



Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692 Vol. 62, No. 258 2023. 1

Thermal Science and Engineering

ISSN 0918-9963 Vol. 31, No. 1 2023. 1



◆特集:沸騰伝熱の進展

https://www.htsj.or.jp/journals/2319.html



銅加熱面上の水の飽和プール沸騰の数値計算の結果. 0.6MW/m² で合体気泡域の激しい沸騰が観察され, さらに熱流束を増加させた 1.5MW/m² では沸騰状態が核沸騰から膜沸騰に遷移している.(特集記事「沸騰 伝熱の数値シミュレーション(佐藤陽平)」より)



サファイア伝熱面上の水の飽和プール沸騰における壁面熱伝達率分布.気泡底部の,ドーナツ状の高熱伝 達領域がミクロ液膜領域で,低熱伝達率領域がドライパッチ.気泡と気泡の間の広い領域が対流熱伝達領 域.(特集記事「高速度赤外線カメラで観察した沸騰熱伝達機構(矢吹智英)」より)



【左図】上向き水平面噴流冷却中の流動状況.赤丸で示されている位置に,高温の激しい沸騰に対しても 耐久性をもつ局所温度・熱流束計測用の微細熱電対が配置されている.(特集記事「高温面冷却中の非定常 遷移沸騰域の伝熱計測手法とその応用(光武雄一)」より)

【右図】サブクール度 20K で生じた銅伝熱面上での水の気泡微細化沸騰における気泡挙動.(特集記事「気泡微細化沸騰(上野一郎)」より)

No. 258

January

伝 熱

目 次

〈巻頭グラビア〉

佐藤 陽平 (スイス,ポール・シェラー研究所), 矢吹 智英 (九州工業大学,JST さきがけ),光武 雄一 (佐賀大学), 上野 一郎 (東京理科大学) ………表紙裏

〈追悼〉

塩冶さんを偲んで桑原 啓一((株) オフィス・クワハラ)	 1
塩冶震太郎元会長を偲んで小熊 正人(エネルギー・エージェンシーふくしま)	 3

<特集:沸騰伝熱の進展>

特集「沸騰伝熱の進展」にあたって矢吹 智英(九州工業大学, JST さきがけ)	
沸騰伝熱の数値シミュレーション佐藤 陽平 (スイス, ポール・シェラー研究所)	7
高速度赤外線カメラで観察した沸騰熱伝達機構	
矢吹 智英(九州工業大学, JST さきがけ)	13
気泡微細化沸騰」野 一郎 (東京理科大学)	18
高温面冷却中の非定常遷移沸騰域の伝熱計測手法とその応用 光武 雄一(佐賀大学)	29

〈報告〉

日本伝熱学会主催講習会「計測技術 〜温度・熱伝導率測定の基礎と応用〜」開催報告 ………………企画部会産学交流委員会:羽鳥 仁人 (ベテル),西 剛伺 (足利大学), 近藤 義広 (日立アカデミー),小林 健一 (明治大学),佐藤 航 (日立製作所), 小泉 雄大 (ナブテスコ) ……… 35

〈お知らせ〉

第 60 回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集	40
優秀プレゼンテーション賞(第 60 回日本伝熱シンポジウム)について	47
編集出版部会からのお知らせ	48

〈編集出版部会ノート〉	51	L
-------------	----	---

Vol.62, No.258, January 2023

CONTENTS

<Opening-page Gravure: heat-page>

Yohei SATO (Paul Scherrer Institute, Switzerland),
Tomohide YABUKI (Kyushu Institute of Technology, JST PRESTO),
Yuichi MITSUTAKE (Saga University),
Ichiro UENO (Tokyo University of Science) ······ Opening Page

<Eulogy>

In Memory of Dr. Enya	
Keiichi KUWAHARA (Office Kuwahara, Ltd.)	1
In the Memory of Dr. Shintaro Enya	
Masahito OGUMA (Energy Agency Fukushima)	3

<Special Issue: Progress in Boiling Heat Transfer>

Preface to "Progress in Boiling Heat Transfer"
Tomohide YABUKI (Kyushu Institute of Technology, JST PRESTO)
Numerical Simulation of Boiling Heat Transfer
Yohei SATO (Paul Scherrer Institute, Switzerland)
Boiling Heat Transfer Mechanisms Observed by High-speed Infrared Thermometry
Tomohide YABUKI (Kyushu Institute of Technology, JST PRESTO) 13
Microbubble Emission Boiling (MEB)
Ichiro UENO (Tokyo University of Science) 18
Measurement Technique and Its Application to Transient Transition Boiling Heat Transfer during
Quenching of Hot Surface
Yuichi MITSUTAKE (Saga University)

<Report>

	Report on the Lecture "Measurement Technology, Foundation and Application of Temperature	
	Measurement and Thermal Conductivity Measurement"	
	Kimihito HATORI (Bethel), Koji NISHI (Ashikaga University),	
	Yoshihiro KONDO (Hitachi Academy), Kenichi P. KOBAYASHI (Meiji University),	
	Wataru SATO (Hitachi) and Katsuhiro KOIZUMI (Nabtesco)	5
<	< Calendar > 3	9
<	Announcements >	0
<	Solution (Note from the JHTSJ Editorial Board >	51

塩冶さんを偲んで In memory of Dr. Enya

塩冶さん(塩冶震太郎様と呼ぶべきかもしれな いが,親しみを込めてこう呼ばせていただく)と 初めてお会いしたのは,私が修士の時であった. その後塩冶さんがおられた石川島播磨重工業(株) (現(株) IHI)に入社し,ずっとお付き合いをい ただいた.

2019 年暮れから体調を崩され,ここ2年余りは 入退院を繰り返しておられたが,昨年7月末に逝 去された(享年87歳).コロナ禍のため,お会い することが叶わなかったのが心残りである.今も, 精神的支柱を失い喪失感にとらわれている.

塩冶さんは、1935年生まれで山口県出身である. 横浜国立大学工学部を卒業後就職されたが、再度 学問の道に入り東京大学大学院博士課程で橘藤雄 先生の指導を受けられ、昭和42年に「焼入れにお ける沸騰熱伝達」で工学博士号を取得された.石 川島播磨重工業株式会社(現 IHI)入社後は、熱 流体関連機器の研究・技術開発を牽引され、技術 研究所所長を経て技術専門系トップの首席技監を 務められた.

社外では,日本伝熱学会第41代会長(2002年 -2003年),横浜国立大学監事などの要職を歴任された.

IHI の熱流体関連機器(プラントの熱交換器, 極低温貯蔵タンク,原子力関連,航空宇宙関連) の研究開発の全てに貢献されたといっても過言で はない.

LNG 貯蔵タンクのロールオーバー現象につい ては、シミュレーションおよび実験により、現象 の解明と最適設計手法を検討し、その後の日本の LNG 発電の道を作られた.

IHI の今後の事業の柱と考えられる航空宇宙部 門の宇宙実験やロケット推進系の微小重力下にお ける熱流体機器の技術開発を,リーダーシップを 取り研究所の熱流体関連以外の部門も巻き込んで 対応された.その中で,日本初のスペースシャト 桑原 啓一 (㈱オフィス・クワハラ) Keiichi KUWAHARA (Office·Kuwahara, Ltd.) e-mail:keiichi@a05.itscom.net



塩冶 震太郎 様

ル利用実験 First Material Processing Test (FMPT) では,実験装置の開発や研究者として実験を行わ れた (テーマ名: 無重力下での材料製造過程にお けるマランゴニ対流の研究).

IHI は多数の研究プロジェクトに参画したが, 塩冶さんの存在なくてしては実現できなかったで あろう.上記の FMPT,サンシャイン計画プロジ ェクト(太陽熱冷暖房)およびニューサンシャイ ン計画,ヘリウムガスループや液体ナトリウムル ープを用いての原子力熱機器の開発などがあげら れる.

また, IHI の今後を考え, バイオサイエンスの 先鞭をつけられ,「複雑系」の勉強会を立ち上げら れた.

最後になるが、塩冶さんの最大の功績は、人材 の育成である.部下には、「ライフワークを持つよ うにしなさい」と常々言われ、仕事面でも配慮い ただいた記憶がある.部下の出身研究室とのつな がりを継続することを大事にされ、企業と大学と の良い関係を築くことに腐心された.それが、多 数の部下が博士号を取得することにつながった.

塩冶さんは、写真(1993年頃)のようにいつも

笑顔で優しい印象があるが、中身は活火山でとに かく前進のみであった.大学卒業後、他の会社に 就職したが、仕事が面白くないので退職して大学 院に進んだことや、新入社員の頃は毎日、何かを やっつけてやろうと出社していたと本人からお聞 きした.また、出身研究室が同じであり同い年の 故棚澤一郎先生とのつながりは深く、お互いに刺 激しあう素晴らしい関係であった.塩冶さんの著 書「エネルギー工学のための伝熱工学の基礎」(オ ーム社、1972年)への棚澤先生の監修のことばに、 「企業人には珍しく学問的几帳面さを持った方で ある」とあり、私も仕事でのやり取りで強くそれ を感じていた.

塩冶さんは,現役を退いてからも社会に貢献し たいという思いが強く,NPO 法人での幹事役, 様々な研究会のメンバーとして活動されるととも に多数のセミナーへ参加されていた.現役時代か ら交流のあった建築関係の方が立ち上げた研究会 では,後進の指導にあたられるとともに,若い人 達に人生観を伝えておられた.また,私をその研





究会に誘ってくださったり,私の学会活動を何回 かサポートいただいたりして,最後までお世話に なりっぱなしであった.

塩冶さんは,話が長い(研究会での話題提供お よび結婚式でのスピーチ等,唯一の欠点?)とい う定評があった.ただし,これは,伝えたいこと がたくさんあることの裏返しで,それがあふれ出 てくるのであろう.語り口も熱く,情熱にあふれ ていた.

プライベートでは、修士以来のテニスと IHI 入 社後に年数回の塩冶さんを囲む飲み会(塩冶さん には申し訳ないが、伝熱若手をもじって、伝熱苦 手(にがて)の会と称した)にずっとお付き合い いただいた. 左上の写真は、2017 年 8 月に塩冶さ んを囲んだものである. 北海道や東北からも参加 してもらった.

また,私が 60 代後半に猛暑にも関わらず,テニ スをしていたのを,知っておられたかは定かでは ないが,スポーツ工学のセミナーに参加され,塩 冶さんがまとめられた熱中症の科学的な内容のレ

> ポートをいただいた.私にとっては, 塩冶さんの遺稿であり,テニスバッグ に忍ばせている.

> 2018年7月に昼の研究会の飲み会と 夜の出身研究室のコンパでご一緒した と記憶している.私は,その間に東京 の中心と郊外の橋本を往復して学会の 理事会で出席したので,特に思い出に 残っている.塩冶さんとじっくり酒を 酌み交わした最後となった.

> 左下は、なぜか私の手元にあった橘 研コンパ(1961 年頃)の写真である. 塩冶さん(右から2人目)と棚澤先生 (左から4人目)が一緒に写っておられ る貴重なものである.

> 最初の写真, 伝熱苦手の会の写真と 合わせると, 塩冶さんのほぼ 60 年の写 真史となっている.

> 不肖の部下の追悼文をきっと塩冶さ んはまだまだと苦笑しながら読んでく ださるであろう.

> これまでご指導いただいた塩冶さん に深く感謝を申し上げるとともに心か ら哀悼の意を表します.

塩冶震太郎元会長を偲んで In the Memory of Dr. Shintaro Enya

小熊 正人 (エネルギー・エージェンシーふくしま) Masahito OGUMA (Energy Agency Fukushima) e-mail: oguma@f-open.or.jp

第41代会長の塩冶震太郎先生が去る7月28日 にご他界され,既に近親の方々で御葬儀が行われた との訃報に接したのは,8月22日のことでした. 塩冶先生に公私共に御高配を頂いた一人として,心 よりご冥福をお祈り申し上げます.

塩冶先生の御略歴や御活躍の詳細は桑原さんの 追悼文をご覧いただくこととして、小生は先生に関 わる思い出を書かせていただくことで追悼文とさ せて頂きたく存じます.

塩冶先生との最初の出会いは、石川島播磨重工業 に入社時の配属先の部門長として、入社直前に面談 した時です.因みに地方の大学出で、且つ伝熱にお ける専門分野が先生とは異なる自分にとっては、塩 冶先生が既に産業界ならびに学界において確固た る地位を築かれている方とは全く知りませんでし た.

当時,会社の人事部に出された塩冶先生の新入社 員に対する要望は「伝熱分野に対して広く知識を有 しており,さらに材料,電子・電気関係や制御技術 に対しても対応できる人材」であり,極めて高度な 要求でした.これを人事担当から紹介された時には, 自分はこのような要望に対応できる人材ではない と回答したことを覚えております.

塩冶先生は,先生の専門分野とは異なる「宇宙分 野の技術開発」を御担当されておりましたが,今か ら思えば「宇宙」という総合的な技術開発に携われ ていた御経験から,既にこの時には「伝熱」という 狭い概念で止まるのではなく,関連した周辺技術も 対応できるような人材の育成がこれから重要との ビジョンをお持ちだったのだと思います.

そのような観点からと思いますが,学会活動に参

加できる機会が少ない地方出身の大学出の新入社 員の「幅」を拡げるために,入社直後から塩冶先生 から当時の著名な数多くの大学の先生を御紹介い ただきました.東大の棚澤先生や西尾先生,東北大 の相原先生,慶應大の長島先生など,当時の学会の 重鎮の先生と面識ができたことはその後の自分の 研究開発活動に大きな支えとなりました.

塩冶先生は原子力の伝熱分野では高名な方,との 話を大学の恩師から受けた時には、かなり厳格な方 とのイメージがあったのですが、実際にはかなり違 いました.

金沢での第25回伝熱シンポジウムの帰りの列車 で,塩冶先生,東大の西尾先生,筑波大の成合先生 そして自分の4名で一緒にボックス席に座り,金沢 から越後湯沢まで缶ビールを手にしながら大声? でいろいろなことを談笑したことを覚えておりま す. その中に塩冶先生しか知らなかった小生の私事 までその場で塩冶先生が話してしまったものです から、それ幸いと話の肴になってしまい、大声で皆 さんから揶揄されてしまったことも覚えています. 今から思えば赤面してしまう話題ですが懐かしい 思い出です(なおこの缶ビールは列車内に1台しか ない自動販売機で販売していたものですが,始発直 後から買い続け,遂には空になるまで買い占めてし まいました.同列車の乗客の皆さまには多大なる御 迷惑をおかけしたのではないかと思います. 西尾先 生,成合先生,塩冶先生と私という買い占めチーム を代表してこの場を御借りしてお詫びいたします). その際,塩冶先生から,自分の若い時は出張時でも よく昼間からビールを飲んだことはあったが,今は そのようなことは許されなくなったね、と言われ、 普段のお姿からは想像できず意外な気がしたもの です.

このように学会でご一緒させていただくことは 多かったのですが、塩冶先生は学会恒例の懇親会に はあまり参加されていませんでした.後日、その理 由をお尋ねしたことがあります.塩冶先生曰く、多 くの日頃からお世話になっている大学の先生や関 係者が懇親会に参加している.もし参加すれば、こ れらの方々全てに挨拶をしなければいけないが、そ のようなことはかなり困難.もしその場で挨拶でき なかった方がいるならばその方に対して非礼にあ たる.それならば最初から参加しない、ということ でした.塩冶先生のネットワークの大きさに驚きま したが、このようにかなり繊細な気遣いをされる方 でしたので、自分としてはある意味、無用な気遣い されないように日頃より気をつけていたものです.

塩冶先生は技術には厳しい方で,自分は塩冶先生 のご指示に従って仕事を進めていましたが,一度だ け意見が合わなかったことがあります.

塩冶先生が請け負った機器開発で,なかなか問題 解決の緒が見えなかったプロジェクトがありまし た.その解決のため,入社からさほど日が経ってい なかった自分が新たに指名されたのですが,塩冶先 生は「伝熱手法」によって解決しなさいという指示 に対して,小生は「化学手法」で解決するべきだと 主張し譲りませんでした.

早期に解決しなければいけない状況の中で,なか なか塩冶先生と合意できない日々が続きました.こ のプロジェクトは経験の浅い自分にとってはかな りハードだったこともあり,周りの心配を他所に塩 冶先生には無断で休暇をとって旅行に出掛けたこ ともあります. 誰にも知らせていなかった旅行先ま で塩冶先生が連絡を取りにまいりましたので,塩冶 先生のお怒りは相当だったのではないかと思いま す.ただ出社した際には詰問されることはなく,ま たどのような御判断があったのかはわかりません が、小生の解決案を受け入れていただきました.こ の問題を解決した以降,社内プロジェクトの責任者 を拝命することが多くなりましたので,自分に対し て信頼をおいていただいたのではないかと思いま す.また自分も何かと塩冶先生に御相談することが 多くなり,いろいろなお話しを聴けるようになった ように思います.

小生は入社時からある意味で「要注意社員?」で した.そのため塩冶先生には余計なご苦労をおかけ したのではないかと思い,事あるごとにお詫びいた しましたが、常にお笑いになりながら受け流してお られました.ただどうもこいつは組織枠に嵌らない 社員ではないかと見ておられたと思われ, 小生の将 来を案じられて新天地のご紹介を塩冶先生から受 けたときは、幾分悩みもしましたが塩冶先生のお話 しでしたのでお受けしました.しかしながら折しも 政権交代と重なり、このお話しが流れてしまった際 には、事あるごとにお気遣いいただき、また私事も 含めて何かと親身にご相談に乗っていただきまし た.後に国の東日本大震災復興支援技術開発プロジ ェクトに関係して東北の大学に職を得たことを,真 っ先に御報告させていただき, 塩冶先生からは「よ かったね」とのお言葉をいただきました. それまで 大変なご心配をおかけしたことは大変申し訳なく 思っております.

大学で携わったこの国の復興支援技術開発プロ ジェクトでは客観的な技術評価が必要と考え,自主 的に外部の技術評価委員会を設置することとし, 塩冶先生のご参加を前提に,委員長にはどなたにお 願いすればよいかの御相談をさせていただきまし た.その結果,塩冶先生から棚澤一郎先生に委員長 就任をお願いしていただくことになりました.当時, 棚澤先生は体調がすぐれないことが多く,このよう なお話しはお引き受けされないようでしたが,塩冶 先生の頼みということで引き受けられたと後日伺 いました.この復興支援プロジェクトを推進するに あたっては,棚澤先生と同様に大変なご支援を頂い たと感謝しております.また現地郡山においても市 長とは面識があり,市長から何度も塩冶先生のお名 前が出ていたことも思いだされます.

委員会の場での塩冶先生は、プロジェクト側の立 場を鑑みて厳しいコメントはされませんでした.し かし個別にお話しすると柔らかいロ調ではありま すが、厳しいコメントを頂くことが多かったことを 記憶しております.健康には日頃より気を配る方で したが、この頃から体調がすぐれないことが多くな ったように思います.特に冬季になると首都圏から 寒い東北へのお出かけは避けられるようになりま した.それに伴って現地郡山で開催した委員会を欠 席されることが増えましたが,塩冶先生はプロジェ クトの状況を常に気にかけておられました.

桑原さんの追悼文にもあろうかと思いますが,年 に何回か開かれた石播 OB メンバーの集まりが有 りましたが,その時にプロジェクトの状況を聞かせ て欲しいとお話しが必ず有りました.そこでこの集 まりの 2 時間以上前に塩冶先生と東京駅八重洲中 央ロで待ち合わせし,地下街の適当な喫茶店で小生 が状況を説明するのが常となっていました.もちろ んですが,その時にも塩冶先生からは物静かで柔ら かい口調ではありますが,内容が厳しいコメント, お叱りとともに励ましもいただいたことは,自分に とって一生忘れない思い出だと思っております.

昨今の熱エネルギー事情は不透明感が増してお り、またともすれば過去に諸先輩のご苦労によって 明らかにした技術課題が再度俎上にのることがあ りますが、既に諸先輩によって結果が出ている研究 テーマが多いように思えます.そのような時に、塩 冶先生のような方に,若い研究者が御指導いただけ ればもっと良い成果を導き出せるだろうにと感じ るところです.

このように塩冶先生とは石川島播磨重工業入社 時から約35年間のお付き合いをさせていただきま した.その中で,極めて貴重な数々のご指導ならび にご支援を賜わりました.塩冶先生の訃報に接した 時には,塩冶先生との思い出が走馬灯のように流れ, 実は今でも信じられないというところが正直な思 いです.

先生が他界されてから東京駅には行っておりま せんが,八重洲中央ロに降り立った時,塩冶先生の お笑いになったお顔を思い出すような気がしてな りません.

最後にご冥福をお祈り申し上げるとともに,今ま でのご高配に感謝して追悼といたします.



ある日の石播 OB の集まり(右から2番目が塩冶先生,左から2番目が筆者)

特集「沸騰伝熱の進展」にあたって Preface to "Progress in Boiling Heat Transfer"

矢吹 智英(九州工業大学, JST さきがけ) Tomohide YABUKI (Kyushu Institute of Technology, JST PRESTO) e-mail: yabuki.tomohide556@mail.kyutech.jp

沸騰伝熱は、単相対流熱伝達やふく射伝熱など と比較して高い熱伝達率をもち、高発熱密度体の 冷却に有用な現象です.沸騰研究は約100年の歴 史をもち、沸騰の理解、予測、制御を目的として 理論、実験、数値計算により世界中で研究が展開 されてきました.産業における沸騰の重要性だけ でなく、壁面上でダイナミックに運動する気泡や 界面の姿の美しさが、沸騰が多くの研究者を魅了 してきた理由の一つと想像します.

沸騰の研究がなかなか終わらないのは,沸騰が 内包する素現象のマルチスケール性と固気液三相 の相互作用に由来する現象の複雑さゆえに,精密 な現象観察が難しいためと考えます.しかしなが ら,ハイスピードカメラの性能向上,レーザー計 測技術や MEMS 技術の登場,感温塗料や高速度赤 外線カメラなどの壁面温度分布計測技術の発展,

二相流数値計算技術の発展,計算機能力の飛躍的 向上などを背景にした実験・数値解析技術の進化 の助けを受けながら沸騰の研究は進展してきまし た.現代においては,今と比べると限られた研究 資源しかない中で先人たち(諸先輩)が想像力を 働かせながら築き上げてきた理論や仮説を,実験 や数値計算で直接検証して現象の理解を深めると ともに,何が真にわかっていないのかをあぶり出 すことが可能になってきました.理論や洞察力に 長けた先人に現代の実験・数値計算技術を手渡せ たとすれば,鬼に金棒で沸騰研究はずいぶんと早 く進むのだろうとたまにふと空想します.

本特集では、核沸騰熱伝達機構に関する話題を 二件と、通常の核沸騰より現象の時空間スケール が小さくなり実験・解析が難化する高温・高熱流 束における沸騰や濡れに関する話題を二件取り上 げました.

スイスのポール・シェラー研究所の佐藤陽平氏 には、核沸騰の数値計算の最新動向を紹介してい ただきました.まず、二相流の数値計算法につい て概説していただき,その後,いくつかの計算例 を示す中で現状の数値計算技術でどのようなこと が解析可能なのかを示していただきました.気泡 底部のミクロ液膜も直接解析する沸騰の数値計算 が単一気泡に対する軸対称二次元系であれば実現 されていること,大規模計算で限界熱流束現象が 観察されていることなど大変興味深い結果が紹介 されています.

矢吹からは,高速度赤外線カメラを用いた壁面 温度分布の可視化を通じて調べた核沸騰の熱伝達 機構について紹介する機会をいただきました.

東京理科大学の上野一郎氏には,高サブクール 度条件で限界熱流束を超える高い熱流束で生じる 気泡微細化沸騰 MEB の研究動向を,現象の特徴 のわかりやすい説明とともに解説していただきま した.沸騰音と沸騰気泡挙動の関係,MEB 遷移直 前で生じる特徴的な気泡挙動と熱流束低下,温度 分布計測が示唆する濡れの発生機構など,大変興 味深い結果をご紹介いただきました.さらなる現 象理解に向けた課題にも触れていただきました.

佐賀大学の光武雄一氏には,高温面の非定常冷却過程で生じる沸騰遷移に関する研究を,捉える べき現象や特性点の詳しい説明と併せて紹介して いただきました.高温の激しい沸騰に対しても耐 久性をもつ微細熱電対と逆問題解析を組み合わせ た高速局所表面温度・熱流束計測技術で観察され た,濡れ先端およびその周囲での高速で大きな熱 流束変動とその解釈や非定常冷却過程と他の沸騰 系との関係などについて大変興味深い結果を示し ていただきました.

沸騰研究の最新動向の一部分ながらも重要な題 材に触れた本特集号が,読者の皆様にとって有意 義なものであることを願っております.三人の先 生方には,ご多忙のところ記事の執筆をお引き受 けいただきました.この場を借りて感謝申し上げ ます. 沸騰伝熱の数値シミュレーション Numerical Simulation of Boiling Heat Transfer

1. はじめに

沸騰伝熱を用いる機器は、よほど単純な機器を除き、内部の熱流体の沸騰状況を直接観察することが 難しいことが多いため、数値シミュレーション (Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation)で 沸騰を伴う流れを再現したいという要望がある.最 たる例は、沸騰型原子炉の圧力容器の中の沸騰流れ である.高圧および高放射線下、さらには複雑な機 器構造の中で、カメラ等で沸騰流れを光学的に直接 観測することは、極めて困難である.従って、圧力 容器内で沸騰伝熱に関する問題が発生した場合、計 測データ(数十箇所の流量、圧力、温度および中性 子線量等)だけではなく、冷却水流れの数値シミュ レーションを補完的に用いることにより、問題をよ り正確に把握することができる.

沸騰伝熱を数値シミュレーションする*工学的*な 主な目的としては,核沸騰から膜沸騰への遷移の推 定が挙げられる.この遷移は、熱流束がある限界値 (限界熱流束, Critical Heat Flux (CHF)) を超えると 発生し[1],機器の急激な温度上昇をもたらす.一方, 数値シミュレーションの*基礎科学的*な目的として は、沸騰現象のメカニズム解明が挙げられる. 核沸 騰領域における熱伝達率は, 50,000 W/m²·K 以上に 達するが、これは沸騰を伴わない水冷の熱伝達率 (1,000~5,000 W/m²·K) [2]に比べて一桁大きい. そ の主要因として、一気圧の水の核沸騰では、沸点 (100℃)に保たれた気液界面(蒸気泡の表面)が, 直接,高温の壁面に接するため,その接線で巨大な 熱流束が発生することが挙げられる. それ以外の要 因として、次のようなメカニズムも提案されてい る: ミクロ液膜による伝熱の促進, 気泡の壁面離脱 に伴う対流による伝熱の促進等.これらのメカニズ ムで定義される熱流束を,実験で計測することは難 しいが,数値シミュレーションでは算出可能である ため、シミュレーションにより、沸騰伝熱のメカニ ズムを解明することが可能となる.ここで、ミクロ

佐藤 陽平 (スイス, ポール・シェラー研究所) Yohei SATO (Paul Scherrer Institute, Switzerland) e-mail: yohei.sato@psi.ch

液膜とは,成長気泡と伝熱面の間に生成される薄い 液膜で,図1に示すように,透明なヒーターを用い た実験で,干渉計により厚さの分布が計測されてい る.



Temperature drop due to micro-layer

☑ 1 Growing bubble (top row), microlayer formed underneath a growing bubble detected by an interferometer (middle row), and temperature distribution (bottom row) [3].

2. 数値シミュレーション法

さて, CFD シミュレーションで, 沸騰に伴う全て の現象を再現できれば良いのだが,残念ながら話は そう単純ではない. CFD では,計算空間を格子(グ リッド)で分割(空間離散化)し, Navier-Stokes(NS) 方程式やエネルギーの式などを解くため,基本的に は、格子サイズ以下の現象は解像できない. 解像で きない現象は、無視するか、サブグリッドモデルと して新たに定式化 (モデル化) することとなる. 従 って, 用いる格子サイズによって, サブグリッドモ デルは変わってくる. 例えば, 100 μm 程度の計算 格子を用いた場合,次の現象をモデル化する必要が ある:(1)壁面の凹凸とそこから発生する初期気泡, (2) 成長気泡と壁面の間に生成されるミクロ液膜, (3) 格子サイズより小さい気泡.もし1 µm 程度の 細かい格子が使える場合、ミクロ液膜(2)は解像 でき、より小さな気泡(3)を取り扱える.しかし、 壁面の凹凸や濡れ性が初期気泡に及ぼす影響(1) は、ナノメートルサイズの現象であるので、流体を 連続体として取り扱う CFD ではなく, 分子動力学 (molecular dynamics) で取り扱うのが適切である[4].
 沸騰現象の大きさのスケールと、シミュレーション
 手法を図2にまとめる. 図中の Single-fluid model 法が、1 µm 程度の格子を使った CFD 計算に相当する.

計算領域がメートルサイズに達する場合,計算格 子の大きさが mm から cm のオーダーとなることも ある.沸騰は、極小の気泡から始まるため、mmや cm の大きさの格子では、気泡が合体して格子サイ ズにならない限り,気泡を解像することができない. この様な場合,気泡や気液界面を捕捉することをあ きらめ,計算格子内の液体/気体の体積分率を計算 する手法を取ることとなる(図2の two-fluid model /Eulerian approach). この手法では,気液界面を捕獲 できないため, 例えば上昇気泡のシミュレーション では、図4bのように気液の体積分率が計算結果と なる.なお、気泡の結合や分裂など気液界面の挙動 は、実験値に基づく値で近似されるため、two-fluid model の計算結果の信頼性は一般的に低いが、数メ ートルオーダーの大きい計算領域内における沸騰 流れを計算できる利点がある.



Molecular dynamics

 \boxtimes 2 Length scale of boiling phenomena and corresponding simulation approach.



☑ 3 Boiling of water near hydrophilic zirconium using molecular dynamics [4]. Because of the hydrophilicity, liquid layer exists underneath vapor phase (yellow surface).



☑ 4 Bubbly flow simulation using (a) single-fluid model and (b) two-fluid model.

З. Single-fluid model

3.1 沸騰シミュレーションの支配方程式

Single-fluid model では、各格子点に速度ベクトル、 圧力,温度,および気液体積分率を定義する.速度 や温度が、気液どちらの相の値なのかは、気液体積 分率に依存する.支配方程式は,一組のNS方程式, エネルギー保存方程式,および気液体積分率の輸送 方程式となる.相変化を考慮して気液体積分率の輸 送方程式を解くために, Volume Of Fluid (VOF) 法 [5,6], Level-Set 法[7-9], Phase-Field 法[10,11]など, 様々な計算方法が開発されてきた.いずれの手法に おいても,気液界面は捕捉/解像されており,相変化 に寄与する気液界面周りの熱流束を直接計算する ことが可能である.例えば、図5に示すように、境 界条件として気液界面の温度に飽和温度 T_{sat}を与え, 界面の法線ベクトル ñを用いて,気液各相から気液 界面への熱流束, q_v および q_l を算出することが可能 である.この熱流束の和が相変化に使われるとして, 相変化率は $(q_v + q_l)/L$ [kg/m²s]と計算される.ここで L[J/kg]は相変化に伴う潜熱である.相変化に伴う体 積変化は、NS 方程式の体積保存において、source term として取り扱われる.

なお、2章でも述べたが、気液界面を捕獲するた めには、解像したい蒸気気泡よりも小さな計算格子 が必要となるため、大きい計算領域内の流れを計算 するには大型計算機が必要となる.また、気泡を含 む流れ場は非定常現象としての取り扱いが必要な ため、定常状態のシミュレーションよりも一~二桁、 計算量が多くなる.



 \boxtimes 5 Heat flux calculation around the liquid-vapor interface in a single-fluid model [6].

3.2 Single-fluid modelのシミュレーション例

シミュレーション例として,図1に示す単一気泡 の核沸騰を紹介する.図1から読み取れるように, ミクロ液膜下の壁面は,熱伝達率が高くなり冷却さ れる.もし液膜が形成されなければ、それ程高い熱 伝達率は得られない. ミクロ液膜が形成されるかさ れないかは,温度,圧力,液体の種類などに依存す るが、その条件は未解明である.そこで、ミクロ液 膜形成のメカニズム解明を目的に,数値シミュレー ションを用いた研究が行われている[12-14].図6に 数値シミュレーション上で形成されたミクロ液膜 を示す. ミクロ液膜を捕獲するために、 サブミクロ ンの非常に小さな格子(0.5 µm)を用い, さらに, 格子数を減らすために二次元軸対称の座標系で計 算する必要がある.数値シミュレーションでは,温 度, 圧力, 流体の物性値などを自由に変えることが できるため,実験で形成条件を探索するよりも簡易 である.なお, Bures ら[13]によると、 ミクロ液膜が 形成されるのは、気泡の膨張速度が、濡れ性による 気液界面の壁面上の移動速度を上回った場合と結 論付けられている.





二つ目の例として,直径 20 mm の銅ブロック加 熱面上の水の飽和沸騰のシミュレーション[15]の 結果を図7に示す.計算の目的は、限界熱流束の推 定であるため、投入熱流束は最大 1.5 MW/m² と大 きな値に設定されている.図中,投入熱流束が 100 kW/m²と低い場合は、孤立気泡が生成され、熱 流束が増大するに伴い,気泡が壁面上で合体して巨 大気泡が形成されていることが分かる.熱流束が 1.2 MW/m²以下では、温度場が準定常状態に達する ことができたが、1.5 MW/m²では、核沸騰から膜沸 騰に遷移して,銅ブロックの温度が上昇し続ける結 果となっている.なお,このシミュレーションでは, 計算領域が大きいため,一つ目の単一気泡の計算で 用いたサブミクロンの格子を使用できず、約 100 µm の格子を採用している. このサイズの格子 では、ミクロ液膜を解像することはできないため、 ミクロ液膜はサブグリッドモデル[16]して取り扱 われている.また、発泡点密度は、実験での計測値 を壁面上の境界条件として与えている. シミュレー ションと実験で得られた沸騰曲線の比較を図8に 示す.計測結果のバラツキは大きいが,最大熱流束 も含めて比較的良い精度で一致している.このシミ ュレーションは、総格子点数 3100 万点の非定常計 算であり、512 コア用いて一週間程度で計算された ものである.

三例目として,強制対流下でのサブクール沸騰流 動沸騰のシミュレーション結果を図9に示す. サブ クール沸騰とは、流入水の温度が飽和温度未満の条 件での沸騰を意味し, 伝熱面近傍では沸騰, 伝熱面 遠方領域では凝縮が発生することを特徴とする.沸 騰と凝縮は、計算上、相変化率の負号が変わるだけ なので,同じアルゴリズムで計算可能だが,流入水 の温度が飽和温度より著しく低い場合,気液界面近 傍の温度勾配が大きくなるため,細かい計算格子が 必要となる.この計算例では,75 μmの立方体計算 格子が用いられているが,薄い温度境界層を捉える には、格子が大きすぎると言える.しかし、総格子 点数は1.3 億点に達し、数百万タイムステップ以上 の非定常計算を必要とするため,通常のクラスター 計算機ではこれが限界であろう. 流入口付近では核 沸騰が起こり,下流に行くに従い,蒸気泡が合体し, 核沸騰と膜沸騰を行き来する状態に至っている.図 中の左上に示す通り,計算された壁面温度は実験値 とよく一致している. 単純な矩形流路内の沸騰流れ



ではあるが, 強制対流を伴う, 工学的に意味がある

シミュレーションとなっている.

through the copper block for the saturated pool boiling simulation with different applied heat fluxes [15].



 \boxtimes 8 Comparison of overall heat transfer coefficient between the experiment [17] and simulation [15].

Condition: Water at 2 bar (T_{sat} = 120°C), applied heat flux: 1100 kW/m2 (= 90% CHF)



3 Forced convective subcooled flow boiling simulation using single-fluid model [18].

4. Two-fluid model (Eulerian approach)

4.1 Two-fluid modelの支配方程式

Two-fluid model では、各計算格子に、液相の速度 ベクトルと気相の速度ベクトルを別々に定義する. これらの速度は、各相の NS 方程式を解くことによ り求められる.解くべき NS 方程式の数は、singlefluid model の二倍となる.ある格子点において、液 相と気相の速度が異なる場合、液相と気相間に相互 間力(interfacial forces)が働くが、two-fluid model で は、気液界面が解像されていないため、interfacial forces はモデル化した値(モデル式)を用いて算出 される.温度場についても、速度場と同様に、各計 算格子に、液相の温度と気相の温度を定義し、それ ぞれの相のエネルギー保存の方程式を解くことで、 温度を算出する.気液相間の伝熱(interfacial heat transfer)は、interfacial force と同様に、モデル式を 用いて計算する.

沸騰による相変化率は,通常,各格子点における 気液相の温度と飽和温度の差を用いたモデル式で 算出される.また,壁面上での核沸騰では,活性な 発泡点の密度,離脱気泡径,気泡離脱頻度のモデル 式が必要となる.

上記のように, two-fluid model では, モデル式を 用いて定式化するが, それらの式は, 実験結果に基 づく式であり,モデル式の適用範囲を超える場合の 有効性は疑わしい. 例えば, interfacial forces の一つ の要素として,気泡上昇に伴う抵抗力があり,抵抗 力の計算には層流域の単一気泡の実験から得られ た近似式が使われるが,通常のシミュレーションで は、乱流領域に複数の気泡が存在するため、モデル 式の適用範囲を超えていると言える.別の例では, 離脱気泡径や気泡離脱頻度等は流れ場と温度場に 大きく依存してしまうが,モデル式がその影響を考 慮しきれていない. 結論として, two-fluid model を 用いた沸騰流れでは,モデル式を余程チューニング しない限り,信頼性が高い計算結果を得ることは出 来ないと言わざるをえない. UCLA の Dhir 教授は, このシミュレーションを hopeless task と表現してい る[19].

4.2 Two-fluid modelのシミュレーション例

Two-fluid model を用いた沸騰流れの計算として は、図 10 に示すような、加熱されたパイプ内の沸 騰流れ[20]がある.このシミュレーションは、モデ ル式をチューニングして実験結果と似た計算結果 を得ることが出来ている. なお, two-fluid model で は気液界面が解像されないため,図 10 a に示すよ うに,計算結果として気泡や気液界面を観ることは できない.



 \boxtimes 10 Upward subcooled boiling flow in heated pipe using a two-fluid model: (a) volume fraction of vapor, (b) liquid temperature, and (c) comparison between experiment ($\bigoplus \bigstar X$) and simulation[20].

実用的な沸騰伝熱機器内のシミュレーション例 は、あまり多くないが、原子力発電の燃料集合体内 の沸騰流れの例を図 11 に示す. Two-fluid model に よる計算で、多くのモデル式を導入したことにより、 計算結果の信頼性は未だ高いとは言い難い. しかし、 計測とシミュレーションを上手く併用することに より、熱的問題の解決に活用できると考えられる.



 \boxtimes 11 Boiling flow simulation in a fuel assembly of a nuclear power plant using a two-fluid model [21].

5. おわりに

沸騰伝熱の数値シミュレーションについて概観 した.現段階で,どの程度のことが数値シミュレー ションで計算可能なのか,把握していただけたかと 思う.今後の課題としては,乱流に関する問題(相 変化をしている気液界面と乱流の相互干渉), twofluid model のモデル式の問題などが挙げられる. 筆 者は,計算機能力の発展を考慮し, single-fluid model で,工学上より実用的な沸騰流れシミュレーション を行うことが今後 10 年くらい先には可能になると 考えている.

参考文献

- [1] Nukiyama, S., The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure, J. Jap. Soc. Mech. Eng., Int. J. Heat Mass Transfer, 37 (1934) 1419-1433.
- [2] 機械工学便覧 基礎編 〈α5〉熱工学, 日本機械 学会, 2007.
- [3] Jung, S., Kim, H., An experimental method to simultaneously measure the dynamics and heat transfer associated with a single bubble during nucleate boiling on a horizontal surface, Int. J. Heat and Mass Trans., 73 (2014) 365-375.
- [4] Karalis, K., Zahn, D., Prasianakis, N.I., Niceno, B., Churakov, S.V., Deciphering the molecular mechanism of water boiling at heterogeneous interfaces, Scientific Reports, 11 (2021) 19858.
- [5] Hardt, S., Wondra, F., Evaporation model for interfacial flows based on a continuum-field representation of the source terms, J. Comput. Phys., 227 (2008) 5871-5895.
- [6] Sato, Y., Niceno, B., A sharp-interface phase change model for a mass-conservative interface tracking method, J. Comput. Phys., 249 (2013) 127-161.
- [7] Son, G., Dhir, V.K., Ramanujapu, N., Dynamics and heat transfer associated with a single bubble during nucleate boiling on a horizontal surface, J. Heat Trans., 121 (1999) 623-631.
- [8] Son, G., Dhir, V.K., Numerical simulation of nucleate boiling on a horizontal surface at high heat fluxes, Int. J. Heat and Mass Trans., 51 (2008) 2566-2582.
- [9] Tanguy, S., Ménard, T., Berlemont, A., A level set method for vaporizing two-phase flows, J. Comput. Phys., 221 (2007) 837-853.
- [10] Takada, N., Tomiyama, A., Numerical simulation of isothermal and thermal two-phase flows using phasefield modeling, Int. J. Modern Phys. C, 18 (2007)

536-545.

- [11] Badillo, A., Quantitative phase-field modeling for boiling phenomena, Physical Review E, 86 (2012) 041603.
- [12] Urbano, A., Tanguy, S., Huber, G., Colin, C., Direct numerical simulation of nucleate boiling in microlayer regime, Int. J. Heat and Mass Trans., 123 (2018) 1128-1137.
- [13] Bureš, L., Sato, Y., On the modelling of the transition between contact-line and microlayer evaporation regimes in nucleate boiling, J. Fluid Mech., 916 (2021) A53.
- [14] Bureš, L., Sato, Y., Comprehensive simulations of boiling with a resolved microlayer: validation and sensitivity study, J. Fluid Mech., 933 (2022) A54.
- [15] Sato, Y., Niceno, B., Pool boiling simulation using an interface tracking method: From nucleate boiling to film boiling regime through critical heat flux, Int. J. Heat and Mass Trans., 125 (2018) 876-890.
- [16] Sato, Y., Niceno, B., A depletable micro-layer model for nucleate pool boiling, J. Comput. Phys., 300 (2015) 20-52.
- [17] Gaertner, R.F., Photographic study of nucleate pool boiling on a horizontal surface, J. Heat Trans., 87 (1965) 17-27.
- [18] Sato, Y., Niceno, B., Smith, B.L., Departure from nucleate boiling simulation based on an interface tracking method, in: 18th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-18), Oregon, USA, 2019.
- [19] Dhir, V.K., Mechanistic prediction of nucleate boiling heat transfer -Achievable or a hopeless task?, J. Heat Trans., 128 (2006) 1-12.
- [20] Krepper, E., Končar, B., Egorov, Y., CFD modelling of subcooled boiling—Concept, validation and application to fuel assembly design, Nucl. Eng. Des., 237 (2007) 716-731.
- [21] Lo, S., Lecture CFD-4: Eulerian multiphase flow model, https://www.imperial.ac.uk/media/imperialcollege/research-centres-and-groups/nuclearengineering/17-CFD-4.pdf

高速度赤外線カメラで観察した沸騰熱伝達機構 Boiling Heat Transfer Mechanisms Observed by High-speed Infrared Thermometry

> 矢吹 智英(九州工業大学, JST さきがけ) Tomohide YABUKI (Kyushu Institute of Technology, JST PRESTO) e-mail: yabuki.tomohide556@mail.kyutech.jp

1. はじめに

核沸騰が他の伝熱形態と比して高い熱伝達率を もつことはよく知られているが,その理由を明確に 答えることは難しい. 蒸発による潜熱輸送のおかげ だろう、というのがすぐに頭に浮かぶが、潜熱輸送 と高い熱伝達率は直接的には結びつかない. 沸騰の 熱伝達機構を調べるためには、沸騰を構成する伝熱 素過程[1] (図1,気泡底部のミクロ液膜と呼ばれる 厚さ数ミクロンの薄液膜の蒸発,気泡運動に誘起さ れる対流,乾き面のリウェッティングの際に生じる 過渡熱伝導,三相界線における蒸発など)を詳細に 観察して,それぞれの伝熱素過程が受け持つ伝熱量 を評価する必要がある.本稿では、沸騰における壁 面熱輸送の可視化に最も有力なツールの一つと考 えられる高速度赤外線カメラを用いて,大気圧の水 の飽和プール沸騰における熱伝達機構を調べた結 果[2,3]を報告し、得られた知見や今後の課題につ いて述べる.

2. 実験と伝熱量評価の方法

沸騰の壁面熱伝達メカニズムを調べるには,壁面 温度を計測するだけでは不十分で,得られた温度か ら伝熱量を評価する必要がある.高速度赤外線カメ ラに限らず,MEMS センサ[4]や感温塗料[5]などの 他の手法を用いる場合にも,以下のプロセスを経て 壁面伝熱量や熱伝達率が評価できる.(1)沸騰中の 壁面温度分布を取得する.(2)得られた温度分布か



図1 プール沸騰で生じる伝熱素過程.

ら構築した伝熱壁表面の温度境界条件を用いて非 定常熱伝導を解いて伝熱壁内の温度分布を計算す る.(3)伝熱壁表面における壁面と垂直方向の温度 勾配からフーリエの法則を用いて表面熱流束を計 算する.(4)表面温度と流体温度の差と表面熱流束 から表面熱伝達率を計算する.熱伝導計算の際の境 界条件,とりわけ伝熱壁表面の境界条件を適切に構 築できることが肝要である.高速度赤外線カメラな どの光学的手法を用いると,壁面温度"分布"が計 測できるため,表面境界条件の構築が容易になる.

最新の市販の赤外線カメラは、1,000fps を超える 撮影速度、100µm/pixel 以下の空間分解能で、数 cm 角の領域の温度分布を計測することが可能である. 伝熱壁下方から表面温度を観察する必要があるた め、サファイアやシリコンなどのように赤外線に対 して透過率の高い材料を伝熱壁に使用しなければ ならない制約がある.

本研究では、厚さ 0.6mm のサファイアウエハを 伝熱壁に用い、その表面にヒータと放射体を兼ねる チタン薄膜を成膜し、さらにその表面に電気的絶縁 のための SiO₂ 薄膜を成膜している.チタン薄膜ヒ ータの加熱領域のサイズは 20mm×10mm である.

3. サファイア平滑面上の熱伝達機構

図2に,発生気泡の少ない低熱流束(0.2MW/m²) と,気泡数が増えて気泡間干渉が活発になって沸騰 様相が複雑な高熱流束(0.6MW/m²)において得ら れた熱伝達率分布を示す.ミクロ液膜領域の 100kW/(m²·K)を優に超える高い熱伝達率が収まる ようにカラーバーの上限を定めると他の伝熱形態 の挙動が隠れてしまうため,ここでは60kW/(m²·K) をカラーバーの最大値に設定している.ドーナツ形 状の高熱伝達率領域が気泡底部のミクロ液膜領域 である.本稿では示さないが,ミクロ液膜領域では 局所熱流束は1MW/m²を大きく上回る高い値を示 す.ドーナツの穴に対応する領域が,ミクロ液膜の



図 2 平滑サファイア面上の熱伝達率分布[2].気泡底部の、ドーナツ状の高熱伝達領域がミクロ液膜領域で、低熱伝達率領域がドライパッチ.気泡と気泡の間の広い領域が対流熱伝達領域.

蒸発によって生じたドライパッチであり,乾きによ り最も低い熱伝達率を示す.気泡と気泡の間(ミク ロ液膜とミクロ液膜の間)には対流領域がある.対 流領域において,熱流束(蒸気生成量)の増加に伴 う熱伝達率の向上が見て取れ,高熱流束条件では 30kW/(m²·K)前後の高い熱伝達率を示しており,細 かな対流パターンにより熱伝達率は不均一になっ ている.このことから,低熱流束条件の孤立気泡の 運動で生じる対流によってもたらされる熱伝達促 進の程度は小さく,気泡間干渉が生じることで対流 熱伝達が大きく促進されることがわかった.

次に,熱輸送分布をミクロ液膜領域,液相熱輸送 領域,ドライアウト領域に分類する熱流束パーティ ショニングの結果得られた,各伝熱素過程の総熱輸 送量への寄与と壁面上での面積占有率を図 3 に示 す. 液相熱輸送は対流熱伝達と乾き面のリウェッテ ィングに際して生じる伝熱の二つから構成されて いるが, リウェッティング伝熱は伝熱面積の小ささ から伝熱量が無視しうるほど小さいため,液相熱輸 送は対流熱伝達とほぼ等しい.結果として、ミクロ 液膜蒸発は、最も高い局所熱流東、熱伝達率を示す ものの面積占有率が10%程度と小さいため、総熱輸 送量への寄与は30%以下にとどまる結果となった. 一方で,最大の面積占有率をもつ対流熱伝達(液相 熱輸送)が大部分の熱輸送を担っていることが明ら かになった. Sato & Niceno の銅板上の水の飽和プ ール沸騰の大規模数値計算[6]によっても同様の結 果が得られている点は心強い.対流によって壁面か ら液相(まずは境界層)に輸送された熱は,壁面上 の気泡や離脱した気泡の表面での蒸発により潜熱 に変換されるため,壁面上で対流熱伝達として見え ている熱輸送は熱輸送経路全体を見渡すと純粋な 顕熱輸送ではない点に注意が必要である.相変化現 象特有の飽和温度の冷たい気液界面が壁面の近く にいるということが壁面上の対流熱伝達の促進に 一役買っているのだろうというイメージを持って いる.現在,気泡表面での蒸発が対流熱伝達の促進 にどの程度寄与しているかを調べている.



図 3 熱流東パーティショニングにより得られた 各伝熱素過程の(a)総熱輸送量への寄与と(b)面積占 有率[2]. 液相熱輸送は対流熱伝達とほぼ等しい.

4. 発泡点密度を制御した伝熱面上の熱伝達機構

4.1 人工発泡点付き伝熱面上での沸騰

これまでの実験では, 平滑なサファイア伝熱壁上 の沸騰を対象としていた. 平滑であるがゆえに発泡 点密度は金属粗面の場合と比較して小さく,おそら くそれが主要因となって沸騰熱伝達率が銅伝熱壁 を用いた一般的な沸騰実験(最も多くの実験データ の蓄積がある系)の場合の1/2~1/3程度と小さかっ たため、金属面により近い条件を再現することが課 題であった.一方,近年,より一般性のある知見を 得るために表面に工夫をした伝熱壁を用いた実験 が報告されている. Su ら[7]は, 10µm 程度の比較的 厚い銅めっき膜をサファイア基板上に形成し,その 表面にやすりを掛けることで金属粗面を実現して サブクール流動沸騰における限界熱流束発生機構 を調べている. Zupančič ら[8]は、 伝熱壁として用い ている銅箔の表面にレーザー加工で人工発泡点を 形成して発泡点密度を制御したプール沸騰実験を 行っている.

我々は、カー用品である超撥水コーティング剤ガ ラコを表面にインクジェットプリントすることで、 人工発泡点となる超撥水円形斑点を任意の密度で 千鳥配置して沸騰伝熱特性の発泡点密度依存性を 詳細に調べた[3]. 超撥水斑点は直径約 150μm で、 見積もられる気泡成長開始過熱度が 1K以下と小さ い、気泡が比較的生成されやすい発泡点と言える. 金属面上の水の飽和プール沸騰における発泡点密 度が、約 1MW/m²の高熱流束域で 100 sites/cm²程度 という報告[9]を踏まえ、本研究では 24~318 sites/cm²の密度で人工発泡点を配置した伝熱壁を 試験した.

図4は、0.6 MW/m²における温度分布(左列, 白 丸は人工発泡点位置)と熱伝達率分布(右列)であ り,千鳥状に配置した超撥水斑点が人工発泡点とし てうまく機能していることがわかる.図5は、平均 熱伝達率を熱流束に対してプロットしたグラフで、 裸面(Bare)と比較して人工発泡点付き伝熱面が高 い熱伝達率を示している.また、比較的高い熱流束 では、89、130 sites/cm²で最も高い熱伝達率が得ら れており、熱伝達率に対して最適な発泡点密度が存 在していることもうかがえる.

図6は, 熱流束パーティショニングによって得ら れた, 各伝熱素過程の(a)総熱輸送量への寄与と(b) 面積占有率を, 発泡点間隔に対して示した結果であ

る.人工発泡点により発泡点密度を増やしても、平 滑面の場合と同様に対流熱伝達が壁面熱輸送を支 配しており,面積占有率の小さなミクロ液膜蒸発の 総熱輸送への寄与は大きくても35%程度であった. 面積占有率と総熱輸送量への寄与がよく似た変化 の傾向を示しており,熱輸送量に対する伝熱面積の 重要性がよくわかる. 発泡点間隔が 1.2mm (89 sites/cm²) でミクロ液膜の総熱輸送への寄与,面積 占有率が最大値を取っている.1.2mmより発泡点間 隔が大きい領域では,発泡点間隔が小さくなる(発 泡点密度が大きくなる)ことで気泡数が効果的に増 えてミクロ液膜の面積占有率が増加している.一方 で,発泡点間隔が 1.2mm を下回って発泡点密度が 過大になると、ミクロ液膜の形成が阻害されて発泡 点間隔が小さくなるに従いミクロ液膜の面積占有 率が減少している.詳細な議論は既報[3]にありこ こでは省略するが、1.2mm (89 sites/cm²)の発泡点 間隔で最大の熱伝達率(図5)を示した理由は、最 も高い熱伝達率をもつミクロ液膜の面積占有率が そこで最大値をとるためであることが明らかにな っている.このことは、ミクロ液膜の面積占有率を 増やすことが熱伝達率向上の一つの方針になりう ることを示唆している.本研究では 89 sites/cm²付 近で最大の熱伝達率が得られたが,発泡点のサイズ (気泡成長開始の所要過熱度)や配置の仕方で最適 な発泡点密度が異なることには注意が必要である.

4.2 マクロ液膜の観察

人工発泡点を付与して発泡点密度を高めたこと で, 高熱流束条件において合体気泡底部でマクロ液 膜の存在を示す興味深い熱伝達率分布が観察され た. 図7は、観察結果の例で、熱伝達率分布におい て白い線で囲った領域が合体気泡底部に形成され たマクロ液膜の領域であり、ミクロ液膜や対流の領 域と比較して明らかに低い熱伝達率を示している. 低い熱伝達率を示すのは、マクロ液膜は、合体気泡 やそれと合体した一次気泡と壁面の間に閉じ込め られているため、内部の液の対流が抑制されている ためと考えられる.発泡点密度や熱流束に対して顕 著な依存性はなくマクロ液膜領域の熱伝達率は約 20kW/(m²·K)であった. 液膜内の熱輸送が, 液の対 流を無視して厚さ方向の一次元定常熱伝導と仮定 すると、液膜厚さは 30um 程度と見積もられた.同 一の対象を観察しているかはまだ不明なため単純 な比較には慎重になる必要があるが, Sakashita ら



図 4 0.6MW/m² での人工発泡点付き伝熱面上の温 度分布(左列)と熱伝達率分布(右列)[3].



図5 人工発泡点付き伝熱面の沸騰熱伝達率[3].



図 6 熱流東パーティショニングにより得られた 人工発泡点付き伝熱面上の沸騰における,各伝熱素 過程の(a)総熱輸送量への寄与と(b)面積占有率. 0.1~0.9MW/m²の熱流束範囲で,0.1 MW/m²刻みで 熱流束を変化させている[3].

[10]は、コンダクタンスプローブを用いたボイド率 分布計測を通じて、似た熱流束条件で、我々の観察 結果より厚い 50µm~300 µm の結果を示している. マクロ液膜の厚さを決める要因を調べるのは今後 の課題である.

Haramura and Katto の限界熱流東モデル[11]では, 合体気泡の滞在時間中にマクロ液膜が蒸発によっ て消失することで限界熱流東が生じることを考え ている.より高い熱流束条件での実験を通じて,マ クロ液膜の消失と限界熱流束発生のきっかけとな る大きな乾き面の発生の関係を調べることが今後 の課題である.大きな乾き面があるメカニズムによ り発生したとして,乾いた面が再度濡らされれば膜 沸騰遷移には至らない.乾いた面が再度濡らされれ



図7 高熱流束域において合体気泡下で観察されたマクロ液膜[3].

ば膜沸騰遷移には至らない.高温の乾き面が濡れら れなくなる原理の解明が限界熱流束の発生機構の 解明には併せて必要である.

平滑で発泡点密度が小さい裸面の場合にはマク ロ液膜が観察されず、人工発泡点を用いて発泡点密 度を増やしたことではじめてマクロ液膜を観察す ることができた点も重要である.規則正しく発泡点 を配置したことがマクロ液膜の形成につながった 可能性も無視してはならないが、マクロ液膜の形成 にはある程度の発泡点数が必要なのではないかと 考えている.人工発泡点の配置の不規則性を導入し たり、密度を変えたりした実験を行えばマクロ液膜 の形成条件が見えてくるだろう.

5. おわりに

本稿では、高速度赤外線カメラで観察された水の 飽和プール沸騰における熱伝達機構について報告 した.裸面の場合も発泡点密度が大きな人工発泡点 付き伝熱面の場合も、最大の面積占有率を持つ対流 熱伝達が壁面熱輸送を支配していることがわかっ た.対流熱伝達が沸騰の基礎をなす高い熱伝達率を 実現しているメカニズムはまだ明らかでない.一方、 最も高い局所熱流束、熱伝達率をもつミクロ液膜蒸 発の総熱輸送量への寄与は面積占有率の小ささが 要因となって最大でも35%程度にとどまっていた. 人工発泡点を付与して発泡点密度を増やすことで はじめて、高熱流束条件において合体気泡底部でマ クロ液膜が観察された.限界熱流束のきっかけとな るはずの大きな乾き面の形成とマクロ液膜の挙動 の関係は、現在調べている.

計測技術の進展は目覚ましく、とても明瞭に伝熱 素過程が観察できるので、はじめて高速度赤外線カ メラで実験を行った際はすごく感激したのを覚え ている.当然のことながら計測対象は沸騰に限られ るものでないので、様々な壁面上の高速熱流体現象 の観察に高速度赤外線カメラを利用する価値は高 いはずだ.

参考文献

- [1] 矢吹智英,沸騰熱伝達を支配する伝熱素過程, J. HTSJ, **57-239** (2018) 20-25.
- [2] Tanaka, T., Miyazaki, K., Yabuki, T., Observation of heat transfer mechanisms in saturated pool boiling of water by high-speed infrared thermometry, Int. J.

Heat Mass Transf., 170 (2021) 121006.

- [3] Yajima, S., Nanako, I., Miyazaki, K., Yabuki, T., Heat flux partitioning and macrolayer observation in pool boiling of water on a surface with artificial nucleation sites, Int. J. Heat Mass Transf., 194 (2022) 122924.
- [4] Yabuki, T., Nakabeppu, O., Heat transfer mechanisms in isolated bubble boiling of water observed with MEMS sensor, Int. J. Heat Mass Transf., 76 (2014) 286-297.
- [5] Baba, S., Saito, S., Takada, N., Someya, S. Visualization of flow boiling heat transfer using temperature sensitive paint with high spatial and temporal resolution, Int. J. Heat Mass Transf., 197 (2022) 123367.
- [6] Sato, Y., Niceno, B., Pool boiling simulation using an interface tracking method: from nucleate boiling to film boiling regime through critical heat flux, Int. J. Heat Mass Transf., **125** (2018) 876-890.
- [7] Su, G.-Y., Wang, C., Zhang, L., Seong, J.H., Kommajosyula, R., Phillips, B., Bucci, M., Investigation of flow boiling heat transfer and boiling crisis on a rough surface using infrared thermometry, Int. J. Heat Mass Transf., 160 (2020) 120134.
- [8] Zupančič, M., Gregorčič, P., Bucci, M., Wang, C., Aguiar, G.M., Bucci, M., The wall heat flux partitioning during the pool boiling of water on thin metallic foils, Appl. Therm. Eng., 200 (2022) 117638.
- [9] Wang, C.H., Dhir, V.K., Effect of Surface Wettability on Active Nucleation Site Density During Pool Boiling of Water on a Vertical Surface, J. Heat Transfer, **115-3** (1993) 659-669.
- [10]Sakashita, H., Ono, A., Nakabayashi, Y., Measurements of critical heat flux and liquid–vapor structure near the heating surface in pool boiling of 2-propanol/water mixtures, Int. J. Heat Mass Transf., 53 (2010) 1554-1562.
- [11]Haramura, Y., Katto, Y., A new hydrodynamic model of CHF applicable widely to both pool and forced convection boiling on submerged bodies in saturated liquids, Int. J. Heat Mass Transf., 26-3 (1983) 389-399.

気泡微細化沸騰 Microbubble Emission Boiling (MEB)

1. はじめに

気泡微細化沸騰(microbubble emission boiling, MEB)は、サブクール沸騰条件下で発現する沸騰様 相である.この沸騰領域では、膜沸騰へ移行するこ となく比較的低い壁面過熱度において限界熱流束 (CHF)よりも高い熱流束を達成することが知られ ている.そのため、インバータやパワーデバイスな どの高密度発熱体を対象とした冷却技術への応用 が期待されている.本稿では、MEBに関する代表 的な研究の推移と最近の知見を紹介する.

このユニークな現象は、1980年代初めに群馬大 学の研究グループによって発見された沸騰様式の 一つ[1-4]である.稲田らは,水平円形伝熱面上のプ ール沸騰を対象に,複数のサブクール条件下での伝 熱特性を示した(Fig. 1)[1].その上で,この沸騰 現象において伝熱面近傍からの微細な気泡が放出 すること(Fig. 2)[2],気泡および気泡塊挙動と伝 熱面温度変動の関係[3],また,核沸騰域からMEB へ至るまでの遷移過程に着目し,合体気泡の体積の 変化と伝熱特性の関係を示した[4].伝熱面近傍か ら微細気泡が放出される特徴から,この現象は『気 泡微細化沸騰(MEB)』と呼ばれる[5].稲田らによ るこの新しい沸騰様相の発見[1-4]ののち,その発生 条件や伝熱特性,さらにその制御に関する研究が行 われてきた.以下にその主要なものを紹介する.

MEB の特徴の1つとして、伝熱面上での蒸気泡 の高周波数振動が挙げられる.すなわち、伝熱面上 で発生した蒸気泡は、核沸騰域で見られるような大 きな合体蒸気泡を形成することなく、伝熱面上で数 百 Hzの膨張・凝縮を示す[6-13].核沸騰域から MEB への遷移過程における蒸気泡挙動は、Ando et al. [7] によって詳細な観察が成されている.また、もう一 つの特徴として、MEB 発生時に、核沸騰と比べて かなり激しい沸騰音が生じることが知られている [5,11-15]. 久保・熊谷[5]は水平円形伝熱面に対し、 サブクール条件下で伝熱面直上での吸込流を与え 上野 一郎 (東京理科大学) Ichiro UENO (Tokyo University of Science) e-mail: ich@rs.tus.ac.jp

る実験を行い,周囲液体圧力変動の違いによって,激しい変動を示す Stomry-MEB (S-MEB) および比較的小さい変動を示す Calm-MEB (C-MEB) の2種類に分けられると示した.後に並行流を付与した系において,S-MEB をさらに,低熱流束で発現するS-MEB I および高熱流束で発生する S-MEB II の2種類に分けられるとした[16]. その後,蒸気泡挙動および沸騰音の解析により,MEB における沸騰音が蒸気泡の激しい振動によるものであることが示されている[11,12,14,15].



Fig. 1 Boiling curves under $\Delta T_{sub} = 30$ K. (Reuse of Fig. 6 in [1]: permitted by the JSME)



Fig. 2 Schematic image of microbubble emission from heating surface.

(Reuse of Fig. 17 in [2]: permitted by the JSME)

Horiuchi et al. [11]は、水平円形伝熱面での MEB の発生前後における伝熱面温度の半径方向分布を 測定し、半径方向の温度差変動が大きい場合に C-MEB が発現していること、小さい場合に S-MEB が 発現していることを示し, 伝熱特性と沸騰音特性に 相関があることを明らかにした. すなわち, 半径方 向に温度分布がある場合とない場合で,蒸気泡挙動 の時空間的挙動が変動していることが予想される. 以上より,熱伝達特性,蒸気泡の空間的挙動,沸騰 音には明らかな相関があることが示唆されるが,そ れらの詳細な関係は定量的に明らかになっていな かった. その他 MEB に関する研究例として, MEB 発現に対する伝熱面の熱容量[17]や濡れ性[18],表 面粗さ[19]の影響,超音波を付加した際の熱伝達特 性への影響[20-22]、また、伝熱面上部領域の空間を 狭隘化した状態[10]やマイクロチャネル内での MEB発現条件[23]に関するものが存在する.

本稿では以下に,特にサブクール・プール沸騰系 で実現した MEB に関する実験的研究により得られ ている知見を用いながら MEB の特性を紹介する. 図とともに紹介する実験結果は全て,作動流体とし て蒸留水,伝熱面を有する伝熱ブロックとして銅製 のものを使用し,大気圧下で実験を行っている.

2. 沸騰曲線

これまでさまざまな研究グループにより MEB が 実現されている. 最初に実現した沸騰曲線(Fig.1) に加えて、他の実験系で得られたものの一例を Fig. 3に示す.これは、蒸留水を作動流体とし、銅製の 直径 10 mm の伝熱面を用いた際に実現した沸騰曲 線である. 伝熱面を上面とする伝熱ブロック内中心 軸上に複数の熱電対を挿入し、一次元熱伝導を仮定 して伝熱面表面温度および熱流束 q"を評価してい る. サブクール度∆T_{sub}=40K および 60K の条件下 において,それぞれ複数の実験により得られたもの を示している.いずれの条件においても安定的に MEB が発現する. 稲田ら[1]が実現したように、核 沸騰域から伝熱面への熱入力を徐々に上昇するこ とにより、CHF を経てほぼ q"が一定のまま壁面過 熱度ΔT_{sat}がやや上昇する.このとき,激しい沸騰音 とともに沸騰様相の変化が発現しており, 膜沸騰に 移行することはない. その後さらに熱入力を上昇す ると、 ΔT_{sat} がほぼ一定の状態を維持したまま q''が 顕著に上昇する. $\Delta T_{sub} = 40 \text{ K}$ の条件では、実験に



Fig. 3 Boiling curves under $\Delta T_{sub} = 40$ K and 60 K. Test liquid is distilled water, and the heating surface is made of copper, whose diameter is of 10 mm. (Reuse of Fig. 3 in [12]: permitted by the Elsevier)

よりΔT_{sat}のばらつきが見られる.一方,当該実験系 において極めて安定的に MEB が発現する条件,す なわち、 $\Delta T_{sub} = 60 \text{ K}$ においては、沸騰様相の再現 性も極めて高く、 ΔT_{sat} が一定のまま q"の上昇を実 現することが出来る.いずれの条件においても, MEBを発達させることにより限界熱流束 q"CHFの2 倍以上の熱流束を実現している. なお, いずれの ΔT_{sub}に関する実験においても、当該実験装置での 安全上の問題のため, さらなる熱入力を中断してい る.これ以上の熱入力を行った際の挙動に関しては, 当該実験系では不明である.ここで,熊谷ら[16]は 並行流を付与した系での気泡微細化沸騰において, 高ΔT_{sub}条件下において比較的低いΔT_{sat}で発現し定 量的に高い再現性を有するものを S-MEB I, 低 ΔT_{sub} 条件下において高いΔT_{sat} で発現するも定量的に再 現性が良好でないものを S-MEB II と定義している. この定義を用いると、当該系で観測された $\Delta T_{sub} = 40$ K での MEB は後者, $\Delta T_{sub} = 60 \text{ K}$ での MEB は前者 と分類可能と思われる.ただし、あくまでも定量的 再現性を考慮にした定義であることから、本稿では この区別は積極的に導入していない.

3. 蒸気泡挙動と沸騰音

作動流体として蒸留水を用い,直径 10 mm の銅 製円形伝熱面上での(a) 核沸騰域から (b) CHF 近傍



Fig. 4 Successive images of the behavior of the vapor bubbles on a copper heated surface of 10 mm in diameter under $\Delta T_{sub} = 20$ K for (a) nucleate boiling, (b) near CHF, and (c) MEB. The time-averaged wall superheat and heat flux are (a) $\Delta T_{sat} = 19.8$ K, q'' = 2.56 MW/m², (b) $\Delta T_{sat} = 28.1$ K, q'' = 2.82 MW/m², and (c) $\Delta T_{sat} = 53.4$ K, q'' = 3.38 MW/m². Test liquid is distilled water.

(Reuse of Fig. 8 in [7]: permitted by the Elsevier)

域を経て,(c) MEB 発現時における蒸気泡挙動例を Fig. 4 に示す. なお, Fig. 3 とは異なるΔT_{sub}での結 果である.(c) MEB 発現時の特徴として,その名称 の発端ともなった微細な気泡の射出に加えて,(a) 核沸騰域や(b) CHF 近傍域と比較して,蒸気泡が極 めて短い周期で伝熱面上において成長・凝縮をして いる点が挙げられる.前述の通り,このような蒸気 泡高周期振動は異なる研究グループによって確認 されている[6-13].

蒸気泡の高周期振動によって、この現象の特徴の 一つとなる激しい沸騰音が発生する. Fig. 5 に、Δ*T*_{sub} =40K (Fig. 3)の条件下にて取得した沸騰音のスペ クトログラムを示している.条件"7"で付与した伝熱



Fig. 5 (top) Boiling-sound spectrogram for 20 s under different conditions ('1' ~ '13') under $\Delta T_{sub} = 40$ K, and (bottom) zoomed view of spectrogram for state for '13'. The onset of the MEB is realized under the condition of '7'. Test liquid is distilled water, and the diameter of the heating surface is of 10 mm. (Reuse of Fig. 5 in [12]: permitted by the Elsevier)



Fig. 6 Spatio-temporal behaviors of vapor bubbles over heat transfer surface under different conditions ('a5' ~ 'a13') as illustrated in Fig. 5. Dark regions correspond to the vapor bubbles passing through the monitoring line at 1 mm above the heat transfer surface. The position r = 0 mm corresponds to the center of the heating surface.

(Reuse of Fig. 8 in [12]: permitted by the Elsevier)

面への熱入力により,沸騰様相の発達過程において MEB に遷移する.ここで,当該条件で充分に場を 発達させた場合にはΔT_{sat}~65 K, q"~4.8 MW/m² の 状態を実現する.MEB への遷移後は,沸騰音の周 波数分布にさほど顕著な差違は見られないが,強度 が不連続的に大きくなり,容易にMEB 発現を判別 することができる.このような事例は過去の研究で も認められる[1,15,24].MEB への遷移を実現した後 にさらにヒータへの熱入力を増加すると,沸騰音は 次第にそのピーク周波数を狭めつつ(図中:条件'7' ~'11') その強度を上げ,さらなる熱入力の増加によ り基本周波数が上昇する(図中:条件'11'~'13').この基本周波数が上昇する段階において,蒸気泡の成長・凝縮の基本振動周波数と合致する[12].

沸騰音をもたらす伝熱面上蒸気泡挙動を示すた めに、伝熱面上方 1.0 mm の位置に検査線を設け、 検査線を通過する蒸気泡画像を時間的に蓄積した もの(いわゆる「リスライス」データ)を Fig.6 に 示す.この画像により、検査線上での蒸気泡の時空 間挙動を示すことが可能となる. 図中の r=0 mm が伝熱面中心位置, $r = \pm 5 \text{ mm}$ が伝熱面端部に相 当する.ここで、当該実験系における照明により、 蒸気泡が通過する際に低輝度に,液体が通過する際 に高輝度になる. 各時空間挙動の下に示した'a;'は実 験条件を示し,自然数iは,Fig.5 で示した実験条 件と対応している. MEB の発達とともに、伝熱面 上の蒸気泡はあたかも伝熱面を広く覆う形で協調 的に高周波数振動を実現する(Fig. 6 中の条件'all' ~'a13'). すなわち大きな蒸気「膜」が音源として激 しい沸騰音を実現している.一方, MEB 遷移後の 発達途上過程では、伝熱面上にて蒸気泡の振動が異 なる位相で実現し (Fig. 6 中の条件'a7'~'a10'),局 所的に蒸気泡が呈する振動数よりも見かけ上高い 周波数の沸騰音が発生する.これらのことから,激 しい沸騰音の開始を検出することによる MEB の発 生判別は可能であるが,沸騰音により蒸気泡挙動を 推定することは、大きな熱入力により充分発達した MEB においてのみ可能である[12].

4. MEB 発現過程

ここまで、MEB に遷移した後の伝熱特性や蒸気 泡挙動・沸騰音に関する知見を紹介してきた.本節 では、特に核沸騰域から MEB に遷移する過程にお いて得られた知見を紹介する. Fig.7 に、MEB 遷移 前後における伝熱面上での蒸気泡挙動の例を示す. この結果は、直径 5 mm の伝熱面を用いた実験系に おいて、 $\Delta T_{sub} = 20 \text{ K}$ で取得している. 図中初期(t[ms] = t_0)として CHF 近傍の沸騰域において合体蒸 気泡が伝熱面を覆っている状態を採用し、蒸気泡挙 動の時系列変化を示す. MEB に遷移する以前は、 高熱流束下での核沸騰域で見られるように、合体蒸 気泡が形成された後に伝熱面から離脱しサブクー ル状態のバルク液中で凝縮する様子が観察される. 一方、MEB 遷移直前においては、合体蒸気泡が離 脱することなく、時間とともに緩やかにその体積の



Fig. 7 Successive images of condensing and collapsing vapor bubbles on the heated surface in transition process from nucleate boiling near CHF to MEB under $\Delta T_{sub} = 20$ K. Test liquid is a distilled water, and the diameter of the heated surface is of 5 mm.

(Reuse of Fig. 8 in [7]: permitted by the Elsevier)

減少が見られる ($t \le t_0+10$). この間, 伝熱面ごく 近傍では細かい蒸気泡の生成が見られる. その後, 伝熱面中央部において合体蒸気泡高さが有意に低 くなり ($t = t_0+11$), 微細化した気泡が伝熱面上方 に射出される ($t \ge t_0+13$). 伝熱面への周囲液体の 供給によって急激な蒸発が発生し, 強い剪断場が生 じることにより微細化が実現していると考えられ るが, 微細化の機構については未解明である. さら に伝熱ブロックへの熱入力を増加すると, 稲田ら [1]が示したように (Fig. 2) 微細化した気泡が伝熱 面から放射状に射出されるようになる.

このような MEB への遷移時に注目した(a) 伝熱 ブロック内温度,および,(b) 表面熱流束(ただし, 沸騰現象の発達を問わずに一次元熱伝導を仮定し て求めている)の例をFig.8に示す.図中の矢印は, 伝熱ブロックへの熱入力を増加した時刻を表して いる.核沸騰域では,熱入力の増加により,伝熱面 ブロック内温度が比較的緩やかに上昇し,時間とと もに一定値に収束する.この温度変化から求めた熱 流束に注目すると,熱入力の増加により比較的緩や かに上昇している.一方,MEB が発生する時刻で は,ある瞬間にブロック内温度がそれまでの変化と 比較して顕著に上昇する状況が発生する.図で示し た異なるΔ*T*_{sub}および異なる直径を有する伝熱面に



Fig. 8 Temporal variation of (a) temperature and (b) quasi-heat flux under (1) $\Delta T_{sub} = 10$ K, (2) 20 K, and (3) 40 K. Rows (1), (2) and (3) indicate the results with the heating surface of 10 mm in diameter, and Rows (2)' and (3)' with the heated surface of 5 mm in diameter.

(Reuse of Fig. 11 in [7]: permitted by the Elsevier)

依らず共通して熱流束が一時的に急減少し, 直後に 回復してさらなる上昇を呈する. すなわち, MEBの 発現直前において, 合体蒸気泡体積減少による潜熱



Fig. 9 Temporal variations of $\Delta T^{(cp)} = T_s^{(c)} - T_s^{(p)}$ under (a) $\Delta T_{sub} = 10$ K and (b) 20 K. Here $T_s^{(c)}$ and $T_s^{(p)}$ denote the temperature at the center and at the periphery of the heating surface, respectively. Frames (a) and (b) illustrate the results without and with transition to the microbubble emission boiling (MEB), respectively.

(Reuse of Fig. 8 in [11]: permitted by the John Wiley and Sons)

輸送の停滞に起因する熱流束の減少が見られ,その 後,微細化した気泡の射出を伴う伝熱面への周囲液 体供給による MEB 発現によって熱流束が急激に上 昇していると考えられる.ただし,当該実験系では 伝熱ブロック内温度変動を充分な時間解像度をも って計測することが出来ておらず,したがってこの 図で示したような温度および熱流束変化と伝熱面 上蒸気泡挙動と一対一で対応して議論するだけの 材料を取得出来ていない.近年になって精力的に研 究が行われている伝熱面上の温度および熱流束の 時空間解析[24-28]の導入が,MEB 発現時の機構解 明に向けて必須であると考える.そのためには, MEB 発現時に見られるような高熱流束および高壁 面過熱度での計測実現が鍵となる.

著者らは、高精度時空間解析に先行する原始的な 方法、すなわち、伝熱面半径方向に複数の熱電対を 設置し、MEB 発現時における伝熱面中央部および 端部の表面温度およびその差の計測を試みた[11]. Fig. 9 にその典型的な例として、直径 15 mm の伝熱 面を採用した実験結果を示す.当該実験では、伝熱 面表面近傍に異なる半径位置に熱電対を埋め込む ため、大きい伝熱面を採用している.そのため、同 一作動液体に対し直径 10 mm や 5 mm の伝熱面を 用いた実験と比較して、MEB の安定的な発現がよ り高 ΔT_{sub} にシフトする[11].パネル(a)および(b)は、 それぞれ ΔT_{sub} =10K および 20K の条件で取得した CHF 近傍状態から伝熱ブロックへの熱入力を増加 していった過程での伝熱面表面温度差ΔT^(cp)を示し ている.条件(a)では MEB の遷移は発現せず,条件 (b)では MEB への遷移が実現している.ここで,条 件(b)では遷移直後に S-MEB が発現するが,前述の 通り当該条件下では安定した MEB への遷移は実現 しない. すなわち,時間とともに C-MEB (図中に C-MEB として示している領域が該当)と S-MEB が 間欠的に発現している.なお,図中の矢印位置が熱 入力値を増加した時刻を表す. ここで, 伝熱面中心 位置での表面温度を T_s^(c),同じく端部の表面温度を $T_s^{(p)}$ とし、表面温度差を $\Delta T^{(cp)} = T_s^{(c)} - T_s^{(p)}$ と定義して いる.条件(a)に注目すると、核沸騰域が持続してい る期間においては、ΔT^(p)はわずかながらに正とな る状態を保ちながら変化している. すなわち, 伝熱 面中央部が端部と比べて若干高い温度を維持した まま沸騰様相を実現している.一方,条件(b)では, MEBに遷移する時点(図中のb4での熱入力変更後) でΔT^(cp)が正の方向に急峻な上昇を呈した後,S-MEB が発現した状態ではΔT^(cp)は時間的に変動をし ながらもその値は常に負の状態を維持している.す なわち, 伝熱面端部の方が中央部と比べて温度が高 い状態で MEB を実現している. Fig. 7 で示した通 り、MEB への遷移時に伝熱面中央部で蒸気泡がそ の高さを下げていき, 微細化した気泡を射出してい ることから, 伝熱面中央部に周囲液体が流入するこ とで MEB への移行を実現していることを定性的に 説明出来る. MEB 遷移後は, 蒸気泡の高周波数振 動が伝熱面上で発生し、したがって伝熱面上の温度 差は激しく振動を呈するが, 伝熱面中央部の方が端 部に比べて正味低い温度を維持している.一方, C-MEB に移行すると、伝熱面上にて振動する蒸気泡 が有意に小さくなり[11],「激しい気泡微細化現象 の様相から静かな気泡微細化現象の様相になると 伝熱面温度は急激に上昇」[5]することからも伝熱 面への液体供給機構の大幅な変化によってΔT^(cp)の 挙動が大きく変化している.不安定な C-MEB では, パネル(b)の後半で見られるように、ΔT^(cp)がその正 負を逆転しながら変動しており, 伝熱面への液体供 給および蒸気泡の高周波数振動が伝熱面上のさま ざまな領域で発生していることをうかがわせる.な お,繰り返しになるが,当該計測は熱電対を伝熱面 表面近傍に埋め込んで温度を計測しているため,時 間的分解能は MEB の現象時定数, すなわち蒸気泡 の振動周期と比べて全く充分ではないことに注意 が必要である.前述の通り伝熱面上伝熱場の高精度 時空間解析によって,伝熱面への液体供給機構に関 する知見がもたらされると考えられる.ただし,今 回紹介した時間的分解能が充分ではない計測にお いても,MEBの発現の有無,さらに発現した MEB の種類によってもΔ*T*^(q)に有意な差の検出が可能で あることを示している.

5. MEBにおける履歴現象

沸騰現象を冷却技術などに安定的に適用するために必要な知見の一つとして,その履歴現象が挙げられる.すなわち,伝熱面への熱入力を増加させるだけでなく,減少させた際に沸騰様相がどのように変化するのか,その伝熱特性がどう変化するのか,という知見が重要となる.従来の研究では,過渡的な状況における核沸騰域[29,35-37]において行われてきた.本節では,MEBにおける履歴現象,いわゆるヒステリシスについて紹介する.

Fig. 10 に, (a) $\Delta T_{sub} = 40$ K, (b) 50 K, および(c) 60

K での沸騰曲線および MEB 域での蒸気泡基本振動 数6を示す.ここで6は、所定の熱入力値に対して 充分に発達した MEB を実現した後、伝熱面中央部 で蒸気泡の振動周期 τ を 20 から 70 回分計測した 上で平均してその逆数として求めたものである.履 歴現象については、熱入力を徐々に増加して MEB を実現した後,熱入力を下げながら再度各条件にて 充分 MEB を発達させた状態で壁面過熱度ΔTsat およ び熱流束 q"を計測している.いずれのΔT_{sub}におい ても, 熱入力を減少させる場合には, 高ΔT_{sat} 側にシ フトする. 熱入力の減少に伴い, ΔT_{sat} はより大きく なり、最終的に伝熱面上で MEB を維持することが 出来なくなり、核沸騰域へと遷移する. 核沸騰域に おいては,熱入力の増加時と減少時で顕著な差はな く、したがって、MEB における履歴の発現が伝熱 面性状に起因するものではないと考えられる.なお, 熱入力減少時の MEB 域での ΔT_{sat} の増加は, ΔT_{sub} の 上昇とともに小さくなる.ただし、水平伝熱面直上 での吸込流を付与した系での実験[5]においては, 伝熱面への熱入力を減少する過程においても「気泡 微細化現象域では同一の曲線をたどること」が確認



Fig. 10 Fundamental frequency f_0 against corresponding boiling curve for (a) $\Delta T_{sub} = 40$ K, (b) 50 K, and (c) 60 K. The data of f_0 are plotted against q'' and ΔT_{sat} on the vertical planes. Note that the fundamental frequency in the MEB regime only is plotted. Another note that upward and downward triangles correspond to the data point obtained in the processes of increasing and decreasing the power input, respectively. Test liquid is the distilled water, and the diameter of the heating surface is of 10 mm. (Reuse of Fig. 4 in [13]: permitted by the JSME)

されており,同一の傾向が得られていないことに注 意が必要である.本稿執筆時に著者は統一的な結論 に到達していない.

蒸気泡が呈する振動の平均基本周波数 f_0 は,熱入 力の増加に伴い上昇し,当該実験系で最も高い熱入 力時には 400 Hz から 500 Hz に到達する.この周波 数は, Fig. 5 で示した沸騰音の基本周波数とほぼ一 致している[12,13].当該実験系で異なる ΔT_{sub} に対し て行った結果により,熱入力を減少する過程におい て,蒸気泡が呈する高周波数振動はq''に対してほ ぼ不変となることを明らかにした.すなわち,MEB 発現時において,蒸気泡の高周波数振動は、 ΔT_{sat} に よらずq''によって決定されることを示唆している. この傾向は,図中に示した f_0 -q''の投影分布からよ り詳細に確認出来る.

6. おわりに

本稿では沸騰伝熱に関するトピックの一つとし て、気泡微細化沸騰(microbubble emission boiling, MEB)について概説した.稲田らによる一連の先駆 的研究[1-4]に始まる従来研究を紹介した後,特に作 動液体として蒸留水を,伝熱面として銅製円形状の ものを採用したプール沸騰系に関し,沸騰曲線,蒸 気泡挙動と沸騰音の関係,発現過程,さらに,履歴 現象について研究事例を紹介した.

MEB の伝熱特性や発生条件に関して、本稿では 紹介しきれないさまざまな研究が行われ知見が蓄 積されているが,工学的応用を目指す上で最も重要 だと思われるのは、その特徴として知られている高 熱流束状態の安定的な維持機構である. その特徴を 実現する鍵となるのは、伝熱面への周囲液体の供給 機構であると考えられる. MEB 特有の高熱流束状 態については, ミクロ液膜モデルによる熱流束の予 測値がサブクールの核沸騰熱流束の実験値とよく 一致することが示されている[38]. また, 伝熱面へ の周囲液体供給については、MEB 発現時での伝熱 面周囲液体速度場の計測により, 伝熱面上方から伝 熱面に向かう巨視的な周囲液体供給経路の存在が 示されている[7,39,40]. さらに、伝熱面上に生じた 蒸気泡表面における,いわゆる温度差マランゴニ効 果が液体供給の鍵となるという提言もなされてい る[6]. しかしながら, いずれにしてもこれらの実現 機構について依然包括的な理解に至っていないと 認識している. MEB の熱流体的特徴である蒸気泡 の高周波振動や,充分発達した高熱流束条件下で見 られる蒸気泡の協調的高周波数振動現象[12]につ いても,その発現機構は依然未解決な問題である.

著者にとって気泡微細化沸騰(MEB)は、学部4 年時に研究室の先輩とともに行った膜沸騰熱伝達 に関する卒業研究以来の沸騰現象に関する研究テ ーマとなる.学位取得後に着任した現所属にて,鈴 木康一博士(東京理科大学名誉教授)が強制対流場 で行っていた一連の研究によってその存在を初め て知り,強い関心を持ったのが始まりである.当時 は諸事情により MEB に関する研究を行うことがで きなかったため、サブクール状態下での蒸気泡凝縮 過程に注目し,沸騰を実現する代わりに蒸気をオリ フィスからサブクールプール中に射出した際の界 面現象[41,42]や、超音波・音場を付与した際の気泡 が呈する体積振動・形状振動[43,44]に注目して試行 錯誤を繰り返してきた. 著者にとって転機となった のは、2006年にイタリア・スポレート (Spoleto) で 行われた 6th International Conference on Boiling Heat Transfer にて, MEB 研究の先駆者である稲田茂昭博 士(群馬大学)のご講演を聴講する機会を得たこと であった. 稲田博士は液滴落下系により q~10² MW/m²に迫る熱流束を実現されており[45],激しい 蒸気泡生成を伴い, CHF よりも高い熱流束を安定 的に実現する現象にあらためて惹きつけられた. そ の後, 庄司正弘博士(当時:神奈川大学, 東京大学 名誉教授),渡辺誠氏(東京大学)に貴重なご助言 をいただき実験装置の構築に漕ぎつけた.本稿にて 紹介した実験結果は、そのような経緯を経て得てき たものである.

本稿をまとめる機会をいただいた矢吹智英博士 (九州工業大学) に謝意を表する.著者がこれまで に行ってきた研究活動を振り返りつつ,蓄積されて いる知見をまとめる貴重な機会となった.

著者グループによる研究成果は,東京理科大学理 工学部機械工学科界面熱流体力学研究室に所属し 研究を遂行してくれた学部学生・大学院生によるも のである.彼ら彼女らが一所懸命に取り組んでくれ た実験および解析結果が無ければ本稿をまとめる 機会も得られなかった.特に,本稿で紹介した結果 は,安藤洵氏,堀内和菜氏,宮下周氏,小林穂高氏, 林美玲氏によるものである.心から謝意を表すると ともに,今後の研究の進展を見守っていただきたい と願っている.

参考文献

- [1] 稲田 茂昭, 宮坂 芳喜, 泉 亮太郎, 小長谷 芳 彦, サブクールプール沸騰特性曲線の研究 (第 1報, 局所熱伝達特性とそれにおよぼすサブク ール度の影響), 日本機械学会論文集 B 編, 47 (1981) 852-861.
- [2] 稲田 茂昭, 宮坂 芳喜, 佐久本 伸, 泉 亮太郎, サブクールプール沸騰特性曲線の研究 (第2 報, 熱伝達におよぼす伝熱面汚損と気ほう塊 の微細化現象), 日本機械学会論文集 B 編, 47 (1981) 2021–2029.
- [3] 稲田 茂昭, 宮坂 芳喜, 泉 亮太郎, サブクー ルプール沸騰特性曲線の研究 (第3報, 気ほう 塊の挙動と伝熱面温度の変動), 日本機械学会 論文集 B 編, 47 (1981) 2030–2041.
- [4] 稲田 茂昭, 宮坂 芳喜, 泉 亮太郎, 小林 盛一, サブクールプール沸騰特性曲線の研究(第4報, 遷移沸騰的領域の伝熱機構), 日本機械学会論 文集 B 編, 47 (1981) 2199–2208.
- [5] 久保 良, 熊谷 哲, 気泡微細化沸騰の発生と安定性, 日本機械学会論文集 B 編, 58 (1992)
 497-502.
- [6] Tang, J., Zhu, G., and Sun, L., Microbubble emission boiling in subcooled pool boiling and the role of marangoni convection in its formation, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 50 (2013) 97–106.
- [7] Ando, J., Horiuchi, K., Saiki, T., Kaneko, T., and Ueno, I., Transition process leading to microbubble emission boiling on horizontal circular heated surface in subcooled pool, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 101 (2016) 240–250.
- [8] Tang, J., Mo, Z., Sun, L., and Yan, C., An experimental study on microbubble emission boiling in a subcooled pool: Heat transfer characteristics and visualized presentation, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 80 (2017) 40–52.
- [9] Horiuchi, K., Koiwa, Y., Kaneko, T., and Ueno, I., Condensation of vapor bubble in subcooled pool, *Proceedings 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics*, 2017 [doi: 10.1117/12.2271288].
- [10] Kawakami, K., Sakamoto, S., Tanigawa, H., and

Tsuruta, T., A study on transition process to MEB by limiting boiling space, *Journal of Thermal Science and Technology*, 16 (2021) JTST0004.

- [11] Horiuchi, K., Kobayashi, H., Miyashita, S., Hori, T., and Ueno, I., Spatial-temporal thermal-fluid behaviors of microbubble emission boiling (MEB), *American Institute of Chemical Engineering Journal*, 67 (2021) 17193.
- [12] Kobayashi, H., Hayashi, M., Kurose, K., and Ueno, I., On homogeneity of vapor bubbles' oscillation and corresponding heat transfer characteristics and boiling sound in microbubble emission boiling (MEB), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 188 (2022) 122564.
- [13] Kobayashi, H., Hayashi, M., Kurose, K., and Ueno, I., Hysteresis in microbubble emission boiling (MEB) under highly subcooled conditions, *Mechanical Engineering Journal*, 9 (2022) 22– 00062.
- [14] 久保 良, 島田 了八, 熊谷 哲, 気泡微細化沸 騰の発生音と熱伝達の相関性, 日本機械学会 論文集 B 編, 59 (1993) 183–190.
- [15] Tang, J., Xie, G., Bao, J., Mo, Z., Liu, H., and Du, M., Experimental study of sound emission in subcooled pool boiling on a small heating surface, *Chemical Engineering Science*, 188 (2018) 179– 191.
- [16] 熊谷 哲, 久保 良, 川崎 正史, 気泡微細化沸 騰の発生と安定性, 日本機械学会論文集 B 編, 64 (1998) 3808–3813.
- [17] 古谷 正裕, 高熱負荷除去のための微細化沸騰 の持続的発生条件, 日本原子力学会和文論文 誌, 2 (2003) 115–120.
- [18] Ito, D., Hase, K., and Saito, Y., Heat transfer study for ads solid target: surface wettability and its effect on a boiling heat transfer, *In, Ed., Nakajima, K., Nuclear Back-end and Transmutation Technology for Waste Disposal*, Springer Japan (2015) Chapter 10, 95–105.
- [19] Unno, N., Noma, R., Yuki, K., Satake, S., and Suzuki, K., Effects of surface properties on wall superheat at the onset of microbubble emission boiling, *International Journal of Multiphase Flow*, 155 (2022) 104196.

- [20] Suzuki, K., F. Inagaki, and Ueno, I., Heat transfer enhancement in subcooled boiling with ultrasonic field, *Trans. Japan Society for Aeronautical and Space Sciences (JSASS)*, 7 (2009) Ph67–Ph70.
- [21] Tang, J., Sun, L., Wu, D., Du, M., Xie, G., and Yang, K., Effects of ultrasonic waves on subcooled pool boiling on a small plain heating surface, *Chemical Engineering Science*, 201 (2019) 274– 287.
- [22] Li, X., Tang, J., Sun, L., Li, J., Bao, J., and Liu, H., Enhancement of subcooled boiling in confined space using ultrasonic waves, *Chemical Engineering Science*, 223 (2020) 115751.
- [23] Wang, G. and Cheng, P., Subcooled flow boiling and microbubble emission boiling phenomena in a partially heated microchannel, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (2009) 79– 91.
- [24] Wagner, E. and Stephan, P., High-resolution measurements at nucleate boiling of pure FC-84 and FC-3284 and its binary mixtures, *Journal of Heat Transfer*, 131 (2009) 121008.
- [25] Jung, S. and Kim, H., An experimental method to simultaneously measure the dynamics and heat transfer associated with a single bubble during nucleate boiling on a horizontal surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 73 (2014) 365–375.
- [26] Yabuki, T. and Nakabeppu, O., Heat transfer mechanisms in isolated bubble boiling of water observed with mems sensor, *International Journal* of Heat and Mass Transfer, 76 (2014) 286–297.
- [27] Yabuki, T. and Nakabeppu, O., Microscale wall heat transfer and bubble growth in single bubble subcooled boiling of water, *International Journal* of Heat and Mass Transfer, 100 (2016) 851–860.
- [28] Jung, J., Kim, J., Lee, H., and Kim, S.J., Measurement of phase distributions on the surface in subcooled pool boiling of fc-72, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115 (2017) 62–72.
- [29] Berenson, P.J., Transition boiling heat transfer from a horizontal surface, *Technical Report* 17, Massachusetts Institute of Technology (1960).

- [30] Sakurai, A. and Shiotsu, M., Transient pool boiling heat transfer. Part 2: Boiling heat transfer and burnout, *Journal of Heat Transfer*, 99 (1977) 554– 560.
- [31] Hino, R. and Ueda, T., Studies on heat transfer and flow characteristics in subcooled flow boiling -Part 1. Boiling characteristics, *International Journal of Multiphase Flow*, 11 (1985) 269–281.
- [32] Hsieh, S.-S. and Weng, C.-J., Nucleate pool boiling from coated surfaces in saturated R-134a and R-407c, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40 (1997) 519–532.
- [33] Kruse, C., Tsubaki, A., Zuhlke, C., Anderson, T., Alexander, D., and Gogos, G., Secondary pool boiling effects, *Applied Physics Letters*, 108 (2016) 051602.
- [34] Zhang, C. and Cheng, P., Mesoscale simulations of boiling curves and boiling hysteresis under constant wall temperature and constant heat flux conditions, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 110 (2017) 319–329.
- [35] Berenson, P.J., Experiments on pool-boiling heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 5 (1962) 985–999.
- [36] Witte, L.C. and Lienhard, J.H., On the existence of two 'transition' boiling curves, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 25 (1982) 771–779.
- [37] Maracy, M. and Winterton, R.H.S., Hysteresis and contact angle effects in transition pool boiling of water, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 31 (1988) 1443–1449.
- [38] 中村 仁, 鶴田 隆治, 谷川 洋文, 気泡微細化 沸騰の発生機構に関する研究, 日本機械学会 論文集, 84 (2018) 17–00405.
- [39] Li, X., Tang, J., Hu, R., Sun, L., and Bao, J., Investigation on interaction between an oscillating vapor film and its surrounding liquid in microbubble emission boiling, *Applied Thermal Engineering*, 216 (2022) 119012.
- [40] 伊藤 大介, 刀塚 淳, 齊藤 泰司, 気泡微細化
 沸騰における流れ場の PIV 計測, 日本機械学
 会論文集, 83 (2017) 16-00428.
- [41] Ueno, I., Hattori, Y., and Hosoya, R., Condensation

vibration, Proceedings of International Heat and collapse of vapor bubbles injected in Transfer Conference 13 (2006) subcooled pool, Microgravity Science and Technology, 23 (2011) 73-77. [DOI:10.1615/IHTC13.p12.400]. [42] Ueno, I., Ando, J., Koiwa, Y., Saiki, T., and [44] Matsumoto, K. and Ueno, I., Oscillating bubbles in Kaneko, T., Interfacial in- stability of a condensing ultrasonic acoustic field, Journal of Physics: Conference Series, 147 (2009) 012015. vapor bubble in a subcooled liquid, European Physical Journal Special Topics, 224 (2015) 415-[45] Inada, S., Shinagawa, K., Liias, S.B., Sumiya, H., 424. and Jalaludin, H.A., Micro-bubble emission boiling [43] Ueno, I. and Kojo, T., Excitation of high-orderwith the cavitation bubble blow pit, Scientific mode shape oscillation of bubbles under ultrasonic Reports, 6 (2016) 33454.

高温面冷却中の非定常遷移沸騰域の 伝熱計測手法とその応用

Measurement Technique and Its Application to Transient Transition Boiling Heat Transfer during Quenching of Hot Surface

> 光武 雄一 (佐賀大学) Yuichi MITSUTAKE (Saga University) e-mail: mitutake@me.saga-u.ac.jp

1. はじめに

自発核生成温度を超える高温面の沸騰冷却は, 材料製造プロセスを始めとする工業的に重要な冷 却過程の1つである.その過程には高温面のぬれ 回復に関連した不安定な遷移沸騰領域を含むため, 抜山による沸騰曲線の発見以来 80 有余年の沸騰研 究にも関わらず,非定常冷却過程の理解とその予 測制御技術は不十分と言わざるを得ない.

本稿では、伝熱面上での不安定なぬれに起因す る非定常性と空間的不均一性が強い遷移沸騰域の 特徴と非定常計測法について述べた後、衝突噴流 沸騰系の伝熱特性への適用結果について概説する.

2. 沸騰曲線と冷却曲線

2.1 沸騰伝熱の基本特性と平衡点の安定性

沸騰熱伝達は、図1に示すN字型の沸騰曲線と呼 ばれる両対数グラフに描かれた壁面過熱度△T_{sat}と 表面熱流束 q_wの関係で特徴づけられる.沸騰曲線 上の沸騰開始(ONB)点,限界熱流束(CHF)点, 極小熱流束(MHF)点の3つの特性点により,単 相熱伝達(SC),核沸騰(NB),遷移沸騰(TB), 膜沸騰(FB)の4つの伝熱領域に分類され,沸騰 曲線の勾配により伝熱領域が判断できる.



高温面の非定常沸騰冷却では, 膜沸騰域から遷 移沸騰域を経て核沸騰域に至る複数の沸騰伝熱形 式が固体側の非定常熱伝導と連成して出現する. 各伝熱形式の説明は成書に譲るが, 遷移沸騰域の 下限と上限を定める CHF 点と MHF 点, そして遷 移沸騰領域の基本特性については触れておきたい.

CHF は、伝熱面近傍での気液対向二相流の干渉 で液体供給が制限される結果、伝熱面上の液体の 欠乏によって乾き面を生じて壁面温度が上昇し、 遷移沸騰域へ移行する.非定常状態での CHF は、 固体側非定常熱伝導の影響を受けるため、最大熱 流束と区別して呼ぶ場合もある.

遷移沸騰域では、伝熱面上の部分的なぬれ面と 乾き面でそれぞれ核沸騰と膜沸騰が共存する.遷 移沸騰熱流束 q_{TB}の最も簡単な表現は、式(1)に示 すように時間的・空間的に平均化されたぬれ面の 占有割合Γで重み付けした核沸騰と膜沸騰の熱流 束 q_{NB}と q_{FB}の和で与えられる.

$$q_{TB} = \Gamma \cdot q_{NB} + (1 - \Gamma) \cdot q_{FB} \tag{1}$$

遷移沸騰域を特徴づける負性抵抗の定性的説明 は、式(1)で CHF 点近傍から MHF 点近傍まで AT_{set} の上昇に伴いΓが1から0まで変化、つまり乾き面 の拡大で q_{TB} が減少するためである. 固液接触状態 の測定結果と遷移沸騰曲線との相関性は、この説 明を支持するが、遷移沸騰域に影響する表面の酸 化膜, 粗さ, ぬれ性などの不確実性に加えて, 高 温面上でのぬれと乾きに伴う固体側の非定常熱伝 導との連成など考慮すべき因子が非常に多く,一 意的にΓ(ΔT_{sat})を与えて遷移沸騰曲線を予測するこ とは困難である.また,遷移沸騰は負性抵抗のた め不安定な領域である.例えば,図 1 で等熱流束 q_sの一点鎖線と沸騰曲線が交わる平衡点の中で負 勾配の D-E 間の平衡点では、Twの変動で生じる熱 流束不均衡(q_w≠q_s)が温度変動を拡大する方向に作 用し, 正勾配の C-D または E-F 間の安定な平衡点

まで非定常変化で T_wの逸走が生じる.遷移沸騰を 定常状態で維持するには飽和蒸気による間接加熱 [1]など実験装置に特別な工夫が必要となるが,熱 容量が大きな伝熱面であれば準定常変化中の遷移 沸騰曲線の経路が追跡可能となる.

遷移沸騰域の上限と膜沸騰域の下限を定める MHF 点は,高温面上での部分的・一時的な固液接 触の上限に関わる特性点のため,高温面非定常冷 却では,固液接触開始に伴う急冷開始の起点とな る MHF 点の特性は非常に重要である. MHF 点近 傍での代表的な固液接触形式として,図2に示さ れる a)-c)の三形式が挙げられる.衝突噴流やスプ レーなどの外部強制対流沸騰系では,b)/c)の形式 が顕著となり,MHF 点温度の高温化が生じる.

MHF 点の測定とモデル化は、古くよりプール沸 騰系を対象に行われており、1)試験流体の自発核 生成温度または熱力学的液過熱限界温度に基づく 温度支配型[2]、2)流体力学的不安定で気液界面 から離脱する蒸気流出量に釣り合うエネルギー供 給量を規定する熱流束支配型のモデル[3]が存在す る.参考までに、パルス加熱法による大気圧下の 水とエタノールの液過熱限界温度 T_{SHL} の測定値は、 それぞれ 302 $^{\circ}$ 、199 $^{\circ}$ となる[4].

2.2 冷却曲線

図3は、高温面非定常冷却中の内部温度*T*_bまた は表面温度*T*_wの代表温度時間履歴で与えられる冷 却曲線を模式的に示したものである.冷却曲線の



勾配, すなわち冷却速度は, 高温面上を支配する 伝熱形式に応じて大きく変化する. 特に, 冷却開 始初期の膜沸騰域での緩やかな冷却速度から突然 急冷を開始するクエンチ点の時刻と温度は, 高温 面の冷却温度制御で重要なパラメータである.

図4に示す表面積*A*,体積*V*,物性値*pck*,表面 温度*T*_wの高温物体が代表液温*T*_∞の流体により熱伝 達率 *h* で冷却される場合を考える.冷却中の高温 物体の内部温度*T*や表面温度*T*_wは不均一のため, クエンチ点を決定づける保有エネルギー(平均温 度)の時間変化率は,式(2)の積分形のエネルギー 保存式に従う.右辺の伝熱量の面積分では,伝熱 形式の変化に伴う *h* の変化だけでなく,高温面上 で共存する各伝熱様式の占有面積割合の変化の影 響も冷却曲線には内包されている.



つまり,図2に示す不均一な固液接触を伴う遷 移沸騰は,伝熱面温度の非平衡性が強く,1本の 代表温度履歴でその伝熱特性の本質的な理解は不 可能で,局所伝熱計測が不可欠となる.ただし, 小寸法・熱の良導体の膜沸騰冷却のように無次元 数 Biot 数が 0.1 以下の集中定数系近似と一様な熱 伝達率分布が成立する場合,各瞬間のTおよびTw が測定温度 Tb(t)と等しいので,式(2)の両辺の積分 が簡単に実行できて,冷却曲線の温度勾配から表 面熱伝達率と表面熱流束を直接評価できる.そし て,図3の冷却曲線に対して沸騰曲線上の特性点 や熱伝達形式を一義的に対応付けが可能となる. 従って,非定常沸騰冷却実験を行うときは,内部 温度履歴 Tb(t)の測温位置や表面温度履歴 Tw(t)の評 価方法について十分な検討が必要である.

2.3 冷却曲線と沸騰曲線との対応

 非定常熱伝導逆問題解析で評価された代表半径位 置r = 10 mmでの表面温度 T_w と表面熱流束 q_w の時 間履歴と沸騰曲線の比較例を示す.沸騰曲線は時 間履歴から20 s毎に読み取った T_w と q_w の値をシン ボルでプロットしたもので、シンボル間隔の粗密 で非定常変化の早さが分かる.グラフ中、●はク エンチ点とMHF点を示し、一点鎖線はエタノール の液過熱限界温度 T_{SHL} を示す.

図 5(a)は、炭素鋼の高温面全体を均一にスプレ 一散布した全面スプレー冷却の結果を示す.クエ ンチ点は、 q_w が最大熱流束へ急上昇と T_w の急冷の 開始時刻で定義する. T_w の急冷開始点は丁度折れ 点に対応する.クエンチ点は、 ΔT_{sub} に関わらず沸 騰曲線上の MHF 点と一致し、MHF 点到達と同時 に急冷を開始する.MHF 点温度とクエンチ温度は、 T_{SHL} とほぼ同じ200 ℃となる.図5(b)は、銅の高温 面の中心部¢36 mmの範囲のみ高質量流束・高サブ クール度のスプレー散布した部分スプレー冷却の 結果を示す.スプレー直下のMHF 点温度は T_{SHL} を 超える約 300 ℃まで高温化するが、MHF 点でクエ ンチを開始することなく長時間遷移沸騰状態を維 持し、 T_w が T_{SHL} を下回る 180 ℃でクエンチを開始 し、クエンチ点とMHF 点は一致しない.

図 2(b)に示される高温面上の一部を強冷却する 状況では, MHF 点温度は *T*_{SHL} を超えて高温化する が, クエンチ温度は冷却の均一・不均一に関わり なく *T*_{SHL} 以下, つまりクエンチは, 高温面上で安 定なぬれが可能な状況下でのみ達成されることを 示唆する.





3. 高温面非定常冷却実験での温度計測

3.1 沸騰研究における局所伝熱計測技術の進展

近年 MEMS プロセスで作製した薄膜表面温度セ ンサー[7]や高速 IR カメラ[8-11]など新しい非定常 伝熱計測法が沸騰伝熱研究に導入され,従前の伝 熱面上の空間的・時間的に平均化された伝熱特性 評価と異なり,空間的不均一性と非定常性が強い 発泡核,三相境界線近傍の表面温度・表面熱流束 を高い応答周波数(1~10kHz)と高い空間分解能 (サブミリ以下)で把握できるなど,沸騰伝熱研究 分野での計測技術は大きな進化を遂げている.

IR カメラでの計測は、沸騰面裏側からの撮影と なるため、伝熱面は赤外線波長域に対して透明な Si などの脆性材料基板や薄い金属板が適用となる. 高温面非定常沸騰冷却では、クエンチ発生時に過 大な熱応力が伝熱面に生じるため、実験範囲が限 定されてしまう[8,11].また、非定常遷移沸騰域 の冷却実験では、伝熱面熱容量も必要なので、従 前の金属伝熱面を用いた実験手法にも利がある. しかし、強い非定常性と不均一性が特徴の遷移沸 騰域の伝熱過程の把握には、時間応答性に優れた 局所表面温度・表面熱流束計測が不可欠となる.

3.2 高速応答表面温度計測

局所表面温度センサーの 1 つに同軸熱電対 (Coaxial Thermocouple)がある.図6の断面図で示 す絶縁被覆した金属細線の端面を異種金属の伝熱 面と面一に固定し,メッキなどで伝熱面と同一金 属薄膜を積層して表面近傍に接合点を形成した熱 電対である.内燃機関シリンダー内壁の周期的加 熱や衝撃波管内の空力加熱など高い応答性が必要 な温度計測で広く用いられている.また,60 年代 初頭には既に CHF 点近傍での非定常温度計測結果 の報告がある [12].センサー応答周波数は,薄膜 の厚さ δ と温度伝導率 a に依存する.表面から半無 限固体内部へ伝播する周波数 f,波数 $k = (f/a)^{1/2}$ の 温度波の振幅は,深さ δ で1/ $e^{k\delta}$ 倍に減衰する[13]. 減衰比が 1/2 の周波数 $f_{1/2}$ は,式(3)で与えられる.



図6 CR-Ni 同軸熱電対を用いた温度計測システム と測温部拡大写真[14]

表1に示す材料の熱物性値に基づき、NiとCuに 対して $f_{1/2}$ = 100 kHz を得るには、 δ はそれぞれ 7.8 µm、22.3 µm の薄さが要求される. 高温実験では 酸化し易い Cu は使えないので、熱電材料の組み合 わせは Ni 薄膜とクロメル (CR) 細線の一択となる.

$$f_{1/2} = 0.480 \ a/\delta^2 \tag{3}$$

著者らは、図6に示すNi円板(ϕ 50 mm, t5 mm) にSiO₂の絶縁コーティングした ϕ 0.32 mmのCR線 を設置し、その表面に膜厚 3 µmの無電解Niメッ キを施したCR-Ni 同軸熱電対を作製し、液滴衝突 や衝突噴流冷却の局所非定常伝熱計測に用いてい る[15,16]. CRとSiO₂の熱浸透率 $e(=(\rho ck)^{1/2})$ が母材 のNiより小さいため、接合点の非定常温度指示が Ni 均質相の真値より過小となる.この誤差はSiO₂ 絶縁層のギャップ或いは線径を小さくして許容範 囲内に収めることができる[14].センサーから電 圧アンプの出力までのシステム全体の最小応答時 間は70 µs程度であった.400 ℃までの高温冷却実 験ならば、十分な耐久性を有する.

表1 各種材料の温度伝導率 a と熱浸透率 e (600 K)

Material	a, mm ² /s	$e, Ws^{1/2}/cm^2/K$
Ni	12.7	1.86
Cu	103.9	3.72
Chromel	5.62	0.983
SiO ₂ (300 K)	0.81	1.80

3.3 非定常熱伝導逆問題解析

内部温度履歴から伝熱面上の*T_wとq_wを*推定する には、非定常熱伝導逆問題(IHCP)解析が必要と なる.よく用いられるBeckの手法は、順問題解析 で求めた測温点の温度履歴が実測値と一致するま で未知の表面熱流束履歴を反復計算で修正する.

一方,均質一定物性の平板/円筒/球座標系の解析 的解法として Laplace 変換法に基づく門出の方法 [17,18]がある.図7,8に代表的な1Dと2Dの解析 対象例と内部測温面上のセンサー配置(黒丸)を 示す.門出の解析法では,内部測温面上の温度変 化(1D)と温度分布(2D)をそれぞれ時刻の半値 多項近似式,時刻の半値多項式と固有関数との積 で構成した近似式で境界条件を与えることにより, 反復計算なしに安定性に優れた解析解を得ている.

高温面非定常冷却実験では,固液接触に伴う強い不規則温度変動と熱物性の温度依存性の影響が 顕著となる.時間領域を分割し低次の半値多項近 似式を複数重ね合わせた近似精度補償[14,19],熱 伝導率の温度依存性を厳密に取り扱う変換温度法 [20]の導入で一応解決されている.逆問題解析に よる推定結果の時間応答は、図7,8で表面と最も 近い測温面深さ $\delta = x_1$, $R_o - r_1$ で感知可能な表面温 度変動の最大周波数で決まる.同軸熱電対が測定 対象とする非常に速い表面温度変化の計測では, 固体表面から内部へ伝播する温度波の高調波成分 の減衰が非常に大きいので、半無限体近似を適用 して図7(a)の解析解で T_w , q_w を評価する.



4. 高温面の衝突噴流非定常冷却の伝熱計測

4.1 高温面上の流動状況

図 9 に水平上向き高温面の衝突噴流冷却中の沸 騰状況を示す.冷却条件は、初期温度 $T_{s0} = 350$ °C 噴流径 $d_j = 1 \text{ mm}$,水温 $T_l = 50$ °C,噴流速度 $u_j =$ 9.4 m/s である.撮影時刻は冷却開始後 0.54 s で、 よどみ点から拡大するぬれ面が代表測温位置 r =7.5 mm に到達したタイミングである.

図 9 でよどみ点から外周部に向かって単相熱伝 達域 SC と核沸騰域 NB が ONB 点を挟んで存在し, 安定なぬれ面を形成する. NB 領域の幅 Δr_b は数 mm 程度と狭く,その外側はぬれ先端(WF: Wetting Front)が前進と後退を繰り返す不安定なぬ れ状態の遷移沸騰域 TB となる. TB 領域では,WF 前進時に高温面上でのスパッタリングで液膜は全 て液滴となって周囲に飛散し、WFの外側の高温面 は乾き面となる.本実験系でのWF挙動は、噴流自 由界面の Plateau-Rayleigh 不安定波長 $\lambda_j = 4.508d_j$ に 基づく擾乱が噴流衝突後、液膜流上を伝播して WF まで到達し、前進・後進の周期を支配していた.

4.2 非定常局所熱伝達計測

著者の研究グループで実施したサブクール衝突 噴流冷却中の高温面非定常冷却特性の研究[21]で は、内部の測温面深さで検知可能な最大周波数は 銅製伝熱面でも高々数 10 Hz に留まるため、同軸 熱電対による固液接触界温度の直接測定を行った.

図 10 は、初期温度 $T_{s0} = 370$ ℃において、 $\Delta T_{sub} = 30-50$ K, $u_j = 6-10$ m/s で 5 つの条件の組み合わせ F1 ~F5 で得られた代表測温点 r = 7.5 mm での局所表 面温度と表面熱流束の変化を示す[16]. $\Delta T_{sub} \ge u_j$



図 9 上向き水平面噴流冷却中の流動状況 ($T_{s0} = 350$ °C, Water, $\Delta T_{sub} = 50$ K, $u_i = 9.4$ m/s)



図 10 初期温度 *T*_{s0} = 370 ℃の Ni 高温面噴流冷却 中の局所表面温度,表面熱流束の時間変化[16]

の値は、 q_w のグラフ右側に示す. 図中各曲線上の \downarrow と ∇ のシンボルは、それぞれ測温位置への WF 到 着時刻 $t_{wf} \ge q_w$ の急増開始に対応するクエンチ開始 時刻 t_q を示す. FB, TB, NB, SC の時間区間は、F2 での結果に対して、WF 到着時刻 t_{wf} 、最大熱流束 発生時刻 t_{MHF} (注: MHF は Maximum Heat Flux)、 ONB 点到着時刻 t_{ONB} で区別された代表測温点上で の伝熱形式を示す.

F2の TB 領域では、ぬれと乾きに対応した数 10 K 程度の Tw 変動と 10 MW/m²程度のスパイク状の qw 変動が捉えられている. Tw 変動から求めた接触 時間間隔の統計分析で得られた最も出現頻度が高 い時間間隔は,不安定波長の周期 λ_i / u_i とほぼ一致 した. また, TB よりも頻度は少ないが NB だけで なく WF 到着前の飛散液滴による FB (液膜流は飛 散しているので正確にはただの乾き面)領域でも 存在する.5つの条件に対する時刻 t_{WF} と t_q での T_w に注目すると,WF 先端での固液接触開始時の温 度 T_{WF}は 280~310 ℃の範囲に存在し,水の過熱限 界温度 T_{SHL} とほぼ一致する. また, 高温面上での 安定なぬれ回復に対応するクエンチ温度 T_aは, *T_{SHL}*以下の 230~260 ℃の範囲に存在し、*ΔT_{sub} と u_i* が大きくなるに従い, T_qは高温側に偏移している. この結果は、図5で示したスプレー冷却のクエン





チ温度の特徴と一貫性を持つことが分かる.

4.3 沸騰曲線上の非定常伝熱特性

図 11(a),(b)は、図 10 で $u_j = 8$ m/s, $\Delta T_{sub} = 70$ K, 30 K の条件に対応する F1 と F2 の時間履歴から作成 した沸騰曲線をそれぞれ示す. 図中ループを描く 細線は T_w , q_w の履歴をそのまま描いたもの、シン ボルは 0.5 ms または 5 ms 毎に時間履歴の数値を読 み取りプロットしたもの、太線は時間履歴データ に移動平均処理を施した結果を示す. リファレン スとして記入している整理式 [16]の提示は省略す るが、図中の破線と一点鎖線は、定常状態の衝突 噴流単相熱伝達の式(等熱流束面)とプール核沸 騰熱伝達の式を示す. また、 q_c で示す熱流束は、 飽和噴流沸騰系の CHF の整理式に含まれる沸騰長 さを核沸騰域の幅 Δr_b の実測値を用いて評価した CHF の予測値を示す.

グラフより不規則なループ軌道を描く非定常の 沸騰曲線は,移動平均処理を通すと一般的な強制 対流沸騰曲線と類似した形を現す.ただし,WF 到着前は乾き面のため,膜沸騰および極小熱流束 点は存在しない.非定常条件の局所単相熱伝達, 核沸騰域の特性は,定常条件に対する既存の単相 熱伝達,核沸騰熱伝達の整理式と定性的に一致し ている.一方,図示のない他の冷却条件を含めて 非定常条件で記録した最大熱流束については,飽 和衝突噴流沸騰系のCHF 整理式の予測値とよく一 致し,安定なぬれを生じている NB 域の上限が定 常状態のCHF で規定されることも分っている.

5. まとめ

本稿では、高温面非定常沸騰冷却中の高温面の 非定常伝熱計測・評価法の紹介と衝突噴流冷却中 のぬれ先端周囲の接触界面温度・熱流束の評価結 果について概説した.

高温面上で共存する伝熱形式分布の決定には, ぬれ先端(WF)の挙動予測が欠かせない.現状, WFが前進中のモデル化の見通しを得ているが, 冷却初期のよどみ点直下(図 2(b)の状況)で生じ る自発核生成が支配的なぬれ回復の伝熱過程は, µs スケールの現象で計測を含めて課題として残る.

最後に本研究課題での共同研究者である佐賀大 門出 政則 名誉教授,柳楊氏(現浙江理工大学), および実験に協力いただいた研究室卒業生の諸氏 に対して謝意を表します.

参考文献

- [1] Berenson, P.J., Int. J. Heat Mass Trans., 5 (1962) 985.
- [2] Spiegel, P., et al., Int. J. Heat Mass Trans., 6 (1963) 987.
- [3] Berenson, P.J., Trans. ASME, J. Heat Trans.,83 (1961)) 351.
- [4] Cole, R., Advances in Heat Transfer 10, Academic Press (1970) 108.
- [5] 光武雄一,門出政則,日高真一郎,スプレー 冷却中の高温面のぬれ開始温度特性(第1報, 高温面全体を均一にスプレー冷却した場合), 日本機械学会論文集 B 編, 75-758 (2009) 1917.
- [6] 光武雄一、門出政則、高木英斗、スプレー冷却中の高温面のぬれ開始温度特性(第2報,高温面の一部をスプレー冷却した場合)、日本機械学会論文集 B 編, 75-758 (2009) 1925.
- [7] Yabuki, T. and Nakabeppu, O., Int. J. Heat Mass Trans., 100 (2016) 851.
- [8] Okawa, T., et al., Nuclear Eng. Des., 363 (2020) 110629.
- [9] Tanaka, T., et al., Int. J. Heat Mass Trans., 170 (2021) 121006.
- [10] Wagner, E. and Stephan, P., J. Heat Transfer, 131 (2009) 121008.
- [11]Hikata, T. and Fujimoto, Int. J. Heat Mass Trans., 197 (2022), 123364.
- [12] Moore, F.D. and Mesler, R.B., AIChE J., 7 (1961) 620.
- [13] Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C., *Conduction of heat in solids*, Oxford University Press (1946).
- [14]Liu, Y., et al., Int. J. Heat Mass Trans., 162 (2020) 120331.
- [15]Illias, S., et al., Therm. Sc. Eng., 22-2 (2014) 21.
- [16]Liu, Y., et al., Therm. Sc. Eng., 29-1 (2021) 9.
- [17]Monde, M., Int. J. Heat Mass Trans., 43 (2002) 3965.
- [18]Monde, M., et al., Int. J. Heat Mass Trans., **46** (2003) 2135.
- [19]Woodfield, P.L., et al., Int. J. Heat Mass Trans., 49 (2006) 2864.
- [20]仁井谷洋,光武雄一,変換温度法によるラプ ラス変換を用いた熱伝導逆問題解析精度の改 善,鉄と鋼,107-7 (2021) 577.
- [21] Mozumder, A.K., et al., Int. J. Heat Mass Trans., 48 (2005) 5393.

報告

日本伝熱学会主催 講習会

「計測技術 ~温度・熱伝導率測定の基礎と応用~」開催報告

Report on the Lecture "Measurement Technology, Foundation and Application of Temperature Measurement and Thermal Conductivity Measurement"

企画部会産学交流委員会:羽鳥 仁人 (ベテル), 西 剛伺 (足利大学), 近藤 義広 (日立アカデミー), 小林 健一 (明治大学), 佐藤 航 (日立製作所), 小泉 雄大 (ナブテスコ)

Kimihito HATORI (Bethel), Koji NISHI (Ashikaga University), Yoshihiro KONDO (Hitachi Academy), Kenichi P. KOBAYASHI (Meiji University), Wataru SATO (Hitachi) and Katsuhiro KOIZUMI (Nabtesco)

1. はじめに

毎年,日本伝熱学会の産学交流事業の一環として,企業技術者等の実務に直結したテーマを選択し,日本伝熱学会主催の講習会を開催しています.

今年度は、「計測技術 〜温度・熱伝導率測定の 基礎と応用〜」をテーマに、2019年を最後に実施 できていなかったオンサイト中心の講習会として 開催しました.11月29日に以下の講義題目で開 催し、36名にご参加頂き(オンサイト18名、オ ンライン18名)、盛況のうちに終えることができ ました(図1).

-題日-

- 開催の挨拶
- ② 放射温度計の正しい使い方
- ③ 熱電対の正しい使い方(図解で学ぶ熱電回路の動作原理と測定誤差要因)
- ④ DSC の計測の基礎知識
- ⑤ フラッシュ法による熱拡散率/熱伝導率測定 技術の使いこなし術
- ⑥ ホットディスク法による熱伝導率の測定原理 とその事例
- ⑦ 定常法及び周期加熱法による放熱材料の熱拡 散率/熱伝導率測定
- ⑧ 総合討論

2. 各題目について

②の「放射温度計の正しい使い方」の講義では, 中村元教授(防衛大学校)より,放射温度計の基礎として測定原理と測定方式及び素子による分類 ついてご説明いただきました.講演の冒頭では小型の赤外線カメラによる実演を実施頂き,実使用時に発生しやすい測定誤差要因が具体的にイメージできました(図2).

③の「熱電対の正しい使い方(図解で学ぶ熱電

回路の動作原理と測定誤差要因)」の講義では田川 正人教授(名古屋工業大学)より,熱電対の測定 原理と取り扱いの基礎,および誤差要因について ご説明いただきました.熱電回路を図とグラフを 用いて表現することで,測定原理をわかりやすく 説明いただきました.また,固体表面温度測定や 流体温度測定の際の誤差についても紹介いただき ました(図 3).



図1 講演会の様子



図2 放射温度計の正しい使い方, 防衛大学校 中村元教授 ④の「DSC の計測の基礎知識」の講義では,加 藤英幸氏(産業技術総合研究所)より,DSC の計 測に関する基礎知識についてご説明いただきまし た.原理をかみ砕いて講義いただいた上で,測定 に関する各種の注意事項をご説明いただきました (図 4).

⑤の「フラッシュ法による熱拡散率/熱伝導率 測定技術の使いこなし術」の講義では、阿子島め ぐみ氏(産業技術総合研究所)より、フラッシュ 法の原理と測定において注意すべき点をご説明い ただきました.試料の調整や、現在国内外で供給 されている標準物質についても詳しくご紹介頂き ました(図 5).

⑥の「ホットディスク法による熱伝導率の測定 原理とその事例」の講義では、手嶋康介氏(京都 電子工業)より、ホットディスク法の測定原理及 び各種の事例をご説明いただきました.各種試料 に対応した測定方法や測定可能範囲をご紹介いた だいた上で、グリス状試料から固体試料まで幅広 い測定事例をご紹介いただきました(図6).

⑦の「定常法及び周期加熱法による放熱材料の 熱拡散率/熱伝導率測定」の講義では、山藤靖一 朗氏(ベテル)より、定常法及び周期加熱法によ る各種材料の測定手法及び事例を紹介いただきま した. 圧力又は厚みを制御しながら迅速に測定で きる定常法熱伝導率測定装置と異方性とマッピン グ測定が可能な周期加熱法熱拡散率測定装置の測 定原理と測定事例をご説明いただきました(図7).

⑧の総合討論では,講義と同時に受講者が質問 を投稿できるようにあらかじめ受講者に質問票を 配布し,その内容を講師の先生から回答いただく という形式で行われました.測定方法に関する基 本的な質問や,実測時の注意点に関する質問も多 数あり活発な質疑が行われました(図8).

3. 全体の印象, アンケート結果

参加者の内訳は,86%が企業の方,14%が公的 機関の方でした.企業の方が学会の活動に参加す る機会となり産学交流委員会の活動目的である産 学交流の活性化の一助になったものと思います.

アンケート結果は多くが肯定的なご評価でした. 本講習会が大変役立ったという回答が 86.4%とな りました. 今後も実務に役立つ講習会をめざして アンケートを参考に企画させて頂きます.



図3 熱電対の正しい使い方(図解で学ぶ熱電回路の動作原理と測定誤差要因), 名古屋工業大学田川正人教授



図4 DSC の計測の基礎知識, 産業技術総合研究所 加藤英幸氏



図5 フラッシュ法による熱拡散率/熱伝導率測 定技術の使いこなし術, 産業技術総合研究所 阿子島めぐみ氏



図 6 ホットディスク法による熱伝導率の測定 原理とその事例, 京都電子工業 手嶋康介氏



図7 定常法及び周期加熱法による放熱材料の熱 拡散率/熱伝導率測定, ベテル 山藤靖一朗氏



図8 総合討論

今回は3年ぶりのオンサイトでの開催となりま した.オンライン開催の利便性も捨てがたいです が,オンサイトでの開催ならでは臨場感や活発な 討論があり今後も定期的にオンサイト開催を継続 していきたいと考えております.

4. おわりに

産学交流委員会では,産学交流を促進するため の各種イベントを検討中です.本講習会はその中 のアイテムの1つとして,来年度もオンサイト開 催に向け準備を進めて参ります.詳細が決まり次 第ご案内します.

最後に,講師の皆様にはご多忙のところ,オン サイトプラスオンラインというハイブリッド開催 の状況下で,資料作成含め,ご協力を頂きありが とうございました.紙面をお借りして,改めて感 謝申し上げます.

行事カレンダー

本会主催行事

平云 土惟门 争					
開催日 行事名 申込締切 原稿締切 問合先		問合先	掲載号		
2023 年					
5月 25(木) ~ 27(土)	第 60 回 日本伝熱シンポジウム			第 60 回日本伝熱シンポジウム実行委員会事務 局 九州大学 大学院工学研究院 航空宇宙工 学部門内 E-mail: symp2023@htsj-conf.org FAX: 092-802-3017	

本会共催,協賛,後援行事

開催	開催日 行事名 申込締切 原稿締切 問合先		掲載号		
2023 年					
1月	1月 19(木) 第3回燃焼工学講座 (一社)日本燃焼学会 office@combustionsociety.jp		(一社) 日本燃焼学会 office@combustionsociety.jp		
	24(火) ~ 25(水)	第 51 回ガスタービンセミナー		(公社)日本ガスタービン学会 E-mail: gtsj-office@gtsj.org	
	27(金)	化学工学会 材料・界面部会 共通基 盤技術シンポジウム 2023 ~材料・プロセス開発とその改善にお ける機械学習の役割と今後の展望~		九州工業大学工学部応用化学科 山村方人 093-884-3344 yamamura@che.kyutech.ac.jp	
4月	2(日) ~ 7(金)	日本混相流学会混相流国際会議 2023		日本混相流学会 office@jsmf.gr.jp	
5月 6月	31(水) ~ 2(金)	第28回計算工学講演会		(一社)日本計算工学会 office@jsces.org	
9月	24(日) ~ 27(水)	33rd International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-33)		ISTP-33 実行委員会幹事 渡邊則彦 nwatanabe@mec.sojo-u.ac.jp	
11 月 12 月	26(日) ~ 1(金)	International Gas Turbine Congress 2023 Kyoto (IGTC2023 Kyoto)		(公社)日本ガスタービン学会 E-mail: gtsj-office@gtsj.org	

第60回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集

第60回日本伝熱シンポジウム実行委員会 委員長 高橋 厚史 副委員長 森 昌司

開催日: 令和5年5月25日(木)~5月27日(土)

会 場: 福岡国際会議場 (https://www.marinemesse.or.jp/congress/) ※状況によっては Web 開催の可能性があります. 所在地〒812-0032 福岡県福岡市博多区石城町 2-1 電話番号 092-262-4111 アクセス 福岡空港より呉服町駅まで福岡市営地下鉄で約10分,呉服町駅より徒歩約12分. JR 博多駅より西鉄バスで約12分, サンパレス前下車すぐ. 福岡国際会議場 交通アクセス (https://www.marinemesse.or.jp/congress/access/)

講演申込締切: 令和5年1月20日(金) 講演論文原稿提出締切: 令和5年3月17日(金) 令和5年4月14日(金) 早期参加申込締切: ホームページ https://htsj-conf.org/symp2023/

【シンポジウムの形式】※状況によっては Web 開催の可能性があります.

(第60回日本伝熱シンポジウム)について」をご参照下さい.

- 講演発表形式として a) 通常の一般セッション(口頭発表) b) オーガナイズドセッション(口頭発表) c) 学生および若手研究者を対象とする優秀プレゼンテーション賞セッションを実施します. 1 講演あたりの割当時間は、一般セッションでは 15 分(発表 10 分、個別討論 5 分)で、各セッショ ンの最後に総合討論の時間(5分×セッション内の講演件数)を設ける予定です.オーガナイズドセッ
- ションについては、オーガナイザーの指示に従って下さい.(個別討論,総合討論の時間は変更にな る場合があります.) 優秀プレゼンテーション賞セッションについては、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞

【参加費等】※Web 開催の場合でも参加費は同じです.

参加申込の時期 早期申込:4月14日(金)まで 通常申込:4月15日(土)以降(4月末までに参加登録を完了された方には、事前に参加者キットを お送りします) シンポジウム参加費 学会員一般 早期申込:12,000円 (不課税) 通常申込:15,000円 (不課税) 共催・協賛学会員一般 早期申込:13,200円(税込み)通常申込:16,500円(税込み) 非学会員一般 早期申込:16.500円(税込み)通常申込:19.800円(税込み) 学会員学生 早期申込: 6,000 円 (不課税) 通常申込: 7,000 円 (不課税)

共催・協賛学会員学生 早期申込: 6,600円 (税込み) 通常申込: 7,700円 (税込み) 非学会員学生 早期申込: 7,700円 (税込み) 通常申込: 8,800円 (税込み)

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

※名誉会員は参加費が無料になります.
※学会員とは、日本伝熱学会会員のことを指します.
※講演論文集電子版は参加者全員に配布されます.
講演論文集電子版
講演論文集電子版のみの販売: 5.000円(シンポジウム後の販売になります.)

【意見交換会】

- · 開催日:令和5年5月26日(金)
- ・ 会 場:ホテル日航福岡(〒812-0011 福岡県福岡市博多区博多駅前 2-18-25)
- ・ 参加費:(詳細はシンポジウムホームページに掲載します.)

【参加登録と参加費等の支払い方法】

- ・ 参加登録は本シンポジウムのウェブページから行ってください.
- 参加費等の支払いをもって「参加登録の完了」とします。
- 4月末までに参加登録を完了された方には、事前に参加者キット(講演論文集電子版,講演プログラム、参加票など)をお送りします.
- 参加登録および参加費等の支払方法および期限を設定します.(詳細はシンポジウムホームページに 掲載します.)

講演申込方法,講演論文集,執筆要綱

【講演申込方法】

- ・ 一般セッションと優秀プレゼンテーション賞セッションの講演者(登壇者)は、日本伝熱学会会員(た だし、賛助会員と特別賛助会員は除く)に限ります。講演者が日本伝熱学会会員でない場合は、会員 申込と会費納付を行って下さい。(オーガナイズドセッション等については、各セッションのオーガ ナイザーの指示に従って下さい。)
- 原則としてウェブによる申込みに限らせて頂きます.本シンポジウムで準備するウェブサイトから必要なデータを入力して下さい.ウェブによる申込みができない場合には、実行委員会事務局にお問い合わせ下さい.
- 申込みの際に、一般セッション、オーガナイズドセッション、優秀プレゼンテーション賞セッション
 のいずれで発表するかを選択して下さい. 優秀プレゼンテーション賞セッションにお申込みの場合には、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞(第60回日本伝熱シンポジウム)について」
 をご参照下さい.
- ・ 発表申込み時に,論文要旨(日本語で 200~250 字)を入力して下さい.講演論文集の抄録として科 学技術振興機構(JST)のデータベースに登録します.
- ・ 講演発表申込は,講演者1名につき1題目とさせて頂きます.
- ・ 講演の採否およびセッションへの振り分けは、実行委員会にご一任下さい.

【講演論文集電子版】

- 従来の講演論文とは別に、当該講演内容を後日原著論文として TSE 以外の学術雑誌等に投稿する場合は、二重投稿にならないように配慮して 1 ページの講演アブストラクトを提出することができます。
- ・ 講演論文または講演アブストラクトのいずれかの原稿を提出して頂きます. 講演論文は A4 サイズで 2~6ページ, 講演アブストラクトは, A4 サイズで1ページとします.

- ・ 講演論文集として電子版のみを発行し、冊子版は発行しません.
- ・ 講演論文集電子版を参加者に配布します.なお、参加できなかった日本伝熱学会会員には、講演論文 集電子版をネットからのダウンロードを基本として配布します(ダウンロードが困難な会員は事務局 へお申し込みください).
- ・ 講演論文集は会員を対象にパスワードを配布し、シンポジウム開催日の1週間程前からウェブ上で公 開します。従って、特許に関わる公知日はシンポジウム開催日よりも早くなりますのでご注意ください。
- ・ シンポジウム終了後,一定期間を経て講演論文集のウェブ上での公開を終了します.
- ・ 原稿提出締切日までに提出されなかった講演論文は講演論文集電子版およびウェブに掲載されません。 +分にご注意下さい。

【執筆要綱】

- ・ 以下の4つの原稿のうちから選択して執筆して下さい.
 - ①講演論文(一般セッション,オーガナイズドセッション,優秀プレゼンテーション賞セッション)
 ②講演アブストラクト(一般セッション,オーガナイズドセッション,優秀プレゼンテーション賞セッション)

③Full size manuscript (英文)

④Abstract manuscript (英文)

- 各原稿の書式の詳細ならびにテンプレートは、シンポジウムのホームページをご参照ください.
- 論文表題および著者名は、講演申込時のデータと同じものを同じ順序で書いてください. 講演申込時のデータと異なる場合には、目次や索引に反映されないことがあります。
- PDF ファイル作成のためのファイル変換時には,「フォントの埋め込みを行う」を設定してください. 提出前に必ず,変換後の PDF 原稿を印刷して確認して下さい.

 ① 講演論文(一般セッション,オーガナイズドセッション,優秀プレゼンテーション賞セッション)
 表題部分の書式:原稿は、以下の四角囲い部に示すように、和文表題、和文副題、英文表題、英文副題、 和文著者名(会員資格、著者名、所属の略記)、英文著者名、英文所属機関・所在地、英文アブストラクト、英文キーワードの順に、幅140mm に収まるようにレイアウトしてください.連名者がある場合には、 講演者の前に*印をつけ、英文の所属機関・所在地についても上付き数字で区別してください.
 本文の書式:本文は表題部分に続けて、10ポイント明朝体の1段組み(1行 50字程度)、1ページ当たり 46行を目安として作成してください.

図表: 図表中の記号およびキャプションは英語で書いてください. カラー表示が可能です.

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

(番号) 著者名, 雑誌略称, 巻-号(発行年), 先頭ページ番号.

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

140 mm \leftarrow 原稿の書き方(和文表題: Gothic 14pt) MS-Word の場合(和文副題: Gothic 12pt) Guide for the manuscripts (英文表題: Times New Roman 12pt) The case of MS-Word (英文副題: Times New Roman 12pt) (1 行あける) 伝正 *伝熱 太郎(伝熱大)(会員資格 著者名[講演者には*印](所属 略称):明朝体 12pt) (1 行あける) Taro DENNETSU (英文著者名: Times New Roman 10pt) Dept. of Mech. Eng., Dennetsu Univ., 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8563 (1 行あける) (文頭に半角スペース5 つを挿入する) English abstract (英文アブストラクト: Times New Roman 10pt, 100 語程度) (1 行あける) Key Words: Heat Transfer (英文キーワード: Times New Roman 10pt, 3~5 個程度) (1 行あける) 1. 大見出し 1.1 中見出し 講演論文原稿は A4 サイズで原則 2~6 ページです. 講演論文の作成様式は,1段組×50字 ×46 行とし、カラーの使用が可能です.ファイル容量は最大で 2MB までとし、アニメーションは含まな いものとします.

① 講演論文の冒頭部分(表題部分および本文書き出し部分)の書式

② 講演アブストラクト(一般セッション,オーガナイズドセッション,優秀プレゼンテーション賞セッション) 表題部分の書式: 原稿は、以下の四角囲い部に示すように、和文表題、和文副題、英文表題、英文副題、 和文著者名(会員資格、著者名、所属の略記)、英文著者名、英文所属機関・所在地の順に、幅 140mm に 収まるようにレイアウトしてください.連名者がある場合には、講演者の前に*印をつけ、英文の所属機 関・所在地についても上付き数字で区別してください.

アブストラクトの書式: アブストラクトは表題部分に続けて,10ポイント明朝体の1段組み(1行50字 程度),1ページ46行を目安として作成してください.

図表: 図表中の記号およびキャプションは英語で書いてください.カラー表示が可能です.掲載にあたり,他の学術雑誌等との二重投稿にならないように十分に配慮して下さい.

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

(番号) 著者名, 雑誌略称, 巻-号(発行年), 先頭ページ番号.

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

お知	ĥ	廿
AO VH	~	<u> </u>

140 mm < 原稿の書き方(和文表題: Gothic 14pt) MS-Word の場合(和文副題:Gothic 12pt) Guide for the manuscripts (英文表題: Times New Roman 12pt) The case of MS-Word (英文副題: Times New Roman 12pt) (1行あける) 伝正 *伝熱 太郎(伝熱大)(会員資格 著者名[講演者には*印](所属 略称):明朝体 12pt) (1 行あける) Taro DENNETSU (英文著者名: Times New Roman 10pt) Dept. of Mech. Eng., Dennetsu Univ., 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8563 (1 行あける) Key Words: Heat Transfer (英文キーワード: Times New Roman 10pt, 3~5 個程度) (1 行あける) 講演アブストラクト原稿はA4 サイズで1ページです.講演論文の作成様式は、1段組×50字×46行 とし、原則として章で分ける必要はありません.カラーの使用が可能です.ファイルの容量は最大で 2MB アニメーションは含まないものとします. とし. ② 講演アブストラクトの冒頭部分(表題部分および本文書き出し部分)の書式

③ Full Size Manuscript

As shown in the square enclosure below, the manuscript is composed of a title, a subtitle, author names, affiliation institutions, locations, abstract and keywords in order, lay out so that it fits within the width of 140 mm. If there are multiple authors, please mark * in front of the speaker and distinguish the affiliation institution and address with superscripted numbers. Following the title part, please prepare the body as a guide with a single column of 10 point Times New Roman, 46 lines per one page. Color display is possible. References should be indicated by numbers with brackets (1) on the right shoulder of cited parts in the text, and should be listed together at the end of the text as follows.

Example: (1) T. Dennetsu et al., J. Thermal Sci. Technol., 12-345(2018), 1234.

The template file of MS-Word format can be downloaded from the symposium's website.

お知	らせ

140 mm		
✓ → → → → → → → → → → → → → → → → → → →		
Guide for the manuscripts (Main title: Times New Roman 14pt)		
The case of MS-Word (Subtitle: Times New Roman 12pt)		
(blank line)		
Taro DENNETSU (Authors: Times New Roman 12pt, Mark "" at the head of		
speaker's name)		
(blank line)		
Dept. of Mech. Eng., Dennetsu Univ., 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8563 (Affiliations:		
Times New Roman 10pt)		
(blank line)		
Abstract of approximate 100 words is written by Times New Roman 10pt. Five blank		
(blank line)		
Key Words: Heat Transfer (Keywords: Times New Roman 10pt, 3 to 5 words)		
(blank line)		
1. Headline		
1.1 Crosshead The manuscript is provided only with an electronic manuscript. The manuscript needs 2 to 6 pages		
of A4 size. The manuscript forms 1 column \times 46 lines, and color can be used. The file size is limited to 2MB at the		
maximum, and animations cannot be included.		

③ Format of English full size manuscript (title part and text export part).

(4) Abstract Manuscript

 \leftarrow

As shown in the square enclosure below, the manuscript is composed of a title, a subtitle, author names, affiliation institutions, locations and keywords in order, lay out so that it fits within the width of 140 mm. If there are multiple authors, please mark * in front of the speaker and distinguish the affiliation institution and address with superscripted numbers. Following the title part, please prepare the abstract as a guide with a single column of 10 point Times New Roman, 46 lines per one page. Color display is possible. References should be indicated by numbers with brackets (1) on the right shoulder of cited parts in the text, and should be listed together at the end of the text as follows.

Example: (1) T. Dennetsu et al., J. Thermal Sci. Technol., 12-345(2018), 1234.

The template file of MS-Word format can be downloaded from the symposium's website.

140 mm

Guide for the manuscripts (Main title: Times New Roman 14pt) The case of MS-Word (Subtitle: Times New Roman 12pt) (blank line) *Taro DENNETSU (Authors: Times New Roman 12pt, Mark "*" at the head of speaker's name) (blank line) Dept. of Mech. Eng., Dennetsu Univ., 5-1-5, Kashiwanoha, Kashiwa, 277-8563 (Affiliations: Times New Roman 10pt) (blank line) Key Words: Heat Transfer (Keywords: Times New Roman 10pt, 3 to 5 words) (blank line) The manuscript is provided only with an electronic manuscript. The manuscript needs 1 page of A4 size. Chapters are not necessary. The manuscript forms 1 column \times 46 lines, and color can be used. The file size is limited to 2MB at the maximum, and animations cannot be included.

④ Format of English abstract manuscript (title part and text export part).

⇒

【ご注意】

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

【お問い合わせ先】

第60回 日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局九州大学 大学院工学研究院 航空宇宙工学部門内E-mail: symp2023@htsj-conf.org, Fax: 092-802-3017

優秀プレゼンテーション賞(第60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 小宮 敦樹

第60回日本伝熱シンポジウムでは、下記の要領で、若手研究者および学生を対象とした優秀プレゼンテーション賞セッションを設けます。日頃の研鑽の成果を披露するチャンスとして、奮ってご応募下さい.

- 開催日:令和5年5月25日(木) シンポジウム第1日
- 発表形式:発表者1名あたり、発表内容をまとめた1枚のアピールスライド提出とポスタープレゼン テーションを行う形式とする予定です.アピールスライドは冊子体として配布されるとと もにスライドショーとして会場にて案内される予定です. なお、<u>伝熱シンポジウムの開催状況により、優秀プレゼンテーション賞セッションをオン</u> ラインにて開催する場合があります.発表形式の詳細については決定し次第、シンポジウ

ムのホームページに掲載いたします.

- 対 象:企業・大学・研究機関等の技術者・研究者で,令和5年3月31日現在で28歳以下の方, または、申込当日に学生である方.
- 応募資格:発表者は日本伝熱学会の会員(正員・学生員)に限ります.発表者が日本伝熱学会会員で ない場合は,講演論文原稿提出までに,会員申し込みを行ってください. なお,本セッシ <u>ョンで発表する方は,応募資格を必ず満たす必要があります.また,過去に本賞を受賞さ</u> れた方は応募することはできません.
- 応募件数:大学に所属する学生の場合:指導教員あたり1名(1件) 大学以外の研究機関,企業に所属する場合:研究グループあたり1名(1件) とします.
- 応募 方 法:第60回日本伝熱シンポジウム発表申込時に、本誌掲載の講演申込方法に従って、"優秀プ レゼンテーション賞"を選択し、"指導教員または研究グループ長等"を入力してください. なお、講演論文原稿の様式については一般セッションと同様のものとします.
- 審査・選考方法:複数名の審査員による評価に基づいて選考し,受賞者を決定します.
- 表 彰:受賞者はシンポジウム第2日の学会総会で表彰されます.



編集出版部会からのお知らせ 一各種行事・広告などの掲載について一



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

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

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

【連絡先】

- ・総務部会長: 白樫 了(東京大学): aa21150@iis.u-tokyo.ac.jp
- ・編集出版部会長:永井二郎(福井大学):nagai@u-fukui.ac.jp
- ・広報委員会委員長:櫻井 篤 (新潟大学): sakurai@eng.niigata-u.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐協議員:長谷川洋介(東京大学):ysk@iis.u-tokyo.ac.jp
- ・事務局:大澤毅士・村松佳子・山田麻子:office@htsj.or.jp
- 【注意】
- ・原稿は Word ファイルまたは Text ファイルでお願いします.
- ・HP はメンテナンスの都合上,掲載は申込月の翌月,また削除も希望掲載期限の翌月程度の時間遅 れがあることをご了承願います.
- ・MLでは,原則としてテキスト文の送信となります.pdf等の添付ファイルで送信を希望される場合 はご相談ください.

熱流束センサーは、熱エネルギーの移動密度(W/cm²)に比例した直流電圧を出力します。 弊社の製品は、大変手軽に高速・高精度で熱流量の測定をすることができます。 特に応答速度の早いこと、センサーからの出力レベルが高いことが特徴で、 熱流束マイクロセンサー(HFM)では、応答速度最高6マイクロ秒を達成しています。

奈束セ



A REAL PROPERTY AND IN THE OWNER OF THE OWNER OWNER

● 最高速の応答(約 6µ秒)
 ● 850℃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
 自動車用エアーバッグ安全性試験
 ジェットエンジンバックファイヤー試験





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 電対をとなっています。フォイル・ディスクはコンス タンタンで作られており、銅製の円柱形ヒートシン クに取り付けられています。水冷式は取付け場 所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

使用例

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





「gSKIN®」熱流束センサーはセンサー自身の 表面を通過する熱流束を29対の超高感度な 熱電対を用いて測定します。センサーは、 72m²の広さを持ち、厚さは0.4mmです。レベル-0 パッケージングの最適化ポリマーと1-レベルパ ッケージングの金属の構造になっています。

使用例

電気・電子機器内の発熱・放熱状態測定

- 熱交換器の効率測定
- パイプの放熱状況測定
- 暖房および換気自動システムの測定
- 熱移動/熱放出の即時応答測定

熱流束センサー 校正サービス

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

そ センサテクノス株式会社

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

URL www.senstech.jp

E-mail info@senstech.jp

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



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

CAPTEC 社(フランス)

CAPTEC(キャプテック)社は、独自の高度技術により、低熱抵抗で高感度な熱流束センサーを開発・製造致しております。環境温度が変化して も感度は常に一定で、熱流束値に比例した電圧を高精度に出力します。

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

熱流束センサー

サイズ: 5×5mm~300×300mm 厚み: 0.4mm (平面用・曲面用) 温度範囲: - 200~200℃ 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℃ 応答速度:約 50ms オプション:温度計測用熱電対内蔵 形状: 正方形 長方形 円形 波長領域:赤外/可視+赤外

MEDTHERM 社(アメリカ)

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



熱流計/輻射計

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

応答速度: 50ms 以下* 再現性: ±0.5% 較正精度: ±2% オプション: 輻射窓 視野角指定等 *応答速度は、熱流束レンジによって異なります。

超高速応答同軸熱電対

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



【主な用途】 表面温度及び表面熱流束計測 風洞試験・エンジンシリンダー・エアコンプレッサー等

【最小プローブ径】 0.015 インチ(約 0.39mm)

【熱電対タイプ】 T型(銅/コンスタンタン) J 型(鉄/コンスタンタン) E型(クロメル/コンスタンタン) K 型(クロメル/アルメル) S型(白金 10%ロジウム/白金) +200℃~+1700℃

【温度範囲】 - 270°C∽+400°C - 210°C∽+1200°C - 270°C∽+1000°C - 270°C∽+1372°C

|ITI 社(アメリカ)|

ITI (International Thermal Instrument Company)社は、1969年の設立以来、高温用熱流板や火炎強度熱流計など、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℃ 応答速度: 0.1s 直径: 8mm~25.5mm 厚み: 2.5mm

当社取扱製品の適用分野

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

水冷式 火炎強度熱流計



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

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

本広告に掲載されている内容は2010年9月現在のもので、製品の仕様は予告なく変更される場合があります。

編集出版部会ノート

Note from the JHTSJ Editorial Board

この数年間で世界的な課題として急に現れたものは、コロナ禍とロシアによるウクライナ侵攻(軍事力に よる現状変更の試み)かと思います.この2点について、私は自身の見通しの甘さに愕然としております. コロナ禍が2020年に始まった時には、「2021年には収束しているだろう」と思い込んでいましたし、2022年 2月にロシアの侵攻が始まった時には、「夏頃には、一旦は停戦するだろう」と感じていました.本ノート執 筆時点では、いずれも収束の見通しは見えていません.私の先を見る目の無さは、研究においても同様です. 遡れば大学院生時代から、私は同じテーマで研究を続けていますが、未だにナゾは解けておらず、能力不足 を痛感しております.

さて、本号では「沸騰伝熱の進展」の特集を矢吹智英先生(九州工業大学,JST さきがけ)に組んでいた だきました.前述の私の研究テーマが沸騰ということもあり、いつにも増して特集記事に大きな関心を抱き ました.沸騰という複雑な熱流体現象を対象として、最新の計測手法と数値計算によりナゾの解明にアプロ ーチされている第一線の研究者の皆様から4件のご寄稿をいただきました.ご多用にも関わらずご寄稿くだ さった皆様に、この場をお借りして厚くお礼申し上げます.

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

- 企画・編集出版担当副会長 小原 拓(東北大学)
- 編集出版部会長 永井 二郎(福井大学)

委員

- (理事) 丸山 直樹(三重大学),坂村 芳孝(富山県立大学),田之上 健一郎(山口大学),矢嶌 健史(東京電力)
- (協議員) 浅岡 龍徳(信州大学),小針 達也(日立製作所),小宮 敦樹(東北大学),塚原 隆裕(東京理 科大学),矢吹 智英(九州工業大学),田中 三郎(日本大学),櫻井 篤(新潟大学),小川 邦康 (慶應義塾大学)

 TSE チーフエディター
 鈴木 雄二 (東京大学)

 TSE 編集幹事
 李 敏赫 (東京大学)

 編集出版部会 連絡先:
 〒910-8507 福井市文京 3-9-1

 福井大学 学術研究院工学系部門
 永井 二郎

 Phone: 0776-27-8537

 E-mail: nagai@u-fukui.ac.jp