sigma_E/\bar{\tau}_E$ と $\sigma_H/\bar{\tau}_H$ だけで定まること，これらの影響が加算的に生じることを確認している。

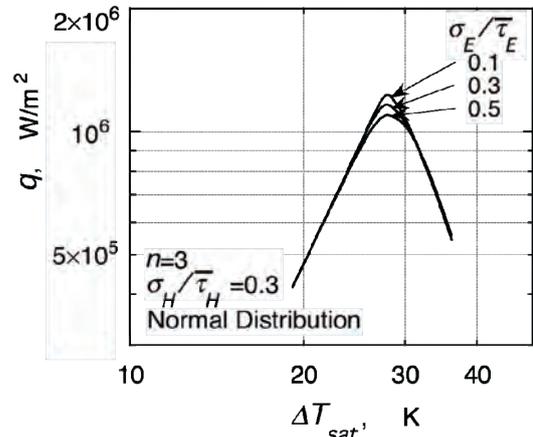


Fig. 5. Effect of variance of macrolayer thickness

#### 参考文献

- [1] Haramura, Y. and Katto, Y., A new hydrodynamic model of critical heat flux, applicable widely to both pool and forced convection boiling on submerged bodies in saturated liquids, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **26** (1983) 389.
- [2] Katto, Y. and Haramura, Y., Critical hat flux on a uniformly heated horizontal cylinder in an upward cross flow of saturated liquid, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **26** (1983) 1199.
- [3] Katto, Y., A physical approach to critical heat flux of subcooled flow boiling in round tubes, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **33** (1990) 611.
- [4] Katto, Y., Prediction of critical heat flux of subcooled flow boiling in round tubes, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **33** (1990) 1921.
- [5] 原村，マクロ液膜乾燥を原因とする限界熱流束モデルへの統計的手法の導入，日本機械学会論文集B編，**64** (1998) 1839.

プール沸騰における限界熱流束機構  
Critical heat flux mechanism in pool boiling

坂下 弘人 (北海道大学)  
Hiroto SAKASHITA (Hokkaido University)  
e-mail: saka@eng.hokudai.ac.jp

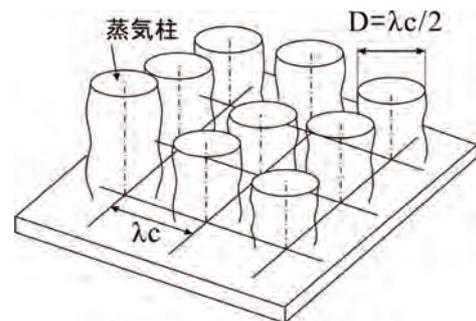
1. はじめに

1934年、「金属面と沸騰水との間の伝達熱の極大値並びに極小値決定の実験」と題する論文が、東北帝国大学の拔山博士によって機械学会誌に発表された[1]。沸騰には、除熱限界である限界熱流束 (Critical Heat Flux: CHF) が存在することを世界で初めて明らかにした画期的な論文である。この研究以降、CHFに関して膨大な研究が行われ、数多くの物理モデルが提案されてきた。しかし、拔山博士による発見以来 3/4 世紀以上たった現在でもCHF発生機構の詳細は明らかになっていない。

本稿では、筆者らがこれまでに行った研究の中から、(1)上向き面のサブクール沸騰、(2)下向き傾斜面の飽和沸騰、(3)二成分混合液の飽和沸騰、の各実験で得られた結果を順に紹介する。これら3種類の沸騰は、CHFを人為的に変化させることができるという特徴を持っている。このような異なる体系のCHFの特徴を、どのようなCHF機構を想定すれば矛盾無く説明できるのか、そのようなCHF機構が存在するならば、それは真のCHF発生機構にかなり近いのではないかと、このあたりを検討することが本稿の目的である。ただし、表題にあるとおり沸騰体系はプール沸騰に限定させていただく。

2. 既存の CHF モデル

はじめに、これまでどのようなモデルが提案されてきたのかを簡単に紹介する。ただし紙面の都合上、幾つかの代表的なモデルに限定させていただく。おそらく最も有名なモデルは、Zuber[2]によって提案された「流体力学的不安定モデル」であろう。このモデルは、CHF近傍の沸騰様相を図1のように交互に並んだ蒸気柱に近似し、蒸気柱界面での気液の相対速度が限界に達すると界面が不安定になり蒸気の脱出が阻害されるためにCHFを生じると考える。一方、Katto and Yokoya[3]



λc : テイラー不安定波長

図1 Zuber の流体力学的不安定モデル

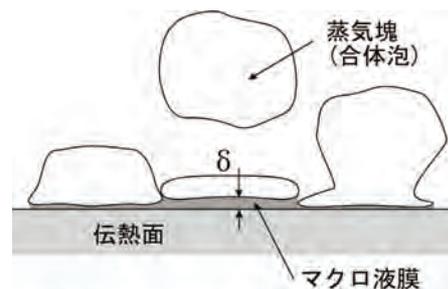


図2 Katto and Yokoya よるマクロ液膜蒸発モデル

は、一連の実験事実を積み重ね、Zuberとは全く異なるCHF機構を提案した。図2に示すように、伝熱面上に形成される大きな蒸気塊の下には薄い液膜(一次気泡の下に形成されるごく薄い液膜(マイクロ液膜)と区別するため、マクロ液膜と呼ばれる)があり、蒸気塊の滞留中にこの液膜が乾くことによりCHFを生じる、とするものである。このアイデアは、その後Haramura and Katto[4]によってモデル化され、以降「マクロ液膜蒸発モデル」と呼ばれることになる。Unalら[5]は、伝熱面上に現れる部分乾燥領域の温度がある限界を超えると固・液接触を維持できなくなりCHFが発生する、とする「固・液接触限界モデル」を提案している。このモデルと類似のものとして、Theofanousら[6]は、伝熱面上にランダムに発生する気泡底部の乾き部分の温度が非可逆的に上昇する状況が出現す

ると CHF を引き起こす，とするモデルを提案している．この他，適用範囲は垂直から下向き傾斜面に限定されるが，Mudawar [7]は，波状界面を持つ蒸気層がその谷の部分のみを伝熱面と接しながら移動すると考え，伝熱面最前縁の谷の部分が伝熱面から離れると面全体のドライアウトを引き起こし CHF が発生する，とした「Interfacial lift-off model」を提案している．

以上のモデルでは，想定する CHF 発生機構は異なるものの，CHF を引き起こす“トリガ”が存在すると考える点では共通である．従って，（そのような測定が実際に可能か否かは別として）そのトリガを捉えることができれば CHF の発生（あるいはその予兆）を検知できることになる．

一方，核沸騰から遷移沸騰にかけて沸騰は連続した事象であり，CHF 点は沸騰曲線の単なる極大値に過ぎない，と考えるモデルがある．このモデルでは，伝熱面過熱度の増大は，気泡発生点数，気泡の成長速度や離脱頻度，蒸発量の増大，などによって伝熱の促進をもたらす一方で，伝熱面上の乾燥領域の拡大による伝熱劣化の進行を同時にもたらすため，自然と沸騰曲線に極大値が現れる，と考える．このモデルは，核沸騰から遷移沸騰にかけての熱伝達の変化を予測することで CHF 点を特定することになるため，沸騰曲線モデルあるいは沸騰伝熱モデルと見なすこともできる．この種のモデルとして，Dhir and Liaw の「定常蒸気柱モデル」[8]，Nishio らの「3 相境界線モデル」[9]，趙らの「マイクロ液膜蒸発モデル」[10]，などが知られている．これらのモデルでは，CHF の発生にトリガを必要とするモデルとは異なり，CHF 点前後で気液挙動に変化は現れないことになる．

### 3. 上向き面のサブクール沸騰 CHF [11, 12]

#### 3.1 サブクール沸騰 CHF の特徴

3 章以降では，筆者らが行った実験結果を順に紹介させていただく．まず，一連の研究を始めるきっかけとなったサブクール沸騰の CHF から述べることにする．液を飽和温度以下のサブクール状態にすると，サブクール度の増加とともに CHF が増大することは良く知られている．一例として，図 3 に上向き面で測定された CHF を示すが，いずれの測定結果もサブクール度の増加とともに CHF はほぼ直線的に増大する．

一方，図 4 は直径 8mm の上向き面での CHF 近傍の沸騰様相であり，図 4(a)が飽和沸騰，図 4(b)がサブクール度 40K でのサブクール沸騰である．図 4(b)のサブクール沸騰で蒸気塊が多少小さくなっている点を除くと，両者の沸騰概観は差が無いように見える．（図 4(a)，(b)とも伝熱面は完全に蒸気塊に覆われている．この蒸気塊は，飽和沸騰，サブクール沸騰の場合とも，25～40ms 程度の周期で形成と離脱を繰り返す）．しかし，図 3 から分かるように，サブクール度 40K の CHF は飽和沸騰の値の 2 倍以上に促進される．沸騰概観に差が無いにも関わらず CHF が促進されるからには，伝熱面ごく近傍の気液構造に何らかの変化が生じているはずであり，この点を明らかにできれば，CHF

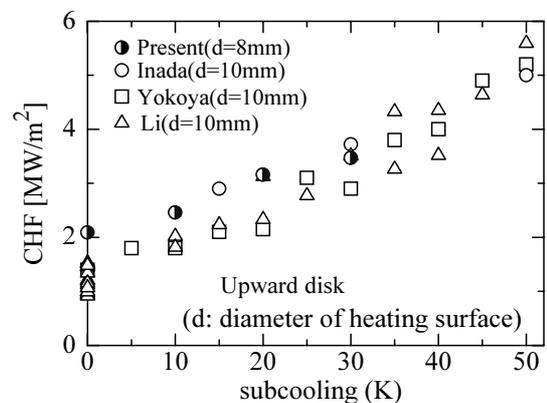
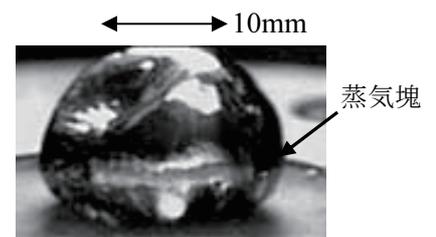
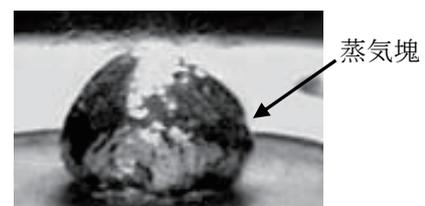


図 3 CHF のサブクール度による変化（上向き面）



$\Delta T_{\text{sub}}=0\text{K}$ 、 $q=1.5\text{MW/m}^2$

(a)飽和沸騰



$\Delta T_{\text{sub}}=40\text{K}$ 、 $q=5\text{MW/m}^2$

(b)サブクール沸騰

図 4 飽和沸騰とサブクール沸騰における CHF 近傍の沸騰様相

機構を解明する手がかりを得られると考え、次節で述べる実験に着手した。

### 3.2 気液挙動測定用実験装置

図5が、伝熱面近傍の気液挙動測定に用いた実験装置である。大気圧の水の沸騰を対象とし、体系は上向き面とした。伝熱面は円錐状銅ブロック上端面で、高サブクール度でも図4(b)のように単一の蒸気塊が規則的に形成されるように直径は8mmとやや小さくしている。気液挙動の測定には導電プローブ法を用いた。プローブの先端は数 $\mu\text{m}$ まで細く仕上げてあり、プローブの位置精度はおよそ $1\mu\text{m}$ と非常に高精度である。このプローブが、図5のプローブA（以下、移動プローブ）であり、移動精度 $0.5\mu\text{m}$ の3次元微動ステージに連結されている。プローブB（以下、固定プローブ）は、蒸気塊の信号のみを捕らえるために、伝熱面から約4mmの高さに先端が来るように横向きに設置されている。プローブと伝熱面間には24kHzの交流を印加して、その電圧変化を測定した。

### 3.3 蒸気塊下の気液構造

移動プローブを伝熱面中央に設置し、伝熱面からの高さ $h$ を変えて測定すると、図6に示す信号が得られる。各図で、上の信号(黒色)はプローブからの生の信号であり、高電圧がプローブと蒸気の接触、低電圧はプローブと液の接触を示している。下の信号(青色)は、最大電圧の8割の閾値で2値化した信号である。プローブが伝熱面から離れた $h=1.011\text{mm}$ で見られる幅の広い信号が蒸気塊の信号である。プローブが伝熱面に近づくと蒸気

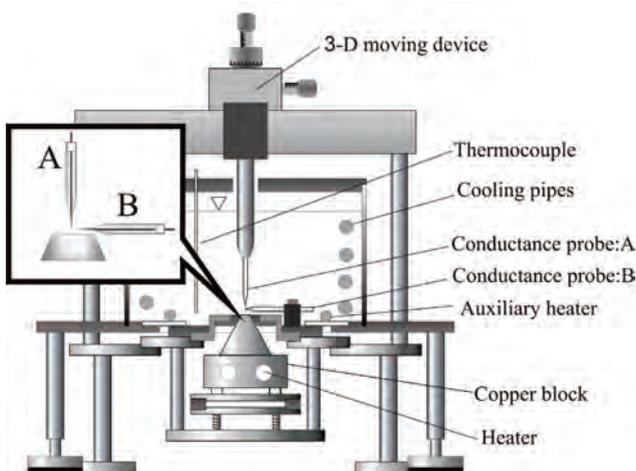
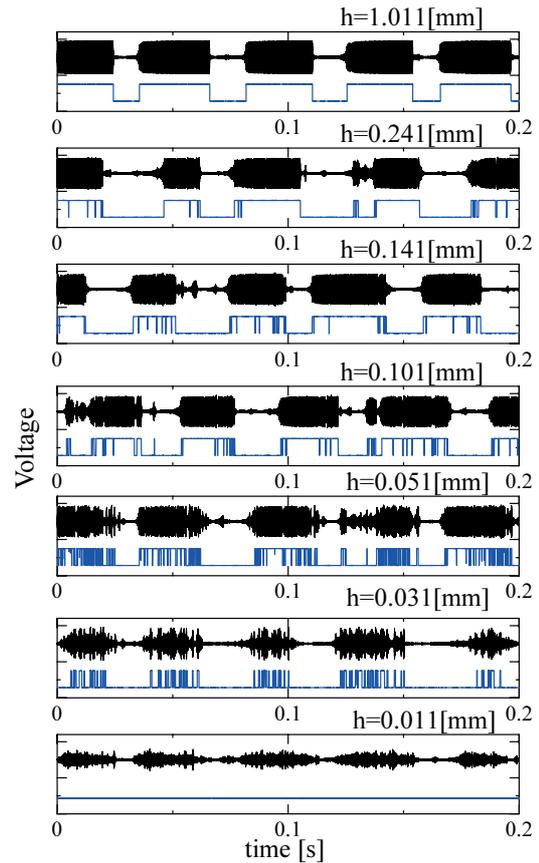


図5 気液挙動測定用実験装置



upper : probe signal lower : digitized probe signal  
図6 伝熱面から各高さでのプローブ信号

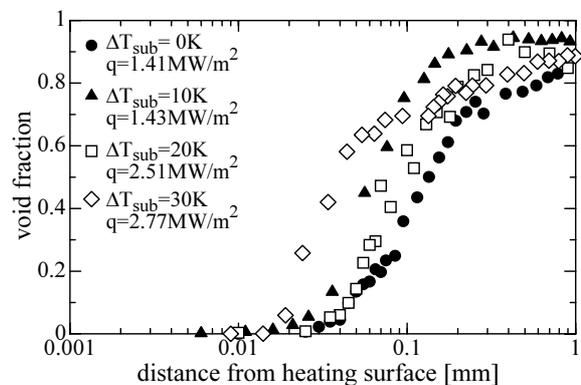


図7 時間平均ボイド率分布

塊信号に亀裂を生じ始め( $h=0.141\text{mm}$ )、さらに伝熱面に近づくと幅の広い信号は消滅し、微細な信号が集合した形態をとる( $h=0.051\text{mm}$ ,  $0.031\text{mm}$ )。そして伝熱面から $h=0.011\text{mm}$ では、液のみを示す低電圧信号となっている。図7は、プローブ信号を時間平均して得られる時間平均ボイド率の高さ方向分布である。どのサブクール度でも、ボイド率は伝熱面に近づくとつれて0まで低下している。以上の測定から、伝熱面とその上部の蒸気塊の

間には気液が混在した液に富む領域が存在し，伝熱面上は常に液に覆われていることが分かる．このように，蒸気塊の下には明瞭な界面を持つ，いわゆる“液膜”が存在しているわけではないが，慣例に従って蒸気塊の下に存在する液に富む領域を，“マクロ液膜”と呼ぶことにする．

図8は，マクロ液膜の厚さを特定し，サブクール度ごとにプロットした結果である．マクロ液膜厚さの特定法の詳細は参考文献[11]に譲るが，各位置で取得したプローブ信号から蒸気塊に対応する信号が消滅する位置を特定し，伝熱面から信号消滅位置までをマクロ液膜とした．図6の信号に見られるように蒸気塊底部の変動により液膜厚さも変動することになる．図8中の各記号は，最も形成頻度の高いマクロ液膜の厚さであり，付随する縦棒の両端が変動するマクロ液膜厚さの最大値と最小値である．なお，サブクール沸騰では，ある熱流束以下のデータは示していないが，これはサブクール沸騰では凝縮効果のため，熱流束がこれ以上高くなければ伝熱面を覆う蒸気塊（したがって，その下のマクロ液膜）が形成されないことによる．図中の直線は，過去に飽和沸騰で提案されているマクロ液膜厚さの式であり，それぞれ次式で与えられる．

(a) Haramura and Katto [4] :

$$\delta = 0.00535 \frac{\sigma}{\rho_v} \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.4} \left( 1 + \frac{\rho_v}{\rho_l} \right) \left( \frac{\rho_v H_{fg}}{q} \right)^2 \quad (1)$$

(b) Bhat, et al.[13] :

$$\delta = 1.585 \times 10^5 q^{-1.527} \quad (\text{液体は水}) \quad (2)$$

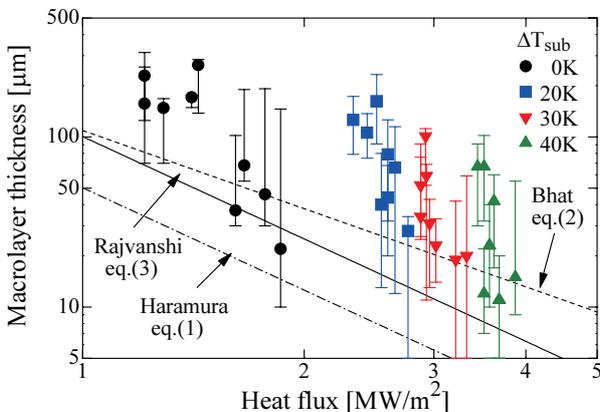


図8 飽和およびサブクール沸騰で蒸気塊下に形成されるマクロ液膜厚さ

(c) Rajvanshi et al.[14] :

$$\delta = 0.0107 \frac{\sigma}{\rho_v} \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0.4} \left( 1 + \frac{\rho_v}{\rho_l} \right) \left( \frac{\rho_v H_{fg}}{q} \right)^2 \quad (3)$$

式(1)~(3)で， $\delta$ がマクロ液膜厚さである．飽和沸騰を対象とした式(1)~(3)は，いずれもマクロ液膜厚さは熱流束の“べき乗”で薄くなる傾向を予測する．図8の飽和沸騰の結果はこれらの式と類似の傾向を示しているが，サブクール沸騰のマクロ液膜厚さは，飽和沸騰のデータの外挿上にはなく，サブクール度ごとに異なる傾向を示している．特に，蒸気塊が形成され始める熱流束（この熱流束は飽和沸騰のCHFを遥かに超えている）で形成されるマクロ液膜厚さは，飽和沸騰のデータの高熱流束域への外挿値より遥かに厚い．

### 3.4 伝熱面のドライアウト挙動

#### 3.4.1 導電プローブによるドライアウトの検出

前節で，サブクール沸騰では，飽和沸騰のCHFを超える高熱流束でも伝熱面は常に液で覆われていることを示した．本節では，さらに熱流束を高くした CHF 近傍で伝熱面上にどのような変化が現れるかを述べる．その前に，本実験で用いた導電プローブの特性について示しておく．

図9は，導電プローブを大気中から静止水中に押し下げたとき（また，水中から大気中に押し上げたとき）の，プローブからの出力電圧特性である．距離 0mm が，プローブ先端と水面が接触した位置を示す．図より，プローブ先端が液に接触した瞬間に電圧が 1/2 程度まで急減し，プローブ先端が水面より深く進入するにつれて電圧は降下

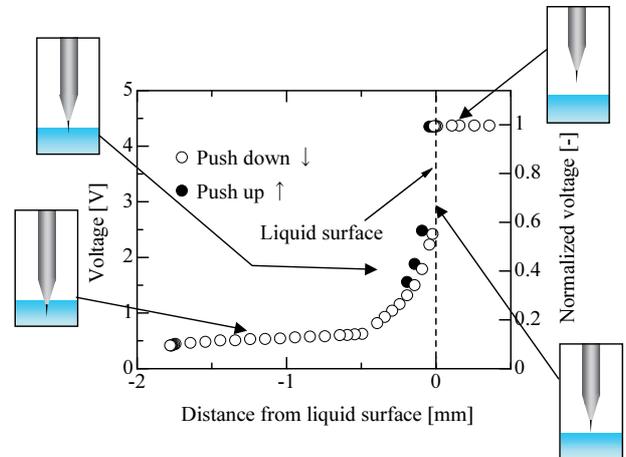
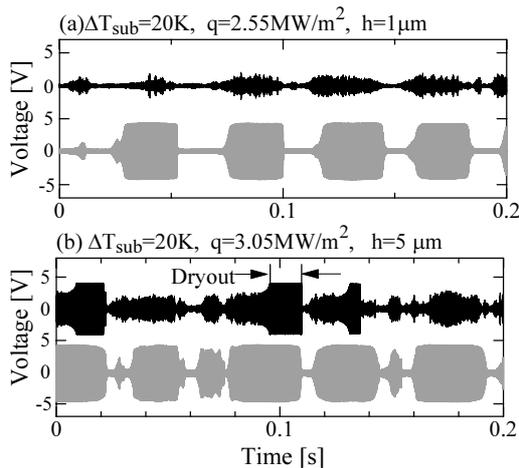


図9 プローブの特性



(Upper signal: moving probe. Lower signal: fixed probe.)

図10 核沸騰高熱流束域(a)とCHF近傍(b)で得られるプローブ信号

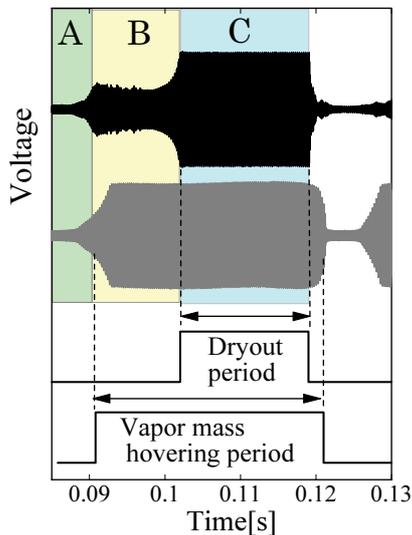


図11 ドライアウトを検出した信号における3つの特徴的な領域

し、0.4mm程度進入すると以降の電圧はほぼ一定値を取る。本実験で使用したプローブは絶縁被覆を施していないこと、および先端部が非常に細くこの部分の感度が極めて鋭敏であることから、図9のような特性を示すことになる。この特性を念頭に置いて、以下の結果を見ていただきたい。

図10は、プローブを伝熱面のごく近傍に設置した場合に、核沸騰高熱流束領域 ( $q/q_{CHF}=81\%$ ) で得られる信号(a)と、CHF近傍 ( $q/q_{CHF}=97\%$ ) で得られる信号(b)である。各図において、上段(黒色)は伝熱面のごく近傍に設置した移動プローブの信号、下段(灰色)は固定プローブによる蒸気塊の信号である。移動プローブの信号は、核沸騰高熱

流束域の図10-(a)では電圧が全体的に低く、伝熱面が液で覆われていることを示している。一方、CHF近傍の図10-(b)では、固定プローブの信号と比較すると分かるように蒸気塊滞留期間の後半で電圧が高くなる信号が現れている。

図11は、このような信号を蒸気塊一周分だけ抽出して示したものである。信号は、出力電圧の違いに応じて3つの時間領域(A, B, C領域)に分けられる。この3領域の状況を図9で示した導電プローブの特性との対応から類推すると、A領域(低電圧領域)は触針全体が液に覆われている状況を、B領域(中間電圧領域)は触針先端部が液に覆われており残りの部分が蒸気塊中の蒸気に覆われている状況を、C領域(高電圧領域)は触針全体が蒸気に覆われている状況に対応する。C領域を含む信号がCHFのごく近傍でのみ出現することを考え合わせると、この信号は壁面のドライアウトを検出したものと考えるのが自然であり、A領域の時間幅は先行蒸気塊の離脱から次の蒸気塊形成までの“待ち時間”を、B領域の時間幅は蒸気塊下の“マクロ液膜存在期間”を、C領域の時間幅は“壁面ドライアウト期間”を示すものとみなすことができる。

以上、CHF近傍では、伝熱面の濡れと乾きが時間的にランダムに生じているのではなく、先行蒸気塊の離脱→周囲液体の流入→蒸気塊とその下のマクロ液膜の形成→マクロ液膜の消耗による壁面のドライアウト、の一連の挙動が繰り返されていることが判明した。

### 3.4.2 ドライアウトの2次元分布

図10,11では、伝熱面中央の固定した1点におけるドライアウト挙動を示したが、ドライアウトの伝熱面上2次元分布の測定結果を図12に示す。この図は、伝熱面中央部の1mm×1mmの領域内の121点で測定を行い、各測定点で、全測定時間に対する壁面ドライアウトの時間割合(ドライアウトボイド率)を求めて、2次元分布図を作成した結果である。図12(a)のドライアウトが発生し始める  $q=2.97\text{MW/m}^2$  ( $q/q_{CHF}=94\%$ ) では、局所的なドライアウトの発生が見られるが、ドライアウトボイド率は最大でも1.5%であり、ほぼ全域が常時液に覆われている。この状態からわずかに熱流束を上げた図12(b)の  $q=3.01\text{MW/m}^2$  ( $q/q_{CHF}=95\%$ ) では、ドライアウトが発生する領域は急激に拡大

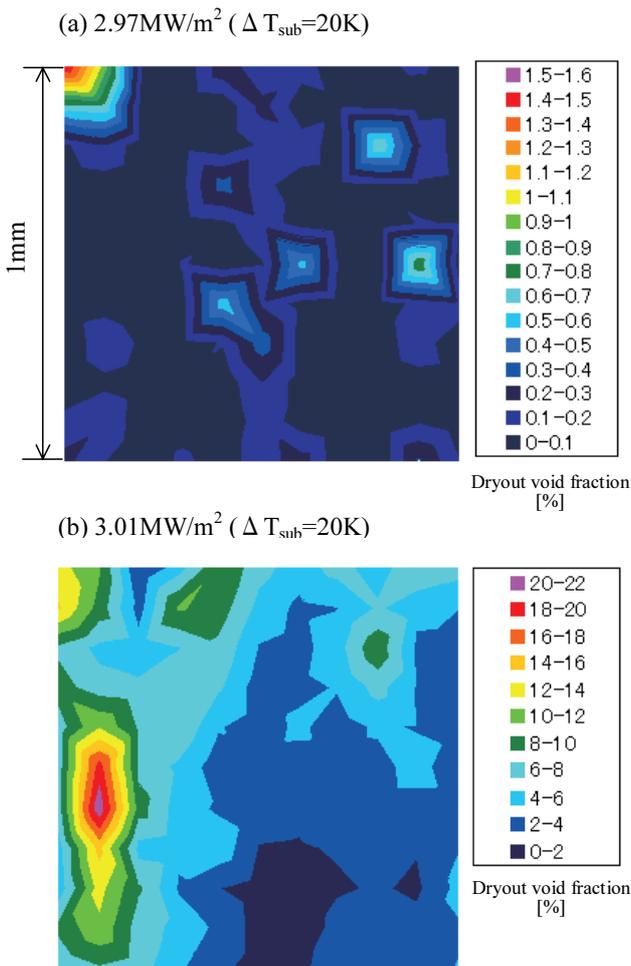


図 12 ドライアウトボイド率の 2 次元分布

し、ドライアウトボイド率の最大値も 21%と急増している。

### 3.5 CHF 発生機構とサブクール沸騰での CHF 促進の要因

前節までの結果をまとめると、(1)熱流束が増加し CHF の近傍になると壁面のドライアウトが発生し始める、(2)ドライアウトは蒸気塊滞留期間の後半で発生する、(3)熱流束のわずかな増加でドライアウト発生領域が急激に拡大する。以上の結果は、伝熱面上に形成されるマクロ液膜のドライアウトが CHF のトリガとなっていることを強く示唆している。

この点を確認するため、移動プローブを伝熱面から約 10  $\mu\text{m}$ の高さに設置し、核沸騰高熱流束域の定常状態から銅ブロックへの入力を増加させ、CHF を経て遷移沸騰に移行する非定常過程でのプローブ信号の変化の様子を測定した。図 13 に、

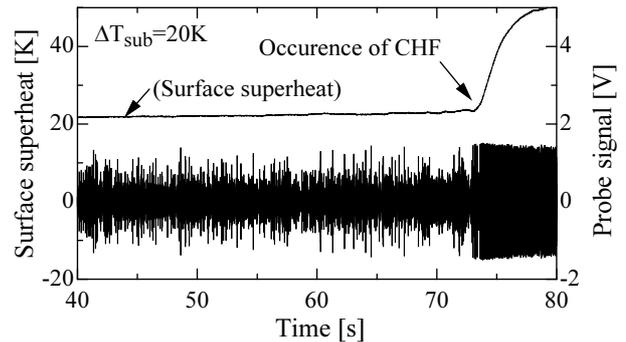


図 13 CHF 発生前後におけるプローブ信号の変化

プローブ信号を表面過熱度の変化とともに示す。図 13 は、測定開始後 40s から測定終了時(80s)に亘る信号であるが、73s で壁面温度が上昇し CHF が発生している。この時点でプローブ信号は一次気泡による微細な信号から壁面のドライアウトを示す信号に急変する。

以上、本章でこれまでに示した全ての結果は、伝熱面上のマクロ液膜が蒸気塊滞留中に消耗し、ドライアウト領域が急激に拡大することがトリガとなり CHF が発生することを示している。この CHF 機構は、2 章で述べた各種モデルの中で、マクロ液膜蒸発モデルが想定する CHF 発生機構にきわめて近い。したがって、少なくとも本実験で用いたような熱容量の大きな上向き伝熱面におけるプール沸騰の CHF に対しては、Katto ら[3,4]によって提案されたマクロ液膜蒸発モデルが最も妥当な近似モデルと言える。

したがって、CHF がサブクール度の増大とともに増加する大きな要因は、図 8 に示したようにサブクール沸騰では飽和沸騰におけるマクロ液膜厚さの外挿値に比べて厚いマクロ液膜が形成されることにある、と結論付けてよさそうである。

なお、サブクール沸騰でマクロ液膜が厚くなる要因についての検討も行っており、定性的に説明可能なモデルを提案しているが[15]、紙面の都合上、ここでは省略させていただく。

## 4. 下向き傾斜面および 2 成分水溶液の CHF

3 章では、上向き面でのサブクール沸騰 CHF の結果を述べたが、サブクール沸騰の利用以外にも、プール沸騰の CHF を変化させる方法は幾つか存在する。本章では、他の方法で CHF を変化させた場合に、同様の機構で CHF の変化を説明できるかどうか、について検討した結果を紹介する。対象

とした沸騰は，垂直から下向き傾斜面の水の飽和沸騰，および上向き面でアルコール水溶液を沸騰媒体とした 2 成分溶液の飽和沸騰である。

#### 4.1 下向き傾斜面の飽和沸騰 CHF [16]

傾斜伝熱面の CHF に関しては比較的多くの測定があり，伝熱面を垂直から下向きにすると傾斜角の増加とともに CHF は大幅に減少することが知られている。この体系の CHF 機構を検討するために用いた実験装置を図 14 に示す。実験は大気圧の水を用いて行った。伝熱面と導電プローブが向かい合って設置されている。伝熱面は銅ブロックの上端面で幅 5mm，長さ 48mm の矩形形状であり。導電プローブは伝熱面下端から 38mm の位置に設置した。試験容器全体を傾けることによって，水平上向きから測った伝熱面傾斜角  $\theta = 90^\circ \sim 170^\circ$  まで変化させて行った。 $\theta = 90^\circ$  が垂直面， $\theta = 180^\circ$  が下向き水平面となる。

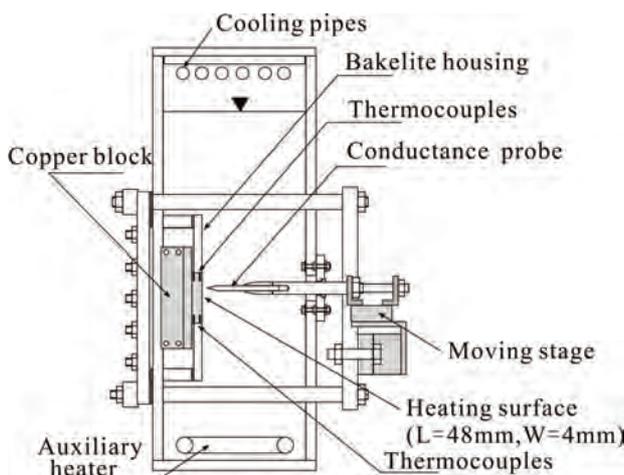


図 14 垂直から下向き傾斜面の実験装置

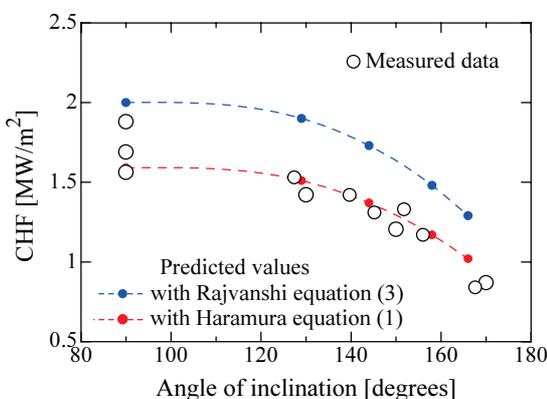


図 15 下向き傾斜面の CHF 測定結果

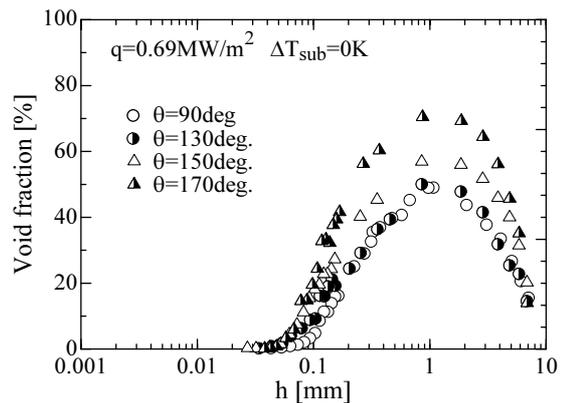


図 16 下向き傾斜面の時間平均ボイド率分布

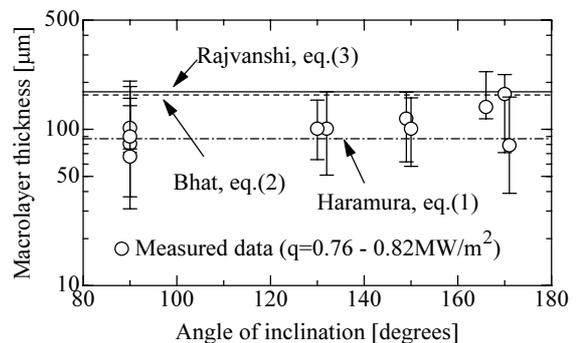


図 17 マクロ液膜厚さの傾斜角による変化

図 15 が CHF の測定結果であり，CHF は傾斜角の増大とともに減少する。図 16 は，伝熱面から垂直方向の時間平均ボイド率分布である（横軸の  $h$  は伝熱面からプローブ先端までの距離である）。図 7 の上向き面の結果とほとんど同一であり，どの傾斜角の場合も伝熱面近傍で 0 まで低下している。このように，伝熱面上を移動する蒸気塊と伝熱面の間には常に液層（マクロ液膜）が存在している。

図 17 は蒸気塊と伝熱面間のマクロ液膜厚さの結果である。この図は，熱流束を一定にして傾斜角度を変化させた結果であるが，マクロ液膜厚さは傾斜角度によらずほぼ一定値となり，重力は液膜の厚さにほとんど影響を与えないことが分かる。したがって，図 15 の CHF の傾斜角による変化は，マクロ液膜厚さの変化に起因するものではない。

傾斜面と上向き面の違いは，蒸気塊が伝熱面を覆っている時間が，傾斜角によって大きく変化する点である。図 18 は，傾斜角  $\theta = 155\text{deg.}$  の沸騰様相であるが，傾斜角が大きくなると，伝熱面長にほぼ匹敵する大きな蒸気塊が伝熱面に沿って上昇する。図 19 は，プローブと蒸気の接触時間（パルス幅と呼ぶ。図 19 上図参照）のスペクトル

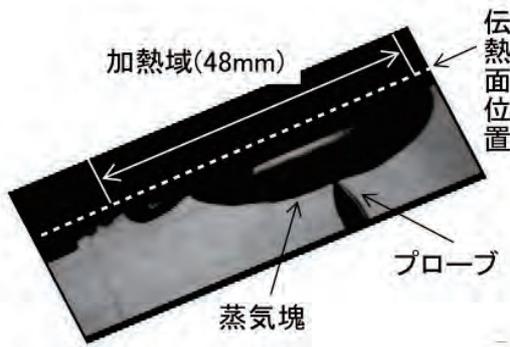


図 18 下向き傾斜面の沸騰様相 ( $\theta=155\text{deg.}$ )

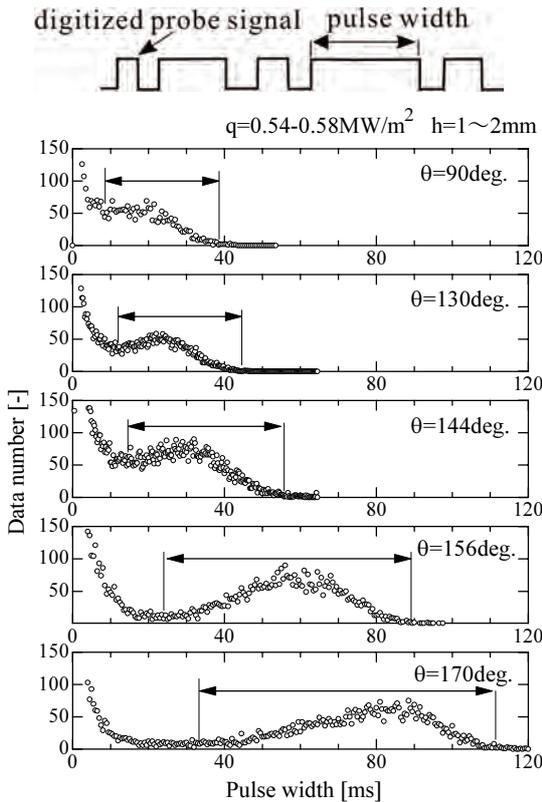


図 19 プローブと蒸気の接触時間のスペクトル

である。横軸がパルス幅，縦軸は測定時間内に得られたパルスの総数(4096 個，または 8192 個)のうち，各パルス幅に含まれるパルスの個数である。熱流束はほぼ同一で，プローブは伝熱面からの距離  $h=1\sim 2\text{mm}$  で，蒸気塊中に設置している。スペクトルのピーク部分（図中の矢印で示した範囲）が，蒸気塊信号に対応している。（例えば  $\theta=144\text{deg.}$  では，プローブと蒸気塊が接触している時間は  $15\text{ms}\sim 55\text{ms}$  程度であり，最頻値は約  $30\text{ms}$  である）。図より，スペクトルは，傾斜角の増加とともに長時間側にシフトする傾向を示しており，

伝熱面は大きな傾斜角の場合ほど通過時間の長い蒸気塊に覆われる様子が分かる。

以上に示したように，垂直から下向き傾斜面の伝熱面近傍の気液構造は，上向き面のそれと類似しており，CHF は上向き面と同様にマクロ液膜の消耗によって発生していることが示唆される。CHF が，蒸気塊通過中に伝熱面と蒸気塊間のマクロ液膜が乾くことで生じるとすれば，CHF 時には近似的に以下の熱収支の式が成立する。

$$q_{CHF} \cdot \tau = \rho_l H_{fg} \delta \quad (4)$$

ここで， $q_{CHF}$  が限界熱流束， $\tau$  は蒸気塊の通過時間， $H_{fg}$  は蒸発潜熱， $\delta$  はマクロ液膜厚さである。図 17 の結果からマクロ液膜厚さのデータは既存の式とよく一致するため， $\delta$  に式(1)，(3)を用い，蒸気塊通過時間には最も出現頻度の高いスペクトルのピーク値を用いて，式(4)より得られる CHF の予測値を，図 15 に破線で示す。測定値と比較的よく一致することが分かる。このように，下向き傾斜面の CHF の傾向は，マクロ液膜蒸発モデルで矛盾なく説明することができる。

#### 4.2 2 成分水溶液の飽和沸騰 CHF [17]

水に少量のアルコールを添加した 2 成分水溶液を沸騰媒体として用いると，CHF が顕著に促進される場合のあることが知られている。CHF 促進機構として，伝熱面近傍での低沸点成分の選択的な蒸発によって生じる沸点の変化や，表面張力の変化に起因するマランゴニ効果による説明が試みられているが，その要因は明らかではない。

筆者らは，水に 2-プロパノールを添加した 2 成分水溶液を用いて，何故 CHF が促進されるのかを検討している。研究は現在も進行中であるが，本節ではこれまでに得られた結果を紹介する。

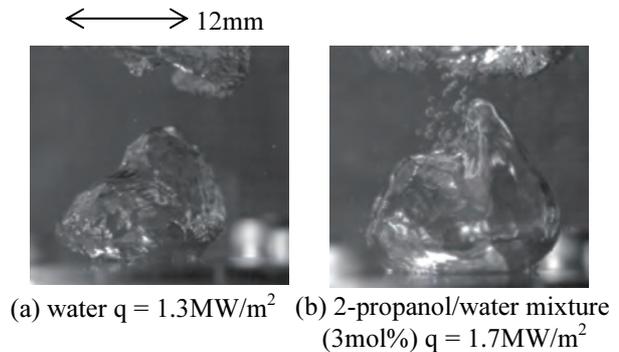


図 20 高熱流束域における沸騰様相

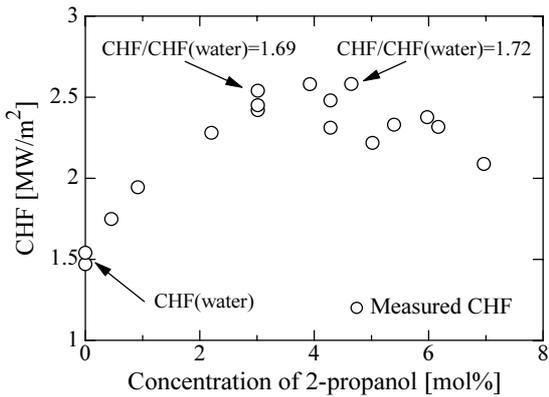


図 21 CHF の 2-プロパノール濃度による変化

実験装置は，図 5 とほぼ同じであり，伝熱面は直径 12mm の銅製円形上向き面であり，伝熱面の上方には気液挙動測定用の導電プローブを設置してある。

図 20 に高熱流束域での沸騰概観を示す．水に 2-プロパノールを添加すると，低熱流束では気泡は著しく微細化するが，高熱流束では水と 2-プロパノール水溶液では大きな違いはなく，どちらも伝熱面を覆う蒸気塊が形成される．図 21 に CHF の 2-プロパノール濃度による変化を示す．濃度 3mol%～4.5mol%で，CHF が水に比べて 1.7 倍程度促進されていることが分かる．沸騰概観に大きな違いが無いにもかかわらず CHF が大幅に促進される状況は，サブクール沸騰の場合と類似している．図 22 は，水と 2-プロパノール水溶液(3mol%)の時間平均ボイド率分布の比較である．同一熱流束にもかかわらず，両分布には大きな違いが現れており，2-プロパノール水溶液のボイド率は伝熱面から 1mm 以下の領域で水に比べて極端に低下することが分かる．

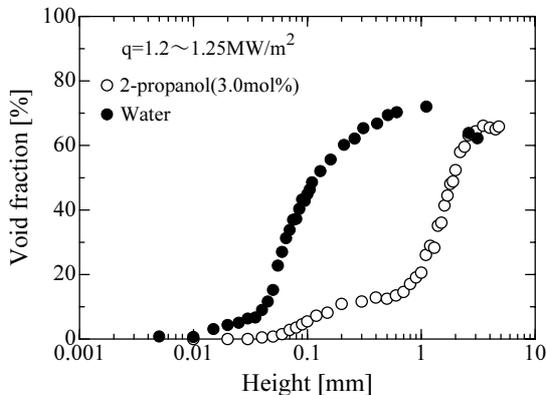


図 22 水と 2-プロパノール水溶液の時間平均ボイド率分布

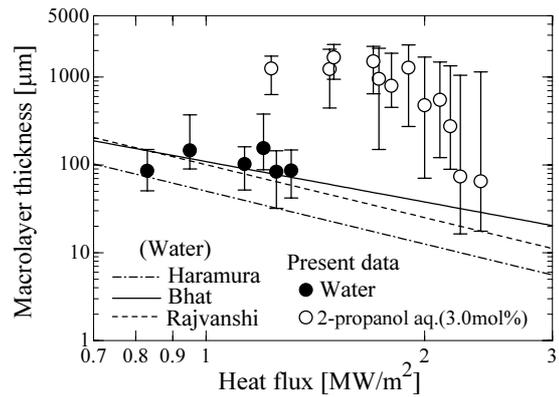


図 23 水と 2-プロパノール水溶液のマクロ液膜厚さ

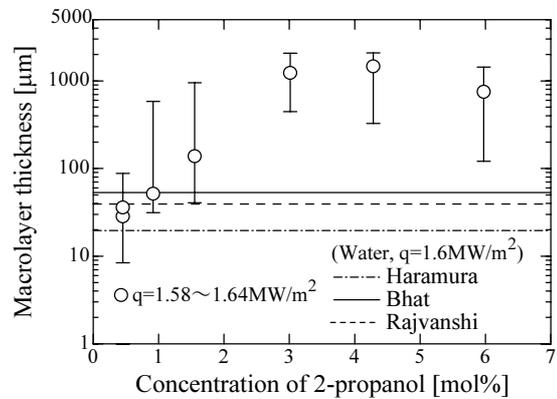


図 24 マクロ液膜厚さの 2-プロパノール濃度による変化

図 23 に蒸気塊下のマクロ液膜厚さの結果を示す．ボイド率分布から類推されるように，2-プロパノール水溶液のマクロ液膜厚さは，水に比べて極端に厚くなっており，熱流束の増加とともに水の外挿値に近づく傾向を示す．図 24 は，熱流束を同じにして 2-プロパノール濃度を变化させた場合のマクロ液膜の厚さの結果である．マクロ液膜厚さは濃度とともに増加し濃度 3～4.5mol%で最大値をとった後に減少する傾向を示している．これは図 21 の CHF の傾向と一致する．

以上，2-プロパノール水溶液の CHF の特徴は，蒸気塊下のマクロ液膜厚さの変化に基づいて説明することが可能であり，マクロ液膜蒸発モデルが CHF の妥当な近似モデルであることを示唆する結果となった．なお，2-プロパノール水溶液のマクロ液膜が水に比べて厚くなる要因は今のところ不明である．

## 5. まとめ

プール沸騰の限界熱流束発生機構に関して，筆者らが行っている研究の概要を紹介した．(1)上向き面でのサブクール度の増加による CHF の増大，(2)下向き傾斜面での傾斜角の増大による CHF の減少，(3)上向き面で水に 2-プロパノールを添加した場合の CHF 促進，に関しては，いずれも CHF が蒸気塊と伝熱面の間に形成されるマクロ液膜のドライアウトによって発生すると考えると説明可能であり，これと矛盾する実験結果は今のところ得られていない．したがって，少なくとも，大気圧近傍で熱容量の大きな伝熱面上のプール沸騰に関しては，マクロ液膜蒸発モデルが実際の CHF 機構に最も近い CHF モデルであると結論付けてよさそうである．

なお，CHF に影響を与えるその他の重要な因子として圧力と伝熱面の濡れ性がある．前者に関しては，沸騰様相の観察から 5MPa 程度まではマクロ液膜蒸発モデルで説明できそうであるが[18]，気液挙動の詳細な測定は未だ行っていないため，推測である．後者の濡れ性に関しては，実験を計画している段階である．両問題とも，そのうち何らかの結果を提示できればと思っている．

本稿で紹介した研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究 13650204，18560187）によった．ここに謝意を表する．

## 参考文献

- [1] 抜山，金属面と沸騰水との間の伝達熱の極大値並びに極小値決定の実験，機械学会誌，37-206(1934)，367-374.
- [2] Zuber N., On the stability of boiling heat transfer, *J. Heat Transfer*, 80(1958), 711-720.
- [3] Katto, Y. and Yokoya, S., Principal mechanism of boiling crisis in pool boiling, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 11(1968), 993-996.
- [4] Haramura, Y. and Katto Y., A new hydrodynamic model of critical heat flux, applicable widely to both pool and forced convection boiling on submerged bodies in saturated liquids, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 26(3)(1983), 389-399.
- [5] Unal, C., Daw, V. and Nelson, R.A., Unifying the controlling mechanisms for the critical heat flux and quenching, *J. Heat Transfer*, 114(1992), 972-982.
- [6] Theofanous, T.G., Dinh, T.N., Tu, J.P. and Dinh, A.T., The boiling crisis phenomenon Part2: dryout dynamics and burnout, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 26(2002), 793-810.
- [7] Howard, A.H. and Mudawar, I., Orientation effects on pool boiling critical heat flux (CHF) and modeling of CHF for near-vertical surfaces, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 42(1999), 1665-1688.
- [8] Dhir, V.K. and Liaw, S.P., Framework for a unified model for nucleate and transition pool boiling, *J. Heat Transfer*, 111(1987), 739-746.
- [9] Nishio, S., Gotoh, T. and Nagai, N., Observation of boiling structures in high heat-flux boiling, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 41(1998), 3191-3201.
- [10] 趙, 増岡, 鶴田, ミクロ液膜モデルによる限界熱流束の予測, 機論 B, 62-598(1996), 2338-2343.
- [11] Ono, A. and Sakashita, H., Liquid-vapor structure near heating surface at high heat flux in subcooled pool boiling, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 50(2007), 3481-3489.
- [12] Ono, A. and Sakashita, H., Measurement of surface dryout near heating surface at high heat flux in subcooled pool boiling, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 52(2009), 814-821.
- [13] Bhat, A.M., Saini, J.S. and Prakash, R., Role of macrolayer evaporation in pool boiling at high heat flux, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 11(1986), 1953-1961.
- [14] Rajvanshi, A.M., Saini, J.S. and Prakash, P., Investigation of macrolayer thickness in nucleate pool boiling, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 35(1992), 343-350.
- [15] 小野, 坂下, 飽和およびサブクールプール沸騰におけるマクロ液膜形成モデルの提案, 第 43 回日本伝熱シンポジウム(2006), 563-564.
- [16] Sakashita, H., Ono, A. and Nyui, J., Critical heat flux and near-wall boiling behaviors in saturated and subcooled pool boiling on vertical and inclined surfaces, *J. Nuclear Science and Technology*, 46-11(2009), 1038-1048.
- [17] Sakashita, H., Ono, A. and Nakabayashi, Y., Measurements of Critical Heat Flux and Liquid-Vapor Structure near Heating Surface in Pool Boiling of 2-propanol/Water Mixtures, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 53(2010), 1554-1562.
- [18] Sakashita, H. and Ono, A., Boiling Behaviors and Critical Heat Flux on a Horizontal Plate in Saturated Pool Boiling of Water at High Pressure, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 52(2009), 744-750.

## CHF に関する趙のマイクロ液膜モデル

*Zhao's micro-layer model on the CHF*

鶴田 隆治 (九州工業大学)

Takaharu TSURUTA (Kyushu Institute of Technology)

e-mail: tsuruta@mech.kyutech.ac.jp

### 1. はじめに

プール沸騰熱伝達を対象に，高熱流束の核沸騰領域から遷移沸騰領域までを記述する伝熱モデルとして，趙[1]が提案したマイクロ・マクロ液膜モデルがある．伝熱面上の一次気泡とその合体泡の挙動を考慮した上で，一次気泡下のマイクロ液膜の蒸発が伝熱に最も寄与し，過熱度とともに蒸発熱流束が増加する一方，マイクロ液膜の乾燥が進むため，やがて面平均の熱流束が減少に転ずるとするモデルである．したがって，沸騰曲線上において伝熱面平均の熱流束は連続的に変化し，限界熱流束 (CHF: Critical Heat Flux) はその極大点となる．CHF を越える過熱度域の遷移沸騰に対しても，マイクロ液膜の蒸発乾燥の進展によって熱流束は低下し続け，マイクロ液膜部の蒸発乾燥が終わると次ぎにはマクロ液膜の蒸発乾燥に進んでさらに伝熱特性が低下し，最後は膜沸騰に移行するというモデルである．マイクロ・マクロ液膜の蒸発乾燥という統一した視点から高過熱度域のプール沸騰熱伝達を記述するもので，わかりやすい解釈が可能のように考える．

しかし，最初の論文[2]が日本機械学会論文集に発表されて 15 年になろうとするが，その考え方はあまり浸透せず，受入れられていないように感じている．CHF に関しては非常に多くの研究がなされており，様々なモデルが提案されているためと推察するが，合体気泡下の一次気泡やさらにその底部のマイクロ液膜の存在すらも疑問視されることもある．相変化研究会では，第 45 回日本伝熱シンポジウムにおける「沸騰熱伝達について徹底討論」の一つの話題に取り上げ，「趙のマイクロ液膜モデルの問題点は何か？」と題する討論を行った．

議論はまだ決着をみないが，著者はこのモデルが生まれた場面に臨んでいるため，この場を借りてモデルの生まれた背景を紹介するとともに，定式化の概略を示し，今後の議論に期待したい．

### 2. モデルの生まれた背景

#### 2.1 狭い隙間における水平細線からの沸騰挙動

モデルの提案者である趙耀華 (Zhao Yaohua) 博士 (現北京工業大学教授) は，九州工業大学の博士後期課程に在籍し，増岡隆士先生の指導のもと，多孔質層内の沸騰伝熱の研究に着手した．具体的には，多孔質層内の熱流動現象を再現できる Hele-Shaw セル，すなわち狭い鉛直隙間内における水平白金細線からの沸騰現象の可視化観察を行った．この実験により，沸騰熱伝達におけるマイクロ液膜の役割に着目することになった．

Hele-Shaw の制限空間は，二枚の鉛直平行ガラス板によって構成され，空間内に直径 0.3mm の白金細線を水平に設置し，間隙を変えた通電加熱実験により CHF までの沸騰特性が可視化観察された．広い空間での水平細線の実験では，細線が合体気泡に覆われてしまうため，一次気泡を観察しにくい．それに対し，制限空間を設けると細線の側面での合体泡の成長を制限できるため，二次元的な観察が可能となり，合体気泡下の一次気泡をよく観察できるという特長がある．また，間隙の調整によって一般の水平上向き伝熱面からのプー

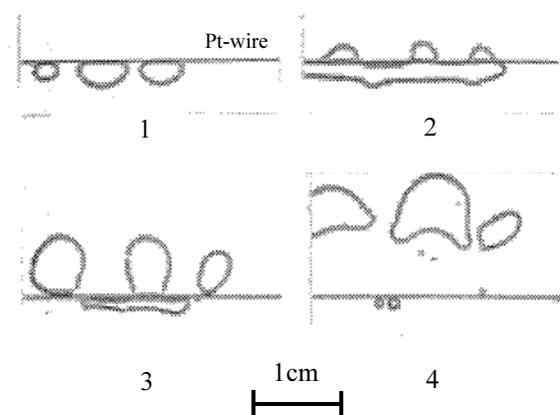


Fig. 1 Bubble behaviors in narrow spacing ( $q=1.1 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ ,  $\Delta T=8.6 \text{ K}$ , 1.3mm spacing)

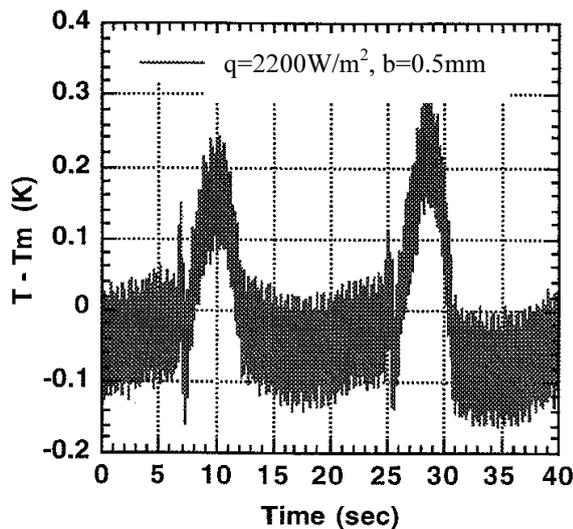


Fig. 2 Temperature transient of Pt-wire due to bubble growth and departure

ル沸騰を再現することも可能と考え，プール沸騰と同様の一次気泡の生成と成長，そして離脱と液体の補充機構が推察できるとした。

図1に低熱流束時の気泡発生と合体成長，離脱の様子を示す。毎秒1000コマの高速度撮影を行ったものであるが，画像の解像度が低く，またオリジナル画像が保存されていないため，不鮮明なものとなっている。しかしながら，興味深いことに，気泡は細線の下側に形成され，細線に沿って水平方向に成長し，やがて細線の上に浮上して離脱する。白金細線の温度の平均値からの変動の代表例を図2に示すが，細線温度は気泡が下部に保持されて成長している間に低い温度を示し，気泡離脱後の温度境界層形成時に上昇することを確認した。このことは，液層内に温度境界層を形成する熱伝導よりも高い熱輸送が気泡成長時の蒸発潜熱によって行われることを示しており，細線と気泡との間に液膜があり，その蒸発が関与することを意味する。すなわち，マイクロ液膜蒸発と考えた。

CHF近傍の熱流束においては，図3に示すように，細線周りの一次気泡とその上部の合体泡（二次および三次気泡）が明瞭に観察された。制限空間によって大きな合体泡の上昇が抑制されることにより，その下部で成長する一次気泡の吸収が生じている。広いプール沸騰における大きな茸状の合体泡が，上部の液体の慣性力によって停留する時と同じ状況を作り出していると考えた。これにより，マイクロ液膜の蒸発による一次気泡の成長と，

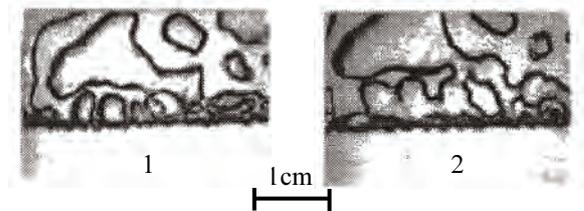


Fig. 3 Individual bubbles and coalescence into large vapor mushrooms near CHF condition ( $q_{CHF}=1.8 \times 10^6 \text{ W/m}^2$ , 2.9 mm spacing)

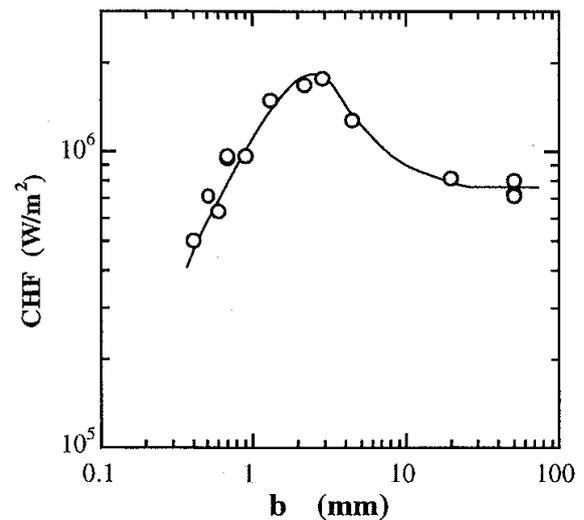


Fig. 4 CHF in narrow spacing

上部に位置する合体泡による吸収が周期的に繰り返されるといった構想が浮かび上がった。

なお，間隙幅へのCHFの依存性を図4に示すが，間隙幅とともにCHFは上昇したのち，再び低下して間隙幅の影響は消える。すなわち，極大値を与える間隙幅が存在して，広い空間のCHFに至ることが分かる。この極大値は，一次気泡の合体泡による吸収が最も頻繁に起こるときに対応しており，間隙幅がこれより小さくなると，水平方向に広がる一次気泡の離脱が抑制されてマイクロ液膜の蒸発が進み，ドライアウトを生じやすくなるため，限界熱流束は小さくなる。

## 2.2 永井・西尾による乾き域の可視化観察

もう一つの背景に，永井・西尾が伝熱シンポジウムで発表したCHFにおける伝熱面の観察実験があった[3]。これは，透明なサファイアの伝熱面を裏から観察したもので，フロン等の冷媒においては乾燥部分が合体成長するものの，濡れ部分が

なくなることはなく，従ってマクロ液膜が消耗しきることではないことを実験的に明らかにしたものである．機論にもまとめられており[4]，この後の「三相接触界線モデル」の起点ともいえる研究である．趙は，この実験結果から乾燥面の役割を確信し，マイクロ液膜の蒸発と乾燥の観点から CHF モデルを構築するに至った．

### 3. ミクロ液膜モデルの概要

#### 3.1 モデルと定式化

基本となるマイクロ液膜モデルの概要を以下に紹介する．先にも触れたように，一次気泡下に形成されるマイクロ液膜が伝熱の主役であって，マイクロ液膜の蒸発乾燥により熱流束に極大値が現れるとするもので，考え方を整理すると以下の通り．

- ・合体気泡下に一次気泡が周期的に形成される．
- ・一次気泡の底部にマイクロ液膜が存在し，一次気泡間にマクロ液膜が形成される．
- ・蒸発は主にマイクロ液膜部で生じる．
- ・一次気泡の一周期内にマイクロ液膜に液は供給されず，一次気泡が加熱面から離脱した後に，マクロ液膜が加熱面に液を供給する．
- ・一次気泡の離脱には，合体気泡による吸収と隣接気泡同士の合体との二つの場合がある．
- ・限界熱流束はマイクロ液膜が部分的に乾燥して生じる．

ここで，一次気泡の成長を，図5に示すように初期成長と後期成長の二段階に分けて考えるのが一つの特徴である．まず初期成長期間では，気泡は半球形状に形成され，その下部にマイクロ液膜が形成される．次いで後期成長過程では，マイクロ液膜

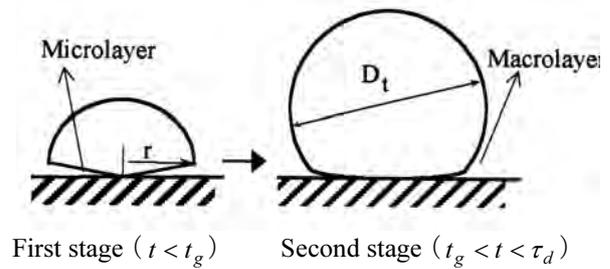


Fig. 5 Growing stages of individual bubble and micro/macro layers

の蒸発とともに気泡は上方に体積を増す形で球状に成長する．このとき，過熱境界層の発達によって気泡下部に蒸発をとまなうマクロ液膜部が現れると考える．

一次気泡の離脱過程も後期成長過程の成長速度によって二種類に分けられる．一つは，主として水の場合のように気泡の成長速度が速い場合には，上方に早く成長するため，上部の合体泡に吸収される形態となり，もう一方は，フロン系冷媒のように成長速度が遅いと横方向の合体によって合体泡が形成され，伝熱面から離脱するというものである．両者の区別においては，液膜の熱伝導性を考え， $\rho_l c_l k_l$ の大小によって行っている．すなわち，水のように $\rho_l c_l k_l$ が大きい場合には図6(a)，フロン系冷媒のようにその値が小さい場合には図6(b)に示す状況を想定している．ちなみに，永井・西尾が観察した孤立乾燥域の合体成長はフロン系冷媒を対象としたものであり，図6(b)に対応し，モデルで考慮した状況に合致する．ここでは，水の場合を想定した(a)の場合について紹介する．

まず，マイクロ液膜の伝熱への寄与を考えるため

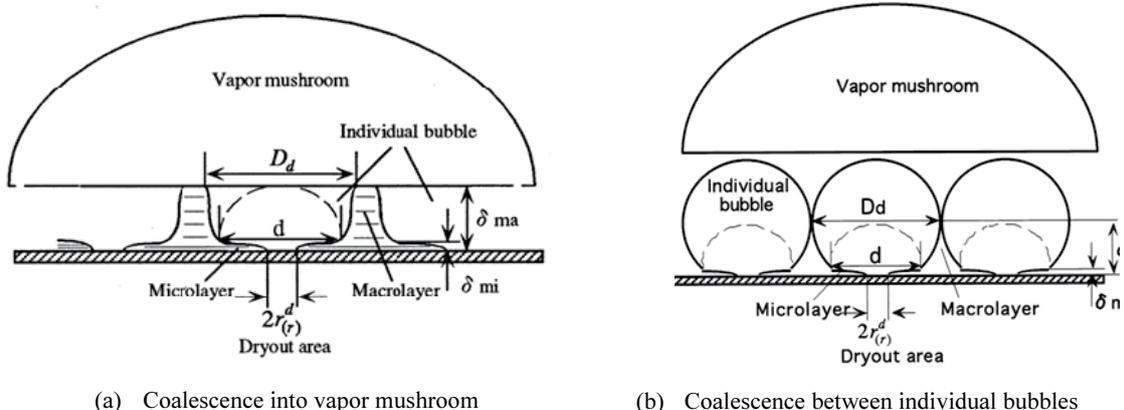


Fig. 6 Physical model of nucleate boiling heat transfer

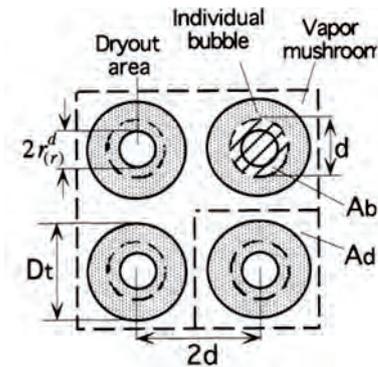


Fig. 7 A distribution model of bubbles under vapor mushroom

に，一次気泡の伝熱面上での分布状況を想定する必要がある．モデルでは，図7に示す大胆な配置を考えた．すなわち，一次気泡の初期成長期間に形成されるマイクロ液膜部の径を  $d$  (図6も参照) とし，気泡間隔をこれの2倍と限定して正方格子状に配置した．この配置を仮定したことにより，一次気泡の発生点密度  $n$  との間以下に関連が生まれることになる．

$$d = 1/\sqrt{2n} \quad (1)$$

伝熱面上には，一次気泡中心部に生じる乾燥領域とマイクロ液膜が覆う領域，およびマクロ液膜が覆う領域の三つの領域があると考えられる．気泡下のそれぞれの熱流束は，液膜厚さとの関係から次式で与えられる．

$$q_{(r,t)} = \begin{cases} 0, & r \leq r_d \\ -\rho_l h_{fg} \frac{d\delta_{mi}}{dt}, & r_d < r \leq d/2 \\ \frac{k_l \Delta T_{sat}}{\sqrt{\pi \alpha t}}, & \text{in other area} \end{cases} \quad (2)$$

ここで  $r_d$  が乾燥領域の半径であり，伝熱への寄与はなく，マイクロ液膜  $\delta_{mi}$  の蒸発熱流束，および液体部への非定常熱伝導をもって表現している．これより，面平均の熱流束が次式で求められる．

$$\bar{q} = \frac{1}{A_d} \left[ \frac{1}{\tau_d} \int_0^{\tau_d} \int_{A_b} q(r,t) dAdt + \frac{1}{\tau_D} \int_0^{\tau_D} \int_{A_d - A_b} \frac{k_l \Delta T_{sat}}{\sqrt{\pi \alpha t}} dAdt \right] \quad (3)$$

ここに， $\tau_d$  は一次気泡の離脱周期であり，初期成長期間 ( $t < t_g$ ) と気泡の力学的挙動で決まる後期

成長期間 ( $t_g < t < \tau_d$ ) によって求められる．

初期成長期間に形成されるマイクロ液膜の初期厚みには，粘性支配型の式として知られている Cooper-Lloyd [5] の式を用いている．

$$\delta_{mi}^0 = 0.8 \sqrt{v_l t} = \sqrt{c \alpha \cdot t}, \quad c = 0.64 Pr \quad (4)$$

マイクロ液膜を通しての熱伝導量が半球形状に成長する気泡の蒸発潜熱と釣り合うことを考慮して，

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{2}{3} \pi r^3 \rho_v h_{fg} \right) = \int_0^t k_l \frac{\Delta T_{sat}}{\delta_{mi}} 2\pi r \cdot dr \quad (5)$$

故に，気泡の成長式が次式に求まる．

$$r = \frac{2k_l \Delta T_{sat}}{\rho_v h_{fg} \sqrt{c \alpha}} t^{1/2} = 2 \sqrt{\frac{\alpha}{c}} Ja \cdot t^{1/2} \quad (6)$$

また，マイクロ液膜の消耗量を考えれば，

$$-\rho_l h_{fg} \frac{d\delta_{mi}}{dt} = k_l \frac{\Delta T_{sat}}{\delta_{mi}} \quad (7)$$

これに対する初期条件として， $r$  の位置にマイクロ液膜が形成される時刻を  $\tau_g$  とすれば，

$$\tau_g = \left[ \frac{\rho_v h_{fg} \sqrt{c \alpha}}{2k_l \Delta T_{sat}} r \right]^2, \quad \delta_0 = \sqrt{c \alpha \tau_g} \quad (8)$$

半径  $r$  の位置におけるマイクロ液膜の厚みとして

$$\frac{\delta_{mi}(t)}{\delta_0(\tau_g)} = \left[ 1 - \frac{2k_l \Delta T_{sat} (t - \tau_g)}{\rho_l h_{fg} \delta_0^2} \right]^{1/2} \quad (9)$$

が得られ，乾燥領域が  $\delta_{min} = 0$  として次式に求まる．

$$r_d^d \approx \frac{2k_l \Delta T_{sat}}{c \rho_v h_{fg}} \left[ \frac{2C_{pl} \Delta T_{sat}}{\alpha h_{fg}} \cdot t \right]^{1/2} \quad (10)$$

一次気泡の離脱周期  $\tau_d$  については，図8に示す

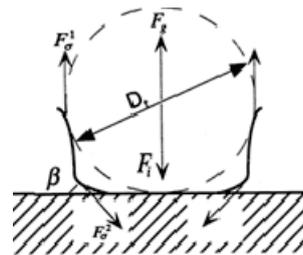


Fig. 8 Force balance of coalescing bubble into vapor mushroom

ような上部の合体気泡に吸収される状況に対し，慣性力が浮力と表面張力とに釣り合うと考えた運動方程式を考慮している。

$$\frac{d}{dt} \left[ \left( \frac{1}{2} \xi \rho_\ell + \rho_v \right) V \frac{ds}{dt} \right] = (\rho_\ell - \rho_v) V g + 2\pi\sigma(r - r_d \sin \beta) \quad (11)$$

ここに， $\xi$ は気泡運動に随伴する液体の等価慣性率であり半無限液体空間で用いられる 11/16 を使うが，上部に合体気泡があることを考慮して式では 1/2 倍している。また， $s$  は伝熱面より気泡重心までの距離， $V$  は気泡体積であって次式となる。

$$V = \frac{1}{12} \pi d^3 + \frac{1}{4} \pi d^2 \int_{r_g}^t \frac{q_{ev}}{\rho_v h_{fg}} dt \quad (12)$$

これらの関係式から離脱周期  $\tau_d$  は数値的に求められている。なお，合体気泡の離脱周期  $\tau_D$  については，原村・甲藤[6]の式が適用される。

以上の情報をもとに，式(3)から伝熱面平均熱流束を表現すれば，次式となった。

$$\bar{q} = \frac{\pi c_1}{16 d^2} (\Delta T_{sat})^2 \left[ \frac{d}{2} - \frac{c_2 (\Delta T_{sat})^3 \tau_d}{d} \right] + \frac{16 - \pi}{16} \frac{k_l \Delta T_{sat}}{\sqrt{\pi \alpha \tau_D}} ; c_1 = \frac{16 k_l^2}{c \alpha \rho_v h_{fg}}, c_2 = \frac{4 c_{pl} k_l^2}{c^2 a h_{fg}^3 \rho_v^2} \quad (13)$$

第一項が液膜の蒸発と乾燥の寄与，そして第二項が液体への熱伝導の効果である。マイクロ液膜の厚みは式(9)からわかるように過熱度とともに薄くなり，マイクロ液膜を介しての伝熱量は増加する。同時に液膜の乾燥も早くなり，乾燥領域も拡大することが式(10)からもわかる。液体への熱伝導の影響は小さいと考えられるため，この二つの効果から面平均の熱流束は極大値を持つと理解される。

その極大値，すなわち CHF を与える過熱度が，

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial (\Delta T_{sat})} = 0 \quad (14)$$

より求められ，CHF が式(13)から決まる。ただし，初期成長終了時における気泡直径でもあるマイクロ液膜部の径  $d$  を与える必要がある。図 7 のモデルを考えた場合に式(1)で示したように発泡点密度と関連するため，大気圧下の水に対する Gaertner [7]の観察結果を外挿した Pasamehmetoglu ら[8]の

関係式を用いた。

$$n = 7.892 \times 10^{-4} q^{1.5} \quad (15)$$

その結果，CHF 点が以下のように予測された。

$$d = 0.5 \text{ mm}, \Delta T_{sat} = 20.9 \text{ K}, q_{CHF} = 1.2 \times 10^6 \text{ W/m}^2$$

### 3.2 モデルによる予測結果

図 9 は， $d=0.5\text{mm}$  の結果を用いて求めた水の沸騰曲線である。ここでは紹介しなかった遷移沸騰領域にまで拡張した結果[9]を示しているが，核沸騰域から CHF を経て，遷移沸騰に連続的に移行する様子わかる。実験結果ともよく一致することを確認しており，CHF 点における時間平均乾燥面積は約 16.5%と予測され，Shoji [10]の報告にある 17%という実験結果とかなり近くなっている。

なお図 10 には，各々の過熱度におけるマイクロ液膜とマクロ液膜の蒸発の伝熱割合を示しているが，

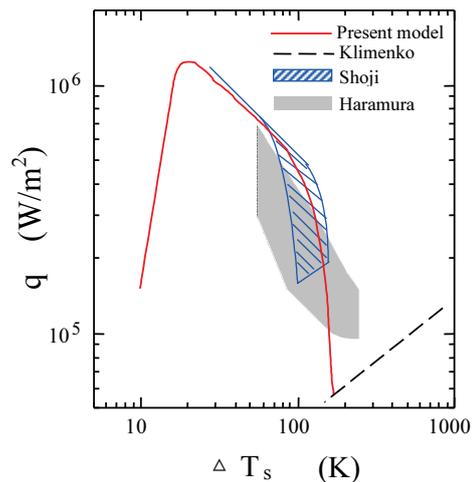


Fig.9 Theoretical prediction of boiling curve of water based on the micro/macro-layer model

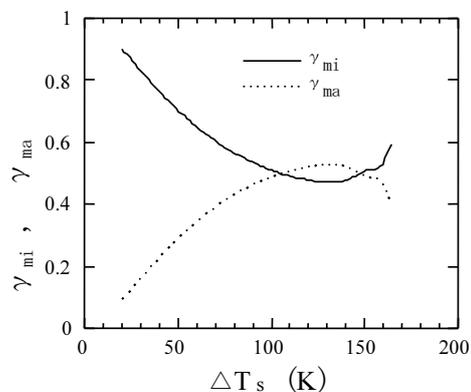


Fig.10 Heat transfer fractions of micro- and macro-layers

ここで紹介した CHF 点近傍では、圧倒的にマイクロ液膜の蒸発の影響が大きく、80%以上に及んでいる。マクロ液膜の蒸発は、高過熱度の遷移沸騰域において大きくなるのがわかる。

近年、宇高ら[11]は、核沸騰過程における気泡下のマイクロ液膜構造をレーザー消光法にて直接測定し、初期マイクロ液膜の厚みは約  $1\sim 8\mu\text{m}$  であり、熱流束への依存性は弱いことを示すとともに、Cooper の式は実際より厚い値を与えることを指摘している。また、伝熱特性の検討も行い[12]、全生成蒸気量に対するマイクロ液膜からの蒸発量は熱流束とともに大きくなり、 $1\text{MW}/\text{m}^2$  では約 80% に及び、マイクロ液膜の影響が強いという報告を行っている。蒸発量の寄与は本予測モデルとほぼ一致しており、何よりもマイクロ液膜の存在と役割を実験的に示している点は非常に貴重である。

以上説明したように、マイクロ・マクロ液膜の挙動を考えることにより核沸騰から遷移沸騰までを統一的に記述しているのが本モデルの特徴である。趙はこのマイクロ・マクロ液膜モデルを飽和プール沸騰だけではなく、超急速加熱による非定常沸騰[13]、サブクール沸騰[14]、制限空間[15]、そして微小重力条件下における限界熱流束[16]にも適用している。

#### 4. おわりに

沸騰曲線は滑らかな連続曲線であり、CHF はその極大点であるとする考えは、西尾・永井の論文[17]にも紹介されているように、これまでもあったものである。ただ、遷移沸騰のイメージからの間欠的固液接触という見方や、マクロ液膜と蒸気茎とによる濡れと乾き面とを考えた固液接触構造としている場合が多い。徐々に乾燥面の役割が注目されてきたように感じるが、これを決定的にしたのが、紹介したマイクロ液膜モデルと永井・西尾[18]による接触界線長さ密度の提案であろう。接触界線長さ密度が、沸騰曲線と同様の過熱度依存性を示すことが見出され、その後の西尾・田中による詳細な観察実験[19]を経て、田中・西尾[20]による滴状凝縮の滴径分布理論を乾燥域の合体成長に活用したモデルに到達している。いわゆる三相接触界線モデルであるが、伝熱の素過程を記述する際の伝熱モデルの完成度においてはマイクロ液膜モデルが優っていると著者は考えている。三相

接触界線モデルでは接触界線単位長さあたりの伝熱量を定義し、気泡成長モデルに組み込んでいるが、定式化には実験値が用いられている。また、伝熱は面であり、線で記述することへの違和感、さらには気液界面抵抗が影響すると考えるよりは液膜の熱伝導抵抗を考えることの方が実現象に近いと思うことによる。

最後に、蛇足かもしれないが、水を想定したマイクロ液膜モデルにおける一次気泡の上部合体泡への吸収が、マクロ液膜モデルにおける蒸気茎に相当し、フロン系冷媒を想定した伝熱面上での一次気泡同士の合体が、孤立乾燥領域の合体成長に対応するものと考えている。

#### 参考文献

- [1] 趙耀華，沸騰熱伝達機構に関する研究—マイクロ・マクロ液膜モデル，九州工業大学学位論文，(1999)．
- [2] 趙耀華，他 2 名，マイクロ液膜モデルによる限界熱流束の予測，日本機械学会論文集 B 編，62-598(1996) 2338．
- [3] 永井二郎，西尾茂文，沸騰における固液接触状況に関する研究，第 31 回日本伝熱シンポジウム講演論文集，2(1994) 412．
- [4] 永井二郎，西尾茂文，単結晶サファイア面上でのプール沸騰（固液接触にかかわる諸量の測定法），日本機械学会論文集 B 編，61-588，(1995) 3018．
- [5] Cooper M. G. and Lloyd, A. J. P., The Microlayer in Nucleate Pool Boiling, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 12 (1969) 895.
- [6] 原村嘉彦，甲藤好郎，限界熱流束に対する新しい流体力学的モデル，日本機械学会論文集 B 編，49-445(1983) 1919．
- [7] Gaetner, R. F., Photographic Study of Nucleate Pool Boiling on A Horizontal Surface, *J. Heat Transfer*, 87 (1965) 17.
- [8] Pasamehmetoglu, K.O., et al., Saturated Pool Nucleate Boiling Mechanisms at High Heat Fluxes, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 36 (1993) 3859.
- [9] 趙耀華，他 2 名，液膜部分乾燥モデルによる遷移沸騰熱伝達の予測，日本機械学会論文集 B 編，62-599(1996) 2717．
- [10] Shoji, M., Pool and External Flow Boiling (Dhir,

- V. K. and Bergles, A. E., eds), ASME, New York (1992) 237.
- [11]宇高義郎，他 4 名，核沸騰過程におけるマイクロ液膜構造，日本機械学会論文集 B 編，72-747(2008) 2358.
- [12]中村孝作，宇高義郎，核沸騰過程におけるマイクロ液膜構造に基づく伝熱特性の検討，日本機械学会論文集 B 編，74-748(2008) 2560.
- [13]趙耀華，他 2 名，マイクロ・マクロ液膜モデルによる非定常沸騰熱伝達の理論的研究，日本機械学会論文集 B 編，63-607(1997) 964.
- [14]趙耀華，他 2 名，マイクロ液膜モデルによるサブクール沸騰の限界熱流束，日本機械学会論文集 B 編，67-654(2001) 466.
- [15]Zhao, Y. H., et al., Critical Heat Flux of Boiling Heat Transfer in a Confined Space, *JSME Int. J., B*, 44-3(2001) 344.
- [16]Zhao, Y. H., et al., Unified Theoretical Prediction of Fully Developed Nucleate Boiling and Critical Heat Flux Based on A Dynamic Microlayer Model, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 45-15 (2002) 3189.
- [17]西尾茂文，永井二郎，飽和プール沸騰における沸騰曲線予測の試み，日本機械学会論文集 B 編，58-549(1992) 1490.
- [18]永井二郎，西尾茂文，沸騰熱伝達における固液接触現象（接触界線長さ密度の概念の提案），日本機械学会論文集 B 編，63-610(1997) 2104.
- [19]西尾茂文，田中宏明，高熱流束プール沸騰における沸騰構造の可視化，日本機械学会論文集 B 編，69-682(2003) 1425.
- [20]田中宏明，西尾茂文，高熱流束沸騰の固液接触構造のモデル化，日本機械学会論文集 B 編，69-683(2003) 1659.
-

## イリノイ大学シカゴ校での研究活動報告

*Report on Research Activities in the University of Illinois at Chicago*

角田 直人 (九州大学)

Naoto KAKUTA (Kyushu University)

e-mail: kakuta@nucl.kyushu-u.ac.jp

シカゴは、現代超高層ビル群の中に 20 世紀初頭の歴史的な建築ビルが混在林立し、その時代の雰囲気を感じられる魅力的な街である。冬の寒さは厳しいが、ダウントウンのスカイラインが映えるミシガン湖の夏は爽快そのものである。筆者は、そのダウントウンに程近いイリノイ大学シカゴ校 (University of Illinois at Chicago, UIC) にて、2009 年 6 月より 10 ヶ月間、研究する機会を得た。

UIC は州立の冠は付いていないが、主に州の財源で運営され、14 の college を有し、学生数が約 25,000 人 (うち大学院生が 10,000 人)、教員数が約 2,300 人である。公共交通機関の利便性に優れ、その意味で都会型の大学とも言えるが、そこはアメリカの大学、キャンパス内には立派な寮、スポーツジム、アリーナ、ボーリング場などが完備され、学生へのサービスは充実している。医学部キャンパスとの間にはスクールバスが運行され、たまたま私の住むアパートがルート上にあつたため、大学との往復に利用することができた。さらに、大学自前の police が常にキャンパス内外を巡回していることもあり、治安上の不安が全くない快適な生活を送ることができた。尚、イリノイ大学には、UIC とは別にアーバナ・シャンペーン校 (University of Illinois at Urbana-Champaign, UIUC) がある。

研究室は、Department of Mechanical and Industrial Engineering に属する Micro/Nanoscale Fluid Transport Laboratory (以降 MNFTL と記述) であり、率いるのは C. M. Megaridis (メガリディス) 教授と A. L. Yarin (ヤェリン) 教授である。二人の教授による研究室体制とは如何なるものかと興味津々だったが、実際、実験室と学生控室は全くの共用で、全体ミーティングも一緒に行っていた。運営上のメリットがあるとはいえ、ミーティングでお互い激論を交わしながらも共同体制を維持しているのには感心した。結局、両先生から

同程度の割合でアドバイスを受けられたのは幸いであつた。実験室は、教員二人分ということもあるのだろうが、広々としており、羨ましい限りであつた。彼らがグラント獲得に精力を注いでいるのは言うまでもないが、UIC は 9 ヶ月報酬システムのため、夏期分を稼ぐためにも必要なだと語っていた。

研究室のメンバーは、博士課程大学院生 5 名、修士課程 2 名、学部生 (卒研) 4 名、その他に共同研究者や他研究室の学生が常時数名出入りしていた。博士課程は、米国の大学院事情を象徴しているのだろうか、インドと中国出身の学生で占められていた。彼らと机を並べて研究ができ、3 名の博士論文に対する中間および最終審査会 (Ph.D. Defense) にも参加することができたのは幸運であつた。審査会の形式は基本的に日本と変わらない。学生が厳しい質問にも自信たっぷりに答えているのが印象的だつた。

MNFTL は、マイクロナノ領域での流体特性と、それに基づく機能性材料の作製と応用を研究テーマとしているが、キーワードとして、Fluidics in carbon nanotubes, Multiphase heat and mass transfer



写真 1 UIC キャンパスからのシカゴのダウントウンの眺め。アメリカで最も高いビル Willis Tower (旧称 Sears Tower) が見える。



写真 2 Department of Mechanical and Industrial Engineering が入っている建物。

in carbon nanotubes, Droplet and spray phenomena in electric field, Electrospinning of nanofibers, Co-electrospinning of core-shell nanofibers, Stimuli-responsive nanofibers and nanoparticles, Superhydrophobic Coatings が挙げられる。筆者は、電圧が印加された  $\mu\text{m}$  サイズの微細管に充填された溶液とマイクロプラズマとの相互作用について研究した。通常、溶液は管先端開口から電界作用でナノ液滴として飛び出していく。これは MNFTL が得意とする Electro spray に他ならないのだが、筆者の場合は、効率的なプラズマとの反応のため、逆に飛び出させない制御が必要であった。そのための実験および理論的研究をしたいというのが MNFTL 訪問の第一の動機であり、著者にとって新たな研究テーマをスタートさせる契機ともなった。

溶液制御は一筋縄にはいかなかったが、印加電圧の条件を絞り込むことができた。微細管については異なる形状をいくつか試したが、MNFTL からは Carbon tube bundle を提供してもらった。その名の通り Carbon tube の束で、微量な液体とガスを通すことができる。Electrospinning を用いて安価で簡単に作製できる利点があり、著者が使用したのは tube 内径がおよそ  $1\ \mu\text{m}$  のものである。最終的には、小型ガスチャンバを作製し、Carbon tube



写真 3 Megaridis 先生と筆者。

bundle をセットして質量分析計と分光器による成分測定を実施したが、分析に至らず時間切れで終了した。今後の課題である。

研究は博士課程の学生と共同で行い、彼のお陰で研究の立ち上げはスムーズにできた。一方、真空ポンプや高感度カメラを他の研究室から借りたのだが、メンテナンスが悪かったのか、立ち上げ作業に予想外の時間を要したり、分析センターでは質量分析計の調子が突如悪くなり、私のせいかと気を揉んだり、思わぬトラブルに見舞われたりもした。また、チャンバ作製は工作工場に依頼したのだが、全く噛み合わない部品が届いて以来、要望を正確に説明する必要性を痛感した。こういった研究室以外の人達とのコミュニケーションは、正直、研究自体よりもむしろ骨の折れる作業だった。ただ、どの人も明るく協力的で、愉しく作業できる場面も多かった。

在外研究のメリットは、時間の制約がない（雑用がない）、専門外の知識や技術を身に付けられる、更に筆者の場合のように、新たな研究に踏み出す好機であることが挙げられるだろうが、何よりも多くの海外の研究者と知り合えることだと実感した。10 か月間という決して長い滞在ではなかったが、米国での研究生活を体験し、日本の研究環境を多少なりとも見つめ直すことができた。是非この経験を今後活かしていきたい。

## エルヴィン・シュレディンガー(1887-1961)の功績

*A meritorious deed of Erwin Schrödinger (1887-1961)*

芝原 正彦 (大阪大学)

Masahiko SHIBAHARA (Osaka University)

e-mail: siba@mech.eng.osaka-u.ac.jp



エルヴィン・シュレディンガー (1887-1961)

## 1. はじめに

1900年のプランクの法則の発表[1], その後のボーアらによる前期量子論のさまざまな研究成果を経て[2], それらの古典力学では説明できない量子論的現象を記述する学問として, 1925年のハイゼンベルクらの行列力学と1926年のシュレディンガーの波動力学の発見, さらに行列力学と波動力学は数学的に同じことを別の形式で記述していることをシュレディンガー自身が証明することで, 量子力学が確立されていきます. このシュレディンガーの波動力学の発見には, ド・ブロイの「物質の波」という概念[3]が欠かせませんでした. 現代に目を移すと, 大学の講義, 特に量子力学においてシュレディンガー方程式は欠かせないものであり, またそれを用いた研究例は数え切れません. 文献[4]によると1960年までにシュレディンガー方程式の応用に基づく論文は10万編以上 (!) 発表されているとのことですので, 現在では, その方程式は公知のものとしてあえて引用文献が示されることもありません. このように現代では広く認知されているシュレディンガー方程式はいかにして発見されたのか, それは1926年にシュレディンガーによって発表された一連の論文に遡ります.

本稿ではその功績に焦点を当てるとともに, それを生み出した哲学者シュレディンガーの思索の経緯についても触れてみたいと思います.

## 2. 波動力学の発見

## 2.1 物質波に対する波動方程式の導出

シュレディンガーによる波動力学の発見は, 1926年前半に, *Annalen der Physik* 誌に発表した「固有値問題としての量子化」と題した4部の論文[5]をはじめりにしています. シュレディンガーは, 1925年の秋以降の極めて短期間に波動力学のアイデアを得て, 完成させたものと考えられています. 1925年の研究ノートには, 最初は相対論的な波動方程式を導出していますが, 電子のスピンについての知見がなかったために, 水素原子のスペクトルデータと一致せず, この方程式の公表を行いませんでした. この研究ノートに記載されている導出方法は, 現在多くの教科書に記載されているとおり, ド・ブロイの物質波の関係式[3]を通常定常波動方程式に代入する形で行われています. すなわち, シュレディンガーは物質波が満たすべき波動方程式を導出したということになります. 本稿では, 物質波が満たすべき波動方程式, いわゆるシュレディンガー方程式, の導出方法の一例を示したいと思います. なお, ニュートンの運動方程式と同様に, シュレディンガー方程式は厳密にいうと導出されているのではなく, 発見されたというべきであり, この方程式は多くの物理現象または化学現象を適切に説明することをもってその正当性が証明されているといえます.

さて, 位相速度  $v$  で空間を伝わる振幅  $\varphi$  の一般的な波動方程式は

$$\nabla^2 \varphi - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

となります. 波長  $\lambda$  の波の場合には

$$\phi(r,t) = \phi(r)e^{-2\pi i v t / \lambda} \quad (2)$$

と書くことができるので、式(1)に代入すると、以下のように書き換えられます。

$$\nabla^2 \phi(r) + \frac{4\pi^2}{\lambda^2} \phi(r) = 0 \quad (3)$$

$p$  を運動量としてド・ブロイの物質波の関係式[3]

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (4)$$

が満たすべき波動方程式を得るために、式(3)に代入すると、

$$\nabla^2 \phi(r) + \frac{4\pi^2 p^2}{h^2} \phi(r) = 0 \quad (5)$$

となります。非相対論的な場合を考えるとエネルギー  $E$  は運動エネルギーとポテンシャルエネルギー  $V(r)$  の和と考えるので、

$$E = \frac{p^2}{2m} + V(r) \quad (6)$$

となります。これを式(5)に代入すると

$$\nabla^2 \phi(r) + \frac{2m}{\hbar^2} \{E - V(r)\} \phi(r) = 0 \quad (7)$$

となり、これを変形すると

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) \right\} \phi(r) = E \phi(r) \quad (8)$$

となり、いわゆる時間に依存しないシュレディンガー方程式(time independent Schrödinger equation) が得られました。

一方で、エネルギーに関する物質波の式

$$E = \frac{h\nu}{\lambda} \quad (9)$$

を式(2)に代入すると

$$\phi(r,t) = \phi(r)e^{-iEt/\hbar} \quad (10)$$

となります。これを  $t$  で微分すると、

$$i\hbar \frac{\partial \phi(r,t)}{\partial t} = E \phi(r) \quad (11)$$

一方で式(8)の両辺に  $e^{-iEt/\hbar}$  を右からかけると、

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) \right\} \phi(r)e^{-iEt/\hbar} = E \phi(r)e^{-iEt/\hbar} \quad (12)$$

となり、式(11)とポテンシャル  $V$  が時間変化する場合を考えて一般化すると

$$\left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r,t) \right\} \phi(r,t) = E \phi(r,t) = i\hbar \frac{\partial \phi(r,t)}{\partial t} \quad (13)$$

となります。すなわち、ポテンシャル  $V(r,t)$  であらわされる力をうける質量  $m$  の粒子に関する物質波は式(13)の方程式、いわゆる時間に依存したシュレディンガー方程式(time dependent Schrödinger equation)に従うことが分かります。このように物質波に対する一般的な方程式は式(13)に記した時間に依存したものであり、式(8)の時間に依存しない方程式は定常状態である特別な場合に成り立つことが分かります。これらの方程式は、同じく量子状態を記述するハイゼンベルクらの行列力学とは一見異なる事柄を記述しているように見えますが、水素原子や調和振動子などの具体的な場合に適用した場合には完全に同一の結果を与えることがシュレディンガーによって示されています[5]。さらに同年シュレディンガー自身によって、ハイゼンベルクの行列力学とシュレディンガーの波動力学が同じ内容を異なる数学形式で表したものであることが示されました[6]。さらにその後、ヨルダンとディラックによって、行列力学と波動力学は統一されて量子力学が確立されていきます。

このように、先行していた行列力学と比べれば、波動力学は量子状態を波動やその固有値といった具体的なイメージで自然に捉えやすく、極めて美しく革命的なアイデアであったことが理解できます。また、現在では前述の方程式の解である波動関数  $\phi(r,t)$  は、

$$|\phi(r,t)|^2 dr \quad (14)$$

と計算した場合に、微小体積  $dr$  内に粒子が見出される確率と等しくなるというボルンの解釈が一般的ですが、当のシュレディンガー自身は波動関数  $\phi(r,t)$  自体が粒子の密度分布を表すようなイメージを持っていました。シュレディンガー本人においてもそうですので、現代において量子力学を勉強する場合に、この波動関数自体の解釈が最初の難関となることは仕方ないといえるでしょう。いずれにしても、波動関数はもともとの波動方程式では振幅に相当していることは確かでしょう。

## 2.2 1926年に発表された波動力学の論文

シュレディンガーによって 1926年に発表され

た「固有値問題としての量子化」(第一論文)[5]には、水素原子について、電子を波動であると考えerことで、波動の固有関数と固有振動数が決定され、その離散的な固有振動数が、不連続なエネルギー準位をあたえることに相当することが示されています。不連続なエネルギー準位、すなわち量子化されたエネルギーは固有振動のエネルギー固有値として自然な形で導くことができることが示されています。この論文における波動が満たすべき方程式の導出方法は、前述の通常の波動方程式にド・ブロイの関係式を代入する方法ではなく、古典力学のハミルトン-ヤコビの方程式からはじまり、その変分問題に置き換える方法を示しています。

第一論文の受理のちょうど4週間後に、「固有値問題としての量子化」の第二論文[5]が受理されています。この論文では、力学と光学の間の相似性を論ずるとともに、物質波に対する波動方程式を調和振動子と二原子分子へ応用することを試んでいます。この中で、力学と光学のアナロジーから、光の波動としての回折現象に幾何光学が適用できないように、同様の限界が古典力学にもあり、この場合には波動力学を適用する必要が生じるとの主張を行っています。すなわち、幾何光学と古典力学にアナロジーを認めると、幾何光学を厳密化すると波動光学が必要なように、古典力学を厳密化すると波動力学の確立が必要であると述べています。

この後、シュレディンガーは論文「ハイゼンベルク-ボルン-ヨルダンの量子力学と私の力学の関係について」[6]を発表しました。この論文の中で、行列力学と波動力学の数学的な対応関係を論じて、ハイゼンベルクらの代数方程式を解くことが、自ら導出した偏微分方程式の境界値問題を解くことと同等であることを示しました。先行していた行列力学と波動力学の数学的同一性について記述したこの論文は、量子力学の確立に対して大きな意義をもっています。

「固有値問題としての量子化」の第三論文[5]は、5月10日に受理されていますが、この論文では水素のバルマー線に対するシュタルク効果が説明されています。第四論文[5]は6月23日に受理されていますが、この論文では時間によって変化する力学系における波動力学の問題について取り扱い、

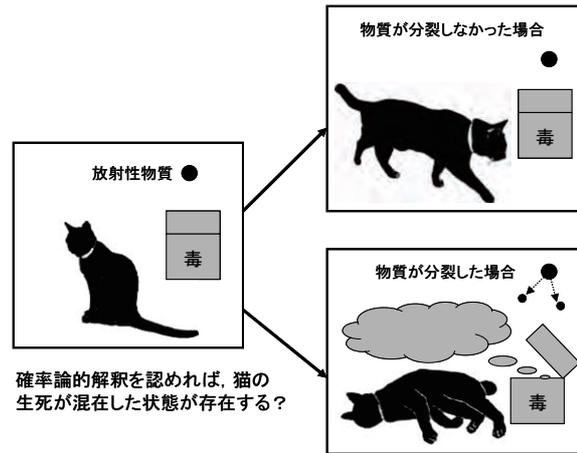


図1 シュレディンガーの猫

光の散乱、ふく射の放出・吸収、化学反応をも含む場合を論じています。これらの問題は現代におけるさまざまな研究課題にも関連する問題ですが、同時にこの論文において、波動関数 $\psi$ が実数関数ではなく複素関数であることを述べています。後に波動関数が複素位相を有することは量子力学の解釈において非常に重要な点であったと考えられており、それを最初に示したのがシュレディンガーでありました。ディラックによって「確率振幅(波動関数)に伴う位相の存在は、あまりにも自然の奥深くに巧妙に隠されていたので、人がそれに気づくのが遅れた」[7]という言葉が残されています。

### 2.3 パラドックス「シュレディンガーの猫」

1926年の波動力学の発見の後、1927年のハイゼンベルクによる不確定性原理の提唱、ボーアの波束を用いた粒子・波動の二重性の統合、相補性の概念の導入などにより、現在の量子力学の主流の解釈となっている考え方が確立されていきました。そのような量子力学の解釈をめぐる論争の中で、1935年にシュレディンガーは「量子力学の現状について」という論文[8]の中で、量子力学の解釈に対して「シュレディンガーの猫」と呼ばれる有名なパラドックスを提示しています。これは図1に示すように青酸ガス発生装置付の外から見えない鉄の箱に猫を閉じ込めておくとし、このとき、1時間のうちに1個の原子が崩壊するかしないか程度の微量の放射性物質があり、もし原子崩壊が起こったならば青酸ガスが発生して猫は死んでし

まうという装置であるとして、このときに系全体を波動関数を使って表現すると、この関数には生きている猫と死んでいる猫が同じ程度に混在していることとなります。この例は、量子力学に許されるさまざまな状態の重ね合わせや確率論的解釈を、直接観測可能な状態に置き換えた典型例であり、この場合の確率論的解釈はとても奇妙であるように思えます。このような量子力学の解釈におけるさまざまな議論において、シュレディンガーは現代における少数派の解釈、すなわち確率論的解釈を受け入れない立場に立っていたようです。このことはおそらくシュレディンガーの一元論的な哲学と関連すると思われる。

### 3. シュレディンガー方程式

#### 3.1 シュレディンガー方程式と波動関数

シュレディンガー方程式の解のイメージをつかんでいただくために、最も簡単な例として、一次元の箱の中に閉じ込められた量子論的自由粒子に対するシュレディンガー方程式の解を求めてみましょう。図2に示すような箱の長さ方向を  $x$  軸として、箱の左端を  $x=0$ 、箱の右端を  $x=a$  として、箱の中ではポテンシャルエネルギー  $V=0$ 、箱の外では  $V=\infty$ 、すなわちこの自由粒子は箱の外に出られないと考えます。この系のハミルトニアン  $H$  は、一次元的に考えると以下ようになります。

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + V \quad (15)$$

自由粒子の波動関数を  $\varphi$  とすると、式(8)の時間に依存しないシュレディンガー方程式は、

$$\left( -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + V \right) \varphi = E\varphi$$

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E-V)\varphi = 0 \quad (16)$$

となります。箱の外では、 $V=\infty$  の条件から、 $\varphi=0$  でなければならず、 $|\varphi|^2=0$  となることから、この粒子が箱の外に存在する確率が0であることが分かります。一方で、箱の中では  $V=0$  であるので、式(16)は以下ようになります。

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}E\varphi = 0 \quad (17)$$

上記の一般解を求めると、 $\alpha$ 、 $\beta$  を定数として

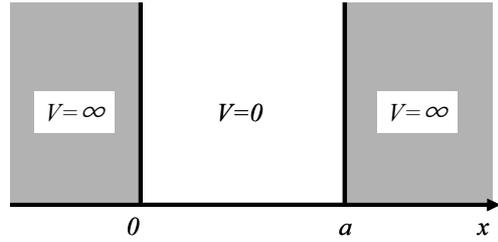


図2 簡単な一次元モデル系

$$\varphi = \alpha \cos \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} x + \beta \sin \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} x \quad (18)$$

となります。次に、 $x=0$  で  $\varphi=0$  となる境界条件より、 $\alpha=0$  であるので、

$$\varphi(x) = \beta \sin \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} x \quad (19)$$

となります。次に、 $x=a$  で  $\varphi=0$  となる境界条件より、以下の式が成り立ちます。

$$\varphi(a) = \beta \sin \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} a = 0$$

したがって、以下のような関係が得られます。

$$\frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} a = n\pi \quad n=1,2,3,\dots \quad (20)$$

この結果を式(19)に代入すると

$$\varphi(x) = \beta \sin \frac{n\pi}{a} x \quad n=1,2,3,\dots \quad (21)$$

となり、規格化条件より

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\varphi(x)|^2 dx = 1$$

であるので、この式を満たすように  $\beta$  を決定すると、

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\varphi(x)|^2 dx = \beta^2 \int_0^a \sin^2 \frac{n\pi}{a} x dx = \frac{a}{2} \beta^2 = 1$$

となるので、

$$\beta = \sqrt{\frac{2}{a}} \quad (22)$$

が得られ、式(16)の解は以下ようになります。

$$\varphi_n(x) = \begin{cases} 0 & x < 0, x > a \\ \sqrt{\frac{2}{a}} \sin \frac{n\pi}{a} x & 0 \leq x \leq a \end{cases} \quad n=1,2,3,\dots \quad (23)$$

このとき、この解に対応するエネルギーは式(20)より、

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m} \frac{n^2}{a^2} \quad n=1,2,3,\dots \quad (24)$$

となります。したがって、この粒子のエネルギーはその量子数  $n$  の増加に伴って不連続的に増加することとなり、量子論的なエネルギー状態を自然に表現できました。式(23)の解である波動関数  $\varphi$  の意味を考えてみると、 $\varphi$  は両端を固定した弦の定常波と同じ形をしており、図3に示すように物質波の場合においても固有振動と同様のイメージで考えることができます。したがって、不連続なエネルギーはそのそれぞれの固有振動に対応した固有値と考えることができます。

### 3.2 シュレディンガー方程式の応用

前述した式(8)のようなシュレディンガー方程式は、現代ではさまざまな分野に適用されており、コンピュータの発達に伴って数値解析的に解かれるようになってきています。例えば、多数の電子からなる分子系や固体界面などに適用された場合には、方程式を解くための物理化学モデリング法さらにはその数値解法に関する研究例が多数あり、化学や物理の大きな研究分野を形成しています。

しかしながら、分子系全体や界面全体に対するシュレディンガー方程式を厳密に解くことは不可能であり、さまざまな観点から近似解法が必要です。このために、まずは原子核と電子の特性の違いから、シュレディンガー方程式を原子核に対するものと電子に対するものを分離し（ボルン・オッペンハイマー近似）、原子核の位置を固定して電子に対するシュレディンガー方程式のみを解いてその波動関数とエネルギーを得ます。次に、例えば原子核の位置を移動させて、同じ操作を繰り返す、結果として系全体のエネルギーが最小値になる場合を求めると、その幾何配置が最安定な分子構造あるいは安定な界面構造であることが分かります。

一方で、例えば複数個の分子系全体のシュレディンガー方程式を解いて、横軸に分子間距離、縦軸に分子系のエネルギーを描けば、分子間ポテンシャルが得られることとなります。同様に、化学反応が生じる分子系全体のシュレディンガー方程式を解き、分子系の座標と系全体のエネルギーをプロットしていけばポテンシャルエネルギー面を描くことができ、活性化エネルギーに相当するエネルギーを得ることができるため、反応速度の理論的な予測ができます。このように原子種と数の

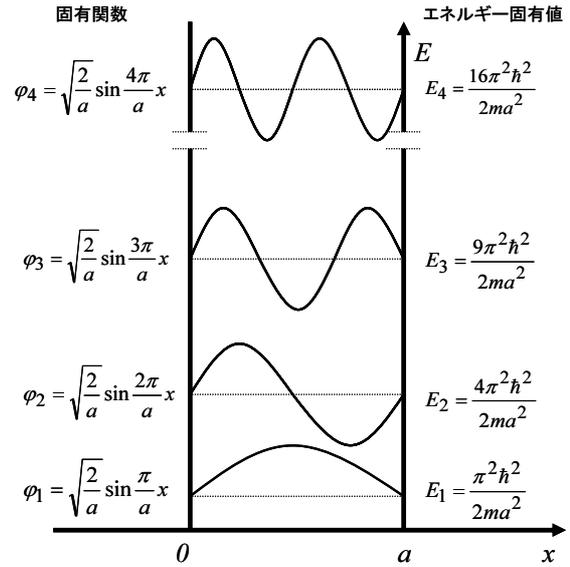


図3 波動関数とエネルギー固有値

情報さえあれば、原理的にはシュレディンガー方程式を記述することができ、それを何らかの方法で精度よく解くことができれば、任意の分子や物質に対して非経験的にさまざまな物理化学情報を得ることができることとなります。

また、多電子系に対するシュレディンガー方程式を実際に解くためには、例えば分子軌道法では独立電子近似を用いて電子系のみに対するシュレディンガー方程式をさらに近似してコンピュータによって解くこととなります[9]。この独立電子近似とは、多電子系の中の一つの電子に注目して、他の電子からの影響を加味したシュレディンガー方程式に書き直し、その波動関数を最後に合成することで全電子波動関数を記述する方法です。この過程において、他の電子からの影響を加味する方法が大きな問題となりますし、一つの電子のシュレディンガー方程式には、最終的に解かれるべき他の電子の波動関数が含まれていますから、必然的に膨大な数の繰り返し計算が必要となり、コンピュータが威力を発揮します。また、近年では密度汎関数法(DFT)と呼ばれる解法が用いられるようになり、多電子系への適用に威力を発揮し、さまざまな研究成果が報告されています[10]。

## 4. シュレディンガーの生涯と哲学

シュレディンガーは1887年にオーストリア・ハンガリー帝国のウィーンに生まれました。その後、1906年ウィーン大学に入学し、ボルツマンの後継

者であったフリッツ・ハーゼンエールのもとで理論物理学を学びます。その後、第一次世界大戦への従軍を経て、1921年にスイスのチューリヒ大学に教授として着任しました。この間シュレディンガーは古代インドのヴェーダ哲学に傾倒するとともに、色彩論ならびに熱放射などの研究を行っていましたが、1921年からは原子スペクトルに関する研究、光の粒子性と波動性に関する研究、ボーアやアインシュタインらの量子論に関連する論文を発表しています。その後、ド・ブロイの物質波のアイデアに大いなる触発を受けて、1925年の後半に波動力学のアイデアに到達したものと思われまふ。また、1925年の波動力学の一連の研究ならびに論文執筆に取り掛かる直前に、現在でも文庫本として入手可能な「わが世界観」[11]の前半部である「道を求めて」という哲学書を脱稿しており、その中で自我と世界の関係について哲学的に論述しています。おそらくこれらの経緯は偶然ではなく必然であり、1925年から1926年にかけてシュレディンガーという人間の深い部分でこれらの思考が結び付き、量子論の本質と実態を思考する中で半年という極めて短期間に波動力学が生み出されたと考えられます。その翌年に、プランクの後任教授として、ベルリン大学に招聘され、1933年にノーベル物理学賞を受賞しますが、ナチス・ドイツに追われて1939年アイルランドのダブリン高級研究所に移りました。その後、統一場の理論の研究に専心しましたが、晩年にはウィーンに帰って一生を終えました。

一方で私生活では、愛を奏でる抒情詩に加えて女性に関する奔放なエピソード[4]が多数残されています。一例を挙げると、本妻に加えて、友人の夫人ならびにその間に生まれた娘と同居しつつ、それ以外の女性にも大いに情愛を注いで暮らしたといわれています。このような過剰ともいえる情愛はシュレディンガーの研究における衝動や直感と密接に関連していると考えられます。

シュレディンガーは物理学者でありながら哲学者でもありました。現在においても、「わが世界観」、「自然とギリシャ人」[12]、「精神と物質」[13]、「生命とは何かー物理的にみた生細胞」[14]などの珠玉の哲学書を書店で気軽に手にとることができます。特に「生命とは何か」は、DNAの構造解明で著名なクリックとワトソンがその分野に興味

を持つきっかけになったと述べています。このように、シュレディンガーはその方程式とともに、その直感と科学的合理性に導かれた幅広い功績を後世に残したといえるでしょう。

#### 参考文献

- [1] 花村克悟, マックス・プランクの功績, 伝熱, **48-205**(2009)32.
- [2] 村上陽一, ニールス・ボーアの功績, 伝熱, **49-206**(2010)25.
- [3] 村上陽一, ルイ・ド・ブロイの功績, 伝熱, **49-208**(2010)52.
- [4] W.ムーア著, 小林澈郎・土佐幸子訳, シュレディンガーその生涯と思想, 培風館, (1995).
- [5] Schrödinger, E., Quantisierung als Eigenwertproblem, *Annalen der Physik*, **79**, 361-376 (1926); **79**, 489-527 (1926); **80**, 434-490 (1926); **81**, 109-139 (1926).
- [6] Schrödinger, E., Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen, *Annalen der Physik*, **79**, 734-756 (1926).
- [7] 中村量空著, シュレディンガーの思索と生涯, 工作舎, (1993).
- [8] Schrödinger, E., Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik, *Naturwissenschaften*, **23**, 807-812, 823-929, 944-849 (1935).
- [9] 例えば, 武次徹也, 平尾公彦共著, 早わかり分子軌道法, 裳華房, (2003).
- [10] 例えば, 菅野 暁監修, 里子允敏・大西権平共著, 密度汎関数法とその応用, 講談社サイエンスフィク(1994).
- [11] E.シュレディンガー著, 橋本芳契監修, 中村量空, 早川博信, 橋本契訳, わが世界観, 筑摩書房(2002).
- [12] E.シュレディンガー著, 河辺六男訳, 自然とギリシャ人ー原子論をめぐる古代と現代の対話, 工作舎 (1991).
- [13] E.シュレディンガー著, 中村量空訳, 精神と物質ー意識と科学的世界像をめぐる考察, 工作舎 (1987).
- [14] E.シュレディンガー著, 岡 小天, 鎮目恭夫訳, 生命とは何かー物理的にみた生細胞, 岩波文庫 (2008).

## ITherm2010 会議報告

### Report of ITherm2010

畠山 友行 (富山県立大学)

Tomoyuki HATAKEYAMA (Toyama Prefectural University)

#### 会議について

ITherm とは、電子機器実装に関する諸問題を取り扱う国際会議であり、IEEE が中心となって隔年で開催されている。電子機器実装の中でも、特に熱関連と材料関連の話題が中心となっている。今回は、ITherm2010 と題し、ラスベガスの Bally's ホテルにて、2010 年 6 月 2 日から 5 日にわたって開催された。

開催日程を見てお気づきの方も多と思うが、今回の会議は伝熱シンポジウムの直後に開催された。第 47 回日本伝熱シンポジウムが 5 月 26 日から 28 日までであったため、ITherm2010 は一週間と間をおかずに開催されたことになる。実はこの会議、毎回伝熱シンポジウムと非常に接近して開催されている。ITherm と一年ずれて、隔年で開催されている InterPACK の方は、例年 7 月頃の開催であり、伝熱シンポジウムとかぶる心配はまずない。主催が、ITherm は IEEE であり、InterPACK は ASME である違いはあるが、ITherm ももう少し時期をずらしてくれればといつも思う。

#### 今回の会議について

今回の会議の参加者は、230 名程度であったようである。講演は 170 件以上であった。ITherm というだけあって、さすがに熱関連の講演件数が、材料関連よりも多かった。熱関連の講演に関しては、デバイスレベルからパッケージ・筐体、さらにはデータセンターまで、多様な内容になっていた。特に、データセンターレベルの熱問題の話が多いような印象を受けた。データセンター関連は、一般セッションが 4 つあり、パネルセッションが 1 つ、プレナリーが 1 件あった。また、ヒートシンクなどの空冷関係、TIM 関係は相変わらずの根強い人気で、相変化を用いた冷却技術の講演も多数あった。しかし、半導体デバイスレベルの話を取っている講演が少なかったのは、残念である。

特に、三次元集積回路の熱問題に関する話は、非常に少なかった。

表 1 に、キーノートなどを除く、一般講演の公演数内訳を示す。日本人による講演は、全部で 16 件、熱関係が 9 件、材料関係が 7 件であった。

プロシーディングの配布形式は恒例で、プログラムのみ紙媒体で配布され、講演論文集は電子媒体で配布された。これまでと異なる点としては、講演論文集の配布が、CD-ROM から USB メモリに変更されていた点である。これは、近年の光学ドライブを持たないネットブックに代表されるモバイル PC が普及していることに配慮したことであろうと思う。そのため、会議参加者のほとんどが、プレゼンを聞きながら講演論文集を眺めることができていたようである。今後、このような形がノーマルになるのかもしれない。

表 1 講演数内訳 (一般講演のみ)

| 地域         | 講演数 |
|------------|-----|
| 北アメリカ      | 125 |
| ヨーロッパ      | 17  |
| アジア (日本以外) | 13  |
| 日本         | 16  |
| オセアニア      | 1   |
| 合計         | 172 |



図 1 会議開催の前日に食事を共にした日本からの熱関係者

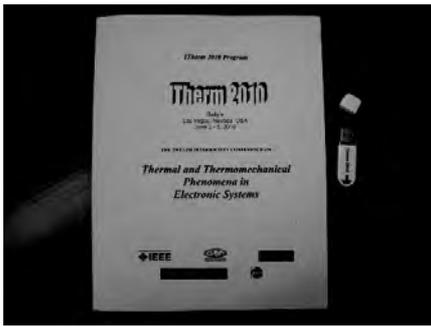


図2 プログラムとプロシーディング

今回は、ラスベガスの Bally's ホテルでの開催であった。すぐ隣の Paris というホテルでは、ECTC2010 という、こちらも電子機器の実装関係の国際会議が開催されており、どうやら客を二分する形になっていたようである。ECTC も IEEE がスポンサーになっており、ECTC は電気寄り、ITherm は機械寄りという性質の違いはあるものの、同じ IEEE が関連しているだけに、co-locate になぜしないのかと思ってしまった。おそらく、三次元集積回路関係の話題は、ECTC の方で盛んに議論されていたのではないかと思う。InterPACK'09 では、Electro-Thermal-Mechanical Issue in Packaging (Multi-Physics) というトラックが立ち上がり、電気・熱・材料間の議論が活発になりつつある状況を考えれば、なおさら co-locate が良かったのではないかという思いが強い。

今回の会議では、参加者を悩ませることがいくつかあった。まず、会議室の場所がわかりづらかった。プログラムに会議室の地図がなく、部屋の名前が書いてあるのみであったためである。ラスベガスの性質上、ホテルのフロントフロアにはカジノが併設されている。そのため、他の都市のホテルと比べて、ホテルの様子が全く異なる。ホテル内にはホテル全体の地図もなく、結局、プログラムに書いている部屋の名前をホテルの人に聞き、会議室のフロアを教えてもらうこととなってしまった。また、プログラムの変更が参加者を悩ませていた。紙媒体で配布されているプログラムに一部変更が生じていた。しかし、このプログラム変更の情報が、全くアナウンスされていなかった。実は、参加受付の横にあった、決して大きくないホワイトボードにプログラムの変更が書かれていた。しかし、参加者の大半が参加する、キーノー

トやランcheonなどでは全くアナウンスされなかったため、プログラムの変更に気づいていない参加者が多かったようである。あるセッションでは、午前中二番目のセッションが、午前中一番目に変更になっており、プログラム変更気づいていない講演者が一人来なかった。午前一番目のセッション開始時刻が、朝の7時半であったせいもあろう。おそらく午前二番目のセッション開始に合わせて会議室に来たのであろうが、なんとともかわいそうな話である。

会議の運営には、若干の不備があったように感じられたが、会議の内容自体は非常に充実していた。講演内容が多岐にわたっていたため、あまり知らない内容の講演を聞くことで視野を広げることができたように感じている。特に、熱関連の研究者が材料関係の話の聞いたり、その逆であったりと、熱という枠を超えた他の研究内容を知ることができたことは、非常にありがたい。なおさら、電気関係も充実していればという思いが残る。



図3 セッションの様子

#### 次回の会議について

さて、次回二年後の ITherm2012 であるが、どうやら最初に書いた伝熱シンポジウムとの開催時期の接近が大きな問題になりそうである。2012 年の伝熱シンポジウムは、富山で開催される予定である。会議中に設けられたミーティングで決まった ITherm2012 の開催時期は、伝熱シンポジウムと見事にバッティングし、同日開催となるようだ。2012 年の ITherm には、日本人の熱関係者が参加することは難しいようである。今回の会議において、日本人による講演が全体の 1 割を占めていただけに、日本人の熱関係者が参加できないことは、非常に残念でならない。

## 九州電力株式会社・八丁原発電所の紹介

*Introduction of KYUSYU ELECTRIC POWER CO., INC  
HATCHOBARU GEOTHERMAL POWER STATION*

白倉 典幸（九州電力 八丁原発電所）

*Noriyuki SHIRAKURA (KEPCO HATCHOBARU PS)*

### 1. はじめに

21世紀は環境の世紀と言われています。地球温暖化の問題が顕在化し、人類にとってCO<sub>2</sub>排出量削減が急務の課題となっています。

我が国の電力業界も太陽光や風力などの再生可能エネルギーや原子力エネルギーの導入促進に取り組んでいます。このような中で、CO<sub>2</sub>排出が非常に少ない地熱発電も温暖化防止に有効であることから、最近、注目を集めるようになりました。日本には約530MWの地熱発電設備がありますが、その中で最大の設備が、九州電力㈱八丁原発電所110MW（55MW×2基）です。また、近年、八丁原発電所では地熱バイナリー発電設備を導入しました。

この設備は、従来の地熱発電方式では利用できなかった低温の蒸気・熱水を有効利用できる設備として、今後、導入促進が期待されているものです。

それでは、地熱発電の特徴と九州電力㈱八丁原発電所の設備概要を紹介します。

### 2. 地熱発電の特徴

地熱発電には次のような特徴があります。

- 純国産エネルギーである  
一次エネルギーの自給率が約4%しかない我が国にとって貴重なエネルギーです。
- CO<sub>2</sub>排出量が非常に少ない  
化石燃料を燃焼させるわけではありませんが、エネルギー源となる地熱熱水に溶解しているCO<sub>2</sub>が地熱熱水を地下から取り出す段階で遊離するため、少量のCO<sub>2</sub>を排出します。
- 安定した発電が可能  
他の自然エネルギーを利用した発電方式と比較して、年間、昼夜を通じて安定した発電が可能です。
- 半永久的な発電が可能  
天水が地下深くに浸透し、マグマによって温められた地熱熱水からエネルギーを取り出しますが、水や熱量のバランスを図れば、半永久的に発電が可能です。



図1 八丁原発電所全景

● 開発地点は限られている

地熱発電を行う条件として、地熱貯留層の存在が必要です。

地熱貯留層とは、比較的地表に近いマグマによって温められた天水が、キャップロック（帽岩）と呼ばれる不透水層によって豊富に保持されている地下構造のことです。

このような地下構造はどこにでも存在するわけではないため、地熱発電を行うことができる地点は限定されます。

また、地熱資源の多くは景観に優れた火山・温泉地域に存在するため、自然公園法の制限を受けることから開発地点が限定されます。その他、開発に当たっては、周辺温泉事業者の理解も不可欠です。

● 大規模開発が難しく、開発リードタイムも長い

発電設備の規模は、地熱貯留層の大きさに制限されます。

また、地熱発電では地熱貯留層の探査から始めるわけですが、地下 1000～2000m の状況を地表から様々な探査技術で調査します。この調査には 10～20 年といった長い時間がかかります。

● 初期投資が高く、開発リスクを伴う

運転を開始すれば燃料費はかかりませんが、長期間の調査費用や多数の坑井掘削費用が必要となるため初期投資が高くなります。また、坑井に関しては、計画どおりの能力を出さない場合もありますし、地下熱水の pH が低すぎて使用できない場合など開発リスクが伴います。

3. 設備概要

(1) 八丁原 1 号機・2 号機

1 号機と 2 号機は共に定格出力が 55MW で、発電システムもほぼ同じです。1 号機が昭和 52 年、2 号機が平成 2 年に営業運転を開始しています。現在、蒸気井（深さ 2000～2500m）を 18 本、還元井（深さ 1000～1500m）を 13 本使用して運転しています。

営業運転開始から現在まで、80%以上の高い設備利用率（一定期間に発電した電力量／一定期間に発電可能な最大電力量×100）を維持しています。

地熱発電では、地熱熱水をフラッシュさせて蒸気を取り出し、タービン・発電機を回して電気を作るわけですが、八丁原発電所設備の特徴として、ダブルフラッシュ方式と二相流体輸送方式の採用があります。

ダブルフラッシュ方式とは、蒸気井から噴出する流体を気水分離器で分離し、一次蒸気と熱水に分け、更に熱水をフラッシャー（二次分離器）で減圧フラッシュさせて二次蒸気を発生させて、一次蒸気と二次蒸気を併用してタービンを駆動する方式です。二次蒸気が加わることで、タービンの出力が約 20%増加する設計となっています。ダブルフラッシュ方式は、八丁原発電所において噴出流体の熱水比率が高く、また、エンタルピーも高いので、熱水の有効利用を図るために当社と三菱重工で開発した技術です。

二相流体輸送方式とは、蒸気井から噴出する気水混合流体を 1 本の管路で輸送するものです。

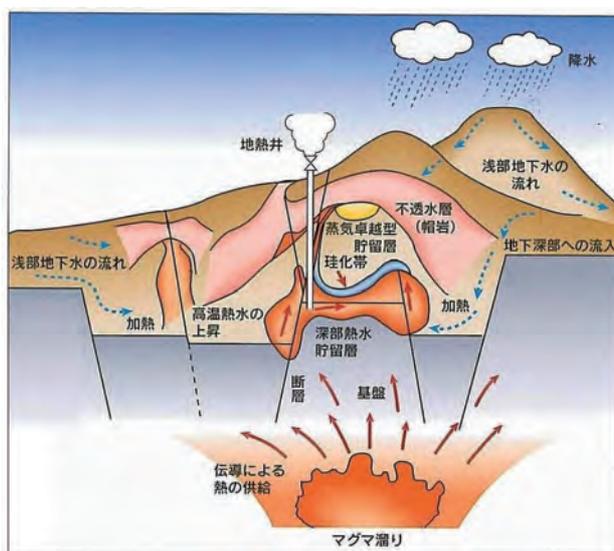


図 2 地熱構造概念図

一般的には、気相と液相が共存する状態では流動不安定となり易いため、蒸気井から噴出した気水混合流体を直ぐに気水分離し、気体と液体は別々の管路で輸送します。管路傾斜の制限等で流動不安定を防止しています。

(2) バイナリー発電設備

バイナリー発電とは、沸点の低い媒体を蒸発させ、その媒体蒸気でタービン・発電機を回し電気を作るもので、従来の地熱発電方式で利用することができなかった低温の地熱資源が利用可能となるメリットがあります。

国内で地熱にバイナリーを導入した実績はなく、技術ノウハウの取得等を目的とした実証研究を行うため、八丁原発電所で噴出勢力（温度・圧力）が減衰し、利用できなくなった蒸気井を熱源として、国内初の地熱バイナリー発電設備を導入しました。

平成 16 年に出力 2,000kW の発電設備を設置し、2 年間の実証研究運転を経て、平成 18 年から事業用として運転を継続しています。

本設備では、低沸点媒体として n-ペンタン (C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>, 沸点 36℃) を使用しています。

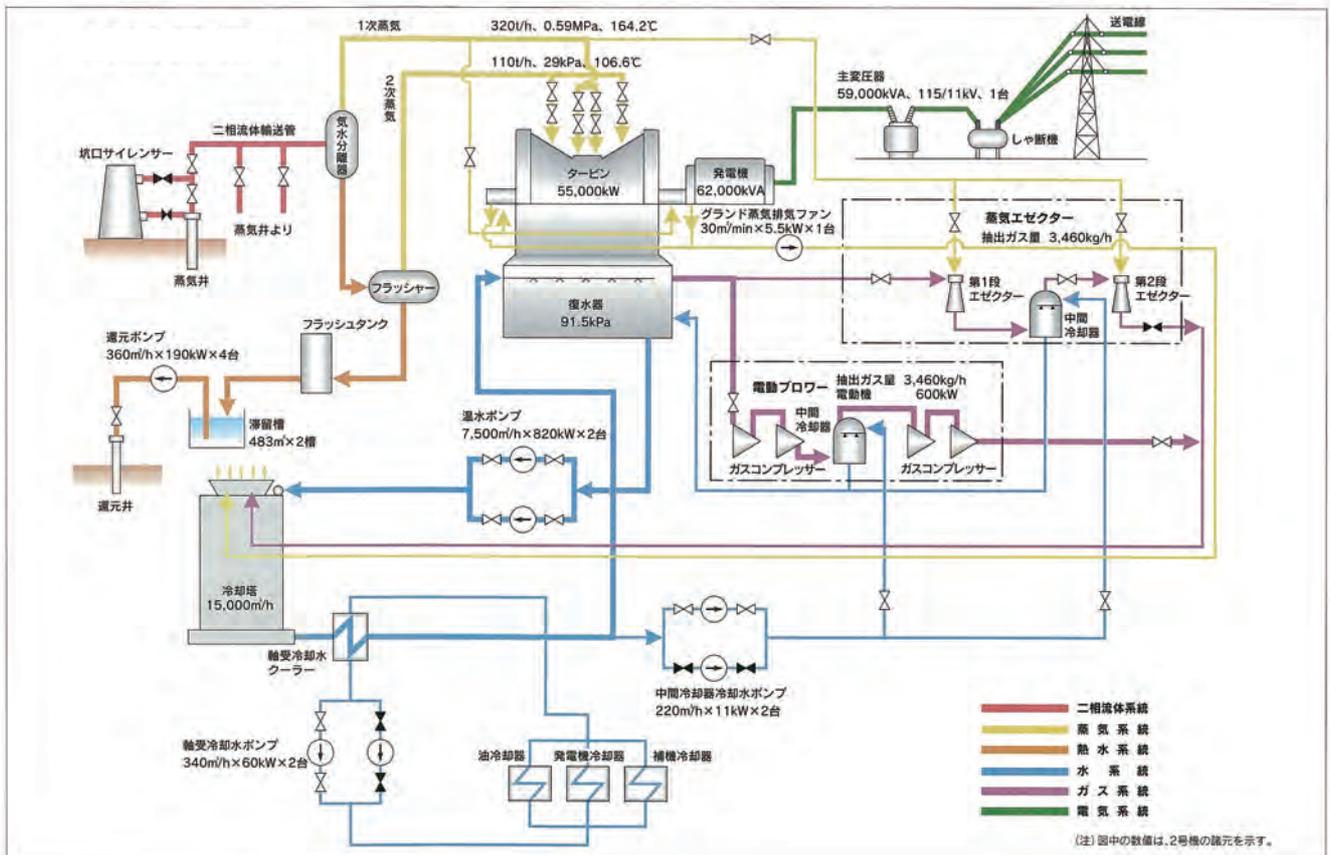


図3 八丁原発電所系統図

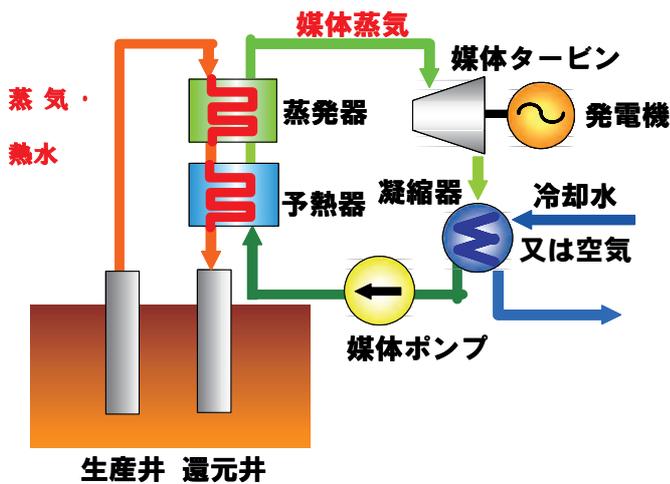


図4 バイナリーサイクル



図5 バイナリー発電設備

#### 4. まとめ

今年の6月に発表されたエネルギー基本計画では、2030年に地熱発電を1650MW（現在の約3倍）まで増加する計画となっています。地熱開発には、地元の理解や自然公園法など難しい問題もありますが、国の支援の下で計画どおり開発が進むことを期待しています。

地熱エネルギーは発電だけでなく、給湯や花卉栽培等へのカスケード利用も可能で、八丁原発電所は地元貢献に取り組んでいます。

最後になりましたが、八丁原発電所の所在地は大分県西部の九重町、阿蘇九重国立公園内、標高約1100mです。背後に九重連山を配し、雄大な自然に囲まれ、四季折々の景観を楽しめる場所にあります。

八丁原発電所には展示館を併設していますので、是非一度設備見学にお越しください。

|           |                  |
|-----------|------------------|
| 八丁原発電所展示館 | TEL 0973-79-2853 |
| 開館時間      | 9:00～17:00       |
| 閉館日       | 12/29～1/3        |



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 |
|-------|-----------------------|----------------|------|------|-----|
| 2010年 |                       |                |      |      |     |
| 5月    | 26日(水)<br>～<br>28日(金) | 第47回日本伝熱シンポジウム |      |      |     |

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   |
|-------|-----------------|--|-----------|---|---|
| 2010年 |                 |  |           |   |   |
| 8月    | 7(土)            | No.10-12「機械の日・機械週間」記念行事<br>(開催地:名古屋市西区)  |           | 社団法人日本機械学会<br>「機械の日記念講演会」係<br>〒160-0016 東京都新宿区信濃町35<br>信濃煉瓦館5階<br>Tel: 03-5360-3505 Fax: 03-5360-3509<br>E-mail: kikainohi@jsme.or.jp<br>http://www.jsme.or.jp/kikainohi/ |   |
| 8月    | 8(日)<br>～13(金)  | 14th International Heat Transfer Conference (IHTC-14)<br>(開催地: Washinton, D.C., USA)         | 2010.5.30 |   | http://www.asmeconferences.org/ihtc14/  |
| 8月    | 17(火)<br>～19(木) | 日本実験力学会 2010年度年次講演会<br>(開催場所:長崎大学)   | 2010.4.30 | 2010.6.30   | 松田浩・森田千尋・牧野高平<br>〒852-8521 長崎市文教町1-4 長崎大学工学部<br>インフラ長寿命化センター<br>Tel: 095-819-2880 Fax: 095-819-2879<br>E-mail: ilem_jsem@ml.nagasaki-u.ac.jp              |
| 9月    | 9(木)<br>～11(土)  | 日本流体力学会 年会 2010  | 2010.6.6  | 2010.7.26   | 日本流体力学会 年会 2010 実行委員会<br>Tel:03-3714-0427, FAX: 03-3714-0434<br>Email: nenkai2010@nagare.or.jp  |
| 9月    | 14(火)<br>～18(土) | 2010年度日本冷凍空調学会年次大会   | 2010.5.31 | 2010.7.30   | 〒160-0008 東京都新宿区三栄町8 三栄ビル4<br>階 社団法人日本冷凍空調学会 年次大会協<br>賛担当<br>Tel: 03-3359-5231 Fax: 03-3359-5233<br>E-mail:y.uda.pa@jsrae.or.jp (担当) 宇田                   |
| 9月    | 16(木)<br>～17(金) | 日本機械学会 第309回講習会<br>「熱・流体エネルギーシステムのフ<br>ロントニア技術を学ぶ」   | 2010.9.10 |   | (社)日本機械学会関西支部事務局<br>〒550-0004 大阪市西区靱本町1-8-4<br>大阪科学技術センタービル内<br>Tel: 06-6443-2073 Fax: 06-6443-6049<br>E-mail:jsme@soleil.ocn.ne.jp                       |
| 9月    | 27(月)<br>～28(火) | No.10-70講習会<br>「『伝熱工学資料』の内容を教材にした<br>熱設計の基礎と応用」  | 2010.9.17 |   | 日本機械学会熱工学部門(担当 大通千晴)<br>TEL:03-5360-3500  |
| 10月   | 7(木)<br>～8(金)   | 可視化情報学会全国講演会   | 2010.7.16 | 2010.8.16   | 田中和博 九州工業大学大学院情報工学研究院<br>〒820-8502 福岡県飯塚市川津 680-4<br>Tel:0948-29-7773 Fax:0948-29-7751<br>Email: kazuhiro@mse.kyutech.ac.jp                               |
| 10月   | 20(水)<br>～21(木) | 第38回日本ガスタービン学会<br>定期講演会<br>(開催地:徳島市)   | 2010.6.21 | 2010.8.30   | (社)日本ガスタービン学会<br>〒160-0023 東京都新宿区西新宿7-5-13<br>第3工新ビル402<br>TEL:03-3365-0095 FAX:03-3365-0387  |
| 10月   | 23(土)           | 「低温工学会 熱音響デバイス研究<br>会 熱音響工学講習会」  |           |   | 社団法人低温工学会<br>〒113-0033 東京都文京区本郷6-12-8<br>パレドール本郷302号<br>TEL:03-3818-4539 FAX:03-3818-4573<br>Email:LDJ04246@nifty.com<br>担当者 松村貴子                         |
| 10月   | 30(土)<br>～31(日) | 熱工学コンファレンス 2010<br>(開催場所:長岡技術科学大学)   | 2010.7.2  | 2010.9.10   | 2010年熱工学コンファレンス実行委員会<br>事務局<br>〒940-2188 長岡市上富岡町1603-1 長岡技術大<br>学工学部機械系実行委員長青木和夫<br>Tel:0258-47-9729 Fax:0258-47-9770<br>Email: aoki@mech.nagaokaut.ac.jp |
| 11月   | 2(火)<br>～5(金)   | 21st International Symposium on<br>Transport Phenomena (ISTP-21)<br>(開催地: Kaohsiung, Taiwan) | 2010.4.15 | 2010.7.26   | Email: info@istp-21.org<br>http://www.istp-21.org/  |

行事カレンダー

|     |                 |   |           |            |  |  |
|-----|-----------------|---|-----------|------------|--|--|
| 11月 | 1(月)<br>～3(水)   | The 10 <sup>th</sup> International Sympojium on Advanced Fluid Information and Transdisciplinary Fluid Integration (AFI/TFI-2010)<br>(開催場所:東北大学流体科学研究所) |           |            |  |  |
| 11月 | 4(木)<br>～7(日)   | The 5th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics<br>(開催場所:龍谷大学 大宮キャンパス)                                     | 2010.5.10 | 2010.6.30  | Takashi Yokoyama<br>Department of Mechanical Engineering, Okayama University of Science1-1 Ridai-cho, Okayama 700-0005<br>Tel. 086-256-9580 Fax. 086-255-3611<br>E-mail: yokoyama@mech.ous.ac.jp |  |
| 11月 | 17(水)<br>～19(金) | 第31回日本熱物性シンポジウム   | 2010.7.13 | 2010.9.14  | 九州大学大学院工学研究院 機械工学部門<br>熱流体物理研究室 河野 正道<br>〒819-0395 福岡市西区元岡 744<br>Tel: 092-802-3099, FAX: 092-802-3098<br>E-mail: kohno@mech.kyushu-u.ac.jp  |  |
| 11月 | 19(金)           | ステップアップセミナー2010<br>わが国企業・技術者・学生のための<br>戦略的技術経営V<br>- 新興国へのグローバル化における<br>戦略的技術経営-  | 2010.11.5 |            | (社)日本機械学会関西支部<br>〒550-0004 大阪市西区靱本町 1-8-4 大阪科学<br>技術センタービル内<br>Tel: 06-6443-2073 FAX: 06-6443-6049<br>E-mail:j sme@soleil.ocn.ne.jp<br>http://www.kansai.j sme.or.jp/                            |  |
| 11月 | 27(土)<br>～28(日) | 第34回人間-生活環境系シンポジウム  | 2010.8.31 | 2010.10.15 | 五十嵐由利子 igarasiy@ed.niigata-u.ac.jp   |  |
| 12月 | 1(水)<br>～3(金)   | 第48回燃焼シンポジウム  | 2010.7.16 | 2010.9.17  | 第48回燃焼シンポジウム事務局<br>〒819-0395 福岡市西区元岡 744<br>九州大学工学研究院<br>機械工学部燃焼科学講座内<br>Tel:092-642-3404 Fax:092-642-3404<br>Email:sympo48@combustionsociety.jp<br>http://www.combustionsociety.jp/sympo48/     |  |
| 12月 | 7(火)<br>～8(水)   | 第13回スターリングサイクル<br>シンポジウム  | 2010.7.9  | 2010.10.22 | 実行委員長 平田宏一 (海技研)<br>Tel: (0422) 41-3695/FAX (0422) 41-3607<br>E-mail:khirata@nmri.go.jp  |  |
| 12月 | 8(水)            | マイクロ・ナノエンジニアリング<br>シンポジウム   |           |            | 日本機械学会 マイクロ・ナノ工学専門会議<br>熊谷理香<br>〒160-0016 東京都新宿区信濃町 35<br>信濃煉瓦館5階<br>Tel. 03-5360-3505 Fax. 03-5360-3508<br>E-mail: kumagai@jsme.or.jp   |  |
| 12月 | 15(水)<br>～17(金) | 2 <sup>nd</sup> International Symposium on Thermal Design and Thermophysical Property for Electronics and Energy (e-Therm 2010)                         | 2010.9.10 | 2010.10.30 | 産業技術総合研究所 計測標準研究部門<br>物性統計科<br>E-mail: e-therm2010@m.aist.go.jp  |  |
| 12月 | 20(月)<br>～22(水) | 第24回数値流体力学シンポジウム<br>(開催場所:慶応義塾大学日吉キャンパス)  | 2010.9.17 | 2010.10.20 |  |  |

| 開催日   | 行事名   | 申込締切       | 原稿締切      | 問合せ先   | 掲載号 |
|-------|---|------------|-----------|--|-----|
| 2011年 |   |            |           |  |     |
| 7月    | 24(日)<br>～29(金)<br>ASME-JSME-KSME Joint Fluids<br>Engineering Conference 2011<br>(AJK2011)<br>(開催地:浜松市) | 2010.10.1  | 2011.4.1  | AJK2011 excecutive committee<br>Shizuoka University, 3-5-1 Johoku, Naka-ku,<br>Hamamatsu, Shizuoka 432-8561<br>Tel. 053-478-1601<br>E-mail: dajk2011@ipc.shizuoka.ac.jp<br>http://www.eng.shizuoka.ac.jp/~AJK2011/index.html |     |
| 10月   | 3(月)<br>～6(木)<br>第4回人間-生活環境系国際会議<br>(開催場所:北海道大学)  | 2010.12.28 | 2011.5.31 | 人間-生活環境系国際会議組織委員会事務局<br>〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目<br>北海道大学大学院工学研究科環境人間工学研<br>究室<br>Tel/Fax 011-706-6280<br>E-mail: iches2011@eng.hokudai.ac.jp   |     |

## 平成 22 年度 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・奨励賞の募集のお知らせ

日本伝熱学会は、学術賞、技術賞、および奨励賞が設けられています。つきましては、下記の要領に従って本年度の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 歳程度以内の者）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) 所定用紙

「日本伝熱学会 学術賞 申請書・推薦書」 <学術賞用 Word ファイル>

「日本伝熱学会 技術賞 申請書・推薦書」 <技術賞用 Word ファイル>

「日本伝熱学会 奨励賞 申請書・推薦書」 <奨励賞用 Word ファイル>

各賞に該当する申請書・推薦書 1 通

用紙は本ホームページからダウンロードしてご使用ください。

学術賞、技術賞、奨励賞それぞれに申請書・推薦書が異なりますので、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 22 年 12 月 17 日 (金)

### 5. 提出先および問い合わせ先:

〒569-1098 大阪府高槻市白梅町 7-1

関西大学 社会安全学部 小澤 守 宛

E-mail : ozawa@kansai-u.ac.jp Tel : 072-684-4153, FAX : 072-684-4188

平成 22 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 22 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、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：

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_



## 日本伝熱学会創立 50 周年記念 第 48 回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集

第 48 回日本伝熱シンポジウム実行委員会  
委員長 稲葉英男  
事務局長 堀部明彦

開催日：平成 23 年 6 月 1 日 (水) ～ 6 月 3 日 (金)  
会場：岡山コンベンションセンター (ママカリフォーラム) (<http://www.mamakari.net/>)  
行き方 JR 岡山駅西側直結 徒歩 3 分  
所在地 〒700-0024 岡山市北区駅元町 14 番 1 号, Tel. 086-214-1000

講演申込締切：平成 23 年 1 月 21 日 (金)  
講演論文原稿提出締切：平成 23 年 3 月 18 日 (金)  
事前参加申込締切：平成 23 年 4 月 15 日 (金)

ホームページ URL：<http://heat6.mech.okayama-u.ac.jp/nhts2011/index.htm>

### 【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定に従って下さい。
- ・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について」をご参照下さい。

### 【研究発表申込方法】

- ・原則として Web による申込に限らせていただきます。シンポジウムのホームページから必要なデータを入力して下さい。Web による申込ができない場合には、実行委員会にお問い合わせ下さい。
- ・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下さい。優秀プレゼンテーション賞セッションにお申込の場合には、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞について」をご参照下さい。
- ・発表申込時に、論文のアブストラクト (日本語で 200～250 字) を入力して下さい。講演論文集の抄録として科学技術振興機構 (JST) のデータベースに登録します。
- ・講演発表申込は、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下さい。

### 【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 Web 上において J-STAGE から公開します。会員にはパスワードを配布して、電子版を Web 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、非参加の会員にも、希望があれば配布しますので、開催後に事務局にお申し込み下さい。
- ・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 2 MB までとし、アニメーション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、論文原稿を原則として PDF ファイルで提出していただきます。PDF ファイルで提出できない場合には、変換作業料（1 件につき 3,000 円）を申し受けて、実行委員会が PDF 化を代行します。
- ・原稿提出締切日までに提出されなかった講演論文は、講演論文集（印刷版・CD-ROM）および J-STAGE に掲載されません。特に、J-STAGE の講演申込締切日と講演論文原稿提出締切日は厳密ですので、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 J-STAGE 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 J-STAGE 上で事前に公開します。参加者には当日に印刷版・CD-ROM を配布します。非参加者のうちの希望者には、CD-ROM 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、無料になります。

### 【懇親会】

- ・開催日：平成 23 年 6 月 2 日（木）
- ・会場：岡山コンベンションセンターまたは隣接ホテル  
(決定次第、本シンポジウムのホームページに掲載します。)
- ・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下さい。

**【ご注意】**

- ・講演申込の取消および講演論文原稿の差替は、準備と運営に支障をきたしますのでご遠慮下さい。
- ・論文題目と著者名が、講演申込時と論文提出時で相違しないように特にご注意下さい。
- ・口頭発表用として実行委員会が準備する機器は、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下さい。
- ・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。
- ・その他、ご不明な点がありましたら、実行委員会に E-mail または FAX でお問い合わせ下さい。

**【お問い合わせ先】**

第 48 回日本伝熱シンポジウム実行委員会  
岡山大学 大学院自然科学研究科産業創成工学専攻  
（工学部機械工学科）伝熱工学研究室内  
E-mail: [nhts48@cc.okayama-u.ac.jp](mailto:nhts48@cc.okayama-u.ac.jp)  
FAX: 086-251-8266

## 優秀プレゼンテーション賞（第48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 宮良明男

第48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機会ですので、奮ってご応募下さい。

- 開催日：平成23年6月1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80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が、詳細については現在検討中です。決定しましたら、シンポジウムのホームページに掲載します。
- 対象：企業・大学・研究機関等の技術者・研究者で、平成23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）、または入会申込中であること。注：応募資格を満足していない場合は発表できません。また、過去に本賞を受賞された方は応募できません。
- 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48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します。

〈最新情報はシンポジウムのホームページに公開します。〉



## 編集出版部会からのお知らせ —各種行事・広告などの掲載について—



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

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

| 対 象                                       | 対 応  | 具体的な手続き<br>(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<br>国内外の会議・シンポジウム・セミナー | 条件付き掲載<br>会誌：1件当たり4分の1ページ程度で掲載（無料）<br>HP：行事カレンダーに掲載しリンク形成（無料）<br>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<br>HP：条件付き掲載（無料）<br>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<br>求人広告                              | 会誌：条件付き掲載（有料）<br>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 <a href="http://www.htsj.or.jp/banner.pdf">http://www.htsj.or.jp/banner.pdf</a> 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：花村克悟（東京工業大学）：hanamura@mech.titech.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：酒井清吾（横浜国立大学）：sakai@ynu.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願います。
- ・MLでは、原則としてテキスト文の送信となります。pdf等の添付ファイルで送信を希望される場合はご相談ください。

事務局からの連絡

---

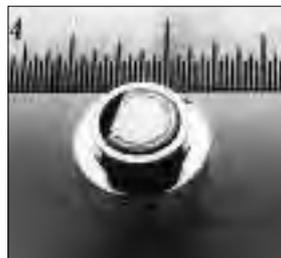
第 49 期新入会員（2010.6.30～7.31） 正 2 名

| 資 | 氏 名   | 所 属               | 資 | 氏 名  | 所 属       |
|---|-------|-------------------|---|------|-----------|
| 正 | 池内 宏樹 | パナソニック株式会社 生産革新本部 | 正 | 淵端 学 | 近畿大学 理工学部 |

# 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



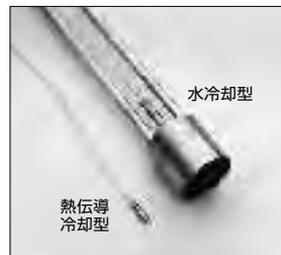
### 特徴

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

### 使用例

- エンジン内壁の熱伝達状態観察
- ロケットエンジンのトラバース実験
- 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と薄いため、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](http://www.senstech.jp)

E-mail [senstech@td6.so-net.ne.jp](mailto: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)

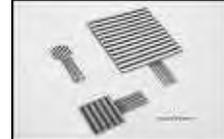
CAPTEC(キャプテック)社は、独自の高度技術により、低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化しても感度は常に一定で、熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。  
輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

#### 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/ft<sup>2</sup>sec(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2熱電対のチューブの中に第1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1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/cm<sup>2</sup>

#### 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*

きわめて身近な現象でありながら、今なお議論が尽きない“沸騰”に関する研究討論会が最近活発に行われています。そこで、その沸騰論（沸討論？）について、その一部を集約させていただきました。読むにつれ、脳内に汗が滴るのを感じ、さらにそれこそ沸騰しそうになるほどの知恵熱が発生することでしょう。伝熱研究の存在感が最も大きくなる現象の1つと考えられます。この分野に浅学な小職の稚拙な表現をお許しいただくとすると、おそらく、突き詰めれば液体、固体、気体の三相接触界線近傍における分子1個の挙動に帰着され、それが目に見える大きな気泡にまで成長するモデルが必要となり、さらに三相の物質の組み合わせによっては様相が一変するなど、果たしてこのようなマイクロとマクロをつないだ統一理論に到達できるのか、といった辺りが研究者を魅了してやまないのかもしれませんが、また、火力、原子力などの発電システムにおける蒸気発生や、様々な温度域での高密度除熱などに応用展開されるなど、その重要性は尽きないと思います。第14回国際伝熱会議においても沸騰・蒸発に関する発表件数は、合わせて91件と群を抜いています。家庭での煮物から、発電所の蒸気発生にいたるまで広範囲にわたる沸騰現象ではありますが、そこに潜む真実は1つであり、それを追い求める探究心を維持し続けていただきたいと思います。

今一度、沸騰についての議論のきっかけになれば幸いです。

花村 克悟（東京工業大学）

*Katsunori Hanamura (Tokyo Institute of Technology)*

*e-mail: hanamura@mech.titech.ac.jp*

---

|              |              |            |               |
|--------------|--------------|------------|---------------|
| 副会長          | 小澤 守（関西大学）   | 部会長        | 花村克悟（東京工業大学）  |
| 委員           |              |            |               |
| （理事）         | 石塚 勝（富山県立大学） |            | 加藤 泰生（山口大学）   |
|              | 板谷義紀（名古屋大学）  |            | 西村 伸也（大阪市立大学） |
|              | 深川雅幸（三菱重工）   |            |               |
| （評議員）        | 白樫 了（東京大学）   |            | 田崎 豊（日産自動車）   |
|              | 齊藤卓志（東京工業大学） |            | 宗像鉄雄（NEDO）    |
|              | 大村高弘（ニチアス）   |            | 木下 泉（電力中央研究所） |
|              | 小原 拓（東北大学）   |            |               |
| （オブザーバー）     |              |            |               |
|              | 高松 洋（九州大学）   |            |               |
| 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：

東京工業大学 機械制御システム専攻 花村克悟  
〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1 11-24  
Tel&Fax: 03-5734-3705, [hanamura@mech.titech.ac.jp](mailto:hanamura@mech.titech.ac.jp)