



Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692 Vol. 61, No. 254 2022. 1

Thermal Science and Engineering

ISSN 0918-9963 **Vol. 30, No. 1** 2022. 1



◆特集:固液相変化を伴う伝熱現象



(a)赤色に着色した潜熱輸送物質を吸着させたマシュマロゲルと(b)その SEM 画像 図はジメチルジメトキシシランとメチルトリメトキシシランの共重合体ゲル(略称,マシュマロゲル)である.n-ヘキサデカンが吸着したマシュマロゲルの相転移温度は17.5 °C,潜熱量は116kJ/kg で,潜熱輸送物質として使用できる.

(特集記事「未利用熱を有効活用するための潜熱輸送(日出間 るり, 大坪 拓夢, 鈴木 洋)」より)



開発中のコア-シェル型 MEPCM の構造と特徴

(特集記事「固液相変化を伴う伝熱現象を利用した潜熱蓄熱技術(能村 貴宏)」より)



楔状結晶がガラス面下端に到達した後,そこから発生する樹枝状結晶.

図中の点線はガラス面下端であり、その上方に楔状結晶(wedge)、下方に樹枝状結晶(dendrite)が 観察された.楔状結晶の成長方向は c_1 、 c_2 、 c_4 とそれぞれのガラス面下端部から発生する樹枝状結晶の 基底面に含まれる.また、 c_1 と c_2 から発生する樹枝状結晶の基底面は一致しない.

(特集記事「固体面上を伝播する氷結晶の基底面(寺岡 喜和, 米林 尚, 佐藤 由菜)」より)

No. 254

January

伝 熱

目 次

〈巻頭グラビア〉

	洋(神戸大学),能村 貴宏(北海道大学),	拓夢,鈴木	るり,大坪	日出間
	喜和(金沢大学),米林 尚(エネゲート),	寺岡		
表紙裏	佐藤 由菜(日立ソリューションズ東日本)			

〈特集:固液相変化を伴う伝熱現象〉

特集「固液相変化を伴う伝熱現象」にあたって浅岡 龍徳(信州大学)	1
氷の核生成現象稲田 孝明 (東京電機大学)	2
固体面上を伝播する氷結晶の基底面	
佐藤 由菜(日立ソリューションズ東日本)	
未利用熱を有効活用するための潜熱輸送	
日出間 るり,大坪 拓夢,鈴木 洋(神戸大学)	13
固液相変化を伴う伝熱現象を利用した潜熱蓄熱技術能村 貴宏(北海道大学)	
アイススラリーの流動および伝熱特性熊野 寛之 (青山学院大学)	27
分散質の融解・凝固を伴う相変化エマルションの流動および伝熱特性	
森本 崇志,熊野 寛之(青山学院大学)	33
100℃以下の低温温熱輸送に適するエリスリトールスラリーの紹介	
	39

〈会議報告〉

第2回アジア熱科学会議:実行委員会報告

〈報告〉

日本伝熱学会主催オンライン講習会

「計測技術 ~測定の基礎と設計応用~」開催報告

……企画部会産学交流委員会:小泉 雄大 (ナブテスコ),近藤 義広 (日立アカデミー)

西 剛伺 (足利大学), 佐藤 航 (日立), 羽鳥 仁人 (ベテル) ……… 50

〈行事カレンダー〉 53

〈お知らせ〉

第 59 回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集	54
優秀プレゼンテーション賞(第 59 回日本伝熱シンポジウム)について	61
・事務局からの連絡	62

Vol.61, No.254, January 2022

CONTENTS

<Opening-page Gravure: heat-page>

Ruri HIDEMA, Takumu OTSUBO, Hiroshi SUZUKI (Kobe University), Takahiro NOMURA (Hokkaido University), Yoshikazu TERAOKA (Kanazawa University), Nao YONEBAYASHI (Enegate), Yuna SATO (Hitachi Solutions East Japan, Ltd.) Opening Page

<Special Issue: Heat Transfer with Solid-Liquid Phase Change>

	Preface to the Special Issue on "Heat Transfer with Solid-Liquid Phase Change"
	Tatsunori ASAOKA (Shinshu University)
	Ice Nucleation in Supercooled Water
	Takaaki INADA (Tokyo Denki University) 2
	Basal Plane of Ice Crystal Growing on Solid Surface
	Yoshikazu TERAOKA (Kanazawa University), Nao YONEBAYASHI (Enegate),
	Yuna SATO (Hitachi Solutions East Japan, Ltd.)
	Latent Heat Transport for Utilizing Waste Heat
	Ruri HIDEMA, Takumu OTSUBO, Hiroshi SUZUKI (Kobe University) 13
	Latent Heat Storage Technology using Heat Transfer with Solid-Liquid Phase Changing
	Takahiro NOMURA (Hokkaido University) 19
	Flow and Heat Transfer Characteristics of Ice Slurry
	Hiroyuki KUMANO (Aoyama Gakuin University) ····· 27
	Flow and Heat Transfer Characteristics of Phase-change Emulsions with Melting and Solidification of Dispersoid
	Takashi MORIMOTO, Hiroyuki KUMANO (Aoyama Gakuin University) 33
	Erythritol Slurry as Candidate of Heat Transfer Medium for Low Grade Heat below $100^\circ C$
	Tatsunori ASAOKA, Shunsuke ABE (Shinshu University) 39
<	Conference Report>

Report on the 2nd Asian Conference on Thermal Sciences from Executive Committee	
Koji MIYAZAKI (Kyushu Institute of Technology)	45

<Report>

Report on The Lecture "Measurement Technology, Foundation of measurement and Practical Design"	
Katsuhiro KOIZUMI (Nabtesco), Yoshihiro KONDO (Hitachi Academy),	
Koji NISHI (Ashikaga University), Wataru SATO (Hitachi) and	
Kimihito HATORI (Bethel)	50
<calendar> ·····</calendar>	53
<announcements></announcements>	54
<note board="" editorial="" from="" jhtsj="" the=""></note>	65

特集「固液相変化を伴う伝熱現象」にあたって Preface to the Special Issue on "Heat Transfer with Solid-Liquid Phase Change"

固液相変化は, 蓄熱, 食品冷凍, 凍結濃縮など, 多くの工業技術に関わっています. また, 私たちの 普段の生活の中でもしばしば現れる非常に身近な 現象です. それゆえに古くからたくさんの研究の対 象であり, 工業的にも頻繁に利用されてきました. しかしながら, 最も身近な水・氷の相変化ですら未 解明なことが多く, 今なおたくさんの研究の対象と なっています.

特に,近年では,SDGsやカーボンニュートラル などのキャッチフレーズの下,クリーンで持続可能 なエネルギー利用を目指す気運が高まっており,再 生可能エネルギーや未利用エネルギーを活用する うえで不可欠な技術として,潜熱蓄熱が改めて関心 を集めています.実用化され普及した技術としては, 氷蓄熱が有名ですが,近年では応用範囲を積極的に 拡大するため,水和物,パラフィン,糖など様々な 利用温度に適用できる新しい蓄熱材の開発が進ん でいます.また,相変化蓄熱材をスラリーとして用 いることで蓄熱材や熱媒体としての性能を高める という試みがなされています.

本特集では、固液相変化の基礎となる現象である 核生成・結晶成長に関する記事を2件、潜熱蓄熱技 術に関する記事を2件、スラリー蓄熱材・熱媒体に 関する記事を3件集めました.

東京電機大学の稲田孝明氏には,固液相変化の起 点となる重要な現象である核生成の理論について 解説していただきました.古典核生成理論の観点か ら特筆すべき研究事例や実験における観測の限界, 今後期待される検討手法などについて,整理してわ かりやすく紹介していただきました.

金沢大学の寺岡喜和氏には,氷結晶の成長につい て紹介していただきました.独自に開発したユニー クな結晶方向の制御手法を用いて,氷結晶が方向を 変えながら固体面上を伝播する現象について解説 していただきました.

神戸大学の日出間るり氏には,未利用熱を有効活

浅岡 龍徳(信州大学) Tatsunori ASAOKA (Shinshu University) e-mail: asaoka@shinshu-u.ac.jp

用するためのサーマルグリット構想にむけた研究 事例を紹介していただきました.その中で,アンモ ニウムミョウバンやマシュマロゲル,硬殻マイクロ カプセル化蓄熱材など熱を長距離輸送するための 有望な技術を紹介していただきました.

北海道大学の能村貴宏氏には,潜熱蓄熱技術のこ れまでの進展や研究・実用化の事例,今後潜熱蓄熱 技術が社会に広く受け入れられるために克服すべ き課題について紹介していただきました.また,そ の課題を回避しつつ長所を抽出する有望な技術に ついても紹介していただきました.

青山学院大学の熊野寛之氏には、冷房・冷却用の 熱媒体として最も研究が進んでおり、実用例もある アイススラリーの特徴について紹介していただき ました.単相流よりも複雑な挙動を示すアイススラ リーの流動と熱伝達特性を把握するための、簡明で わかりやすい整理式について説明していただきま した.

青山学院大学の森本崇志氏には、相変化エマルシ ョンの流動と熱伝達特性について紹介していただ きました.特に、相変化に伴う相変化物質の密度変 化に着目して詳細かつ幅広く行われた研究成果を もとにして、相変化エマルションの特徴についてわ かりやすく説明していただきました.

また,浅岡より,高温用のスラリー熱媒体の候補 であるエリスリトールスラリーの基本的な特性に ついて紹介させていただいきました.

これらの記事では、たくさんの有望な技術が登場 し、固液相変化技術の有用性が示されています.また、固液相変化に関連する技術に対する社会的な需 要が今後益々高まることが示唆されています.この 特集が、固液相変化に関連する研究や技術のさらな る発展に寄与することを期待しています.

各稿の筆者の皆様には、大変ご多忙の中、本特集 のために時間をつくって執筆し寄稿していただき ました. こころより感謝いたします.

米の核生成現象

Ice Nucleation in Supercooled Water

1. はじめに

水(液相)あるいは水蒸気(気相)からの氷 (固相)の発生(核生成)は、自然界においてよ く見られる現象である.氷の核生成現象を理解す ることは、大気科学の分野だけでなく、低温生物 学や食品工学の分野でも重要な課題となってい る.伝熱工学の分野においても、冷熱媒体として 活用される氷スラリー(微細な氷粒子と水の混合 物)の製造や、熱交換器における着霜抑制など、 氷の核生成の制御を必要とする場面は多く、その ため現象の理解が不可欠である.

しかしながら,氷の核生成現象は十分に解明されているとは言いがたい.たとえば,いわゆる古 典核生成理論(classical nucleation theory)に端を 発する核生成の解釈は時代とともに変化し,現在 でもその知見は更新され続けている.われわれが 常圧・氷点下で目にする氷結晶は氷 Ih と称する 六方晶系の結晶構造を持つ.しかし,核生成時に は氷 Ih と立方晶系の氷 Ic とが混在するという考 えが最近では主流であり,それに応じて核生成理 論の見直しが求められている[1,2].

また、(氷以外の)固体と水の界面で氷が核生 成する場合には、固体表面のどのような性質が核 生成温度に影響を及ぼすのか、いまだ明確な答え は得られていない[3-5]. この点の理解が進まない 限り、氷の核生成を本質的な意味で制御すること は技術的に難しいのではないだろうか.

本稿では、伝熱工学への応用を意識して、特に 固体と水の界面で起こる氷の核生成に限定して話 を進めることにする(氷の核生成に精通している 人には、immersion freezing を想定していただき たい[6]). その上で、氷の核生成現象を理解する ために、われわれが注意すべき点について触れ、 さらに今後どのような知見が求められるのかを展 望してみる.

なお筆者の勉強不足のため、本稿が筆者の私見

稻田 孝明 (東京電機大学) Takaaki INADA (Tokyo Denki University) e-mail: t-inada@mail.dendai.ac.jp

(あるいは思い込み)を含んだ内容となること を,あらかじめご容赦いただけると幸いである.

2. 均質核生成と不均質核生成 ~ 均質核生成の 実験は可能か

核生成現象は、均質(homogeneous)核生成と 不均質(heterogeneous)核生成とに大別して扱わ れることが多い.均質核生成とは、均質な母相 (本稿では液体の水)の中で起こる核生成であ る.これに対して、母相中の不純物(原子、イオ ン、粒子など)や容器壁面を起点とする核生成 は、不均質核生成と呼ばれる.不均質核生成は、 均質核生成よりも高い温度で発生する.現実的に は母相中の不純物を完全に除去するのは困難なた め、均質核生成が起こることは極めて稀である [7]. 伝熱工学の分野における氷の核生成は、ほ ぼすべて不均質核生成であると言っても過言では ないだろう.

実験的に氷の均質核生成を調べることを目的と して、油中に微小な水滴群を含んだ W/O (waterin-oil) エマルションを用いた研究が多く報告さ れている[8]. エマルションを使用する理由は, µm オーダーの微小水滴には不純物が含まれる可 能性が低く、また油と水の界面では氷の核生成が 起こりにくいためである. たしかにエマルション を用いた実験では、氷の核生成温度は -40 ℃付 近まで下がり(図1)[9],一見均質核生成が実現 しているかに思える.しかし実験結果を解析する と,核生成速度(単位時間あたりの核生成頻度) は水滴の体積には比例せず、表面積に比例する結 果が得られる[9]. このことは、エマルションを 用いた実験においても、均質核生成が容易には実 現できないことを意味する. 同様に最近の Xue ら[7]の研究では、233~235 K の水滴中で起こる 氷の核生成は、均質核生成でないことが実証され ている.



図 1 エマルションを用いた実験による純水水 滴の核生成温度[9].

相変化伝熱を扱う研究者におなじみの古典核生 成理論は、均質核生成だけでなく、不均質核生成 を説明するのにも有用である[10].古典核生成理 論によると、不均質核生成の起点となる不純物固 体表面の性質(固液界面自由エネルギー、あるい は固体表面と水(氷)との接触角)を与えれば、 理論上は核生成速度を求めることができる.しか し、伝熱工学の分野で実際に起こっている氷の不 均質核生成現象に対して、本当に古典核生成理論 をそのまま適用することは可能だろうか.次章で は、固体表面の均一性の観点から、実現象を扱う 際の問題点について考えてみよう.

3. 固体表面の不均一性 ~ 古典核生成理論を実 現象に適用するには

固体表面が氷の不均質核生成を引き起こす能力 を、氷核活性(ice nucleating activity)と呼ぶこと にする.見かけ上は均一な固体表面であっても、 氷核活性が一様となることは少なく、実は均一な 氷核活性を有する固体表面はなかなか存在しない のが事実である[11].

一例として,硼珪酸ガラス表面の氷核活性を調べた実験結果を取り上げる(図 2)[12].ガラス 表面上に置いた純水水滴中で氷の核生成温度を測 定し,ガラスと水滴の接触面積に対して整理する と,接触面積の増大に伴って核生成温度のばらつ きが大きくなる.この結果は,面積が大きくなる と,ガラス表面に特異的に氷核活性の高い場所 (氷核活性点:ice nucleating site)が出現し,氷核 活性を均一と見なせなくなることを示唆してい



図 2 ガラス表面上に置かれた水滴の氷の不均 質核生成温度[12].

る. さらに詳しい解析からは, このガラス表面の 特異な氷核活性点密度は 30 個/mm²と推算されて いる[12]. すなわち, 見た目が均一なわずか 1 mm² 程度のガラス表面であっても, 氷核活性の 観点では不均一ということになる.

不均質核生成に古典核生成理論を適用するに は、固液界面自由エネルギーの値が必要である. しかし、現実的な固体表面で均一な氷核活性が担 保されていない以上、一定の固液界面自由エネル ギーを与えることは難しい.したがって、古典核 生成理論を不均質核生成にそのまま適用するのに は、無理があるように思える.

そこで、固体表面の不均一な氷核活性をモデル 化する試みを紹介しよう.固体表面を微小領域に 細分化し、それぞれに固有の氷核活性を付与して 古典核生成理論を適用する方法が、10年ほど前 にNiedermeierら[13]によって提案された(粒子 表面をサッカーボールの模様のように分割するこ とから、サッカーボールモデルとも呼ばれる). このモデルを用いて、適切な氷核活性点の分布を 仮定すると、氷の不均質核生成の実験結果の多く を再現することができる[14,15].余談だが、筆 者も当時サッカーボールモデルを用いて自身のデ ータの解析を試み、その有用性に感銘を受けた経 験がある.

しかし,冒頭でも述べた通り,固体表面のどの ような特性が氷核活性を決定するのかは,いまだ 不明なままである.固体表面上に数多くの特異な 氷核活性点が不均一に存在する以上,その起源を マクロな表面物性に求めるわけにはいかない.第 5 章であらためて触れるが、氷核活性を決定する 原子・分子レベルの要因を追及することは、核生 成現象を理解する上で重要な課題だと考える.

4. 核生成温度のばらつき ~ 核生成の確率的な 現象を見ているのか

よく知られている通り,核生成は理論的には熱 ゆらぎに基づく確率的(stochastic)な現象であ り,その確率は統計力学におけるボルツマン因子 (Boltzmann factor)に依存する[10].一方,氷の 不均質核生成の実験を行うと,核生成温度の大き なばらつき(典型的な例として 2 ℃ 以上として おこう)を経験することが多い.実験で見られる この核生成温度の比較的大きなばらつきは,はた して熱ゆらぎに基づいた確率的な現象に由来して いるのであろうか.

その答えは、おそらく否であろう.実験におい て核生成温度が大きくばらつくとき、実は多くの の場合、熱ゆらぎによる確率的な現象ではなく、 実験条件(すなわち固体表面の特性)のばらつき を見ているに過ぎない(と筆者は考えている). 実験で使用する水に含まれる不純物や、水を保持 する容器壁面の性状を、毎回同じように再現する ことは極めて難しいのである.

それでは、実験条件の再現に細心の注意を払え ば、氷の核生成温度はばらつかないのだろうか. この点に着目した Wilson and Haymet [16]の興味 深い研究を紹介しよう.彼らは、実験条件に再現 性のある不均質核生成の過去のデータを解析して いる.その結果、核生成温度のばらつきは、核生 成の基点となる固体表面の性質に関わらず、概ね 1 ℃ 以内に収まることを示した.すなわち、本 質的な意味での核生成の確率的な現象は、1 ℃ 以内の核生成温度のばらつきとしてしか顕在化せ ず、それ以上のばらつきは実験条件の再現性の問 題に起因すると言える.

このことは、核生成の実験結果を解釈する上で 重要な知見となる.一例を示そう.ヨウ化銀 (AgI)結晶は、氷核活性の高い固体として知ら れている[17]. 直径 10 μ m 程度の多数の微小水滴 に、粒径 1 μ m 程度の AgI 粒子をそれぞれ数個ず つ懸濁し、一定速度(4 °C/min)で冷却して氷の 核生成温度を測定すると、核生成温度のばらつき は 1 °C をはるかに超えてしまう(図 3) [18].こ



図 3 ヨウ化銀(AgI) 粒子を含んだ水,及び AgI 粒子を含まない水における氷の不均質核生 成[18].

れは, AgI 粒子の氷核活性に個体差があり,水滴 ごとに実験条件が大きく異なっていることを示唆 している.したがって図 3 に示した AgI 粒子を 含んだ水の結果では,核生成の確率的な現象を見 ているのではなく,実験条件のばらつき(AgI 粒 子の氷核活性の分布特性)を見ていると解釈でき る.一方,図中の AgI 粒子を含まない水では, 核生成温度のばらつきが 1 ℃ 程度に収まってい る.こちらのばらつきは,熱ゆらぎに基づく核生 成の確率的な現象に由来していると考えられる.

5. 氷の核生成の予測・制御に求められる知見

伝熱工学の立場からは、氷の核生成温度を正確 に予測し、また核生成温度を自在に制御すること が求められる.ここでは、そのためにどのような 知見が必要なのかを考えてみたい.

われわれはすでに、氷の核生成温度を制御する 術を経験的にいくつか知っている.たとえば、固 体表面に適切な撥水性の被覆を施せば、氷の核生 成温度をある程度低くすることができる.また、 氷核活性を有する微粒子を水に懸濁すれば、氷の 核生成温度をある程度高くすることも可能であ る.しかし、さらに精緻で確実な制御の実現を目 指すと、制御対象である固体表面の氷核活性につ いて理解を深める必要が生じてくる.したがっ て、今もっとも求められている知見は、氷核活性 の起源を明らかにすることだと言えよう.

古くから認識されている氷核活性の条件として,固体結晶表面の格子定数が挙げられる.固体

表面の格子定数が氷 Ih のそれに近ければ, ヘテ ロエピタキシーによって核生成が起こりやすくな ると考えられてきた.たとえば,高い氷核活性を 有する六方晶系(β相) AgI 結晶の格子定数は, 氷 Ih にきわめて近く,格子定数の重要性を示す 典型的な例と言えよう[17].その一方で,同じく 氷 Ih に近い格子定数を持つフッ化バリウム (BaF₂)結晶の氷核活性は,AgI と比べて著しく 低く[19],格子定数だけでは氷核活性を説明でき ないこともわかっている.

もう一つ氷核活性の要因として注目すべきは, 表面電荷の影響である[20].水中のイオン種や pH を変化させることにより,固体表面の氷核活 性は大きく変化する[21,22].さらには,固体表 面の凹凸(原子レベルのステップやキンクも含め て)も氷核活性に影響を及ぼすことが古くから指 摘されている[3,23].また固体と水の界面を考え るとき,その端部の特殊性について配慮する必要 がある.たとえば,水・固体・空気の三相界線 は,氷核活性に特異な影響を及ぼす可能性も指摘 されている[24,25].

このように、氷核活性につながる固体表面の特 性は数多く挙げられる.それにもかかわらず、氷 核活性を決定づける要因が特定できない原因はど こにあるのだろうか.この点について筆者は、第 3章で触れた固体表面の不均一性が精緻な実験を 妨げており、決定的な議論に至らないのだと推察 している.多数の任意の氷核活性点を有する結晶 面で実験を行っている限り、何が氷核活性を決め ているのかを特定することは難しい.均一な氷核 活性を有する理想的な結晶面を実現することで、 はじめて氷核活性の起源に迫る実験が可能になる のではないだろうか.

筆者は最近, β相 AgI のベーサル面からなる大 きさ1 mm 程度の単結晶基板を作成し,その単結 晶基板上に複数の水滴を配して氷の核生成実験を 行っている. AgI 単結晶基板上には成長時に形成 された成長丘やステップが多数見られるものの (図 4),その氷核活性は比較的均一な特性を示す ことがわかってきた(図 5).このような基板の 氷核活性を詳細に調べることにより,氷核活性の 起源に迫りたいと考えている.

一方で,最近では固体表面の氷核活性の起源を 調べるためのシミュレーション研究も数多く報告



図 4 ヨウ化銀(AgI)単結晶基板ベーサル面の 電子顕微鏡(SEM)画像.



図 5 ヨウ化銀(AgI)単結晶基板ベーサル面上 での氷の不均質核生成.

されている[26-28]. しかしそのほとんどは,均一 な氷核活性を有する原子レベルで平坦な結晶面を 計算対象としているため,従来の実験結果との比 較は困難である.均一な氷核活性を有する結晶面 を用いた実験を実現できれば,シミュレーション 結果との比較が可能となり,氷核活性の理解が飛 躍的に進展することも期待される.

ここまで固体表面の氷核活性という観点から議 論を進めてきたが、氷の核生成の主役はあくまで も液相中の水分子であることを忘れてはならない [29].氷核活性に必要な固体表面の特性は、その 近傍の水分子を核生成に有利な構造に導く間接的 な役割を果たしているに過ぎないのである.最近 では、液相での水の構造不均一性に関する研究も 進んでおり、氷の核生成と水の動的構造との相関 に関する新しい知見も得られていて、たいへん興 味深い[30]. 最後に,技術的な視点から注意を要する点に触 れておきたい. 伝熱工学の技術は,必ずしもコン トロールされた清浄な環境下で使われるとは限ら ない. したがって,固体表面を扱うときには,常 に異分子のコンタミネーション(吸着・付着)を 意識すべきである. 固体表面の氷核活性は,間違 いなく分子の吸着・付着の影響を強く受ける. 伝 熱工学の技術として氷の核生成制御を実現するた めには,固体表面のコンタミネーションの問題を 解決する必要があることを強調しておきたい.

6. おわりに

固体と水の界面で起こる氷の不均質核生成現象 の理解に向けて、伝熱工学を扱う立場から、注意 すべき点や求められている知見について、筆者の 私見を交えながら述べてみた.

氷の核生成現象は、一般の人々にとって馴染みの深い現象である.しかし、学術的な観点からはいまだ現象の理解が不十分であり、解明すべき課題が多く残されている. 伝熱工学の立場からは、氷の核生成温度の予測・制御が技術的に重要な課題であり、その実現に向けては、やはり基礎的な現象の理解が不可欠であろう.

氷の核生成現象の理解を深めていく上で、本稿 が読者のみなさまの理解の一助となれば幸いであ る.

謝辞

本稿で紹介した研究の一部は、小山寿恵博士 (東京電機大学)の協力を得て行った.また、本 稿で紹介した研究の一部は、JSPS 科研費 (JP21360102, JP24656149, JP19K21938)の支援を 受けて行った.

参考文献

- Lupi, L. et al., Role of stacking disorder in ice nucleation, *Nature*, 551 (2017), 218.
- [2] Li, C., Liu, Z., Goonetilleke, E.C. and Huang, X., Temperature-dependent kinetic pathways of heterogeneous ice nucleation competing between classical and non-classical nucleation, *Nat. Commun.*, **12** (2021), 4954.
- [3] Kiselev, A. et al., Active sites in heterogeneous ice nucleation the example of K-rich feldspars,

Science, 355 (2017), 367.

- [4] Murray, B.J., Cracking the problem of ice nucleation, *Science*, 355 (2017), 346.
- [5] Holden, M.A. et al., High-speed imaging of ice nucleation in water proves the existence of active sites, *Adv. Sci.*, 5 (2019), aav4316.
- [6] Vali, G., DeMott, P.J., Möhler, O. and Whale, T.F., Technical note: A proposal for ice nucleation terminology, *Atmos. Chem. Phys.*, **15** (2015), 10263.
- [7] Xue, H. et al., Spontaneous freezing of water between 233 and 235 K is not due to homogeneous nucleation, J. Am. Chem. Soc., 143 (2021), 13548.
- [8] Koop, T., Luo, B., Tsias, A. and Peter, T., Water activity as the determinant for homogeneous ice nucleation in aqueous solutions, *Nature*, 406 (2000), 611.
- [9] Inada, T., Koyama, T., Goto, F. and Seto, T., Ice nucleation in emulsified aqueous solutions of antifreeze protein type III and poly(vinyl alcohol), *J. Phys. Chem. B*, **115** (2011), 7914.
- [10] Fletcher, N.H., *The Chemical Physics of Ice*, Cambridge University Press (1970).
- [11] Vali, G., Repeatability and randomness in heterogeneous freezing nucleation, *Atmos. Chem. Phys.*, 8 (2008), 5017.
- [12] Inada, T., Tomita, H. and Koyama, T., Ice nucleation in water droplets on glass surfaces: From micro- to macro-scale, *Int. J. Refrig.*, 40 (2014), 294.
- [13] Niedermeier, D. et al., Heterogeneous ice nucleation: exploring the transition from stochastic to singular freezing behavior, *Atmos. Chem. Phys.*, **11** (2011), 8767.
- [14] Broadley, S.L et al., Immersion mode heterogeneous ice nucleation by an illite rich powder representative of atmospheric mineral dust, *Atmos. Chem. Phys.*, **12** (2012), 287.
- [15] Ervens, B. and Feingold, G., On the representation of immersion and condensation freezing in cloud models using different nucleation schemes, *Atmos. Chem. Phys.*, **12** (2012), 5807.
- [16] Wilson, P.W. and Haymet, A.D.J., The spread of nucleation temperatures of a sample of

supercooled liquid is independent of the average nucleation temperature, *J. Phys. Chem. B*, **116** (2012), 13472.

- [17] Vonnegut, B., The nucleation of ice formation by silver iodide, J. Appl. Phys., 18 (1947), 593.
- [18] Inada, T., Koyama, T., Goto, F. and Seto, T., Inactivation of ice nucleating activity of silver iodide by antifreeze proteins and synthetic polymers, *J. Phys. Chem. B*, **116** (2012), 5464.
- [19] Conrad, P., Ewing, G.E., Karlinsey, R.L. and Sadtchenko, V., Ice nucleation on BaF₂(111), J. Chem. Phys., **122** (2005), 064709.
- [20] Edwards, G.R. and Evans, L.F., Effect of surface charge on ice nucleation by silver iodide, *Trans. Faraday Soc.*, **58** (1962), 1649.
- [21] Abdelmonem, A. et al., Surface-charge-induced orientation of interfacial water suppresses heterogeneous ice nucleation on α-alumina (0001), Atmos. Chem. Phys., 17 (2017), 7827.
- [22] Whale, T.F. et al., The enhancement and suppression of immersion mode heterogeneous ice-nucleation by solutes, *Chem. Sci.*, 9 (2018), 4142.
- [23] Campbel, J.M., Meldrum, F.C. and Christenson, H.K., Observing the formation of ice and organic crystals in active sites, *Proc. Natl. Acad. Sci.* U.S.A., 114 (2017), 810.

- [24] Gurganus, C., Kostinski, A.B. and Shaw, R.A., Fast imaging of freezing drops: no preference for nucleation at the contact line, *J. Phys. Chem. Lett.*, 2 (2011), 1449.
- [25] Gurganus, C.W., Charnawskas, J.C., Kostinski, A.B. and Shaw, R.A., Nucleation at the contact line observed on nanotextured surfaces, *Phys. Rev. Lett.*, **113** (2014), 235701.
- [26] Sayer, T. and Cox, S.J., Stabilization of AgI's polar surfaces by the aqueous environment, and its implications for ice formation, *Chem. Phys. Phys. Chem.*, **21** (2019), 14546.
- [27] Roudsari, G., Reischl, B., Pakarinen, O.H. and Vehkamäki, H., Atomistic simulation of ice nucleation on silver iodide (0001) surfaces with defects, *J. Phys. Chem. C*, **124** (2020), 436.
- [28] Soni, A. and Patey, G.N., How microscopic features of mineral surfaces critically influence heterogeneous ice nucleation, *J. Phys. Chem. C*, 125 (2021), 10723.
- [29] Jin, S. et al., Use of ion exchange to regulate the heterogeneous ice nucleation efficiency of mica, J. Am. Chem. Soc., 142 (2020), 17956.
- [30] Fitzner, M., Sosso, G.C., Cox, S.J. and Michaelides, A., Ice is born in low-mobility regions of supercooled liquid water, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **116** (2019), 2009-2014.

固体面上を伝播する氷結晶の基底面

Basal Plane of Ice Crystal Growing on Solid Surface

寺岡 喜和 (金沢大学),米林 尚 (エネゲート),佐藤 由菜 (日立ソリューションズ東日本) Yoshikazu TERAOKA (Kanazawa University), Nao YONEBAYASHI (Enegate), Yuna SATO (Hitachi Solutions East Japan, Ltd.)

1. はじめに

我々の生活とは切り離すことが出来ない氷は,結 晶構造に由来する異方性が様々な現象として現れ る.例えば,霜の形状,凍結濃縮の物質の除去,氷 層の強度など,工業的にも重要なものも含まれる. そのような氷の結晶状態を決定する凝固過程のほ とんどは過冷却状態を経ることになるが,その詳細 については未だ多くの疑問が残されている.特に, 極めて低い過冷度域を除き,氷は異なる結晶方位を 有する結晶粒が集合した多結晶体となるが,比較的 核生成が起こり難い水からどのようにして異なる 結晶方位の結晶粒が出現するのかを議論した研究 は少ない.

氷結晶の生成過程で異なる結晶方位が出現する 現象について、いくつかの条件下での実験的研究が 報告されている. Macklin ら[1]は、-3~-7℃過冷却 水中を自由成長する氷結晶が二つの正六角錘を頂 点で結合した立体的な形状として成長する様子を 観察し、隣接する基底面の角度を測定した. その結 果、10~35°の範囲となり、過冷度の増加に伴いそ の角度が増加すると報告している. Uyeda ら[2]は、 0.6~1.0 mm 径の過冷却水滴に単結晶を接触させて 発生した隣り合った結晶の基底面角度のピークが、 -15~-20℃では 20°、-20~-25℃では 20° と 70° となることを報告している. また、Zhang ら[3]は、 平板間の基底面が平行な氷単結晶を一方向成長さ せ、セル状であった成長界面が、結晶が 2 方向に傾 き海綿状に遷移する過程を観察した.

一方で,著者らは,平板間に挟まれた過冷却水の 凝固現象を観察し,基底面が板に垂直な場合は楔状 の結晶が現れることを示した[4].しかし,実際の固 体面上に形成される氷層の結晶状態を把握するた めには,この楔状結晶から分岐する結晶についても 明らかにする必要があるものの,十分な議論はなさ れていない.また,冷却銅板上で結晶方位が徐々に 変化する現象を確認した[5,6].この現象を利用し て,不規則な結晶方位の結晶から特定の基底面方向 を持つ結晶を発生させる結晶方位制御技術を確立 した[7,8].

本研究では,過冷却状態にした水溶液中にガラス 平板を設置し,その表面上に氷結晶を伝播させる. その平板と種結晶の結晶方位の幾何学的関係が,伝 播する氷結晶に及ぼす影響を明らかにすることを 目的とする.

2.実験方法および手順

2.1 実験装置および氷結晶の生成

本実験で用いた結晶成長試験管(以下,試験管) を図1に示す. 試験管に封入する試料は、蒸留水と 99.5%エチレングリコールを混合し作成した 1wt% 水溶液を用いた.純水ではなく水溶液とした理由は、 出現する樹枝状結晶および楔状結晶の c 軸方向成 長速度が抑制されることで,純水に比べ,結晶形状 から基底面の特定が容易になるためである.この試 験管を低温室内に設置した一定温度の不凍液が循 環する恒温水槽に浸漬し、水溶液を過冷度 1±0.05 K(-1.30℃)に維持する. 温度が定常になったこと を確認した後,試験管上部の核生成部を冷却するこ とで氷結晶を発生させる. 核生成部の氷結晶は、矩 形細管(アクリル製,内断面 0.2×2 mm)および三 角波状細管(ステンレス製,外径 0.4,内径 0.2 mm) の管路内の過冷却水溶液が凝固することで成長し, 最終的に細管下端から樹枝状の種結晶が出現する. このような材質・形状の細管を用いたのは、種結晶 の基底面方向を制御するためである[7,8]. 細管下 端はガラス面から 2~5 mm 程度離れた位置にある ため、種結晶は2次元的な六花状に成長する. その 六方向に成長する樹枝状結晶の1または2個の結 晶がガラス板 (ソーダ石灰ガラス, 30×14×1 mm) の表面に到達し、その後、ガラス板表面を伝播する. その様子を試験管を回転させつつ,回転軸垂直方向 から撮影した.



図1 結晶成長試験管

2.2 座標および種結晶の結晶方位の定義と測定

本研究で用いた座標系とガラス板と種結晶の結 晶方向の関係を図2に示す.種結晶の樹枝状結晶が ガラス面に到達した点を原点*O*,ガラス面上に*x,y* 軸を配置し,ガラス面に垂直な方向を*z*軸とする. さらに*y*軸は,種結晶基底面に平行にとるものとす る.ガラス板と種結晶の結晶方向の関係は,*z*軸と 基底面の角度を*a*,*O*に到達した樹枝状結晶が成長 する方向のa軸と*x-z*面とのなす角を β とすること で定義する.さらに,結晶の対称性を考慮し,*a* ≥ 0, β ≥0 となるように,*x*,および,*y*軸の正方向を 決定した.実際の実験では,ガラス板サイズが有限 であり,時間が経過すると細管から異なる結晶方位 の種結晶が成長するため,0 ≤ *a* ≤ 45°,0 ≤ β ≤ 45°の範囲となる.

種結晶の基底面を上述の細管である程度制御す ることで,試験管回転軸とy軸は近くなる傾向を示 すが,完全に一致はしない.そのため,ガラス面垂 直方向,ガラス面平行方向,基底面平行方向, c軸 最近似方向からの観察画像を取得し,各画像上にお けるガラス面幅や結晶の寸法,回転軸と基底面およ び a 軸方向との角度を測定する.これらの測定値を 幾何学的に解析することで,種結晶の α , β , およ び,後述する伝播結晶の各種角度を得る.





3. 実験結果および考察

3.1 伝播形状の観察

種結晶の結晶方位が異なる3つの実験において, ガラス面垂直(z軸)方向から観察したガラス上を 伝播する氷結晶と種結晶の画像を図3に示す.

 $a = 20^\circ$, $\beta = 2^\circ$ の種結晶となった図3(a)では,細管先端から出現した種結晶の樹枝状結晶が点 Oに到達し,その点から楔状の結晶が画像の上方向,および,右下方向の2方向にほぼ直線的に成長する. その結晶を主枝とし,それぞれの主枝のx軸正方向側から複数の二次枝がほぼ平行に連なっている.また,その二次枝の方向は,もう一方の主枝とほぼ一致することが確認できる.

一方,図(b)では,種結晶の2本の樹枝状結晶が, それぞれ, 点 O_Aおよび O_Bの2点でガラス面に到 達した. その後, それぞれの点から氷結晶が伝播す ることが観察される.このような現象は、一方のβ が約15°以上の時に観察されるが、以降の議論では それぞれ別の伝播現象として扱うこととする.この 場合,種結晶が単結晶とすれば,αは同一,それぞ れの β の和は 60° となる.また,図3(b)のように α が比較的大きくなると,主枝が湾曲している様に成 長することが観察される.このような現象は,過去 の文献[8]でも報告されており、楔状結晶先端で基 底面が成長しつつ徐々に変化しているものと考え られる.また、二次枝が主枝の両側から成長し、そ の一部は主枝と同様にやや湾曲しているものの, そ れぞれ正反対の方向に成長していることが分かる. この条件では、二次枝が他方の主枝と方向が一致し ていないが,これは結晶方位変化が発生した為と推 測する.

特集:固液相変化を伴う伝熱現象



(c) $\alpha = 8^{\circ}$, $\beta_A = 20^{\circ}$

図3 z方向から観察した種結晶と伝播する氷結晶

(b) $\alpha = 41^\circ$, $\beta_A = 24^\circ$

基底面がガラス面とほぼ垂直になる条件での伝 播の様子を図 3 (c)に示す. 種結晶は y 軸と重なる ように線状になっている為、この画像での判別は困 難である.βが大きい為,伝播の開始点は2点とな った. 伝播開始直後に成長する主枝は、 O4 から画 像下方向, O_Bからは右上方向であった. 主な傾向 は図3(a)と共通するが、y軸負側の主枝が観察され ず,他方の伝播開始点から成長する結晶に成長を阻 害された為と考えられる.また、二次枝が図3(a)と 異なり, x 軸負側に成長している.しかし,その成 長方向は,他方の伝播開始点から成長する主枝と正 反対であることが確認できる.このことは、伝播開 始点が1点であっても、y軸負側の主枝と同様な傾 向を示すことを確認している.

3.2 楔状結晶の伝播方向

前項の観察から、ガラス面上を成長する氷結晶は 楔状となり,その結晶から分岐する枝も同様な形状 となる. さらに, α が比較的小さい条件では結晶方 位が徐々に変化する現象が発生しないため,以降で は図4 で示す角度 γ で楔状結晶の成長方向の評価 を行う. yに付した番号は成長方向の x-v 座標象限 を表す. 全ての実験で図4の cl が観察されるが, 前項で説明したように伝播開始点が2 点になる条 件で c4 は観察されない. また, c1 の二次枝である c_2 , c_4 の発生の有無も β に依存する. しかし, 前項 で述べたように、各実験において、それら第2およ

び第4象限へ成長する楔状結晶の y4, y2, y4'はそれぞ れほぼ同じ値となる.





測定された y について α を横軸に, β を 10°毎に プロットしたグラフを図5に示す.図5(a)は第1象 限に成長する楔状結晶の y1,(b)は第2および第4象 限に成長する結晶の中で最も大きいものの y, (c)は 各実験でのそれらの差を示したものである. αの増 加とともにいずれの γ も上昇していることが確認 できる.一方で,βの依存性はαに比べ低いものの, βの上昇とともに γ1 は低下する傾向が確認できる. また,図5(c)から, y1と y2.4.4'の差は5°以下と小さ く, $\beta < 30^{\circ}$ においては $\gamma_1 > \gamma_{2.4.4}$ であるが, $\beta \ge 30^{\circ}$ ではその大小が逆転している.これは、2 点から伝 播が開始した場合、一方の c_1 ともう一方の c_1 の二 次枝が平行になることからも妥当な結果といえる.



図5 楔状結晶の成長方向の測定結果

3.3 楔状結晶から発生する樹枝状結晶の観察

楔状結晶の基底面を把握するため,楔状結晶がガ ラス面下端に到達した後,そこから発生する樹枝状 結晶の観察を行った.図6にz方向から観察した画 像を示す.画像の点線はガラス面下端であり,その 上方に楔状結晶,下方に樹枝状結晶が観察され.図 中の c_1 および c_2 とそれぞれのガラス面下端部から 発生する樹枝状結晶を別角度から観察した結果,楔 状結晶の成長方向は樹枝状結晶の基底面に含まれ ること,加えて, $c_1 \ge c_2$ (または,別の点から伝播 した c_4)それぞれから発生する樹枝状結晶の基底面 が一致しないことを確認した.



図 6 ガラス板下端に出現する樹枝状氷 (α = 13°, β_B = 29°)

以上のような楔状結晶から観察可能な樹枝状結 晶が発生した実験の観察画像を用い、種結晶のαと 同様な解析を行うことで,各樹枝状結晶の基底面と z軸のなす角 α;を測定した.ただし、種結晶と同じ 傾き方向を正としたため、a;は負の値を取り得るこ ととなる. 測定した結果から特にβとの相関がみら れないため、 $\alpha \ge \alpha$;の関係のみを図7に示す. 図中 に α = α_iとなる線を記した. データにばらつきがみ られるが, *a*_iは *a* と近く, その差は最大で 10°程度 である. また, α_i は, 全て正の値となり, α より大 きくなる傾向が見られる.図 5 の結果を踏まえる と、楔状結晶は、その多くが種結晶の基底面を z 軸 に回転したような基底面を有し,基底面の傾きが大 きいほど、その回転量が増すように変化する.また、 その基底面は,徐々に固体面に平行に近づく傾向が あることが分かる.

これらの基底面が変化するメカニズムとして,二 つの結晶方位間を遷移するような規則性を有する ことから,双晶関係にある結晶方位が出現したもの とする可能性もある.しかし,αの増加に伴い,異 なる方向の楔状結晶の角度が増加することから,単 純な二つの双晶関係として扱うことはできないと





図7 ガラス下端の樹枝状結晶の基底面の傾き

4. 結言

本実験では、エチレングリコール1wt%水溶液を 過冷度1Kの過冷却状態にし、氷種結晶がガラス平 板に到達した後に伝播する楔状の氷結晶を観察す る実験を行い、以下の結論を得た.

楔状結晶から異なる結晶方位を有する結晶が発 生することで分岐が起こる.種結晶の基底面がガラ ス面に垂直から30°以内にある場合,一つの単結晶 から発生した分岐したものを含む楔状結晶は,二つの基底面のみで構成される.これらの基底面は,種結晶の基底面を z 軸で回転したように変化し,その変化量は種結晶基底面が傾くほど大きくなる.

参考文献

- W. C. Macklin and B. F. Ryan, Journal of the Atmospheric Sciences, 22-4 (1965) 452.
- [2] Uyeda, H. and Kikuchi, K., Journal of the Meteorological Society of Japan, 56-1 (1978) 43.
- [3] Tongxin Zhang, ZhijunWang, LilinWang, Junjie Li, JinchengWang, Journal of Crystal Growth, 577-1 (2022).
- [4] 寺岡喜和,岡田昌志,樋口雄介,田中宏和,日本冷凍空調学会論文集,24-4 (2007) 349.
- [5] 堀高誌, 寺岡喜和, 松本浩二, 神崎裕也, 伝熱シ ンポジウム講演論文集, **46** B2-123, (2009) 25
- [6] 堀高誌, 寺岡喜和, 松本浩二, 福野良, 伝熱シン ポジウム講演論文集, **47**, (2010) B312
- [7] 寺岡喜和,岡田昌志,田中宏和,日本冷凍空調学会論文集, 25-1 (2008) 21.
- [8] 寺岡喜和,小泉公彦,榎本啓士,稗田登,日本 冷凍空調学会論文集, **33**-4 (2016) 365.

未利用熱を有効活用するための潜熱輸送 Latent Heat Transport for Utilizing Waste Heat

日出間 るり,大坪 拓夢,鈴木 洋(神戸大学) Ruri HIDEMA, Takumu OTSUBO, Hiroshi SUZUKI (Kobe University) e-mail: hidema@port.kobe-u.ac.jp, hero@kobe-u.ac.jp

1. はじめに

持続可能な開発目標(SDGs)の7番には、「エネル ギーをみんなにそしてクリーンに」が掲げられてお り、エネルギー問題に関する各国の関心の高さがう かがわれる.日本でも,福島第一原子力発電所の事 故以来, エネルギー問題への関心は高く, 必要なエ ネルギーを,安全性を第一とした上で,どう創り出 すかが課題となってきた.この枠組みの一環として, また,パリ協定や SDGs の目標達成のため,日本は, クリーンな再生可能エネルギー割合増加に向けた 努力を続けてきた.結果として、日本の電源構成に 対する再エネ率は震災前の9%から現在の16%に増 加した.この値を、国土面積あたりの再エネ発電量 に換算し、日本と同程度の国土面積を有するドイツ やノルウェーと比較すると、ドイツに次いで高水準 である.しかしながら日本は、人口が多いため需要 も多く、需要に対する再エネ率は上げにくい[1].

このような背景から、資源が少なくエネルギー面 で有利とは言えない日本では,エネルギーを創り出 すことだけでなく, 効率的なエネルギー利用が重要 だと言える.この点について我々は、様々な温度帯 での未利用熱を有効活用するため,流体に潜熱を保 有する微粒子を分散させた潜熱輸送スラリーの利 用について検討してきた. 高熱密度で, 温度維持特 性が高いため、これを熱輸送媒体として用いると、 少量の流体で,長距離の熱輸送が可能となる.これ により, 熱機器のコンパクト化, 輸送量の減少によ る輸送動力削減,排熱が生じる場所と排熱を利用す る場所をつなぐ空間的・時間的ギャップの解消を達 成することができ、省エネにつながる. 潜熱保有微 粒子は、輸送したい熱の温度域によって、氷[2-4]、 有機水和物(低温用)[5-7],無機系の水和物(高温 用) [8-10]などとそれぞれ使い分けられ, いくつか の潜熱輸送物質については、すでに実用化が行われ ている.

しかし、有望ではあるが、まだ実用化されていな

い物質については、実用化するための課題をそれぞ れ解決する必要がある.例えば、高温系潜熱輸送物 質は、高密度であるため沈降しやすいうえに、シス テム停止時に析出するため、管閉塞の恐れがあるこ と、冷房用途に適した温度域のパラフィンは油相で あるため水相に混ぜると相分離しやすく、可燃性で もあり危険である、などである.我々は、これらの 問題を解決するために、レオロジーや化学工学の手 法を用いて、様々な提案を行ってきた.本稿では、 これらの問題を解決し、熱の共有を可能にする熱共 有想定図(サーマルグリッド構想)を実現するため に、これまでに我々が行ってきた研究について、最 近の取り組みについて、まとめて報告する.



図1 サーマルグリッド構想

2. 高温系潜熱輸送物質の高密度·析出問題を解決

日本のエネルギー消費は産業部門・運輸部門・民 生(商業区や家庭)部門の3つで整理されており, それぞれほぼ3分の1ずつを占めている.民生部門 での消費エネルギーは年々増加しており,この部門 での省エネルギー化は急務である.詳細にみると, 民生のエネルギー消費は,50%以上が暖房・給湯お よび冷房といった熱エネルギーであり,年間約2.5 エクサジュール(EJ:10¹⁸J)の熱エネルギーを消費 している.これらの熱エネルギーは質的に低級であ り,せいぜい70℃前後の熱エネルギーである.一 方で工場やゴミ処理施設や電力プラントでは,100 ℃以下の低級エネルギーを利用することができず、 空気中あるいは排水に廃熱している.そのような未利用排熱は年間3エクサジュール程度存在すると考えられている.この産業部門で排出される熱を有効に利用する方法があれば、民生のエネルギーを大幅に削減することができる.ここで、住宅地や商業地から離れた場所に存在する工場や発電プラントの熱を、効率よく住宅地や商業地に運び、民生エネルギーとして利用することを考えたい.数キロメートルにおよぶ輸送の間の温度低下を防いだうえで、流体の圧力損失も低減させることができれば理想的である.

この問題を解決するために我々が着目したのが アンモニウムミョウバン水和物溶液である[8-10]. アンモニウムミョウバン水和物溶液は,濃度によっ て相変化温度が変わり、水和物濃度 35wt%では 51 ℃で相変化する.これは、工場からの廃熱を家庭 に運び再利用するのに適した温度である.しかし, アンモニウムミョウバン水和物を高温系潜熱輸送 物質として実用化するにはいくつかの問題がある. ①密度が大きく(1,640kg/m³)沈殿しやすいこと, ②高温で溶解度が高く,潜熱を利用するためには溶 解度以上の濃度の溶液を調整する必要があること, ③高濃度の溶液ではシステム停止中の室温付近で, 多くの結晶固体を析出させ, 沈殿させること, であ る. 一度沈殿すると、この状態では再稼働は不可能 であり、システム全体を昇温し、 再融解させないと 流動させることができない. 実用化のためには, 沈 殿を抑制し、流動性を向上させること、および、ア ンモニウムミョウバン水和物の濃度を抑えて,有効 な潜熱を得ることが必要になる.

2.1 高温系潜熱輸送物質の沈降抑制と流動化向上

高温系潜熱輸送物質を含む溶液としては, 251J/kg の潜熱を有する硫酸アンモニウムアルミニ ウム (アンモニウムミョウバン) 水和物を水和物濃 度 35wt%で水に溶解させた溶液を調整した.ここに, 潜熱輸送スラリーの流動性を向上させる目的で,抵 抗低減効果を有する棒状ミセルを形成する界面活 性剤である塩化ベヘニルトリメチルアンモニウム (アーカード 22-8) を 2000ppm およびサリチル酸ナ トリウムを 1200ppm 添加した. さらに,高密度な アンモニウムミョウバン水和物の沈降を抑制する ために,ポリビニルアルコール(Poly (vinyl alchol), PVA)を100~2000ppm 添加した溶液も調整し、この効果を調べた.また、PVA のみを添加した溶液も 調整し、効果を比較した.表1に、調整した溶液を まとめて記した[9,10].

表1 アンモニウムミョウバン水和物水溶液

	A	E	C.	D	Ε	=	G	-	1
Ammonium alum hydrai - [wi3c]	35	35	35	35	33	35	35	35	30
Surfactant (ppm)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000
PVA [gpm]	0	0	100	200	300	400	500	1000	2000

図2には、アンモニウムミョウバン水和物の結晶 が析出する温度50°Cで、結晶が沈降する様子を調 べた実験の模式図と、試験管に入れた溶液量に対す る、見かけの沈降割合を示した.この結果から、沈 降抑制の効果は、界面活性剤とPVAを両方添加し た溶液でよくみられることがわかった.沈降抑制の 効果は、4日程度であり、実用化の際、システムを 一時停止しても、再稼働に支障ないことが示された. なお、PVAのみを添加した溶液では、PVAの重な り合い濃度以上に濃度を増やしても、ほとんど効果 が無かった.また、各溶液中での結晶析出の様子を、







図 3 (a) 各溶液およびスラリーの流動抵抗, (b)ヌ ッセルト数, (b)コルバーンの *j* 因子を流動抵抗 *f* で 除した値

顕微鏡下で観察すると、沈降が抑制された溶液では、 析出した結晶のサイズが小さく抑えられているこ ともわかった[9,10].

さらにこれらの溶液の流動抵抗と伝熱の測定を 行い,潜熱輸送スラリーとしての有用性を調べた. 図3には,いくつかの試料について,溶液とスラリ ーの流動抵抗,ヌッセルト数,コルバーンのj因子 を流動抵抗fで除した値jffを示した.抵抗低減を 示す界面活性剤を入れた試料では,流動抵抗は小さ くなり,スラリーの流動性増加に貢献した.この傾 向は,PVA を添加した場合も影響がなかった(図 3a).一方,この抵抗低減効果により,ヌッセルト 数に見られる伝熱特性は低下する(図3b).しかし ながら,j/fの値を比較すると界面活性剤を添加した 抵抗低減を示す溶液でも,アンモニウムミョウバン スラリーでは有意に伝熱性能が向上した.流動中に 粒子の析出や沈降が抑えられる様子は,トモグラフ ィーによる管内可視化によっても検証した[10].

これらの実験から, 50 ℃付近で相変化する高温 系潜熱輸送スラリーの析出, 沈降問題を解決し, 流 動性能も向上させることができた.

2.2 貧溶媒添加による析出抑制と伝熱性能向上

アンモニウムミョウバンスラリーの析出や沈降 による問題を解決するもうひとつのアプローチと して最近我々が取り組んでいるのは、アンモニウム ミョウバン水和物水溶液の溶媒に,貧溶媒を混ぜる というものである[11]. アンモニウムミョウバンは, 水への溶解性が高く,高温になるほど溶解しやすい. 潜熱を得るためには、スラリー中に融解する物質が 必要であるため、アンモニウムミョウバンを高温域 の温度で相変化させようとすると,非常に高濃度の 溶液を調整する必要がある.そして,非常に高濃度 の溶液は,相変化温度以下で,大量の結晶を析出さ せるため、システム一時停止後の再稼働の際に問題 となる. ここで,水と混和しやすく,かつ,アンモ ニウムミョウバンを溶解しない新たな溶媒を混ぜ れば,溶媒全体に対するアンモニウムミョウバンの 割合を減少させつつ、水に溶解しているアンモニウ ムミョウバンの濃度は維持することができる(図 4).この方法により,高い相変化温度を維持しつつ, 結晶析出の問題を解決できるスラリーを得ること ができる.我々は貧溶媒としてプロピレングリコー ル (Propylene glycol, PG) を選び, PG 水溶液にアン

モニウムミョウバン (AINH₄(SO₄)₂) 水和物を添加 し, PG と水の混合割合によるスラリーの潜熱特性 を調べ,良好な結果を得ている.



Dissolved particle

図 4 相変化温度を維持できる貧溶媒を添加した スラリーのイメージ図

3. 低温系油相潜熱輸送物質の相分離問題を解決

比較的低温の潜熱輸送物質として頻繁に用いら れるものにパラフィンがある.例えば n-ヘキサデカ ンは相転移温度 17.5 °C, 潜熱量 224 kJ/kg であり, 冷房域の潜熱輸送物質として用いることができる. しかし,パラフィン系潜熱輸送物質は,油相である ため,水相に添加すると容易に相分離する.この問 題を解決するために,我々が試みているのが,油相 系潜熱輸送物質を,超疎水性ゲルに吸着させるとい う方法である[12].油相系潜熱輸送物質を吸着させ た超疎水性ゲルを,水中に分散させることができれ ば,低温系潜熱輸送スラリーとして活用できる.

超疎水性ゲルに選んだのが、ジメチルジメトキシ シランとメチルトリメトキシシランの共重合体ゲ ル(略称、マシュマロゲル)[13]である.マシュマ ロゲルは、柔軟で多孔質な白色微粒子で、この微粒 子を n-ヘキサデカンに浸漬し、減圧脱気すること で、ゲル微粒子に n-ヘキサデカンを吸着させた(図 5).n-ヘキサデカンが吸着したマシュマロゲルの相 転移温度は17.5 ℃,潜熱量は116kJ/kgで、潜熱輸 送物質として使用できる.しかしこの際も、ゲルを 水に分散させると、ゲルと水が分離し、密度の低い ゲルが水に浮くという問題が生じた.そこで、カル ボキシメチルセルロースナトリウム (Sodium carboxymethyl cellulose, CMC)を 0.6wt%の濃度で水 に溶かすことで、ゲルと水の分離を抑制した.n-ヘ キサデカンを吸着させたマシュマロゲル10wt%を、 0.6w%CMC 水溶液に添加した潜熱輸送スラリーの 伝熱特性を調べると、乱流域で有意に伝熱特性が向 上した.この方法により、油相系潜熱輸送物質を相 分離させることなく、潜熱輸送させる方法を提案で きた.現在、様々なパラフィン系潜熱輸送物質に同 様の方法を適用し、その有効性を検討している.



図 5 (a) 赤色に着色した潜熱輸送物質を吸着させ たマシュマロゲルと(b)その SEM 画像

4. 潜熱保有物質の利用を拡げるカプセル

ここまでの項目で述べた潜熱輸送物質の析出や 凝集,沈降の問題は,潜熱を保有する物質を凝集・ 沈降しないカプセルに閉じ込めることによっても 解決できる.このため,我々は近年,潜熱保有物質 を内包可能なシリカ硬殻マイクロカプセルを作成 し,これを輸送することによる新規の潜熱輸送シス テムの開発に取り組んでいる[14, 15].シリカ硬殻 マイクロカプセルは,機械強度と化学安定性に優れ, 表面の濡れ性が良いためカプセルどうしの凝集も 生じず,壁面にも付着しにくい[16].また,カプセ ル内に潜熱保有物質を内包できると,流体輸送だけ でなく,他の素材への混入も可能となり,潜熱保有 物質を利用できる場所が広がり発展性が期待でき る.

図6には、我々が開発している硬殻マイクロカプ セル化蓄熱材(HSMC)生成法を示した.まず、油 相とケイ酸を含む水相1を混ぜ、Water in Oil(W/O) エマルションを作る.このW/Oエマルションを、 炭酸水素アンモニウムを含む水相2中で反応させ ると、エマルションの表面で反応が生じ中空のシリ カカプセルの原型ができる.この際、水相1に溶け ていた高分子がエマルション表面に析出する.水相 2中で反応が進んだシリカカプセルは、濾過の後、 焼成する.焼成により、表面に析出した高分子が焼 かれると、カプセル表面にナノ孔を有し、内側は空 洞の,中空ナノ孔シリカマイクロカプセルとなる. これを蓄熱材を含んだ容器に入れ,減圧すると,ナ ノ孔から蓄熱材が浸透し,内側の空洞を満たし,内 包される.さらにこれをコーティングすると, HSMC となる.数種の潜熱保有物質を内包した HSMC の伝熱特性を調べると,蓄熱材として使用で きる良好な結果を得ている.さらに,カプセル化す ることにより潜熱保有物質の過冷却を解消できる という知見も得られており,基礎的にも応用的にも 興味深い.現在は,将来の実用化を目標に,カプセ ルの殻を薄くすることによる内包率の向上,カプセ ル表面に均一なナノ孔を作る最適な条件,内包物が 漏洩しない適切なコーティングなど,最適化項目に ついて検討中である.

①ナノ孔作成プロセス



図6 硬殻マイクロカプセル化蓄熱材(HSMC)生 成法の模式図

5. まとめ

本稿では未利用排熱利用を実現する潜熱輸送ス ラリーについて述べた.実用化への課題に対する取 り組みは今後とも進めていく予定である.ここで紹介した技術は熱を長距離に輸送する1手段である.しかしながら未利用排熱利用によって新たな社会構造の大きな変革が期待される.

現在,地域社会は破綻の時代に突入していると思われるが,未利用排熱利用には,互いに熱を融通し あう共生社会の実現が不可欠である.未利用排熱利 用はそういった地域社会の連携をより強固なもの とし,エネルギーの豊かさのみならず,精神の豊か さをも地域にもたらす核となるものである.

なお, 我々は潜熱を中心とした未利用排熱等の高 効率熱利用技術を議論するための潜熱工学研究会 を主宰している. 年に1回のシンポジウムも開催し ているので, 興味のある方は, 詳細は http://www2.kobe-u.ac.jp/~hidema/latentheat/をご覧頂 きたい.

謝辞

本研究の一部は、科学技術振興機構(JST)未来 社会創造事業,新規マイクロカプセル化蓄熱材の開 発,および、科学研究費助成事業基盤研究(B) 19H02498により行われた.

参考文献

- [1] 2019 エネルギー白書,経済産業省,資源エネル ギー庁 (2020)
- [2] Inaba, H. et al., Preventing Agglomeration and Growth of Ice Particles in Water with Suitable Additives, Int. J. Refrig. 28 (2005) 20.
- [3] Kumano, H. et al., Effect of Initial Aqueous Solution Concentration on Rheological Behavior of Ice Slurry, Int. J. Refrig. 68 (2016) 218.
- [4] Suzuki, H. et al., Particle Size Depression and Drag Reduction of Ice Slurry Treated with Combination Additives of Surfactants and Poly(vinyl alcohol), J. Chem. Eng. Japan. 43 (2010) 482.
- [5] Indartono, Y. S. et al., Hydrodynamics and Heat Transfer Characteristics of Drag-Reducing Trimethyloethane Solurion and Suspension by Cationic Surfactant, J. Chem. Eng. Japan. **39** (2006) 623.
- [6] Suzuki, H. et al., Drag-Reduction of Trimethylolethane Hydrate Slurries Treated with Surfactants, Int. J. Refrig. 32 (2009) 931.

- [7] Zhang, P. and Ye, J., Experimental Investigation of Forced Flow and Heat Transfer Characteristics of Phase Change Material Slurries in Mini-Tubes, Int. J. Heat. Mass. Trans. 79 (2014) 1002.
- [8] Suzuki, H. et al., Flow and Heat Transfer Characteristics of Ammonium Alum Hydrate Slurries, Int. J. Refrig. 36 (2013) 81.
- [9] Hidema, R. et al., Phase Separation Characteristics of Ammonium Alum Hydrates with Poly Vinyl Alcohol, J. Chem. Eng. Japan. 47 (2014) 169.
- [10]Hidema, R. et al., Ammonium Alum Hydrate Slurries with Surfactants and Polyvinyl Alcohol as a Latent Heat Transportation Material for High Temperature, Int. J. Heat Mass Trans., **124** (2018) 1334.
- [11]Otsubo. T, et al., Study on the Preparation of Ammonium Alum Slurries with High Thermal Density, Extended Abstracts of the Second Asian Conference on Thermal Sciences, 2nd ACTS, ACTS-

1051 (2021)

- [12]Otsubo, T. et al., A Novel Technique for Latent Heat Transport Using Super Hydrophobic Flexible Gel, Int. Heat Trans. Conf., 16, (2018) 4311.
- [13]Hayase, G. et al., Facile Synthesis of Marshmallowlike Macroporous Gels Usable under Harsh Conditions for the Separation of Oil and Water, Angew. Chem. Int. Ed, 52, (2013)1986.
- [14]Tamaru, M. et al., Fabrication of Hard-Shell Microcapsules Containing Inorganic Materials, Int. J. Refrig. 82 (2017) 97.
- [15]鈴木洋,日出間るり,新規硬殻マイクロカプセ ル化蓄熱材に関する研究,日本伝熱学会学術賞 (2020)
- [16]Hidema, R. et al., Adhesive Behavior of a Calcium Carbonate Particle to Solid Walls Having Different Hydrophilic Characteristics, Int. J. Heat Mass Trans., 92 (2016) 603.

固液相変化を伴う伝熱現象を利用した潜熱蓄熱技術 Latent Heat Storage Technology using Heat Transfer with Solid-Liquid Phase Changing

1. はじめに

潜熱蓄熱は物質の相変化潜熱を利用する蓄熱法 である.潜熱蓄熱に利用する物質,すなわち蓄熱材 のことを潜熱蓄熱材,または相変化物質(Phase Change Material: PCM)と呼ぶ.意識して区別され ることは多くないが PCM は氷以外の潜熱蓄熱材の ことを指す.潜熱蓄熱の作動原理として主に固液相 変化が利用され,融解潜熱による蓄熱と凝固潜熱に よる放熱により, PCM は高蓄熱密度,相変化温度 一定温度での熱供給/熱制御が可能,繰り返し利用 が可能,などの特徴を持つ.

2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて, 変動性再生可能エネルギー(Variable Renewable Energy: VRE)の主力電源化や,既往の技術の延長 線上にない革新的な省エネルギー技術の進展が求 められる中,蓄熱技術が改めて注目されている.潜 熱蓄熱技術は"先進的"な蓄熱技術として"長年"研 究開発が進められてきた一方,氷蓄熱技術を除いて 実用化に至った例は多くない.その主たる原因とし て,熱伝導,対流,相変化を伴う伝熱あるいは物質 伝達等が複合されて発生することに伴う伝熱工学 的な技術課題や,実用的な意味においての難ハンド リング性などがあると思われる.

本稿では, 潜熱蓄熱技術における熱交換方式を概 説し, それぞれの方式に特有の課題とその解決に向 けて筆者と故秋山友宏教授の研究チームが検討し てきたアプローチを紹介する.また,本特集の主旨 とは方向性がやや異なるが, 固液相変化現象に伴う 伝熱工学的な課題自体を回避しながらもその長所 のみを抽出して利用する新たな潜熱蓄熱技術の可 能性について言及する.

2. 潜熱蓄熱の原理・特徴と主要な熱交換方式

2.1 潜熱蓄熱の原理

図1は、固液相変化を利用した潜熱蓄熱と、相 変化を伴わない顕熱蓄熱の積算蓄熱量の比較を示 能村 貴宏(北海道大学) Takahiro NOMURA (Hokkaido University) e-mail: nms-tropy@eng.hokudai.ac.jp



図1 固液相変化を利用した潜熱蓄熱材の温度と 積算蓄熱容量の関係

す.簡単のため, PCM 及び顕熱蓄熱材の固体顕熱, 液体顕熱は温度によらず一定と仮定した.顕熱蓄熱 は相変化を伴わず物質の顕熱のみを利用するため, 積算蓄熱量は温度に比例する.一方,潜熱蓄熱では, 融点に達すると固体から液体へ相変化し,融解潜熱 により蓄熱量はステップ状に増大し,また,逆の工 程を辿って熱を放出,供給する.このように固液相 変化を利用することで,潜熱蓄熱は顕熱蓄熱と比較 して高密度に蓄熱可能である.また,融点一定温度 での蓄・放熱可能なため,間欠的に発生する熱源を 恒温熱源として使用可能かつ,蓄熱システムに付属 する機器の運転効率を高めることができる.加えて, 化学反応を伴わず固液相変化のみを利用するので, PCM は半永久的に繰り返し使用可能である.

代表的な PCM として,パラフィン,脂肪酸,糖 アルコール類,水和塩,溶融塩,合金等がある.既 に実用化が拡大している 100℃ 以下の熱利用のた めの低温 PCM としては,パラフィン,脂肪酸,及 び無機水和塩が代表的だが,100℃ 以上の中高温用 PCM として,糖アルコール類,溶融塩,及び合金 系 PCM が提案されている[1].

2.2 潜熱蓄熱における主要な熱交換方式

図 2 は潜熱蓄熱における主要な熱交換方式を示 す.シェル・チューブ型,カプセル充填層型,およ び直接接触型の三種に分類される.シェル・チュー ブ型とカプセル充填層型は伝熱壁を介して PCM と 熱媒体が熱交換する間接接触型の熱交換方式であ る.カプセル充填層型は PCM をコア,他の構造材 をシェルとする PCM カプセルを充填した熱交換器 で,カプセルの個数,サイズの調整で容易に伝熱面 積増大が可能である.なお,充填層型を採用する際 の PCM のカプセル化は,PCM が溶融した場合にお いても形状を維持するために必須となる.シェル・ チューブ型は熱媒体として高圧水,高圧水蒸気を利 用可能な点でメリットがある.直接接触型は,他の 二種とは違い,伝熱壁を介さず,PCM と熱媒体が 直接接触して熱交換する.



図2 潜熱蓄熱における主要な熱交換方式

3. 間接接触熱交換における課題

間接接触熱交換は,潜熱蓄熱における最も一般的 な熱交換方式であり、様々な検討例がある.シェル &チューブ型は伝熱管部を耐圧設計とすることに より直接高圧水蒸気を発生できることから、太陽熱 発電用の蓄熱システムとしての検討例[2]がある. 一方,代表的な PCM として検討されている有機物 や無機水和塩,溶融塩は熱伝導率が低く,特に放熱 時は固相の熱伝導が律速となるため,熱交換速度, 熱応答性を大きく低下させてしまうことが課題と なっている.図3は、放熱時の伝熱壁近くでの熱移 動の模式図を示す(参考[3]).熱媒体で冷やされて 蓄熱材側の壁に沿って熱伝導率の低い固体層が生 成され,大きな熱抵抗が生じて,熱流束が小さくな ってしまう. そこで, 潜熱蓄熱システム全体の熱交 換速度,熱応答性を高める方法として,炭素材料[4-6]や金属[7,8]などの高熱伝導性材料とのコンポジ ット化による PCM の高熱伝導化が検討されてきた.



図3 放熱時の伝熱壁近くでの熱移動の模式図[3]

筆者らの研究グループでは、高熱伝導性の炭素繊 維をフィラー(日本グラファイトファイバー(株) XN-100,繊維方向熱伝導率:約900Wm⁻¹K⁻¹)とし て、低温産業排熱回収用として有望なエリスリトー ル(融点:118°C,熱伝導率:0.73Wm⁻¹K⁻¹)の有 効熱伝導率の向上を検討してきた.今までに、溶融 PCMにフィラーを分散させる溶融分散法、粉末状 のフィラー(繊維長:50µm)と粉末状のPCMを混 合し冷間または熱間でプレス成型するプレス成型 法[5]、および炭素繊維シート(繊維長:3 mm)へ の含浸法[4]を試行した.図4は、各方法で作製した コンポジットの熱伝導率とフィラー含有量の関係、 および各コンポジットの断面構造の模式図を示す.



図 4 各方法で作製したコンポジットの熱伝導率 とフィラー含有量の関係,および各コンポジットの 断面構造の模式図

コンポジットの熱伝導率は溶融分散法<プレス 成型法<含浸法の順に高くなり、プレス成型法、含 浸法では 20vol%以下のフィラー量で元の PCM の 20 倍以上の熱伝導率を達成することに成功した. 溶融分散法では、構造図のようにフィラーが PCM

内に均一に分散する一方,フィラー同士が連結した ネットワークは観察されなかった.一方,プレス成 型法で作製したコンポジットは PCM 粒子の周囲に フィラーが配置し、フィラーのパーコレーションネ ットワークが観察された. 溶融分散法とプレス成型 法におけるコンポジットの熱伝導率の顕著な違い は、このパーコレーション構造の有無に起因する、 次に、プレス成型法によって作製したコンポジット 中のフィラーネットワーク構造形成過程を考察す る. プレス成型法におけるコンポジット製造過程で は PCM 粒子は溶けないほぼ固体のため、フィラー は PCM 粒子と PCM 粒子の間に配置する. PCM 粒 子同士は点接触しており、PCM 粒子間空隙自体が パーコレーションしているため,その空隙に配置さ れたフィラーは,極めてパーコレーションしやすい 状況にある.この方法をさらに応用し、かさ密度の 高い PCM 粒子群を原料とすることで、より少ない フィラー充填量でパーコレーションネットワーク を形成し、高熱伝導性のコンポジット作製も可能で あることも明らかとなった[5]. この方法は, PCM コ ンポジットの開発のみならず樹脂材料の高熱伝導 化にも適用できる可能性がある.

炭素繊維シートへの含浸処理によって作製した PCM コンポジットは、プレス成型で作製したコン ポジットよりもさらに高い有効熱伝導率を示した. 炭素繊維シートで使用した高熱伝導性炭素繊維の 繊維長は3mmと、ホットプレス法で使用した炭素 繊維の20倍以上の長繊維であるため炭素繊維同士 の接触熱抵抗が低減したことや、繊維の繊維長方向 に炭素繊維が配向しやすくなったことが要因であ る.炭素繊維の体積割合ベースでは、最高24.4 W m⁻¹K⁻¹ (PCM 担体に対して33.4 倍)@14.4 vol%と なり、プレス成型して作製した PCM コンポジット よりもさらに 5~10 vol%少ないフィラー量での高 熱伝導化に成功した.この熱伝導率はステンレス鋼 などの合金やビスマス、チタンなど多くの純金属よ りも高い値である.

以上より、プレス成型法や炭素繊維シートへの含 浸法を用いたコンポジット化により、PCM の低熱 伝導性の課題はある程度解決可能であることが示 された.一方、フィラーの充填量と蓄熱量はトレー ドオフの関係にあるため、用途に応じた材料設計が 望まれる.また、PCM は固液相変化に伴い体積膨 張と収縮を繰り返すため、伝熱表面と PCM との良 好な接触の維持が,開発した PCM コンポジットの 特性を十分に発揮するための肝となる.これらの課 題の解決にはさらなる研究が必要である.

4. 直接接触熱交換における課題

直接接触型は伝熱壁を介さず PCM と熱媒体が直 接接触して熱交換する方式である. 直接接触型は間 接接触型と比較して以下の利点がある[9].1)熱媒 体が PCM 中を分散して熱交換するため、伝熱面積 が飛躍的に増大する.2) 熱媒体による溶融 PCM の 強制対流により、熱伝達特性の向上が期待できる. よって、使用する PCM の熱伝導率が低くても比較 的迅速な熱交換が期待できる.3)基本的には蓄熱 槽と出入口ノズルだけの単純構造なので,間接型と 比較して蓄熱槽内へ PCM を高密度充填可能である. よって蓄熱槽兼熱交換器を比較的軽量に設計でき るため、オフライン熱輸送用途への展開が可能であ る. 直接接触型において、PCM と熱媒体は化学的 に不混和であることが必須条件であるため,適用可 能な材料系は多くない. 適用範囲は比較的低温系に 絞られ、今までに、パラフィン/水系[10,11]、パラ フィン/空気系[12-14], 酢酸ナトリウム三水和物/油 系[15], 及びエリスリトール/油系[9, 16-20] 等が報 告されている.

故秋山友宏教授の研究グループでは,筆者が研究 チームに加わる以前からコンテナトラックによる オフライン潜熱蓄熱輸送システムの実現に向けて 直接接触熱交換を検討してきた. 直接接触型は, 先 述した伝熱,構造,軽量の観点から間接接触式に対 してアドバンテージがある一方, 伝熱壁を持たない ことに起因する熱媒体の偏流や熱媒体流路の閉塞 なども懸念されるため,安定操業の実現には蓄放熱 時の蓄熱槽内の現象の把握と解明が必須であった. Kaizawa らは、オフライン潜熱蓄熱輸送システムで 想定される円筒形積載重量 24t コンテナ (Φ1850×5655 mm) を軸方向に輪切りにした 1/2 ス ケールの二次元蓄熱コンテナ(Φ840×150 mm)を蓄 熱槽とした蓄放熱装置を開発し,前面部のガラス面 から内部の状況をオンタイムで観察することに成 功した[21]. 図5は円筒型潜熱蓄熱コンテナの概要 と二次元可視化実験装置の蓄熱槽部の外観を示す [22]. この実験では PCM としてエリスリトールを 充填し, 蓄熱槽下部に設置した熱媒体吐出ノズルか ら蓄熱槽底部に向けて熱媒油(エリスリトールより

比重が小さい)を流入させることで、PCM と熱媒 油を直接接触熱交換させている. 放熱過程では, PCM が無数のチャネル(熱媒油の流路)を形成し ながら凝固していくことが確認できた一方,熱媒体 吐出ノズルの管壁を通した凝固や、PCM が熱媒油 滴を内包する形で凝固し密度差から熱媒油相と PCM 相の境界に浮遊する現象などが観察された. また, 蓄熱過程では凝固時に形成された無数のチャ ネルを熱媒油が分散して通過することによる高速 の熱交換が確認された一方,熱媒油の偏流もまた観 察された. 直接接触型は間接接触型における PCM の低熱伝導性や接触熱抵抗に関する課題を解決で きる一方, 固液相変化現象に伴う熱媒体の偏流など 新たな課題を解決する必要がある.これらの課題を 操業の観点から克服することで直接接触熱交換を 利用したオフライン潜熱蓄熱輸送システムは我が 国において実用化されている[23]. また, PCM の融 解凝固メカニズムや安定操業に向けた熱交換器設 計に関しては、岡山大学の研究グループの成果があ る[24, 25].



図5 円筒型潜熱蓄熱コンテナの概要[22]

5. マイクロカプセル PCM の開発とその応用

固液相変化現象は, 蓄熱デバイスに潜熱による高 い蓄熱密度と一定温度での熱供給/制御機能をもた らす. 一方, この潜熱蓄熱においては熱伝導, 対流, 相変化を伴う伝熱あるいは物質伝達等が複合され て現れるため, そのハンドリングは比較的難しく, システムの実用化の技術的な障壁となってしまっ ている. また, 蓄熱へのニーズが顕在化している領 域は広く, 必要とされる温度領域も低温から高温ま で利用用途に応じて様々であるが, 潜熱蓄熱はその 原理上, 利用に適した(或いは利用可能な)温度領 域がそれぞれの物質によって異なるため, 用途に応 じて PCM を開発し, その PCM に適した蓄熱シス テムを設計する必要がある. さらに, PCM の物性・ 化学的特性はそれぞれ大きく異なるため, 特定の PCM を使った蓄熱システムの設計を,そのまま他のPCMの蓄熱システムの設計に転用することは難しい.産業で実装されている熱風炉やリジェネバーナー等の固体顕熱蓄熱材を利用した蓄熱機器に倣えば,大規模または広範な用途への展開にはできる限りシンプルで,ある程度フレキシブルにシステムを設計できる観点も重要な要素となるだろう.さらに,産業排熱利用分野では高エクセルギーである一方従来技術では冷却せざるを得ない「ダーティな高温熱源」からの効率的な熱回収方法も,今まで見逃されてきた重要な検討要素である.ここでも,固体顕熱蓄熱材のようにある程度「手荒に」ハンドリングできる頑健な特徴が必要となるだろう.

著者らの研究グループでは、合金マイクロ粒子を コア(=PCM)とし、セラミックスをシェルとする 合金系相変化マイクロカプセル (Micro-Encapsulated Phase Change Material: MEPCM)の開発 に、これらの課題に対する解決の糸口を見出した.



図 6 開発中のコア-シェル型 MEPCM の構造と特 徴[26, 27]

図 6[26, 27]は, MEPCM の構造と特徴を示す. MEPCM の最大の特徴は, セラミックスのマイクロ 粒子同様に使える点である.よって,バインダー材 料などと混合,成型し,焼成することで,粒子やハ ニカム,ペレット等,様々な形状の蓄熱体を作製で きる.また, PCM はシェルに覆われている点で間 接接触熱交換に位置づけられるが,MEPCM は十分 に小さいため,MEPCM 一粒あたりの温度分布は一 様であり,先述した間接熱交換における問題はほと んど無視することができる.つまり,潜熱蓄熱機能 を発揮する固体 (セラミックス)として扱うことが でき,伝熱に対する課題を単純化できる可能性があ る.



図7 MEPCM を原料として作製した蓄熱体の例





図7は、MEPCMを原料として作製した蓄熱体の 例を示す.ハニカム[28]、ペレット[29]、粒子等、基 本的には触媒担体や固体顕熱蓄熱材と同様に成型 することができる.図8はこれらの蓄熱体の熱交換 性能を調査するために制作した1L級充填層型プロ トタイプ蓄熱モジュールの概要を示す[29].このモ ジュールでの実験結果をもとにGWh級の大規模蓄 熱システムの性能を予測していく予定だが、1Lは 車載用などの実用スケールでもある.図9は MEPCMペレット(3Ф×3 mm)を約1000g充填し、 空気を熱媒体として熱交換試験を実施した際の a) 蓄熱、b)放熱モードにおける流入空気の Re 数と蓄 熱槽内容積基準の平均熱交換速度の関係を示す.





いずれも, Re 数に対して比例して平均熱交換速度 は増加した.この系における MEPCM ペレットを 完全に固体として Bi 数を推算したところ, Bi 数は 遷移流領域において十分小さく,空気⇔蓄熱体間の 境膜熱伝達が律速となることが予想された.本試行 の結果はそれを裏付けるものであり, MEPCM 化に より実際のハンドリングだけではなく伝熱も固体 顕熱蓄熱材同様に取り扱い可能であることが示唆 された.今回の検討は遷移域においても比較的低 Re 領域の試行であったが,今後より高い Re での試 行(例えば,工業用のリジェネバーナーでは乱流で 操業されている)を実施していく予定である.

MEPCM のシェルは化学的に極めて安定な Al₂O₃ であり、このシェルはコアである PCM および MEPCM と接しているもの(伝熱壁,熱媒体,発熱 源など)にとって物理/化学的なバリアー層として 機能する.この特徴を利用することで、発熱(例え ば吸着プロセス)と吸熱(例えば脱着プロセス)を 高速に繰り返すガス分離プロセスにおいて、ガス吸 着剤近傍に MEPCM を配置することで、反応熱を パッシブかつマイクロスケールで制御さらには循 環利用できる可能性がある.ガス分離プロセスの一 例として、酸素吸蔵材料を用いた圧力スウィング法 (Pressure Swing Adsorption: PSA)による酸素分離プ ロセスへ MEPCM の適用を検討した例を紹介する.

酸素分離のための PSA では、ペロブスカイトま たはペロブスカイト類似構造を持つ酸化物が酸素 吸蔵材 (Oxygen Storage Material: OSM) として使用 される.酸素吸蔵過程では、OSM 粒子充填層へ空 気を流入させ空気中の酸素を選択的に吸蔵し、脱蔵 過程では真空ポンプにて減圧することで高純度酸 素を取り出すことができる.図10 は酸素吸脱蔵反 応にヒステリシスのある OSM の平衡酸素圧と温度

の関係(Van't Hoff プロット)の概要を示す. OSM の酸素吸蔵は発熱反応(酸化)であるため、熱制御 機構がない場合, OSM および周囲の雰囲気の温度 が上昇し、平衡酸素圧が高圧側にシフトする. 空気 からの酸素分離を考えた場合,吸蔵時の酸素分圧は 0.21atm 一定(昇圧する場合もある)なので,平衡 酸素圧の高圧化により,酸素吸蔵反応の進行が妨げ られることになる.同様に,OSM の酸素脱蔵は吸 熱反応(還元)であるため,熱制御機構がない場合, OSM 自身の温度は低下し、平衡酸素圧が低圧側に シフトするため,酸素脱蔵反応の進行が妨げられて しまう(つまり,より高真空が必要となる).即ち, PSA による空気からの酸素製造プロセスでは、酸素 吸脱蔵時の反応熱を制御し,反応温度をできるだけ 等温に制御する熱制御機構の導入が有望だと理解 できる.



図 10 酸素吸脱蔵反応にヒステリシスのある OSM の平衡酸素圧と温度の関係の概要



 図 11 MEPCM による OSM の熱制御特性を検討 するための試験装置概略図

図 11 は MEPCM による OSM の熱制御特性を検 討するために作製した試験装置の概略図を示す. 熱 制御特性試験装置は,酸素ガス圧調整部,反応器, および管状電気炉から構成される.酸素ガス圧調整 部は真空ポンプ(ロータリポンプとターボ分子ポン プ), 圧力計,酸素バッファータンク,および電磁 弁で構成されており、それぞれが外径 1/4 インチま たは1/8インチのステンレス配管で接続されている. 反応セルは石英製で、セルの内部および外表面には K 熱電対が設置されている.まず,石英セル内に試 料 (OSM のみまたは OSM/MEPCM (重量比 OSM:MEPCM=2:1 の混合粉体)を投入し、セルを管 状炉内部に挿入した.次に、セル内を真空引きしな がら試料内部の温度を 575℃ に昇温後, 等温保持し た. 次に, セルと酸素ガス圧調整部をつなぐバルブ を閉め,酸素ガス圧調整部が任意の圧力となるよう 酸素ガスを注入した. その後, バルブを開放し, 酸 素ガス圧調整部に充填した酸素をセル内に注入し 試料と反応させた.この時,石英セル内の試料温度 およびシステム全体の酸素圧を測定することで, MEPCM の熱制御特性を調査した. MEPCM として は、Al-25Si 系 MEPCM(融点: 577°C)を使用し、 OSM としては MEPCM の融点近傍で作動可能かつ 最大 2.8wt% の O₂ を吸蔵可能な Ca_{1.2}Sr_{0.8}AlMnO_{5+δ}[30]を使用した.



図 12 酸素吸蔵時の充填層内の温度変化(=熱制 御特性)と MEPCM 周辺の O₂ と熱の流れのイメージ

図 12 は 0.4 MPa の酸素を注入した際の充填層内 の温度変化(=熱制御特性)と MEPCM 周辺の O_2 と熱の流れのイメージを示す. OSM 単体では,酸 素注入直後に酸素吸蔵反応により温度が急上昇 (575°C→約 605°C)した一方,OSM/MEPCM の充填 層は瞬時に MEPCM の融点一定温度に維持された. この際の酸素吸蔵量と使用した OSM の反応エンタ ルピーから逆算した結果,MEPCM の熱吸収速度は 約 22 kW L⁻¹ (MEPCM 体積基準)と,極めて高い値 であった.通常,粉体層の伝熱は粒子間の接触熱抵 抗が大きく,みかけの熱伝導率が極めて低いことが 課題となっており,その改善は反応工学・熱工学分 野における未解決テーマの一つである.一方, OSM/MEPCM 混合デバイスは,熱源とヒートシン ク間がマイクロスケール ($1\sim 2\mu m$ 以下) で近接す るため, Q=-k($\Delta T/\Delta x$)A における熱伝導距離: Δx は 極小,かつ伝熱面積:A は極めて大きい状態を獲得 できる.よって,OSM/MEPCM 混合デバイスでは 従来の粉体層伝熱における課題を飛び越えて,高速 熱制御が実現できる.この MEPCM を用いた高速 熱制御法は酸素分離だけではなく,触媒反応の熱制 御等様々なプロセスへ適用できる可能性がある.

6. おわりに

本稿では、固液相変化を伴う伝熱現象のテーマの もとに、潜熱蓄熱技術における伝熱工学的課題とそ の課題へのアプローチについて紹介した.固液相変 化は、潜熱による高い蓄熱密度や融点一定温度での 熱制御など様々な機能をもたらす.しかし、熱伝導、 対流、相変化を伴う伝熱あるいは物質伝達等が複合 されて発生することに伴う伝熱工学的な技術課題 や、難ハンドリング性など実用に向けては様々な課 題を解決する必要がある.他方、MEPCMのような サーマルエンジニアリングマテリアルの進展によ り、固液相変化のもたらす機能のみを抽出して利用 できる可能性もあり、次世代の熱利用技術の新たな 基盤となる可能性がある.

謝辞

本稿の内容の一部は「NEDO 先導研究プログラム /エネルギー・環境新技術先導研究プログラム/合金 系潜熱蓄熱マイクロカプセルを基盤とした高速か つ高密度な蓄熱技術の研究開発」の成果によるもの です.

参考文献

[1] T. Nomura, T. Akiyama, High - temperature latent heat storage technology to utilize exergy of solar heat and industrial exhaust heat, International Journal of Energy Research, 41(2) (2017) 240-251.

[2] D. Laing, C. Bahl, T. Bauer, D. Lehmann, W.-D. Steinmann, Thermal energy storage for direct steam generation, Solar Energy, 85(4) (2011) 627-633.

[3] 化学工学会, 蓄熱技術-理論とその応用蓄熱技術-理論とその応用, 2001.

[4] K. Dong, N. Sheng, D. Zou, C. Wang, K. Shimono, T.

Akiyama, T. Nomura, A high-thermal-conductivity, high-durability phase-change composite using a carbon fibre sheet as a supporting matrix, Applied Energy, 264 (2020) 114685.

[5] T. Nomura, K. Tabuchi, C. Zhu, N. Sheng, S. Wang,T. Akiyama, High thermal conductivity phase change composite with percolating carbon fiber network,Applied energy, 154 (2015) 678-685.

[6] T. Oya, T. Nomura, M. Tsubota, N. Okinaka, T. Akiyama, Thermal conductivity enhancement of erythritol as PCM by using graphite and nickel particles, Applied Thermal Engineering, 61(2) (2013) 825-828.

[7] T. Oya, T. Nomura, N. Okinaka, T. Akiyama, Phase change composite based on porous nickel and erythritol, Applied Thermal Engineering, 40 (2012) 373-377.

[8] X. Xiao, P. Zhang, M. Li, Effective thermal conductivity of open-cell metal foams impregnated with pure paraffin for latent heat storage, International Journal of Thermal Sciences, 81 (2014) 94-105.

[9] T. Nomura, M. Tsubota, T. Oya, N. Okinaka, T. Akiyama, Heat storage in Direct-contact heat exchanger with phase change material, Applied thermal engineering, (2012).

[10] A. Saito, Y. Utaka, K. Okuda, K. Katayama, Basic reserch on latent heat thermal energy storage by direct contact melting and solidification. 1. Visual experiments on direct contact solidification process in paraffin., Nippon Reito Kyokai Ronbunshu, 3(1) (1986) 43-50.

[11] A. Saito, Y. Utaka, K. Okuda, K. Katayama, Basic reserch on latent heat thermal energy storage by direct contact melting and solidification. 2. Heat transfer characteristics in direct contact solidification of n-eicosane as PCM., Nippon Reito Kyokai Ronbunshu, 3(1) (1986) 51-59.

[12] H. Inaba, K. Sato, Fundamental study on latent cold heat storage by means of oil droplets at low freezing point (2th Report, Nondimensional Analysis of Solidification and Heat Transfer Characteristics of Tetradecane Oil Droplets Ascending in Low -Temperature Water Solution), Nippon Kikai Gatsukai Ronbunshu (B), 62(593) (1996) 325-332.

[13] H. Inaba, K. Sato, Fundamental study on latent cold heat storage by means of oil droplets at low freezing point (3th Report, Cold Heat Energy Release Characteristics of Direct - Contact Heat exchange between Solidified Oil Droplets and Hot Air), Nippon Kikai Gatsukai Ronbunshu (B), 62(602) (1996) 172-179. [14] H. Inaba, K. Sato, Fundamental study on latent cold heat storage by means of oil droplets at low freezing point (4th Report, Numerical Calculation of Motion and Soldification Characteristics of Oil Droplet Ascending in a Cold Water Solution by Buoyancy), Nippon Kikai Gatsukai Ronbunshu (B), 63(607) (1997) 267-274.

[15] H. Nogami, K.I., K. Sato, Fundamental Flow Characteristics in a Small Columnar Latent Heat Storage Bath, ISIJ International, 50(9) (2010) 1270-1275.

[16] A. Kaizawa, H. Kamano, A. Kawai, T. Jozuka, T. Senda, N. Maruoka, T. Akiyama, Thermal and flow behaviors in heat transportation container using phase change material, Energy Conversion and Management, 49 (2008) 698-706.

[17] A. Kaizawa, H. Kamano, A. Kawai, T. Jozuka, T. Senda, N. Maruoka, N. Okinaka, T. Akiyama, Technical Feasibility Study of Waste Heat Transportation System Using Phase Change Material from Industry to City, ISIJ International, 48(4) (2008) 540-548.

[18] A. Kaizawa, N. Maruoka, A. Kawai, H. Kamano, T. Jozuka, T. Senda, T. Akiyama, Thermophysical and heat transfer properties of phase change material candidate for waste heat transportation system, Heat Mass Transfer, 44 (2008) 763-769.

[19] T. Nomura, M. Tsubota, A. Sagara, N. Okinaka, T. Akiyama, Performance Analysis of Heat Storage of Direct-Contact Heat Exchanger with Phase Change Material, Applied thermal engineering, (2013).

[20] S. TAGASHIRA, Y. ITO, Y. MURAKAMI, Y. HIGASHI, K. TAKAHASHI, Thermal Energy Transport System" ThermoWay", KOBELCO Eco-Solutions Engineering Report, 2(2) (2006) 36-41.

[21] A. Kaizawa, H. Kamano, A. Kawai, T. Jozuka, T. Senda, N. Maruoka, T. Akiyama, Thermal and flow behaviors in heat transportation container using phase change material, Energy Conversion and Management,

49(4) (2008) 698-706.

[22] 私信:開澤昭英氏.

[23] 三機工業株式会社 ホームページ https://www.sanki.co.jp/product/thc/.

[24] A. Horibe, H. Jang, N. Haruki, Y. Sano, H. Kanbara, K. Takahashi, Melting and solidification heat transfer characteristics of phase change material in a latent heat storage vessel: Effect of perforated partition plate, International journal of heat and mass transfer, 82 (2015) 259-266.

[25] T.T. NAING, A. HORIBE, N. HARUKI, Y. YAMADA, Reduction of the solidification height of phase-change material in direct-contact latent heat storage vessel, 日本伝熱学会論文集, 26(1) (2018) 19-27.

[26] T. Nomura, N. Sheng, C. Zhu, G. Saito, D. Hanzaki, T. Hiraki, T. Akiyama, Microencapsulated phase change materials with high heat capacity and high cyclic durability for high-temperature thermal energy storage and transportation, 188 (2017) 9-18.

[27] T. Nomura, C. Zhu, N. Sheng, G. Saito, T. Akiyama, Microencapsulation of Metal-based Phase Change Material for High-temperature Thermal Energy Storage, 5 (2015) 9117.

[28] (株)日本触媒, テクノアメニティレポート 2021

https://www.shokubai.co.jp/ja/sustainability/library/file/ technoamenity_report2021.pdf.

[29] H. Koide, A. Kurniawan, T. Takahashi, T. Kawaguchi, H. Sakai, Y. Sato, J.N. Chiu, T. Nomura, Performance analysis of packed bed latent heat storage system for high-temperature thermal energy storage using pellets composed of micro-encapsulated phase change material, Energy, (2021) 121746.

[30] K. Tanahashi, Y. Omura, H. Naya, K. Miyazaki, G. Saito, Y. Kunisada, N. Sakaguchi, T. Nomura, Sr-Doped Ca₂AlMnO_{5+ δ} for Energy-Saving Oxygen Separation Process, ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 9(28) (2021) 9317-9326.

アイススラリーの流動および伝熱特性 Flow and Heat Transfer Characteristics of Ice Slurry

1. はじめに

アイススラリーとは、図1に示すように、微細 な氷粒子と水または水溶液の混合物であり、図か らも分かるように高い流動性を持っている.また、 図2に示すようにアイススラリーは、微小な氷粒 子を含むことから、大きな蓄熱密度を持つととも に,熱交換器などで熱交換を行う際には、高い伝 熱性能を持っている. これらの特徴から, アイス スラリーは, 蓄熱材, 二次冷媒としての利用が期 待されている.特に、電力負荷の平準化を目的と した蓄熱システムにおいて,ダイナミック型に分 類されるシステムの蓄冷媒体として利用されてい る[1]. また,近年では,空調用途だけでなく,水 産物の冷蔵などにも用途が拡大している.図2か らも分かるとおり、非常に微細な氷粒子を含んで いることから,これまで,数 cm サイズの角氷が 用いられてきた水産物の冷却において、魚などの 表面を傷つけにくい特徴を持ち,海産物の付加価 値の向上に寄与している.また、ポンプでの搬送 が可能であることから、人の手間を大幅に削減で きるなどの利点がある.

以上のような特徴を持ったアイススラリーに関 して、その特性を把握することを目的として、多 くの研究がなされてきている.基礎的な検討を大 別すると、生成方法に関する検討[2-5]、貯蔵時の 特性変化に関する検討[6,7]、熱物性に関する検討 [8,9]など、様々な研究者により、実験的、解析的 に検討がなされてきた.特に、流動特性や熱伝達 特性に関しては、アイススラリーを使用した蓄熱 システムを設計するためには必要不可欠な知見で あり、多くの研究者らによって研究がなされてき た.特に、ヨーロッパの研究者を中心にアイスス ラリーに関する基礎的な研究がなされており、こ れらの成果について、いくつかのレビュー論文も 発表されている.アイススラリーの流動特性や熱 伝達特性について Ayel ら[10]が、アイススラリー 熊野 寬之(青山学院大学) Hiroyuki KUMANO (Aoyama Gakuin University) e-mail: kumano@me.aoyama.ac.jp



図1 アイススラリーの外観



図2 アイススラリーの顕微鏡写真

の基礎的な特性や関連する機器の特徴などに関し て Egolf ら[11]が, アイススラリーの流動特性に関 して Kitanovski ら[12]が報告している. 最近では, アイススラリーだけでなく,水和物スラリー [13-16]や相変化エマルション[17, 18]も含めた相 変化スラリーとして,その熱物性や流動特性,熱 伝達特性の把握など,広範囲な取り組みがなされ ている.しかしながら,依然として,アイススラ リーの流動および熱伝達特性に関して,統一的な 見解が示されているとは言えない.その一因とし て考えられることは,アイススラリーを生成する ための水溶液の溶質が,エタノール,エチレング リコール, NaCl など,研究者によって異なるとと もに,その濃度も各研究者で異なる点である. 本稿では,著者らのこれまでの研究を中心に, アイススラリーの流動および伝熱特性について報 告する.

2. アイススラリーの流動特性

2.1 流動様式

一般に、固液二相流の流動様式は固液の密度差 や固相の粒子径、固相率、流速などにより変化す る.流動様式の分類方法や呼び方は用途や研究者 によって様々であるが、例えば、均質浮遊流れ、 不均質浮遊流れ、摺動層を伴う流れ、堆積層を伴 う流れなどに分類される.アイススラリーの流動 様式も、一般的な固液二相流と傾向は同様である が、氷と水は密度差が小さいため堆積層・摺動層 が形成されにくく、氷粒子が互いに付着してクラ スターを形成することにより塊状流れ、柱状流れ を形成するなどの特徴がある.

アイススラリーの流動様式を決定するパラメー タには、氷充填率(Ice Packing Factor, IPF)、流速、 氷粒子のサイズ、氷粒子の形などが考えられ、現 状でも統一的な整理がなされていないのが現状で ある.その要因としては、アイススラリーの生成 方法や、アイススラリーを生成する水溶液の種類 など、研究者によって異なるためと考えられる. また、先にも述べたとおり、氷粒子が互いに付着 しやすい特性を有していることも、現象の理解を 難しくしている要因と考えられ、氷粒子同士の付 着力の定量的な評価などが、流動様式の統一的理 解には不可欠と考えられる.

2.2 円管内の流動特性

工業的には、多くの場合で比較的高い流速の条件でアイススラリーを流動させることが想定される.また、冷熱の搬送を考える場合、高 IPF での搬送が好ましい.これらのことから、多くの取り組みは、均質浮遊流れを対象としたものである. ここでは、均質浮遊流れを対象として、円管内を流動するアイススラリーの特性について紹介する.

図3に、著者らによって得られた、5wt%のエタ ノール水溶液から生成したアイススラリーを内径 が7.5mmの円管に流入させた場合のIPFと圧力損 失の関係を示す.図3(a)は低レイノルズ数条件、 図3(b)は高レイノルズ数条件における結果である. ここで、低レイノルズ数条件、高レイノルズ数条 件とは、単相流(IPF=0)の流れがそれぞれ層流、



乱流となる条件を表す. ここで定義されるレイノ ルズ数 Re は, アイススラリー中の液相の溶質濃 度, 温度におけるエタノール水溶液の動粘度を用 いて算出している.低レイノルズ数条件において, IPF の増加とともに圧力損失が増加していること がわかる.一方,高レイノルズ数条件においては, 低 IPF 領域では IPF によらず一定値を示しており, 高 IPF 領域では IPF の増加とともに圧力損失が増 加していることがわかる.

これらの特性をより明確にするために、単相流 の管摩擦係数と実験により得られた管摩擦係数の 比を図4に示す.単相流の管摩擦係数には、次の 式を用いている.

$$\mathcal{R}_{lam} = 64/Re \tag{1}$$

$$\lambda_{tur} = 0.3164 R e^{-1/4} \tag{2}$$

ここで、 λ_{lam} と λ_{tur} は、それぞれ層流および乱流の 管摩擦係数である.これより、低レイノルズ数条 件においては、IPFの増加と共に管摩擦係数が増



図4 管摩擦係数比と IPF の関係

加することが分かる.また、レイノルズ数が小さいほど、その傾向が顕著となる.一方、高レイノルズ数条件においては、管摩擦係数比がほぼ1であることから、単相の管摩擦係数と同程度であることが分かる.また、IPFが高くなると、低レイノルズ数条件と同様に、IPFの増加と共に管摩擦係数比が大きくなっている.これは、IPFの増加に伴い、見かけの粘度が増加し、再層流化が生じたためである.

2.3 レオロジー特性

乱流域におけるアイススラリーの流動特性については、概ね単相流と同様に扱えることが分かった.一方、層流域については、アイススラリー中に氷粒子が流動挙動に大きな影響を及ぼすことが分かった.固体粒子を液体中に分散させた懸濁液に対して、固体粒子の体積分率の関数として、相対粘度を算出する式が提案されおり、その一つにThomasの式[23]がある.

$$\mu = \mu_{liauid} (1 + 2.5\phi + 10.05\phi^2 + 0.00273e^{16.6\phi}) \quad (3)$$



図5 異なる配管における IPF とn', Kの関係

ここで、 ϕ は固体粒子の体積分率、 μ_{liquid} [Pa·s] は液相部の粘度である.この式では、固体粒子の 体積分率のみで見かけの粘度が決定されるのに対 し、アイススラリーの粘度は、単純に IPF のみか ら定まるわけではなく、流速に依存するため、非 ニュートン流体として扱う必要がある.ここでは、 べき乗則モデルを用いてアイススラリーの流動特 性について評価を行った.べき乗則モデルでは、 見かけのせん断速度と壁面のせん断応力 τ_R [Pa]の 関係を次式で表現する.

$$\tau_R = \frac{D\Delta p}{4l} = K' \left(\frac{8u_m}{D}\right)^{n'} \tag{4}$$

ここで、D[m]は配管直径、 $\Delta p/l[Pa/m]$ は配管単位 長さ当たりの圧力損失、 $u_m[m/s]$ は流体の平均流速 を表す.また、n'およびK'は、流体の特性によっ て決定される係数である.アイススラリーのn'、 K'と IPF の関係を図 5 に示す. IPF=0 においては、 n'が 1、すなわちニュートン流体であり、IPF の増 加とともにn'が低下し擬塑性流体としての挙動を



図6 乱流条件における管摩擦係数の予測

示すことがわかった.また,乱流域において,高 IPF 条件では,再層流化することを述べた.再層 流化した条件に対して,図5で示した n', K'を用 いて管摩擦係数を用いることで,乱流域の管摩擦 係数の予測を試みた.図6に,配管径10.2mm, レイノルズ数が4500の条件における管摩擦係数 の実測値を予測値を示す.低IPF条件では,単相 として管摩擦係数を予測し,高IPF条件では,単相 として管摩擦係数を予測し,高IPF条件では,べ き乗則を用いて予測を行った.概ね良い一致が見 られることから,アイススラリーは,層流域と乱 流域ではその特徴が大きく変化することが分かる.

3. イススラリーの伝熱特性 3.1 層流条件での融解熱伝達

アイススラリーは、微細な氷粒子を含んでいる ために固液界面の表面積が大きく、さらに固液の 界面は、常に固液の相平衡温度に保たれるため、 温度境界層が非常に薄くなることが予想され、高 い熱交換性能が期待できる.ここでは、円管内を 流動するアイススラリーの熱伝達特性に関して、 著者らの実験的検討の結果を紹介する.

図7に、5wt%のエタノール水溶液から生成した アイススラリーを、直径7.5mmの水平配管に流入 させ、熱流束5000W/m²で加熱した際の熱伝達係 数とIPFの関係を示す.レイノルズ数は、1000か ら2000の範囲で変化させている.この図より、IPF の増加とともに熱伝達係数が増加すること、レイ ノルズ数には大きく依存しないことがわかる.本 条件では、アイススラリーは均質浮遊流れであり、 配管断面での熱伝達係数の差異はほとんどなかっ た.また、図8には、直径7.5mmの配管にアイス スラリーを流入させた場合の、加熱開始位置から



の距離と熱伝達係数の関係を示す.レイノルズ数 は1000としている.これより,加熱開始位置から 0.1m以降は,ほとんど熱伝達係数に変化がないこ とがわかる.図中,実線で示しているのは,エタ ノール水溶液単相流における熱伝達係数の変化で ある.水溶液のみの場合には,加熱開始位置から の距離とともに熱伝達係数が減少していることか ら,アイススラリーの場合には,速やかに一定値 に到達することがわかる.これは,アイススラリ ーの場合には,温度境界層が速やかに発達するこ とを示しており,これもアイススラリーの大きな 特徴の一つと言える.

ここで、流動特性と同様、アイススラリーの熱 伝達特性を評価することを目的として、エタノー ル水溶液の単相流のヌセルト数とアイススラリー のヌセルト数の比をとることにより、実験結果の 評価を行った.図8で示したように、温度境界層 が十分に発達していると考えられることから、層 流条件には等熱流束条件下での発達した温度分布 におけるヌセルト数として式(5)を用いた.



図9 層流におけるヌセルト数比と IPF の関係

 $Nu_{lam} = 4.364$ (5)

図9にヌセルト数比とIPFの関係を示す.これ より,IPFの増加とともにヌセルト数比が増加し ていることがわかる.これは、単相流と比較して 熱伝達係数が増加する傾向があることを示してお り、IPFが15%程度の条件では、単相流の10倍程 度の熱伝達係数となることがわかる.これらの結 果を含めて、配管径、流速、IPFを変化させた広 範囲の実験から、層流域におけるアイススラリー の熱伝達係数の経験式として以下の式を提案した.

$$Nu = 50.1Re_{M}^{0.0741} \left(\frac{IPF}{100}\right)^{0.822} \left(\frac{D}{d_{p}}\right)^{0.292}$$
(6)

ここで、 Re_M は、図 5 で示した n'、K'を使用して 算出した見かけのレイノルズ数、D[m]は配管径、 $d_p[m]$ はアイススラリー中の氷粒子径である.

3.2 乱流条件での融解熱伝達

層流域での熱伝達係数の整理と同様に、単相流 の乱流域での熱伝達係数の経験式の一つである Colburn の式を用いて、評価を行った.

$$Nu_{tur} = 0.023 R e^{0.8} P r^{1/3}$$
⁽⁷⁾

図 10 に, 直径 7.5mm の水平配管にアイススラリ ーを流入させ, 熱流束 5000W/m² で加熱した際の ヌセルト数比と IPF の関係を示す. 乱流条件では, IPF の変化によらず, ヌセルト数比はおおむね 1 程度を示していることから, 乱流条件においては, アイススラリーの熱伝達係数は, 単相流の場合と 同じであり, 既存の経験式などを用いてアイスス ラリーの熱伝達係数の予測が可能であることがわ かる. また, 管摩擦係数と同様, 高 IPF 条件にお



図10 乱流におけるヌセルト数比と IPF の関係



図11 ヌセルト数比と管摩擦係数比の変化

いて、ヌセルト数が増加傾向にあることがわかる. この傾向を明確にするために、図11に、管直径を 7.5mm, Re を 4500 とした時の, ヌセルト数比と 管摩擦係数比を同時に示す、図より、管摩擦係数 とヌセルト数比は同様の傾向を示していることが 分かり、再層流化がヌセルト数の増加の要因にな っているものと考えられる.また,図6で示した ように、乱流条件において再層流化した際の管摩 擦係数が、層流における見かけの粘度を用いて予 測が可能であった. そこで, 再層流化が生じた際 の熱伝達係数を、層流における経験式を用いて予 測を行った.図 12 に,配管径が 10.2mm, Re が 4500 における熱伝達係数の実測値と予測値を示 す. ここでは,再層流化が生じていない低 IPF 条 件においては,単相の経験式を,再層流化が生じ た条件では、式(6)を用いて予測を行った.図より、 予測値は,実測値と概ね良好な一致を示しており, 乱流条件におけるアイススラリーの熱伝達係数の 予測が可能であることが分かった.



図 12 乱流条件におけるヌセルト数の予測

4. おわりに

本稿では、アイススラリーの流動特性と伝熱特 性について, 著者らの研究を中心に紹介させて頂 いた.これまで実施されてきた実験的な取り組み に加え、近年では、数値的な取り組みもなされて おり、さらに詳細な物理現象の把握に繋がる試み がなされている. また, これまでは空調用途を対 象とした取り組みがほとんどであったが、アイス スラリーの特性を活かした、より付加価値の高い ものを対象としての冷却媒体、加熱媒体としての 活用が期待されている. 医療分野では、冷却低体 温法における臓器の冷却に, 生理食塩水から生成 したアイススラリーを用いることで、迅速な冷却 や温度保持が可能になると言われている.また, 食品分野では,アイススラリーの低温保持性能, 高伝熱性能を利用して、冷凍水産物の解凍に用い る試みもなされている.これらの新しい用途での アイススラリー活用のためには、さらなるアイス スラリーの特性の把握が必要となるものと考えら れる.本会の会員の皆様にご指導を賜りながら, 引き続き研究を進めて参りたい.

参考文献

- [1] Saito, A., Int. J. Refrigeration, 25-2 (2002) 177.
- [2] Wijeysundera, N. E., Hawlader, M. N. A., Andy, C. W. B., and Hossain, M. K., Int. J. Refrigeration, 27-5 (2004) 511.
- [3] Hirata, T., Nagasaka, K. and Ishikawa, M., Int. J. Heat and Mass Transfer, 43-3 (2000) 333.
- [4] 麓耕二, 佐藤敏貴, 川南剛, 稲村隆夫, 城田農, 日本冷凍空調学会論文集, **30-3** (2013) 289.
- [5] Asaoka, T., Saito, A., Okawa, S., Kumano, H. and

Hozumi, T., Int. J. Refrigeration, 32-3 (2009) 394.

- [6] Pronk, P., Hansen, T. M., Infante Ferreira, C. A. and Witkamp, G. J., Int. J. Refrigeration, 28-1 (2005) 27.
- [7] Egolf, P. W., Kitanovski, A., Ata-Caesar, D., Vuarnoz, D. and Meili, F., Int. J. Energy Research, 32 (2008) 187.
- [8] Kumano, H., Asaoka, T., Saito, A. and Okawa, S., Int. J. Refrigeration, **30-2** (2007) 267.
- [9] Matsumoto, K. and Suzuki, T., Int. J. Refrigeration, **30-1** (2007) 187.
- [10] Ayel, V., Lottin, O. and Peerhossaini, H., Int. J. Refrigeration, 26-1 (2003) 95.
- [11]Egolf, P. W. and Kauffeld, M., Int. J. Refrigeration, 28-1 (2005) 4.
- [12]Kitanovski, A., Vuarnoz, D., Ata-Caesar, D., Egolf, P. W., Hansen, T. M. and Doetsch, C., Int. J. Refrigeration, 28-1 (2005) 37.
- [13]福嶋信一郎,高雄信吾,生越英雅,井田博之, 松本繁則,秋山俊一,大塚俊明,NKK技報,166 (1999) 65.
- [14] Ma, Z. W. and Zhang, P., Int. J. Refrigeration, 34-3 (2011) 796.
- [15] Suzuki, H., Int. J. Refrigeration, 36-6 (2013) 1790.
- [16]Kumano, H., Hirata, T. and Kudoh, T., Int. J. Refrigeration, 34-8 (2011) 1953.
- [17] Kawanami, T., Togashi, K., Fumoto, K., Hirano, S., Zhang, P., Shirai, K. and Hirasawa, S., Energy, 117-2 (2016) 562.
- [18] Morimoto, T., Togashi, K., Kumano, H. and Hong, H., Energy Conversion and Management, 122 (2016) 215.
- [19] Kumano, H., Hirata, T., Shirakawa, M., Shouji, R. and Hagiwara, Y., Int. J. Refrigeration, 33-8 (2010) 1513.
- [20] Kumano, H., Hirata, T., Shouji, R. and Shirakawa, M., Int. J. Refrigeration, 33-8 (2010) 1540.
- [21] Kumano, H., Hirata, T., Hagiwara, Y. and Tamura, F., Int. J. Refrigeration, 35-1 (2012) 122.
- [22]Kumano, H., Yamanada, Y., Makino, Y. and Asaoka, T., Int. J. Refrigeration, 68 (2016) 218.
 [23] Thomas, D. G., J. Colloid Science, 20-3 (1965) 267.

分散質の融解・凝固を伴う相変化エマルションの流動および伝熱特性

Flow and Heat Transfer Characteristics of Phase-change Emulsions with Melting and Solidification of Dispersoid

> 森本 崇志, 熊野 寛之(青山学院大学) Takashi MORIMOTO, Hiroyuki KUMANO (Aoyama Gakuin University) e-mail: morimoto@aoyama.ac.jp

1. はじめに

相変化物質を界面活性剤の作用によって液中に 微細な粒子状で分散させた懸濁液は、相変化エマ ルションと呼ばれ[1]、流動性を維持しながら相変 化物質の固液相変化に伴う潜熱を利用することが できる (図 1). エマルションは水中油滴型 (O/W エマルション)と油中水滴型(W/Oエマルション) に分類されるが,相変化エマルションは O/W エマ ルションに該当する.相変化物質を液中に分散さ せた懸濁液として, アイススラリーなども存在し ており[2],相変化エマルションも含めた総称とし て、これらは相変化スラリーと呼ばれる[3].相変 化エマルションは他の相変化スラリーと比較して, 分散質が微細であるため、管路閉塞を生じにくい こと、分散媒が相変化しない温度域において、分 散させる相変化物質の種類を変更可能であること が特徴として挙げられる[4]. このため、相変化エ マルションは流動性を有した蓄熱材としての利用 が期待され、その熱物性[5]、流動特性[6]、伝熱特 性[7-9]について検討がなされてきた.

これまで、相変化エマルションの伝熱特性につ いては、相変化物質の固液相変化に伴う潜熱の吸 放熱を利用した伝熱促進効果が注目されてきた. しかし、相変化物質が融解・凝固する時、潜熱の 吸放熱のみならず、相変化物質の密度変化も発生 する.相変化エマルション中に分散させる相変化 物質として用いられる, n-octadecane (融点: 28.2 °C)を例に挙げると、固相時の密度は 850 kg/m³,液相状態の密度は 780 kg/m³と,固相およ び液相状態の密度差が比較的大きい[10]. 相変化 エマルションの密度は、エマルションを構成する 物質の加成性によって求まることが知られている ため[5],相変化物質の密度変化に伴い,相変化エ マルションの密度も変化する.このため、相変化 物質の固液相変化に伴う密度変化が相変化エマル ションの流動、伝熱特性に影響を及ぼすことが考





図1 相変化エマルションの外観とその内部の模式図

えられるが、これまで、相変化に伴う密度変化の 影響については明らかにされていなかった.

本稿では、分散質である相変化物質の相変化に 伴う密度変化が、円管内および矩形容器内におけ る相変化エマルションの流動・熱伝達に及ぼす影 響について、著者らの研究グループの研究結果を 紹介する.

2. 相変化物質の融解が円管内における 流動・熱伝達に及ぼす影響

水平円管内を流動する流体を加熱した時,壁面 温度と流体の温度差が大きい場合など,自然対流 の駆動力が大きくなった場合,流れ方向に対して 垂直方向の二次対流が生じる.水平円管を流れる 相変化エマルションを加熱し,相変化物質の融解 を伴った場合には,相変化エマルションの密度変 化が比較的大きくなるため,二次対流を生じやす い状態となる.このため,相変化物質の融解に伴 う潜熱吸収効果のみならず、二次対流の発生によ る更なる伝熱促進効果が期待できる.ここでは、 相変化物質の融解が水平円管内を流動する相変化 エマルションの流動・熱伝達に及ぼす影響につい て検討した結果を紹介する.

図2は、内径7.5 mmの円管内を水平方向に流動する相変化エマルションを加熱した場合における、円管周方向各位置のヌセルト数と無次元距離の関係である。周方向の位置は、円管上部が 0° となっており、相変化エマルションとして、n-hexadecane(融点 18.2 °C)を10 wt%含有するエマルションを用いた。ヌセルト数と無次元距離の定義は以下に示す通りである。

$$Nu = \frac{hD}{k}$$
(1)
$$x^* = \frac{xk}{\rho c u_m D^2}$$
(2)

ここで, k(W/m/K), ρ(kg/m³) c(J/kg/K)はそれぞれ 相変化エマルションの熱伝導率,密度,比熱,D(m) は円管内径, h (W/m²/K)は熱伝達係数, um(m/s)は 平均流速である. 図中の実線は、円管内温度助走 区間における等熱流束条件での層流熱伝達の経験 式である[11]. 分散質が固相および液相の状態を 保ちながら流動する固相・液相条件において、相 変化エマルションのヌセルト数は単相流の経験式 の値と良好な一致を示すことがわかる[図 2(a)]. このため,分散質である相変化物質粒子の存在は, 相変化エマルションの熱伝達にほとんど影響を及 ぼしていないと考えられる.また、周方向におけ るヌセルト数の大きな違いを生じていないことか らも、融解を伴わない条件では、加熱による自然 対流が発生していないことが確認できる.一方, 相変化物質の融解を伴いながら流動する融解条件 においては、ヌセルト数の値が経験式の値よりも 有意に大きくなるとともに、周方向におけるヌセ ルト数の分布を生じていることがわかる[図 2(b)][12]. 周方向におけるヌセルト数の分布につ いて、より詳細に検討するため、円管周方向 30° 間隔でヌセルト数を計測した結果が図3である. ここで、液相条件の実験結果も示しているが、相 変化エマルション中の相変化物質は過冷却を伴う



(a) 液相, 固相条件



(b) 融解条件 図2 水平円管内における相変化エマルションの ヌセルト数と無次元距離の関係 (熱流束:2000 W/m²)



- 図3 加熱開始点から0.4,0.7mの位置における周 方向におけるヌセルト数の分布
- (入口温度:16.5 ℃, 熱流束:4000 W/m², 平均流 速:0.264 m/s)

ため[13], 過冷却を利用し, 流入温度(16.5 ℃) を相変化物質の融点(18.2 ℃)未満としながら, 液相条件の実験を実現している.液相条件では, 周方向におけるヌセルト数の分布は確認されない が、融解条件では、上部から下部にかけてヌセル ト数が上昇していることがわかる.液相条件では 加熱による二次対流が発生していないことから、 融解条件では、相変化物質の融解に伴う密度変化 によって二次対流が発生したものと考えられる.二 次対流の実験的な可視化は、比較的高濃度の相変化 エマルションが白濁していることから困難であっ たため、数値解析による流動場の可視化を行った.

数値解析において相変化エマルションをモデル 化するにあたり、相変化エマルションの分散媒と 分散質は別に取り扱わず、単相流体として取り扱 った.相変化エマルションを単相流体として取り 扱いつつも、相変化物質の融解に伴う潜熱の吸収 効果および密度変化を考慮するため、比熱および 密度を、温度の関数として取り扱った[14].そし て、相変化エマルションには、密度差に基づく浮 力が作用するものとした.

図4は実験および解析より得られた,相変化エ マルションのヌセルト数と無次元距離の関係であ る.管上部(0°)において,やや大きな差異が認 められるものの,解析結果(Num.)と実験結果 (Exp.)の定性的な傾向の一致,管中部(90°),下 部(180°)におけるヌセルト数の定量的な一致が 確認できることから,相変化エマルションを単相 流体とした簡易的なモデルで,相変化エマルショ ンの熱伝達を比較的良好に再現できたと思われる.

図5は相変化物質が液相を保ったまま流動する 場合と、相変化物質が融解しながら流動する場合 の、管断面における温度と速度分布の可視化結果 である.入口温度、壁面熱流束、流速条件は同じ であるにも関わらず、相変化物質の融解を伴った 場合のみ、管断面における顕著な対流の発生が確 認できる.これは、管壁付近の相変化エマルショ ン中の相変化物質の融解に伴い、相変化エマルショ ン中の相変化物質の融解に伴い、相変化エマルショ ン中の相変化物質の融解に伴い、相変化エマルショ ン中の相変化物質の融解に伴い、相変化エマルショ ンの密度が小さくなることで、管周方向に沿っ て上向きの流れを形成し、管上部に比較的高温の 相変化エマルション、管下部に比較的低温の相変 化エマルションが移動するためである.

図6は数値解析において,密度変化および比熱 変化を同時に考慮した場合に加えて,密度変化の み,または比熱変化のみを考慮した場合のヌセル ト数と無次元距離の関係を示している.図より, 密度変化のみを考慮した場合においても,二次対



図4 水平円管内における相変化エマルションの
 ヌセルト数と無次元距離の関係
 (熱流束:4000 W/m²)



(b) 融麻采件 図5 管断面における温度分布および速度分布 (熱流束:4000 W/m², 平均流速:0.264 m/s, 加 熱開始点からの距離:0.4 m)

流の発生による伝熱促進効果が得られており,相 変化物質の密度変化が相変化エマルションの熱伝 達に大きな影響を及ぼしていることがわかる.



図 6 数値解析より得られた水平円管内における 相変化エマルションのヌセルト数と無次元距離の 関係. Density: 密度変化のみを考慮, Specific heat: 比熱変化のみを考慮(熱流束: 4000 W/m²)

3. 相変化物質の融解・凝固が矩形容器内におけ る自然対流に及ぼす影響

液中に微細な粒子が分散した懸濁液の自然対流 は、分散質の浮上または沈降によって分散質が不 均質に分布し、この時形成された密度分布に応じ て、自然対流の挙動が変化することが知られてい る[15]. このため、相変化エマルションのように 相変化物質が均質に分散した状態にあっても、相 変化物質が固相または液相であるかで密度が異な るため、分散質の融解および凝固を伴いながら自 然対流する場合には、その自然対流挙動が異なる ことが予想される.ここでは、分散質の固液相変 化が、垂直加熱冷却を有する矩形容器内における 相変化エマルションの自然対流に及ぼす影響につ いて検討した結果を紹介する.

図7は、幅50mm、高さ200mm、奥行き50mm の垂直加熱・冷却壁を有する矩形容器内で、相変 化エマルションを自然対流させ、定常状態に達し た時点における相変化エマルションの温度分布を 示している.温度分布は矩形容器内に3列10行で 設置した30本の熱電対で計測した温度より生成 した.相変化エマルションとして、n-octadecane (融点28.2°C)を10wt%含有するエマルションを 用いた.図7には、分散質が固相の状態を保ちな がら自然対流する場合と、加熱壁面付近での融解、 冷却壁面付近での凝固を伴いながら自然対流する 場合の各条件での温度分布を示している.ここで、 相変化エマルション中の分散質の融解および凝固



図7 定常状態における相変化エマルションの 温度分布.図左が高温壁,図右が低温壁.(a)固相 条件,(b)相変化条件



図8 定常状態における相変化エマルションの温 度分布と凝固比率分布.(a),(b):相変化条件

を伴いながら自然対流させる場合,加熱壁面温度 は相変化物質の融点以上,冷却壁面温度は相変化 物質の過冷却を考慮した凝固開始温度未満に設定 している[13].分散質が固相の状態を保ちながら 自然対流する場合,相変化エマルション内に形成 される温度分布は,矩形容器下部から上部に向か って温度上昇しており,水などの単相流体を矩形 容器内で自然対流させた場合に形成される温度分 布と同様であることがわかる[図 7(a)].一方で, 分散質の融解および凝固を伴いながら自然対流す る場合には,二層の温度層が形成されていること がわかる[図 7(b)].垂直加熱冷却壁を有する矩形 容器内での自然対流では,密度の温度依存性によ って,下部に低温の流体,上部に高温の流体が移 動することで,図 7(a)のような温度分布を形成す る.しかし,相変化物質の融解・凝固を伴った条 件において,相変化工マルションの密度は,温度 のみならず分散質である相変化物質の固相・液相 割合にも依存する.このため,各温度層における 固相の相変化物質の割合を計測した結果が図8で ある.ここで,固相の相変化物質の割合を表す指 標となる凝固比率を,以下のように定義している.

$$\phi_{\rm fr} = \frac{\Delta h'}{\Delta h} \tag{3}$$

ここで, Δh' (J/kg)は相変化エマルションを加熱し た時の,相変化物質の融解に伴う比エンタルピー 変化である. また, Δh (J/kg)は相変化物質が全て 凝固している場合における,相変化物質の融解に 伴う比エンタルピー変化であり、相変化物質の融 解潜熱とエマルション中の相変化物質の含有率か ら算出できる.相変化物質が全て凝固している場 合には、 $\Delta h'$ が Δh の値と一致するため、凝固比率 が1となる.図8より、上部の温度層は低凝固比 率層,下部の温度層は高凝固比率層で形成されて いることがわかる.低凝固比率および高凝固比率 層が存在するのは、相変化物質の融点と凝固開始 温度が一致しておらず,融点と凝固開始温度の間 の温度では、融解および凝固が発生しないためで ある. 冷却壁温度は一定としたまま, 高温壁温度 を上昇させた場合には、液相状態の相変化物質粒 子が増加するため、低凝固比率層が拡大し、温度 層の形成位置が下部へ移動する[図 8(b)].

図9は相変化エマルションを自然対流させた時 の、ヌセルト数比とレイリー数の関係である.ヌ セルト数比は実験より得られたヌセルト数を、垂 直加熱冷却壁を有する矩形容器内における自然対 流の経験式[16]で除すことで算出している.分散 質が固相および液相状態を保つ場合には、ヌセル ト数が経験式の値と良好な一致を示すのに対し、 分散質の相変化を伴った場合には、ヌセルト数比 が1よりも有意に大きくなることがわかる.これ は、加熱壁面付近での相変化物質の融解、冷却壁



図 10 各冷却壁面温度に対するヌセルト数比と 相変化率

面付近での相変化物質の凝固によって熱伝達が促 進されたためである[8]. しかし、相変化条件にお いて、レイリー数が同じであるにも関わらず、ヌ セルト数比が異なる場合があることがわかる.相 変化条件における伝熱促進効果の違いを明らかに するため,相変化物質の融解,凝固量の指標とし て相変化率[17]を新たに定義し、実験結果を整理 した結果が図10である.ここで、相変化率は、加 熱壁面付近上部 (x=5 mm, y= 190 mm) での凝固比 率および冷却壁面付近下部 (x=45 mm, y= 10 mm) での凝固比率の差とした.実験は,壁間温度差は 22 °C で一定としたまま,壁面温度を変更して実 施した.図より、冷却壁面温度の変化と共に相変 化率が変化し、相変化率が大きな場合に、 ヌセル ト数比も大きくなっていることがわかる.このた め、垂直加熱冷却壁を有する矩形容器内における 相変化エマルションの熱伝達においては、相変化 物質の融解、凝固量が大きな影響を及ぼしている ことが示唆された.

4. おわりに

本報告では、相変化物質の固液相変化が相変化 エマルションの流動・熱伝達に及ぼす影響につい て、著者らの研究結果を紹介した.相変化エマル ションは、相変化物質の融解および凝固に伴う潜 熱の吸放熱のみならず、密度変化も利用すること で、更なる伝熱促進効果を得られることがわかっ た.近年、相変化スラリーが高い熱交換性能を有 していることから、相変化物質の潜熱を利用した 蓄熱のみならず、高機能な熱輸送媒体としての利 用が試みられている.特に、分散質が微細である 相変化エマルションはマイクロチャネルなどでの 熱輸送媒体としての応用が期待できる.本稿で紹 介した知見が、相変化エマルションのみならず、 相変化スラリーの応用分野の発展に貢献できれば 幸いである.

参考文献

- Ma, F. et al., Experimental study of the hydraulic and thermal performances of nano-sized phase change emulsion in horizontal mini-tubes, Energy, 149 (2018) 944.
- [2] Kauffeld, M. et al., Ice slurry applications, Int. J. Refrig., 33 (2010) 1491.
- [3] Inaba, H., New challenge in advanced thermal energy transportation using functionally thermal fluid, Int. J. Therm. Sci., 39 (2000) 991.
- [4] Chen, J. and Zhang, P., Preparation and characterization of nano-sized phase change emulsions as thermal energy storage and transport media, Energy, **190** (2017) 868.
- [5] 稲葉英男, 森田慎一, 野津滋, 低温潜熱物質 を分散体とした O/W 型エマルションを用いた 蓄冷システムに関する基礎研究(第1報, 熱物 性の評価)日本機械学会論文集 B 編, 565-59 (1993) 282.
- [6] Chen, B. et al., Experimental research on laminar flow performance of phase change emulsion, Appl.

Therm. Eng. 26 (2006) 1238.

- [7] Roy, S.K. and Avanic, B.L., Laminar forced convection heat transfer with phase change material emulsions, Int. Commun. Heat Mass Transf. 24 (1997) 653.
- [8] Inaba, H. et al., Natural convection heat transfer in enclosures with microemulsion phase change material slurry, Heat Mass Transf. 40 (2004) 179.
- [9] Vasile, V. et al., Experimental study of the heat transfer characteristics of a paraffin-in-water emulsion used as a secondary refrigerant, Int. J. Refrig. 88 (2018) 1.
- [10] 関信弘, 蓄熱工学1基礎編, 森北出版 (2006).
- [11]Shah, R.K. and London, A.L., Laminar Flow Forced Convection in Ducts, Academic Press, (1978).
- [12] Morimoto, T. et al., Experimental study of heat transfer characteristics of phase change material emulsions in a horizontal circular tube, Appl. Therm. Eng. 188 (2021) 116634.
- [13] Morimoto, T., Supercooling characteristics of phase change material particles within phase change emulsions, Int. J. Refrig., 99 (2019) 1.
- [14] Morimoto, T. and Kumano, H., Flow and heat transfer characteristics of phase change emulsions in a circular tube: Part 1. Laminar flow, Int. J. Heat Mass Transf. 117 (2018) 887.
- [15] Okada, M and Suzuki, T., Natural convection of water-fine particle suspension in a rectangular cell, Int. J. Heat Mass Transf. 13-40 (1997) 3201.
- [16] Sparrow, E.M. et al., Two-fluid and single-fluid natural convection heat transfer in an enclosure, J. Heat Transf., 4-108 (1986) 848.
- [17]森本崇志,近間壮大朗,熊野寛之,垂直加熱 冷却壁を有する矩形容器内における相変化エ マルションの自然対流熱伝達特性,第56回日 本伝熱シンポジウム,G313 (2019).

100[°]C以下の低温温熱輸送に適するエリスリトールスラリーの紹介 Erythritol Slurry as Candidate of Heat Transfer Medium for Low Grade Heat below 100 ℃

> 浅岡 龍徳, 阿部 駿佑(信州大学) Tatsunori ASAOKA, Shunsuke ABE (Shinshu University) e-mail: asaoka@shinshu-u.ac.jp

1. はじめに

化石燃料の枯渇や地球温暖化などの環境問題へ の取り組みがはじまって久しいが,近年急激にその 気運が高まっている.世界の国々が意欲的な数値目 標を示して,経済性よりも環境への配慮を優先する 政策を推し進めるようになったことで,有望であり ながらも既存の技術に経済性で対抗できずにいた 技術にも関心が集まるようになりつつある.このよ うな背景の中,熱需要の用途における一次エネルギ ー消費量の削減効果が高いコジェネレーションの 優位性がこれまで以上に注目されるようになりそ うである.

コジェネレーションにおける熱利用の際には,回 収した廃熱を,温度を下げることなくできるだけ高 温のまま,熱需要先に届けることが重要である.こ れは,温度が低いほど熱の利用用途が狭くなるため であり,エクセルギーが低下するためという言い方 もできる.著者らは,このような用途に適する熱輸 送媒体として,エリスリトールスラリーを提案し, 有効性を検討してきた.ここでは,その特徴につい て簡単に紹介させていただく.

2. 基本的な性質

エリスリトールは,融点 119℃,融解潜熱 340kJ/kg を有する糖アルコール系の潜熱蓄熱材である.水溶 液にすると凝固点降下により相変化温度が変化し, 濃度によって 60~100℃の温度域で蓄熱材として 使用することができる.この温度域は給湯や暖房用 に適するため,コジェネレーションの熱輸送媒体と して有望である.さらに,スラリー状にして利用す ることで,高い温度保持性を維持しつつ流動性を持 たせることができる点も熱輸送媒体として利点で ある.

エリスリトールの水に対する溶解度を図 1 に示 す.エリスリトールを水に完全に融解させた状態の 水溶液のエリスリトール濃度を初期濃度 x₀とする



図1 エリスリトールの水に対する溶解度



図2 スラリー中のエリスリトールの結晶[1]

と,スラリー状態における固相率 *P* は式(1)より算 出できる.

$$P = \frac{x_0 - x}{100 - x} \times 100 \tag{1}$$

ここで、Pはスラリー全体の質量に対する固体の質量を百分率で表したものと定義している.xはスラ リー中の液相(母液)のエリスリトール濃度であり、 スラリーの温度に対する溶解度に相当する.スラリ ー中では固液平衡(図1のTとxの関係)が保たれ るため、温度TによってxとPが同時に定まる. また、固相率は場合によって、体積分率[vol%]とし て表すこともあるので注意していただきたい. スラリー中の固体は図2のようなエリスリトー ルの結晶である.初期濃度,固相率,固体析出後の 水溶液濃度の関係から,固体は水を含まない(水和 物化,ガラス化していない)ことを確認している. 初期濃度や生成時の温度条件,スラリーの貯蔵条件 にもよるが,スラリー生成直後の結晶のサイズはお おむね1~2mm 程度であり,立方体である.

エリスリトールの固体の密度はおよそ1500kg/m³ であり,水溶液(1200kg/m³程度)よりも高いため, スラリーを撹拌せずにおくと,固体が下に沈殿する. しかし結晶同士が凝集する傾向は,水に比べれば弱 く,固相率が高くなりすぎない温度条件の下 200rpm 程度の撹拌速度で撹拌しておけば,結晶を 凝集させずに流動性を維持できる.

3. 見かけの比熱

エリスリトールスラリーは、潜熱蓄熱材であるエ リスリトールの固体が融解することで生じる潜熱 により、見かけの比熱が大きくなり、蓄熱密度が増 加することが利点である.

図 3 にエリスリトールスラリーの見かけの比熱 の理論値を示す.見かけの比熱は、スラリーの比熱 (固体と液体の比熱を固相率 Pで重みづけして加重 平均したもの)に、単位温度変化あたりに固体の融 解により生じる熱量(単位温度変化あたりの固相率 変化(dP/dT)に固体の融解潜熱を乗じたもの)を 加えたものである.ここで dP/dT は式(1)により得 られる.既報[2]において、この理論値が実験値によ く一致することを確認しているので参考にしてい ただきたい.理論の詳細についてもそちらを参照い ただきたい.

図3からわかるように,固液平衡温度(P=0における最低温度)において,dP/dTが最大となるため, スラリーの見かけの比熱が最大となる.固液平衡温度よりも高い温度では,P=0となり相変化が生じないため,見かけの比熱は液体の比熱と等しくなる.

また,初期濃度 x₀が高くなるほど見かけの比熱 が大きくなることがわかる.実用においては,使用 温度で最大の性能を発揮するように(使用温度と固 液平衡温度が一致するように)x₀を定めることにな るが,蓄熱密度の観点だけで言えば,できるだけ x₀ が大きい条件で用いることが望ましいといえる.

4. 流動様相

エリスリトールスラリーや氷スラリー, ハイドレ



図3 エリスリトールスラリーの見かけの比熱

ートスラリーなど、スラリー状にして用いる熱輸送 媒体はスラリー熱媒体とよばれる.スラリー熱媒体 は、輸送のために管内を流すと、固体粒子が沈殿も しくは浮遊して、分離した流れ(沈殿層/浮遊層を 伴う流れ)になることがある.特に、エリスリトー ルスラリーは、他のスラリー熱媒体よりも固液の密 度差が大きいため、沈殿層を伴う流れになりやすい という特徴がある.

図 4 にエリスリトールスラリーの流動様相を示 す.写真は鉛直方向が縦であり,重力は写真の上か ら下にはたらいている.反射光を撮影した写真であ るため,黒い部分は固相率が低い領域,白い部分は 固相率が高い領域を表している.

また,図5に流速と固相率による流動様相の変化 をまとめて示す.横軸は,スラリーと同じ流速でエ リスリトール水溶液(固相率0の単相流)を流した 時のレイノルズ数である.すなわち,レイノルズ数 の計算に水溶液の動粘度を用いている.スラリーの ような固液二相流の流れにおいては,レイノルズ数 を用いた流れの相似則が成り立たないため,本来は 評価指標にレイノルズ数を用いることは適切では ないが,ここでは流速の大きさを単相流と比較して わかりやすくするためにあえてレイノルズ数を用 いている.

図5より,流速が低く,固相率が高いほど沈殿層 を伴う流れになりやすいことがわかる.これは,流 速が低いほど流れによる撹拌効果が小さくなり,固 相率が高いほど見かけの粘度が高くなるためであ る.

後述するように,流動様相によって,固着特性, 流動特性,熱伝達特性が大きく変化するため,エリ



図4 エリスリトールスラリーの流動様相[3]





スリトールスラリーを使用する際には,使用条件に おける流動様相を把握することが重要である.

5. 固着特性

エリスリトールスラリーを温熱輸送に用いる場 合,需要先で熱を放出すると,スラリーは冷却され, 固相率が増加する(スラリー中の固体の量が増加す る). このとき適切な条件で熱交換が行われなけれ ば,発生した固体は壁面に付着し,流れることなく 壁面上に堆積する(固着する)こととなる. さらに その状態が続くと,固着した固体の量が増加して, 管の断面を塞ぎ,スラリーが流れなくなる,いわゆ る閉塞が生じる.ひとたび閉塞が生じると,再度ス ラリーを流すためには,融解させるか機械的に取り 除くかの,いずれかの方法により固着した固体を取 り去らなければならず,いずれの方法を用いても時 間的・エネルギー的に大きなロスが生じてしまう. したがって,スラリー熱媒体の安定的な利用のため には,閉塞を回避する技術が不可欠である.

図 6 にアクリル円管内を流れるエリスリトール スラリー中の固体が管壁に固着する様子を示す.い ずれも固相率は 8 vol%である.

実験では、アクリル管が周囲から冷却されており、 管内に埋め込まれた熱電対で測定した温度から冷 却量(熱流束)を算出できるようになっている.冷 却区間の長さに対して、流速が速いため、エリスリ トールスラリーの温度は一定であるとみなしてい る.固着の様子の写真では、カメラのシャッタース ピードが遅いため静止している固体だけが写って おり、スラリーの流れに乗って流れている固体はぼ けているか写っていない.左の写真は管を上から観 察したもので、右の写真は横から観察したものであ る.すなわち、右の写真の上から下に重力がはたら いている.



図6 エリスリトールスラリー中の固体が管壁(アクリル円管)に固着する様子(固相率8 vol%)[3]



図7 エリスリトールスラリーの固着挙動[3]



流速が小さいとき,流動様相は沈殿層を伴う流れ になるが,その条件では,管の上部と底部に固着が 生じる.特に,底部の沈殿層からは急速に固着が進 行するため,冷却量が小さくてもすぐに管閉塞につ ながるおそれがある.

不均一流れになる流速の条件では、管の上部に固 着が生じるが、側部・底部には生じない.これは、 管内を流れるスラリー内に固相率分布が生じてい ることが原因であると考えている.側部や底部の位 置では、スラリー中に多くの固体粒子が流れており、 それが衝突して壁面に固着した固体をはがす効果 があるのではないかと考察している.この考えによ れば、上部の位置では、スラリー中に固体粒子が少 ないためこの効果が弱く、固着が抑制されない.

流速が大きく、均一流れになる条件では、管の上 部・側部・底部によらず全体的に固着が生じる.し かし、その固着量は少なく、比較的大きい冷却量で 長時間流動を続けても管の閉塞に至ることはなか った.

これらの固着挙動の傾向を図7にまとめて示す. 3通りの固相率の条件で実験を行い検討したが,流 動様相と固着挙動にはおおむね同一の関係性が確 認された.

6. 流動特性

図8に,エリスリトールスラリーの流れにおける 管摩擦係数[4]を示す.実験により測定した圧力損 失から,水溶液の物性値を使って求めた管摩擦係数





(b) 記号の定義(断面方向)

図9 沈殿層を伴う流れのモデル[4]

を白抜き□で示している.実線はポアズイユ流の理 論式とブラジウスの経験式を示している.

層流域において管摩擦係数が高く算出されてお り,スラリーでは見かけの粘度が高くなることがわ かる.乱流域においては管摩擦係数の上昇は見られ ない.一般に,層流域のスラリー熱媒体の管摩擦係 数の推算には,擬塑性流体の流体モデルが適用され ることが多い[5]ため,著者らもエリスリトールス ラリーに対して擬塑性流体のモデルの適用を試み たがうまく圧力損失を近似することができず,適切 なモデル(擬塑性流体の式の係数)を導出すること ができなかった.これは,低流速域においてエリス リトールスラリーの流動様相が,沈殿層を伴う流れ になっていることによる.

そこで著者ら[4]は、図9に示すような沈殿層を 伴う流れに適合する独自のモデルを用いて、エリス リトールスラリーの管摩擦係数の推算方法を提案 した.図のように、底部からある高さまでの領域に 固体が充填されており、上部には液体しかないと考 える.底部の固体の流れは、上部の液体の流れに比 べて非常に遅いと考えて、上部の液体の体積流量が スラリーの体積流量 V と等しくなるように液体の 流速 u'を算出する.

$$u' = \frac{V}{S_{\rm sol}} \tag{2}$$

また, 固体に占められていない領域の濡れぶち長 さを代表長さ D' として, 式(4)により管摩擦係数 λ_{het} を算出する.

$$D' = 4 \frac{S_{\rm sol}}{a+b} \tag{3}$$

$$\lambda_{\rm het} = \frac{2D'}{\rho_{\rm sol}{u'}^2 l} \Delta P \tag{4}$$

簡単にいえば、固体の占めている部分を除いた断 面積に液体が全て流れると考えたときの、単相流 (ニュートン流体)の管摩擦係数を計算するという ことである.

図8には、*λ*_{het}を黒■で示している.ポアズイユ 流の理論式とよい一致を示しており、このようなモ デルを使うことで、エリスリトールスラリーの沈殿 層を伴う流れについても、圧力損失(管摩擦係数) をおおまかに推算できることを示した.

7. 熱伝達特性

図 10 にエリスリトールスラリーの流れにおける 熱伝達係数[6]を示す.実験では,外部からヒーター で加熱されたステンレス管内にエリスリトールス ラリーを流し,スラリーの温度,管壁の温度,ヒー ターの加熱量から熱伝達係数を求めた.加熱区間の 長さに対して,流速が速いため,エリスリトールス ラリーの温度はほぼ一定である.ステンレス管の上 部,側部,底部の3か所に熱電対が埋め込まれてお り,それぞれの位置で熱伝達係数が測定できるよう になっている.熱流束は位置によらず一定とみなし ている.また,実験方法として,固着を最小限にす るため,流速の高い条件から始めて,徐々に流速を 下げながら測定する方法を採用しているため,乱流 化するレイノルズ数が低めにあらわれている.

図で流速が高い(レイノルズ数が大きい)条件で データのばらつきが大きくなっているのは,管壁の 温度とスラリーの温度の差が小さくなり,熱伝達係 数の不確かさが大きくなる(計算の誤差が大きくな る)ためである.したがって,流速の高い条件にお ける値の信頼性は低いため,以下の議論ではレイノ ルズ数が 4000 以下のあたりまでについて述べてい ると思っていただきたい.

図 10(a)より,固相率が低い時,上部・側部・底部 で熱伝達係数の差がほとんどないことがわかる.こ れに対し,図 10(b)の固相率が高い条件では,上部 の熱伝達係数は同程度であるが,側部と底部の熱伝



図 10 エリスリトールスラリーの 流れにおける熱伝達係数[6]

達係数が高くなることがわかる.これは,固相率が 高くなることで流動様相が沈殿層を伴う流れとな り,側部と底部の壁面付近での固体の融解が促進さ れて,壁面付近のスラリーの温度が低下したことが 原因である.また,いずれの固相率でも,レイノル ズ数が高くなると流れが乱流化し,熱伝達係数が急 激に向上する傾向が見られた.乱流域においては, 流動様相が均一流れになっているため,上部・側部・ 底部の局所的な熱伝達係数の差はみられず,固相率 によらず熱伝達係数は同等の値となる.

また,固相率が高くなるほど,乱流化するレイノ ルズ数が高くなる傾向が確認できた.これは前述の 見かけの粘度の上昇によるものである.

8. おわりに

コジェネレーションや廃熱回収などの温熱輸送

の用途に適する熱輸送媒体として有望な,エリスリ トールスラリーの特徴について紹介させていただ いた.

ここでまとめたように、基本的な物性、流動様相 の傾向、固着特性、流動特性、熱伝達特性など、使 用上必要不可欠な情報はおおむね把握できたと考 えている.しかし解決すべき課題も多く残されてお り、残念ながら、すぐにこの物質を使った熱輸送シ ステムを実用化するというわけにいかないのが現 状である.

今後の検討課題として、固着による管閉塞を確実 に回避する制御技術を確立すること、固相率が高い 条件で使うと見かけの粘度が高くなるので搬送動 力を抑える方法を提案することなどが重要である と考えている.

参考文献

- [1] 阿部駿佑,浅岡龍徳,久保木健介,潜熱蓄熱材 エリスリトールの水溶液中での結晶成長,日本 冷凍空調学会論文集,35(3),141-149 (2018).
- [2] Abe, S., Morimoto, T., Asaoka, T., Kumano, H., Study on the apparent specific heat of sugar alcohol slurries, Journal of Energy Storage, 42 103026 (2021).
- [3] 水本裕士,阿部駿佑,浅岡龍徳,配管搬送を想定した中低温用熱媒体エリスリトールスラリーの流動特性-水平冷却管内壁面への結晶固着と剥離条件-,日本冷凍空調学会論文集, 36(1),7-18 (2018).
- [4] 稲津健太,阿部駿佑,浅岡龍徳,中低温用熱媒体エリスリトールスラリーの水平円管内における流動特性-流動様相と固相率が流動特性に及ぼす影響-,日本冷凍空調学会論文集, 36(4),339-348 (2019).
- [5] Kumano, H., Hirata, T., Shirakawa, M., Shouji, R., Hagiwara, Y., Flow characteristics of ice slurry in narrow tubes, Int. J. Refrigeration, 33, 1513–1522 (2010).
- [6] 水本裕士,阿部駿佑,稲垣裕之,浅岡龍徳,中 低温用熱媒体エリスリトールスラリーの水平 円管内における熱伝達特性-流動様相と固相 率が局所熱伝達係数に及ぼす影響-,日本冷凍 空調学会論文集,36(4),327-337 (2019).

第2回アジア熱科学会議:実行委員会報告 Report on the 2nd Asian Conference on Thermal Sciences from Executive Committee

1. はじめに

第2回アジア熱科学会議(以下,2nd ACTS)からおよそ2か月が経過し,会計を締める作業の中で会議の全貌が見えてきた.ACTSは第1回が2017年に韓国で開催され,参加者は700人を超えたことから[1],国際伝熱IHTC並みの規模を想定して,当時の実行委員のアドバイスも頂きながら日本学術会議へ共催申請した.経験が無いと慣れない申請書作成から面接対応まで獲得は難しいと実感した.他,内容も多岐にわたるため,IHTC-15(京都)の報告[2]を参考に会議報告とさせて頂きたい.

2. 実行委員会

2.1 位置づけ

実行委員会が正式に発足したのは 2017 年 10 月 で 2020 年 10 月に開催する会議を 3 年前から準備 した. 2017 年 11 月には日本学術会議への申請書 作成の痕跡が残っており, 2018年2月にはヒアリ ングの連絡を受けていることから、実行委員会立 ち上げもかなりギリギリのタイミングであった. 今後の参考にして頂きたい. さて, この 2nd ACTS はアジアの熱工学研究ネットワークの中心 Asina Union of Thermal Science and Engineering (AUTSE) がメインとする国際会議であり、2017年3月の AUTSE Executive Board Meeting (AUTSE EB meeting) で 2020 年の第 2 回の日本開催が正式決 定した.これは3月末に行われた1stACTS会期中 であった. ただし 1st ACTS で開催地の紹介をする から準備をしておくよう AUTSE から指示を受け た記憶があるので、その前の EB meeting で大枠は 決定していたように思う. 日本からの参加で年度 末は、卒業式やその他事務的にも無理がかかると いうことで、2nd ACTS は 11 月開催となった.こ の時点では、まさか3年後、コロナ禍で各国が国 境を封鎖するなど想像すらしていなかった.3年 宮崎 康次(九州工業大学) Koji MIYAZAKI (Kyushu Institute of Technology) e-mail: miyazaki.koji055@mail.kyutech.jp

に1回の開催で、とにかく研究ネットワークを構 築して、活発な交流を図ろうという開催趣旨であ る.日本では本学会が深く関わることから,IFHT の合流も意図された. 開催地については、AUTSE からの意見として、中国と韓国から地理的に近い 九州開催がベースとなり,700 名を超える参加者 (1st ACTS の参加者数)を収容できる施設として、 宮崎シーガイヤでの開催が計画された. 福岡はホ テル事情が厳しいこと,他県には大きな施設がな いことがあった.現在は長崎にも大型の会議場が 建設され,今後は長崎も候補に入ると考えられる. 論文については、2 重投稿となって最新研究成果 を発表できない状況では活発な交流を期待できな いため, A42ページのアブストラクトを集めるこ とで対応した. 韓国で開催された 1st ACTS は非常 に盛況で、会場、食事、宿泊施設といずれも準備 万端だった.中国も国際伝熱を始め、非常に盛大 に国際会議を開催しており,日本開催が見劣りす るわけにはいかず、日本学術会議、宮崎シーガイ ヤほか宮崎県の MICE 事業機関・業者と協力して 2nd ACTS を実現するのが実行委員会の役割とな った.

2.2 体制

2nd ACTS 実行委員長を花村克悟先生(東京工 大),副委員長を Yong Jin Kim 先生(KIMM), Bing-Yang Cao 先生(清華大学)として AUTSEの 中心メンバーで連携をとった.ACTSでは AUTSE 関連の授賞式も行うため,高田保之先生(九州大), 小原拓先生(東北大)とも連携して作業を進めた. 国内 34 名の先生方に ACTS 実行委員に就任して 頂き,2017年10月29日の第1回を皮切りに,お よそ半年に1回のペースで計4回オンサイトの実 行委員会を開催した.途中,会場(名古屋工大) を台風が直撃したため中止となった.委員会では オーガナイズドセッションや招待講演者について 議論し、実行委員にはそのままセッションオーガ ナイザーとして論文の取りまとめや査読の手配に ご協力頂いた. 2020 年 11 月開催が延期されて後 は、会議をオンラインとするか否かなど広く意見 を集めて議論した.オンサイトで国際会議が開催 されていれば、潤沢な経済支援の下、会議を開催 できたはずだっただけに残念でならない. 宮崎県 知事もご臨席の予定だった.ただし、オンライン にあっても日本学術会議会長の梶田隆章先生に開 会の挨拶を頂けたこと, 菅義偉内閣総理大臣から 祝辞を頂けたことは名誉なことであった. フライ ヤー作成や学会参加登録システムを含む Webpage の運営は小宮敦樹先生, 菊川豪太先生(東北大) が担当された.参加登録 Web システムによってレ ジストレーションと発表者の紐づけがなされる成 り行き上、作業が煩雑なプログラム編成までを東 北大学のグループが担当し大きな貢献があった. 現地における細かい運営については 14 名の現地 実行委員が担当した.河野正道先生(九州大)を 委員長とする現地実行委員がカンファレンスブッ クの作成,招待講演者への賞状と副賞の手配,当 日のオンライン会議の運営にあたった. 上記に加 え,招待講演者との細かい連絡,発表者への参加 証明書や発表証明書の発行,参加登録時のトラブ ル対応など細かいところまでを河野先生と小宮先 生が対応された.両先生と直接連絡をされた記憶 がある参加者も少なくないはずである.

3. 参加登録·受付関連

3.1 参加登録料

2nd ACTS の参加登録料(表1)設定は難しかっ た.運営側としては会議全体としての赤字は避け たい一方で参加者に対して参加登録料に見合うサ ービス提供が求められるため、むやみに登録料を 高くできないのが実情である.これらの具体的な 議論は、実行委員会だけでなく、AUTSE EB meeting でも重要な議題となった.予測をもとに設 定した金額であったが、なかなかタフな交渉だっ

表 1	2nd ACTS	参加登録料	(円)
- JA I		S ARDER WITT	

	On-site (延期前)	On-line (延期後)
一般	80,000	20,000
学生	40,000	10,000
同伴者	10,000	-

たことは記憶している.参加登録料を高くすると、 参加者数が減る観点からも適正な金額設定が必須 である. 前回 1st ACTS では 800 ドル, IHTC-16 (北 京) でも 800 ドルだったことから最終的に 80.000 円の設定となった.1\$=114円換算だと、実はほぼ 1 割安い 701 ドルと気が付いたのは会議後で、い ろいろと良い経験になった. 会場費がかさむ全オ ーラル発表にし、さらに4日分のランチをつけ、 空港と会場間でシャトルバスを走らせる案であっ たが、本当にオンサイトで実施した時に黒字で終 わったかどうかは謎である. 韓国済州島であった エクスカーション込みの設定はさすがに無理だっ たと思われる. オンライン開催が決定した後の参 加登録料は、もっと下げる私案を提示したが、オ ンラインになると参加者数が半減するという予測 があり、今回の金額となった。前回700名の参加 だったことを考えると、この読みが的中し、会議 開催において赤字にならず済んだ(当初の私案で は赤字決算). 改めて参加登録料設定の難しさを学 んだ会議だった.

3.2 発表と登録

採択された論文には1論文につき少なくとも1 件の登録を課すことを基本とした.会議によって は、学生発表でも1件の一般登録を課すこともあ るが、今回は論文投稿によって経費が上乗せされ るわけでもなく、オンラインのためオーラル件数 が増えても会場費がかさむわけではないと判断し た.国際交流に重きを置く、すなわちドタキャン を減らすことを主目的にしたこともある.今回、 時差の勘違いによる発表キャンセルが散見された ものの、明確な発表キャンセルは1件のみと効果 を発揮した.



	我 Z 多加亚纳数	
	事前	計
一般	190	260
学生	178	508

表2 参加登録数まとめ

上記チェックに対応したシステムを利用したた め、登録状況については、比較的容易に把握でき た.アブストラクト提出から原稿提出、参加者登 録数の時系列などの詳細なデーターも確認できて おり、運営で必要な時には声をかけて頂きたい. 査読からプログラム編成までシステムが対応して おり、マニュアルですべてを行う作業よりは負荷 は少なかったと思われるが、やはり会議開催にお いて一番手間のかかる作業だったと思われる.東 北大学のグループには本当に感謝している.

3.3 参加登録数

最終的な参加登録数を図1,表2にまとめる.11 ヶ国・地域から368名の登録があったが,主な参 加者は中国,韓国,日本である.これは前回1st ACTSの半分程度の参加であり予想通りだったが, オンライン開催が参加者数減に与えた影響は大き かった.次回,2024年上海の開催では,700名程 度まで回復することを期待したい.一般と学生の 登録がほぼ半々であり,この点は通常の会議に見 られる一般的な傾向だった.

地域分布をみると自然な流れであるものの,見 事に自国開催である日本からの参加者が多かった. 会員各位に記して感謝申し上げる.一方で海外か らは中国と韓国からの参加者がほとんどであった. アジアを冠する会議ではあるものの,欧米からの 参加も望むところであり,加えて,台湾,オース トラリア,シンガポール,マレーシア,ベトナム などのアジア各国をどう巻き込んでいくか課題が 浮き彫りになったようにも感じている.

3.4 参加者数

会議は最大 10 室のパラレルセッションで、プレ ナリー7 件、キーノート 23 件で進められた. 詳細 は 2nd ACTS Webpage に記録が残っている[3]. 各 講演室におけるおよその参加人数から、セッショ ン参加者数の推移をグラフ化したのが図 2 である. 一部、セッション移動した人数をダブルカウント してしまうため、参加登録数に対してオーバーエ スティメートしている統計ではあるが、それでも





抜山賞の授賞講演 (DAY4 AW) では 100 名強, 最 終日に至ってはキーノート (KN) /オーガナイズ ドセッション (OS) 以外が 100 名に達していない のは残念だった. さすがにオンラインかつ4 日間 の通しで会議に参加し続けるのは体力的につらい ことの裏返しだったのかもしれず, オンライン会 議の悪いところが露呈した. 一方でノーベル賞受 賞者の梶田先生が開会の言葉を述べられたことも あってか,開会式参加者 (DAY2 OP) は 300 名に 迫る数字だった. オンサイトで 300 名の参加者と なれば,立ち見が出るほどの混乱を引き起こした と思われる. 収容人数に余裕がある点ではオンラ インの良さも活きた会議だった.

4. イベント

本会議で企画された各種イベントを開催日順に 追って以下記載する.

4.1 市民講座

日本学術会議との共催となった本国際会議では、 市民講座の企画は必須で、当初は「日本のひなた」 を掲げる宮崎県、宮崎大学が推進している太陽電 池について、小中学生向けの体験型の講座を企画 していた.ところがコロナ禍となり本会議が翌年 10月に福岡開催となって延期、さらに結局オンラ イン開催となった本会議に対してどのような市民 講座とするかは悩ましい一面もあった.一方でこ の1年、授業がオンライン化される中、自分自身 がYouTuber の動画を授業の参考にしていたこと もあり、著名な教育系 YouTuber をお呼びしてはど うかと思い立った.ちょっとした人的ネットワー



図3 市民講座の様子(10月3日)

クを使ってご本人(ヨビノリたくみ氏)に打診し たところ,超多忙にも関わらず,大事な活動とし て快諾いただけたことは非常に幸運だった[4].当 日もかなり盛況で700人を超える申し込みがあっ たのと,講演中もリアルタイムにチャットで視聴 者とコミュニケーションをとるなど,観ていて私 自身非常に楽しめたし,多くのことを学ぶことが できた.講演後も多くの反響が寄せられ,熱工学 の面白さや大切さがたった700人の市民にでも伝 わったことに非常に感謝している.

4.2 開会式

宮崎シーガイヤでオンサイトであれば, 宮崎県 知事がご挨拶に来ることが決定していたが、残念 ながらオンライン開催となった.オンラインの場 合,開催地の代表にご挨拶頂ける貴重な機会を失 うことも意識することとなった.ただし、今回は 日本学術会議の共催だったことから、ノーベル賞 受賞者の梶田隆章日本学術会議会長のご挨拶を頂 けたことも幸運だった.本来はご皇族がご臨席さ れる会議でのみ会長挨拶との慣例があるとも伺っ ており、見えないところでの関係各位のご尽力に 感謝している.ご皇族にご臨席をお願いできるチ ャンスについては、移動距離が短く、経験豊かな スタッフが豊富な首都圏開催(東京開催)であれ ば選択肢に入るようにも感じた. 指摘されれば当 然だが、安全性確保のため、空港からホテル間の 送迎車のドライバーの身辺調査まで必要とされる. このような運営経験に加えて、警備費を自己負担 する条件をクリアーしなければならない. 開会式 では、菅義偉内閣総理大臣からの祝辞を披露する こともできた.10月4日の午後に新内閣発足だっ たので, 菅総理の最後の仕事が本会議への祝辞と なったかもしれない.



図4 開会式(梶田 隆章 学術会議会長)



図 5 AUTSE 授章式の様子

4.3 プレナリー講演

本会議への参加者数にも大きく影響を与えるプ レナリー講演者の選定については、AUTSEの EB meeting メンバーの力を大いにお借りした. 図らず もアジア圏での研究ネットワーク構築に重要な仕 事となった. 他国際会議との違いとしては、若め の先生を講演者とすることも念頭に入れさせて頂 いた. 自画自賛的だが、今回の ACTS ではアジア からだけでなく、欧州、米国からも大いに目玉と なる先生方をお呼びすることができたと感じてい る.

4.4 AUTSE 授章式

AUTSE では Outstanding Achievement Awardee (OAA) と Young Scientist Awardee (YSA) を設置 しており,詳細は AUTSE の Website に記載されて いる[5]. 今回の ACTS では 2020 年受賞者のイベ ントを実施した. OAA の受賞者岡崎健先生と Sang Yong Lee 先生の記念講演が行われ,お二人に共通 して,研究を心から楽しんでおられることを感じ ることができ,良い機会となった.記念講演の質 疑応答において,興味あるものを研究することが 大切であるといった趣旨のコメントが岡崎先生か らなされたことは改めて勉強になった.

4.5 ロビー

国際会議では、人と直接会うことで研究ネット ワークを構築できる魅力があることは言うまでも ない. 国外はもちろんのこと、国内含め接点がな い大先生に夕食に誘って頂ける数少ないチャンス である. 今回のオンライン会議にあたり, 少しで もそのような機会を設けたいと考え、直前に REMO の導入を決めた. ところが残念ながら 2021 年 10 月時点で中国から REMO へのアクセスがで きないことを会期中に中国からの参加者から教え て頂いた. 結果, REMO ロビーは閑散としていた. 私自身は数名の先生方とお話しする機会を持つこ とができたが,はるかに想定を下回る成果だった. 宣伝の仕方やイベントの工夫で何とかなると思わ れるので、今後の参考にして頂きたい. 少なくと も REMO を設定するだけでロビーの活性化を計 画するのは過大な期待だった.

4.6 抜山賞授賞式

本会が設置する国際賞であり、日本開催の ACTS における最重要イベントであった.オンサ イトであればバンケット直前に予定されるのは自 然な流れである.ところがオンラインになった影 響まで考慮することができず、スケジュールをそ のまま入れてしまったことに、やや後悔が残る. 後で思い直せばこの時間帯は参加者の夕食時とぶ つかる時間設定だった.それにも関わらず 100名 を超える参加者があったことは、多くの研究者が 注目している国際賞であることを再認識できた. 関係各位のご尽力により、抜山賞が日刊工業新聞 や日経産業新聞、河北新報など多くのメディアで 取り上げられた.受賞記念講演では、放射冷却技 術や Radi-Cool というスタートアップ企業から冷 感帽子などが実用化されていることが紹介された.



図6 抜山賞授賞式

4.7 閉会式

オンライン会議かつ,わざわざ部屋を入り直さ ないといけない手間があったにも関わらず100人 強の出席があった.参加者数や本会議の概略が花 村委員長から説明があった.閉会式前夜に真鍋淑 郎博士が気候変動でノーベル物理学賞を受賞され たことと関連して,熱科学がカーボンニュートラ ル社会に向けて益々重要になることが紹介され, 改めて熱科学の社会への寄与が重要であることを 再確認した.最後に第3回ACTSを2024年6月 23-27日に上海Fuyue Hotel(富悦大酒店)で開催 する計画が Chang-Ying Zhao先生(上海交通大) から紹介された.会場ホテルには,浦東空港から 地下鉄でアクセスできるので,是非,今から参加 を検討して研究を進めて頂くことを願いたい.

5. おわりに

オンサイトで会議が開催されていれば、ツアー などを通して,海外研究者に日本をもっと知って 頂く機会が持てたのにとやや残念な結果ではあっ た. 特に宮崎県で開催される熱関連の国際会議は これまでも少なかったのではないかと思われる. 海外の方にとっては 11 月でも暖かい気候と青い 海,青い空,国内の方にとっては,古事記,日本 書紀と言った日本神話の世界を感じる貴重な機会 だっただろうと思う.とにかくコロナ禍にあって, オンラインで重要な国際会議を終えることができ て安堵している.これ以上,再延期していれば AUTSE ボードメンバーの世代交代と重なってい るため、長年構築されてきた研究ネットワークが 消えかねなかったと感じた. プレナリー講演者を 始め,キーノート講演者,オーガナイズドセッシ ョン座長の選定などを通して、各研究分野の国際 ネットワークが維持されたものと期待したい.こ の機会で台湾やシンガポールも実質的に AUTSE に新たに加わったことは大きな進展だった.

参考文献

- [1] 高田保之, 伝熱, Vol.56, No.236, pp.51-53 (2017).
- [2] 岩井裕, 伝熱, Vol.53, No.225, pp.21-26 (2014).
- [3] 2nd ACTS Webpage, http://acts2020jp.org/
- [4] yobinori Webpage, https://yobinori.jp/
- [5] AUTSE Webpage, https://autse-asia.org/

日本伝熱学会主催 オンライン講習会 「計測技術 〜測定の基礎と設計応用〜」開催報告

Report on The Lecture "Measurement Technology, Foundation of measurement and Practical Design"

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

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

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.

今年度は昨年に引き続きオンライン講習会とし、「計測技術 ~測定の基礎と設計応用~」をテーマ に開催いたしました.11月26日に以下の題目で 開催し、27名にご参加頂き、盛況のうちに終える ことができました(図1).

-題目-

- 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(熱電回路の図式表現 と測定誤差要因)
- ④ 定常法による熱伝導率測定の原理と応用
- ⑤ 熱流センサによる電子部品の発熱量測定
- ⑥ 冷却用ファンの性能測定および評価手法
- ⑦ 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(図2).測定の際に 用いる窓材の透過率にもとづく選び方や画素数確 保の考え方など,実際の測定に役立つ考え方を分かりやすく具体的に紹介いただきました.

③の「熱電対の正しい使い方(熱電回路の図式 表現と測定誤差要因)」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(図3).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,固体表面温度測定の際の 誤差についても紹介いただきました.

④の「定常法による熱伝導率測定の原理と応用」 の講義では、梶田欣氏(名古屋市工業研究所)より、 実際の測定装置の構成をもとに測定原理を分かり やすく説明いただきました(図4).測定するとき の課題について、具体例を挙げた詳細な説明と数 値解析結果をもとに、誤差要因を分かりやすく説 明いただきました.



図1 オンライン講演の様子(事務局)



図2 放射温度計の正しい使い方,防衛大学校 中村先生

⑤の「熱流センサによる電子部品の発熱量測定」 の講義では、沼本竜彦氏(パナソニック)より、 熱流センサと温度センサによる部品の発熱量測定 原理を説明いただきました(図 5).対象部品に隣 接する発熱体の影響を回避する原理を詳細に説明 いただきました.また,熱流センサデバイスの特 徴と測定システムの説明,および実際の電子機器 内部のLSIやFETなどを対象とした具体的な測定 事例を紹介いただきました.

⑥の「冷却用ファンの性能測定および評価手法」 の講義では、福江高志講師(金沢工業大学)より、 強制空冷の性能を決める因子の説明から除熱量の 評価指標、ファン性能の定義までを分かりやすく 説明いただきました(図6).ファン性能を測るた めの測定装置の構成を示し、測り方と注意点を詳 細にご説明いただきました.

⑦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 Webex の Q&A フォームを活 用し,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 的な質問に加えて,研究開発現場の測定環境を想 定した質問も多数あり活発な討論が行われました.

3. 全体の印象, アンケート結果

参加者の内訳は、63%が企業の方、37%が大学 関係の方でした.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.オンラインでの開催となりましたが、幅広い 地域の方にご参加いただくことができました.

アンケート結果は多くが肯定的なご評価でした. 参加した受講者が本講習会を知ったきっかけが, 上司・教員・同僚の勧めであった割合が半数を超 えており,受講者の多くが来年も同様な講習会に は同僚や会社の方に勧めたいと回答頂きました.

今後の講習会の企画については,1DCAE や分析 技術,接合材料の計測技術など多岐にわたるご意 見があり,今後の参考にさせて頂きます.

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,また オンライン講習という状況下で,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.



図3 熱電対の正しい使い方(熱電回路の図式表現と測定誤差要因),名古屋工業大学田川先生



図4 定常法による熱伝導率測定の原理と応用, 名古屋市工業研究所 梶田氏



図 5 熱流センサによる電子部品の発熱量測定, パナソニック 沼本氏



図 6 冷却用ファンの性能測定および評価手法, 金沢工業大学 福江先生

行事カレンダー

本会主催行事

平云 工 匣 [「手					
開催	期催日 行事名 申込締切 原稿締切 問合先		問合先	掲載号		
2022 年						
5月	18(水) ~	第 59 回 日本伝熱シンポジウム	1月14日 (金)		実行委員会事務局 東海国立大学機構 岐阜大学/国立大学法人	
	20(金)				名古屋工業大学 内	
					Email : symp2022 (at) htsj-conf.org	

本会共催,協賛,後援行事

開催日行事名		行事名	申込締切	原稿締切	問合先	掲載号
2022 年					·	
1月	12(水) ~ 21(金)	流れの可視化講習会 2022			 一般社団法人 可視化情報学会 流れの可視化講習会 実行委員長 染矢 聡(s.someya@aist.go.jp) 	
	25(火)	21-5 ポリマーフロンティア 21			高分子学会 行事委員会 事務担当 株式会社AndTech FAX:044-455-5721 E-mail: spsj@andtech.co.jp	
	27(木) ~ 28(金)	第 50 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	
	28(金)	第3回燃焼工学講座			(一社) 日本燃焼学会 office@combustionsociety.jp	
3月	15(火) ~ 17(木)	The 7th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows (ICJWSF- 2022)			ICJWSF-2022 組織委員会 議長:木村元昭 日本大学理工学部機械工学科教授 電話:03-3259-0750/FAX:03-3293-8254 E-mail:kimura.motoaki@nihon-u.ac.jp	
	17(木)	第4回燃焼工学講座			(一社) 日本燃焼学会 office@combustionsociety.jp	
	19(土) ~ 21(月)	32st International Symposium on Transport Phenomena (ISTP32)			ISTP32 実行委員会委員長 宇高義郎 utaka@ynu.ac.jp	
8月	7(日) ~ 10(水)	The 13th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP13)			PSFVIP13 実行委員長 横野 泰之 TEL: 03-5841-0616 E-mail: yokono@mech.t.u-tokyo.ac.jp	

第 59 回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集

第59回日本伝熱シンポジウム実行委員会 委員長 板 谷 義 紀 幹 事 服 部 博 文

開催日: 令和4年5月18日(水)~5月20日(金)

会 場:長良川国際会議場(https://www.g-ncc.jp)

※状況によってはオンラインとのハイブリッド、もしくはオンラインのみの開催となる可能性があります.

所在地 〒502-0817 岐阜県岐阜市長良福光 2695-2 電話番号 058-296-1200

アクセス 自動車:名神高速岐阜羽島 IC から岐阜環状線経由で約40分

東海北陸自動車道岐阜各務原 IC から国道 21 号,岐阜市街経由で約 40 分 (駐車場は有料です)

- バス:岐阜駅バスターミナルより約20分+徒歩約2分
 - 岐阜バス「市内ループ線」で長良川国際会議場北口下車

「三田洞線 K50・K55」で長良川国際会議場前下車

飛行機:中部国際空港(セントレア)から名鉄岐阜駅(特急 66 分)+上記バスと徒歩で約 22 分

- 講演申込締切: 令和4年1月14日(金)
- 講演論文原稿提出締切: 令和4年3月4日(金)
- 早期参加申込締切: 令和4年4月1日(金)

ホームページ URL: https://htsj-conf.org/symp2022/

【シンポジウムの形式】

- 講演発表形式として
 - a) 通常の一般セッション(口頭発表)
 - b) オーガナイズドセッション(口頭発表)
 - c) 学生および若手研究者を対象とする優秀プレゼンテーション賞セッションを実施します.
- 1 講演あたりの割当時間は、一般セッションでは 15 分(発表 10 分、個別討論 5 分)で、各セッションの最後に総合討論の時間(5 分×セッション内の講演件数)を設ける予定です、オーガナイズドセッションについては、オーガナイザーの指示に従って下さい(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(第59回日本伝熱シンポジウム)について」をご参照下さい.

【参加費等】

- 参加申込の時期
 早期申込:4月1日(金)まで
 通常申込:4月2日(土)以降(5月初旬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 会員一般(事前申込:12,000円,当日申込:15,000円) 非会員一般(事前申込:15,000円,当日申込:18,000円) 会員学生(事前申込:6,000円,当日申込:7,000円) 非会員学生(事前申込:7,000円,当日申込:8,000円)
 ※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.
 ※会員とは、日本伝熱学会会員のほか、共催・協賛学協会の会員を含みます.

※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4年5月19日(木)
- 会場:都ホテル岐阜長良川(〒502-0817岐阜県岐阜市長良福光 2695-2)
- 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.
- 5月初旬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,領収書など)をお送りする予定です.
- オンサイト開催の場合には、シンポジウム当日も参加登録と参加費等の支払いができますが、オンライン開催となった場合には、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

【研究発表申込方法】

- 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(学生会員,賛助会員,特別賛助会員,推薦会員を含む)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59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。
- 講演アブストラクトは A4 サイズで1ページ,講演論文は A4 サイズで 2~6ページとします.
- 講演論文と講演アブストラクトは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。
- 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場合は、講演論文集に掲載されません、十分にご注意下 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.
 - 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)
 - ③ Full size manuscript
 - (4) Abstract manuscript
- 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、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.

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	っせ	•
われ	って	

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	6	せ

<>
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 characters are inserted as the indent.
(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 × 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.
- 発表用パーソナルコンピュータは各自でご用意ください.
- 参加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 59 回 日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局 東海国立大学機構 岐阜大学 工学部 機械工学科 内 E-mail:symp2022@htsj-conf.org, Fax: 058-293-2532 or 2491

優秀プレゼンテーション賞(第 59 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59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4年5月18日(水)シンポジウム第1日

ムのホームページに掲載いたします.

- 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をとる予定です.アピールスライドは電子媒体でシンポジウム参加 者に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、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 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
- 対 象:企業・大学・研究機関等の技術者・研究者で、令和4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 ョンで発表する方は,応募資格を必ず満たす必要があります.また,過去に本賞を受賞さ れた方は応募することはできません.
- 応募件数: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59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:稲田孝明(東京電機大学):t-inada@mail.dendai.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:一柳満久(上智大学):ichiyanagi@sophia.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



熱流束

マイクロセンサ

None of the second s

●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

サーモゲージ



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



「gSKIN®」熱流東センサーはセンサー自身の 表面を通過する熱流東を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。

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





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

284

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】 【温度範囲】 T型(銅/コンスタンタン) - 270℃〜+400℃ J型(鉄/コンスタンタン) - 210℃〜+1200℃ E型(クロメル/コンスタンタン) - 270℃〜+1000℃ K型(クロメル/アルメル) - 270℃〜+1372℃ S型(白金10%ロジウム/白金) +200℃〜+1700℃

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

当社取扱製品の適用分野

■温熱環境

■火災



■伝熱一般

■航空宇宙

■各種エンジン

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

■炉 ボイラー

■燃焼

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

コロナ禍の状況は、本ノートを執筆している 2021 年 12 月中旬時点において国内では沈静化された状況が 続いています. 徐々にですが、私や周囲の研究者にも、対面式の会合や出張が復活しつつあります. 一般社 会においてギリシャ文字がこれ程広く用いられるのは珍しいことと思いますが、オミクロン株やそれに続く 変異株が今後猛威を振るわないことを心底願っています.

さて、本号では「固液相変化を伴う伝熱現象」の特集を浅岡龍徳先生(信州大学)に組んでいただきました. 凝固核生成と結晶成長の基本的な解説に始まり、潜熱蓄熱やエネルギー有効利用技術に関わる幅広い内 容について、分野をリードする皆様から7件ものご寄稿をいただきました. ご多用中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.

「伝熱」 文字訂正のお知らせ

「伝熱」2021 年 10 月号(Vol.60, No.153)の7ページ目左欄上から7 行目: 「日野幹夫」と書かれていま すが,正しくは「日野幹雄」でした.ここにお詫び申し上げると共に,訂正をお願い致します.

> 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	高松 洋(九州大学)
編集出版部会長	永井 二郎 (福井大学)
委員	
(理事) 中原 真也(愛媛)	大学),丸山 直樹(三重大学),坂村 芳孝(富山県立大学)
(協議員) 浅岡 龍徳(信州ス	大学),小田 豊(関西大学),小針 達也(日立製作所),小宮 敦樹(東北大学)
武田 哲明(山梨)	大学),塚原 隆裕(東京理科大学),中川 慎二(富山県立大学)
矢吹 智英(九州)	工業大学)

TSE チーフエディター	鈴木 雄二(東京大学)
TSE 編集幹事	福島 直哉(東海大学)
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