



# Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692 Vol. 60, No. 252 2021. 7

**Thermal Science and Engineering** 

ISSN 0918-9963 Vol. 29, No. 3 2021. 7



◆特集:オープンソースソフトウェアを活用したCAE

https://www.htsj.or.jp/journals/2121.html



オープンソースソフトウェアである OpenFOAM (燃焼・流体解析) と Salome-Meca (固体熱伝導解析) を組み合わせ,燃焼と伝熱の連成解析を実施した.双方向の連成であり,非定常熱伝導解析を実施する 副室への入熱境界条件を,燃焼解析により一定間隔ごとに更新することで実現する.新たな構造を考案 し,点火プラグとプラグキャップの最高温度を目標値以下に抑えることができた.

(特集記事「OpenFOAM を用いた自動車用エンジンのシミュレーション技術の開発(保坂 知幸,光藤 健太,杉井 泰介,米谷 直樹)」より)





左:アルミニウム半連続鋳造時の温度分布

アルミニウムの半連続鋳造時の鋳造速度を変化させた場合の温度分布を示す. 図中で白線は液相線, 固相線温度を示す. 鋳造速度上昇に伴い溶融領域は深くなり, 固液共存領域も増加する. 超音波照射時 には音響流が発生し, 温度場振動が増大する. 音響流によって特に鋳造初期に溶融領域が深くなり, 底 部まで溶融金属が到達する. 音響流によって再溶解しており, 固液共存領域が大きく振動する.

(特集記事「アルミニウム生産プロセスにおける OpenFOAM の活用

(山本 卓也, コマロフ セルゲイ)」より)

右:アルミニウム超音波半連続鋳造時の温度分布

No. 252

2021

July

# 伝 熱

### 目 次

〈巻頭グラビア〉

保坂 知幸, 光藤 健太, 杉井 泰介, 米谷 直樹 (日立製作所)

山本 卓也, コマロフ セルゲイ (東北大学) ………表紙裏

### 〈新旧会長挨拶〉

### 〈第 33 回日本伝熱学会賞〉

第59期(令和2年度)表彰選考委員会からの報告

Farzam ZOUESHTIAGH (Univ. Lille),

Harunori N. YOSHIKAWA (Univ. Côte d'Azur),

Lizhong MU (Dalian Univ. Technology), Georg F. DIETZE (Univ. Paris-Saclay),

塚原 隆裕(東理大) ……… 6

日本伝熱学会技術賞を受賞して…………齋藤 祐士,川原 洋司,ファン・タンロン,

萩野 春俊, ブラッドリー・オー, 高宮 明弘, シン・ランディープ,

アハメド・モハマド・シャヘッド (㈱フジクラ) ……… 7

日本伝熱学会奨励賞を受賞して……………橋本 将明(名古屋大学) ……… 9

### 〈第 58 回日本伝熱シンポジウム〉

第58回日本伝熱シンポジウムの報告

······佐々木 直栄, 田中 三郎, 宮岡 大 (日本大学), 小宮 敦樹, 岡島 淳一郎, 庄司 衛太, 神田 雄貴 (東北大学), 岡部 孝裕 (弘前大学),

近藤 義広 (日立アカデミー), 巽 和也 (京都大学), 河村 洋 (公立諏訪東京理科大学),

星 朗 (東北学院大学), 平井 秀一郎 (東京工業大学) ……… 10 優秀プレゼンテーション賞 受賞者 - 第58回日本伝熱シンポジウム -

…………学生会委員会幹事 西山 貴史(福岡大学) ……… 21

# 〈特集:オープンソースソフトウェアを活用した CAE〉

# 〈書籍紹介〉

JSME SERIES IN THERMAL AND NUCLEAR POWER G	ENERATION」発刊のお知らせ	
木戸口	和浩(電力中央研究所) 5	9

〈行事カレンダー〉		61
-----------	--	----

# 〈お知らせ〉

公益社団法人日本伝熱学会第 59 期(2020 年度)総会議事録	62
2021 年度 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・貢献賞・奨励賞候補者推薦募集のお知らせ	64
・事務局からの連絡	65

# Vol.60, No.252, July 2021

# CONTENTS

# <Opening-page Gravure: heat-page>

Tomoyuki HOSAKA, Kenta MITSUFUJI, Taisuke SUGII, Naoki YONEYA (Hitach	ii, Ltd.)
Takuya YAMAMOTO, Sergey KOMAROV (Tohoku University)	Opening Page

# <New and Former Presidents' Addresses>

The 59th Term in Retrospect	
Katsunori HANAMURA (Tokyo Institute of Technology)	1
Inauguration Address as the 60th President	
Tetsuo MUNAKATA (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)	2

# <The 33rd Heat Transfer Society Awards>

Report from the Award Selection Committee of the Heat Transfer Society of Japan, 2020	
Takaharu TSURUTA (Kyushu Institute of Technology)	3
On Receiving Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan	
Qin-Yi LI, Koji TAKAHASHI (Kyushu University),	
Xing ZHANG (Tsinghua University)	5
On Receiving Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan	
Ichiro UENO (Tokyo Univ. Science), Hayate NAKAMURA (Tokyo Univ. Science),	
Farzam ZOUESHTIAGH (Univ. Lille), Harunori N. YOSHIKAWA (Univ. Côte d'Azur),	
Lizhong MU (Dalian Univ. Technology), Georg F. DIETZE (Univ. Paris-Saclay),	
Takahiro TSUKAHARA (Tokyo Univ. Science)	6
On Receiving Technical Achievement Award of the Heat Transfer Society of Japan	
Yuji SAITO, Yoji KAWAHARA, Phan THANG-LONG,	
Harutoshi HAGINO, Bradley ORR, Akihiro TAKAMIYA,	
Singh RANDEEP, Ahamed Mohammad SHAHED (Fujikura Ltd.)	7
On Receiving Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan	
Zhenying WANG (Kyushu University)	8
On Receiving Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan	
Masaaki HASHIMOTO (Nagoya University)	9

# < The 58th National Heat Transfer Symposium of Japan>

Report on the 58th National Heat Transfer Symposium of Japan

Naoe SASAKI, Saburo TANAKA, Futoshi MIYAOKA (Nihon University),	
Atsuki KOMIYA, Junichiro OKAJIMA, Eita SHOJI, Yuki KANDA (Tohoku University),	
Takahiro OKABE (Hirosaki University),	
Yoshihiro KONDO (Hitachi Academy Co., Ltd.),	
Kazuya TATSUMI (Kyoto University),	
Hiroshi KAWAMURA (Suwa University of Science),	
Akira HOSHI (Tohoku Gakuin University),	
Shuichiro HIRAI (Tokyo Institute of Technology) 10	0
Best Presentation Award - 58th National Heat Transfer Symposium of Japan -	
Takashi NISHIYAMA (Fukuoka University)    2	1

# <Special Issue: Open-Source Software and CAE>

Preface to the Special Issue on "Open-Source Software and CAE"	
Shinji NAKAGAWA (Toyama Prefectural University)	22
Current and Future of OpenFOAM $\sim$ The Community that Supports Development and Maintenance $\sim$	
Takashi MINABE (ESI Japan. Ltd.)	23
Numerical Simulation for Internal Combustion Engine Using OpenFOAM	
Tomoyuki HOSAKA, Kenta MITSUFUJI, Taisuke SUGII,	
Naoki YONEYA (Hitachi, Ltd.)	28
Utilization of OpenFOAM in an Aluminum Making Process	
Takuya YAMAMOTO, Sergey KOMAROV (Tohoku University)	34
OpenFOAM and Heat Transfer Problems	
Shinji NAKAGAWA (Toyama Prefectural University)	40
How to Use Elmer, an Open CAE Coupled Analysis Tool	
Ryoichi SHIBATA (National Institute of Technology, Gifu College)	46
Open Source Software "OpenModelica" and Application Examples to Education in University Class and Researcher	es
Koji NISHI (Ashikaga University)	52

# <Library>

Notice of publication of "JSME SERIES IN THERMAL AND NUCLEAR POWER GENERATION"	
Kazuhiro KIDOGUCHI (Central Research Institute of Electric Power Industry)	·· 59
<calendar></calendar>	·· 61
<announcements></announcements>	·· 62
<note board="" editorial="" from="" jhtsj="" the=""></note>	·· 69

第 59 期を振り返って The 59th Term in Retrospect



花村 克悟 (東京工業大学) Katsunori HANAMURA (Tokyo Institute of Technology)

5月26日の第59期総会をもって会長を退任い たしました.この会長職の1年間はコロナ禍にあ り(現在も厳しい状況が続いていますが),理事会 を含め全ての行事がリモート(Web)開催となり ました.このため会員の皆様と対面にてお話しす ることができず,さらに対外的にも会長の職責を 果たした実感がないことに少々虚しさを覚えてい ます.しかしながら,会員のご協力とご尽力によ り正式に契約したWebシステムを用いて多くの 行事を円滑に進めることができたように思います.

特に昨年中止となった伝熱シンポジウムを今年 はすべてリモート開催とし,対面ほどではないに しろ多くの発表および参加をいただきました.詳 細は別途実行委員長からの報告書を参考にいただ ければと思いますが,実行委員会のご尽力により 滞りなく行われたように思います. さらに総合討 論においても活発な議論ができていたように思い ます. 欲を申せば, 発言中はフル画面で発言者が 映し出されると臨場感が高まったかもしれません. 慣れてきたとは言え黒い画面相手の議論には違和 感を覚え、やはり表情を見ながらの議論が必要に 思います. 一方, チャットを使った質問は, 時間 が足りない場合や発言中に質問を送ることができ, 使い方次第では議論を深めることができると思い ます. 重複質問を避けるなどその交通整理をする 座長の腕の見せ所かもしれません.

今年は本会が創立(1961年)から60周年(還暦) を迎えたため、その記念講演会を本伝熱シンポジ ウムの注目行事として開催しました.詳細は別途 掲載される報告書を参照いただきますが、 YouTubeへの配信も含め350名以上の視聴者とな りました.ライブ開催とは一味違う情報発信とし て極めて効果的な手法ではないかと思います.ご 講演いただいた先生方ならびにご尽力いただいた 60周年特命理事をはじめ関係者の皆様には厚く 御礼申し上げたいと思います.

もう一つ、伝熱シンポジウムでの意見交換会も リモートにて行いましたが、参加者には事前に特 産品を送り、共通のものを手にしながら話ができ たことは大変良かったと思います.通常,各自で 持ち寄ることが多いのですが、満たされないもの を感じていました. 今回は、参加者が限られてお りさらに会話ができたのはごく少数の方に留まり ましたが,まさに,離れてはいるものの実体に近 いあるいは同じ環境を用意する Virtual Reality (仮 想現実と訳されますが、日本語の"仮想"といっ た意味ではなく実体と同じものとなることを意味 します)となったように思います. もうしばらく リモートのみの開催となりますが、こうした経験 を蓄積し、ポストコロナにおいても相応しい場合 にはリモートを使ってよいと思います. ただし, オンサイトとオンラインの組み合わせは最も難し いと思いますので、今後の会長の判断はますます 大事になると予想されます.

幸いにも本会の財政を含めた運営については公 益社団法人であるためのルールに辛うじて則して はいます.しかし、コロナの影響により理事会の 出張旅費を必要としなかったことや、特定費用準 備資金として割り当てる新規の国際シンポジウム の提案が乏しかったことなど、綱渡りの運営とな りました.他方、学会のホームページの更新を含 むインターネットに関わる予算をセキュリティも 考慮しつつ大きく計上する必要性を強く感じた期 でもありました.

学会活動を活発に進めるには、適切なところに 惜しみなく予算をつぎ込み学会のキャッシュフロ ーを大きくすることが必要であり、将来的には掌 に収まる画面にてオンサイトでもオンラインでも 議論が時と空間を選ぶことなく"楽しめる"学会 運営が来ることを願いつつ、本会のますますの発 展を期待して筆を置き(キーボードから手を離し) ます. 第60期会長就任にあたって Inauguration Address as the 60<sup>th</sup> President



宗像 鉄雄((国研)産業技術総合研究所) Tetsuo MUNAKATA (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

第58回日本伝熱シンポジウムの中日5月26日 に、オンラインで開催されました本学会の総会の半 ばの臨時理事会において第60期会長を拝命いたし ました.第58期と第59期において、総務担当副会 長として本会の運営に関わってまいりましたが、会 長ということで、大変名誉なことであると同時に責 任の重大さを感じております.

日本伝熱学会,前身の日本伝熱研究会から60年 を迎えました.私自身は1984年,修士2年の時に 入会し,京都での伝熱シンポジウムに参加したのが 最初で,翌年の伝熱シンポジウムで最初に発表しま したが,伝熱シンポジウムでは著名な先生が一番前 の席に座られ,ざっくばらんに容赦のない討論をさ れていたこと,また,懇親会や当時開催されていた 全国規模での伝熱セミナーで著名な先生方とお話 しできたこと等を思い出します.私自身,このよう な刺激を受け伝熱関係の研究を進めることができ ました.このように,これまでの学会の歴史の中で, 若手が対面で著名な先生方からの質疑に対応をす る,あるいは懇談し刺激を受けることは,学会の持 つ一つの特徴であり,今後の学会の発展のためにも 重要と思います.

一方,近年の台風や新型コロナウイルス(COVID-19)の影響で,伝熱の分野で重要な国内会議になっ ている伝熱シンポジウムと日本機械学会の熱工学 コンファレンスに関しては,2年前の熱工学コンフ ァレンス 2019(名古屋)および昨年の伝熱シンポジ ウム(金沢)は中止,昨年の熱工学コンファレンス 2020(札幌)および今年の伝熱シンポジウム(郡山) はオンラインでの開催となり,対面での交流の機会 がなくなっています.2月17日から始まったワク チン接種が国民全員に行き渡れば,通常の対面での 会議体および懇親の場が戻るものと期待していま すが,これまでの自然災害やパンデミックの危機を 踏まえ,前会長の花村先生を中心に進めてきたオン ラインでの会議にも新たなノウハウが蓄積されて きています.通常の会議体に戻っても、学会をより アクティブにするため、何らかの都合で出張が難し くなった方も容易に国内会議等に出席できるよう、 今後は会議体およびオンラインの2つの方法を併 用した開催も考える必要があるかもしれません.

現在,地球温暖化,少子高齢化,台風や新型コロ ナウイルスに代表される自然災害・パンデミック等, 様々な社会課題に直面しています.また,宇宙や深 海といった極限環境でのサイエンスも人間の活動 圏を広げる重要な課題です. 伝熱の研究分野は、学 会設立当時と比べると,空間および時間のスケール が大きく拡大してきており,今後も益々広がってい くことは容易に想像できます.上記に挙げた各種の 課題に関しても, 伝熱という単独の研究者集団ある いは日本という単独の国では対応が難しくても,他 分野の方や国際的な連携を進めることで社会課題 の解決に繋がることが期待できます.また、実際に 研究開発したものを社会実装するためには企業と の連携も欠かせません. そのため、学会の役割とし て, 異分野・国際・企業との連携を深めることが重 要と思っていますので,会員皆様のご協力をお願い いたします.

学会の運営に関しては,種々の講習会や委員会等 をオンラインで開催する,これまで押印での申請が 必要であったものをメール添付の PDF で対応する, 等の対応を進めていきますので,お気付きの点があ ればご連絡ください.

最後に、私自身、この3月に還暦を迎えました. その年に還暦の学会の会長を務め、更に、本来であ れば今年の伝熱シンポジウムの会場が福島県郡山 市という現在私が務めている産総研の福島再生可 能エネルギー研究所の所在地であることを踏まえ ると感慨深いものがあります.東北地区で仙台市以 外に会場設定されたのは初めてと思いますので、今 回の伝熱シンポジウムに参加できなかった方は、是 非、郡山の地にも足を延ばしてみてください. 第59期(令和2年度)表彰選考委員会からの報告

Report from the Award Selection Committee of the Heat Transfer Society of Japan, 2020

表彰選考委員会 委員長 鶴田 隆治(九州工業大学) Takaharu TSURUTA (Kyushu Institute of Technology) e-mail: tsuruta.takaharu393@mail.kyutech.jp

### 1. 日本伝熱学会賞

2020年度(令和2年度)日本伝熱学会賞 学術 賞,技術賞,奨励賞および貢献賞の選考結果につ いてご報告いたします.第59期では昨年の12月 14日に応募を締め切りまして,学術賞10件,技 術賞3件,奨励賞5件の推薦・自薦の応募があり ました.貢献賞の応募はありませんでした.締め 切り後に選考委員会におきまして厳正なる審査を 行い,最終的に学術賞2件,技術賞1件,奨励賞 2件を受賞候補者として4月の理事会に推薦いた しました.各賞の受賞者は以下のとおりでありま す.授賞対象者の所属は申請書・推薦書受領時の ものであり,順不同・敬称略で記載しています.

授賞式は、オンライン開催となりました日本伝 熱学会第 59 期総会の付帯行事として執り行いま した.

# 1.1 学術賞 (Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan)

- 1) 代表研究者:李 秦宜(九州大学) 共同研究者:高橋 厚史(九州大学) 張 興(清華大学)
   「非定常ラマン分光法によるマイクロ・ナノス ケール熱物性計測」
   第 55 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, F211, 2018
- 代表研究者:上野一郎(東京理科大学) 共同研究者:中村 颯(東京理科大学)
   Farzam ZOUESHTIAGH (Université Lille)
   Harunori N. YOSHIKAWA (Université Côte d'Azur)
   Lizhong MU(大連理工大学)

Georg F. DIETZE (Univeristy of Paris-Saclay) 塚原 隆裕(東京理科大学) 「動的濡れを駆使した自発的『メニスカス・ポ ンプ』機構の解明と最適化」 第 55 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, D232, 2018

# 1.2 技術賞 (Technical Achievement Award of the Heat Transfer Society of Japan)

 代表研究者:齋藤 祐士((株) フジクラ) 共同研究者:川原 洋司((株) フジクラ) Mohammad Shahed Ahamed ((株) フジクラ) Randeep Singh((株) フジクラ) Phan Thanh-Long ((株) フジクラ) 萩野 春俊((株) フジクラ) 「超薄型ヒートパイプ、ベーパチャンバの開発 とスマートホン冷却技術」

# 1.3 奨励賞 (Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan)

- 受賞者名:王 振英(九州大学)
   「Lubrication model for vapor absorption into hygroscopic liquid desiccant droplets (吸湿性液 滴への水蒸気吸収に対する潤滑モデル)」
   第 56 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, F124, 2019
- 2) 受賞者名:橋本 将明(慶應義塾大学)
   「光バイオプシーのためのミリ長ストローク切り紙型熱駆動 MEMS スキャナーの開発」
   第 57回日本伝熱シンポジウム講演論文集,

K1428, 2020

# 1.4 貢献賞 (Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan)

推薦・自薦の応募はありませんでした.

### 2. 名誉会員の顕彰

第59期での該当者はおられませんでした.

### 3. 文部科学大臣表彰の推薦

令和3年度科学技術分野の文部科学大臣表彰に ついて,2020年6月19日締め切りとしてメーリ ングリストにて候補者を自薦・他薦で募り,本会 からは科学技術賞1件,若手科学者賞1件を文部 科学省に推薦いたしました.

その結果,次のように受賞されました.

### 若手科学者賞

受賞者:志賀拓磨(東京大学)
 業績名:フォノン輸送スペクトル理論の構築と
 熱制御に関する研究

### 4. 若手会員への表彰制度について

日本伝熱学会賞 奨励賞の対象は、「原則として、 最近2回の日本伝熱シンポジウムにおいて優秀な 論文を発表した若手研究者で、発表時に大学院生、 またはこれに準じる者 (大学卒業後5年以内の 者)」となっています.大学院における研究を対象 とした制度ですので、この年数制限を越えた方に は AUTSE の YSA (Young Scientist Award) への応 募をお勧めします.隔年での募集で、来年がその 年にあたりますが、受賞時に35歳未満という条件 に加え、学位取得5年以内であることが必要です. 今回受賞のあった文部科学省の若手科学者賞は 40歳未満です.各年齢層に応じ、これらの表彰制 度への積極的応募を期待致します.

### 5. 謝辞

日本伝熱学会賞ならびに文部科学大臣表彰の選 考には、本会第59期表彰選考委員会委員の皆様の 多大な協力を頂戴しました.また、募集に対して 本会会員の多くの方々から推薦・応募をいただき ました.この場をお借りして、関係各位に深く御 礼申し上げます. 日本伝熱学会学術賞を受賞して On Receiving Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan



李 秦宜,高橋 厚史(九州大学),張 興(清華大学) Qin-Yi LI, Koji TAKAHASHI (Kyushu University), Xing ZHANG (Tsinghua University) e-mail: qinyi.li@aero.kyushu-u.ac.jp

このたび、「研究事態宣言」(出典:九州大学・ 高田保之先生)の中、オンラインで開催された日 本伝熱学会第59期総会において、2020年度日本 伝熱学会学術賞の栄誉をいただき、誠に光栄に存 じます.ご推薦いただきました先生方と選考にあ たられた先生方に心から感謝申し上げます.

受賞の対象となった研究課題は、「非定常ラマン 分光法によるマイクロ・ナノスケール熱物性計測」 です.近年、マイクロ・ナノ材料の研究は相変わら ず活発にされていて、熱制御及び熱電変換を含む多 くの応用が期待されています.しかし、その評価に 不可欠なマイクロ・ナノスケールでの熱物性の汎用 的で高精度な計測技術は未だ確立できていません. そのため、カーボンナノチューブやグラフェンを含 む多くのナノ材料及びそのアセンブリの熱伝導特 性はまだ完全には解明されていません.

2008 年に UC Riverside の Balandin ら[1]はグラ フェンのラマン分光の温度依存性を用いてグラフ ェンの熱伝導率を世界で初めて計測しました. 5300W/(m·K)という記録的に高い熱伝導率が報告 された Balandin らの論文[1]はこれまでにおよそ1 万3 千回引用され,多くの研究者が Balandin らの 「定常ラマン分光法」の手法に倣って次々と現れる 新しい低次元材料の熱伝導率計測を行っています. しかし,Balandin らの定常ラマン分光法では加熱 レーザーの吸収率が不明なために本質的に信頼性 が低いことが指摘されています.UT Austin の Li Shi グループ[2]は試料の光吸収率を測定しました が,誤差は 33%もありました.

この光吸収率の問題に対して、本研究課題では レーザーの吸収率が未知であっても熱物性値を正 確に得られる「非定常」ラマン分光法という新し い熱物性計測法が開発されました[3]-[6]. この手 法は、時間/空間分解能として 10ns/0.5 µ m を有し、 MEMS センサ等は不要で汎用性が高く、それまで のラマン分光に付きまとった信頼性の問題を大き く改善するものです.この計測手法は発展性に富 んでいるのも特徴で,時間領域と周波数領域の非 定常手法がそれぞれ開発され,試料とするナノ材 料をわざわざ懸架状態にする必要のない基板に接 した状態での「その場」計測や積層された二次元 材料の各層ごとの温度同定と界面熱抵抗の高精度 計測,さらにはマイクロ・ナノワイヤ単体同士の 界面熱抵抗を含む熱伝導特性の分布まで測れる手 法も開発されました.非定常ラマン分光法を応用 することで,グラフェンの熱拡散率を世界で初め て測定したり[3],カーボンファイバー単体同士の 接触熱抵抗の測定[6]にも成功しました.

末筆ではございますが、本研究に際しラマン分 光に基づく計測システムの構築に関して甚大なご 助力をいただきました九州大学の高田保之先生、 河野正道先生、生田竜也氏、福岡大学の西山貴史 先生、グラフェンの試料提供に関して多大なるご 協力をいただきました清華大学の Yingying ZHANG 先生と Kailun XIA 氏、Qunyang LI 先生と Ji ZHANG 氏、そして、ともにカーボンファイバ ーの計測を進めた研究室の卒業生である片上孔貴 氏に、この場を借りてお礼申し上げます.

### 参考文献

- Balandin, A. A., Ghosh, S., Bao, W., *et al.*, Nano Lett., 8 (2008), 902-907.
- [2] Cai, W., Moore, A. L., Zhu, Y., et al., Nano Lett., 10 (2010), 1645-1651.
- [3] Li, Q.-Y., Xia, K., Zhang, J., *et al.*, Nanoscale, 9 (2017), 10784–10793.
- [4] Li, Q.-Y., Zhang, X., Takahashi, K., Int. J. Heat Mass Transf., 125 (2018), 1230–1239.
- [5] Li, Q.-Y., Takahashi, K., Zhang, X., Int. J. Heat Mass Transf., 134 (2019), 539-546.
- [6] Li, Q.-Y., Katakami, K., Ikuta, T., *et al.*, Carbon, 141 (2019), 92–98.

日本伝熱学会学術賞を受賞して On Receiving Scientific Contribution Award of the Heat Transfer Society of Japan



上野 一郎 Ichiro UENO\* (東理大; Tokyo Univ. Science), 中村 颯 Hayate NAKAMURA (東理大院 (当時); Tokyo Univ. Science), Farzam ZOUESHTIAGH (Univ. Lille), Harunori N. YOSHIKAWA (Univ. Côte d'Azur), Lizhong MU (Dalian Univ. Technology), Georg F. DIETZE (Univ. Paris-Saclay), 塚原 隆裕 Takahiro TSUKAHARA (東理大; Tokyo Univ. Science) \*e-mail: ich@rs.tus.ac.jp

2020 年度日本伝熱学会学術賞受賞にあたり、お 礼を申し上げるとともに受賞内容をご紹介する機会を いただきました.ひょんなことから始まり継続してきた 共同研究がこのような栄誉ある賞に値するとご評価い ただいたことは、光栄であるとともに大変嬉しく存じま す.表彰選考委員会をはじめ関係者のみなさまに心 よりお礼申し上げます.

今回は、「動的濡れを駆使した自発的『メニスカス・ ポンプ』機構の解明と最適化」に関する一連の研究を ご評価いただきました. 2018 年に北海道で開催され た第55回日本伝熱シンポジウムでの口頭発表,およ び,その前後の一連の実験的・理論的・数値解析的 研究成果が該当します.

本研究は、2011年に福島淳平さん(東理大理工・ 機械 学部 4 年生(当時))が行った実験結果が端緒 となります.彼は平滑基板上を濡れ拡がる液体前縁 近傍と基板上に静置した微小粒子との相互作用の可 視化を通じて,微小粒子が液滴内部に引き込まれた り、その場に留まったりする条件が存在することを見 出しました.福島さんは同大大学院に進学後,本共 同研究フランス側代表者である Zoueshtiagh のもとに 短期留学し,メニスカス形成過程の可視化実験を行 いました. その結果, 代表寸法が数 µm から数百 µm の微小構造物との相互作用を経て液滴前縁部が局 所的な加速を実現することを明らかにしました. さらに 日比野哲也さん(同, 2012-2013 年), 姫野大幹さん (同, 2014-2015 年)がこつこつと実験を重ね, Tanner の法則にしたがう液滴の濡れ拡がりに対しメニスカス の形成が液膜前縁部の局所的加速を実現することを 示しました.

先行研究の調査によると、微小構造パターンを施 した基板上での濡れ拡がり過程や濡れ拡がり形状の 制御を実現する実験的研究が欧米を中心に行われ ており、微小構造による表面積の増大によって濡れ 拡がりの発達が実現するというエネルギー論的議論 が中心となっていました.そこで、力学的にこの現象 を捉えようという目標を掲げ、流体力学不安定性の理 論的研究を行っている Yoshikawa がチームに加わり ました.また, Mu を PD として東理大に迎え,近藤大 地さん(東理大→東理大院, 2015-2018 年),小川哲 也さん(同, 2016-2019 年)とともに実験を重ね, Reynolds 数および capillary 数がともに1より充分小さ い濡れ拡がり過程が,微小粒子との相互作用によっ て界面移動速度が局所的に約 10 倍もの増加を実現 すること(Mu et al., J. Fluid Mech. 830, 2017; Mu et al., Colloids Surf. A 555, 2018)や,連続配置した微小 構造物群との相互作用により界面移動速度が局所的 に 100 倍以上もの増加を実現することを示しました (Mu et al., Colloids Surf. A 555, 2018; Mu et al., Langmuir 35, 2019).

同時に,界面熱流体力学の数値解析を行っている Dietze および塚原がチームに加わり,井上幹允さん (同,2015-2018年)がDietzeのもとに短期留学して本 系の計算の基礎を構築しました.その後,中村が中 心となって,メニスカスが微小構造物の後方に液体を 供給するポンプ的な機構を有していること(Nakamura et al., J. Colloid & Interface Sci. 562,2020),複数の 微小構造物との相互作用の際に,上流側構造物周り のメニスカスが液体供給を促進すること(Nakamura et al., Langmuir 36,2020)などを明らかにしました.これ らの研究では,Zoueshtiagh の所属大学から Mr. Frédérick de Miollis(2016年), Mr. Victor Delafosse / Ms. Mélanie Hossein(2018年), Mr. Fabien Corretel / Ms. Chloe Petrykowski(2019年)を東理大に迎えて 行いました.

これらの研究を通じて、伝熱促進、特に伝熱面への効率的な液体供給への応用に留まらず、輸送・塗 布・反応・洗浄等の広範な産業的分野での応用を目 指して知見を蓄積していきたいと考えています.

本受賞にかかる国際共同研究は, JSPS-MAEDI (仏)二国間交流事業(2015-2016 年度),科研費基 盤研究(B)(19H02083, 2019-2022 年度),東京理科 大学国際共同研究支援費(2019-2020年度)による助 成を受けています.記して謝意を表します.

### 第33回日本伝熱学会賞

日本伝熱学会技術賞を受賞して On Receiving Technical Achievement Award of the Heat Transfer Society of Japan



齋藤 祐士,川原 洋司,ファン・タンロン,萩野 春俊,ブラッドリー・オー,
 高宮 明弘,シン・ランディープ,アハメド・モハマド・シャヘッド(㈱フジクラ)
 Yuji SAITO, Yoji KAWAHARA, Phan THANG-LONG, Harutoshi HAGINO, Bradley ORR,
 Akihiro TAKAMIYA, Singh RANDEEP, Ahamed Mohammad SHAHED (Fujikura Ltd.)
 e-mail: yuji.saito@jp.fujikura.com

このたび日本伝熱学会第 59 期技術賞という由緒 ある賞を受賞し、開発者一同、誠に名誉に感じてお ります.また、表彰選考委員会の先生方、技術賞に 推薦してくれた当社サーマルテック小川剛部長なら びに応募を勧めて頂いた高橋厚史先生、望月正孝様 に、この紙面をお借りして深く御礼申し上げます.

今回,受賞した技術である「超薄型ヒートパイ プ・ベーパーチャンバーの開発とスマートホン冷却 技術」の超薄型ヒートパイプとベーパーチャンバー の外観を図1に示します.以下,これらの製品の開 発内容について紹介します.



図1 超薄型ヒートパイプとベーパーチャンバーの外観

超薄型ヒートパイプは、2013年にスマートホンの 高性能化に伴い発熱量の増加した CPU とカメラ用 センサーの冷却に採用され、現在では、スマートホ ンの冷却手段の一つとなっています.図2は、ウィ ックを中央部に配置し、蒸気通路を両側に配置する 構造を示しており、この構造により、ヒートパイプ 内の作動流体の循環による圧力損失の低減を実現し ています.スマートホンの冷却装置は、図3に示す ように厚さ 0.3~0.5mm のヒートパイプを放熱板



図2 超薄型ヒートパイプの断面構造

に固定し CPU の熱を筐体に拡散することにより冷却しています.



図3 スマートホン冷却用放熱板

現在,スマートホンへの 5G 通信適用により,発 熱量が増加しており,超薄型ベーパーチャンバーの 採用が見込まれています.図4に超薄型ベーパーチ ャンバーの内部構造の概略を示します.蒸気通路と 液通路を分けることにより,作動流体の循環による 圧力損失を低減しています.



図4 超薄型ベーパーチャンバー

今回の授賞は、開発チームの更なるモチベーショ ン向上となりました.今後、内部構造ならびにウィ ック構造の技術開発を更に進め、よりコンパクトな 冷却装置の開発,製品化を行います.これらにより、 高速・大容量のデータを取り扱うモバイル製品の高 機能化ならびにデータセンターのサーバ、光モジュ ール製品の高性能化に貢献する所存です. 日本伝熱学会奨励賞を受賞して On Receiving Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan



王 振英(九州大学) Zhenying WANG (Kyushu University) e-mail: zhenying.wang@aero.kyushu-u.ac.jp

It's a great honor to receive the Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan. I'd like to share this honor with my collaborators and coauthors who have inspired me, encouraged me, and supported me in the awarded research. I'd also like to express my deep appreciation to my supervisor and mentor in Japan and UK, as well as to the committee members of HTSJ who have acknowledged the significance of the awarded research.

The awarded topic "Lubrication model for vapor absorption into hygroscopic liquid desiccant droplets (吸湿性液滴への水蒸気吸収に対する潤滑モデ  $\mathcal{H}$ ) " is part of my PhD project under the supervision of Prof. Yasuyuki Takata at Kyushu University. The idea originates from the practical demand of liquid-type absorption systems which has been my master's topic at Tsinghua University. A good understanding of the liquid behaviors is of great importance for the operation control of the system. At Kyushu University, I started to explore the fundamental kinetics and the heat and mass transfer of liquid desiccant droplets in response to different environmental conditions. We found that the hygroscopic liquid droplets indicate unexpected 'over-spreading' on hydrophilic substrates, which cannot be simply explained by the classical Young's equation and the Tanner's law. We reported this phenomenon in Physical Chemistry Chemical Physics with detailed theoretical analyses by the force balance at the contact line and with the precursor film theory, which was selected as the back cover of the issue.

At the same time, I started to seek for quantitative answers via accurate numerical simulation. Benefit from the international platform of I<sup>2</sup>CNER at Kyushu University, I got the opportunity to cooperate with Prof. Prashant Valluri at University of Edinburgh, who is an expert in direct numerical simulation of multiphase flow. We worked out a general schematic of the mathematical model during his one-month stay at Kyushu. I then visited Edinburgh for half a year and worked full time on the mathematical formulation and programming. We were rather pleased to get the initial results by the end of my visit, and I spent another one year on repetitive model optimization, case study and experimental verification. The work was finally published in *Journal of Fluid Mechanics* with high acknowledgement from peer reviewers.

The established model well explains the 'over-spreading' phenomena by the interplay of internal capillary flow, solutal Marangoni flow and thermal Marangoni flow within the droplet. These complex mechanisms have also been found to induce diverse dynamics of other binary mixture droplets as reported very recently by peer groups in the world. The colorful physics within a small droplet enriches our current knowledge of microfluid mechanics. The findings also indicate great potentials in the contactless control of liquid motion and on-chip chemical reaction for the applications of digital microfluidics, cell sorting, biomedical diagnosis, etc.

From this April, I started working as an assistant professor at aerospace propulsion laboratory of Kyushu University. This high honor from HTSJ is a great encouragement for me at the kicking-off stage of my career. I will continue to focus on cutting-edge research on multiphase thermofluids with the combination of high-standard experimental design and high-quality numerical modelling. I sincerely look forward to communications and collaborations with you in common-interest fields in the future. 日本伝熱学会奨励賞を受賞して On Receiving Young Researcher Award of the Heat Transfer Society of Japan



この度日本伝熱学会第 59 期総会におきまし て、大変名誉ある日本伝熱学会奨励賞を賜りまし たこと心より光栄に存じます.この場をお借りし て、ご指導頂いた先生方、御推挙、御選考下さい ました先生方ならびに日本伝熱シンポジウムにて 御助言頂いた皆様に深く御礼申し上げます.

受賞対象であります「光バイオプシーのための ミリ長ストローク切り紙型熱駆動 MEMS スキャ ナーの開発」は、私が慶應義塾大学博士課程在籍 時に田口良広教授のご指導のもと博士学位論文の コアとして取り組んだ研究であります. 光バイオ プシーと呼ばれる内視鏡下光学測定を応用先とし て,低消費電力でミリ長ストロークを達成する熱 駆動 MEMS スキャナーを独自に開発しました.こ こでいう熱駆動 MEMS スキャナーとは、熱膨張率 が異なる2層ナノ薄膜をジュール加熱した時に生 じる機械的な変形を利用し、レンズを駆動させる マイクロアクチュエーターのことです. デバイス サイズが小さいとその分得られる変位も小さくな るため、"マイクロ"アクチュエーターにとって "ミリ"長ストロークは未踏の領域でした.本研究 は伝熱工学に立脚して、ミリ長ストローク、しか もそれを低消費電力で達成する熱駆動マイクロア クチュエーターの開発に挑戦したものです.

開発にあたっては、試行錯誤しながら設計・作 製・評価と進めていきました.設計当初、MEMS サイズでミリ長ストローク・低電力駆動を満たす アクチュエート形態が中々思いつきませんでした. ある日、立体的に変形する切り紙アートを見かけ、 「この切り紙のように、ジュール加熱をトリガーと して熱膨張差によって自立ナノ薄膜がピラミッド 状に立体変形すれば、長ストロークを得ることが できそうだ.しかも切り紙自立ナノ薄膜は、熱容 量が小さくかつ熱抵抗値も高いため、低消費電力 で駆動できるのではないか.」と着想しました.そ 橋本 将明(名古屋大学) Masaaki HASHIMOTO (Nagoya University) e-mail: masaaki.hashimoto@mae.nagoya-u.ac.jp



図 1 切り紙型熱駆動 MEMS スキャナ

の後,薄膜の熱膨張率,熱伝導率に加え,ヤング 率、降伏応力といった熱的・機械的パラメータを 考慮して薄膜材料を探索し、電気-熱-機械連成 有限要素解析を用いてデバイスを設計しました. 意外にも,ナノ・マイクロスケール伝熱の観点か ら設計された熱駆動マイクロアクチュエーターは 少なく、まだまだ開拓の余地があると感じます. 設計もハードでしたが、最大の難関はデバイス作 製でした.可動領域が全て自立ナノ薄膜で構成さ れたアクチュエーターは珍しく, 微細加工的に多 少無理がある構造でした. 案の上, 膨大な条件だ しを要しましたが,最後には薄膜の残留応力を制 御することでデバイスを作製できました. そして 駆動評価を初めて行った夜、やっとの思いで作製 したアクチュエーターが動いてくれた瞬間は、博 士課程研究生活の一番のハイライトになりました. さらには、デバイスの集中定数モデルを構築し、 静的・動的応答を解析することで熱機械特性を明 らかにしました. これらの開発を通じ得られた知 見は、次なる熱駆動ナノ・マイクロマシンの開発 に繋がるものと信じております.

最後になりましたが、今年4月から日本学術振 興会特別研究員 PD として名古屋大学に所属し、 自身の研究の幅を広げるべく新たな研究領域に挑 戦しております.微力ながら今後とも伝熱工学の 発展に寄与できるよう精進して参りますので、ご 指導ご鞭撻のほど宜しくお願い申し上げます.

# 第 58 回日本伝熱シンポジウムの報告

Report on the 58th National Heat Transfer Symposium of Japan

佐々木 直栄,田中 三郎,宮岡 大(日本大学),小宮 敦樹,岡島 淳一郎,庄司 衛太,神田 雄貴(東北大学), 岡部 孝裕(弘前大学),近藤 義広(日立アカデミー),巽 和也(京都大学),

河村 洋(公立諏訪東京理科大学), 星 朗(東北学院大学), 平井 秀一郎(東京工業大学)

Naoe SASAKI, Saburo TANAKA, Futoshi MIYAOKA (Nihon University), Atsuki KOMIYA, Junichiro OKAJIMA, Eita SHOJI,

Yuki KANDA (Tohoku University), Takahiro OKABE (Hirosaki University),

Yoshihiro KONDO (Hitachi Academy Co., Ltd.), Kazuya TATSUMI (Kyoto University),

Hiroshi KAWAMURA (Suwa University of Science), Akira HOSHI (Tohoku Gakuin University),

### 1. シンポジウム概要

第58回日本伝熱シンポジウムは、日本伝熱学会 創立60周年記念事業の一環として、5月25日(火) から27日(木)に、意見交換会も含めて、従来の シンポジウムのコンテンツを完全に再現すること を目標に、オンライン開催されました.参加登録 者数は536名を、講演数は278件を数え、いずれ も前回通常開催された徳島市での第56回の場合 [参加登録者数:741名(招待者を除く),講演数: 370件]の70%を超える実績が得られました.

今回使用された WEB コミュニケーションツー ル一覧を表1に示します.プログラムの特徴に応 じて,合計4種類のツールが適宜使用されました. 実行委員会が運営したツールは Zoom ウェビナー と Remo でしたが,日頃から使い慣れているツー ル(例えば, Zoom ミーティング)と趣を異にす る点が多く,事前に試用を重ねてもなお,常に緊 張感を持って運用することになりました.

今回のオンライン開催運営方法として工夫した 点は,運営拠点を3拠点(東北大学,山形大学お よび日本大学)に分散したことです(表2).それ は,通常の通信トラブル発生時だけでなく,災害 により拠点自体が使用不可能になった場合でもバ ックアップできる体制を確保するためでした. 「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」の 余震が続く東北地区での対応策としては十分とは いえないかもしれませんが,この時点において可 能な究極の対策を取るために努力した結果でした.

最後に、今後の緊急事態時の対応に関する参考 資料として、開催方針決定の経緯とその間に発生 した出来事を簡単にまとめて表3に示します.東 北支部における開催候補地(福島県郡山市)決定 表1 WEB コミュニケーションツール一覧

ツール	使用プログラム
Zoom ウェビナー	<ul> <li>・オーガナイズドセッション</li> <li>・一般セッション</li> <li>・特定推進研究特別ワークショップ</li> </ul>
Remo	・優秀プレゼンテーション賞セッション ・意見交換会
Zoom ミーティング	・特別講演
Webex meetings	・産学合同交流会 ・総会

表2 オンライン開催運用拠点一覧

運用拠点	担当
東北大学 (宮城県仙台市)	・A 室, B 室, C 室, D 室, E 室
山形大学 (山形県米沢市)	・F 室, G 室, J 室
日本大学 (福島県郡山市)	・H 室, I 室 ・意見交換会

表3 本シンポジウム方針決定と出来事の経緯

年月	経緯
2018年10月	開催地(福島県郡山市)支部内定
2019年5月	第1案[福島県産業交流館(講演会)+ ホテルハマツ(意見交換会)]提案
2019年8月	第2案「ホテルハマツ(講演会+意見交 換会)」提案
2020年2月	WHO により COVID-19 命名
2020年4月	開催会場の COVID-19 対応状況報告
2020年5月	年内の本会行事のオンライン開催決定
2020年9月	シンポジウムオンライン開催予算案報告
2020年11月	従来+オンライン開催予算案並列報告 本シンポジウムのオンライン開催決定
2021年2月	2011 年東北地方太平洋沖地震の余震と 考えられる地震が福島県沖で発生(発生 日時:13日23時07分,マグニチュード: 7.3,深さ:55km,震度:6強)

は、 宮城県仙台市以外で初の開催という挑戦の始 まりでした. 中堅地方都市(郡山市)での開催を 検討する中で、大型展示場(福島県産業交流館) を会場候補の一つとして検討・提案した経験は, 不採用に終わったものの、持続可能なシンポジウ ム運営を考える絶好の機会になりました. ホテル ハマツを会場と定めて検討を開始して間もなく, COVID-19 と名付けられた新型コロナウイルスの 感染拡大が顕著になりました.これに伴って、開 催会場であるホテル側の COVID-19 対応状況も逐 次確認する必要に迫られましたが、2020年5月の 段階でオンライン開催の可能性が高いことが議論 され、11月の時点でオンライン開催を正式決定し ていただけたことは、本シンポジウムのオンライ ン開催を成功に導いた最も大きな要因であったと 感じています. 花村会長をはじめとする理事会ご 関係の皆様のご英断に感謝申し上げます.

本シンポジウムの企画立案から準備段階におい ては、以上のような紆余曲折がありましたが、オ ンライン開催に的を絞って準備が順調に進む中,2 月13日に福島県沖で震度6強の地震が起きました. 2011 年東北地方太平洋沖地震の余震と報道され、 規模は小さかったものの、10年前の大震災を思い 起こした人が少なくなかったはずです. 福島県内 では場所によって被害状況が異なるという特徴が うかがえましたが、当初案で会場候補となってい た福島県産業交流館やホテルハマツの被害状況は 予想以上に甚大で、この報告記を執筆している現 在でも、営業停止状態が続いています. コロナ禍 は人間の努力やワクチンの開発で乗り越える可能 性があるかもしれませんが、自然災害は突然やっ てきて甚大な影響を与えていくことを改めて思い 知らされました.「もし,コロナ禍に襲われなかっ たら・・・」と考えることもありましたが、「・・・ それでもオンライン開催が必要だった」という結 論が得られることを学んだシンポジウムだったと も言えます.

以上,第58回日本伝熱シンポジウムの概要を, オンライン開催に至る経緯を含めて,まとめさせ ていただきました.以降,各担当者による報告が 示されますので,ご覧いただければ幸いです.

様々な不安を抱えながらの準備・運営となりま したが、参加された全ての皆様のご理解、ご協力 によりまして、大過なく所期の目標を達成するこ とが出来ました.ここに,改めて感謝の意を表し たいと考えます.

(佐々木 直栄)

### 2. ホームページ・参加登録

本シンポジウムに関する情報は、ホームページ (http://htsj-conf.org/symp2021/index.html) 上と学会 誌の会告で公開しました. オンライン開催に伴う 主な変更点として、オンライン参加方法やオンラ イン参加用タイムテーブルの作成を行いました. オンライン参加方法では、オンライン講演会入室 方法をはじめ, 講演会参加マニュアル (聴講者, 講演者,座長),優秀プレゼンテーション賞セッシ ョン参加マニュアル, Zoom アプリインストール マニュアル,産学合同交流会マニュアルを作成し, PDF ファイルとしてホームページ上で公開しまし た. オンライン参加用タイムテーブルは、開催日 の前日にアップロードし、参加者が聴講したいセ ッションをワンクリックで選択できるようにしま した.また、シンポジウム2日目に行われた特別 講演のオンライン会場へのリンク (Zoom および YouTube)をホームページのトップページに公開 しました.

電子版の講演論文集は、現地開催の時と同様に ホームページ上で事前に公開し、参加者が各自ダ ウンロードし閲覧できるようにしました.閲覧に 必要となる ID とパスワードは、「オンライン参加 用タイムテーブル」と同様に、参加登録者宛てに 事前に送付しました.ただし、シンポジウム直前 や期間中に ID やパスワードが記載されたメール が届いていない等の問い合わせが多くあったため、 シンポジウム期間中に参加方法および講演論文集 のご案内に関するメールを参加者宛てに再送しま した.

今回のシンポジウムは初のオンライン開催であ りましたが、講演申込や原稿投稿、参加登録、申 込方法に関しては、ほぼ従来通りとしましたので、 運営上大きな問題は生じませんでした.ただし、 参加登録時に、オンライン意見交換会に飲食を伴 わない参加をご希望の方が相当数あったため、ホ ームページ上に、「クリック(飲食なし)」ボタン を作成し、ご要望に対応しました.また、企業か らの参加者の方々から、参加費支払いに関するご 要望を数多く頂きました.今後のシンポジウムの 円滑な運営や企業からの参加者のご希望に沿うた めにも,頂いたご要望をまとめた上で今後のシン ポジウムの参加登録時の注意書き等に反映する必 要があると感じました.

最後に,初のオンライン開催ということもあり, ホームページに関しても初の試みが多かったと思 います.オンライン会場への入室を含めほぼ全て の手続きが,ホームページを介して行われたこと を考えると,本シンポジウムにおけるホームペー ジの役割は現地開催の時よりも重要であったと考 えております.様々な先生方から多くの有益なご 助言を頂いたおかげで,業務を全うできたと考え ております.この場を借りて御礼申し上げます.

(岡部 孝裕, 宮岡 大, 田中 三郎)

### 3. プログラム

本シンポジウムの発表申込件数(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)は278件で,第57回の金 沢(344件)や第56回の徳島(370件)と比較し て8割程度となりました.

オーガナイズドセッションは、「水素・燃料電 池・二次電池」、「燃焼伝熱研究の最前線」、「乱流 を伴う伝熱研究の進展」、「ふく射輸送とふく射性 質」、「熱エネルギー材料・システムのための熱・ 物質輸送促進」、「化学プロセスにおける熱工学」、 「人と熱との関わりの足跡」、「東北地区企業によ る部品開発・技術開発の紹介」へ、95 件の発表が 寄せられました.前回に引き続き、「基調講演」を 企画して頂いたオーガナイズドセッションもござ いました.ご尽力いただきましたオーガナイザー の皆様には改めて感謝申し上げます.

優秀プレゼンテーション賞セッションには 38 件の講演が寄せられました.ご尽力いただきまし た学生会委員会の皆様に感謝申し上げます.

オーガナイズドセッションおよび優秀プレゼン テーション賞セッションについては、オーガナイ ザーおよび学生会委員会にプログラム編成をお任 せし、実行委員会では一般セッションのプログラ ム編成を行いました.各セッションの座長選出に 際しましては、多くの皆様にご協力いただきまし た.ご多用中のところ座長をお引き受けください ました皆様には厚くお礼申し上げます.

(岡島 淳之介, 庄司 衛太, 神田 雄貴)

### 4. 講演論文集・プログラム冊子

今回のシンポジウムの講演論文集は CD-ROM 版を、プログラム冊子は例年通り紙媒体を作製しました.講演論文集は会員向けに公開された Web 版と同構成となっており、タイムテーブル、プログラム、索引、企業広告を掲載しました.

作製にあたり,プログラム編成,本部システム 管理の先生には多大なご協力をいただきました. この場を借りて御礼申し上げます.

(田中 三郎)

### 5. 会場

今回のシンポジウムは、当初、郡山のホテルハ マツでの現地開催を予定しておりましたが、新型 コロナウイルス感染症の状況を鑑み、オンライン での開催となりました.開催には Zoom ウェビナ ーを使用しました.講演室として10室を用意し、 それぞれ東北大学が5室、山形大学が3室、日本 大学が2室、管理を担当しました.また、日本伝 熱学会創立60周年記念特別講演会はZoomミーテ ィングと同時に YouTube での配信を行いました.

日本伝熱シンポジウムとして、初めてのオンラ イン開催ということもあり、オンライン講演会入 室方法、講演会参加マニュアル、聴講者・講演者・ 座長マニュアル、優秀プレゼンテーション賞セッ ション参加マニュアル、Zoom アプリインストー ルマニュアルを整備しました.Zoom ウェビナー 開催に伴い、座長をご担当いただきました先生に 「発言の許可」など種々の操作をお願いし、ご協力 いただきました.この場を借りて御礼申し上げま す.また、マニュアルと異なり、名前の変更がで きない事例が報告されました.これはアプリでは 名前を記憶するサインイン情報が残っていること、 ブラウザでは名前を記憶するキャッシュが残って いることが原因と考えられます.参加者の皆様に はご迷惑おかけしました.

当日, Zoom ウェビナーの管理, 時計の表示な ど, 多くのアルバイトの学生にご協力いただきま した. この場を借りて御礼申し上げます.

(江目 宏樹, 神田 雄貴)

### 6. 機器展示・広告

今回のシンポジウムでは,完全オンライン開催 となったため,例年募集している機器展示は実施 せず,プログラム冊子への広告掲載のみを募集さ せていただきました.以下にご協力いただいた企 業を紹介させていただきます(敬称は省略させて いただきました).

・株式会社ファンクショナル・フルイッド

・Maplesoft Japan 株式会社

・ツクバリカセイキ株式会社

今回のシンポジウムでは、オンライン意見交換 会のバナーに広告を掲示して参加者の方々に PR させていただきました.ご協力いただいた企業の 皆様にこの場を借りて御礼申し上げます.

(田中 三郎)

# 7.日本伝熱学会特定推進研究 特別ワークショップ

本学会は 2011 年 (平成 23 年) に特定推進研究 企画委員会を設置し,本学会の分野を大局的な学 術の振興の中に位置付け、より学際的な研究アク ティビティを確保しながら,社会の期待に応える ための社会的課題と科学技術課題, あるいは我が 国の今後の成長分野に特化した個別先鋭的な研究 課題を客観的な根拠に基づいて設定し、活動を進 めてきております. これを受けて毎年の伝熱シン ポジウムにおいて特定推進研究特別ワークショッ プを開催しております. 2020年度(令和2年度) は、コロナ禍によりシンポジウムの開催自体が中 止となってしまい、その代替として10月8日本学 会に企画部会主催の特別オンラインセッションを 開催いたしました.本年度はシンポジウムが Zoom ウェビナーによるオンラインで開催された ことから、これまでに倣いましてシンポジウムの 初日の午後に特定推進研究特別ワークショップが プログラムされ、以下の3件の講演が行われまし た.(以下,敬称略)

### 講演 1.

「動物におけるエネルギー代謝と熱産生の制御機 構に関する研究 ~生命の熱から代謝熱~~」 梅田 眞郷 (ホロバイオ株式会社) 講演 2. 「温度感受性 TRP チャネルを介した温度感知機構 と生理的意義に関する研究」 富永 真琴 (自然科学研究機構 生理研) 講演 3. 「哺乳類の体温調節機構」 中村 和弘(名古屋大)

本年度のワークショップは,昨年度新たに立ち 上がりました推進研究課題「細胞内における熱・ 物理的環境」(主査:東京大教授 白樫 了)の研 究会としての位置づけも兼ねたワークショップで あり,上記3件のご講演は本推進研究課題に関連 した講演内容となっております.研究会という性 質を兼ねていることから,広い学術分野からの知 見を紹介いただくという視点で,伝熱学会以外の 研究者を招聘いたしましてワークショップを開催 いたしました.

講演1では、梅田先生より基礎代謝および熱産 生の考え方の歴史的背景のご紹介が冒頭にあり、 その後、動物のエネルギー代謝と熱産生について のご紹介がありました.動物ではエネルギー代謝 と体温調節メカニズムに密接な関連があり、それ を理解するには細胞レベルにおける温度調節機構 の解明が必要であるとの当該研究の動向について もご説明されました.ご講演後半では、細胞レベ ルでの現在の最先端の研究についても触れていた だきました.熱産生が必要となる環境では、細胞 レベルでの温度適応メカニズムが発現することな どのご説明がありました.

講演2では、富永先生より生体の温度感知機構 についての研究紹介および現在のホットトピック のご紹介がありました.新学術領域研究として展 開してこられました研究内容(温度生物学)につ いて詳細なご紹介をいただき,特にTRP チャネル についてのご紹介がありました.聴講者にとって 身近な味覚による温度感知を例にしまして、唐辛 子の効果とミントの効果といったわかりやすい事 例を示されながらご講演をいただき,温度感受性 のメカニズムを紹介いただきました.

講演3では、中村先生より哺乳類の体温調節機 構についての研究紹介がありました. 伝熱学会で は個体(生体)と周囲環境との伝熱に着目した研 究,および生体表面と周囲との伝熱に関する研究 が進められておりますが、中村先生のご講演では、 自律性体温調節や行動性体温調節といった生体内 部の伝熱および温度維持機構に焦点を当てておら れ、それに関わる小動物実験等の結果等をご紹介 いただきました. 周囲環境と生体表面、さらには 生体表面と生体内部の伝熱という一連の伝熱機構 をイメージすることができるご講演内容でした.

本ワークショップは予定では2時間半を計画し ておりましたが、どのご講演も参加者にとって大 変興味深いものであり、質疑応答を含め、3時間 を超える大盛況のワークショップとなりました. 特定推進研究企画委員会を代表してご参加いただ きました皆様に御礼を申し上げます.

(小宮 敦樹)

# 8. 産学交流イベント

企業会員活動の活性化及び産学官の垣根を超え た連携・協力を目指して、本年もシンポジウムの初 日午後に産学合同交流会を、二日目午前に企業特別 セッション「東北地区企業による部品開発・技術開 発の紹介」を開催しました.

### 8.1 産学合同交流会

第52回日本伝熱シンポジウムから隔年で行って いるもので、本年はオンライン開催となりました. 数分程度のショートプレゼンテーション及びテー マごとに部屋を分けたポスターセッションを実施 しました(図1).テーマについては制限を設けず 各社が得意とする分野としました.ショートプレゼ ンテーションでは各社技術の概要を参加者が効率 よく把握ができ、ポスターセッションについては、 オンラインの特長を生かした各部屋で行うブレイ クアウトセッションを活用することで、参加者それ ぞれの深い議論につながりました.学会では通常発 表されることのない各社の基盤技術や普段は聞く ことのできない課題や解決策を議論することがで き、参加者の関心は高く、活発な議論がなされ、盛 況のうちに終了しました.

開催にご尽力頂いた出展者の皆様,シンポジウム 実行委員会の先生方に深く感謝し,報告とさせて頂 きます.

ご出展頂いた団体(敬称略, 50音順):(株) IHI, (株) WELCON, (株) サーモグラフィテクス, シ ーメンス(株),太陽金網(株),名古屋市工業研 究所,日本製鉄(株),ブラザー工業(株),水谷 電機工業(株).

### 8.2 企業特別セッション

昨年に引き続き開催地区ならではの伝熱に関す るご講演を頂くセッションで、本年は東北地区から ご講演頂きました.講演頂いた企業(敬称略,講演 順)は、東成イービー東北(株)、(株)佐原、(株)、 (株)アスター、アルプスアルパイン(株)の合計4 社です.オンラインでの開催のため、距離的、時間的 制約がなくなり、30名弱の方に参加いただきました.



図1 産学合同交流会の参加者スクリーンショット

快くご講演を引き受けて頂いた企業の方々に深 く感謝致します.ご講演の題目およびご講演の風景 は次の通りです.

(1) 電子ビーム溶接加工時の課題について 水野 豊 東成イービー東北(株)



(2)『持続可能なエネルギーを使用したチムニーハ ウス』技術開発

木原 定利(株)佐原



(3) 指すべきモータの在り方 本郷 武延(株) アスター



(4) サーマルプリンタの動向と熱制御技術並びに 産学連携

寺尾 博年 アルプスアルパイン (株)



来年以降もシンポジウム開催地区の支部にご協 力を仰ぎながら,企業特別セッションを継続実施す る予定です.次回の特別セッションへの皆様のご参 加をお待ちしております.

(産学交流委員会 近藤 義広)

### 9. 優秀プレゼンテーション賞セッション

優秀プレゼンテーション賞(Best Presentation Award:BPA)セッションは、28歳以下の若手研 究者や学生の会員が参加者に研究を紹介し、時間 をかけた議論と発表技術に磨きをかける場として ポスター発表形式で開催しています.例年、シン ポジウムの初日の午後に行われ、学生会委員会と 実行委員会によって企画・運営しています.今回 の優秀プレゼンテーション賞セッションでは、伝 熱シンポジウムがオンラインで開催されることを 受け、Remoシステム(https://remo.co/)を用いて 150分のセッション時間で開催しました.このシ ステムは、2020年9月28日に行われた、第57回 日本伝熱シンポジウム・特別オンラインセッショ ンにおける優秀プレゼンテーション賞オンライン セッションでも用いたものです.1 つのフロアに 複数のテーブルが設置され(図2),テーブルごと に話し合いや発表が行えます.参加者は各テーブ ルを自由に移動して発表を見聞きし,講演者とや り取りができることから,対面式のポスターセッ ションにより近い雰囲気を作れます.

システム運営としては,事前に Remo システム に自由に入室できる練習期間を長く設けたためか, 当日は大きな問題は生じませんでした.前回は通 信障害が発生する講演者と参加者もいましたが, 今回はそのような話もなく,この1年間でオンラ イン環境整備が進んだこともうかがえました.一 方,Remo システムでの課題は、参加者がマイク とカメラをオフにすると画面に表示されないこと です.このため、参加者がホワイトボードを訪れ ていることに気が付かない講演者も多く,説明と 質問をする機会を逃しているのが残念でした.

発表では、講演者はホワイトボードにポスター を貼り付けて質問や議論を行う形式としました (図 3).参加者はホワイトボードにてポスターを 自由に拡大縮小および見る場所を変えながら、講 演者の説明を聞くことができます.ポスターの様 式は細かく設定せず講演者で考えてもらいました が、PDF ファイルのポスターを中心に、YouTube やアニメーション GIF の動画および補助スライド の掲載など、工夫を凝らした発表が見られました.

また,研究を紹介するアピールスライド(1枚) を講演者に作成してもらい,これらをまとめたア ピールスライド集は,シンポジウムのホームペー ジと Remo 会場にて配布し,さらにシンポジウム 初日の各セッションの休憩時間や Remo 会場のス クリーンにてスライドショーとして参加者に案内 しました.研究内容が一目で分かるように,また 興味を引き付けられるように,図・文・デザイン をよく考えたスライドを作成していました.

講演申込は 39 件(1 件講演中止) ありました. また,優秀プレゼンテーション賞セッション (Remo 会場) への総参加者数は 181 名であり,常 に 100 名近い人が参加していました.

優秀プレゼンテーション賞は,審査員に厳正に 審査いただきました.その結果,清水友斗(北海 道大学),田邊拓(慶應義塾大学),手嶋秀彰(大 阪大学),市川達基(東京大学),岸谷宣成(東京 理科大学)(敬称略/順不同)の5名が優秀プレゼ ンテーション賞を受賞しました.(本誌の「優秀プ レゼンテーション賞 受賞者」の記事もご覧ください.)

このほかに、参加者を対象に抽選で景品を贈る 企画を立てました.企画では7つの数字を用意し、 各ポスターの横にその中の1つを掲示します.7 つの数字すべてを回収し、その総和を応募フォー ムから申し込んだ人に抽選で記念となる福島の特 産を贈りました.

最後になりましたが,優秀プレゼンテーション 賞の審査員の方々,学生会委員会,伝熱シンポジ ウム実行委員会に大変お世話になりました.この 場を借りて深くお礼申し上げます.

(学生会委員会 巽 和也)



図 2 Remo を用いた優秀プレゼンテーション賞セッションの会場の様子



図3 ホワイトボードを用いた発表の様子

### 10. オーガナイズドセッション 「人と熱との関わりの足跡(第4回)」

「熱の科学技術史研究会」では、例年、伝熱シン ポジウムの開催地における熱に関する科学技術の 発展に関連するテーマをとりあげるオーガナイズ ドセッションを開催している.今回開催される東北 地方は,日本伝熱学会を代表する顕彰である「抜山 記念国際賞」を生んだ地であることから,この研究 が進められた東北大学片平地区に焦点を当てた講 演を当該地区にご在職の先生方にお願いするとと もに,熱技術の面からは釜石が我が国における近代 製鉄技術の発展に重要な役割を果たしたことから, 同市にも講演を依頼した.セッションの内容及びご 講演者は以下の通りである.

- 東北地方における熱科学技術の発展-

- セッションの主旨 星 朗 (東北学院大学工学部)
- (2) 日本近代製鉄の発祥 釜石から八幡へ 森 一欽 (釜石市文化スポーツ部世界遺産課)
- (3) 東北大学片平地区における伝熱研究(抜山沸騰 曲線)
  - 小宮 敦樹(東北大学流体科学研究所)
- (4) 東北大学片平地区における極低温の研究 野島 勉(東北大学金材研/極低温科学センター)

まず座長の星 朗(当研究会委員,東北学院大学) からセッションの主旨を説明したのち,以下のご講 演を頂いた.

(2)日本近代製鉄の発祥 釜石から八幡へ

森氏からは、まず釜石市の橋野鉄鉱山(図4)は 世界遺産 「明治日本の産業革命遺産」を構成する遺 産の一つに認定されているとのご紹介があった.こ の歴史的背景としては, 盛岡 (南部) 藩の出身の大 島高任が江戸や長崎などで西洋砲術や採鉱術を学 んだ後,水戸藩那珂湊の反射炉の建設に携わったが, 当時の原料は砂鉄から作る砂鉄銑であったため,十 分な性能の製品(大砲)は得られず,岩鉄(鉄鉱石) からの銑鉄を生産すべく, 岩鉄を産出した釜石(当 時は盛岡藩)の地に高炉の建設を計画した.その後, 財政や技術的な困難を克服して、安政4(1857)年 に日本で初めて鉄鉱石を原料とした高炉での連続 出銑に成功, さらに, 明治には釜石製鉄所が建設さ れ,官営から民営へと経営上及び技術上の多くの苦 難に遭遇しつつ,明治27(1894)年には,我が国で はじめて木炭ではなくコークスを用いての出銑に も成功し、これらの釜石における経験が、明治34 (1901)年の官営八幡製鐵所の開設に繋がったと説 明された.

ご講演のあと、「高炉が一時停止せざるを得なかった理由」や「新しい技術の成熟や定着には常に困難が伴い時間が必要である」などの活発な意見交換が行われた.

(3)<u>東北大学片平地区における伝熱研究(抜山沸騰</u>曲線)

「抜山沸騰曲線」の実験は、東北大学片平地区に おいて行われた.現在この地区の熱流体関係の研究 組織としては、流体科学研究所が所在する.そこで 当該研究所にご勤務の小宮敦樹教授に、このご講演 をお願いした.

このご講演に当たって小宮先生は,抜山先生に関 係する方々から文献や諸資料を収集されて,抜山先 生の研究に対するご姿勢,いくつかの研究に関わる 名言,例えば「一生にひとつくらいはいい論文を書 き,それだけ発表したい.」などを紹介され,これ らを物語る研究エピソードのご説明もあった.

その他,抜山先生に繋がる棚澤泰先生,武山斌郎 先生などの方々の系譜や研究業績,当時の写真など もご紹介頂いた.

この沸騰実験が実施された建物については、火災 や戦災、あるいは改築のためにそのままは残されて いないが、当時の配置図と現状を比較された結果、 現在の多元物質科学研究所の位置にあったと推測 されている.図5が現状の建物の外観であるが、確 かに旧帝国大学風のファサードが当時の面影を残 している.

その他, 抜山先生がこの沸騰実験をはじめられた 動機や, 沸騰曲線を得られた後は, 重要なことはわ かったとしてこの分野の研究はされなかったこと, 原子炉の冷却に関連して, 米国の研究者からの関心 が高かったことなどが紹介された.

ご講演後に出席者から「学会で抜山先生のご講演 を聞いたことがあるが,研究が何に役立つかを非常 に重視しておられた」などのお話しがあった.

(4) 東北大学片平地区における極低温の研究

東北大学片平地区における熱に関わる研究のも う一つの特色である「極低温」について,同地区に 所在する金属材料研究所及び極低温科学センター の野島勉准教授よりご講演を頂いた.

ご講演では、まず歴史的な経緯について、金属材料研究所は大正11(1922)年に発足したが、初代の本多光太郎所長が磁性材の研究者であったことや、一般の金属材料物性の研究にも低温環境が重要で



図4(右上)講演される森一欽氏
 (中央)橋野鉄鉱山三番高炉跡
 (世界遺産,写真:釜石市提供)



図 5(右上) 講演される小宮敦樹先生 (中央) 抜山先生の沸騰実験が行われたと思わ れる場所に現在建つ多元物質科学研究所.

あったため、その初期から低温研究が重視されていたこと、当時世界的にはすでにヘリウムの液化に成功していたが(1908年)、未だ広く普及する段階にはなく、初期の研究は液体水素を用いて進められ、昭和27(1952)年になって我が国で最初に同研究所にヘリウム液化機が導入されたこと(図6)、その後は利用者のための基盤整備にも力を入れてきた等のご説明があった。

ヘリウム利用の現状については、ヘリウムは、低 沸点、高熱伝導率、低密度、不活性などの特徴ある 物性を有するので、これらを利用して、医療用MRI 等の超伝導磁石冷却(低沸点)、半導体製造(高熱 伝導率)、光ファイバー線材の引き抜き製造(不活 性など)等の現代社会に不可欠な分野に幅広く活用 されていることを紹介された. 最後に、ヘリウムは天然ガスとともに取得される ものでその供給には限界があり、上記のような利用 分野への代替技術や小型冷凍機の開発、回収率の一 層の向上などによって、貴重な天然資源であるヘリ ウムの有効利用をさらに進める必要があると締め くくられた.



図 6 (右上) 講演される野島勉先生 (中央) 我が国最初のヘリウム液化機

以上,東北地方における熱の科学技術の発展について,これら三人の講演者から趣旨に沿った貴重なご講演を頂いたこと,また最多時で約35名のご参加を頂いたことに心から感謝したい.

(熱の科学技術史研究会 河村 洋, 星 朗)

### 11. 特別講演

日本伝熱学会創立 60 周年を記念する特別講演 会が伝熱シンポジウム2日目に行われた. 学会が 還暦を迎えることを意識し, 伝統のある分野を尊 重しつつも、新しい分野にどのようにチャレンジ するのか,特に若手の研究者に刺激になるように, 講演会全体のタイトルを「新しい研究はどのよう な発想から生まれるのか, 一新しい領域への挑戦 一」とした. 講師は, 独自に新しい研究領域を立 ち上げてきた東大の内田建教授と九大の山西陽子 教授にお願いした. 伝熱シンポジウムがオンライ ンであることから、本講演会もオンラインで開催 し、伝熱学会員には Zoom による配信を、一般の 方にも本講演会を聞いていただけるように, YouTube による無料公開も実施した. 公益社団法 人である日本伝熱学会として,学会員のためだけ でなく,社会のための学会活動を意識した. 司会

進行は花村会長にお願いした.

東大の内田健教授のタイトルは、「社会課題解 決を目指したナノ電子材料・デバイスにおける熱 の課題と利用」である.トランジスタの研究から 始まり、ナノスケールの電子のふるまいの基礎理 解のレベルを上げて来る中で、社会のニーズと照 らし合わせ、IoT で必要とされる低消費電力の新 しい超小型センサーに、ナノスケールのジュール 熱を利用するセンシングの開発に成功した.例え ば、人間の呼吸中の成分が、ナノシートに付着す ることにより、電気抵抗が変化することを、発生 する熱により高感度に計測できる新たな研究へ展 開を図られたことの講演がなされた.

九大の塘氏,東大の志賀氏,丸山氏から,「どの ようにしてこのような発想にいたったのか?」と か「ブレークスルーとは?」について質問がなさ れ,「自分の技術・知識と社会のニーズのアンドを いかにとるのか,という発想が重要である」こと が述べられた.

九大の山西陽子教授のタイトルは、「電界誘起 気泡による機能創発と異分野研究への発想」であ る.英国のインペリアルカレッジで石炭燃焼・レ ーザ計測で学位をとられた後、東北大学で全く違 う分野での細胞について学び、さらに、電気メス の超小型化について研究していたところ、マイク ロ気泡を連続的に射出することに成功し、気泡が 圧壊するときに、生物の膜を焦がさずに穴を開け られることを発見したこと、さらには、これを利 用して外科手術ではない血栓をとる技術に発展さ せたことや、遺伝子・薬剤を注入する技術などに 展開させたことについて講演がなされた。

名大の長野氏,東北大の小宮氏から,「違った切 り口の展開とは?」「異分野融合とは?」について 質問がなされ,「自分の技術,基礎の立ち位置をふ りかえりつつ,異分野の人と積極的に議論するこ とと,外部のニーズについて希求することがその 切り口になる」との答えがなされた.

Zoom で 170 名余り, YouTube で 200 名余り, 約 400 名弱の視聴があり,その後の学会の意見交 換会でも,60 周年にふさわしい実におもしろい講 演であったと多くの人から講評をいただいた.

(60周年記念担当 平井 秀一郎)

### 12. 意見交換会

本シンポジウムの2日目の19:00より,意見交 換会をオンライン開催しました.今回のオンライ ン意見交換会は、「共通のフードとお好みのドリ ンクを楽しむこと」をコンセプトに企画したもの ですが、学会の意見交換会としては前例の少ない 企画であったこともあり、飲食付きの参加者数は 54名(参加者総数:87名)に止まりました.当初 の開催予定地である福島の思い出を参加者の皆様 の記憶に残すために、外注サービス (nonpi foodbox)のドリンク標準プランには存在しない、 特別プラン(福島地酒セット:45セット限定)を 準備させていただきました.この地酒セットは、 実行委員会独自の市場調査・価格交渉・発注手続 きにより実現したものです.

本来の意見交換会では、講演発表と同様に参加 者全員がスピーカーの話を聞く場面や、気の向く ままに複数のグループに分かれて会話する場面が 想定されます.その両方を実現可能な WEB コミ ュニケーションツールとして Remo を採用しまし た.運営側の Remo 利用経験の不足も手伝って、 会の開始早々にはややもたついたところがありま したが、参加者の皆様のご協力により、ほぼ予定 通りに進行することができました(表 4).また、 従来の意見交換会では、終了時刻が比較的厳格で あり、会話の途中で会場を退出せざるを得ない場 合も多々ありますが、オンライン開催の場合には 実質的にはその制限が無く、心置きなく意見交換 ができる場を提供できることを発見しました.

想定よりも参加者数が少なかったために,従来 の対面式の意見交換会に比べて盛り上がるかどう か不安を感じてのオンライン開催でしたが,参加 者の皆様のご理解とご協力により大盛況に終わる ことがきました.ご参加いただきました皆様に心 から感謝申し上げます.

(宮岡 大, 佐々木 直栄)

### 13. あとがき

第 58 回日本伝熱シンポジウムを開催するにあ たり、東北地区の先生方に実行委員会メンバーと して参加いただき、ホームページ作成、プログラ ム編成,論文集編成,講演会オンライン会場(Zoom ウェビナー)および意見交換会オンライン会場 (Remo)準備,展示・広告の勧誘等,数多くの仕

表 4 WEB 意見交換会次第

次第	担当者(敬称略)
開会の辞	宮岡 大(日大)
第 58 回実行委員長ご挨拶	佐々木 直栄(日大)
第 60 期会長ご挨拶	宗像 鉄雄 (産総研)
乾杯のご挨拶・ご発声	小泉 安郎 (電通大)
ご歓談	
第 59 期会長ご挨拶	花村 啓吾(東工大)
第 59 期企画部会長ご挨拶	桃木 悟 (長崎大)
創立 60 周年記念担当ご挨拶	平井 秀一郎(東工大)
第 59 回実行委員長ご挨拶	板谷 義紀(岐阜大)
第58期会長〆のご挨拶	高田 保之 (九州大)
閉会の辞	宮岡 大(日大)

事を引き受けていただきました.今回は,新型コ ロナウイルス感染拡大防止および参加者の安全を 考慮して初のオンライン開催になったことで例年 と異なるシンポジウムの運用形式となりました. 近年多発する自然災害まで考慮した場合,オンラ イン開催の備えが定常的に必要になることが予想 されます.オンライン開催に特化した組織を立ち 上げて,使用ツールや実施方法のノウハウを蓄積 していくことにより,円滑で持続可能なシンポジ ウムの運営ができるものと考えます.また,対面 開催とオンライン開催に共通した課題として,参 加費支払管理業務の負担軽減が挙げられます.他 学会では常識となりつつあるクレジットカード払 いへの支払方法の一本化を一日も早く実現いただ ければと考えます.

最後に,直前まで現地開催を目指してご協力い ただきました皆様,参加いただいた皆様に御礼申 し上げるとともに,本学会のさらなる発展と会員 各位のご活躍を祈念いたします.

(田中 三郎, 佐々木 直栄)

### 第58回日本伝熱シンポジウム実行委員会

委員	長	佐	木	直	栄	(日本大学)
監	事	小	原		拓	(東北大学)
		小	宮	敦	樹	(東北大学)
幹	事	田	中	Ξ	郎	(日本大学)
委	員	青	木	秀	之	(東北大学)
		赤	松	Æ	人	(山形大学)
		秋	永		剮	(秋田大学)
		井	関	祐	也	(八戸工業高等専門学校)
		伊	藤		悟	(東北大学)
		江	原	真	司	(東北大学)
		畄	島	淳⋧	と介	(東北大学)

畄	部	孝	裕	(弘前大学)	徳	増		崇	(東北大学)
片	畄	則	之	(日本大学)	中	村		寿	(東北大学)
鹿	野	<u> </u>	郎	(山形大学)	埜	上		洋	(東北大学)
神	田	雄	貴	(東北大学)	星			朗	(東北学院大学)
菊	Ш	豪	太	(東北大学)	松	下	洋	介	(東北大学)
江	目	宏	樹	(山形大学)	松	原	裕	樹	(東北大学)
古	Ш	琢	磨	(八戸工業高等専門学校)	馬	渕	拓	哉	(東北大学)
須	知	成	光	(秋田県立大学)	丸	田		薫	(東北大学)
庄	司	衛	太	(東北大学)	員	山	重	直	(八戸工業高等専門学校)
大	黒	Æ	敏	(八戸工業大学)	宮	畄		大	(日本大学)
田	子		真	(秋田大学)	安	原		薫	(山形大学)
塚	田	隆	夫	(東北大学)	若	嶋	振-	・郎	(一関工業高等専門学校)
門	旪	秀	樹	(山形大学)					

# 優秀プレゼンテーション賞 受賞者 - 第 58 回日本伝熱シンポジウム – Best Presentation Award - 58th National Heat Transfer Symposium of Japan -

令和3年5月25日に第58回日本伝熱シンポジ ウム(オンライン)の優秀プレゼンテーション賞 セッションが Remo システムを用いて開催されま した.審査員の厳正なる審査により優秀プレゼン テーション賞を受賞された方々が決定いたしまし た.受賞者および優秀プレゼンテーション賞セッ ションの様子をご紹介させていただきます.

### 2021 年度 受賞者

- ◆ 清水 友斗 【北海道大学】
   温熱エネルギー貯蔵のための
   Al-Ni 合金系相変化マイクロカ プセル
- ◆ 田邊 拓 【慶應義塾大学】 高温超伝導 REBCO 薄膜の極低 温・強磁場下における熱伝導率 の異方性測定の検討
- ◆ 岸谷 宣成 【東京理科大学】 航空機エンジン用予混合二段 燃焼器で発生する燃焼振動の ダイナミクス
- ◆ 手嶋 秀彰 【大阪大学】 固液界面の気体分子吸着層に 関する実験的研究
- ◆ 市川 達基 【東京大学】
   Allen-Feldman 理論に基づいた
   三元系アモルファス合金の熱
   伝導解析



(順不同)

学生会委員会幹事 西山 貴史(福岡大学) Takashi NISHIYAMA (Fukuoka University) e-mail: tnishiyama@fukuoka-u.ac.jp





受賞者と賞状



Remo 会場の様子

今回の優秀プレゼンテーション賞セッションは, 1 ページのアピールスライドによる研究内容アピ ール,および Remoを用いたオンラインでの研究 発表というスタイルで行われ,質疑応答を含めた 研究発表が審査対象となりました.参加された講 演者の皆様は Remo のホワイトボード機能を活用 し,動画や補助スライドを加えるなど,独自の工 夫を凝らした発表を行いました. 特集「オープンソースソフトウェアを活用した CAE」にあたって Preface to the Special Issue on "Open-Source Software and CAE"

今春,日本を代表する最新鋭スーパーコンピュ ータ「富岳」が完成し,正式運用がスタートしま した.「富岳」は新型コロナウイルス対策でも活用 され,飛沫やエアロゾルの飛散の様子を可視化し た結果が多くのニュースで取り上げられることで, 世間一般での認知度が上がっているようです. 「富岳」のアプリケーション実効性能は先代「京」 の100倍以上ともいわれます.計算機の性能の向 上は止まるところを知らないといえそうです.デ スクトップ PC向け CPU でも,10を超えるコア数 のものがすぐに手に入ります.

このような計算機を活用した CAE・数値シミュ レーションを実施するためのソフトウェアとして 注目されているのが,オープンソースソフトウェ アです.多数の CPU コアを使った並列計算の効率 化について頭を悩ますことなく利用できることや, 並列数に応じたライセンス料を気にすることなく マシンをフル活用できるなどの利点が挙げられ, 活用を検討された方も多いのではないでしょうか.

しかし,オープンソースソフトウェアを利用した CAE・シミュレーションを実施しようとすると, その導入コスト (スムーズに使いこなせるようになるまでの時間や労力)がネックとなり,断念されたということも多いようです.私がオープンソ ースソフトウェアを活用した CAE に取組んで感じたことの1つに,商用ソフトのライセンス料は, 高くはないということです.お金を払うからこそ, 問題解決までの時間を短縮できる面があります.

とはいえ、いろいろな制約・しがらみを取り払 い、高度なソフトウェアのソースコードを自由に 見て・改造できることは、研究者にとっては大き な喜びです.オープンソースソフトウェアを活用 することで、研究成果としての知識だけでなく、 さらなる知識を生み出すソースコードを広く共有 し、知の創造に貢献することも容易となります. 本特集号では、オープンソースソフトウェアを 中川 慎二(富山県立大学) Shinji NAKAGAWA (Toyama Prefectural University) e-mail: snakagaw@pu-toyama.ac.jp

活用した CAE の現状を広く共有したいと考え, 複数のソフトウェアを取り上げました. これをきっかけとして, 伝熱学会関係者の皆様がオープンソ ースソフトウェアを活用し, 知の創造と共有がさらに進展する一助となることを願っております.

流体分野では、OpenFOAM というオープンソー スソフトウェアが世界中で活用されています. OpenFOAMのトレードマークと開発チームの1つ は私企業である ESI グループが所有しています. 同グループの一員である日本イーエスアイ株式会 社の三邉考志氏に、OpenFOAM の現在と今後につ いてご寄稿いただきました.いろいろなバージョ ンや開発元の関係性や、企業グループが共同出資 しての開発依頼など、商業利用とオープンソース との関わりなどが解説されています.

OpenFOAM の企業での活用事例として日立製 作所の保坂知幸氏に、大学での活用事例として東 北大学の山本卓也氏に、オープンソースの利点を 活かしたカスタマイズも含めて紹介していただき ました.エンジンの最適化や、溶融金属凝固過程 の解明など、高度な内容が解説されています. OpenFOAM に含まれる伝熱関連機能の概要につ いては、私が寄稿させていただきました.

熱流体と構造変形との連成解析ツール Elmer の 解説を、岐阜工業高等専門学校の柴田良一氏にご 担当いただきました. OpenFOAM より使い勝手の 良いところもあり、GUI での操作説明もあります. ますます関心の高まっているモデルベースデザ インに関連して、OpenModelicaの教育から研究ま での幅広い活用例を、足利大学の西剛伺氏にご紹 介いただきました.マルチドメインシミュレーシ ョンの一例として、熱と電気の連成など複雑な問 題へ適用されています.

各稿の筆者の皆様には、ご多忙にも関わらず原 稿執筆をお引き受け頂きました.この場を借りて 感謝申し上げます.

# オープンソースソフトウェア OpenFOAM 現在と今後 ~開発・維持を支えるコミュニティとその活動~ *Current and future of OpenFOAM*

 $\sim$ The community that supports development and maintenance  $\sim$ 

三邉 考志 (日本イーエスアイ株式会社) Takashi MINABE (ESI Japan. Ltd.) e-mail: takashi.minabe@esi-group.com

### 1. はじめに

OpenFOAM は元々商用ソフトウェアとしてリ リースされ、2004 年に GNU General Public License に沿ってオープンソースソフトウェアとして公開 されました.今では、北米、ドイツ、中国、イン ド、英国、日本、フランス、イタリアなど、世界 各国でダウンロードされ、多くの研究機関、大学、 企業などで使用され(図1参照)、世界で最も使用 されている3つCFDコードの一つと言われていま す.さらに、HPC 環境で使用されているソフトウ ェアのトップ5にも入っているなど、広く認知さ れるようになりました.

この背景には、無料ということもありますが、 多くのユーザーからのフィードバックを得て、機 能が充実し安定し、多様な分野で使用されている ことも大きなの要因と考えられます.



図1 2019年 OpenFOAM ダウンロード比率

しかし、オープンソフトウェアという印象から か、メジャーな商用 CFD ソフトウェアと比較する と、日々の設計開業務での使用には、漠然とした 不安やハードルの高さを感じているのが事実だと 思います.

オープンソフトウェアの特性は、コード自体も

公開されることで,ユーザーにより検証され安定 し,新しい技術が搭載されるということだと言わ れています.

ESI-Group の傘下である OpenCFD 社(以下 ESI-OpenCFD)は、オープンソフトウェアとして の特性を生かし、OpenFOAM の維持と開発を支え るために、コミュニティを立ち上げました.

今回は、このコミュニティの概要、活動内容、 さらに OpenFOAM の開発状況、リリースプロセ スについてご紹介します.

商用ソフトウェアとは異なる、オープンソフト
 ウェアの特性を生かした仕組みにより、
 OpenFOAMの開発維持が行われていることを理解していただければと思います。

### 2. ESI-OpenCFD バージョン

OpenFOAM は 2004 年にオープンソフトウェア 化の後,幾つかのバージョンに枝分かれています. 商用ソフトウェアライクな形態となっているもの もありますが,現在,オープンソフトウェアとし て公開されている主なものは, ESI-OpenCFD バー ジョン,Wiki バージョン, OpenFOAM Foundation バージョンの3つとなっています.(図2参照)



図2 主な OpenFOAM

それそれのバージョンに関する Web サイトを 表1にまとめます.

バージョン	Web サイト				
OpenCFD	https://www.openfoam.com/				
Foundation	https://openfoam.org/				
Wiki	http://openfoamwiki.net/				

表1 Web サイト一覧

このうちの一つをリリースしている OpenCFD が ESI-Group の傘下となった当初は,開発/拡張したものを OpenFOAM Foundation に共有し, Foundation バージョンに搭載して公開していました.

しかし,企業が利用するツールとしては「バー ジョンアップ時期が不定期」,特に,機能開発に投 資したユーザーからは,「開発された機能の公開時 期が不透明」,「開発版を何時まで使い続ける必要 があるのかが不明確」などの理由から,バージョ ンアップとリースについての改善要望がありまし た.そこで,ESI-OpenCFDは独自のバージョンを リリースすることで,これらの改善要望に対応を することとしました.最初のバージョンは 2016 年1月に OpenFAOM-v3.0+としてリリースされ, その後は6月と12月の半年ごとにリリースされて います.現在のバージョンは4桁の番号で管理さ れ,例えば,2020年の12月にリリースされたバ ージョンは OpenFOAM-v2012となっています.

### 3. OpenFOAM Governance

ESI-OpenCFD は OpenFOAM の維持と開発を継 続するために, 2018 年に OpenFOAM Governance というコミュニティを立ち上げました.

このコミュニティは、中心となる Steering Committee と、それぞれに技術的なテーマを持っ た複数の Technical Committees で構成されていま す.図3にこの OpenFOAM Governance の概要イ メージ図を示します.

詳細な情報は下記サイトで確認ができます. https://www.openfoam.com/governance/

### 3.1 Steering Committee

現在の Steering Committee のメンバーは, ESI-OpenCFD はもちろんの事,ヨーロッパや北米 の大手自動車 OEM から, CAE 関連のコンサルタ ントサービズ会社,大学の研究機関などから構成 されています.メンバーは最低3年間の在籍が求 められ,年2回開催する OpenFOAM Governance 会議に参加し, OpenFOAM 開発維持の方向性につ いての議論を行います.また,この Steering Committee には参加会費が必要となり,この会費 は開発関連や Technical Committees の活動の費用 として使用されます.



図 3 OpenFOAM Governance 概要

### 3.2 Technical Committees

Technical Committees は現在9つあり,それぞれ にチェアマンが存在し,乱流,混相流,数値計算 手法,メッシュ作成のようなCFDの構成技術から, 海洋,自動車,原子力のようなアプリケーション に特化したもの,HPC 関連技術など,それぞれの テーマを持って活動しています.そして,Steering Committee へ,OpenFOAMの機能拡張に関して提 案や開発コードの提供も行います.

この Committee の特徴的な活動に OpenFOAM Journal があります. これは Document and Tutorial Committee が中心となり OpenFOAM を用いた成果 を論文として公開する取り組みになります. もち ろん, この OpenFOAM Journal には誰でも登録す ることができます.

また,後記の exaFOAM プロジェクトでは HPC Technical Committees がイニシャティブを持って 活動しています.

各 Committee について詳細を知りたい場合は, 下記サイトをご覧ください.

https://www.openfoam.com/governance/technical-c ommittees

より詳細な情報を得ることができます.

**OpenFOAM Journal** の詳細確認や登録は下記サ イトから行えます.

https://journal.openfoam.com

### 3.3 One OpenFOAM

OpenFOAM Governance のテーマの一つに"One OpenFOAM"というものがあります.これは枝分 かれした OpenFOAM を一つに統合するというも のではなく,それぞれで自由に開発され公開され たものを,可能な限り ESI-OpenCFD バージョンに 反映させていくというものです.(図4参照)

例えば, 異なる FOAM extend バージョンを公開 している, Wiki のメンバーも Technical Committees に参加し, 積極的に情報共有を行っています.



図4 One OpenFOAM の考え方

### 4. ESI-OpenFOAM のリリース前テスト

前記の様に, ESI-OpenCFD では, 毎年6月と12 月の半年毎にバージョンアップをおこなっており ます.

次期バージョンでのリリース予定となった機能 はリストアップされ、状況を確認しながら更新さ れていきます.次期リリースまでに、十分な仕様 での開発や、検証が間に合わないものは、リリー スが延期され、リストから外れていきます.残っ たものが新バージョンに搭載されリリースされま す.

バージョンアップに向けて、ESI-OpenCFDでは、 OpenFOAMの品質を維持するために3つのレベル でのテストを行っています.表1に各レベルの概 要を、図5にリリースまでの各レベルのテスト実 施頻度のイメージ図を記載します.

Small や Medium レベルで用いるテストケース はチュートリアルとして公開されるものも含んで いますが, Large レベルで使用するケースは, ESI-OpenCFD と契約しているユーザーから提供 されたケースとなります.計算の安定性,結果の 精度等を検証し,契約ユーザーのみに報告されま す.

例えば,空力評価に OpenFOAM を使用してい

る契約ユーザーであれば,任意のベンチマークケ ースでリリース毎に検証され,その結果をリリー ス毎に確認することも可能となります.

表2 リリース前テストケース

Small	約5時間(One Night)の実行テスト			
	700 強の機能確認テスト			
Medium	約 400 ケースによるバリデーション			
	2日間程度の時間(1回/週)			
Large	顧客提供の約 20 ケース			
	数100万セルケースでの定常/非定常			
	約1週間(リリース毎に実施)			

OpenFOAM には商用コードの様なライセンス 契約による品質保証がありませんが,契約ユーザ ーは, OpenFOAM の使用目的/対象に対して同等 の品質保証を得ることが可能になります.

また, ESI-OpenCFD バージョンは, リリース体 制を整えたことにより, 2015 年に ISO9001 を取得 しています.



### 5. OpenFOAM の開発

### 5.1 ユーザーリクエストによる開発

OpenFOAM の開発/拡張は、主にユーザーから のリクエストにより開発が行われています. リク エストの内容は、商用ソフトウェアに有って OpenFOAM に無い機能の追加や、比較的新しい技 術の反映等様々です.

開発費はリクエストしたユーザーからの投資に よりまかなわれ,通常,ESI-OpenCFDのエンジニ アが開発作業を行い,その後,新機能として公開 されます.

開発プロジェクトには、単独ユーザーからの場 合と複数のユーザーからの共同出資となる場合が あります. 単独の場合は,技術的な可能性を議論,検討し仕 様決定後に開発され実装されます.しかし,リク エストしたユーザーの目的に対して仕様が決めら れるため,他のユーザーの解析対象には対応でき ない等,仕様上の制限となることもあります.こ の場合,さらに,必要とするユーザーからのリク エストで機能拡張が行われ,OpenFOAM が拡張さ れていきます.

この一例として、「日射量計算機能」があります. この機能は、最初に基本的な機能が搭載され、次 に「鏡面反射(図 6)」が考慮できるようになり、 v2012では「日射量の吸収領域(図 7)」を考慮で きるまで拡張されています.これらは、異なるユ ーザーからのリクエストにより拡張されています.



図6 鏡面反射を考慮した日射量計算



図7 日射量吸収領域を考慮した計算例

共同出資の場合は,ユーザー(出資者)毎で解 析対象と目的が異なるため,より多様な仕様とな ります. 共同出資で開発された代表的なものとしては, compressibleInterFoam (圧縮性混相流), fireFoam (固体表面燃焼), Overset Grid (重合格子) がありま す.

機能の基本部分に関しては、各ユーザーで開発 費を分担することになりますが、異なる利用目的 にたしてのリクエスト、例えば、境界条件や他機 能とのカップリング等は個別対応となります.

また、CFD は幅広い物理現象に対応しています. 時には専門性が高く、ESI-OpenCFD だけでは対応 できないものもあります. この場合は、より高い 専門性を持つ Technical Committees のメンバーが 開発を担当し、ESI-OpenCFD で実装と確認検証を 行い、公開するということもあります.

### 5.2 OpenFOAM Governance が中心となる開発

ユーザーからのリクエストに対応した開発は, ソルバー機能の拡張,境界条件の追加,メッシャ ーの改善,プリポスト処理機能の追加等,CFD ソ フトウェアとしての枝葉的な部分が主な目的とな る傾向があります.しかし,このようなアプリケ ーションソフトウェアとしての表に見える部分で なく,根幹,もしくは根幹に近い部分の開発及び 拡張に関しても行う必要があります.

例えば, 昨今のクラウドや HPC 等の並列処理が 当たり前となるハードウェア環境の変化に対して の対応が一例としてあげられます.

商用ソフトウェアの場合"競合他社との差別化" や"マーケットニーズへの対応"をビジネス視点 から見据え,ベンダーの判断で対応していきます が,オープンソースソフトウェアではこれらの"ビ ジネス的な視点"が当てはまらなくなります.

しかし,オープンソフトウェアは"誰でも入手 できコード拡張できる"という特徴から,比較的 容易に共通の研究開発の題材となりえます.新し い技術の開発や試みという視点で考えれば,この 特性を生かし,多様な立場からのメンバーが参加 して,積極的に新しい技術開発に取り組むことも 可能です.

2021 年から開始される OpenFOAM を用いたエ クサスケールコンピューティングへの対応を目的 としたプロジェクト "exaFOAM" はこの一例と言 えます.



図8 OpenFOAM の開発イメージ

このプロジェクトは OpenFOAM Governance が 主導で企画したプロジェクトで, HPC Technical committee が中心となって行われます.

この様に、OpenFOAM Governance により、ソフ トウェアとして必要と考えられる技術開発にも対 応できるようになり、よりバランスの良い開発体 制が整えられています.

### 6. まとめ

昨今, Linuxをはじめとして, 色々な分野でオー プンソフトウェアが使用されています. オープン ソフトウェアは, フリーで使用できるというだけ でなく, コード自体も公開されています. よって, ユーザー自身がコード自体の改良を行う事も可能 ですし, さらに, 複数のユーザーが同じソフトウ ェアをプラットフォームとして利用し目的を共有 することで, 多様な立場からのコラボレーション が起こり, 新しい技術が生まれ, 発展の加速も期 待できます.

CFD ソフトウェアは多種多様な目的で,自動車, 重工,建築,化学材料,電子機器,医療などに携 わるエンジニアが設計・研究開発を目的として利 用しているツールとなっています.

OpenFOAMはCFDのツールとして使用できる, オープンソフトウェアで,ユーザーのものと位置 づけられています.公開された技術が共有され, 多様な分野で使用され,コラボレーションを実現 できます.

OpenFOAM がベストであるとは言いえません が、オープンソフトウェアとしてリリース後、確 実に良くなってきていると言えます. 今後も、多 くのユーザーに使用され、情報が公開されること で、継続し発展していくことが期待できると思い ます. OpenFOAM を用いた自動車用エンジンのシミュレーション技術の開発

Numerical Simulation for Internal Combustion Engine Using OpenFOAM

保坂 知幸, 光藤 健太, 杉井 泰介, 米谷 直樹 (日立製作所) Tomoyuki HOSAKA, Kenta MITSUFUJI, Taisuke SUGII, Naoki YONEYA (Hitachi, Ltd.)

### 1. はじめに

地球温暖化防止に向けて,自動車への燃費規制が 強化されている.電気自動車(Electric Vehicle: EV) の市場拡大が必至である一方で,ライフサイクルで の CO<sub>2</sub>排出削減の観点から 2030 年以降も内燃エン ジンを搭載したハイブリッド車が高い市場シェア を持つと考えられており[1],電動車へのシフトと エンジンの熱効率改善の両輪での CO<sub>2</sub> 削減が必要 である.

自動車用エンジンの燃費や排気の改善のために は,エンジン内の流れや燃料挙動,熱発生などを詳 細に評価し、燃焼の最適化を行う必要がある.この ような現象の詳細な検討には, CFD (Computational Fluid Dynamics) が重要な役割を果たしており、製 品試作や性能試験の代替による開発費用と開発期 間の短縮,実験的に計測できない現象の解明等に大 きく貢献している. 著者らは OSS (Open Source Software) である OpenFOAM[2]を用いて,弊社内の 火力・原子力分野で培った二相流や燃焼の数値解析 技術をベースに,エンジン筒内の流動,混合気形成, 燃焼挙動などをシミュレーションによって予測す る技術を開発した. OSS を用いる利点としては、多 様な解析ニーズに応えるためのカスタマイズが容 易であることや, ライセンスコストの低減が可能で あることが挙げられる. さらに, 燃焼のような複雑 な現象に対しては、使用されている物理モデルへの 理解を深めたり,新たなモデルの組込みが可能であ ることが OSS を活用するメリットであると考えて いる.

本稿は、OpenFOAM をベースに、自動車用エン ジンのシミュレーションを実現するために開発し た燃焼解析技術について解説する.さらに、同じく OSS である Salome-Meca[3]と組み合わせて固体熱 伝導解析と燃焼解析の連成解析を行うことで、エン ジンコンポーネントである副室式点火装置のモデ ルベース設計に活用した事例について紹介する.

### 2. OpenFOAM の概要

オープンソース CFD ソフトウェアとしては、英 国インペリアルカレッジで開発され、その後 OSS となった OpenFOAM の他、フランス電力公社が開 発している Code Sature[4], スタンフォード大学の 航空宇宙工学部が開発した SU2[5], 文部科学省に よる研究開発プロジェクトから生まれた Front Flow[6]などが知られている. 著者らが OpenFOAM を選定した理由としては,弊社内においてガスター ビン燃焼器[7]や蒸気タービンのラビリンスシール 流れ[8], 産業用インクジェットプリンタ[9]などを 対象として過去に OpenFOAM を活用した事例があ り, 社内に知見が蓄積されていたこと, 後述するよ うにエンジン解析に必要な機能の一部がライブラ リとして備わっていることに加え,国内外の使用ユ ーザの多さとコミュニティが活発であることが挙 げられる.

OpenFOAM は、連続体力学の問題を解くための ソルバ群と、メッシュ作成ツールなどのユーティリ ティ群と、それらを作成するために必要なライブラ リ群から構成されている(図 1). 主要開発言語は C++であり、ライブラリ群はオブジェクト指向プロ グラミングと呼ばれるソフトウェア開発手法に則 って書かれている.また、商用ソフトウェアのよう な GUI (Graphical User Interface)が用意されているわ けではなく、ほとんどの操作はコマンドラインで行 う必要がある.



### 図1 OpenFOAM の構成

### 3. 自動車用エンジンのシミュレーション

ガソリンエンジンでは、空気と燃料蒸気と混合し た混合気をピストンにより圧縮し、点火プラグを用 いて点火して燃焼させる.図2に示すように、エン ジン解析ではバルブやピストン移動を考慮した流 動、燃料噴霧の挙動、燃焼などの複合現象の解析が 必要である.

OpenFOAM は、解くべき支配方程式ごとに独立 したソルバが用意されている.例えば、単相流の非 定常非圧縮流れの解析には pimpleFoam が、二相流 の非圧縮流れの解析には interFoam が用意されてお り、およそ 100 種類の中から適切なソルバを選択す る必要がある.本報の執筆時点で最も新しいバージ ョンである OpenFOAM-v2012 では、エンジン解析 に関して XiEngineFoam や engineFoam と呼ばれる ソルバが用意されているものの、表1に示す通り、 複雑なエンジン形状を用いるのが困難であり、壁面 に付着した燃料液膜の物理モデルが存在しないこ となどから、要求される機能要件を十分には満たし ていなかった.そのため、不足している機能を独自 に開発する必要があった.

前述の通り OpenFOAM には多数の独立したソル バが用意されているが,多くの部分は共通化され独 立したライブラリとなっている.例えば, OpenFOAM は偏微分方程式の離散化手法として有 限体積法を用いているが,有限体積法を解くための 処理はほとんどのソルバが共通のライブラリを使 用している.そのため,独自のソルバを開発する際 には,共通化されているライブラリの機能を組み合 わせるか,あるいは拡張することによって所望の解 析を実施できるソルバを開発することが基本方針 となる.以降の節では,エンジンの燃焼解析に必要 となる個別機能の開発について述べる.

表1 エンジン燃焼解析の機能要件

	XiEngineFoam	engineFoam					
バルブ・	^	^					
ピストン							
の移動	(簡易形状)	(簡易形状)					
燃料液滴	~	$\bigtriangleup$					
噴霧解析	X	(液膜モデルなし)					
予混合	$\bigcirc$	$\bigtriangleup$					
燃焼解析	0	(拡散燃焼モデル)					

#### 3.1 移動境界を考慮した流動解析

エンジン解析では,吸排気バルブとピストンの移 動を考慮した解析が必要となる. OpenFOAM に用 意されている engineFoam では,メッシュのトポロ ジーを保ちながら変形 (モーフィング) するライブ ラリが使用されているが,複雑な形状のエンジンに 対してはメッシュの歪みが大きくなり計算が破綻 する.そこで,図3に示すように,計算メッシュを あらかじめ自動メッシャによって複数用意してお き,モーフィングによるメッシュの歪みが大きくな る前にメッシュを切り替えて物理量をマッピング することで,メッシュの品質を保ちながらエンジン のシミュレーションを実施する手法が過去に報告 されており[10],著者らも同様の機能を組み込んだ [11].

メッシュの作成には OpenFOAM に用意されてい る snappyHexMesh を用いた. snappyHexMesh は STL 形式などの形状ファイルを用いて自動でメッシュ を生成するユーティリティである. エンジンの STL ファイルのバルブ位置とピストン位置をクランク 角に応じて自動で修正するスクリプトを作成し,メ ッシュ作成を自動化した. また, バルブとポートの 間には微小な隙間を設け, バッフルと呼ばれる内部 壁を設けてポートと筒内の空間を分けることで, バ ルブが閉じられた状態を表現した.

自動メッシャによる生成

メッシュ 1'

図3 移動境界解析の概要

モーフィング



図2 エンジン燃焼解析

インジェクタ 点火プラグ

メッシュ 2

マッピング モーフィング

エンジン内の流動解析結果を図4に示す.図4(a) にエンジンのモデル図を示す.対象のエンジンはペ ントルーフ型のレシプロエンジンであり、IN は吸 気ポートとの接続面を, EX は排気ポートとの接続 面を示す. ピストンはフラット形状であり, 上死点 におけるピストン中心座標を原点とした. 図 4(a) における B-B 断面の, 上死点後 (ATDC: After Top Dead Center) 120 度の時刻における流速分布を図 4(b)に示す. 吸気(IN)ポートから流入した流れが筒 内で排気側に強い流動を起こしている様子が分か る. また, B-B 断面の原点から 30 mm 下の位置に おける流速分布を図4(c)に示す.なお、z方向の平 均流速を、ピストン平均速度で無次元化した. 白抜 きプロットが実験値[12]を,点線が既存コード[13] によるシミュレーション値を,実線が開発したコー ドによる解析結果を示す. 流動分布が実験値とよく 一致することを確認した.

### 3.2 噴霧解析

エンジンに燃料を供給する方式の一つである直 接噴射式(直噴式)では,筒内に微粒化された燃料 噴射し,筒内の空気と混合する.粒子の大きさはマ イクロメートルオーダであり,エンジン内の空間に 対して非常に小さい.このため,燃料の液滴をラグ ランジュ粒子で表現する DDM (Discrete Droplet Model)が一般に用いられる.



OpenFOAM には DDM のライブラリが用意され ており,液滴の伝熱・蒸発モデルに加え,微粒化モ デルである KHRT モデル[14]や TAB モデル[15]な どの主要な物理モデルが実装されている.図5に示 すように,噴霧単体形状でのシミュレーションと実 験結果が良い一致を示すことを確認した.

エンジン内流動と組み合わせた解析を実施する にあたり,壁面へ付着した燃料液滴が液膜となる挙 動をモデリングする必要がある. OpenFOAM にお いては液膜モデルとしてオイラー法によるライブ ラリが用意されているが,前節で述べた移動境界解 析との連携を考慮し,ラグランジュ粒子による液膜 モデルを開発した.噴霧粒子のライブラリを参考に 液膜のライブラリを作成し,付着や液膜蒸発モデル などのサブモデルを導入した. これにより,図6に 示すような,エンジン内の流動を考慮した燃料噴霧 と燃料の壁面付着の解析が可能になった.



14 gr. Actorecia





図6 エンジン内噴霧流動解析
#### 3.3 燃焼解析

一般にガソリンエンジンでは、筒内で燃料と空気 の混合気を形成し、点火プラグにより着火して火炎 伝播が発生する予混合燃焼の形態をとる.著者らは、 OpenFOAM のライブラリにあらかじめ用意されて いる燃焼モデルに関するコードを再利用しつつ、予 混合燃焼モデルとして稲毛ら[16]が開発した HTA (Hyperbolic Tangent Approximation)モデルを組み込 んだ[17]. HTA モデルは、火炎面の分布を双曲線正 接関数で近似して導出したモデルであり、ガスター ビンの燃焼解析に活用されている[18].

図7に,エンジン内で火炎が筒内に広がっていく 様子のシミュレーション結果を示す.図7(a)はエン ジンの断面における温度分布を示しており,火炎内 部の温度が上昇していることが分かる.図7(b)は火 炎面として,同時刻において反応進行度が0.5であ る等値面を可視化している.また,図8に燃焼に伴 う筒内の圧力上昇のシミュレーションと実験値の 比較結果を示す.Cyl.に続く数字は気筒番号を表し ている.ここでは例として1条件のみの結果を示す が,HTAモデルの定数を適合することにより,燃料 と空気の異なる混合率において圧力分布が実験と 良い一致を示すことを確認している[17].



図8 筒内圧力の予測結果と実験値の比較



図9 点火モデルを用いた解析例

## 3.4 点火解析

ガソリンエンジンでは、点火プラグ周りに放電に よるスパークが発生し、周囲の流動によって放電経 路が伸長し、着火性が向上することが知られている. このような挙動を表現するために、DPIK[19]や AKTIM[20]などの物理モデルが提案されている.

筆者らは、点火モデルである AKTIM を参考に、 噴霧解析で用いられている粒子ライブラリのコー ドを再利用することで、放電経路と火炎核をそれぞ れ別のラグランジュ粒子で表現するモデルを導入 した[21]. 図9に、点火解析結果の一例を示す.赤 色で示す放電経路が、周囲ガスの流動により伸長す る様子が見られる.また、半透明で示す火炎核の成 長は DPIK[19]を用いてモデリングしている.さら に、点火コイルの電子回路をモデル化し、二次コイ ルに蓄えられた放電エネルギーが放電経路におい て消費される挙動を連成して計算した.

## 3.5 ソフトウェアの社内展開

商用 CFD ソフトウェアに比べて,オープンソー ス CAE ソフトウェアである OpenFOAM は使い勝 手に課題がある.そこで,ソフトウェアを社内展開 するにあたり,使い勝手の向上のための工夫を行っ た.

OpenFOAM では、物理モデルの設定や、物性値 の設定、境界条件などの設定のために、それぞれ個 別のファイルを書き換える必要があり、使用者にと って大きな作業負担となる.そこで、設定ファイル を一つのテキストファイルにまとめ、自動的に設定 を反映するスクリプトを作成した.これによって、 使用者が個別のファイルを修正することなく計算 を実行できるようにしている.

また、マニュアルを Web アプリとして社内に公 開し、メッシュの作成手順や解析の実行手順などを 確認できるようにしている. なお, ソースコードや WebマニュアルはGitによるバージョン管理をオン プレミス環境で行っている. 社内で OpenFOAM を 活用しつつ, ソルバのカスタマイズや使い勝手の向 上について継続的な改良を行える環境の構築に努 めている.

#### 4. 副室式点火システムのモデルベース設計

本章では、OpenFOAM をベースとして開発した ソフトウェアを用いてエンジンコンポーネントの 熱設計を行った事例について紹介する[22]. 対象で ある副室式点火システムは,エンジンを発電用に特 化したシリーズハイブリッド車両向けに,近年開発 が活発化している点火システムである.図10に副 室式点火システムの概要図を示す.通常、ガソリン エンジンにおいて点火プラグは主燃焼室の上部に 備えられるが,本システムでは主燃焼室上部に副室 を有し、点火プラグは副室内に備えられる. 燃焼時 には副室内の混合気への点火を行い,副室内で発生 した燃焼が噴孔から高温の火炎ジェットを噴出し, 主燃焼室の混合気を着火させる.このように構成す ることで多点での高速燃焼を実現することができ, 熱効率の向上が期待される. 副室の冷却面における 課題は、高出力条件で副室が過熱し、異常燃焼(ノ ッキングやプレイグニッション)が発生する点であ る. 副室の過熱要因としては、燃焼ガスから副室内 壁への過大な入熱と、副室からエンジンヘッドへの 伝熱不足が考えられる.双方を考慮するために,前 章までに述べた OpenFOAM と,同じく OSS である Salome-Meca による固体熱伝導解析を組み合わせ ることで、燃焼と伝熱の連成解析を実施した.



図10 副室式点火システムの概要図



図11 連成解析の概要図

図11に、実施した連成解析の構成を示す.本連 成手法は、図11(a)で示す非定常熱伝導解析を実施 する副室への入熱境界条件を,図11(b)で示す燃焼 解析により一定間隔ごとに更新することで実現す る. これは双方向の連成であり,図11(a)の解析結 果から、副室の壁面温度が図 11 (b)の燃焼解析の温 度境界条件となる. ここで, エンジンにおける固体 の熱伝導は,現象の進行する時間スケールが燃焼に 比べて非常に大きい.加えて、3次元燃焼解析の計 算コストが大きいため,燃焼解析を固体熱伝導の時 間スケールに合わせて実施するのは解析時間の観 点から現実的ではない. そこで燃焼解析の1サイク ルの燃焼解析結果から得た入熱量を用いて数 100 サイクル分の時間(数百秒相当)の固定熱伝導解析 を行い,結果を次の燃焼解析の温度条件として渡す 手順を,固体温度が定常になるまで繰り返し実施し た.実機とのキャリブレーションとして、副室の側 壁に熱電対を埋め込んで温度測定を行い,実測値と 解析値が合うように、銅スペーサの接触熱抵抗の値 を調整した.温度測定結果を用いた検証により、収 束時の温度が実験値と 15℃以内で一致することを 確認した.

事前検討により, 副室内で高温化しやすい部位は 点火プラグの電極先端と, 副室先端のノズルキャッ プ部(図11(a)参照)であることが分かった.一般 的に点火プラグ温度が 950℃を超えると自着火が 発生することから, 点火プラグ部は 950℃, ノズル キャップ部は 750℃を自着火限界として定義した. また, 点火プラグの最高温度に着目すると, 検討開 始時の初期形状においては, 目標である 950℃を大 幅に超過してしまうことが分かった. 最高出力条件 におけるこれら 2 か所の温度が, 異常燃焼発生の閾 値以下とする副室形状を,3次元燃焼解析と固体熱 伝導解析を連成させたシミュレーションにより検 討した.

副室の温度解析結果を図 12 に示す. 図に示すよ うに、副室壁内に冷却水ジャケットを設け、プラグ の熱を副室を介して冷却水側に流す構造を考案し た.冷却水温度は 80℃、冷却水流路の熱伝達率は エンジンヘッド内部の冷却水の伝熱面と同じ値と した. この構造により、点火プラグでは目標の 950℃以下である約 910℃. プラグキャップの最高 温度は目標の 750℃以下である、530℃程度となっ た.



図12 副室の温度解析結果

## 5. 結言

オープンソースソフトウェアである OpenFOAM を用いて、エンジンのシミュレーションを可能とす るための開発を行った.既存の OpenFOAM の機能 を拡張することで、バルブやピストンといった移動 境界を考慮した流動、噴霧や液膜の挙動、詳細な点 火挙動を考慮した予混合燃焼などのマルチフィジ クスをシミュレーションで予測できるようにした.

また、本解析ソフトウェアを熱設計に活用した事 例として、同じくオープンソース CAE ソフトウェ アである Salome-Meca と組み合わせることで、副室 式点火装置の構造検討を行った.燃焼からの過大な 入熱と冷却不足による過熱を考慮するため、

Salome-Meca による固体熱伝導解析と OpenFOAM による燃焼解析の連成解析を行う仕組みを構築した.

シミュレーションにより, 点火プラグでは目標の 950℃以下である 910℃, プラグキャップの最高温 度は目標の 750℃以下である 530℃程度となる副室 構造を提案した.

#### 参考文献

- Günter F., Proceeding for AVL International Simulation Conference, (2019).
- [2] Hrvoje, J., International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 1-2 (2009) 89.
- [3] Aubry, J.P., Gmsh and Salome. Paris: Framasoft, (2013).
- [4] Archambeau, F. et al., International Journal on Finite Volumes, 1-1 (2004).
- [5] Economon, T. D. et al., AIAA Journal, 54-3 (2016) 828.
- [6] 畝村毅ら, 生産研究, 56-1 (2004) 40.
- [7] 柚木啓太ら, 日本燃焼学会誌, 56-177 (2014) 266.
- [8] 小林克年,西嶋規世,日本機械学会論文集(B 編),79-800 (2013).
- [9] Ikegawa, M. et al., Society for Imaging Science and Technology, 2015-1 (2015) 13.
- [10]Nguyen, T. et al., SAE Technical Paper, (2014).
- [11]Hosaka, T. et al., SAE Technical Paper, (2016).
- [12]Obokata, T. et al., The international symposium on diagnostics and modeling of combustion in internal combustion engines, (2008).
- [13]Sukegawa, Y. et al., JSAE Review, 24-2 (2003) 123.
- [14]Patterson, M. and Reitz, D., Journal of Engines, 107-3 (1998) 27.
- [15]O'Rourke, J. and Amsden, A., SAE Technical Paper, (1987).
- [16] 稲毛真一,大塚雅哉,日本機械学会論文集(B 編),61-586 (1995) 2290.
- [17]Hosaka, T. et al., ASME 2017 ICEF Technical Conference, (2017).
- [18]井上洋ら,日本機械学会年次大会講演論文集, 2000-4 (2000) 377.
- [19]Fan, L. et al., Journal of Engines, 109-3 (2000) 1977.
- [20]Duclos, JM. and Colin, O., Proceedings of COMODIA 2001, (2001) 343.
- [21]Hosaka, T. et al., Proceedings of the 14th OpenFOAM Workshop, (2019).
- [22]米谷直樹ら, JSAE 2021 年春季大会, (2021).

アルミニウム生産プロセスにおける OpenFOAM の活用 Utilization of OpenFOAM in an Aluminum Making Process

> 山本 卓也, コマロフ セルゲイ (東北大学大学院工学研究科) Takuya YAMAMOTO, Sergey KOMAROV (Tohoku University) e-mail: t-yamamoto@tohoku.ac.jp

#### 1. はじめに

近年、オープンソースソフトウェアが伝熱分野 では広く活用されており、流体、伝熱を解析でき るものとして, OpenFOAM, SU2, FrontFlow 等が良 く知られている. オープンソースはユーザー側で プログラムを変更し、追加機能を実装することが 可能であるため、拡張性が高い.また、プリ、ポ スト処理が実装されているものが多く、ユーザー 側でこれらの処理をプログラムで実装する必要が 無く, 使い勝手が良い. 一方で, オープンソース はマニュアルやグラフィカルユーザーインターフ ェースが少ないため, 商用ソフトウェアと比較す ると、新規ユーザーの敷居が高いものとなってい る. このような状況ではあるが, オープンソース を活用した論文数は飛躍的に増加しており, OpenFOAM を例にすると, scopus でキーワード検 索した文献数では2008年に15報であったものが、 2013年には 218報, 2018年には 735報へと増加し ている.

著者らは、金属生産プロセスにおける精錬、鋳 造工程において OpenFOAM を活用し、超音波処 理による溶融金属中不純物無害化やガス吹き込み 操作による溶融金属中からの不純物除去現象を調 査している.以下、アルミニウムの超音波鋳造時 における OpenFOAM を活用した研究を紹介する.

#### 2. 溶融アルミニウム中での超音波処理

凝固過程時に溶融アルミニウム中へ超音波を照 射するとその金属組織を改質できることが知られ ている[1].液体中に超音波を照射した際に発生す る現象を図1に示す.超音波を溶融アルミニウム に照射すると,音響キャビテーションが生じ,音 響キャビテーションの非線形振動,局所ホットス ポットの生成,キャビテーションからの液体ジェ ットの発生に加え,キャビテーションによる音波 散乱,マクロな音響流,気泡周囲のミクロな音響 流が発生する[2]. 金属組織改質は音響流による温 度均一化,気泡周囲温度変動,キャビテーション 圧壊時の衝撃波による核生成促進,液体ジェット による晶出した金属組織の分断,ソノキャピラリ 一効果,音響流による金属組織分断等様々な説が 提案されている[1]が,実際のところよく理解され ていない.これらの一つ一つの現象を解明するた め,溶融金属中の音響キャビテーションのダイナ ミクスから応用先として期待されるアルミニウム の超音波半連続鋳造時の現象解明まで幅広く取り 組んでいる.以下に,OpenFOAMを改良して利用 した研究である,1.アルミニウム凝固時の体積収 縮現象,2.アルミニウム超音波半連続鋳造,3.音 響キャビテーション気泡の非線形振動に関して紹 介する.



# 図1 液体中への超音波照射時に生じる現象の概略図

#### 3. 数值解析手法

#### 3.1 アルミニウム凝固時の体積収縮現象

超音波鋳造のるつぼ実験時には超音波処理した 溶融金属を鋳型に流し込み,凝固させる.この際, 鋳型内冷却速度によって金属組織形態が変化する ため,鋳型内冷却速度を正確に予測することは重 要であるが,アルミニウムの凝固時には密度変化 が大きく,体積収縮の影響を考慮しなければなら ない.また,これによって引け巣と呼ばれる欠陥 が生じる.この現象では,気液混相流,体積変化, 液相から固相への相変化を取り扱う必要がある. これらの現象を数値モデルで表現するため、気液 混相流モデルとして、代数的に界面再構築を行う Volume of Fluid (VOF)法[3],凝固モデルとして、 Enthalpy Porosity法[4]を組み合わせた.

支配方程式として、Enthalpy 収支式,Navier-Stokes 式,質量保存式を利用した.温度差による 密度差対流はBoussinesq 近似,凝固,固液共存領 域における多孔体モデルとして,Carman-Kozeny モデル,固相率は誤差関数モデル[5]を採用した. また,相変化に伴う密度変化による体積収縮モデ ルはBounds らのもの[6]に従うとした.表面張力 は CSF モデル[7]で表現したが,界面曲率計算時の 誤差低減のためLaplace filter [8]を導入した.また, 温度差と自由表面を有する場合,一般には Marangoni対流が発生するが,溶融アルミニウム は空気中の水蒸気,酸素と反応性が高く,薄い酸 化皮膜を瞬時に形成するためモデルとして導入す る必要がない.物性値としては,Leitner らの報告 値[9]を用いた.

アルミニウム凝固時の引け巣の形状と鋳物のア スペクト比の関係性を調査するため,幅5mm,高 さ10,20,40mmまで注いだ溶融アルミニウムの 凝固過程を計算した.また,鋳型表面での温度境 界条件は Newton の冷却則で与え,上側境界を境 界面での圧力勾配に応じた自由流入出条件である とした.また,Enthalpy-Porosityモデルによる溶 融現象はBrentらの結果[10]と比較,検証し,温度 場を含む VOF 法では,Sen&Davisの結果[11]と比 較,検証し精度良く計算できることを確認した上 で上記数値モデルを構築した [12].



図 2 アルミニウム超音波半連続鋳造プロセスの 概略図

#### 3.2 アルミニウムの超音波半連続鋳造

アルミニウムの展伸材の多くは半連続鋳造で製 造される(図2).この半連続鋳造プロセスでは鋳 型の下から水を直接アルミニウムに吹き付けるこ とで連続的に真っ直ぐ下に凝固させるプロセスで ある.これは,連続的に数メートルに渡って鋳造 することから半連続鋳造と呼ばれる.超音波半連 続鋳造を行う場合には,超音波ホーンを溶融アル ミニウム中へ浸漬させるが,鋳造中の流動パター ンに応じて金属組織が変化することが報告されて おり[13,14],鋳造時のキャビテーション領域と流 動パターンの関係性が重要であると考えられる. このような大規模且つ高温なプロセス中の溶融ア ルミニウム中の熱物質流動凝固現象を実験的に観 測することは難しく,数値モデルによる予測が重 要となる.

このプロセスでは合金を取り扱うことがほとん どであるため、熱物質流動、相図(状態図)に応 じた凝固、凝固相の移動を取り扱う必要がある. また、超音波を照射する場合には、それに加え、 音波の伝播、キャビテーション、音響流等様々な 現象をモデルに組み込む必要がある.現在数値モ デル開発を含め研究に取り組んでいるところでは あるが、ここでは、物質移動の含まない熱流動凝 固解析のみ紹介する.

この半連続鋳造では,数100mm程度の円形(ビ レット)や四角形(スラブ)の鋳型から数mにわ たって引き抜く. ここで, 初期では計算領域が狭 いものの、最終段階では計算領域が長くアスペク ト比の大きいものとなる.これを計算するため, 境界面移動に伴い、計算格子を追加する動的格子 を導入した.支配方程式は、3.1 項とほぼ同様であ るが、凝固した鋳塊移動のため、Enthalpy Porosity 法を修正し、固体の移動速度を追加した[15,16]. また、超音波を照射する場合は、音波伝搬と熱流 動凝固解析を分離する2段階で計算した.1段階 目として線形振動する気泡分散中の音波伝播方程 式を解き、得られた音圧、音響キャビテーション 分布を利用し, 音圧分布に応じた音響流の体積力 を追加した熱流動凝固解析を 2 段階目に行った [17]. Al-17%Si 合金を利用し, 直径 203 mm の円 形の鋳型を用いた場合に1 m 引き抜くこととし, 鋳型や水冷部からの抜熱条件は Newton の冷却則 を利用し、熱伝達率としては文献値[18]を利用し

た.本計算では軸対称近似を利用し,特に凝固界 面形状の時間発展を調査した.また,凝固界面形 状の点から実機試験結果と比較し,検証した[15].

#### 3.3 音響キャビテーション気泡の非線形振動

溶融アルミニウム中での超音波照射下のキャビ テーション気泡の運動と晶出した金属組織の関係 性を調査する必要があるが、キャビテーション気 泡の非球形非線形動力学が明確でないものが多い. そこで、モデル系として水中、のキャビテーショ ン気泡もしくは水中に液滴が分散する液液混合系 においてキャビテーション気泡とその他分散相と の相互作用を解明し、本稿では紹介しないが実験 結果とも比較した.

方程式としては圧縮性の Navier-Stokes 式,連続 式,Energy 収支式を解くこととし,気液混相流モ デルとして,圧縮性を加味するが上記と同様の VOF 法を利用した.また,他分散相との関係性を 解明する場合においては,3相 VOF 法を利用する こととし,CSF モデル計算時には Laplace Filter を 導入した[19,20].また,キャビテーション気泡が 圧縮時には非常に小さいスケールになるため, Adaptive Mesh Refinement (AMR)を利用して,界 面付近でのみ計算格子を細分化した.立方体の計 算領域の境界で 20 kHz の超音波を与え,気泡の振 動,分裂,他相との関係性を調査した.

上述全ての数値解析で OpenFOAM を活用し, 上記モデルを解析できるようプログラムを修正し, 計算結果が上述の他研究と良好に一致しているこ とを確認した上で解析を行った.

#### 4. 数値計算結果

#### 4.1 凝固時の体積収縮現象

アルミニウムの凝固時の固相率分布,気液界面 位置を図3に示す.凝固開始直後では,初期界面 高さで凝固が始まるが,凝固収縮に伴い,液面が 低下する.凝固が進行するに従い,低下した液面 位置で凝固するため,引けが生成する.また,比 較対象として収縮影響を考慮しなかった計算結果 を示すが,冷却速度に大きな影響はないものの, 最終的な界面形状が異なる.

続いて,凝固界面形状に対する注湯した溶融ア ルミニウム領域のアスペクト比の影響を図4に示 す.時間発展に伴い凝固が進展し気液界面が低下 するが,アスペクト比の大きい場合には特に引け 巣形状が鋭くなり,最終凝固時に急速にその界面 位置が低下する.このような現象は実験的にも報 告されており,定性的に実験結果と一致する.ま た,溶融アルミニウムは水素を含有し,凝固時に 水素気泡が発生して固体中に気孔として取り込ま れ,収縮量が変化する.このような気泡生成によ る収縮量変化に対しても,今回利用した方法[6]と 同様に数値モデルに取り入れることが可能である.



図 3 アルミニウム凝固時の固相率分布の時間進 行:(a) 収縮影響を考慮した場合,(b) 収縮影響を 無視した場合



図 4 異なるアスペクト比の鋳型におけるアルミ ニウム凝固過程:アスペクト比2(a),4(b),8(c)

#### 4.2 アルミニウムの半連続鋳造 [15,16]

アルミニウムの半連続鋳造時の鋳造速度を変化 させた場合の温度分布を図5に示す.図中で白線 は液相線,固相線温度を示す.鋳造速度上昇に伴 いサンプ(溶融領域)は深くなり,固液共存領域 も増加する.また,180 秒程度からはおおよそ定 常的な状態へと変化する. 鋳造速度が大きい場合 には径方向の温度差が大きくなり,強い熱応力が 加わることが予想される.



図 5 アルミニウム半連続鋳造時における温度分 布:(a) 鋳造速度 200 mm/min,(b) 鋳造速度 100 mm/min



図 6 アルミニウム超音波半連続鋳造時における 温度分布: (a) 鋳造速度 200 mm/min, (b) 鋳造速度 100 mm/min

超音波を照射した場合の結果を図6に示す.超 音波照射時には音響流が発生し,音響流によって 温度場振動が大きくなることが見て取れる.また, 音響流によって特に鋳造初期にサンプが深くなり, 底部まで溶融金属が到達する.加えて,音響流に よって一度半凝固した領域が再溶解しており,固 液共存領域が大きく振動する.再溶解が生じると 金属組織構造にも影響を与える.また,鋳型付近 での温度振動が大きくなると,鋳肌構造にも影響 を与えることが想定される.超音波鋳造では,鋳 肌組織がより平滑化されることが実験的に報告さ れており[16],音響流によるサンプ内部乱流化に 伴う温度変動による影響が疑われる.また,この 研究では物質移動,状態図(相図)との連成が行 われていないため,今後より詳細な解析が必要で あり,各合金種に対して現象を定量化されること が望まれる.

# 4.3 超音波キャビテーション気泡の非線形振動 [19,20]

溶融アルミニウム中での音響キャビテーション 気泡のサイズを予測することが必要であるが,基本的に溶融金属中の現象を観察することは困難で ある.このため,超音波印加時に気泡が分裂する 条件を求めることで擬似的に気泡サイズを予測す ることとした.まずは,水中の音響キャビテーションで調査した.

音圧振幅が低い場合には気泡は球形のまま音圧 振動と同位相で振動するが, 音圧振幅が上昇する と非線形振動を開始し、さらに大きな音圧振幅で は気泡は分裂する.数値解析結果による気泡分裂 条件付近での気泡運動を図7に示す.気泡分裂直 前では非線形な振動パターンを取り, Rayleigh 収 縮後に非球形の十字状に振動する. さらに少し音 圧振幅が大きい条件では, 十字状に振動する際に 分断する.この分裂挙動は高速度ビデオカメラを 用いた実験でも同様に観察された[19]. Brenner ら のRayleigh-Plesset 方程式の形状不安定性に対する 安定性解析結果[21]とこの条件を比較すると、よ く一致している.また,形状不安定性が発生する 条件よりわずかに大きい音圧振幅で気泡が分断す る. つまり, Rayleigh-Plesset 方程式の形状不安定 性に対して安定性解析を行えば、水中であろうが 溶融アルミニウム中であろうが、気泡径を推測で きると考えられる. また, 球形振動の場合には圧 縮時に気泡中心で高温場が発生するが、界面付近 の温度はほとんど上昇しなかった.一方で、非球 形振動する場合には,界面付近の温度も変動した. つまり、非球形振動は溶融アルミニウム中の金属 間化合物の核生成に寄与する可能性がある.



図7 音響キャビテーション気泡の分断の様子[19]

次に,音響キャビテーションが他相に及ぼす影響を調査するため,超音波照射下での水中のキャ ビテーションと液滴の関係性を調査した[20].液 滴として,シリコーンオイル,もしくはガリウム を用い,キャビテーション気泡と一定間隔離した 場所に配置し,超音波を照射した条件で計算を行った.

図8に音響キャビテーションと液滴の関係性を 示す. 図中左上の数字は時間を表し、単位はµs で ある.キャビテーション気泡は音圧の低下に合わ せて膨張し, 音圧が上昇するにつれ急速に圧縮さ れる. 圧縮される際に、球周辺で非対称性を持つ ことから液体ジェットが生成される.また、驚く べきことに、ガリウム液滴を利用した場合には壁 面近傍のキャビテーション気泡と同様,液滴に向 かって液体ジェットが生成するが、シリコンオイ ルの場合には、液体ジェットの発生方向が反転す る.シリコンオイルの場合は密度が低く、液滴が 大きく変形するため、気泡の急速な収縮時に気泡 周囲の流動パターンが変化し、液滴側に流れが集 まることで、液体ジェット発生方向が反転したと 考えられる.また、実験的にこの液体ジェット発 生方向が反転するかを確認するため、液滴周辺の キャビテーション気泡を高速度ビデオカメラで撮 影した[22]. ガリウムの場合にしか撮影すること に成功しなかったが, ガリウム液滴を利用した場 合には、液体ジェットは液滴に向かって発生した. また、この際に計算結果と同様に、液体ジェット 発生直後に微細液滴が主な液滴から離脱した. そ の後、レーザーキャビテーションの場合ではある が、別の研究者によって油滴から反対方向に向か って液体ジェットが発生すると実験的に報告され た[23]. これは、キャビテーションからの液体ジ ェットのスケーリング則[24,25]を利用することで 説明できるが,液滴と連続相の密度比が重要であ ると考えられる.溶融アルミニウム中でのキャビ テーションと金属間化合物の関係性は構造がより 複雑であると考えられ,更なる調査が必要である.

(1) Water-Cavitation-Gallium system Cavitation



Cavitation



図 8 液滴と音響キャビテーションの相互作用: (1) 水-キャビテーション-ガリウム系, (2) 水-キャ ビテーション-シリコーンオイル系[20].

#### 5. さいごに

アルミニウムの生産プロセスの研究の一部に OpenFOAM を活用した事例を報告した. 超音波鋳 造プロセスの全容を解明するには程遠いが, OpenFOAM を利用した数値計算によって,徐々に 基礎知見が積み上がってきている.また、今回紹 介していないが、OpenFOAM には solver が多数準 備されており, 圧縮性, 非圧縮性流体, 熱対流, 乱流,燃焼,電磁場の解析に加え, Euler-Euler, Euler-Lagrange モデル, DEM, CFD-DEM 連成, 随 伴解析等を行える.一方で、オープンソースであ ることから上記のようにコードを修正し、解析し たい現象に対して拡張することができる. 拡張性 が高いため、著者らは他にも例えば超音波伝播 [26],熱対流凝固と溶存ガスによる気泡の生成と 運動に対する Euler-Lagrange 連成[27]や状態図(相 図)と連成したマクロ偏析解析等も行っている. また、多数の研究者が拡張プログラムを git 上で 公開しており, 今後更なる多数の現象を解析でき るプラットフォームになる可能性が高いと思われ る.

#### 謝辞

本研究の一部は、日本アルミニウム協会アルミ ニウム研究助成,軽金属奨学会研究助成,東京大 学情報基盤センター若手・女性利用者推薦,日本 製鉄若手教員委託制度,科研費(若手)の支援を受 けた.ここに謝意を表す.

#### 参考文献

- [1] Eskin, G. I. and Eskin, D. G., *Ultrasonic treatment* of light alloys melts, CRC Press, (2015).
- [2] Yasui, K., *Acoustic cavitation and bubble dynamics*, Springer, (2017).
- [3] Weller, H.G., Technical report of OpenCFD Ltd., (2008) TR/HGW/04.
- [4] Voller, V. R. and Prakash, C., Int. J. Heat Mass Transfer, **30** (1987) 1709-1719.
- [5] Rösler, F. and Brüggemann, D., Heat Mass Transfer, 47 (2011) 1027-1033.
- [6] Bounds, S. et al., Metall. Mater. Trans. B, **31B** (2000) 515-527.
- [7] Brackbill, J. U. et al., J. Comput. Phys., 100 (1992) 335-354.
- [8] Lafaurie, B. et al., J. Comput. Phys., 113 (1994) 134-147.
- [9] Leitner, M. et al., Metall. Mater. Trans. A, 48A (2017) 3036-3045.
- [10]Brent, A. D. et al., Num. Heat Tr.-B Fund., 13 (1988) 297-318.
- [11] Sen, A. K. and Davis, S. H., J. Fluid Mech., 121 (1982) 163-186.
- [12] Yamamoto, T. et al., Int. J. Num. Meth. Fluids,

**83** (2017) 223-244.

- [13] Komarov, S. et al., Metall. Mater. Trans. A, 46 (2015) 2876-2883.
- [14] Subroto, T. et al., JOM, 72 (2020) 4071-4081.
- [15] Komarov, S. and Yamamoto, T., Materials, 12 (2019) 3532.
- [16] Yamamoto, T. and Komarov, S., J. Mater. Process. Technol. 294 (2021) 117116.
- [17] Fang, Y. et al., Ultrason. Sonochem., 48 (2018) 79-87.
- [18] Weckman, D. C. and Niessen, P., Metall. Mater. Trans. B, 13B (1982) 593-602.
- [19] Yamamoto, T. et al., Ultrason. Sonochem., 58 (2019) 104684.
- [20] Yamamoto, T. and Komarov, S. V., Ultrason. Sonochem., 62 (2020) 104874.
- [21] Brenner, M. P. et al., Phys. Rev. Lett., 75 (1995) 954-957.
- [22] Yamamoto, T. et al., Ultrason. Sonochem., 71 (2021) 105387.
- [23] Orthaber, U. et al., Ultrason. Sonochem., 68 (2020) 105224.
- [24] Gibson, D. C. and Blake, J. R., Appl. Sci. Res., 38 (1982) 215-224.
- [25] Supponen, O. et al., J. Fluid Mech., 802 (2016) 263-293.
- [26] Yamamoto, T. and Komarov, S. V., Light Metals, 2019 (2019) 1527-1531.
- [27] Yamamoto, T. and Komarov, S. V., Int. J. Cast Metals Res., 32 (2019) 266-277.

OpenFOAM と伝熱問題 OpenFOAM and Heat Transfer Problems

## 1. はじめに

OpenFOAM は、偏微分方程式を有限体積法で解 くための C++ライブラリであり、オープンソース ソフトウェアとして公開されている. OpenFOAM そのものについては本特集号の他記事で詳細が説 明されているため、ここでは著者の個人的な経験 を元に、伝熱分野への適用について考える.

OpenFOAM が関心を集め,広く応用されている のは,その汎用性と公開性の高さが要因と考える. ソースコードが Github[1]や Gitlab[2]で公開され, ユーザと開発者とのバグに関するやりとりや開発 中のソースコードなども自由に閲覧できる.発見 したバグを報告すると,開発者が迅速に反応して くれ,必要な場合には即時に修正が施される.ユ ーザが開発したコードが取り入れられることもあ る.

日本で開発された優れたフリーソフトウェアと して, FrontFlow/red が存在[3]する. FronFlow/red は乱流の非定常現象の高精度予測が可能な LES を主体とした高性能なソフトウェアであり,国内 のスーパーコンピュータでの利用実績は高いと想 像される.しかし,ソースコードの入手や営利目 的での使用については手続きが必要であり,軽い 気持ちで触ってみるにはハードルが高いと感じら れるであろう.

OpenFOAM は非常に便利なものであるが,導入 への敷居や学習コストが高いと考える人も多い. OpenFOAM を CFD ソフトウェアと捉えると,こ の考えは納得できる.しかし,OpenFOAM はあく までも便利な C++ライブラリであると考えるべき ものである.すぐに実行できるソフトウェア・ソ ルバとしても提供されているが,これはライブラ リの使用方法を説明するためのサンプルとして添 付されていたものである.(商用ソフトウェアと して開発されていた FOAM がオープンソースに 移行した当時には,そのような記述があったと記 中川 慎二(富山県立大学) Shinji Nakagawa (Toyama Prefectural University) e-mail: snakagaw@pu-toyama.ac.jp

憶している.) こういった観点で OpenFOAM を見 ることができる人であれば,有効に活用できるも のである.

OpenFOAM の利用方法や学習方法について,イ ンターネット上に多くの情報が存在する.最近で は、日本語での解説書籍[4-6]も複数存在する.富 岳をはじめとする国内のスーパーコンピュータで もシステム側でインストール済みであり、ノート パソコンからスーパーコンピュータまでの幅広い ハードウェアを臨機応変に使うことができる.

OpenFOAM は流体解析を主としているが、伝熱 問題についても適用できる機能が含まれている. 本稿では、どういった機能が利用できるのかを説 明し、その利用例を紹介したい.

#### 2. OpenFOAM 標準機能

#### 2.1 標準ソルバ

OpenFOAM では,解きたい問題に含まれる物理 現象に応じてソルバを選択する必要がある. 商用 ソフトウェアのように,とりあえずソフトウェア を起動してから,解きたい物理現象のボタンを押 すといった形ではない.そのため,どのような機 能が含まれるソルバが存在するのか,また,どの 物理現象を含めてシミュレーションを実施したい のかを考え,ソルバを選択する必要がある.

OpenFOAM v2012 で「伝熱および浮力流れ」ソ ルバとして整理[7]されているものを表 1 に示す. ソルバ名に含まれるキーワードから,おおよその 機能を推測できる. Simple とは SIMPLE 法を利用 した定常ソルバ, Pimple とは SIMPLE 法と PISO 法とを組み合わせた非定常ソルバを表す.

計算領域内に固体領域と流体領域が存在し,両 領域で熱が移動する場合には,固体-流体の熱連 成(Conjugate Heat Transfer)を表す cht というキ ーワードの入ったソルバを利用する.これらのソ ルバは,領域毎に解を求める弱連成として実装さ れている. OpenFOAM で熱問題を扱う時の課題と して,この cht ソルバでの解析が長時間(商用ソ フトや改良コードに比べて数倍から数十倍)にな る[8]ことが挙げられる.これに対する改善は常に 話題となっており,近い将来のアップデートで改 善されると期待されている. OpenFOAM をベース とする商用ソフトウェア Helyx や, OpenFOAM の 派生版 foam-extend 4.1 では,改善されたコードが 存在する.

伝熱に関係するものとしては, 燃焼問題に関す るソルバも存在する.これについては,本特集号 の保坂氏の記事を参照していただきたい.

OpenFOAM が得意とする混相流に関するソル バでも,熱・エネルギー輸送方程式が解かれてお り,伝熱問題に適用することができる.表面張力 や接触角の温度依存性に関するモデルも存在する. ただし,これらの機能については,必要とする精 度で現象を再現できるのか注意深く検証する必要 がある.

固体領域を含まない外部流れの伝熱問題であれ ば、OpenFOAMを効率的に使うことができる.上 述した計算速度の問題から、固体領域を含む問題 に対しては、OpenFOAMの使用が適しているかを 検討する必要がある.

Solver Name	定常	非定常	浮力	非圧縮性	山体熱連成	重合格子	7 散混相流
buoyantBoussinesqPi mpleFoam		0	$\bigcirc$				
buoyantBoussinesqSi mpleFoam	0		0				
buoyantPimpleFoam		$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$			
overBuoyantPimpleD yMFoam		0	0	0		0	
buoyantSimpleFoam	$\bigcirc$		$\bigcirc$	0			
chtMultiRegionFoam		$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$		
chtMultiRegionSimpl eFoam	$\bigcirc$		$\bigcirc$	$\bigcirc$	$\bigcirc$		
chtMultiRegionTwoP haseEulerFoam		0	0	0	0		0
thermoFoam		$\bigcirc$					

表1 伝熱分野標準ソルバと対応機能(v2012)

日

# 2.2 標準ライブラリ

OpenFOAM には数多くのライブラリが存在す

るため、全てについて説明することはできない. 例えば、OpenFOAM v2012 で thermophysical モデ ルとして紹介されているものは次の通りである [9].

- Basic thermophysical models
- Reaction models
- Radiation models
- Laminar flame speed models
- Barotropic compressibility models
- Thermophysical properties of gaseous species
- Functions/tables of thermophysical properties
- Chemistry model
- Other libraries

それぞれの物理現象について複数のモデルが含 まれている. 例えば放射に関しては, Finite volume discrete ordinate 法, P1 法, 形態係数法, 日射モデ ルなどが存在する. 前節で紹介した伝熱関連ソル バでは, これらの放射に関する機能が利用可能で ある.

# 2.2.1 乱流モデル

OpenFOAM では、DNS、LES、DES、RANS に よる乱流計算が可能である.流れ場に対しては、 レイノルズ平均乱流モデル RANS として、数多く のモデルが用意されている.しかし、温度場に対 しては乱流プラントル数を指定する0方程式モデ ルが標準機能として存在するだけである.乱流伝 熱については、さらなら機能の充実が求められる.

#### 3. 適用事例

#### 3.1 密閉空間内自然対流

OpenFOAM による自然対流問題への取組み例 として,BettsとBokhariによる実験[10,11]との比 較を紹介する.これは,OpenFOAMの例題として, 実験結果とシミュレーション結果との比較までを 自動化する方法が組み込まれているものである.

計算対象は、幅 76mm×奥行き 520mm×高さ 2180mm の薄い矩形容器である. ERCOFTAC の case079 として実験結果が公開[11]されている.対 面する壁面を高温と低温に維持することで、矩形 容器内に自然対流が生じる.上下面および前後の 面は断熱とされている.シミュレーションでは、 レイリー数が 8.6×10<sup>5</sup>の条件を対象としている.

ソルバには buoyantSimpleFoam を利用し, 圧縮 性流体(空気を理想気体として扱う)の定常流れ を RANS 型乱流モデル (k- $\omega$  SST) によって予測 した. OpenFOAM 標準添付の例題 (例題名: buoyantCavity)を元に、メッシュ数を 70×720× 180 個と増やし、収束判定条件を厳しくするなど の調整を加えた. 乱流プラントル数  $Pr_t$ はデフォ ルト値の 1.0 とし、壁面では P 関数に  $Pr_t = 0.85$  を 与えた.



低温壁から高温壁へ向かう距離 x をチャネル 幅 W で除して無次元化した温度分布を図1に示 す.同様に高さ方向速度の分布を図2に示す.ど ちらも,高さ方向距離 y を容器高さ H で無次元 化した3つの無次元高さでの分布を実験結果とと もにプロットしている. 定性的には温度分布および速度分布の予測が可 能である.定量的な予測精度については,物性値 や乱流モデルの整合性,ならびに,乱流モデルで の浮力効果などの検討によって,さらに向上させ る必要がある.なお,OpenFOAMには,浮力効果 を加味した k-εモデル[12]が実装されている.





#### 3.2 単純な強制対流

OpenFOAM による計算精度の検討を目的として, 直円管内部の乱流熱伝達を計算した[13]. 直径 3mm, 長さ 100mm の円管に水を流し, レイノルズ数を 6,200 とした. 流路入口では一様な速度および温度分布を与えた. 温度場の境界条件とし

て, 流路壁面で一様熱流束 1.06×10<sup>-5</sup> W/m<sup>2</sup> を与 えた.

この円管内部に,一辺が 0.1mm の立方体である セルを基準セルとして配置した.円管の形状にフ ィットしたセルを,OpenFOAM と併用することを 目的として開発されているメッシュ生成ソフト cfMesh によって生成した.管路近傍には境界層レ イヤーを配置した.これによって,壁面隣接セル 中心と壁面との無次元距離 y+ は1以下となる. セル総数は,1,312,448 である.

使用した OpenFOAM のバージョンは 2.4 であり, ユーザにより開発された低レイノルズ数型 k-ω SST モデル[14]を使用した.この乱流モデルを使 用することで,圧力損失の理論値との差は約 5% となった.

図3に、円管軸に沿った局所ヌセルト数分布を 示す. 乱流プラントル数は 0.85 とした. 出口付近 でのヌッセルト数は, Gnielinski による式[15]で求 めた値 55 に近く, その差は約 5%である.



図3 円管壁面での局所ヌセルト数分布

# 3.3 固体-流体熱連成

建築物外壁表面の温度分布を赤外線カメラで計 測し、得られた熱画像から外壁内部に生じた「は く離(浮き)」を検出する技術がある.この技術の 信頼性向上を目指し、試験体による実験と OpenFOAMによるシミュレーションを実施[16]した.

この問題では、時々刻々と変化する日射により 加熱される建築物壁面温度を解析する必要がある こと、固体(外壁表面のタイル、主材であるコン クリート、両者を結合するためのモルタル)、およ び、流体(固体周囲、もしくは、固体内部に発生 した浮き部)といった複数物質が対象であること から、chtMultiRegionFoam ソルバを採用した. OpenFOAM 3.0.1 を使用した.

厚さ約 200mm, 1m 角のコンクリート試験体が 対象である.この試験体表裏面には、モルタル層 とタイルが配置されている.物性値には、一般的 な値[17]を使用した.

試験体内部には、人為的な4箇所の浮き(はく 離)を設けた.はく離の厚みは、0.1mmから3mm である.2種類の試験体を用意した.1つは、タイ ルの裏面にはく離(空気層)が存在するもの、も う1つは、モルタル層とコンクリートとの境界に はく離が存在するものである.これにより、はく 離の発生箇所による違いを評価した.実験は株式 会社アイペックによって実施された.





Experiment

OpenFOAM

(a) 外気温上昇時(午前)



Experiment

OpenFOAM

(b) 外気温下降時(午後)

図4 内部欠損(はく離)を伴う建屋外壁面での温度分布

計算メッシュの生成には OpenFOAM 付属のメ ッシュ生成ユーティリティ blockMesh を使用した. OpenFOAMの複数のユーティリティを用いて1つ の試験体を 10 の領域に分け,それぞれの物性を与 えた.

測定した日射量に応じた熱量をタイル表面への 温度境界条件として与えた.ただし,周囲空気へ 一定の熱が逃げるとして,その熱量を差し引いた.

実験および OpenFOAM によるシミュレーショ ンで得られた試験体表面温度を図4に示す.図4(a) は早朝から昼にかけての外気温度上昇時の結果, 図 4(b)は昼から夕刻にかけての温度下降時の結果 である.実験では赤外線カメラで表面温度を測定 した. 表面に使用する材料によって周囲温度の影 響を受けるが、内部のはく離領域に応じた形状が 熱画像でも観察できる. はく離部の位置(表面か らの深さ)と大きさを変化させており、その影響 が見て取れる.シミュレーション結果でも、定性 的に一致する結果を得た. 屋外での赤外線カメラ による表面温度観測が主となるため、測定温度に 含まれる不確かさは大きく、定量的な議論は難し い. OpenFOAM を利用したシミュレーションによ って,外乱を除いた温度変化を予測することで, はく離検出技術の信頼性向上に貢献することが期 待されている.



図 5 固液相変化検証例題概要

# 3.4 固液相変化

OpenFOAM にはソルバには含まれない機能や 物理モデルを実行時に追加する fvOptions という 仕組みが存在し、ソルバで解く基礎式に生成項な どを追加することができる. 凝固および融解プロ セスをモデル化する solidificationMeltingSource と いう機能の検証例[18]を紹介する. この機能は, 車のガラス面での除霜を解析することを目的とし て, OpenFOAM 2.4.0 で追加されたものである.

OpenFOAM 3.0.0 の buoyantPimpleFoam を使用 した.このソルバ自体には凝固や融解のモデルは 含まれていないが,相変化に伴う潜熱の効果を生 成項として含めることが可能である.流体が凝固 して流れがなくなることは momentum porosity 法 によって実現されている.

計算領域は図5に示す2次元領域である.初期 状態では全領域が氷であり,左端を一定温度で加 熱することで融解面が進行する1次元非定常問題 である.この計算では重力加速度を0として対流 の影響をなくし,計算結果を理論解と比較した.

図6に,水と氷の界面位置の推移を示す. 横軸 が経過時間,縦軸は加熱面から融解面までの距離 を示す. 簡易的な機能追加ではあるが, OpenFOAM によるシミュレーション結果は定性 的には理論解と一致する.

しかし、solidificationMeltingSource機能では、領 域全域での計算には流体に与えた物性値が使われ るため、対象とする問題によっては実際とは離れ た結果となることがある点に注意が必要である. 凝固・融解問題を正しく解くためには、標準機能 だけでは難しく、本特集号で山本氏が紹介してい るようなカスタムソルバを用いる必要がある.



図6 融解時の水/氷界面位置の履歴

# 4. おわりに

本稿では、近年多くの関心が寄せられているオ

ープンソース CFD ソフトウェア OpenFOAM の伝 熱関連問題への適用について考えた. OpenFOAM は非常に多機能ではあるが、伝熱については、不 十分な機能も多い. ただし、オープンソースであ ることから、ユーザが機能を追加することで、様々 な問題を解決するツールとすることが期待できる.

OpenFOAM のカスタマイズには, 慣れと経験が 必要である.しかし,多くの情報が公開・共有さ れており,関連書籍[5]や講習会・勉強会も増えて いる.これらを活用することで,学部生や大学院 生が改造している事例も多い.

研究者・技術者が感心のある物理モデルを開 発・実装するだけで、大規模な並列計算を実行で きるようになることは、魅力的である.

様々な伝熱研究者が活用し、その成果とともに、 ソースコードを公開することで、伝熱研究がより 一層深化することが期待できる.

#### 参考文献

- OpenFOAM Foundation, "Official OpenFOAM Repository", https://github.com/OpenFOAM, (参 照 2021-05-10).
- [2] OpenCFD Ltd., "Development/openfoam repository", https://develop.openfoam.com/Development/open

foam, (参照 2021-05-10).

- [3] 東京大学生産技術研究所, "マルチフィジック ス流体シミュレーション・システム", 革新的 シミュレーションソフトウェアの研究開発, http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/rss21/theme/mult i/fluid/fluid\_softwareinfo.html, (参照 2021-05-10).
- [4] オープン CAE 学会編, OpenFOAM による熱
   移動と流れの数値解析(第 2 版), 森北出版
   (2021).
- [5] 株式会社テラバイト, OpenFOAM ライブラリ リファレンス, 森北出版 (2020).
- [6] 野村悦治, オープン CAE のための DEXCS for OpenFOAM ハンドブック, 丸善出版 (2021).
- [7] OpenCFD, "User Guide A.1 Standard Solvers", OpenFOAM, https://www.openfoam.com/documentation/user-g

uide/a-reference/a.1-standard-solvers, (参照

2021-05-10).

- [8] Villiers, E.d. et al., "A New Region-Coupled Framework for Conjugate Heat Transfer", 11th OpenFOAM WorkShop (2016), P075.
- [9] OpenCFD, "User Guide Table A.4: Libraries of Thermophysical Models", OpenFOAM, https://www.openfoam.com/documentation/user-g uide/a-reference/a.3-standard-libraries#x34-13713 1r4, (参照 2021-05-10).
- [10]Betts, P.L. and Bokhari, I.H., "Experiments on Turbulent Natural Convection in an Enclosed Tall Cavity", Int. J. Heat and Fluid Flow, Vol. 21(2000), 675-683.
- [11]Betts, P.L. and Bokhari, I.H., "ERCOFTAC case079 Turbulent Natural Convection in an Enclosed Tall Cavity Experiments", ERCOFTAC, http://cfd.mace.manchester.ac.uk/ercoftac/doku.ph p?id=cases:case079, (参照 2021-05-10).
- [12] Henkes, R.A.W.M. et al., "Natural Convection Flow in a Square Cavity Calculated with Low-Reynolds-Number Turbulence Models", Int. J. Heat Mass Transfer, 34 (1991), 1543-1557.
- [13]広瀬良平他2名、OpenFOAMを利用した電子機器液冷システムのシミュレーション、第53回日本伝熱シンポジウム講演論文集(2016)、 C211.
- [14] Bachant, P., "petebachant/kOmegaSSTLowRe", https://github.com/petebachant/kOmegaSSTLowR e, (参照 2016-03-11).
- [15]日本機械学会(編),伝熱工学資料 改訂第 5 版,丸善(2009) p.45.
- [16] 中川慎二他3名,赤外線熱画像を利用した建築物外壁はく離診断試験のOpenFOAMによるシミュレーション,オープンCAEシンポジウム2016 (2016), A21.
- [17]建築環境・省エネルギー機構,建築物総合エ ネルギーシミュレーションツール BEST プロ グラム 壁体材料の熱性能値, http://www.ibec.or.jp/best/program/db/,(参照 2021-05-10).
- [18]西田樹生、中川慎二、OpenFOAM による固液 相変化シミュレーションの検証、オープン CAE シンポジウム 2016 (2016), B32.

オープン CAE の連成解析ツール Elmer の活用 How to Use Elmer, an Open CAE Coupled Analysis Tool

> 柴田 良一 (岐阜工業高等専門学校) Ryoichi SHIBATA (National Institute of Technology, Gifu College) e-mail: ryos@gifu-nct.ac.jp

# 1. はじめに

製造業の DX 対応を追い風として, CAE の活用 が幅広い業種や様々な規模の企業において, 取り 組まれています. この中でソースコードが公開さ れたオープンソースソフトウェアによる CAE シ ステムの活用も, ライセンスフリーによる無償利 用のメリットだけでなく, ソースコードをプラッ トホームとして,研究開発を目的とする場面で使 われています.

また CAE に対するものづくりの現場において, 現実の複雑な現象を再現し分析するためには,気 体・液体・固体を対象として,様々な物理現象を 組み合わせた解析が必要になっており,様々な産 業分野において連成解析への関心が高まっていま す.

オープンソースは、ソースコードが公開されて いることより、プログラム内部のデータ構造や入 出力ファイルのデータ形式も確認できる特徴をも っているため、異なるプログラムを連携させる連 成解析を実現するためには、適したシステムとな っています.ただしこの場合には、利用者がシス テムを統合するための高度な研究開発が前提とな ってきます.

現時点では,構造解析や流体解析など独立して 開発されるオープンソースのツールに対して,共 通基盤となる連成解析ツールで公開されたものは, 世界を見ても少ないのが現状です.また公開され たものでも非常に高度なシステム構築技術が必要 となるため,ものづくりの現場で容易に活用でき る状況ではありません.そのため,ものづくりに おける連成解析の実現においては,オールインワ ン型のツールが期待されています.

そこで本稿では、オープンソース連成解析ツー ルとして、オールインワン型としてほぼ唯一の存 在である「Elmer」に注目し、この概要と活用技術 を紹介することを目的としています.

#### 2. 連成解析ツール Elmer について

#### 2.1 Elmer の概要

この連成解析ツール Elmer (エルマー) は,公 式サイト (https://www.csc.fi/fi/web/elmer) で配布 されている,オープンソースの CAE ツールです. 本質的な機能としては,各種物理モデルの偏微分 方程式を解くための,有限要素法による汎用ソフ トウエアパッケージと言えます.

つまり,偏微分方程式で記述された理学や工学 で用いられる様々な現象に対して,流体力学,構 造力学,電磁気学,熱伝達,音響などの物理モデ ルを,有限要素法により統一的に取り扱うことが 可能です.

さらにこれらを連成して処理することが、開発 の主目的となっており、これよりマルチフィジッ クスに対応した多機能で統合型の連成解析ツール として、様々な数値解析の応用において注目され ています.

この Elmer は, 1995 年からフィンランドの技術 基金: Tekes に基づいた国家的な CFD プロジェ クトによって開発が始まり,既に 25 年以上継続し ている息の長い連成解析ツールになります.

当初のプロジェクトが終了した後,開発は CSC (フィンランド科学 IT センター)によって多面的 な研究開発が継続されてきました.2005 年になっ て GPL のラインセンスで公開され,オープン CAE としてユーザー数が増加しています.

#### 2.2 Elmer の機能

Elmer は、様々な物理現象の数値解析のために、 偏微分方程式で記述された幅広い物理モデルと解 析ソルバーが提供されます.以下に重要なものを 要約します.

・伝熱:伝導,対流,放射,及び相変化のモデル

- ・流体の流れ: Naiver-Stokes 方程式, k-ε モデル
- ・粒子の輸送:一般的な対流拡散方程式
- ・固体構造物:弾性および弾塑性の構造解析

- ・音響特性:Helmholtz 方程式,理想気体の波動
- •電磁気学:静電学,静磁気学,磁気誘導
- ・マイクロ流体力学: Poisson-Boltzmann 方程式
- ・レベルセット法:オイラー自由境界問題
- ・量子力学:密度汎関数理論(Kohn-Sham)

## 2.3 Elmer の長所と短所

このように多彩な機能を持つ Elmer ですが,こ れから Elmer を活用しようとする利用者のために, 開発者自らが記した「長所:+項目」と「短所: 一項目」は以下のとおりです.なおこれらは主観 的な評価ですので,状況や目的によっては不完全 な判断かもしれませんが,オープン CAE に共通す る内容とも言えます.

【長所:+項目】

・Elmer はオープンソースなので、それぞれの物 理モデルの解法を確認し、また容易に変更するこ とが可能です.

・Elmer は物理モデルの方程式の連成が柔軟に可 能であり,新たな物理現象に関する変数を導入す ることが容易です.

・連成解析で必要となる全ての物性値は、場の変数やその他のパラメータとして自由に設定することが可能です.

・Elmer では、先に挙げたように最新の研究成果 を踏まえて、多数の効果的な数値的手法が選択可 能です。

・Elmer では、流体解析や構造解析をはじめ、多 くの物理モデルで標準的に使用される有限要素を 使用可能です.

・Elmer では、連成解析の高速化のために物理モ デルの支配方程式の構成と反復解法は並列化が可 能です.

・Elmer には、簡単な解析を設定するための、マウスで効果的に操作するGUIツールがあります。
 ・Elmerのソースコードは容易にコンパイル可能

であり, Windows ではコンパイル済みのバイナリ が用意されています.

・Elmer のユーザコミュニティは世界で常に成長 し続けており,多くの科学技術の論文で既に活用 されています.

【短所:一項目】

・Elmer はツールやドキュメントなどの様々な要素で構成されていますが、すべてが揃って最新の状態になっていません.

・複雑な連成解析の設定では、高度な知識が必要 になります.従って他の何らかの FEM パッケー ジの利用経験が必要です.

・Elmer には、複雑形状で複数領域の解析対象に 対してメッシュを生成するツールがありません. インポートのみが可能です.

・Elmer が提供するソルバーでは、マルチフィジ ックスに関する問題において、一般的でない物理 現象には対応していません.

・例えば流体解析では、物理モデルの基本機能に のみ対応し、乱流および多相流のモデル化に関す る機能がほとんどありません.

#### 3. 基本的な流体解析の手順

この例題は、流体解析のチュートリアルでよく 取り上げられる「カルマン渦列の不安定性を見る 流体解析」で、渦が交互に発生して放出される「フ オンカルマン不安定性」を調べます.図1に示す ような、2次元の長方形空間(0.41×2.2m)を対象 に、流入面の近くに円形の障害物があり、この後 ろに渦が交互に放出されます.



#### 図1 カルマン渦列の流体空間メッシュ

この例題のレイノルズ数を調べます.まず流入 面での速度分布は放物線状で,平均速度(V)とし ては空間の長手方向で流れる向きの Vx= 1.0 m/s です.流体の密度(p) 1.0 kg/m<sup>3</sup>,粘度(µ)0.001 kg/(m・ s)としています.

解析空間の寸法を見ると流入面の長さが 0.41 m で,直径 0.1m の円形の障害物の上 0.16m と下 0.15m の間隔が空いており,特徴長さを円形の直 径 0.1 m とします.従ってこの例題のレイノルズ 数 Re は,約 100 となります.

 $Re = \rho V L / \mu = 1.0 \times 1.0 \times 0.1 / 0.001 = 100$ 

この円形の障害物の上下の間隔が異なり,Y軸 方向の中央にないのは、カルマン渦を発生しやす くするために、障害物の上下で条件が異なるよう にするためと思われます.

#### 3.1 解析環境の構築

連成解析ツール Elmer は, 統合環境として GUI 層が可能なツールとして, Window / Ubuntu でのバ イナリインストールパッケージが公開されていま す.よって,オープンソースツールですが,利用 者がビルド作業をすることなく,インストーラー で簡単に導入できます.

ここでは利用者が多いと思われる Windows10 (64bit) を用いた導入手順の概要を説明しますが, Ubuntu18.04 では apt による導入も可能であり,統 合環境の GUI は全く同等起動で操作方法も共通 です.

Windows版 Elmer の, MPI 並列処理対応の統合 環境の最新版インストールパッケージは,以下の サイトからダウンロードします.

#### https://sourceforge.net/projects/elmerfem

#### File:ElmerFEM-gui-mpi-Windows-AMD64.exe

導入手順は、基本的にインストーラーの指示に 従って進めるだけですが、並列処理において Windowsのディレクトリ名では正しく動作しない 場合があり、インストール先を空白や記号を含ま ない「C:¥OpenCAE¥Elmer」のようにしました.

なおインストール手順では, Microsoft Visual C++ Redistributable や Microsoft MPI の導入を同時 に行います.

連成解析ツール Elmer は,統合解析ツールとなっていますが,プリ処理に関してはメッシュ作成 機能を持っていますが,複数領域に対して境界条 件などを設定する連成解析などの複雑な設定の場 合には,専用のプリ処理ツール SALOME を用い ることにします.

入手方法として, Windows 用インストールパッ ケージは,以下のサイトからダウンロードします.

http://www.salome-platform.org/downloads/current-version

#### File:SALOME-9.5.0.exe (執筆時最新版)

導入手順は、基本的にインストーラーの指示に 従って進めるだけですが、Linux ベースのツール なのでインストール先を空白や記号を含まない 「C:¥OpenCAE¥SALOME」のようにしました.

さらにポスト処理に関しては、以前は独自の可 視化ツールを用いていましたが、現在の活用方法 では解析結果に可視化ツール ParaView のデータ フォーマットである「VTU 形式」を利用します. この可視化データを活用するために定番である ParaView を導入します.

入手方法として, Windows 用インストールパッ ケージは,以下のサイトからダウンロードします. http://www.paraview.org/

File:ParaView-5.8.1-Windows-Python3.7-msvc2015-6 4bit.exe(執筆時最新版)

導入手順は,基本的にインストーラーの指示に 従って進めるだけですが,これまでと同様な理由 で「C:¥OpenCAE¥ParaView」のようにしました.

#### 3.2 例題の解析手順

連成解析ツール Elmer は, 統合解析ツールとして GUI 操作で容易に連成解析を実現します. ツール を起動して, 解析形状ファイルを読み込んでメッ シュを作成した状態が, 図2のようになります. 右側に有限要素法のメッシュが表示され, 基準長 さ0.02mの2次元三角形1次要素です. 左側にオ ブジェクトツリーが表示され, ここに連成解析の 実現に必要な以下の情報を設定します.

#### (1) Menu-Model> Setup

解析の全体に関する設定として、「入出力のファイ ル名・解析のステップに関する時間設定・物理定 数」の記入を行います. この例題では, カルマン 渦の成長を見るために,時間刻み 0.04 秒で 200 ス テップの非定常解析とします.

#### (2) Object-Add> Equation

この例題では、非定常流体解析のみを行うので、 「Navier-Stokes」のみを選択します. 収束条件の設 定変更が可能ですが、標準設定を用いて十分な結 果が得られます.

#### (3) Object-Add> Material

解析モデルの流体の材料特性の設定を行います. ここでは論文の設定に基づいて,渦の発生を可能 にするような理想的な材料特性を設定します.

#### (4) Object-Add> Boundary condition

解析モデルの境界条件の内容の設定を行います. 場所の設定は次の「Set boundary properties」で行います.この例題の境界条件の設定においては, 以下の3つを定義します.

流入面 Inlet: 左端の流入面(速度分布を数式定義) 滑りなし壁面 Wall:水平や上下の壁と円形の円周 流出面 Outlet: 右端の流出面(ゼロ圧力条件)

#### (5) Menu-Run> Start solver

ツールから標準の逐次実行できる. さらに並列処

理設定 Parallel settings による4並列処理を行うと, 解析は約2倍高速化されました.



図2 連成解析ツール Elmer のウインドウ表示

## 3.3 例題の解析結果

解析が終了すると、可視化ツール ParaView 用の VTU 形式のデータが解析ステップ毎に作成され ます.これを ParaView で読み込み、表面色を速度 として最後の解析ステップを表示すると、図3の ようなカルマン渦が確認できます.



図3 速度表示でのカルマン渦の状態

#### 4. 熱流体と構造との非定常連成解析

この例題では,熱源によって加熱された水が対 流して,水中にあるバイメタルを加熱することで, サーモスタットのように変形する様子を調べてみ ます.この場合には,通常の流体と構造の連成解 析の仕組みに加えて,熱移動も考慮する物理モデ ルを追加することによって実現します.

このバイメタルは2種類の薄い金属を張り合わ せたもので、熱に対して膨張する線膨張係数が異 なるため、大きく膨張する側の影響で構造部が曲 がる様子を確認することができます.

これまでの流体構造連成解析では、物理モデル として「流体解析・構造解析・格子更新」の3つ でしたが、本節の例題では「熱解析」が追加され、 これは流体部と構造部の両方に影響します.

熱源によって加熱された水が対流して、徐々に バイメタルの温度を上げて熱膨張の変形をみるた めに、非定常解析として計算します.またバイメ タルの変形は2次元的なので、この例題は2次元 モデルで考えます.

なお加熱による水の対流は、ゆっくりとした現 象なので、バイメタルが十分に変形するまでには 時間が必要であり、この例題では600秒間を対象 として、1解析ステップ1秒として行います.

#### 4.1 熱を考慮した連成解析

流体構造連成解析は,流体と構造の機械力学的 な挙動のみに注目していますが,マルチフィジッ クスの連成解析の中では一般的なものです.しか し現実には,何かのエネルギーによって移動や変 化などの機能を目的とした作られた人工物では, そのエネルギーのある部分は目的以外に,摩擦や 抵抗などによる熱発生に使われます.

っまり実現象を完全に再現しようとすると,必 ず「熱」を考慮する必要があるわけです.もちろ ん熱発生が僅かな場合で,影響なく拡散してしま う場合には無視することもできます.しかし自動 車もパソコンも移動や計算といった主たる目的以 外にも,冷却による排熱が重要な問題となってい ます.

通常の熱連成解析では、流体部と構造部におい て、熱がどのように移動するかを調べる場合が多 く、その場合には共役熱伝達解析(CHT: Conjugate Heat Transfer)として、流体と固体との間での熱の 相互作用による、それぞれの温度変化を求めてい ます.

しかし本例題では、固体つまり構造部の温度上 昇によって、バイメタルが変形する挙動を調べる ために、構造解析を追加しています.なお温度変 化による構造変形を調べる場合には、ElmerGUI の設定として「線形弾性構造解析:Linear elasticity」 ソルバーを利用します.

なお Elmer では、大変形を考慮した非線形弾性 構造解析ソルバーは、熱解析では利用できないの で注意してください.この設定条件より、加熱に よる構造物の変形は過大にならない範囲に制限さ れ、大きい場合でも構造部の要素分割を細かくし て、個々の要素の変形は小さい状態にする必要が あります.

#### 4.2 解析例題の定義

解析は図4に示す2次元モデルで,流体の解析 空間は縦(Y=0.60m)・横(X=0.45m)で,底面全 体を熱源の面として,ここで暖められた流体(水) が対流しながら上昇します.上部の中央からは 0.004x0.45mのバイメタル(2mmを2枚重ね)が 垂直下向きに接続されています.

上部と左右の壁面は,流体解析では滑りなし条 件で,熱解析では断熱としています.



図4 熱連成解析の解析モデル

連成解析ツール Elmer の標準設定でメッシュを 作成すると、図5に示すような3373 個の三角形1 次要素となります.解析空間は、左:流体空間・ 中:バイメタル左・右:バイメタル右、として領 域が分割されています.



図5 解析モデルの領域分割

この例題での流体構造連成解析では、物理モデ

ルとして流体空間にNavier-Stokes モデルによる流体解析,構造部分にLinear Elasticty モデルによる 構造解析を定義します.同時にそれぞれの物理モ デルに対して,熱解析も追加しています.

そのため本計算では,流体が構造に作用する力 は考慮しておらず,構造は熱応力のみによって変 形します.

熱による構造の変形であっても流体の格子を変化させるので、流体と構造の境界面において、2つの物理モデルの情報交換する Mesh Update モデルを定義します.

この例題の材料特性は、流体は現実の「水: Water」を基準に設定し、構造はバイメタルを構成 するために、現実の「アルミニウム」を基準とし て、変形が大きくなるように線膨張係数を「左構 造部:2 倍(x2.00)・右構造部:1/100(x0.01)」 として、仮想的な設定としています.

この例題では、熱源により加熱された流体(水) が、自然対流して上部のバイメタルまで熱を伝達 します.この流体が加熱されたとき、熱膨張によ る密度変化に比較して、膨張圧縮による密度変化 が無視できるとする近似計算手法「ブシネスク近 似(Boussinesq approximation)」を利用しています.

熱解析の初期条件としては,流体と構造ともに 通常の室温として,20℃(293.0K)とし,底面は, 100℃(373.0K)としています.

連成解析の境界条件としては、流体に関する設 定では、境界面は「滑りなし条件:Noslip」とし て、壁面では熱的には設定をしないので、「断熱」 として熱の移動はありません、流体が構造と接す る面の連成する境界条件は、滑りなし境界条件で として、バイメタルを固定する境界条件は、「XY 方向の変位 0」の設定とします。

#### 4.3 例題の解析結果

この例題では、非定常解析なので表示ステップ は 301 個あり、解析対象時間は 600 秒の挙動で、1 ステップ 1 秒として 600 ステップとなり、可視化 結果出力は 2 ステップ毎なので、0 から 300 の 301 個となります.

解析の初期状態を図6に示します. 底面の加熱 面が,赤色の「100℃(373.0K)」になっています.



図6 初期状態の温度分布

最終状態を図7に示します. 流体が加熱されて 対流している様子が分かります. バイメタルの最 大変形量が 0.02884m です.



図7 最終状態の温度分布

# 5. まとめ

連成解析ツール Elmer を利用することで, Windows-PC を用いて手軽に実践的な熱連成解析 が可能であることをご紹介しました.

なおここに掲載した内容の詳細については、参 考文献[1] にまとめているので、興味を持たれた 方はぜひ参考にして連成解析に取り組んでみてく ださい.

# 参考文献

[1] 柴田良一,「Elmer」ではじめる連成解析,工 学社 (2020).

# オープンソースソフトウェア OpenModelica と大学における教育と研究への適用事例

Open Source Software "OpenModelica" and Application Examples to Education in University Class and Researches

> 西 剛伺(足利大学) Koji NISHI (Ashikaga University) e-mail: nishi.koji@g.ashikaga.ac.jp

# 1. はじめに

現代の製品は、自動車に代表されるように、非 常に多くの部品やモジュールで構成され,複雑化, 高機能化している.限られた設計期間内に、シス テムの制御性や安全性を確保しつつ,高性能化, 省エネ化を実現するには、システム全体の挙動や 特性を見通すことが必要になる、そして、システ ム全体の挙動や特性を見通すには、部品やモジュ ールレベルはもちろん, 電気や磁気, 機械, 熱等, さまざまな物理ドメインを跨ぐシステムレベルで の動作や特性をモデル化し、シミュレーション実 行する環境が必要である.このような状況下,そ れを実現する手法として、モデルベースデザイン が注目されている.本稿では、モデルベースデザ インに活用することができるオープンソースの物 理モデリング及びシミュレーション環境 OpenModelica [1]について紹介するとともに、筆者 が携わっている大学での教育及び研究への適用事 例について紹介する. なお,筆者は電気系の分野 に所属しており, 教育事例については機械系では なく, 電気系の内容となる点, あらかじめご了承 頂ければ幸いである.

#### 2. Modelica & OpenModelica

#### 2.1 Modelica

OpenModelica は, Modelica [2]を用いた物理モデ リング及びシミュレーション環境である.以下, まず Modelica について説明する.

Modelica は、The Modelica Association が策定及 び管理する、電気や磁気、機械、熱等の物理系を モデリングするための、オブジェクト指向言語で ある.その歴史は 1996 年秋に行われた会議に遡り、 20 年余に渡って、仕様が拡張されてきた.モデル ベースデザインでは、シミュレーション対象を形 状を伴わない概念モデルとしてモデル化する. Modelica では、電気工学において古くから用いら れてきた回路理論のように、その物理ドメインに おける流れとポテンシャルを組み合わせて概念モ デルを構成する.例えば、電気と熱は、表1のよ うに相似性があり、伝熱現象を熱回路網として表 現可能である.また、Modelicaは、単位の概念を 有し、1つのモデル内に複数の物理ドメインを共 存させ、さらに連成してシミュレーションを行う ことが可能である.

Modelica は、いわゆるプログラミング言語の一 種であり、C++、Java、Python といったプログラ ミング言語と共通する部分も多いが、特異な点と して、上述した

- ① 単位の概念を有する
- 他,
- ② GUI (Graphical User Interface) 仕様を有する
- ③ 言語仕様に則って記述された有償,無償の様々 なライブラリが利用できる
- ④代入式だけでなく、方程式を記述できる がある.②、③により、Modelica はプログラミン グ言語であるものの、モデル作成における作業の 大半をマウスによる GUI (Graphical User Interface) 操作で行うことができる.③の中心となるのは、 無償で提供される Modelica 標準ライブラリ (Modelica Standard Library、以下、MSL)[3]であ る.MSL は図1に示すように、電気(Electrical)、 磁気(Magnetic)、メカニクス(Mechanics)、流体 (Fluid)、熱(Thermal)の物理ドメインと単位を持 たない純粋な実数や複素数を扱うブロック (Blocks 及び ComplexBlocks)等から構成される.

表1 電気と熱の相似性

	電気 (単位)	熱(単位)
流れ	電流 (A)	伝熱量 (W)
ポテンシャル	電位 (V)	温度 (K)
抵抗	電気抵抗 (Ω)	熱抵抗(K/W)

MSL は Modelica の根幹を成すライブラリであり, 提供される部品モデルを組み合わせることで,さ まざまなモデルを作成することができる.また, MSL には多数のサンプルモデルが同梱されてお り,部品モデルの使い方を学ぶのに便利である.

## 2.2 OpenModelica

OpenModelica は、上述の通り、オープンソース の Modelica を用いた物理モデリング及びシミュ レーション環境である.モデルの作成、シミュレ ーションの実行、シミュレーション結果の可視化 及び保存まで一つのウィンドウ内で行うことがで きる.Windows版が提供されており、初心者でも 気軽にインストールし、使用できる.

OpenModelica ウィンドウを図2に示す.ウィン ドウ内左側には、ライブラリブラウザがある.ラ イブラリブラウザは、その名前の通り、ライブラ リや作成するモデルを一覧表示する.上述の MSL はデフォルトでライブラリブラウザにロードされ、 特別な設定を行うことなく使用可能である.また、 ライブラリブラウザ内でモデルを選択すると、画 面中央部にその中身が表示される.

#### 2.3 OpenModelica 使用の流れ

図3に示した集中定数の熱回路網の作成手順を 例に、OpenModelicaによるモデリング及びシミュ レーションの流れを説明する.

モデルを作成するには、空のモデルを新規作成 し、ライブラリブラウザで使用する部品モデルを 選択し、マウス操作でモデル内に配置していく.





図 4 は熱抵抗 Rth を配置した例である. 同様に, 発熱源 P, 熱容量 Cth, 環境温度 T<sub>A</sub>を配置し, こ れらをコネクタで接続する(図 5). 部品モデルに よっては, 設定値(Modelica ではパラメータとい う)を有する. それらを設定すればモデルは完成 である.



モデルが完成したら、OpenModelica ウィンドウ 内のシミュレーションの実行ボタンを押して、シ ミュレーションを実行することになる.一連の作 業は、マウス操作が主体であるが、OpenModelica はバックグラウンドで Modelica プログラムを生 成している.シミュレーション実行時、Modelica プログラムは、Modelica コンパイラによって、い ったん C コードに変換され、C コードから C コン パイラによって実行ファイルが生成される(図 6). そして、シミュレーションが自動的に開始される.

シミュレーションが完了すると、OpenModelica ウィンドウがプロット表示に切り替わり、画面右 側に変数ブラウザが現れる.そして、グラフ表示 させたい変数を選択すると、グラフにシミュレー ション結果がプロットされる(図7).シミュレー ション結果は CSV (Comma-Separated Values)フ ァイルにデータとして保存することも可能である.

#### 3. 大学教育への適用事例

#### 3.1 電子回路系授業での活用

足利大学電気電子分野では、学部1年次後期から電気回路を学ぶ.電気回路で出てくる素子は抵抗、コンデンサ、コイルといった受動素子であり、 オームの法則

V = RI

に代表されるように,流れ(電流)とポテンシャ ル(電位)の関係が線形である.ここで,Vは電 位差,Rは電気抵抗,Iは電流である.線形の関係 が成り立つ場合,1次の代数方程式を連立するこ とで流れを解くことができる.連立方程式の数が 少なければ,手計算でも解を得ることが可能であ る.一方,学部3年次から学ぶ電子回路は半導体 を含む回路であり,それほど簡単には行かない. 半導体は,整流,増幅,スイッチングを行う非線 形素子であり,電子回路では非線形素子の挙動を 理解する必要がある.半導体素子及び電子回路の 理解を深めるため,筆者が担当する電子回路系科 目では,演習の一部にOpenModelicaを用いたモデ ル化とシミュレーションの演習を取り入れている. 3.2節以降では,その取り組みについて紹介する.

#### 3.2 授業での活用例1(本質を理解する)

伝熱工学を始めとする学問分野も同様であるが, 半導体素子の挙動モデルには,理想モデルと実デ バイスモデルがある.初学者にとって,理想モデ





図7 OpenModelica ウィンドウのプロット表示



(a) 理想スイッチ (b) nMOS トランジスタ
 図8 スイッチング素子モデル



ルを用いた回路で本質的な動作や特性を学んだ上で、実デバイスモデルを用いた回路を学ぶのが望ましい. OpenModelica では、これを部品モデルの入れ替えだけで実現できる.

(1)

例えば、スイッチング素子の場合、MSL には、 理想モデルとして理想スイッチモデル、実デバイ スモデルとして nMOS (n-channel Metal-Oxide-Semiconductor) トランジスタモデルが用意されて いる(図 8). これらを用いれば、EV (Electric Vehicle)等で3相モータを駆動する際に用いられ ている3相インバータ回路モデルも比較的簡単に 構成可能である(図 9). OpenModelicaを用いた演 習では、3相インバータ回路のような応用回路を 学ぶ際は、最初に、理想スイッチモデルを用いた 回路モデルを作成し、スイッチング素子の本質的 な役割を学んでもらうようにしている.

3.3 授業での活用例2(非線形動作を理解する)

非線形素子は、条件によって異なる数式でモデ ル化される.数式は線形素子の場合より複雑であ り、単に手計算による演習問題に取り組んだだけ では、初学者がその挙動を十分に理解することは 難しい.そこで、一歩踏み込んだ演習として、 OpenModelicaを活用している.

例えば、nMOS トランジスタでは、デバイス内 をドレインからソースに向かって電流  $i_{DS}$  が流れ るが、条件により式が異なる[4]. 遮断領域 ( $v_{GS} \leq V_T$ ):

$$i_{DS} = 0 \tag{2}$$

線形領域  $(v_{GS} > V_T$ かつ  $v_{DS} \leq v_{GS} - V_T$ ):

$$i_{DS} = K (v_{GS} - V_T - v_{DS}/2) v_{DS}$$
(3)

飽和領域  $(v_{GS} > V_T か \circ v_{DS} > v_{GS} - V_T)$ :

$$i_{DS} = K (v_{GS} - V_T)^2$$
 (4)

ここで, *K* は nMOS トランジスタの物性や形状で 決まる係数,  $v_{GS}$  はゲートーソース間電圧,  $V_T$  は スレッショルド電圧,  $v_{DS}$ はドレインーソース間電 圧である.

 $K \approx V_{T}$ は一定条件下において固定値とみなせる が、 $v_{GS} \approx v_{DS}$ は端子間にかかる電圧であり、回路 の状態によって値が変化する. OpenModelica では、 マウス操作の他、Modelica プログラムを直接キー ボード入力することも可能である. 演習では、各 自が上述の電流式を Modelica プログラムとして 記述し(図 10)、動作確認モデルを作成して(図 11)、シミュレーションを実行する. 最後に、結果 をグラフ表示させ(図 12)、電流特性を確認する.



図 11 自作した nMOS トランジスタモデル の動作確認モデル



動作確認モデルの設定を変えることで、さまざま な条件でシミュレーションを実施し、グラフ表示 することが可能であり、作成したモデルの特性や 挙動に関して理解を深めるのに役立つ. 3.4 授業での活用3(電気と熱のドメインを繋ぐ) 電子回路を用いた電子機器,モータを始めとす る電気機器では,サーマルマネージメントが極め て重要である.しかし,電気系の教科書には,サ ーマルマネージメントに関する説明が全くないか, もしくは,手計算による簡易見積もり手法が述べ られている程度である.一方,実製品の設計現場 では,小型化,省エネ化を達成する上で,サーマ ルマネージメントは欠かせない.そこで,電気と 熱の物理ドメインを繋いだ OpenModelica による 温度予測シミュレーションの演習も実施している.

図 13 は、パーソナルコンピュータの頭脳である CPU (Central Processing Unit)の電力モデルと 2 章で説明した熱回路網を接続したモデルである. CPU は CMOS (Complementary MOS)回路として 実装されており、CMOS 回路では電源から投入さ れた電気エネルギーのほぼすべてが熱となる. CMOS 回路として実装された CPU の消費電力、 つまり、発熱量  $P_{CPU}$ は、

$$P_{CPU} = aC_{load}V_{DD}^{2}f_{op} + I_{leak}V_{DD}$$
(5)

で表される[5]. ここで, a は動作率, Cload は CMOS 回路の負荷容量, V<sub>DD</sub> は電源電圧, f<sub>op</sub> は動作周波 数, Ileakはリーク電流である.上述の CPU の電力 モデルは,式(5)をモデル化したものである.a, VDD, fop を外部入力変数とし, Cload と Ileak はモデル 内のパラメータとして設定するモデルとなってい る. シミュレーション結果例を図 14 に示す. 実行 開始 30 秒後に, a, VDD, for の値を増加させた際 の, CPU の温度遷移を表している. 実際の CPU では、より頻繁に a, V<sub>DD</sub>, fopの値が変化する. ま た, Cload と Ileak は実際には電圧依存性や温度依存 性を有するが,このモデルでは固定値としている. このようにモデル化には自由度がある. このよう な演習を通じて、教科書や講義資料を鵜呑みにす るのではなく、モデルとはどのようなものか気づ きを与えることが出来れば、とも考えている.

# 4.研究への適用事例

# 4.1 コンピュータの電気-熱連成解析

図 13 で示した CPU の電力モデルを拡張し,図 15 に示すデスクトップ型パーソナルコンピュー タの省エネ化に向けた電気-熱連成解析を実施し た[6].



(a) システム外観(b) ファン付きヒートシンク図 15 デスクトップ型パーソナルコンピュータ

実際のマイクロプロセッサは, CPU を複数搭載 する他,内部バスやメモリインターフェイス等も 内蔵しており,それらの消費電力をモデル化する 必要がある. CPU に一定の高負荷がかかった際の マイクロプロセッサ全体の消費電力は,

$$P_{Microprocessor} = (c_1 V_{DD} + c_2) V_{DD}^2 f_{op} + c_3 (V_{DD} + c_4) (T_J^2 + c_5 T_J + c_6) V_{DD}$$
(6)  
+  $c_7$ 

のようにモデル化できる.負荷容量 Cload の電圧依存性,リーク電流 Ileak の電圧及び温度依存性を考慮したモデルである.ここで,TJはジャンクション温度, c1~c7 は係数である.マイクロプロセッサの消費電力には個体差があるため,これらの係数は実測結果から求める.また,マイクロプロセッサは,専用の電源 EPS12V から電力供給を受ける.EPS12V は,MOSトランジスタのスイッチング動作により電力を供給するが,スイッチング動作により電力を供給するが,スイッチング動作には損失があり,その影響も加味したモデル化が必要である.図16に温度依存性を有するマイクロプロセッサ及び EPS12V の消費電力特性を示す.

温度依存性を有する消費電力を求めるには伝熱 経路のモデル化も必要である.対象とするデスク トップ型パーソナルコンピュータでは、マイクロ プロセッサ直上にファン付きヒートシンクを装着 しており、ファンの回転数により、冷却能力が変 化する.ファンの回転数と消費電力には相関関係 があり、図 17 のように、ファンの消費電力と伝熱 経路の熱抵抗の関係をモデル化することができる.

図 16 と図 17 のモデルを組み合わせた電気-熱 連成モデルを図 18 に示す.上述のように、マイク ロプロセッサや EPS12V の消費電力には温度依存 性があり、ファンの消費電力とこれらの消費電力 は反比例の関係にある.そのため、ファンには最 適な動作点が存在する.電気-熱連成モデルを用 いることで、システムの電力を最小化するファン の動作点を求めることができる(図 19).

4.2 Cauer 型熱回路網のパラメータ同定

電子機器の熱設計では、古くから熱回路網法に よる温度予測が実施されてきた.非定常熱伝導方 程式の関係を離散化し、分布定数として表現した ものが図 20 の Cauer 型熱回路網である.

Cauer 型熱回路網は,温度予測に使用できる他, 伝熱経路の熱抵抗と熱容量の分布状況を可視化す るツールとしても利用できる.ただし,熱抵抗と 熱容量の分布を知るには,温度測定結果から伝熱 経路各所にある熱抵抗と熱容量を同定する必要が ある.つまり,温度測定結果を真として,それに 近い温度遷移を再現する熱抵抗と熱容量の値を求



めることで伝熱経路を表現する[7,8]. OpenModelica は, Cauer 型熱回路網を比較的簡 単にモデル化でき,さらに図 21 に示すスクリプト によるバックグラウンド実行もサポートしている. そのため, SciPy[9], Optuna[10]等の Python モジュ ールと組み合わせることで,伝熱経路各所にある 熱抵抗と熱容量を同定するための最適化を行うこ とも可能である.図 22 に示す表面実装型パッケー ジを採用した MOS トランジスタを搭載した 2 つ のテスト基板の伝熱経路について,64 段の Cauer 型熱回路網を用いて最適化を行うと,図 23 のよう になる[8].両者は銅パッドサイズのみ異なる基板 であるが,その影響による熱抵抗と熱容量の分布 の違いが見て取れる.

#### 5. おわりに

本稿では、OpenModelica について紹介するとと もに、大学での教育及び研究への適用事例につい て紹介した.この記事をきっかけに新たなユーザ が生まれ、国内でのユーザコミュニティの活性化、 さらに Modelica、OpenModelica を活用した研究推 進に繋がれば幸いである.

#### 参考文献

- OpenModelica, https://www.openmodelica.org/ (Accessed on 2021/4/30).
- [2] Modelica® A Unified Object-Oriented Language for Systems Modeling Language Specification, Version 3.5, Modelica Association (2021).
- [3] Modelica Standard Library, https://github.com/modelica/ModelicaStandardLib rary (Accessed on 2021/4/30).
- [4] 末次正, 堀尾喜彦, 電子回路基礎ノート, コ ロナ社 (2011).
- [5] 西剛伺、マイクロプロセッサのダイ周りの非 定常熱伝導シミュレーション、日本伝熱学会 論文集, 20-2 (2012) 27.
- [6] K. Nishi, S. Takada and T. Kaneda, "Power and Temperature Prediction for Computer System Power Optimization", Asian Modelica Conference 2020 - Virtual (2020) S4-3.
- [7] K. Nishi, "Investigation Regarding Thermal Resistance of Surface Mount Type Discrete Power Semiconductor Package", InterPACK2020 (2020) InterPack-2631.



図 20 Cauer 型熱回路網

loadModel(Modelica);
<pre>loadFile("D:/folder/TestModel.mo");</pre>
<pre>buildModel(TestModel);</pre>
system("C:/(途中省略)/TestModel
-override(途中省略)
<pre>-r=result_res.mat");</pre>
result :=
<pre>val(result, 100, "result_res.mat");</pre>
writeFile(途中省略);
quit();

図 21 OpenModelica のスクリプト記述イメージ



(a) テスト基板 A (b) テスト基板 B

図 22 MOS トランジスタを搭載したテスト基板



図23 熱抵抗と熱容量の分布

- [8] 西剛伺,表面実装型パワー半導体パッケージの熱解析モデル化に向けた熱インピーダンスに関する研究,第58回日本伝熱シンポジウム (2021) C313.
- [9] SciPy, https://www.scipy.org/scipylib/index.html (Accessed on 2021/4/30).
- [10] Optuna, https://optuna.org/ (Accessed on 2021/4/30).

# 「JSME SERIES IN THERMAL AND NUCLEAR POWER GENERATION」発刊のお知らせ Notice of publication of "JSME SERIES IN THERMAL AND NUCLEAR POWER GENERATION"



木戸口 和浩 (電力中央研究所)

Kazuhiro KIDOGUCHI (Central Research Institute of Electric Power Industry) e-mail: kidoguti@criepi.denken.or.jp

一般社団法人日本機械学会動力エネルギーシス テム部門では,部門設立 30周年記念企画事業とし て,現在に至るまでの我が国を中心とした火力お よび原子力発電技術の進展を著し,昨今の動力エ ネルギー分野における動きに対する今後への備え の一助となることを願い,Elsevier 社から全 8 巻 にわたる『JSME SERIES IN THERMAL AND NUCLEAR POWER GENERATION』(洋書)の発 行企画を進めております.この度,8巻のうちの3 巻を発刊しましたので,お知らせさせていただき ます.本シリーズは,原子力および熱エネルギー 工学の研究者,専門技術者,ならびに発電,特に 原子力,熱力学を学ぶ大学院生,大学生にとって 貴重な資料になります.

# ☆ Volume 1: Fundamentals of Thermal and Nuclear Power Generation

火力発電と原子力発電の歴史を解説しており, volume 2 以降を読むにあたっての基礎知識を学べ ます.熱力学,流体力学,熱工学,燃焼工学,お よび核物理学の基礎に基づいて,最新の火力およ び原子力発電システム,ならびに技術が理解でき ます.発電システムに関する燃料供給,排出物, 事故リスクを考慮し,持続可能性のみならず,こ れらの技術が社会に与える影響について解説して います.

https://www.elsevier.com/books/fundamentals-of-ther mal-and-nuclear-power-generation/koizumi/978-0-12-820733-8

- ·編著:小泉 安郎,大川 富雄,森 昌司
- ・発行年月日: 2021年1月 29日
- ページ数:320ページ

## ☆ Volume 2 : Advances in Power Boilers

約300年にわたる発電用ボイラの開発プロセス を解説しており、火力発電の基礎を学ぶことがで きるとともに、設計の原則と方法論、ならびに発 電ボイラの構造、操作、制御について、実際のデ ータとともに詳細に説明しています.著者らの豊 富な経験と知識を基に,最近の高度な技術を記載 し,複合サイクル,USC,A-USC,さらには PFBC, IGCC など,さまざまなシステムについて紹介し ています.火力発電に関する環境影響,メンテナ ンス,規制,および基準を全体にわたって考慮し, 写真や図面を掲載していることで,熱工学分野に 関わるすべての人の参考になります.

https://www.elsevier.com/books/advances-in-power-b oilers/ozawa/978-0-12-820360-6

- ·編著:小澤 守,浅野 等
- ·発行年月日:2021年1月29日
- ページ数:508ページ

# ☆ Volume 5 : High Temperature Gas-cooled Reactors

高温ガス炉(HTGR: High-Temperature Gas Reactor)の歴史,および開発と利用に関する最新 の研究を紹介しています.炉心設計,冷却塔設計, 圧力容器設計,I&C係数,安全設計など,HTGR の設計に関して詳細に解説しています.原子力発 電プラントとして高効率的で安全なHTGRを開発 する方法を理解することができます.

https://www.elsevier.com/books/high-temperature-gas -cooled-reactors/takeda/978-0-12-821031-4

- ·編著:武田 哲明, 稲垣 嘉之
- ・発行年月日: 2021年2月26日
- ページ数:478ページ

いずれの volume も定価は US\$ 200.00 (書籍版・ 電子版) で,前記の Elsevier 社の HP などで購入 できます.

なお, Volume 3:PWR (Pressurized Water Reactors), Volume 4:BWR (Boiling Water Reactors), Volume 6: FBR (Fast Breeder Reactors), Volume 7&8: PHWR (Pressurized Heavy Water Reactors) (いずれも仮題) については、今夏以降に順次発刊する予定です.

# 行事カレンダー

本会主催行	「事					
開催	日	行事名	申込締切	原稿締切	問合先	掲載号
2021 年						
9月	7(火) ~ 10(金)	太陽エネルギー国際シンポジウム (11 <sup>th</sup> SOLARIS)			第 11 回太陽エネルギー国際シンポジウム実行 委員会 matsu@eng.niigata-u.ac.jp	
10 月	3(日) ~ 7(木)	アジア熱科学会議 (2 <sup>nd</sup> ACTS)			ACTS2020 実行委員会 secretary@acts2020jp.org	

本会共催,協賛,後援行事

開催	日	行事名	申込締切	原稿締切	問合先	掲載号
2021 年					•	
7月	26(月)	第25回動力・エネルギー技術シンポ			(一社) 日本機械学会総合企画 G	
	~	ジウム			森本あかね morimoto@jsme.or.jp	
	27(火)					
8月	22(日)	日本混相流学会混相流シンポジウム			日本混相流学会	
	~	2021			office@jsmf.gr.jp	
	24(火)					
	25(水)	日本実験力学会 2021 年度年次講演会			新潟大学医学部保健学科内 日本実験力学会事	
	~				務局 担当:小林 TEL: 025-368-9310/FAX: 025-	
	27(金)				368-9309 E-mail: office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp	
9月	21(火)	日本流体力学会 年会 2021			(一社)流体力学会事務局	
	~				Tel:03-3714-0427	
	23(木)				E-mail: jstm@fr/.so-net.ne.jp	
10月	13(水)	第48回日本ガスタービン学会定期講			(公社)日本ガスタービン学会	
	~	演会			E-mail: gtsj-office@gtsj.org	
	14(木)					
11 月	3(水)	The 16th International Symposium on			新潟大学医学部保健学科内 日本実験力学会事	
	~	Advanced Science and Technology			務局 担当:小林 TEL: 025-368-9310/FAX: 025-	
	6(土)	In Experimental Mechanics			368-9309 E-mail: office-jsem@clg.niigata-u.ac.jp	
	19(金)	脱炭素社会実現に向けた再エネ利用シ			三重大学大学院工学研究科機械工学専攻	
		ステムの研究開発に関する講演会			西村 顕 E-mail: nisimura@mach.mie-u.ac.jp	
12 月	4(土)	21-52 第23回スターリングサイクル			(一社)日本機械学会エンジンシステム部門事	
		シンポジウム			務担当 大竹英雄	
					otake@jsme.or.jp	
2022 年						
3月	19(土)	32nd International Symposium on			ISTP32 実行委員会委員長	
	~	Transport Phenomena (ISTP32)			宇高義郎	
	21(月)				utaka@ynu.ac.jp	

# 公益社団法人日本伝熱学会第59期(2020年度)総会議事録

- 1. 日時 2021年5月26日(水)17:10~17:40
- 2. 方 法 ビデオ会議(Cisco Webex を利用)
- 3. 正会員数 997 名
- 4. 出席者 516 名 (うちビデオ会議出席者 99 名, 委任状出席 417 名). 定款第 29 条の定めるところ により, これは定足数である正会員数の過半数 (499 名)を上回り, 総会は成立した.
- 5. 議事経過

定款第27条により花村克悟会長が議長となり、以下の議案について逐次審議した.

第1号議案 第59期(2020年度)事業報告の件

議長より,公益社団法人日本伝熱学会第59期(2020年度)総会議案(以下,「総会議案」と呼ぶ) の第1号議案第59期(2020年度)事業報告について諮り,全会一致でこれを可決した.

第2号議案 第59期(2020年度)会務報告の件

議長より,総会議案の第2号議案第59期(2020年度)会務報告について諮り,全会一致でこれ を可決した.

第3号議案 第59期(2020年度)収支決算の件

議長より,総会議案の第3号議案第59期(2020年度)収支決算について諮り,全会一致ででこ れを可決した.

第4号議案 第60期(2021年度)役員・協議員選出の件

議長より,総会議案の第4号議案第60期(2021年度)役員の選出について,以下のとおり次期 役員の提案がなされ,全会一致でこれを可決した.

定款第17条第1項により退任する役員

理事	宗像	鉄雄	理事	桃木	悟
理事	中村	元	理事	服部	博文
理事	松原	幸治	理事	光武	雄一
理事	平井	秀一郎	監事	木戸	長生

ā	E款第17条第1項	ただし書きにより退任する役員			
	代表理事(会長)	花村 克悟	理事(副会長)	鶴田	隆治
	理事	佐々木 直栄			

第60期(2021年度)に新たに選任される役員

定款第17条第1項により選任される役員

理事	鹿園 直毅	理事	津島	将司
理事	永井 二郎	理事	服部	博文
理事	丸山 直樹	理事	坂村	芳孝
理事	伊藤 衡平	監事	緒方	寛

定款第17条第1項ただし書きにより選任される役員

理事	宗像 鉄雄	理事	高松 洋
理事	板谷 義紀		

第5号議案 議事録署名人選任の件

議長より,本日の議事の経過を議事録にまとめるにあたり,議長に加えて議事録署名人2名を選 任したい旨の提案があり,協議の結果,鶴田隆治氏,宗像鉄雄氏の2名を選任し,全会一致でこれ を可決した.

第6号議案 第60期(2021年度)事業計画の件 議長より,総会議案の第6号議案第60期(2021年度)事業計画について報告を行った.

第7号議案 第60期(2021年度)収支予算の件 議長より,総会議案の第7号議案第60期(2021年度)収支予算について報告を行った.

以上により、本日の議事を終了した.

2021年5月26日

公益社団法人日本伝熱学会第59期(2020年度)総会

議長	花村	克悟	印
議事録署名人	鶴田	隆治	
議事録署名人	宗像	鉄雄	印

# 2021 年度 日本伝熱学会 学術賞・技術賞・貢献賞・奨励賞候補者推薦募集のお知らせ

日本伝熱学会では、本年度も各賞の表彰を実施します.つきましては、下記の要領に従って本年度の学術 賞、技術賞、貢献賞および奨励賞の候補者推薦を募集しますので、自薦、他薦を問わず、多数ご応募下さい.

1. 対象となる業績

- (1) 学術賞の対象は、原則として、最近3年間の Thermal Science and Engineering 誌または Journal of Thermal Science and Technology 誌に掲載された、あるいは、最近5回の日本伝熱シンポジウムにおい て発表され、国内外で審査のある学術論文集に掲載された伝熱に関する優秀な研究を主体的に行っ た研究者とその共同研究者とします. なお、受賞対象研究課題名は、必ずしも論文題目と厳密に一 致する必要はありません.
- (2) 技術賞の対象は、公表された優秀な伝熱技術を開発した者とします.
- (3) 貢献賞の対象は、本学会が主催する事業の実施において、顕著な貢献を行った会員とします.
- (4) **奨励賞**の対象は,原則として,最近2回の日本伝熱シンポジウムにおいて優秀な論文を発表した若 手研究者で,発表時に大学院生,またはこれに準じる者(大学卒業後5年以内の者)とします.
- (5) 学術賞および奨励賞の対象資格は、原則として本学会会員に限ります.
- (6) 贈賞数は、学術賞2件程度、技術賞1件程度、貢献賞2名程度、奨励賞4件程度とします.
- 2. 選考方法
- (1) 「学会賞に関する内規」に定める賞の内,上項に記載の各賞は,「表彰選考委員会」が「学会賞の 審査・選考方法内規」に基づいて選考します.
- (2) 表彰選考委員会は、公募の他に、各賞の候補を推薦することが出来るものとします.
- 3. 提出書類
- (1) 申請書・推薦書
  - ・ 申請書・推薦書の書式は、本学会ホームページからダウンロードしてご使用下さい.
  - ・ 学術賞,技術賞,貢献賞,奨励賞それぞれに申請書・推薦書の書式が異なりますので,ご注意下 さい.
- (2) 論文抜刷または技術内容参考資料(貢献賞以外の賞)
- (3) 日本伝熱シンポジウム講演論文集抜刷(学術賞,奨励賞のみ)
- 4. 提出期限

2021年12月17日(金)

5. 提出先および問い合わせ先

いずれの書類も PDF 化し,下記電子メールアドレス宛にお送り下さい. 九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門 髙松洋 宛 E-mail: takamatsu@mech.kyushu-u.ac.jp TEL 092-802-3123 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)



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.



2 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-ma

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

# AL CAL

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。



熱流束範囲: 0.2-4000Btu/ft<sup>2</sup>sec(フルスケール) サイズ: 1/16 インチ(約 1.6mm)〜1 インチ(約 25.4mm) 最高温度: 200℃(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

熱流計/輻射計

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/cm<sup>2</sup>

# 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

2021年5月総会の議決により,編集出版部会長・理事に就きました福井大学・永井です.本号の企画と原 稿依頼・収集作業は,前期部会長の中村元先生(防衛大学校)を中心として行われました.中村先生をはじ め歴代の部会長の方々のように的確でタイムリーな編集企画作業を今後目指します.中村先生,2年間大変 おつかれさまでした.私は過去に2度,編集出版部会委員を経験しておりますが,いつも「部会長は大変だ な~.本当におつかれさまです.」と他人事の感想を抱いておりました.まさか自分が部会長になるとは思っ てもおらず,この数ヶ月間,不安と重圧のもと過ごしてきました.幸いなことに,7名の新任の方を含めて, 下記の頼もしい委員の皆様と一緒に仕事ができます.全ての学会員皆様のご協力もお願いしつつ,この「伝 熱」が魅力ある学会誌となるよう編集企画を進めていきたいと思います.「伝熱」へのご意見・ご感想をぜひ メールでお寄せ下さい.

さて、本号では「オープンソースソフトウェアを活用した CAE」の特集を中川慎二先生(富山県立大学) に組んでいただき、OpenFORM を中心として各種オープンソースソフトウェアの特徴や活用方法等に関して、 産業界・学術界で実際にご活用されている最先端の方々から6件のご寄稿をいただきました.ご多用にも関 わらずご寄稿くださった皆様に、この場をお借りして厚くお礼申し上げます.

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

企画・編集出版担当副会長	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