ISSN 2185-372X

THERMAL ENGINEERING

TED Newsletter on the WEB

日本機械学会熱工学部門ニュースレター
TED Newsletter No.89 December 2019

目　　次

1. TED Plaza
- 気泡微細化沸騰を使った沸騰冷却デバイス実現に向けて
  海野　徳幸（山陽小野田市立山口東京理科大学）
- バイオ医薬品のためのタンパク質水溶液のマイクロ波常温発泡乾燥
  鶴田　隆治　（九州工業大学）

2. 2019 年度年次大会 熱工学部門報告
3. 熱工学コンファレンス 2019 開催（中止）報告
4. 熱工学ワークショップ 2019 開催（中止）報告
5. 第 96 期（2018 年度）熱工学部門賞・部門一般表彰報告
6. 行事案内
- 部門企画行事案内
- 部門関連行事案内
- 国際会議案内

7. その他
- 編集後記

TED Plaza

気泡微細化沸騰を使った沸騰冷却デバイス実現に向けて

海野　徳幸

山陽小野田市立山口東京理科大学　講師
工学部　機械工学科
unno@rs.socu.ac.jp

１．はじめに～第 4 次産業革命と熱工学の関係～

1700 年代の蒸気機関の発展から始まった第 1 次産業革命，電気の産業化とモノの大量生産の時代となった 1800 年代の第 2 次産業革命，1900 年代後半にコンピュータとインターネットが爆発的に普及し様々なオンラインサービスが開始された第 3 次産業革命．これら以前の狩猟時代や農耕時代を含めて，有史以来産業革命は起こり続けてきた．同時に，それぞれの時代の必要に合わせて技術が進歩し，知識が蓄え続けられてきた．次なる第 4 次産業革命（ドイツ発祥の Industry4.0，日本が掲げる Society5.0，呼び名は違うが目指す先は同じ．）に向けて，ロボット，ビッグデータ，AI（Artificial Intelligence）や IoT（Internet of Things）などのカタカナ言葉が躍る中，人類は産業の究極の効率化に向けて突き進んでいるところである．産業が効率化すると言うことは，今まで必要としていた時間と労力が必要なくなることでもある．例えば，薪の火を絶妙にコントロールしながら焦がさないように傍に付きっきりでかまどを使って米を炊くことは現在では多くの家庭でなくなった．筆者自身もかまどを使ったことはないので，我が家でも私の代でかまど炊飯技術は途絶えている．しかし，知識は決して色あせることはない．「はじめちょろちょろ中ぱっぱ，赤子泣いてもふたとるな」のようなおいしい米の炊き方は古くから先人達が経験的に作り出し，受け継いできた知識である．ここに工学のエッセンスが付与され，米のうまみに関する酵素反応が 50 ℃付近でちょうどよい（はじめちょろちょろの部分）とか，沸騰気泡による激しい熱対流で米を躍らせると一粒一粒が均一温度になり一気に炊ける（中ぱっぱの部分）など技術的な裏づけがされた．そして，かまどがおおよそ途絶えた今日でも家電量販店にかまど炊きを売りにした自動化された炊飯器が並んでいるということは，知識の確かさを物語っている例だと強く感じる．

「自動化」の第 3 次産業革命を超え，上記の例のような知識を集約化した上で「自律化」による産業の効率化を達成し，第 4 次産業革命を成功に導くためのキーワードの一つは間違いなく本部門の皆様で支えておられる「熱工学」であり，中でも冷却技術であると考える．なぜなら，冷却技術は次世代自律化システム全体を長期連続運用するにあたっての信頼性を確保するためにとても大切だからである．第 3 次産業革命から産業のコメとまで呼ばれるようになった半導体デバイスは今や人々の生活には欠かせないものである．第 4 次産業革命のシステムの根幹をなす全ての機器においても半導体電子デバイスが引き続き使われるため，これらの熱による故障を防ぐには必ず冷やしてやる必要がある．例えば，ロボットや電気自動車を効率良く動かすためのモータ制御用のインバータ回路や制御マイコン，ビッグデータ解析や AI を実現するためのデータセンターやスーパーコンピュータ，末端機器でセンシングしたデータを無線で収集転送する 5G 基地局，さらには位置情報を取得できる GPS（Global Positioning System）などなど．単にそれぞれの半導体デバイスを冷やせばよいわけでない．次世代自律化システムの冷却にかかるすべてのコスト（＝電気料金）はそのまま製造される品やサービスの価格に上乗せされる．つまり高集積化され発熱密度が上がる中，「低コスト」にそれぞれの環境に適した状況下で冷却を行わなければならない．

高速に動作するソフトウェアを開発することでハードウェア構成自体の規模を縮小し，次世代システムの維持にかかるコストを大元から削減できるならば，確かにこれが一番省エネ・低コストになる方法である．実際，各国とも現在はこのようなソフトウェア人材の育成に力を入れているように見える．しかし，ソフトウェアがどんなに進化したとしてもハードウェアをゼロにすることは絶対にできない．データセンターを筆頭としてシステムの電力コストのうち冷却に要する電力が占める割合はまだ多い状態である．地球上の資源エネルギーを無駄遣いすることなく持続可能な発展社会を形成しながら，第 4 次産業革命時代を生き残るためにはハードウェアの省エネ冷却技術が絶対に欠かせないはずである．今後ますますこの分野の盛り上がりが必要と考え，筆者は次に述べる沸騰冷却に関する研究に現在取り組んでいる．

２．沸騰冷却技術と気泡微細化沸騰研究のこれまで

半導体デバイスを冷却する際の各種冷却方式ごとの性能比較として，伝熱工学の教科書にも記載のある熱伝達率のおおよその大きさを図 1 に示す（日本機械学会, 2005）．半導体デバイス冷却の歴史はほとんどこの図の性能通りに行われてきた．すなわち，初めの頃は半導体デバイスの集積度が低く扱う電力量も少なかったのでデバイス素子表面の自然対流のみで冷却が間に合っていたものが（気体・自然対流），集積化が進み空気との伝熱面積拡大のためフィンが必要になり，それでも冷却が追い付かず次にファンが装着された（気体・強制対流）．そしていよいよファンでも冷却が困難になると低沸点冷媒である絶縁性液体中に半導体デバイス自体を沈める浸漬冷却手法が 1960 年代に提案され，1980 年半ばには当時のスーパーコンピュータに一部導入されたりもした（液体・強制対流、沸騰・凝縮）．こう書くと半導体デバイスの沸騰冷却はすでに 50 年超の歴史があり熟成して一般化された技術なのだろうかと感じるかもしれないが，実際には沸騰冷却が応用された範囲は狭かった．物理的に最も高い熱伝達率を有する冷却技術は沸騰・凝縮であると分かっていながら，何故広く使われることがなかったのか？それは，電気電子工学の発展も同時に進んでおり半導体デバイスからの発熱自体を抑えるたくさんの技術が開発されため，長い年月をかけ熟成され信頼性が高い空冷・水冷強制対流技術で大抵は事足りていたからであろう．

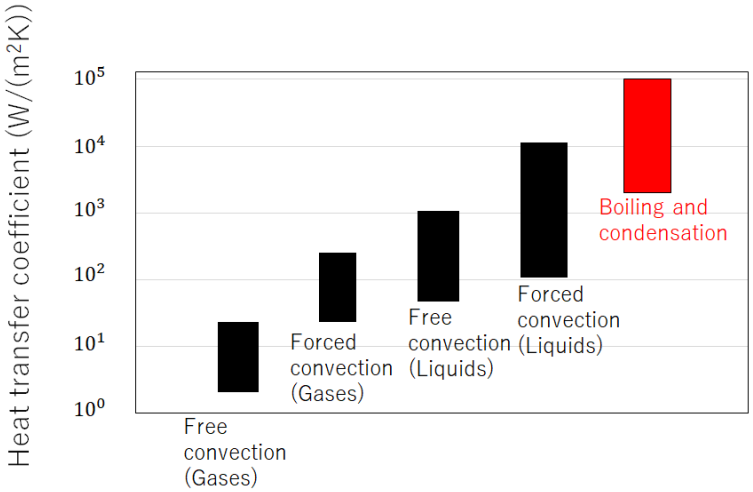


Fig. 1 Comparison of heat transfer coefficients in various cooling methods.

しかし，半導体デバイスの高集積化の流れは加速し続けており，強制対流冷却時の水冷ポンプや空調にかかる冷却電力コストがシステムの利益率にますます影響を与えるようになった．第 4 次産業革命時代を勝ち抜く省エネ冷却技術として高熱流束除熱が可能な沸騰冷却が再び必要とされる時代がきたのである．幸いなことに電気自動車やロボット，産業用モータ駆動向けの大電力パワー半導体用としては炭化ケイ素（SiC）製のデバイス開発が進み，従来のシリコン（Si）半導体の動作温度約 100 ℃を大きく超える 200 ℃超での動作が可能になった．絶縁に気を付ければ安価で安全性の高い液体である水は，潜熱が他の液体に比べ極めて大きく沸騰冷却に最も向く冷媒である．水の大気圧下における飽和温度（沸点）は 100 ℃であるため，従来の Si 製半導体デバイスでは水を用いた沸騰冷却の適用は難しかった．高温動作が可能な半導体の出現により水の沸騰冷却が Si に比べて容易に適用検討できるようになったことは極めて大きな転換点である．

以上のように省エネ冷却技術の切り札として期待できる沸騰冷却であるが，これを普及するために解決しなければならない課題を図 2 に示す沸騰曲線を使って説明する．沸騰曲線は横軸に発熱面表面の温度から使用液体の飽和温度を引いたものである伝熱面過熱度を，縦軸に熱流束（発熱密度）をプロットしたものである．このような整理方法は東北大学の抜山先生が 1934 年に提唱したもので，今や沸騰現象を説明するのに世界中で用いられている（抜山, 1934）．最初，物体が液体中で発熱しだすと，液体との温度差による対流熱伝達がおこる非沸騰領域が現れる．さらに発熱密度が上昇すると，発熱面表面の温度が液体の飽和温度を超え沸騰が始まり気泡が発生する．この時，蒸発潜熱として発熱面から大量の熱を奪うことができるので，熱流束上昇に対する伝熱面過熱度の変化量が非沸騰領域に比べて小さくなる．発熱面上の気泡が発生する個所にはキャビティと呼ばれる小さなくぼみがあり，これを核として気泡の発泡と離脱を繰り返しながら潜熱輸送されるので，核沸騰領域と呼ばれる．非沸騰領域から核沸騰領域に遷移する際の問題が伝熱面過熱度のオーバーシュートである．図 1 にも示した通り，沸騰が開始すると熱伝達率が急激に増大することで壁面温度が急降下することがある．急激な温度変化はナノスケールで作製されている半導体デバイスに高いストレスを与えるため，オーバーシュートは抑える必要がある．また，核沸騰領域においてさらに熱流束が増すと，徐々に伝熱面過熱度の上昇幅が大きくなり，ついには図 2 の赤い点で示した箇所に到達する．この点は限界熱流束（Critical heat flux，CHF）と呼ばれる．一般に，飽和温度にある液体中での沸騰は飽和沸騰と呼ばれ，大気圧下における水の飽和沸騰時の CHF は 110 W/cm^2 程度である．通常は CHF を超える熱流束が生じると，発熱面全体が気泡の膜に覆われる膜沸騰へと遷移する．この時，発熱面には液体が直接触れられなくなり蒸発潜熱による熱輸送ができなくなってしまうことで急激に熱伝達率が低下する．結果，膜沸騰への遷移が起こると，半導体デバイスが壊れてしまう温度まで急上昇してしまう．以上のことから，沸騰冷却は核沸騰域内の CHF から安全率を取った熱流束までの範囲内で通常実施される．しかし，次世代電気自動車に用いられる SiC 製インバータの発熱密度は 500 W/cm^2 にも達すると言われており，CHF 自体の向上技術もしくは CHF を超える沸騰冷却技術がなければ実際の使用は難しい．

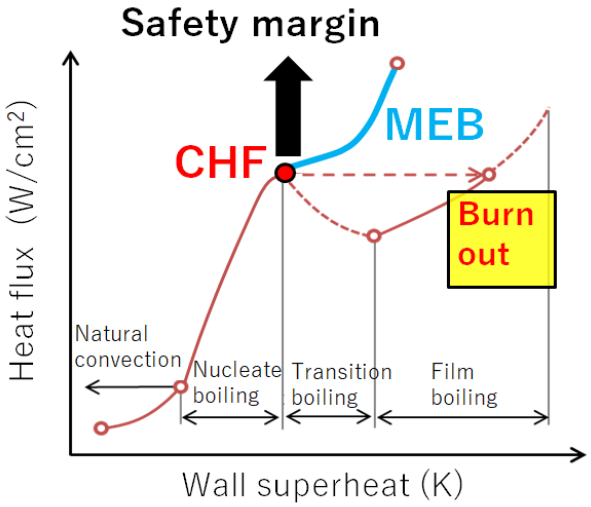


Fig. 2 Boiling curve with or without microbubble emission boiling (MEB) regime.

CHF を超える沸騰冷却技術の一つが気泡微細化沸騰（Microbubble emission boiling, MEB）である（図 2 青線）．MEB は 1980 年代に特殊な沸騰現象として群馬大学の稲田先生らにより発見された（稲田他, 1981a, 1981b, 1981c, 1981d）．本研究室で取得した MEB が発生した場合の実際の沸騰曲線を図 3 に示す. 純水プールを用いた大気圧下での実験で無酸素銅製の伝熱面面積 ϕ 10 mm, サブクール度 50 K での試験結果である．破線はサブクールプール沸騰試験時の CHF 予測によく用いられる Ivey-Morris の式より計算した熱流束値である（Ivey and Morris, 1966）．通常であれば予測された CHF 付近で膜沸騰に遷移してしまい 100 K 以上の伝熱面過熱度になってしまうはずが，MEB が発生することで 900 W/cm^2 近くまで熱流束が伸びていることが分かる．もし MEB を積極的に利用できるなら，SiC 製インバータの冷却要求に対しても余裕のある高熱流束冷却が可能になる．

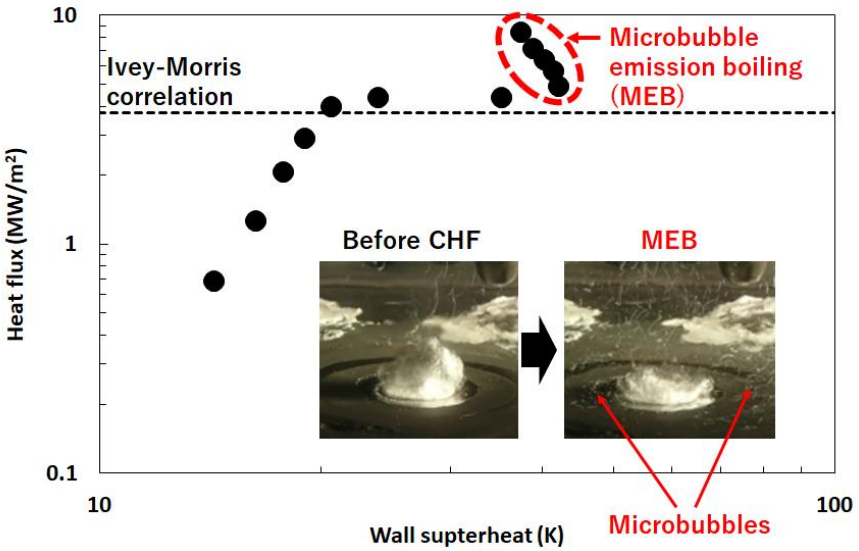


Fig. 3 Boiling curve in subcooled pool boiling at liquid subcooling of 50 K using purewater.
(1 MW/m^2 = 100 W/cm^2)

このように驚異的な高熱流束冷却を可能とする MEB であるが，発見から 30 年近くが過ぎても未だ実用が難しいと考えられている．なぜなら，詳しい発生機構が分かっていないからである．しかし，多くの研究者らによって発生条件に関してはおおよそ明らかになりつつある．次の（1）～（8）に MEB に関するこれまでの主な知見をまとめた．紙面の関係上その全てを紹介できていないことをお詫びいたします．

（1）プール内圧力の影響（高圧力下ほど MEB が起きにくい）（Suzuki, et al., 2014）
SUS 製耐圧容器内に純水を入れ, 窒素ガスを充てんすることで加圧環境を生み出した実験である．サブクール度 40K，60K の時の＋0，50，100 kPa の条件が調べられた結果，100 kPa，40K 時には MEB への遷移が見られるものの 450 W/cm^2 のときの伝熱面過熱度は 100 K を超えてしまう．

（2）純水への有機溶媒の添加量が高濃度だと MEB 発生に悪影響となる（Furusho, et al., 2016）
純水以外の溶媒で MEB が発生するかどうかを確認するため, 自動車用不凍液の成分として知られるエチレングリコール（EG）水溶液の濃度と MEB 遷移の関係についての報告がある．その結果は，EG 濃度が高くなるほど MEB への遷移に高いサブクール度が必要になり，あまりに高い濃度では MEB 自体発生しないことが明らかになっている．他にも，水－エタノール（10%）や水－1-Butanol（3%）の混合液でも MEB の発生は確認されている（Suzuki, et al., 2005）．

（3）サブクール度の影響（純水の場合大気圧下サブクール度約 20-25K 以下では MEB が起こらない）
MEB 発生要因の一つとして CHF 付近に生じる合体泡の凝縮崩壊が関連していると考えられている．気泡が凝縮崩壊しない飽和沸騰では MEB は観測されていない．実際にサブクールプール沸騰試験時にサブクール度を細かく変化させ純水にて実験された例を見ると, サブクール度 20-25K 以上で MEB が起きるとの報告がある（Suzuki, et al., 2011, Tang, et al., 2013）．また，沸騰現象ではないがサブクールプール中に蒸気を射出した場合に，サブクール度 20K 以上になると蒸気泡界面に擾乱が発生するとの報告もある（Ueno, et al., 2007）（Tang, et al., 2015）（Ueno, et al., 2018）．

（4）プール中に超音波を照射すると，MEB の発生時サブクール条件が緩やかになる
気泡の凝縮崩壊が MEB 発生の一つの要因であるとの考えから, 水中の超音波照射を外乱としたときに MEB 発生条件がどのように変化するかも調べられている．MEB が発生しないサブクール度 20 K で超音波を照射した場合，伝熱面上の合体気泡が微細気泡群に崩壊とともに高熱流束になる MEB が発生している（Suzuki et al., 2009）．すなわち，MEB はサブクール度 20 K 以上の CHF 付近で伝熱面上の合体気泡の気液界面の不安定が増幅して微細気泡に崩壊し，固液接触が起こり，

熱流束が CHF 以上に高くなるものと考えられる．純水の水平矩形管内流動沸騰に発生した MEB において，伝熱面付近の圧力変動と気泡挙動の同期動画解析では，気泡崩壊の周波数にほぼ比例して熱流束が直線的に増加することが報告されている. すなわち MEB における気泡崩壊の周波数が固液接触の周波数と考えている（Suzuki, et al., 2005）.

（5）水中の非凝縮性ガスの影響（非凝縮性ガスが MEB 特性に影響する）
純水を用いたサブクールプール沸騰試験において、サブクール度 50 K として事前に脱気をしなかった場合に MEB 領域での熱流束の伸びが抑制されることが報告されている（Tang, et al., 2013）. また高速カメラによる撮影により, 溶存ガスがある場合には MEB 時の気泡凝縮崩壊の抵抗になることも示されている（Nakamura, et al., 2018）．一方，窒素ガスをバブリングさせながらサブクール度 50 K にて実験を行った場合でも MEB が発生することも確認されている（海野・結城他, 2018）.

（6）伝熱面周辺の温度場観察による MEB 時の固液接触箇所の測定（Furusho, et al., 2017）
高熱流束除去を可能にする MEB であるが, それだけの熱量を冷却するにあたっては伝熱面上にサブクール液が触れて相変化が起きていないことには実現できないはずである．そこで、極細熱電対をアレイ状に配置したものを使って伝熱面周辺の時間平均温度場が測定され，固液接触箇所の解明が試みられている．その結果，MEB 発生初期においては伝熱面周辺部で固液接触が盛んにおきているが, 高熱流束域になると面中央側に固液接触が広がる可能性があることが示されている.

（7）強制流動沸騰においても MEB は発生する（久保・熊谷, 1992）
上辺 427 μm, 下辺 280 μm, 高さ 104 μm の台形マイクロチャネル内において，サブクール度 80 K 質量流速 883.8 kg/m^{2}s の純水を使った試験にて，MEB の発生が確認されその最大熱流束は 1441 W/cm^2 と報告されている（Wang and Cheng, 2009）．また，流速が速く，流路高さが高いほど MEB へ遷移しやすいとされる（Suzuki, et al., 2005）．しかし，長尺の伝熱面では下流側のサブクール度が劣化し MEB が抑制される（Suzuki, et al., 1999）．これを防ぐには，サブチャネルからの衝突噴流を吹き付け長尺の伝熱面全領域のサブクール度を調整することが有効である（Torikai, et al., 1994）.

（8）平面伝熱面だけでなく，細線加熱実験においても MEB は発生する（庄司, 2006）
白金細線などに通電加熱した場合にも, サブクール度の条件が合えば MEB に遷移し平面と同様に CHF を超える高熱流束除去が可能である．一方で，平面伝熱面でも設置の際に周囲から一段下がった状態（0.5 mm）の場合には MEB への遷移が阻害されることも報告されている（Zhu et al., 2014）.

３．気泡微細化沸騰の実用化にむけた応用研究

前章で紹介した研究のように気泡微細化沸騰のメカニズム解明に対する様々なアプローチがされている．一方で、沸騰という現象自体も最初は工業的応用が先に熟成し，その後に学術上の理解が進み始めたという前例がある．そこで，まずは実用的な気泡微細化沸騰冷却デバイスを何かしらの方法で提示することが急務と考え，これができれば工業的および学術的観点からもありがたいと願っている．そして実用できる気泡微細化沸騰冷却デバイスの熟成を通して様々な問題を解決しながら発生メカニズムに再度アプローチすることにより，解明への道筋が見えてくるのではないかと思い，現在筆者の研究グループが進めている応用研究を次に紹介させていただく.

（1）伝熱面表面ぬれ性が MEB の発生に与える影響（ぬれ性が悪いと MEB を阻害する）
MEB 実験には平面伝熱面の場合は無酸素銅が用いられてきた．しかし，無酸素銅は酸化・腐食しやすく実用上は何かしらの表面コーティングがなされるはずである．そこで，無酸素銅伝熱面にニッケルやクロムをコーティングした場合 MEB に遷移するのかを確かめた．その結果，コーティングにより MEB への遷移が阻害されることが分かった．水滴を用いて接触角を測定したところ，MEB に遷移後の無酸素銅面に比べて遷移しなかったコーティング面の表面ぬれ性は低いことが分かった．また，無酸素銅伝熱面であっても表面にフッ素系の薄膜コーティングを施した場合にも，MEB への遷移が起きず膜沸騰に遷移することも確認できている．まずは高熱流束環境においても伝熱面がぬれる条件が整っていないと蒸発潜熱による熱輸送が行われないので，気泡の凝縮

崩壊パラメータだけでなく伝熱面表面ぬれ性が MEB 遷移の条件として重要であることを明らかにした（海野・結城他, 2018）（Unno, et al., 2018）.

（2）プール水位が MEB の発生に与える影響（水位 10mm まで MEB の挙動は変わらない）
はじめに述べたように，最終目標は省エネ冷却技術としての MEB の利用であるので，外部電力を必要とするポンプを使う強制流動系ではなく，サブクールプール沸騰を現在主に研究している．これまでの MEB 研究で用いられてきたサブクールプール沸騰装置はデバイスに実装するには大きく，プール容量も 1L 以上のものが多かった．そこで，使用液量を 100 mL 以下にしたプール沸騰装置においても MEB への遷移が見られるのかを明らかにするため, 実際にコンパクトプール沸騰装置を製作し MEB へ遷移可能な最低水位を調べた．その結果，純水であれば水位 10 mm までは既存の MEB 研究と同等の沸騰曲線が得られるが，水位が 6 mm 以下では膜沸騰に遷移してしまうことを示した．特に，冷却デバイスの大きさは実装にあたり重要であるが，プール部分高さを 10 mm まで低くしても現状の構成で MEB を使えることを示した意義は大きい（Unno, et al., 2018）.

４. おわりに

伝熱面からの超高熱流束除熱に適した省エネ技術である MEB は電子機器（半導体デバイス）の冷却に応用可能であるとの記述は少なくとも 15 年以上前から見られる（鈴木他, 2004）．諸先生方の視野と知識の広さは本当にすごいとしか言いようがない．そして今，時代が追い付き始めて沸騰冷却の応用範囲が広がろうとしている．もちろん，従来の単相冷却技術は長年にわたる十分な評価とともに実績の蓄積があり簡単に切り替えられるものではないが，電子機器の冷却に関するトレンドが沸騰冷却に変わる瞬間は将来きっとやってくると確信する．なぜなら，最も高い熱伝達率が得られる物理現象が相変化であり，沸騰であり，気泡微細化沸騰であるという知識が存在するからである．皆がそろって実装し始める日が訪れた時に技術的に遅れないように準備をしておくことは大事だと考える．そして，沸騰冷却デバイスを実用化するにあたっては，沸騰だけを考えていればよいわけではない．どうやって凝縮させて液をプールに戻すか，蒸気に耐性のある安価な部材や容器の気密接合方法はどうするか，半導体デバイスの絶縁をどのように担保するかなど，熱工学部門の皆様のみならず様々な業種の産業界から要求を吸い上げて沸騰部分をどう作っていくかがこれからの筆者の仕事だと考えている．そういった意味で普段沸騰がご専門でない方々，特に産業界の皆様に本記事を読んで頂き沸騰冷却にご興味を持って頂けたら幸いである．ご興味をもって頂いた方々と学会などで直接お話できる日を楽しみにしている．

謝　辞

本記事を執筆する機会を頂きました，徳永敦士先生（宇部工業高等専門学校　准教授）に謝意を表します．沸騰研究の奥深い世界に筆者を導いてくださいました鈴木康一先生（山陽小野田市立山口東京理科大学　名誉教授），結城和久先生（山陽小野田市立山口東京理科大学　教授）に心より感謝申し上げます．伝熱面表面と沸騰現象について考えるきっかけを下さった佐竹信一先生（東京理科大学　教授）に厚く御礼申し上げます.

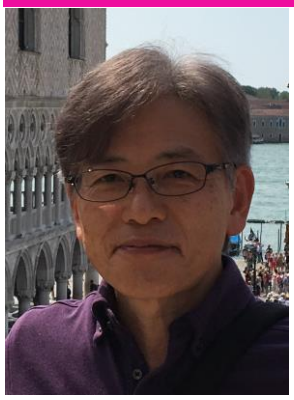
文献

日本機械学会, JSME テキストシリーズ　伝熱工学 (2005), p. 9.
抜山四郎，機械學會誌, Vol. 37, No. 206 (1934), pp. 367-374.
稲田茂昭，宮阪芳喜，泉亮太郎，小長谷芳彦，日本機械学会論文集 B 編, Vol. 47, No.417 (1981), pp. 851-861.
稲田茂昭，宮坂芳喜，佐久本伸，泉亮太郎，日本機械学会論文集 B 編，Vol. 47，No.422 (1981), pp. 2021-2029.
稲田茂昭，宮坂芳喜，泉亮太郎，日本機械学会論文集 B 編, Vol. 47, No. 422 (1981), pp. 2030-2041.
稲田茂昭，宮阪芳喜，泉亮太郎，小林盛一，日本機械学会論文集 B 編, Vol. 47 No. 423 (1981), pp. 2199-2208.
Ivey, H. J. and Morris, D. J., Proceeding of 3rd International Heat Transfer Conference, Vol.3 (1966), pp. 129-142.
Suzuki, K., Yuki, K., Chen Y., Proceedings of the 25th International Symposium on Transport Phenomena (2014).

Furusho, T., Yuki, K. and Suzuki, K., Proc. of 15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm) (2016), pp. 193-198.
Suzuki, K., Kokubu, T., Nakano, M., Kawamura, H., Ueno, I., Shida, H., Ogawa, O., Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 29, No.7 (2005), pp.827-832.
Suzuki, K., Yuki, K., and Mochizuki, M., Application of Boiling Heat Transfer to High-Heat-Flux Cooling Technology in Power Electronics, Transaction of the Japan Institute of Electronics Packaging, Vol.4, No.1 (2011), pp.127 -133.
Tang, J., Zhu, G., Sun, L., Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 50 (2013), pp. 97-106.
Ueno, I., Arima, M., Behavior of vapor bubble in subcooled pool, Microgravity Science and Technology, Vol.19, (2007), pp.128–129.
Tang, J., Yan, C., Sun, L., International Journal of Heat Mass Transfer, Vol. 88 (2015), pp.597–608.
Ueno, I., Koiwa, Y., Okada, M., Kaneko, T., Proc. of 10th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer (2018).
Suzuki, K., Inagaki, F., Ueno, I., Heat transfer enhancemnet in subcoolrd boiling with ultrasonic field, Trans. Japan Society for Aeronautical and Space Science (JSASS) and Space Tech. Japan, Vol. 7 (2009), pp. Ph67-Ph70.
Suzuki, K. and Inagaki, R., A fundamental study on high heat flux cooling using subcooled boiling with microbubble emission in horizontal rectangular channel., Proc. 5th International Cinference on Enhanced, Compact and Ultra-compact Heat Exchangers, Science, Engineering and Technology, CD-ROM (2005), CHE2005-37.
Nakamura, J., Tsuruta, T., Tanigawa, H., Proc. of 10th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer (2018).
海野德幸，結城和久，木伏理沙子，鈴木康一，日本機械学会熱工学コンファレンス 2018 講演論文集 (2018).
Furusho, T., Yuki, K., Kibushi, R., Unno, N., Suzuki, K., The 28th International Symposium on Transport Phenomena, No.26 (2017).
久保良，熊谷哲，日本機械学会論文集 B 編, Vol. 58 (1992), pp.497-502.
Wang, G., Cheng, P., Subcooled flow boiling and microbubble emission boiling phenomena in a partially heated microchannel. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 52, No.1-2 (2009), pp. 79-91.
Suzuki, K., Kokubu, T., Nakano, M., Kawamura, H., Ueno, I., Shida, H., Ogawa, O., Experimental Thermal and Fluid Science, Vol.29 (2005), pp. 827-832.
鈴木康一，鳥飼欣一，佐藤英明，石丸淳二,田中康夫，日本機械学会論文集 B 編, Vol. 65, No. 637 (1999), pp.3097-3104.
Torikai, K. and Suzuki, K., et al., Proc. 3rd Int. Symp., Multi-Phase Flow Heat Transf., (1994), pp. 70-77.
Suzuki, K., Inagaki, F., Hong, C, Heat Transfer Engineering, Vol. 32, No.7-8(2011), pp. 673-682.
Zhu, G., Sun, L., Tang, J., Mo, Z., Liu, H., International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 59 (2014), pp.148-157.
庄司正弘，神奈川大学工学研究所所報, Vol. 29 (2006), pp. 2-9.
海野德幸，結城和久，木伏理沙子，佐竹信一，鈴木康一，熱工学コンファレンス 2018 講演論文集 (2018).
Unno, N., Yuki, K., Kibushi, R., Satake, S., Suzuki, K., Proc. of the 29th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP29).
Unno, N., Yuki, K., Kibushi, R., Suzuki, K, Advanced boiling cooling technology using a compact vessel with a low water level. Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging, Vol. 11 (2018), E18-010.
鈴木康一，河村洋，大田治彦，阿部宣之，沸騰冷却方法、沸騰冷却装置および流路構造体並びにその応用製品，特許第 4464914 号 (2004).

TED Plaza

バイオ医薬品のためのタンパク質水溶液のマイクロ波常温発泡乾燥



鶴田　隆治

九州工業大学　教授
工学研究院機械知能工学研究系
tsuruta.takaharu393@mail.kyutech.jp

１．はじめに

バイオ医薬品は，遺伝子組換え技術や細胞培養技術を用いて製造されたタンパク質を有効成分とする医薬品である．化学合成の低分子医薬品に比べて分子量が大きく，構造も複雑であって，その特性や性質は製造工程自体に依存するため，異なる製造者が同じものを作ることは困難とも言われている（松崎，2013）．その開発は 1980 年代から本格的に行われ，タンパク質本来の生理活性に基づく優れた薬効や速攻性および治療範囲の広さから利用が急速に進んでいる．最近では，酵素，ホルモン，サイトカイン，インターフェロン，抗体，また本庶佑先生がノーベル医学生理学賞を受賞されたのを機に，がん免疫治療薬など，多くのバイオ医薬品の名を耳にする機会も多くなったのではないだろうか.

バイオ医薬品の製品形態としては，多くが注射剤として用いられるために液状の溶液製剤と，溶液での数カ月から数年間の保存安定性確保が困難なタンパク質の場合には，乾燥品としてのいわゆる用時溶解型製剤となっている．水溶液中のタンパク質分子は，活発な分子運動による化学変化や熱変性を受けやすく，また水溶液輸送時の振とうによる高次構造の崩壊などの物理変化を防止する必要もあり，保存安定性を向上させるために乾燥状態での製品化の必要性が高くなっている.

その方法としては凍結乾燥が主流となっているが，バイオ医薬品としての主薬の他に，水溶液状態でのタンパク質構造を物理・化学的に安定化させるための安定化（保護）剤，凍結過程を経ることによる pH 変化に対する pH 調整剤や，等張化剤，そして賦形剤などの添加剤を必要とし，製剤開発と実際の製造の各工程においてその最適化は重要となっている（伊豆津，2012）．特に，凍結乾燥過程はバイオ医薬品製造の最終工程になるため，添加剤とともに，複雑かつ長期間にわたる培養と精製過程を経て生産された主薬が凍結乾燥に進むことを考えれば，乾燥工程の失敗は許されるものではない．しかしながら，凍結乾燥では，添加剤を含むタンパク質水溶液の凍結プロセス（氷晶形成と成長），低温・低圧下での氷晶の昇華である一次乾燥プロセス，そして氷晶昇華後にガラス化状態を保ちながら室温まで昇温する二次乾燥プロセスなど，物理・化学的変化をもたらす可能性のある現象は多く介在して複雑なプロセスとなるため，新規に開発されるバイオ医薬品に最適な乾燥プロセスを設計するには多大な努力が必要とされる．また，一次乾燥には数日を要することも多く，真空ポンプや加熱・冷却のエネルギー消費を考えれば，極めて長い乾燥時間と多大なエネルギーは凍結乾燥の大きな課題である．そのため，新規薬剤開発を目指す製薬分野においては，凍結乾燥に代わる革新的な技術が切望されている（Walters, et al., 2014, Langford, et al., 2018）.

本稿では，常温乾燥法としてマイクロ波真空乾燥技術（鶴田，2017）を用いれば，タンパク質を失活させることなく乾燥できる可能性のあること，特に水溶液を泡状にすれば，より高速に乾燥が進むことを紹介する.

２． 凍結乾燥法とマイクロ波常温乾燥法の比較

まず，広範なタンパク質に利用可能な安定剤とされるショ糖水溶液を例とし，Franks・寺島の解説（Franks, 寺島，1996）をもとに，凍結乾燥プロセスの状態変化から紹介する．図 1 では，溶質（ショ糖）濃度の増加とともに非晶質となるガラス転移温度T_gが上昇する様子を示すとともに，各濃度に対する平衡凝固点と溶解度を示している．ただし，概略の説明のために数値的な厳密さは追求していない．図中の A から始まる凍結乾燥過程では，冷却によって平衡凝固点を越えた過冷却状態 B で氷核生成が生じ，その後，氷結晶の成長とともに溶質の排除による凍結濃縮が進行する．それに伴い凝固点降下が生じ，引き続く冷却によって平衡凝固曲線上を高濃度側に進むと，やがて溶解度曲線との交点である共晶点T_eに到達する．NaCl 水溶液などは，明瞭な共晶点が存在して析出が始まるが，糖類の水溶液では凍結濃縮の進行によって残存溶液の粘性が非常に高くなるために糖が結晶になりづらく，共晶現象は生じないことが知られている．この領域では，溶液はシロップ状になり，次いでゴム状になるため，ゴム領域と呼ばれている．この間の粘度上昇は数桁にも上り，やがて C 点でガラス転移曲線と交わり，事実上の凍結はこの点で終了する．この点の温度はT_g'と表され，最大濃縮相のガラス転移温度であり，濃縮相がガラス状態になっているため，この点より温度を下げても，さらなる凍結濃縮や氷結晶の成長，組成変化は生じない．ガラス状態の中に残る水は不凍水となる．したがって，凍結乾燥の一次乾燥はこの点を目標に行われ，氷晶の昇華後に多孔質状となった固体からの水分蒸発を行う二次乾燥に移行し，ガラス転移曲線上を C から D に進んで，凍結乾燥が終了する．

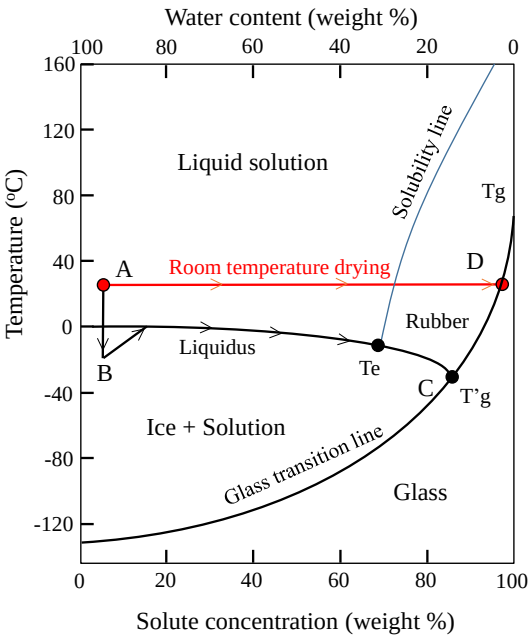


Fig. 1 Drying processes in solid/liquid phase diagram of the sucrose solution.

ガラス領域では，極度に高粘度になるため，物質の拡散速度が極めて低く，物理的，化学的，そして生物学的変化はおこらず，物質は安定に保たれる．余談にはなるが，生体の凍結保存はこのガラス領域を利用するもので，A 点から超急速冷却によって B 点の氷核生成を回避してガラス領域に入り，解凍時にも水の再結晶化を回避して A 点に戻るものである．一方，雨で蘇る乾燥昆虫もこのガラス化によって代謝活動を制御し，生命活動を回復することが「乾眠」として知られている（古木他，2009）．この場合は，凍結の絡まない常温での乾燥によるガラス化で，恐らく本稿の主目的である常温乾燥 A→D の現象になろう．

つまり，図 1 の同じ出発点 A と目的点 D に対して，凍結乾燥の長くかつ複雑なプロセス（A→B→C→D）ではなく，常温のまま直接（A→D）となるプロセスが実現できれば，凍結乾燥よりも高い温度で水分蒸発が行われ，短時間の乾燥工程とすることが可能である．Franks・寺島の解説

によれば，この方法はパーマザイム法（Permazyme Process）と呼ばれ，すでに特許化されて製薬会社などで採用されている．具体的な方法としては，室温程度の常温である必要性から真空乾燥や，ある程度の高温に耐えられる製品の場合にはスプレー乾燥が施される．さらに最近では，2018 年 9 月にスペインのバレンシアで開催された第 21 回国際乾燥シンポジウム IDS’2018 において，米国 Pfizer 社の Dr. Satoshi Ohtake が”Beyond freeze-drying of biologics: Vacuum-foam drying and spray freeze-drying”と題したキーノート講演を行なっており，真空泡乾燥やスプレー凍結乾燥が凍結乾燥を超える期待される技術であると紹介している（Langford, et al., 2018）.

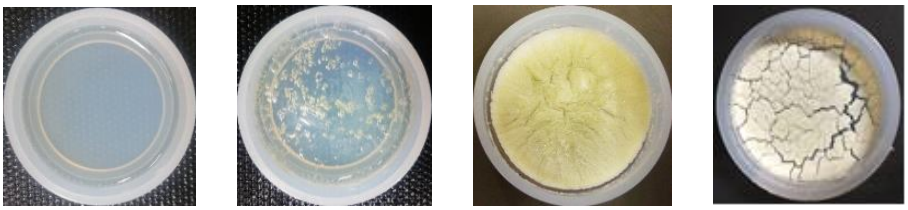
要点としては，バイオ医薬品の活性低下につながる水分領域を短時間に通過すること，具体的には高粘度のゴム領域を高速で通過してガラス状態に移行することである．したがって，熱・物質輸送の観点に立てば，抵抗の小さい薄膜や微細液滴が有力であることは容易に想像できる．

３． マイクロ波常温乾燥法によるフィルム乾燥と泡乾燥

高速の常温乾燥を施す方法として，水の沸点を下げるために真空環境を用い，蒸発潜熱の供給にマイクロ波を用いる方法がある．ここで重要なのは，あくまで蒸発に必要な潜熱を供給することであり，蒸発を速めようとして不必要にマイクロ波強度を高めても，結果的に顕熱にしかならず，品温を上げてしまうことがある．この点に注意し，タンパク質水溶液を慎重にフィルム状に乾燥させた例と，より積極的に発泡をともなって乾燥させた場合について紹介する．なお，マイクロ波乾燥装置の詳細は，文献（Tsuruta, et al., 2015）を参照願いたい．

３・１ 静的なフィルム乾燥について

最初に，フィルム状に乾燥させた結果から紹介する（Tsuruta, et al., 2018）．図 2 は，卵白をマイクロ波真空乾燥（MVD），凍結乾燥（FD），そして 1 時間の MVD を行った後に FD で乾燥を行なったときの乾燥後の様子を比較したものである．MVD の圧力は 20kPa とし，温度を 40℃以下に保って行った．卵白は，およそ 88%が水で，タンパク質の主成分はαヘリックス構造を持つアルブミンである．容器は，直径 50mm，高さ 12mm の PFA 皿で，試料として 5g の卵白を入れると厚みが 3mm 程度となる. 写真からもわかるように, MVD ではところどころに気泡痕があるものの，大半は生の状態と同じく無色透明の状態にあり，ガラス状態になっていることが伺える．



(a) Control (raw) (b) MVD (c) FD (d) 1h-MVD+FD

Fig. 2 Comparison of dryied egg whites.

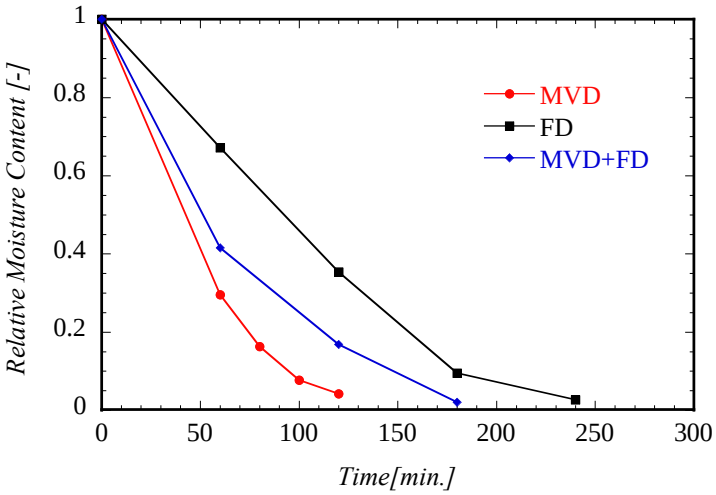


Fig. 3 Time transitions of moisture content ratio of egg whites.

この時の乾燥速度の比較を図 3 に示すが，最終水分率 5%までに FD では 240 分を要しているのに対し，MVD では半分の 120 分で感想を終了している．なお，MVD と FD とを組合せた乾燥を行なったのは，乾燥品の溶解性を考え，FD による多孔質化を重視したためである．

乾燥後の卵白アルブミンが，果たして元の構造であるαヘリックス構造を維持しているかどうかについては，円二色性分散計（CD）を用いて CD スペクトル解析を行い，波長 210nm と 220nm 近傍に二つの負のピークを持つというαヘリックス構造の特徴が確認できた（図 8）．

また，タンパク質の構造だけでなく，その機能が失活していないかの確認も重要であるため，糖質加水分解酵素であるリゾチームがミクロコッカス・ルテウスという細菌の細胞壁を分解することを利用して，残存活性の評価を行った．図 4 にその結果を紹介する．分光光度計を用いた吸光度の変化によってミクロコッカス・ルテウスの濃度変化を把握する方法であるが，比較対象として 98℃に加熱処理をしたリゾチームの結果も示しており，加熱処理を行うと細菌濃度が減少しないことが確認できる．したがって，この結果が示すように，ここで示した 3 つの乾燥法の全てが，リゾチームの活性機能を保存できることがわかった．

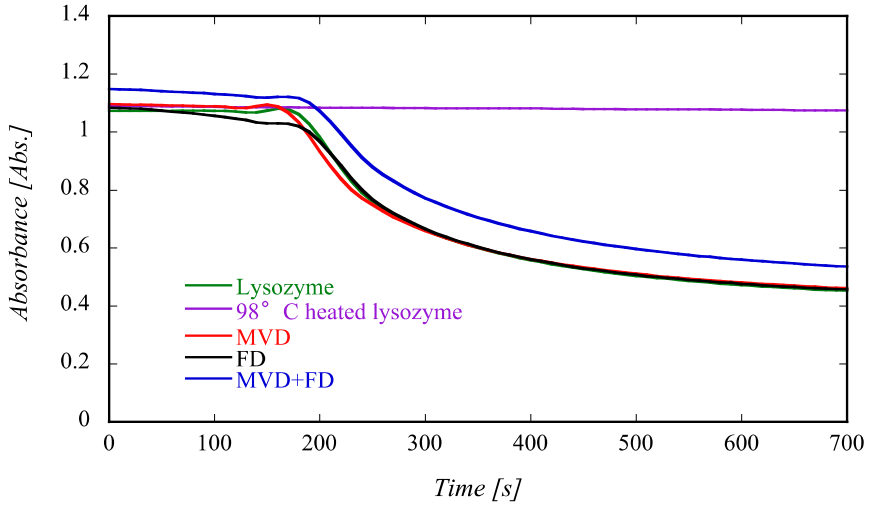


Fig. 4 Evaluation of residual activity of lysozyme with use of micrococcus luteus.

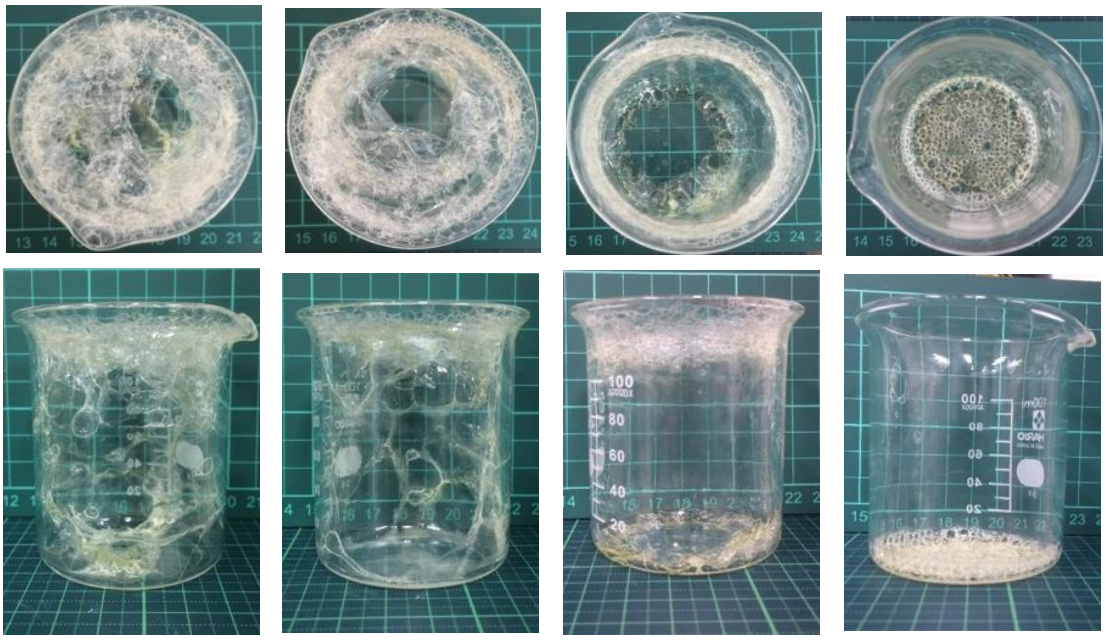
3・2　動的な発泡乾燥について

静的なフィルム状の乾燥では，図 3 に比較したように，さほどの乾燥速度の改善にはなっていないように思われる．そこで，圧力をより低圧の 5kPa（飽和温度：33℃）とし，マイクロ波出力を変えて実験を行なった．その結果を図 5 と図 6 に示す．試料は同じく 5g の卵白であるが，容器直径は 50mm と同じであるものの，高さ 70mm のガラス製ビーカーとした（Tsuruta, et al., 2019）．

図 5 は，乾燥終了後の卵白の様子を示しているが，マイクロ波照射強度が大きくなるにしたがって，泡の状態で多く残っているのがわかる．卵白はもともと発泡性が良いため，攪拌することによってメレンゲを作ることなど，日常でもよく目にするが，減圧下でのマイクロ波加熱でも泡状になることがわかる．50W の照射強度では容器底部に気泡が発生するのみで，泡となってビーカー上部に上昇することはなかった．そのため，容器底部で小さな気泡痕を形成して乾燥を終えており，気泡痕の密度は多いものの，図 2(b)で示したフィルム状でのガラス化乾燥と同様の乾燥形態にあると判断する．それに対して 100W 以上のマイクロ波照射強度では，容器底部で気泡が多く発生し，成長をともなって上部に一斉に上昇していった．この実験では，ビーカー上部から溢れることはなかったが，写真に見られるように 70mm の高さまで到達している．乾燥の初期では，溶質濃度もまだ低く，粘度もさほど大きくはないため，泡となって上部に達した溶液は泡の消滅によってビーカー内面を重力によって流下する．図 5(c)はこの時の泡の形成と安定性の関係を非常によく表現している．すなわち，泡が安定した状態のまま上部に留まってガラス化したものと，流下して下部に留まり，そのままフィルム状にガラス化したものに二分化されている．

150W 以上にマイクロ波照射が大きいと，写真のように下部に溶液はほとんど残らず，その全てが泡の形態でガラス化乾燥している．つまり，底部の溶液層で発生する泡の上昇が，上部から

流れ落ちる溶液の流下を妨げつつ，泡の形状を保ったまま容器の内壁一面に付着し，その状態のままガラス化していると判断できる．泡の形成とその安定性が非常に重要なことを示している．



(a) 200 W　(b) 150 W　(c) 100 W　(d) 50 W

Fig. 5. Comparison of forming of egg white after microwave vacuum drying.

このときの乾燥速度を図 6 に見れば，発泡した試料の乾燥時間は非常に短くなっており，短時間に乾燥が終了している．FD と比較すれば，乾燥時間は 10 分の 1 ほどに短縮されており，泡形成が非常に有効であることがわかる．

この間の温度変化がはたしてどうなっていたかについては，図 7 に卵白の濃度を時間の代わりにとって示している．なお，この図は図 1 と同様に卵白の相図にもなっている．

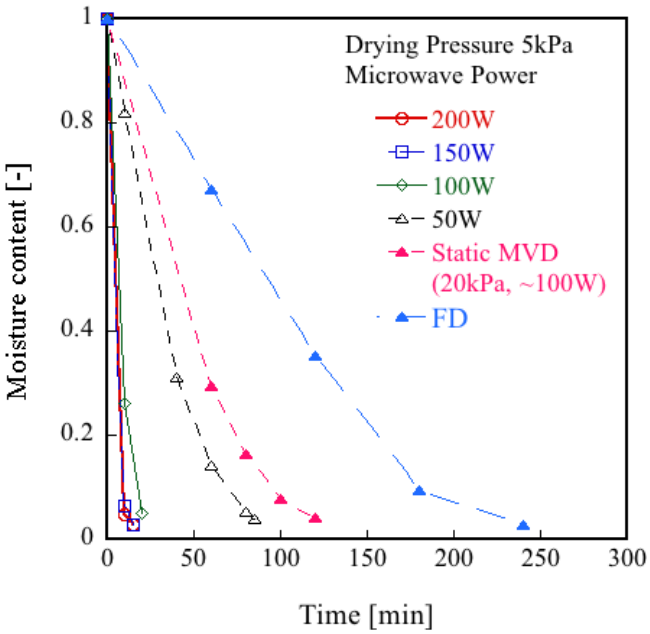


Fig.6 Comparison of drying rate of 5g egg white.

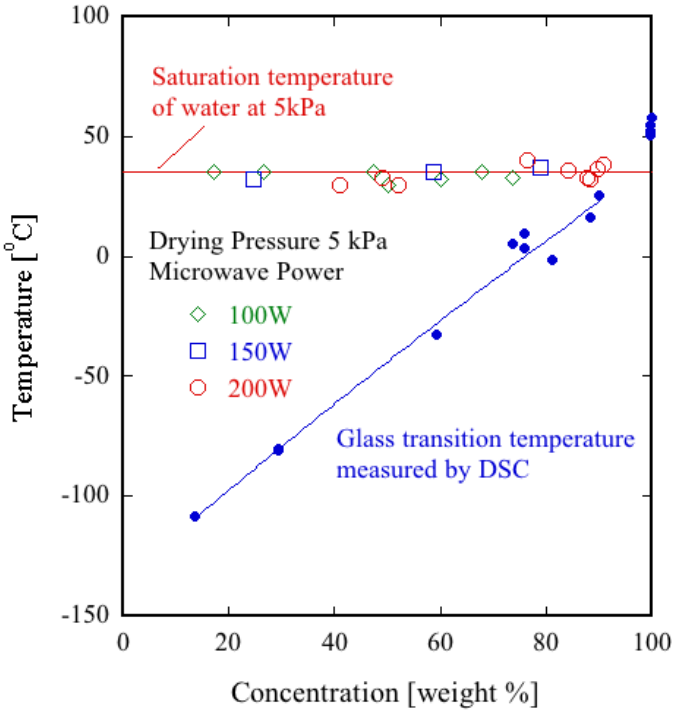


Fig. 7 Temperature changes of egg white in microwave foam drying as a function of concentration.

乾燥中の卵白の温度は，容器底部に設置した光ファイバー温度計によって測定しているが，底部に卵白がなくなった時の温度についての信頼性は低いものの，その出力値は圧力に対する飽和温度にほぼ保たれており，大きな差はないものと考えている．なお，図中の卵白のガラス転移温度は，示差走査熱量計（DSC）で実際に測定したものであり，乾燥終盤でガラス転移温度とほぼ交差していることから，乾燥後の状態はガラス状態にあると推定される．

実際に，フィルム乾燥の場合と同様に，CD スペクトル解析によって分子の構造解析を行うと，図 8 に示すように，98℃に過熱処理した際には見られない，卵白アルブミンのαヘリックス構造の特徴を示す二つの負のピーク値が確認でき，分子構造を維持していることが確認できる．

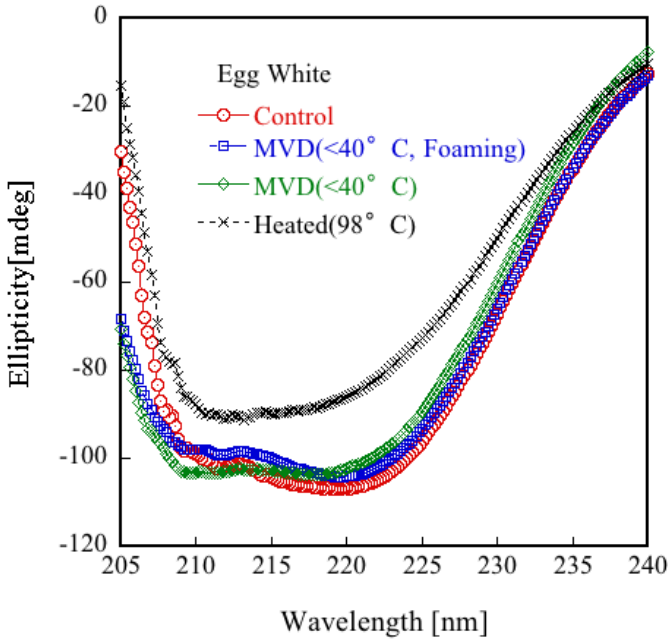


Fig. 8 CD spectrum change of dried egg white to examine the α-helix structure.

４． おわりに

本稿では，バイオ医薬品製造のための乾燥技術として，最も多用されている凍結乾燥法について触れた後，凍結過程を経ない常温乾燥の利点を挙げ，現在取り組んでいるマイクロ波を利用した発泡乾燥について紹介した．常温であることからタンパク質の構造崩壊や機能の失活を防ぐことが可能なこと，および泡の形態により高速乾燥となることについて，卵白のケースを中心に述べている. 泡立ちの良い卵白に限るのではとの懸念もあることから, リゾチームやプロテアーゼ, スクロース水溶液についての検討も行っており，泡形成によって高速乾燥になることと，分子構造が維持できることを確認している（小川他，2018）．発泡は，粘性が桁違いに大きくなる前であれば可能であり，そのままの状態で乾燥できれば，バイオ医薬品の常温乾燥技術として有効な方法になるものと期待している．

なお，泡については，食品だけでなく，洗浄や消火技術など，非常に広範囲にその応用技術が考えられている（石井他，2005）．また，泡の構造とそのダイナミックスといった基礎的内容についても，ラメラと呼ばれる薄い包膜やプラトー境界には多くの興味深い現象が関わっている．その膜厚は数百 nm から数 nm になり，二つの界面を有することなども，熱および物質伝達の観点からの熱工学的興味は尽きることがない.

謝　辞

タンパク質の構造と機能性評価においては，九州工業大学工学研究院物質工学研究系の竹中繁織教授にご協力いただいた．また，科学研究費補助金の挑戦的研究（萌芽）No.17K18843 および基盤研究(B) No.19H02081 を受けていることを記し，謝意を表す.

文献

Franks, F.，寺島公信，生物製剤の長期常温安定化への道，蛋白質 核酸 酵素，Vol.41, No.6 (1996), pp.810-816.

古木隆生，奥田隆，黄川田隆洋，櫻井実，雨で蘇る乾燥昆虫の謎−ガラス化したトレハロースが水代替作用，Netsu Sokutei, Vol.36, No.2 (2009), pp.105-111.

石井淑夫編集，泡のエンジニアリング，テクノシステム (2005).

伊豆津健一，タンパク質医薬品の凍結乾燥，薬剤学，Vol.72, No.6 (2012), pp.353-358.

Langford, A., Balthazor, B., Bhatnagar, B., Tchessalov, S., Hageman, M.J., Luka, A., Plitzko, M., Luy, B., Ohtake, S., Beyond freeze-drying of biologics: vacuum-foam drying and spray freeze-drying, IDS’2018 – Proceedings of the International Drying Symposium, Editorial Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain(2018), pp. 41-48.

松崎淳一，バイオ医薬品産業の現状と課題，生物工学，Vol.91, No.9 (2013), pp.495-498.

小川拓馬，鶴田隆治，谷川洋文，生物由来水溶性タンパク質のマイクロ波真空発泡乾燥，日本機械学会熱工学コンファレンス 2018 講演論文集(2018), Paper No.0141.

鶴田隆治，マイクロ波を用いた多孔質体内の水分輸送促進と食品乾燥への応用，伝熱，Vol.56, No.234(2017), pp.17-24.

Tsuruta, T., Tanigawa, H., Sashi, H., Study on shrinkage deformation of food in microwave-vacuum drying, Drying Technology, Vol.33, No.5(2015), pp.1830-1836.

Tsuruta, T., Ogawa, T., Abe, R., Tanigawa, H., Ambient temperature drying of therapeutic protein solution with use of microwave, IDS’2018 – Proceedings of the 21st International Drying Symposium, Editorial Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain (2018), pp. 651-658.

Tsuruta, T., Ogawa, T., Fujita, K., Tanigawa, H., Microwave foam-drying of egg white, Proceedings of the Eurodrying’2019, Torino, Italy(2019), Paper No.84.

Walters, R.H., Bhatnagar, B., Tchessalov, S., Izutsu, K.I., Tsumoto, K., Ohtake, S., Next generation drying technologies for pharmaceutical applications, Journal of Pharmaceutical Sciences, Vol.103, No.9 (2014), pp.2673-2695.

2019 年度年次大会 熱工学部門報告

第 96 期熱工学部門年次大会委員会
委員長　足立　高弘（秋田大学）
幹　事　小松　喜美（秋田大学）

日本機械学会 2019 年度年次大会は,「まんず，あべ！機械学会さ！－秋田に集うしったげおもしぇ技術」をキャッチフレーズに 9 月 8 日（日）～11 日（水），秋田大学手形キャンパスにおいて開催されました. 会期中には,「サスティナビリティ」,「AI 社会の機械工学」「少子高齢化・人手不足を支えるテクノロジー」を大会テーマとして 1,080 件の学術講演発表が行われました.

2019 年度年次大会総合プログラム表紙

熱工学部門に関連する学術講演では, 部門一般セッションでは，2 セッションにおいて 9 件の講演発表があり，分散型エネルギーのシステムや要素技術に関する研究成果が発表された．また，オーガナイズドセッションでは，以下に示します 21 セッションにおいて 101 件の講演発表があり, 他部門の研究者を交えた活発な討論が行われた.

・電子情報機器、電子デバイスの強度・信頼性評価と熱制御(〇計算力学部門，熱工学部門，材料力学部門）セッション数：2，講演件数：5 件

・機械工学に基づく細胞アッセイ技術(〇バイオエンジニアリング部門，マイクロ・ナノ工学部門，流体工学部門，熱工学部門，ロボティクス・メカトロニクス部門）セッション数：1，講演件数：7 件

・燃料電池・二次電池とナノ・マイクロ現象(〇材料力学部門，流体工学，熱工学部門，計算力学部門，動力エネルギーシステム部門，マイクロ・ナノ工学部門)）セッション数：2，講演件数：10 件

・乱流における運動量，熱，物質の輸送現象およびその応用(〇流体工学部門，熱工学部門)）セッション数：4，講演件数：21 件

・熱・流れの先端可視化計測(〇流体工学部門，動力エネルギーシステム部門，熱工学部門，バイオエンジニアリング部門，エンジンシステム部門)）セッション数：4，講演件数：19 件

・マイクロ・ナノスケールの熱流体現象(〇流体工学部門，熱工学部門，マイクロ・ナノ工学部門）セッション数：4，講演件数：21 件

・交通・物流機械の自動運転(〇交通・物流部門，機械力学・計測制御部門，機械材料・材料加工部門，熱工学部門，スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス部門，技術と社会部門，流体工学部門，法工学専門会議，生産加工・工作機械部門，設計工学・システム部門，産業・化学機械と安全部門，ロボティクス・メカトロニクス部門）セッション数：2，講演件数：6 件

・医工学テクノロジーによる医療福祉機器開発(〇医工学テクノロジー推進会議，機械力学･計測制御部門，バイオエンジニアリング部門，材料力学部門，機素潤滑設計部門，流体工学部門，ロボティクス・メカトロニクス部門，熱工学部門，計算力学部門，情報・知能・精密機器部門，マイクロ・ナノ工学部門）セッション数：2，講演件数：12 件

熱工学部門では，例年通り熱工学部門に関連する講演に対して「若手優秀講演フェロー賞」の審査を行い，評価フォームによる採点を行っております．審査を行うにあたりご協力を賜りました多くの先生方には，この場をお借りして御礼申し上げます．恒例の部門同好会は，流体力学部門，計算力学部門および材料力学部門との合同で，9 月 9 日の夕方に秋田大学生協で開催され，合計 40 名の参加を頂きました. 利き酒大会を開催し各部門の垣根を越えた交流を図ることができまいた．最後になりましたが，年次大会の企画・運営にご尽力いただきましたオーガナイザー，講演者，座長の皆様に厚く御礼申し上げます.

熱工学コンファレンス 2019 開催（中止）報告

熱工学コンファレンス 2019 実行委員会
委員長　田川正人（名古屋工業大学）
幹事　保浦知也，服部博文（同上）

１．はじめに

「熱工学コンファレンス 2019」は，2019 年 10 月 12 日 (土)，13 日 (日)にわたり名古屋工業大学（御器所地区，名古屋市昭和区御器所町）で開催されることになっていましたが，開催期間中に大型で猛烈な台風第 19 号が襲来したことから，全日程の開催中止を余儀なくされました．以下では，本コンファレンスの概要，開催中止の通知・公表ならびに中止にともなう事後処理，検討すべき課題等について報告させていただきます．

図 1　コンファレンス会場（名古屋工業大学，御器所地区）

２．熱工学コンファレンス 2019（No. 19-303）の概要

本コンファレンスでは下記のオーガナイズドセッション（14 テーマ）と一般セッションを設けて講演発表を募集しました．なお，本コンファレンスは日本機械学会若手優秀講演フェロー賞の選考対象講演会ですので，同賞の受賞資格を有する方には講演発表申し込みの際に審査希望の有無を選択いただきました．

OS 1：　外燃機関・排熱利用技術
OS 2：　火災・爆発
OS 3：　電子機器・デバイスのサーマルマネジメント
OS 4：　多孔質体内の伝熱・流動・物質輸送現象とその応用
OS 5：　乱流伝熱研究の進展
OS 6：　機器設計のためのラピッドシミュレーション
OS 7：　燃料電池・二次電池関連研究の新展開
OS 8：　マイクロエネルギーの新展開
OS 9：　バイオマスの変換における熱工学
OS 10：凝固・融解伝熱および結晶成長の新展開
OS 11：ふく射輸送制御
OS 12：未来型エネルギー変換・推進システムのための燃焼研究
OS 13：沸騰・凝縮伝熱および混相流の最近の進展
OS 14：熱工学コレクション 2019（熱コレ 2019）

講演発表申込の総数は 186 件になりました．そのうち，若手優秀講演フェロー賞の審査対象講演は 100 件でした．

本コンファレンスでは，8 講演室パラレルで合計 41 のセッションが組まれていました．また，特別講演（下記），熱工学ワークショップ（No. 19-353，第 96 期熱工学部門講習会委員会担当），熱工学部門賞・部門一般表彰贈呈式，意見交換会が予定されていましたが，これらの行事もすべて中止となりました．なお，熱工学ワークショップについては本ニュースレターにおいて別途報告があります．

【特別講演】
・演題： 超電導リニアの開発経緯と鉄道総研における高温超電導コイルの開発
・講師： 長嶋 賢 氏（鉄道総研 浮上式鉄道技術研究部 部長）

３．開催中止の通知・公表ならびに開催中止にともなう事後処理について

台風第 19 号は 10 月 9 日（水）12 時の時点では図 2 の進路をとると予想されていました．このような情報に基づいて，本コンファレンスの開催中止の判断について，下記の日時と方法で通知および公表しました．

・10 月 7 日（月），8 日（火）「自然災害時の対応について」をホームページに掲載．
・10 月 8 日（火）8:28　日本機械学会のメーリングリスト（5 部門）で今後の対応を通知．
・10 月 10 日（木）13:59　日本機械学会のメーリングリスト（5 部門）で開催中止を通知．
・10 月 10 日（木）17:00　熱工学コンファレンス 2019 のホームページ（下記アドレス）で全日程の開催中止を公表．（詳細については https://www.jsme.or.jp/conference/tedconf19/ を参照ください．）

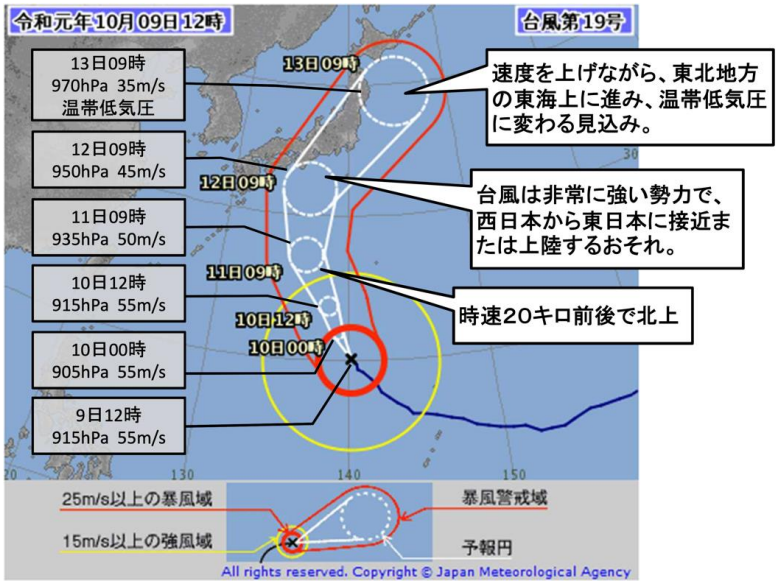


図 2　台風第 19 号の進路予想図
（気象庁「2019 年 10 月 9 日報道発表」より抜粋引用）
https://www.jma.go.jp/jma/press/1910/09a/20191009_1400.pdf

開催中止に伴う事後処理については，熱工学部門，実行委員会，部門担当事務局の間で様々な観点から検討した結果，日本機械学会「地震等の災害時に於ける本会行事の対処方針」に則り，「講演論文集は発行する」，「掲載論文は既発表とする」を基本方針とすることに決まりました．また，参加登録費の取り扱いについては下記のとおり対処するとともに，意見交換会の会費および熱工学ワークショップの弁当代は全額返金することになりました．

・講演予定者（登壇者）：登録費（講演論文集代と論文整理費）を頂戴する．事前参加登録された方には支払い済みの事前参加登録費を頂戴し，事前参加登録されていない登壇者の方には学会員資格に準じた登録費を請求する．
・事前参加登録者で登壇者ではない方（共著者を含む）：講演論文集代（会員：5,000 円，会員外：6,000 円，学生：2,000 円）を頂戴し，差額を返金する．

事前参加登録いただいた方（242 名）には，10 月 18 日に講演プログラム（冊子）と講演論文集（電子媒体）を郵送し，10 月 28 日に領収書を郵送しました．一方，事前参加登録されていない登壇者の方（48 名）には，10 月 31 日に講演プログラム，講演論文集と合わせて請求書を郵送しました．返金手続き（外部業者に委託）は 11 月 1 日に開始できる見込みです（現在進行中）．

４．検討すべき事項について

開催準備において様々な問題に直面しましたが，そのなかでいくつか検討すべき事項を以下に挙げておきます．

・参加登録：事前参加登録期間が終了した時点（9 月 13 日）で参加登録ページ（Web ページ）を閉じましたが，当日参加登録の手続きを簡略化するために開催直前まで参加登録ページを開けておくことは一考に値すると思います．

・参加登録費：日本機械学会の講演会において，「博士課程（後期）の学生（社会人を除く）については，会員資格が正員であっても参加登録費を学生と同額とする」との取り扱いが採用されることがあります．これに関する熱工学部門の対応を定めておいた方がよいと思います．

・協賛学会員の講演：協賛学会員の講演発表（登壇）の可否について議論しておくことが望ましいと思います．

・講演論文の書式：本コンファレンスでは「1 頁書式」と「2～6 頁書式」を選択可能としました．ただし，「投稿原稿執筆要領・論文投稿」の Web ページには，講演論文が 1 頁書式（英文アブストラクトなし）で提出された場合には，若手優秀講演フェロー賞の選考対象にはならない旨の注意書きを記載しました．その理由は，本賞に関する規定に則り「表彰対象者の講演発表と講演論文」に基づいて評価する際に，1 頁書式では「日本機械学会学術誌（日本機械学会論文集，Mechanical Engineering Journal 等）に論文として投稿するに値するレベルにある」か否かの評価が難しいからです．1 頁書式の講演論文を本賞の審査対象とするか否かについて部門の規定があれば助かります．

・Web システムの共通化：コンファレンス Web サイトの開設にあたり，サイト，基本テンプレートは日本機械学会より提供され，開催地と実施内容に即した案内等のページを作成することには問題がありませんでしたが，参加登録，論文投稿システムについては，(1) 自作する（多大な作業時間が発生），(2) 業者に依頼する（多大な費用が発生），の二択しかありませんでした．本コンファレンスでは，参加登録システムについては (2) を，論文投稿システムについては (1) としましたが，完全自作ではなく，前回の富山で作成されたシステムをご厚意で流用させていただきました．これらのシステムは，日本機械学会の全部門における部門講演会で共通化できるものです（部門の事情により多少のカスタマイズが必要とは思いますが）．日本機械学会全体，講演会実行委員会の作業労力と費用負担を減らすためにも，部門を超えた参加登録・論文投稿システムを構築すべきだと思いました．

・保険の加入：本コンファレンスでは賠償責任保険と傷害保険に加入しましたが，「興行中止保険（イベント保険）」には加入していませんでした．現時点では本コンファレンスの収支が確定していませんが，開催中止にともなう経費の補償（リスクの軽減）について考慮しておくべきかもしれません．

５．おわりに

熱工学コンファレンス 2019 には実行委員会委員として下記の先生にご協力いただきました．齋木先生には会場案内および若手優秀講演フェロー賞の審査資料の作成，内藤先生には会場運営の取りまとめをご担当いただきました．また，講演申込の受付，講演論文の投稿，講演プログラムの作成をサポートする Web システムは，熱工学コンファレンス 2018 の実行委員会（富山）からご提供いただきました．ここに記して謝意を表します．

石野洋二郎（名古屋工業大学），古谷正広（同），飯田雄章（同），内藤 隆（同），
齋木 悠（同），板谷義紀（岐阜大学），廣田真史（三重大学），長野方星（名古屋大学），
桑原不二朗（静岡大学），佐野吉彦（静岡大学）

直前での開催中止という非常事態にあたり的確なご指示とご助言をいただきました丸田薫先生（熱工学部門長），鈴木雄二先生（同副部門長）に深謝いたします．また，事後処理の様々な場面で迅速に対応くださった日本機械学会熱工学部門担当の小倉辰徳氏，篠原智也氏に感謝いたします．

最後になりましたが，熱工学コンファレンス 2019 に参加予定の皆様には開催中止ならびに事後処理についてご理解とご協力を賜りましたことに厚くお礼申し上げます．

熱工学ワークショップ開催（中止）報告

第 96 期熱工学部門講習会委員会
委員長　保浦知也（名古屋工業大学）
幹事　佐野吉彦（静岡大学）

「熱工学ワークショップ」（No. 19-353）は，熱工学コンファレンス 2019（名古屋）の初日にあたる 2019 年 10 月 12 日（土）12:00 ～ 14:00 に開催を予定していましたが，台風第 19 号の接近による熱工学コンファレンスの中止に伴い，残念ながら本ワークショップも中止といたしました．以下では，当日に予定していた内容について簡略に報告させていただきます．

本ワークショップは，熱工学コンファレンスと並行して，初日のお昼休みの時間帯を利用して，昼食を取りながらのランチョンセミナー形式で企画しました．この実施形態は，2016 年の熱工学コンファレンス（愛媛）より継続しており，2018 年の熱工学コンファレンス（富山）に続いて第 3 回目となる予定でした（2017 年は第 9 回日韓熱流体工学会議開催のため実施されていません）．これまでと同様に，募集人数は 100 名としましたが，事前予約が 99 名（そのうち，お弁当の予約は 55 名）となりほぼ定員が埋まりました．なお，当日申込による参加者増に対応できるよう，会場は広さに余裕のある階段教室を準備しました．

開催の趣旨は，産業界を中心とした講師をお招きし，熱工学に係る技術上の諸課題や熱工学分野への期待を「熱マネジメント」をキーワードに提示頂き，関係者の今後の研究・開発活動の深化・拡大の萌芽となることを目指すもので前回と同様です．今回はワークショップの開催地である中部地区における伝熱研究をテーマに，産業界において求められている現在の技術トレンドや将来に向けた展望や期待について，下記の 3 名の講師からご講演いただく予定でした．

近藤 良夫 氏（日本ガイシ（株））
「選択波長赤外線を用いた新規プロセス創出の可能性」
佐藤 英明 氏（（株）デンソー）
「自動車の電動化時代に向けた熱マネジメント」
渡邉 澂雄 氏（中部電力（株））
「ヒートポンプの新たな適用分野と次世代のヒートポンプ」

当日のプログラムは，最初に 3 名の講師から順番に 30 分程度で話題のご提供を頂き，最後に 20 分弱のパネルディスカッションで総合討論を行う形で構成していました．これまでと同様に，講師各位には配布資料のご用意は一切お願いせず，最新の情報に基づいた当日その場でのご講演のみをお願いさせて頂きました．上記のご講演題目から，今後の熱工学に関する大変興味深い題材が取り挙げられており，ワークショップが参加者にとって有意義な場となる予定であったと思われます．

最後に，熱工学ワークショップの開催準備にあたり，ご講演を快くご承諾いただきました講師の皆さまに深謝いたします．また，熱工学ワークショップに参加予定の皆様には，開催中止についてご理解を賜りましたこと厚く御礼申し上げます．

第 96 期（2018 年度）熱工学部門賞・部門一般表彰報告

2018 年度部門賞委員会委員長
丸田　薫（東北大学）

熱工学部門では，第 96 期 （2018 年度）の部門賞・部門一般表彰について以下のように決定し，熱工学コンファレンス（名古屋工業大学）において贈呈式を執り行うことを予定しておりました．天候の影響により贈呈式は中止となりましたが，受賞者の方々は，本部門の「部門賞および部門一般表彰規程」により運営委員会構成員ならびに本部門登録会員に候補者を募り，部門賞委員会において部門賞 5 名・部門一般表彰 2 名を選考し，運営委員会の審議を経て決定されました．また，本報告では，第 96 期（2018 年度）に本部門より若手優秀講演フェロー賞を受賞された 7 名の方々も紹介しております．

熱工学部門賞

功績賞（永年功績賞）
宮内　敏雄　氏

贈賞理由:熱工学，とりわけ乱流燃焼の大規模直接数値計算と多次元複合光学計測技術の開発など永年にわたる燃焼工学への功績が顕著であり，環境・航空など多くの関連工学分野への貢献も極めて大きい．

略歴：
1973 東京工業大学大学院
　　理工学研究科修士課程修了
1973 東京工業大学工学部 助手
1981 東京工業大学工学部 助教授
1992 東京工業大学工学部 教授
2000 東京工業大学大学院理工学研究科 教授
2013 東京工業大学定年退職
2013 東京工業大学 名誉教授
2013 明治大学研究・知財戦略機構 特任教授
2016 明治大学研究・知財戦略機構 特任教授退職

功績賞（国際功績賞）
冨田 栄二　氏

贈賞理由:第 8 回日韓熱流体工学会議， COMODIA2017 を始めとする各種国際会議の実行委員長などを務めるとともに，JTST を始め多くの国際学術誌の編集委員を歴任し，熱工学に関する人的・学術的国際交流において，多大な功績を残している．

略歴：
1979　京都大学工学部精密工学科卒業
1981　京都大学大学院工学研究科
　　修士課程機械工学専攻修了
1981　三菱自動車工業株式会社
1982　岡山大学 助手
1990　工学博士（京都大学）
1990　岡山大学 助教授
1998　岡山大学 教授
2014　岡山大学 工学部長（～2017 年 3 月）

功績賞（研究功績賞）
長坂 雄次　氏

贈賞理由：国内外の熱工学，とりわけナノ・マイクロスケールを包含する様々な物質の熱物性に関する幅広い研究業績を挙げる等，熱工学研究の発展に貢献した功績が顕著である．

略歴：
1977 慶應義塾大学工学部機械工学科卒業
1979 慶應義塾大学・助手
1981 Brown 大学（米国）Research Associate）
1983 慶應義塾大学　工学博士
1998 慶應義塾大学・教授
2006 日本学術会議連携会員
2012 日本学術振興会学術システム研究センター
　　主任研究員（工学系科学）
2013 日本熱物性学会会長
2016 日本伝熱学会副会長
2017 文部科学省国立研究開発法人審議会 臨時委員

功績賞（技術功績賞）
栗山　透　氏

贈賞理由：国内外の熱工学，とりわけ極低温(-269℃，4.2K）における超電導磁石冷却のための伝熱，断熱，4K 冷凍機の開発，など，熱工学技術の発展に貢献した功績が顕著である．

略歴：
1982 東京大学工学部機械工学科卒業
1984 東京大学大学院工学系修士課程修了
1984 株式会社東芝　入社
1994 東京工業大学　博士（工学）
2007 株式会社東芝
　電力・社会システム技術開発センター 部長
2014 同社
　電力・社会システム技術開発センター 技監
2015 同社
　電力・社会システム技術開発センター 首席技監
2018 東芝エネルギーシステムズ株式会社
　エネルギーシステム技術開発センター 首席技監

業績賞
鈴木　雄二　氏

贈賞理由：熱工学，とりわけ燃焼における壁面の化学的干渉効果，MEMS 輻射制御デバイス，環境振動発電など，マイクロエネルギー分野における研究業績が顕著である．

略歴：
1993 東京大学　大学院工学系研究科　博士課程修了
　　博士（工学）
1993 東京大学 助手
1994 名古屋工業大学 講師
1995 東京大学講師
1999 東京大学 助教授（2007 年より准教授）
2001 カルフォルニア工科大学客員研究員
2010 東京大学 教授

部門一般表彰

貢献表彰
小宮 敦樹　氏（東北大学）

贈賞理由:熱工学，とりわけ光学系を駆使した熱・物質移動現象可視化やその制御などの分野での研究への貢献，ならびに熱工学部門活動に対する貢献が顕著である．

貢献表彰
平澤 良男　氏（富山大学）

贈賞理由:熱工学，とりわけ複合材の伝熱機構に関する分野での研究への貢献，ならびに熱工学部門活動に対する貢献が顕著である．

若手優秀講演フェロー賞

贈賞理由：実行委員会主導による厳正な審査の結果，本講演は，その内容が優れていると同時に，発表方法に創意工夫がみられ，質疑に対する応答も的確であった．講演者の能力と努力は敬意に値するものであり，今後の活躍に期待が持てると判断した．

論文題目「超臨界状態における高分子炭化水素燃料の熱分解吸熱特性評価に関する研究」

宮浦 拓人　氏（東北大）

論文題目「マイクロからサブミクロンスケールの非対称形状をもつ過熱表面上で自己推進するライデンフロスト液滴の下の蒸気流の数値解析」

Otic Clint John 氏（東北大）

論文題目「メタンハイドレート解離界面における非定常熱物質輸送計測と律速評価」

神田 雄貴　氏（東北大）

論文題目「生物由来水溶性タンパク質のマイクロ波真空発泡乾燥」

小川 拓馬　氏　（九工大）

論文題目「イオンビーム二段階加工による IC 比の異なる PEFC 触媒層内アイオノマー分布解析」

岡田 真也　氏　（大阪大）

論文題目「エタノール水溶液を用いた自励振動ヒートパイプの液柱振動と熱輸送特性に関する研究」

増田 啓介　氏　（東工大）

論文題目「サブミクロン冷線による乱流温度変動の高精度計測に関する研究」

成井 礼　氏　（名工大）

行事案内

部門企画行事案内

－2019 年度－

●The Second Pacific Rim Thermal Engineering Conference (PRTEC2019)
開催日：2019 年 12 月 13 日（金）～17 日（火）
場　所：Hawaii, USA

部門関連行事案内

－2019 年度－

●日本伝熱学会 関東支部セミナー「分野外の技術者にもわかる伝熱工学－最新の研究事例紹介－」
開催日：2020 年 1 月 24 日（金）
場 所：新有楽町ビル，東京都千代田区
主 催：日本伝熱学会 関東支部

●講習会「流体とインフォマティクス」
開催日：2020 年 1 月 15 日（水）
場 所：一般社団法人 日本機械学会，東京都新宿区
主 催：日本機械学会 流体工学部門

●第 30 回内燃機関シンポジウム
開催日：2019 年 12 月 10 日（火）～12 日（木）
場 所：広島国際会議場，広島県広島市
主 催：自動車技術会，日本機械学会エンジンシステム部門

●講演会「1DCAE・MBD シンポジウム 2019」
開催日：2019 年 12 月 4 日（水）～5 日（木）
場 所：ミューザ川崎，神奈川県川崎市
主 催：日本機械学会 設計工学・システム部門

国際会議案内

－2019 年－

●The 7th International Conference on Micro and Nano Flows
開催日：2020 年 9 月 14 日（月）～16 日（水）
場　所：London, The United Kingdom

●The 10th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer
開催日：2020 年 7 月 7 日（火）～7 月 10 日(金）
場　所：Sankt Petersburg, Russia

その他

編集後記

本号の TED PLAZA は相変化をテーマとして 2 報の最新の研究動向についてご寄稿いただきました．九州工業大学の鶴田隆治教授にはバイオ医薬品のためのタンパク質水溶液のマイクロ波常温発泡乾燥についてご執筆いただきました．現在主流となっている凍結乾燥法と比較し，本手法の利点などについて紹介されており非常に興味深い内容となっています．また，山口東京理科大学の海野徳幸講師には気泡微細化沸騰についてご執筆いただきました．CHF 点を超える沸騰冷却技術の一つである気泡微細化沸騰に関して，これまでに行われてきた研究動向について触れながらご自身の研究についてご説明いただいています．ぜひとも皆様にご一読いただけますと幸いに存じます．

改めまして，お忙しい中執筆をご快諾いただきました両先生方にこの場を借りて御礼申し上げます．

（編集担当委員：徳永・李）

第 97 期広報委員会

委員長：	西　美奈	電力中央研究所
幹 事：	大徳 忠史	秋田県立大学
委 員：	岸本 将史	京都大学
	松岡 常吉	豊橋技術科学大学
	李　艶栄	茨城大学
	岡部　孝裕	弘前大学
	徳永　敦士	宇部工業高等専門学校
	馬渕　拓哉	東北大学

©著作権：2019　一般社団法人　日本機械学会　熱工学部門