

伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

ISSN 1344-8692 Vol. 56, No. 237
2017. 10

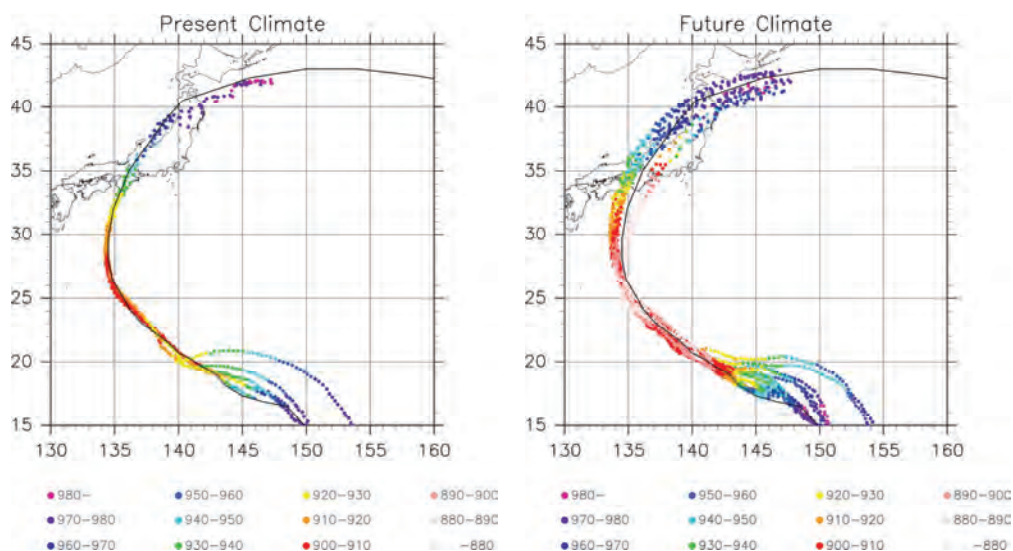
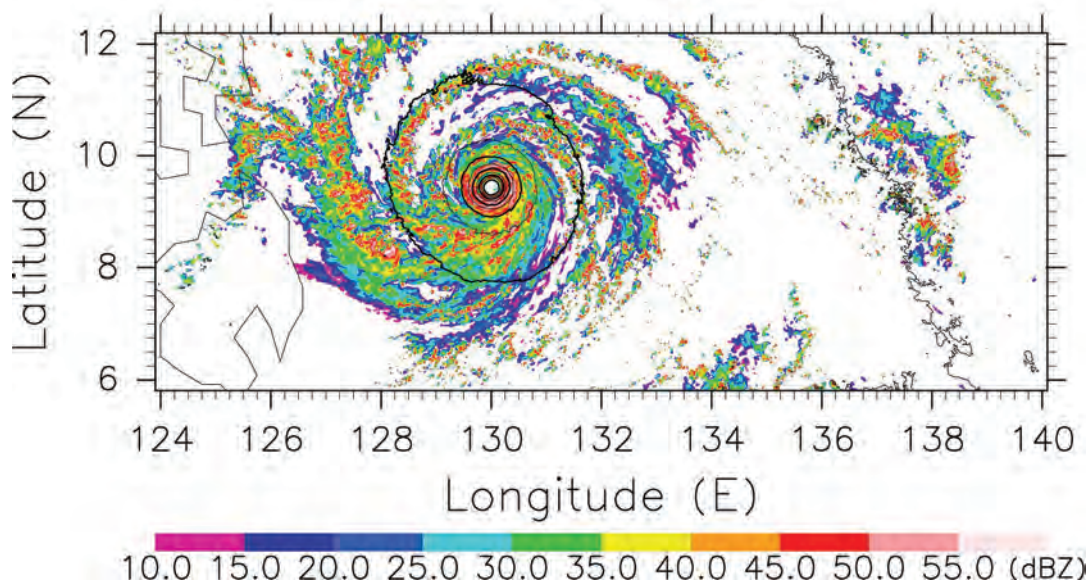
Thermal Science and Engineering

ISSN 0918-9963 Vol. 25, No. 4
2017. 10

HTSJ

◆特集：湿度・水分計測の最前線と自然界における水分輸送現象

0000Z 08.11.2013



上段の図は、気象モデルで再現された2013年台風30号の様子を2013年11月8日00 UTCでの高度2 kmの水平面での降雨強度で示す。下段の左図と右図は、それぞれ再現実験と擬似温暖化実験による伊勢湾台風の経路と中心気圧を示す。初期条件を変えてそれぞれ複数の計算を実行した。温暖化条件で台風強度が強まっていることが分かる。

(特集記事「スーパー台風の数値解析 (竹見 哲也)」より)

伝 熱

目 次

〈巻頭グラビア〉

竹見 哲也（京都大学）……………表紙裏

〈追悼〉

黒崎晏夫教授を悼む……………	伊藤 昭彦（弘前大学）……………	1
黒崎晏夫先生を偲ぶ……………	佐藤 勲（東京工業大学）……………	5
黒崎先生に教えていただいたこと……………	山田 純（芝浦工業大学）……………	9

〈特集：湿度・水分計測の最前線と自然界における水分輸送現象〉

微量水分計測の最前線……………	阿部 恒（産業技術総合研究所）……………	10
高温・高湿度域の湿度計測と利用の最前線……………	伊與田 浩志（大阪市立大学）……………	17
日本における大雨の長期変化……………	藤部 文昭（首都大学東京）……………	24
スーパー台風の数値解析……………	竹見 哲也（京都大学）……………	30

〈委員会報告〉

日本伝熱学会特定推進研究推進課題報告書 ……………特定推進研究企画委員会 花村 克悟（委員長・東京工業大学）， …………… 円山 重直（八戸工業高等専門学校）……………	38
--	----

〈行事カレンダー〉…………… 41

〈お知らせ〉

第 55 回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集……………	44
優秀プレゼンテーション賞（第 55 回日本伝熱シンポジウム）について……………	46
日本伝熱学会主催講習会「省エネのための機器の熱設計」……………	47
事務局からの連絡 ・編集出版部会からのお知らせ……………	48

〈編集出版部会ノート〉…………… 51

CONTENTS

< Opening-page Gravure:heat-page >

Tetsuya TAKEMI (Kyoto University) Opening Page

< Eulogy >

Memorial Tribute for Professor Yasuo Kurosaki

Akihiko ITO (Hirosaki University) 1

To the Memory of Professor Yasuo Kurosaki

Isao SATOH (Tokyo Institute of Technology) 5

What We Have Learned from Professor Kurosaki

Jun YAMADA (Shibaura Institute of Technology) 9

< Special Issue: Frontier of humidity/moisture measurement in extreme states and transport phenomena of moisture in nature >

Frontier of Trace-Moisture Measurement

Hisashi ABE (National Metrology Institute of Japan, AIST) 10

Frontier of Measurement and Utilization of High Humidity over Boiling Point Temperature

Hiroyuki IYOTA (Osaka City University) 17

Long-Term Changes of Heavy Rainfalls in Japan

Fumiaki FUJIBE (Tokyo Metropolitan University) 24

Numerical Analysis on Super Typhoons

Tetsuya TAKEMI (Kyoto University) 30

< Commission Report >

Report of Specific Promotion Researches in Heat Transfer Society of Japan

Specific Promotion Research Planning Committee

Katsunori HANAMURA (Chairperson, Tokyo Institute of Technology)

Shigenao MARUYAMA (National Institute of Technology, Hachinohe College) 38

< Calendar > 41

< Announcements > 44

< Note from the JHTSJ Editorial Board > 51

黒崎晏夫教授を悼む

Memorial Tribute for Professor Yasuo Kurosaki

伊藤 昭彦 (弘前大学)

Akihiko ITO (Hirosaki University)

e-mail: aito@hirosaki-u.ac.jp

1. はじめに

冒頭から私事で恐縮ですが、東京工業大学の一色・黒崎研究室(1979年当時)を修了して以来、九州大学、大分大学そして弘前大学と38年間の教育・研究生活を終えて、この6月に神奈川の自宅に戻って定年退職の挨拶状を送付してまもなくのことでした。挨拶状の返事が、黒崎先生永眠の報せとなり、言葉になりませんでした。一瞬時が止まり、そして研究のスタートとなった学生時代に時はさかのぼりました。

2. 出会い

卒業研究を機械設計学の講座で終えたのち、大学院で応用熱学の一色教授の研究室に移りました。ちょうど同じ時期に、流体の青木研究室で、長らく助手であられた黒崎先生が応用熱学の助教授になられました。学部から大学院に進学するときは、研究室の持ち上がりが常でした。学部で研究室を選ぶ方法は、まず本人の希望が優先し、重なった場合は当事者同士じゃんけんで決定するのが当時の生産機械のルールで、不運にも負けに負け、やっとのこと工作機械の研究室に入れていただいた次第でした。大学院では、希望の研究室に進学でき、これが黒崎先生との出会いでした。同研究室で学部からストレートに進学した同期は、修士での研究も学部からのテーマを引き継ぎ、やるべきことが見えていました。しかし、外から研究室に入った者は、いわば外様状態で、なんの研究をするか、悶々とした時期が続きました。そんな中、黒崎先生も新しく研究室に来られた外様同士(大変失礼な言い方ですが)ということもあったのか、何かこれまでの一色研究室と違った新しい研究ができるのではないかという甘い考えもあり、黒崎先生に研究指導を仰ぐことにしました。

黒崎先生の専門は放射伝熱で、流体の研究室にいた頃も単著で論文を書かれていたこと、当時、

放射伝熱の研究では、九州大学の越後先生、京都大学の国友先生と並び、御三家として注目されていたことも、存じ上げていました。また、たまたま同じ下宿の先輩で森康夫教授の研究室のドクターの方から、森研究室の厳しさ、黒崎先生はその研究室で博士号を取得したこと、など色々なことを耳にしていました。放射という熱拡散とは全く機構が異なる分かりづらさと相まって、自分自身この先生についていけるのだろうか、ビビっていました。放射の分かりづらさが何か、当時は漠然としていました。後に自分なりに理解したことは、熱拡散と放射を同時に扱う場合に、基礎方程式が拡散を表す微分方程式に、放射を表す積分方程式が入り、微積分方程式を解かなければならないところがあると理解しました。黒崎先生はこれを数値解析の手法で詳細に計算し、論文を書かれていました。先生の業績は、複合した伝熱場では、熱拡散と放射を別々に解いて、それらを算術的に足せば、厳密に解いた結果とさほど変わらないこと、それは熱拡散と放射の伝熱機構が全く異なるので、両者の干渉は小さいことに他ならないからです。このことは先生自身から聞いた研究の手柄話です。

その後、いつまでたっても放射はおろか、研究テーマについての話は一向になく、あいかわらず悶々とした日々を過ごしていました。ある日、学生部屋にふらっと来られ、「伊藤君、本屋の火事って困るんだってな」と言って出て行ってしまいました。この一言が自分のライフワークの原点になることなど思いもよりませんでした。

3. 研究テーマのきっかけ

「本屋の火事が困る」と言われても、確かに本は燃えやすい紙であり、その紙が本屋には大量にあるから、それは火事になったら大変だろう、とぐらいにしか思わず、それ以上特段気にも留めて

いませんでした。そのような折、ある研究室で火事が起こり、野次馬根性で見に行きました。消火後の部屋を見て驚いたのは、棚にあった大量のファイルが燃えずにそのまま残っていたことでした。燃えやすいはずの紙がどうして燃えなかったか不思議に思いました。今でこそ積層材量の耐火性が高いことは常識ですが、当時の未熟者には知る由もありませんでした。

大学院での研究は「燃えやすい紙がなぜ燃え残ったのか」、この素朴な疑問からスタートすることにし、指導教員の黒崎先生に相談しました。そもそのきっかけが、自身の発した言葉からであったので、「まあ、やってみたら」の一言で、反対されることはありませんでした。少し、調べていくうちに、意外なことがわかりました。紙のような薄い固体が燃える現象は、思っていたより複雑で、固体が燃えるには、熱分解して可燃ガスが形成されること、これが酸素と拡散されること、燃焼によって発生した熱が未燃固体に供給されること、このサイクルが繰り返されることで燃え広がりが維持されること、などがわかりました。先生は、よく律速という言葉の口にしていました。複雑な現象でも、一番遅いもの（速度）が全体を支配するというもので、この原理を紙の燃え方に当てはめてみると、熱分解の反応速度、酸素との拡散速度、燃焼の反応速度、燃焼による生成熱が未燃固体に輸送される伝熱速度、などのうち、大雑把な見積もりでも伝熱速度が一番遅いことが予想されました。一色・黒崎研究室の主体は熱工学、伝熱であり、燃焼ではありませんでした。しかし、固体の燃焼では、燃焼に特有な化学反応よりも伝熱過程で律速されるとなると、研究室での居場所もあるのではないかと思えました。もう一つ意外なことは、文献を調べていくうち、古い応用物理学会誌に寺田寅彦の「重ねた紙の燃焼」なる論文を見つけ、先生との輪講でこの論文を紹介しました。物理学の研究者がなぜ紙の燃焼なのかと興味が引かれました。寺田寅彦は、災害に関わる物理を研究しており、有名な格言「天災いは忘れたるころくる」を残しています。伝熱律速と寺田寅彦が、大学院での研究テーマを「紙の燃焼」にするべく決定打となりました。

4. 研究生活

研究をスタートするに当たっての助言は、「まず燃やしてみよう」でした。紙といっても結構幅があり、どの紙を燃やせばよいのかが最初の議論でした。当時、数値計算のプログラムはインデックスカードに打ち込んでいました。インデックスカードは密度も厚みも均質で実験には適していると思えました。先生が、数値計算に用いていたインデックスカードを、私はただ燃やすだけに使いました。しかし、インデックスカードはサイズが決まっていたことと、紙面に数字が印刷されていたこともあり、実験範囲を拡張するのに限界がありました。これを先生に相談すると、東工大の卒業名簿から、インデックスカードを生産していた巴川製紙の部長の名前を見つけ、早々に交渉していただいた結果、研究用に印刷前のカード用紙をロールで寄付していただけることになりました。送られてきたロール紙は、一生実験しても燃やしきれないほどの量でした。

実験試料を入手した後は、ひたすら燃やしました。次の課題は、未燃焼部への伝熱過程を明らかにするのに欠かせない温度場の計測でした。この種の研究は、茨城大学の平野先生（のちに東京大学教授）が先行しておりました。燃え広がる火炎周りの温度を微細な熱電対で計測されていました。真似をして熱電対での計測をしばらく続けましたが、色々な問題が浮かび上がってきました。一つは、燃焼部から固体への熱流束を明らかにするには、温度勾配が必要であり、そのためには、温度分布が必要で、移動する火炎近傍の温度分布を熱電対で測定するのは非常に艱難でした。二つ目は、熱電対を挿入することで、火炎の反応が凍結され正確な温度が測定されない可能性があること、さらに熱電対の放射損失や熱伝導損失の見積もりが必要なこと、など結構難しい問題が立ちはだかりました。時期を同じくして、一色先生の助手をされていた柏木先生がノズル内臨界流の可視化にホログラフィ干渉を利用されていました。横目で覗き見ながら、この方法なら非接触かつ瞬間的に密度場が干渉縞で計測され、あとは温度に変換すれば、動いている火炎周りの温度場が瞬時に得られる、と直感しました。しかし、柏木先生に天下の宝刀であるホログラフィを使わせてほしい、などといえるわけもなく、黒崎先生に相談しました。

どのような力関係が働いたか知る由もありませんが、後日研究の合間をぬって、燃え拡がり火炎の温度場計測のためにホログラフィを使わせていただけになりました。色々手ほどきを受けて、というよりも、ほとんど柏木先生に光学系を組んでいただき、実験が始まりました。実験が許されている時間帯は、目蒲線（現目黒線）の最終電車が大岡山を通過してから始発までの間でした。当時のオプティカルベンチに防振装置もなく、電車の振動が干渉縞に影響すると信じられていたからです。最初に干渉縞が撮影された時の感動は今でも忘れられません。それ以後も柏木先生に無理を言って、ホログラフィを使わせていただき、ノウハウを会得しました。これが後の研究を支える大きな財産になりました。

得られた干渉縞を部分ごとに拡大して撮影し、これをつないで完成させる作業は実に楽しいものでした。温度分布が高い空間分解能で得られ、そこから熱のフィードバック量が計算され、研究は一気に進展しました。意気揚々と先生に報告しました。いつものことでしたが、先生の方から、あれをやれ、これをやれなどの研究の指図はまずなく、いわば野放し状態で、自由に研究をすることができました。この手法は学生を指導するときのひな型として生き残りました。

ホログラフィで得られた成果を、学会で発表しようということになりました。自身のフィールドからすれば伝熱シンポジウムか熱工学あたりになるのですが、当時森先生の下で助教授をされていた大竹先生に相談されているのを見ました。大竹先生は燃焼の分野で活躍されており、燃焼学会（当時は燃焼研究会）の様子を伺っていたようでした。内容からすると燃焼の方がよいとの判断で、燃焼シンポジウムに発表することになりました。しかし、燃焼学会の会員でもなかったため、先生と同時に学会に登録しました。したがって、学会員の番号は一つ違いです。初めての学会発表は修士2年の時でした。

その後、博士課程に進学し、機械学会に投稿すべく論文を2本書き、そのチェックをお願いに行きました。先生は「わかった」と言って下書きを受け取ってはくれましたが、なかなか返却されてきませんでした。しばらくして部屋に呼ばれたので、真っ赤に訂正された論文が戻ってくると思い

きや、「まあ、これを読んでみる」と手渡されたのは、「知的生産の技術」やら「科学論文の書き方」など何冊かの本と、伝熱概論の著者である甲藤先生の論文数編でした。投稿用の原稿からは間をおき、手渡された本や論文を読みふけりました。読み終わって返却に行くと、先に提出した原稿が返却され、書き直したら持ってくるよう言われました。返却された原稿を見て驚いたことに、一行も直されていませんでした。読み直してみても、いかに幼稚であったか思い知り、再び書き直して提出しました。そのあとは、論文の内容についての議論を経て、投稿することができましたが、論文の指導方法もこの経験が大きな財産となりました。

基礎研究として、1枚の紙の燃え拡がり有一段落したころ、先生のアイデアで平行に並べた複数枚の紙の燃焼に着手することになりました。この研究は比較的短い期間で興味ある結果がでました。紙と紙の間隔が狭いと、単独で燃える速度の半分になり、間隔が広くなると逆に速くなり、ある間隔で最大値をとることがわかりました。間隔が狭い場合は、まさに本屋の火事で、重なった紙は燃えにくくなり、その理由も判明しました。一方、ある間隔以上で逆に速度が速くなるのは、互いの火炎や炭素残渣からの放射伝熱の影響であり、まさに先生の専門性が発揮されて解明できました。これらの結果は、国際燃焼シンポジウムでの発表につながりました。

5. 私生活

日曜などの休日、よく研究室にいました。特段研究熱心なわけではなく、他に行くところもなかったからです。学生部屋でグダグダしているところ、に、「よう」と言って先生がよく来られました。時には奥様や、お子様もつれて家族で来られることもあり、奥様を紹介されるときは必ず「ワイフ」という言葉が使われていました。

普段研究室では、学生からも「クロさん」と呼ばれていて、学生たちとよく「雀荘」に行かれています。日が落ちるころ頃になると、学生はソワソワし始めます。4人そろって研究室を出るとすぐにばれるので、時間差をつけて一人、また一人研究室を後にします。行先は当然雀荘です。4人そろって始めるかと思いきや、「クロさん」がすでに先輩たちと卓を囲んでいることもしばしばで

した。時代のせいなのか、先生の人柄なのか、古き良き時代であったとしみじみ思います。

研究室をあげてのスポーツも盛んでした。研究室対抗のソフトボールもよくやりましたが、先生は必ずと言っていいほど参加され、ポジションはショートでした。冬場はよく研究室を脱け出し、スキーに行っていました。帰ってくれば顔の色ですぐにばれます。しかし、先生には研究をさぼっていたことで怒られることなく、「研究室で行こう」と音頭をとっていただき、志賀高原一ノ瀬でのスキーが恒例の行事となりました。しかも、「若林プロスキースクール」に入るのが常でした。

冬の恒例行事にもう一つの楽しみがありました。年の瀬に、研究室の学生を自宅に招き、ごちそうをふるまわれた事です。これも恒例で、まず「カニ」でした。うるさい学生が大勢で押し寄せているのにも関わらず、カニを食べているうちは静まります。次は、「肉」です。貧乏学生の腹の内をよくわかっていてのもてなしが忘れられません。

個人的にお世話になった極めつけは、仲人をしていたことでした。先生が米国パデュー大学へ留学される少し前のことでした。学生の分際で結婚することになり、悩んだ末に先生に相談したところ、仲人を引き受けていただくことができました。後に知ったのですが、私の前にすでに3組の仲人をされていたとのことでした。あの時、結婚記念にいただいた時計は、40年経った今でも我が家で時を刻んでいます。

黒崎先生が、パデュー大学に留学されてからは、研究報告はエアメールで行いました。今ならeメールで便利でしょうが、振り返ってみるとエアメールはのんびり屋の自分には案外都合がよかったです。一度手紙を出せば、最速でもアメリカとの往復には2週間必要で、その間は色々考えるゆとりができたからです。先生の留学期間が延長されたこともあって、交わしたエアメールは結構な量になりました。おそらく普段の様子が目に見えなかったため、いろいろ気になったからだろうと拝察します。

最も気にされていたことは、博士課程も終盤に

近付き、修了した後の行先でした。大学での研究職を希望していたものの、当時でもおいそれと大学に就職口はありませんでした。現在の公募が原則とは異なり、教授の推薦が重要な要素でした。アメリカから色々打診していただいたようで、当時九州大学におられた越後先生を通して、機械の流体で助手を探しているとの知らせを受けました。流体は専門ではないし、苦手な分野でしたが、背に腹は代えられない事情もあり、熱工学講演会の懇親会に参加した際に、越後先生から九州大学の深野先生を紹介していただきました。これが我が人生の大きな岐路となりました。お蔭様で、九州大学の「流動工学研究室」で流体の勉強をすることができ、この経験が後の研究生活にとって大きな財産になりました。人と人のつながりがいかに大事か、身をもって感じました。

6. おわりに

在学中は、身近にいて気づかなかったことでも、母校の研究室を離れてわかることがあります。卒業してからも、ことあるごとに先生を訪ね、たわいもない話を聞いていただきました。そんな話の中で、研究のヒントを得ることもありました。

黒崎先生の退職記念パーティの席で、挨拶の機会がありました。その中で「指導を受けた弟子にとって師匠はいつまでたっても師匠です。いつもその背中を見て育っています。退職されてからの人生もやはり師匠です」というようなきざなことを話してしまいましたが、これは本音でした。

東工大を退職された後もしばらくは電通大で教育・研究を続けられていました。賀状は欠かしたことはなく、その年の出来事や気遣いが必ず一言つづられていました。その中で特に印象に残っていることは、アメリカの旧ルート66をドライブされたこと、賀状の挿絵をはじめられたことでした。そして毎年続いていた挿絵は「酉」が最後となってしまいました。

ここに、黒崎先生から受けたこれまでの恩に感謝するとともに、心からご冥福を祈ります。

黒崎晏夫先生を偲ぶ

To the Memory of Professor Yasuo Kurosaki

佐藤 勲 (東京工業大学)

Isao SATOH (Tokyo Institute of Technology)

e-mail: satohi@mep.titech.ac.jp

東京工業大学名誉教授で本会第 37 期会長を務められた黒崎晏夫先生におかれましては、2017 年 7 月 23 日にご逝去されました。享年 81 歳であられました。ご葬儀は、先生のご遺志によりご家族のみで執り行われました。東工大在職当時から長らく肝炎（C 型肝炎だと伺っていました）を患っておられましたが、電気通信大学へ移られ二度目の定年を迎えられた後も、最近までお元気に同大学産学官連携センター客員教授として活躍されていらっしやっただけに、大変残念です。1981 年から、先生の助教授・教授時代を通して長くご指導をいただきました者として、ご業績と幾分かの個人的な思いを記すことで、ここにご冥福をお祈り申し上げます。



黒崎晏夫先生は、1936 年に岡山県にお生まれになり、ご家族のお仕事の都合で当時の満州に渡られ、終戦とともに苦勞されて日本に戻られたように伺いました。その後、東京工業大学に入学されて 1965 年に故森康夫先生の研究室で博士課程を修了（森研の博士第 1 号とのこと）した後、助手、助教授を経て、1983 年に同大学教授に就任されました。1997 年に定年を迎えられ、東京工業大学名誉教授の称号を授与されました。この間、工学部生産機械工学科（1993 年からは機械知能システム学科）の応用熱工学講座（同 熱システム講座）を担当し、ふく射熱交換や固気二相流を利用した伝熱促進技術、相変化現象の物理的メカニズムの解明等、熱工学の分野に多大の貢献をされました。特にふく射伝熱については、基礎学理から応用に至るまで幅広く研究され、現在までに 8 回開催されている International Symposium on Radiative Heat Transfer の第 1 回目（1995 年、トルコ共和国クサダシ）の日本代表を務めるなど、ふく射伝熱の日本における第一人者として世界から広く認識されておられました。

また、1985 年ごろからは、プラスチック成形加工に伴う現象の伝熱工学的視点からの検討を開始し、熱工学の分野に新しい領域を開拓されました。従来、加工学、高分子工学、レオロジー等の観点から検討されてきたプラスチック成形加工現象に熱工学的視点を取り入れた検討は、東京工業大学の 2 年後輩で、共にサッカー部 OB であり、機械加工・生産工学を専門とする伊東 誼教授（当時）から、「プラスチック射出成形における現象が分からなくて困っている。熱を加えて溶かして流すのだから、熱流体屋には簡単だろう。」と唆されて（？）始まったと記憶しています。今でいう分野融合研究を先取りした取り組みで、熱工学の分野にも加工学の分野にも多大な影響を及ぼし、同時期のプラスチック成形加工学会の創設に大いに寄与されました。

1997 年 4 月からは、電気通信大学知能機械工学科に移り教鞭を執られました。2003 年には電気通信大学を定年になられ、2 年間ほど企業の研究所に勤められましたが、定年後も電気通信大学の共同研究センターの客員教授として研究を継続され

ておりました。同大学教授として在職中から、継続して外部資金を獲得されて、特に高分子材料の熱融着に関する産官学連携研究に精力的に取り組んでおられました。この研究は、薄板状の高分子材料をふく射加熱して融着させる際、ふく射的に透明な材料によって圧着することによって高分子材料表面の過熱を防ぎ、高品位な融着継手を実現しようとするものです。黒崎先生の博士論文研究で培われたふく射伝熱に関する基礎的知見と、後に取り組みされた高分子加工の知見を併せて、新しい機能を形にするという学術的応用研究のお手本ともいえる研究であり、産業界からも注目されていると聞いています。

こうした分野融合研究、産学連携研究の芽は、東京工業大学に在職されているときから現れていたように思います。東京工業大学教授として、ふく射をはじめとする様々な伝熱工学の研究をされておられた頃から、研究室には国内外の大学関係者だけでなく、様々な企業の方々が入り出していました。工学の分野でもまだ「共同研究など、はしたない」といわれていた時代です。こうした流れの中で、プラスチック成形加工現象の熱工学的検討に着手することで分野の幅をさらに広げられ、新規で合理的な研究成果を社会実装することに一層、意を注がれるようになったと理解しています。こうした「心意気」は、2002年の本誌5月号に、先生ご自身の言葉で述べられています[1]。

筆者は、1981年に当時の一色・黒崎研究室に修士課程学生として所属して以来、黒崎先生が定年を迎えられるまで、ずっと黒崎先生の下で研究を続けてきました。その間、学術的なご指導はもとより、学科・専攻の組織運営や学会活動、科学研究費補助金の重点研究などの研究プロジェクトの申請や運営といった様々な活動の「お作法」を教えてくださいました。黒崎先生は、学問的には厳格で不合理なことにははっきりとダメ出しをする熱血さをお持ちでしたが、日頃の学生への接し方はきわめて穏やかで、我々ものびのびと研究生活を楽しむことができました。1990年に未熟な筆者を助教授に引き上げて下さった後は、ほぼ毎日、夕方になると筆者の部屋へ来られて、当時、可視化映像の編集用に筆者の部屋にあったビデオシステムで野球を見ながら(熱心な阪神ファンでした)、



東工大時代の黒崎研究室関係者との食事会の後で、右から、伏信(現、東工大)、山田(現、芝浦工大)、齊藤(現、東工大)の各氏、黒崎先生、筆者(自由が丘、2015年12月15日)

ひとしきり雑談をして行かれました。今になって思い返すと、これも、弱輩で心許ない筆者を励ますための先生流の心遣いだったように感じます。

黒崎先生は、お酒はあまりたくさんは召し上がりませんが、学会等で出張するとよく食事に誘って下さいました。瀬戸内海に面した岡山で育ったこともあり、肉料理よりは魚がお好きで、現在の筆者の好みにもその影響が色濃く残っています(ただ、「佃煮は食べ物として理解できない」と仰っていたことだけは、関東人である筆者には受け継がれませんでした)。)

また黒崎先生は、幼少期の満州国でのご経験に加えて、助教授時代に2年間ほど米国パデュー大学に留学されておられたこともあり、国際交流にも熱心でした。前述の International Symposium on Radiative Heat Transfer の他、第3回日米熱工学会議(1991年、米国リノ)の日本側組織委員長を務めるなど、多くの国際会議の運営に携わられたほか、国際伝熱会議などに代表される幾多の国際会議に出席され、各国の研究者とのネットワークを築かれました。こうした海外出張に同行させてもらう機会を豊富にいただけたのも、筆者にとっては得難い経験でした。国際会議等での学術面はもとより、海外に出たときの先生の「嗅覚」に圧倒された覚えがあります。例えば、外国の見知らぬ街で、おいしいレストランを探す感覚はびっくりするほどで、先生とご一緒した海外の食事が不味かった記憶がありません。

筆者も無類の車好きを自認していますが、黒崎先生も車の運転がお好きでした。日々の通勤はもとより、海外出張に際しても空港から車でホテルまで移動するほどで、こうした「習慣」は筆者にもしっかり根付いて(?)います。海外出張中もよく車を借りて、様々なところを訪れておられました。筆者の中で忘れがたいのは、リスボンで開催された1993年のICHMTの熱交換器の国際会議と、翌年1994年の英国ブライトンにおける第10回国際伝熱会議です。いずれも、会議で発表したテーマすらはっきり覚えていないのですが、黒崎先生と車で一緒した「珍道中」だけは強烈に印象に残っています(20年以上前の話で、もう時効なので、お許し下さい)。

特に1994年の国際伝熱会議では、会期終了後にブライトンからロンドンを経由してエジンバラ大学を訪問した際、帰りの列車の運行がはっきりしなかった(ストライキの影響だったように思います)ので、エジンバラで車を借りて、そこから3泊4日、宿の予約もなしにスコットランドをひとまわりして、ロンドンまで戻ってきました(車は翌日、ヒースローで返却しました)。ゴルフがお好きだった黒崎先生のご希望で、まずはセントアンドリュースを訪れ、そのままアバディーンへ行って一泊、翌日はインバネスを経由してハイランド地方ロスチャーのアラプール(Ullapool)まで行き、再びインバネスへ戻ってネス湖の先でもう一泊、さらに南下してマンチェスターで一泊し、翌日はロンドンまでという行程で、レンタカーは返却時まで1000マイル近くの距離を走っていました。行き当たりばったりの旅でしたが、先生の嗅覚に支えられて、実に楽しい経験をさせていただきました(こうした楽しい思い出を画像でお見せできれば良かったのですが、あいにく筆者には写真を撮る趣味も、それらを整理する習慣も持ち合わせていないため、記録に残っていないのが返す返すも残念です)。たぶん先生も、こうした海外での小さな冒険を本当に楽しんでおられたのだと思います。このあたりの先生のご心境は、電気通信大学の定年退職に際して、通機(電気通信大学の機械系学科同窓会)の広報誌に寄せられた文章[2]にも述べられています。

本稿をしたためるに当たり、黒崎先生と過ごさ



国際伝熱会議後のスコットランド・イングランド珍道中の足跡(当時使用した地図。オレンジ色の蛍光ペンによるマークは経路。1994年8月)

せていただいた日々を思い返すだけでなく、先生に関する情報をいくつか調べてみました。それなりに先生のごことは存じ上げているつもりなのですが、特に電気通信大学時代の先生については、筆者の知らないことも当然ありました。例えば、黒崎先生が水彩画を描かれることは知っていましたが、電気通信大学同窓会である「一般社団法人目黒会」の会報表紙に5年間にわたりすばらしい絵を寄せられていたこと[3]は存じませんでした。先生の御尊父が土木関係の技術者であられ、その影響もあってスケッチや水彩画を描くことが好きだとは聞いていました。また、毎年頂戴する年賀状にもこうした水彩画が描かれていることがあり、こうした才覚のない筆者には羨望の念を禁じ

得なかったのですが、改めてこれらのスケッチを拝見すると先生の温厚さと熱血さを併せ持ったお人柄が感じられて、懐かしく切ない気持ちになります。

私は、黒崎先生のこうしたお人柄に育てられたところが多かったかと思います。いま振り返ってみても、本当に大きな方でした。先生のいろいろなことを楽しみながらチャレンジを続けられる精神を忘れずに、これからも精一杯努力して参りま

す。これまで、本当にありがとうございました。どうぞ、安らかにお眠り下さい。

参考文献

- [1] 伝熱, **41-168** (2002) (http://www.htsj.or.jp/dennetsu/denpdf/2002_05.pdf) 39.
- [2] 通機会便り, **23** (2002) (<http://www.tsukikai.mce.uec.ac.jp/dayori/dayori23.pdf>) 2.
- [3] 目黒会ウェブマガジン, http://megurokai.jp/web_magazine/gallery140501/

黒崎先生に教えていただいたこと

What We Have Learned from Professor Kurosaki

山田 純 (芝浦工業大学)

Jun YAMADA (Shibaura Institute of Technology)

e-mail: jyamada@sic.shibaura-it.ac.jp

先月、8月1日に、東京工業大学の齊藤卓志先生から黒崎晏夫先生ご逝去の知らせを受け、信じられない思いでした。というのも、黒崎先生とは、今年の1月に研究室の後輩たちと横浜でランチをして、大変楽しい一時を過ごしたばかりだからです。2月初めに入院の予定があるとはおっしゃっていましたが、本当にお元気にされていました。アメリカのルート66を何年か掛けて走破したエピソードを、感慨深げにお話されていたのが思い出されます。2月の中頃には無事退院され、以前の生活を取り戻しているとのことでした。「身体が許せば、ゴルフの練習に出かけて行きたい」とのお便りもいただいていた。暖かくなったら、また、食事しましょうとおっしゃっていただけに本当に残念です。

黒崎先生と初めてお会いしたのは、学部4年の時です。修士課程に進学してから本格的に指導を仰ぐことになりました。当時、研究とは何かを全く理解していなかった私に、あきれられていたのではないのでしょうか。そのせいもあって、ゼミでは繰り返し「それで、何が新しいんだ？何がおもしろいんだ？」と言われていたことを覚えています。研究をするということの本質を伝えられていらしたのだと思っています。その指導のおかげで、私も何とかここまでやってこられたと感謝しています。

教えていただいたのは研究だけではなく、ゴルフもそうです。黒崎先生は、アメリカに留学されているときにゴルフを始められたそうです。むこうでは、日が暮れるのが遅いこともあってか、終業後にグラウンドでアプローチの練習をしていたそうです。帰国されて直ぐに、ゴルフ会員権を買いに走ったと笑ってお話されていました。

ある年、研究室の合宿で、先生と一緒にみんな

で練習場に行くことになりました。那須だったと記憶しています。ほんの2時間ほどわいわい騒いだだけでしたが、それがきっかけでゴルフを始めた人が多くいました。彼らは、卒業してもゴルフを続けていたので、先生のホームコースで同窓会を兼ねた黒崎杯を、何度か開催させていただきました。卒業生ではほとんど歯が立たず、私も、結局一度も先生に勝つことはありませんでした。

先生が東工大を退職されてからは、少し体調を崩されたこともあって、楽しみにされていた黒崎杯の開催ができなかったことが、今思うと悔やまれます。

教えていただいたことには、この他、研究者としてのあり方やアメリカでの生活の仕方など、いろいろありますが、今思うと、もう一つあったようです。曖昧な言い方なのは、確信がないからです。先生はお話好きで、話題は多岐にわたっていました。政治や経済などの時事問題ももちろんありましたが、学会や大学運営についてもよくお話しされていました。私は、現在、芝浦工業大学で工学部長を仰せつかっております。向いていないと思っていた私が、大学運営の一部を任せられることになったのも、研究以外に広く関心をもつことの大切さを、教えられていたせいかもしれません。研究室の先輩もそうですが、1月に昼食会を共にした後輩たちも皆、企業で主要な役職に就いて、管理業務を任されています。黒崎先生の考え方が研究室のカラーになっていたのでしょう。卒業生の多くは、自然と先生の考えを受け継いだ気がします。

最後になりますが、昨年の秋には現・旧研究室の皆さんと、また、今年の冬には後輩たちと一緒に会食できて、黒崎先生に喜んでいただけたことを嬉しく思います。

微量水分計測の最前線

Frontier of Trace-Moisture Measurement

阿部 恒 (産業技術総合研究所 計量標準総合センター)
Hisashi ABE (National Metrology Institute of Japan, AIST)
e-mail: abe.h@aist.go.jp

1. はじめに

気体中にごくわずかに含まれる水蒸気のことを微量水分と呼ぶ。きちんとした定義はないが、物質質量分率(モル分率)であれば $1 \mu\text{mol/mol}$ (1 ppm) 以下、露点(正確には霜点)であれば $-75 \text{ }^\circ\text{C}$ 以下のときに使われることが多い。半導体製造分野では、この微量水分の計測がもう 30 年近く前から重要な課題となっている。半導体デバイスの製造プロセスでは、多くの種類の材料ガスが大量に使われているが、デバイスが微細化・高機能化・高集積化するにしたがって、それらガスの高純度化も強く求められるようになってきている。材料ガス中の不純物で、デバイスの性能や歩留まりに深刻な影響を与える成分の一つとして水分が挙げられており、必要とされる管理レベルは、多くのガス種に対して 1 ppm 以下と言われている [1]。例えば、GaN 系の青色 LED の製造では、材料ガスとして NH_3 が使われているが、このガス中にわずか 1 ppm の水分が残留しただけで、LED の発光効率が 80 % 近く低下する報告がなされている [2]。この場合、残留水分の管理は、少なくとも 1 ppm よりも十分低いレベルで行う必要がある。

このような背景のもと、各種ガスから水分を除去する精製器の性能向上が進められ、現状では残留水分をモル分率で 1 nmol/mol (1 ppb) 以下とする製品も入手可能となっている。ただし、そのような精製器を使用しても、実際に目的とするレベルまで水分除去が行われているかを確認することは必須であり、そのためには微量水分計測が必要となる。1 ppm 以下の領域で使用可能な微量水分計については、20 年以上前から測定下限が ppb レベルの仕様の製品が販売されている。しかし、それらの微量水分計を同じ計測現場で使用すると、計測値が製品ごとに大きく異なる問題が生じた(図 1)。このような場合、水分濃度が既知の標準となるガス(微量水分標準)を使うことで、各製

品の性能試験を行うことができるが、その当時は微量水分の標準がなかったため、それを行うことができなかった。ユーザーは、各計測器メーカーが独自に行った性能試験の結果を頼りに、製品選定をせざるを得なかった。この状況は、日本を含むいくつかの国で微量水分標準が整備された 10 年ほど前になって、ようやく解消された。各国の微量水分標準の同等性が確認され、微量水分標準を用いて各種微量水分計の性能試験が行われたが、その結果、従来から使用されていた多くの微量水分計の性能には問題があることが明らかになった。しかも、この問題は、現在においても十分解決したとは言いがたい状況にある。

本稿では、微量水分計測における課題とそれを解決するために開発された微量水分標準、そして微量水分計測の現状について紹介したい。

2. ガス中微量水分計測の難しさ

ガス中の水分(湿度)の計測は、微量水分領域に限らず、実は大変難しい。これは水が「どこにでもいて、ベタベタする」ことに起因する。通常の雰囲気、例えば気温 $23 \text{ }^\circ\text{C}$ で相対湿度 60 % の空気中には、水分がモル分率で 1.7 % 程度存在しており、これは窒素、酸素に次いで 3 番目に多い成分となる。大気中に大量に存在する水蒸気は、わ

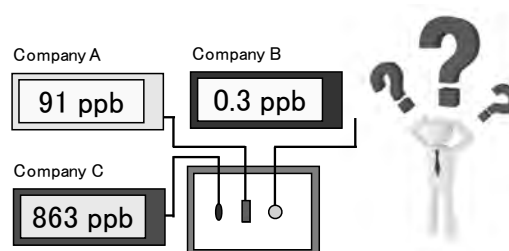


図 1 微量水分計測の問題のイメージ

ずかな隙間さえあれば、拡散によって別の空間に容易に入りこむことができるため、分子レベルで見ると、水分子はどこにでも多数存在していることになる。また、水は比較的大きな極性をもち、かつ水素結合もするため、他の分子・原子と相互作用しやすく、その結果、様々な物質表面で高い吸着性を示す。この表面での水分吸着は物理吸着であることが多く、その場合一度吸着した水分子は表面温度が上昇すれば脱離してくる。すなわち、水は多くの種類の物質表面で、環境温度の変動によって吸着・脱離を繰り返す性質がある。

水の惑星と呼ばれる地球に住む私たちにとって、この「どこにでもいて、ベタベタする」性質というのは、他の物質にはない水だけが持つ特徴といえる。これは水分計測の観点で考えると、ある空間内の水蒸気量を測定しようとした場合に、他の空間から入り込んでくる水分による妨害や、表面での吸着・脱離によって出入りする水分による妨害を常に受けることを意味している。この問題は、微量水分領域で特に深刻となる。すなわち、測定対象となる水分量よりも、はるかに妨害水分の量が多い中で、水分計測を行う必要があるからである。この理由により、微量水分の計測は、微量成分計測の中でもとりわけ難しいと考えられている。

一方、この「どこにでもいて、ベタベタする」性質は、微量水分の標準を整備・利用する上でもやっかいな問題となる。これについては次に述べる。

3. ガス中微量水分標準

3.1 ガス中微量水分の標準とは

標準（測定標準）は、ある物理量の単位または値を定義・実現するために構築された実量器・測定器・測定系であり、参照として用いられる。よく知られた標準の例としては、質量の単位であるキログラム（kg）を定義・実現するための国際キログラム原器が有名であろう。ある標準を国際的に通用させるためには、国際単位系（SI）につながる形（SIトレーサブルと呼ぶ）で標準の値とその不確かさを示す必要がある。

ガス中微量水分の場合、標準とは一定の濃度（モル分率）の水分を含み、その濃度と不確かさが既知である気体を指す。ガス分析の分野でよく使われる標準ガスと同様の考え方であるが、標準ガスのようにボンベ等の容器に充填して提供されるこ

とはない。これは水が「どこにでもいて、ベタベタする」ことに起因する。すなわち、ボンベに既知の一定濃度の水分を含むガスを充填したとしても、ボンベ内面へ水分が吸着したり、ボンベにチューブを接続する際に大気中水分がチューブ内面に吸着してそれが測定時に脱離したりするなど、実際の使用時には充填時の水分濃度と異なってしまう可能性があるからである。この影響は水分量が少なくなるほど深刻になるため、現在の技術では、微量水分領域ではボンベを使った標準ガスの提供は極めて困難と考えられている。そのため、動的な方法、すなわち、既知の一定濃度の水分を含むガスを発生させる装置を整備して、この発生装置で発生させたガスを標準とする方法が一般的となっている。これはボンベ詰めの方法に比べて手間のかかる方法である。

微量水分計の校正は、微量水分発生装置に配管・接続して標準となるガスを導入し、微量水分計の指示と標準の値とを比較することで行われる。従って、毎回校正時には校正設備のある場所まで微量水分計を輸送する必要があり、ユーザーにとっては大きな負担となる。繰り返しになるが、これは水の「どこにでもいて、ベタベタする」性質によって、ボンベ詰め標準ガスが利用できないことが理由である。

発生装置以外の方法として、SIトレーサブルな方法で微量水分を測定できる計測器を開発して、それを一次標準とする方法が考えられる。しかし、湿度計測の分野では、現状では、計測器を一次標準とする方法よりも発生装置を一次標準とする方法の方が信頼性が高いため（あるいはSIにつなげやすいため）、計測器を一次標準として採用している国は現在のところ存在しない。

3.2 微量水分発生装置

3.1で述べたように、微量水分標準の整備のためには、発生装置を開発する必要がある。ガス中の微量水分の発生法にはいくつかの方法があるが、ここでは産業技術総合研究所・計量標準総合センター（NMIJ）が採用した拡散管法と呼ばれる方法を紹介する。この発生法の原理を図2に示す。ステンレスを材料とした、水溜めと拡散管からなる拡散セルを、温度・圧力が制御された発生槽内に入れる。セルの水溜め部分には水が入れてあり、

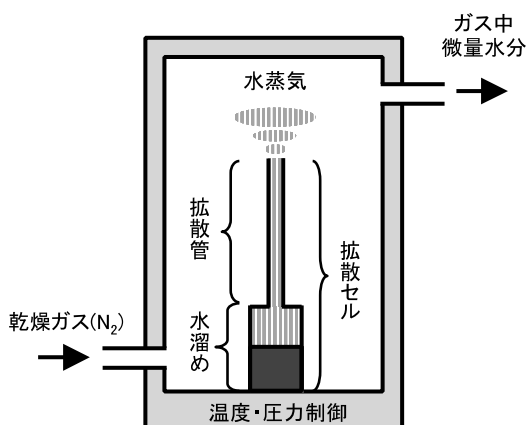


図2 拡散管法の模式図

そこでは温度に依存した蒸気圧をもつ水蒸気が発生している。この水蒸気は拡散管の中を通り発生槽内へと移動する。これを流量制御された乾燥ガス（窒素）と混合することで、ガス中の微量水分を発生させる。ガス中の水のモル分率は、単位時間に蒸発した水分の質量測定（水分蒸発速度の測定）と単位時間に流れた乾燥ガスの質量測定（質量流量の測定）から決定する。NMIJ では水分蒸発速度の測定には磁気吊下天秤を、乾燥ガスの質量流量の測定には臨界ノズル（音速ノズル）式流量計を採用した。磁気吊下天秤は、図3に示したように、発生槽内部にある拡散セルの質量を発生槽外部にある電子天秤に、2つの磁石を使い磁力で非接触に吊り下げることができる構造をしている。磁気吊下天秤を使うことにより、発生槽内部にある拡散セルの質量変化を、発生槽を大気開放することなく、連続的に測定することができる。臨界ノズル式流量計は、臨界ノズルを用いて気体流速を一定（音速）にさせ、ノズル上流の気体密度とノズル断面積の情報を使い質量流量を求める方法で、気体小流量の測定法として、現状では最も信頼性が高い方法である。

3.3 乾燥ガス

本装置では乾燥ガス（ゼロガスとも呼ばれる）が必要となるが、これは高純度窒素ガスをさらに精製器を使って水分除去することで生成した。それでも残留水分を完全にゼロにすることはできないため、それは不確かさとして取り扱うことになる。この不確かさの評価には、キャビティリングダウン分光法（CRDS）を測定原理とする微量水

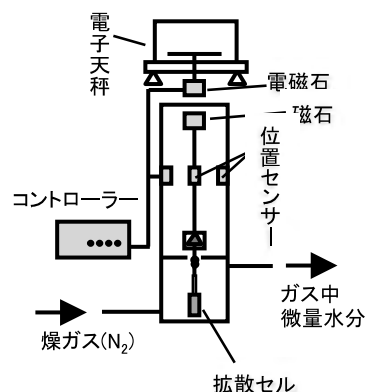


図3 磁気吊下天秤の模式図

分計を使用した。CRDS 微量水分計は、レーザー吸収分光法の一つで、その測定原理自体は30年近く前に報告されているが[3]、市販品が入手可能となったのは2001年頃であり、微量水分計としては比較的新しい装置である。この装置による測定を行った結果、ゼロガス中の残留水分による不確かさは0.36 ppb程度と見積もることができた[4]。CRDS 微量水分計は、発生水分濃度の安定性の評価や吸着・脱離水分の影響の評価にも用いた。CRDSの詳細については文献[5]を参照されたい。

3.4 CRDS 微量水分計による測定

微量水分発生装置を使って発生させたガス中微量水分を、CRDS 微量水分計を使って測定した例を図4に示す。図中の標準値とは、磁気吊下天秤と臨界ノズル式流量計を使って測定した水分蒸発速度と乾燥ガス流量から計算によって求めた値であり、指示値とはCRDS 微量水分計を使って測定した値である。CRDS 微量水分計の指示値はリングダウンタイムと呼ばれる光強度変化の時定数（水の濃度に依存する）の測定と水の吸収断面積から決定されている。すなわち、CRDS 微量水分計は、微量水分発生装置の標準値を参照せずに水分濃度を決定することができる。このようにして独立に求められた標準値と指示値は不確かさの範囲内で一致しており、この結果はそれぞれの値が互いに妥当であることを示す。図4に見られる標準値と指示値の差は、CRDS 微量水分計が用いている吸収断面積の不確かさとガス温度の不確かさで説明できることがわかっている[6]。

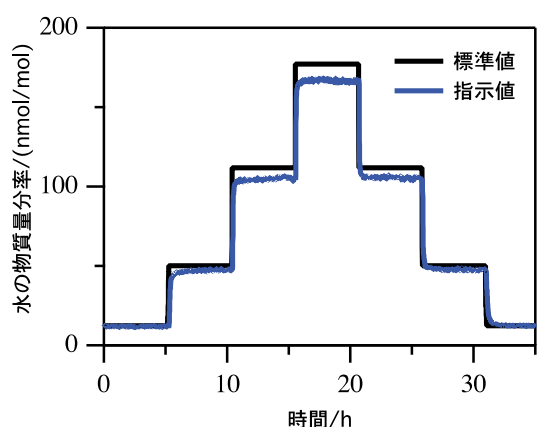


図4 微量水分標準とCRDS微量水分計の指示との比較



図5 ガス中微量水分の標準発生装置

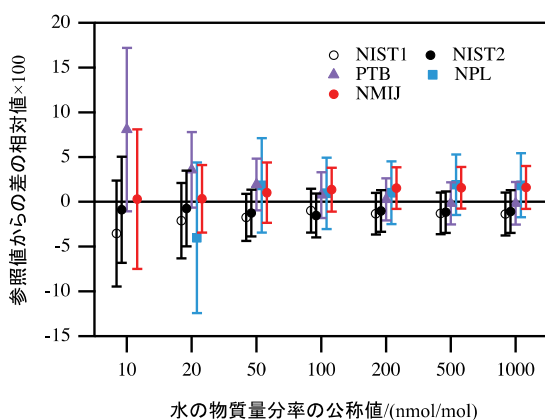


図6 微量水分標準の国際比較の結果

3.5 微量水分標準の確立

開発した微量水分発生装置を用いて、NMIJ は2007年に12 ppb～240 ppbの範囲で微量水分標準を確立した。その後、範囲を拡張し、現在は12 ppb～1200 ppbの範囲で校正サービスを実施している。この範囲の校正・測定能力は相対拡張不確かさ(95%の信頼の水準)で7.6%～0.88%である。拡散管法を用いてガス中微量水分の一次標準を確立したのはNMIJが世界で初めてとなる。図5にNMIJが開発したガス中微量水分の標準発生装置[7]の写真を示す。

3.6 国際比較による妥当性確認

NMIJが微量水分標準を整備した頃、他国の標準研究機関でも、微量水分標準の整備が行われていた。それらの標準の同等性を確認する目的で、2007年に欧州国家計量標準機関協会が予備的な国際比較(パイロット比較)を主催した。これは微量水分領域(1 ppm以下)で行われた世界で初めての国際比較であり、これにはNMIJ、英国物理学研究所(NPL)、ドイツ物理工学研究所(PTB)、米国標準技術研究所(NIST)の4つの国立標準研究機関が参加した。各標準研究機関の発生装置の詳細については、文献[8]を参照されたい。この比較では、微量水分領域でも再現性・安定性のよい測定が可能なCRDS微量水分計を、比較用仲介器として各国に順番に輸送し、測定結果を比較する方法が採られている。2010年にすべての実験が終了し、2011年には報告書[8]が作成された。この国際比較の結果を図6に示す。図中のエラーバーは拡張不確かさ(信頼の水準95%)を表す。また、NIST1とNIST2は国際比較を行っている期間内での最初と最後の測定結果をそれぞれ表す。それらの差が不確かさに比べて十分小さいことから、期間内における比較用仲介器のドリフトは無視できることがわかる。このことは国際比較の有効性とCRDS微量水分計を使った測定結果の信頼性の高さを示す。

図6からわかるように、この国際比較によって、各国の微量水分標準の国際的同等性が不確かさの範囲内で確認された。

4. 市販の微量水分計の予備的性能試験

微量水分標準が整備されたことで、微量水分計の性能試験を信頼性高く行うことが可能となった。

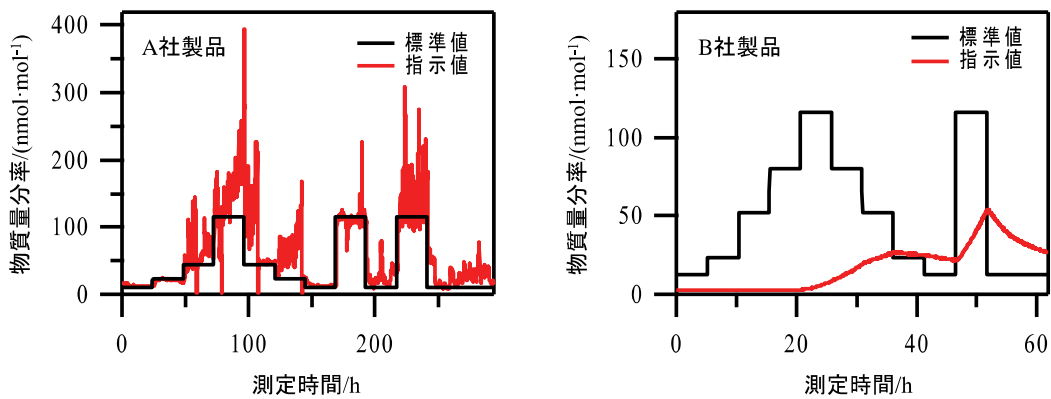


図7 微量水分標準と鏡面冷却式露点計の指示との比較[7] (国立研究開発法人産業技術総合研究所 (AIST) 提供)

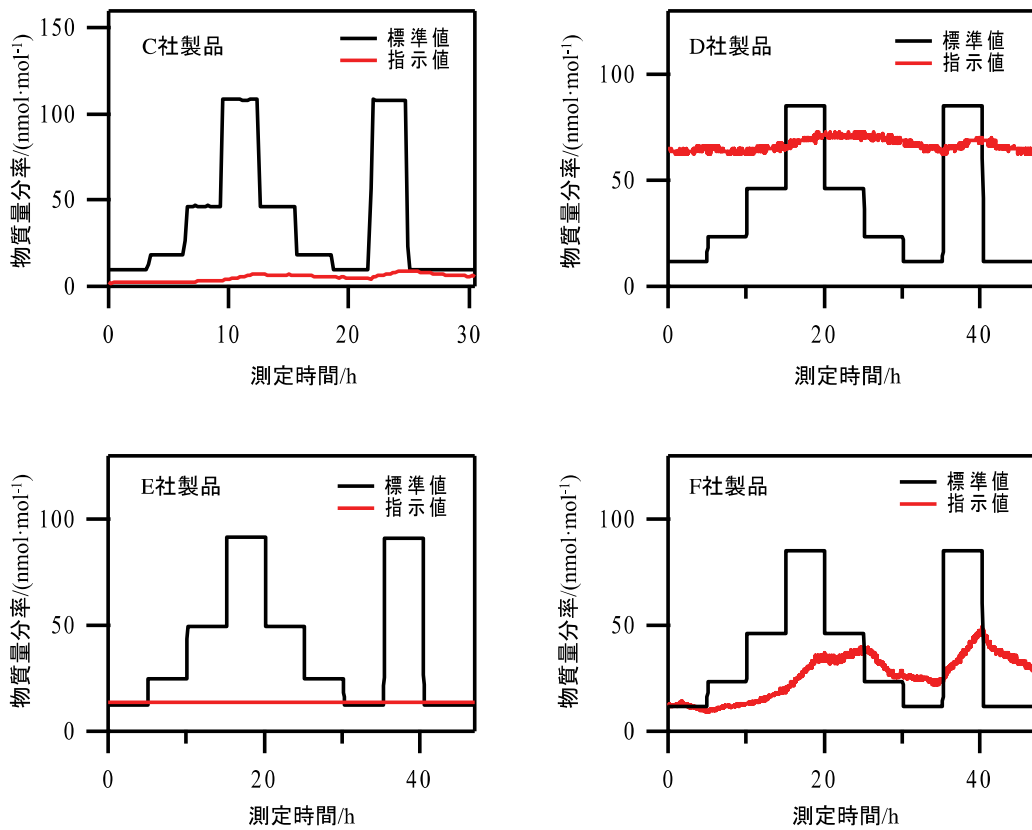


図8 微量水分標準と酸化アルミ静電容量式センサーの指示との比較[7] (国立研究開発法人産業技術総合研究所 (AIST) 提供)

ここでは、NMIJの微量水分標準に基づいて行った、予備的な性能試験の結果の一部について紹介する。図7は鏡面冷却式露点計の結果である。試験した鏡面冷却式露点計は2社の製品で、カタログ記載の測定範囲の下限は両製品とも霜点

-100℃(大気圧でのモル分率14ppb)以下となっている。鏡面冷却式露点計は、標準を参照しなくても露点(霜点)を直接測定(いわゆる絶対測定)できるので、湿度の計測器としては現在最も信頼性が高い装置であるが、微量水分領域になるとい

かに鏡面冷却式といえども測定が容易ではないことがこの結果から分かる。図8は現在も半導体製造分野を中心として大量に使用されている酸化アルミ静電容量式センサーの結果である。ここでは4社の製品の結果を示しており、それらの製品のカタログ記載の測定範囲の下限は全て霜点-100℃(14ppb)以下となっている。ここで試験した全てのセンサーは、指示の正確性・応答性・感度に問題があることがわかった。これらの試験の詳細については、文献[7]を参照されたい。

他の測定原理の微量水分計(水晶振動子式、五酸化リン式、波長可変ダイオードレーザー吸収分光式、フーリエ変換赤外分光式)についても性能試験を行ったが、低濃度領域で同様の問題が見られた。

これらの事実は、微量水分標準が整備されたことで初めて明らかになったことを、ここで強調しておきたい。

5. 微量水分標準と微量水分計の現状

NMIJが開発した微量水分標準は、校正事業者である一般財団法人化学物質評価研究機構(CERI)の標準用微量水分計の校正に使われている。CERIはこの微量水分計を用いて校正事業を行っているため、計測器メーカーや一般ユーザーはCERIに依頼することで、NMIJにトレーサブル、すなわちSIにトレーサブルな校正及び性能試験のサービスを受けることができる。2017年現在、CERIのサービス範囲は12ppb~1200ppbとなっている(“微量水分計”, “CERI”で検索)。一方、微量水分計については、図7と図8で示されたような問題が明らかになって以降、いくつかの計測器メーカーで高性能微量水分計の開発が開始された。それらのうちのいくつかは既に商品化されている。メーカー提供のデータによると、100ppb以下の領域での指示の正確性・応答性・感度が従来製品に比べて大きく改善されている。しかし、それらの性能試験の多くは、以前と同様にメーカーが独自に行ったものであり、NMIJの微量水分標準へトレーサブルとなる方法で性能試験を行った報告は、2017年現在でまだほとんどない状況にある。微量水分領域では、性能試験を行うこと自体が非常に難しいので、メーカー独自の性能試験の結果しかない状況では、それらの「高性能微量水分計」の性能は依然として不明と言わざるを得ないである

う。いくつかのメーカーではSIトレーサブルとなる性能試験や第三者機関(NMIJ, CERI等)による性能試験を計画中であるので、今後はより公正・中立な試験に基づく性能評価の報告が期待される。

現在市販されている微量水分計の性能で、特に注意するものとして、指示の応答時間がある。微量水分領域では水分濃度変化に対して、一般に計測器の指示の応答が遅くなり、これが大きな不確かさ要因となる。応答時間は、水分濃度を急激に変化(ステップ変化)させた時の、指示値が最終値の90%に達するまでの時間(90%応答)で表される場合が多い。このような情報がきちんと仕様表に記載されていることも重要なポイントとなる。

6. おわりに

微量水分標準が整備されたことで、古くから使われてきた多くの微量水分計の性能に問題があることが明らかになった。これを受けてSIトレーサブルとなる微量水分計の校正・性能試験サービスが開始され、計測器メーカーは高性能微量水分計の開発を始めた。しかし、5.で述べたように、SIトレーサブルな標準と微量水分計の性能試験がいまだ十分に結びついていない状況にある。この現状は今後徐々に改善されていくと思われるが、その一方で、図8の結果と同レベルの性能の製品が、仕様表に測定下限が霜点-100℃(14ppb)以下と記載されて、現在も大量に販売されている。これは、性能は「多少」低くても小型で安価なセンサーが欲しいとのユーザーニーズによくマッチしているからと思われる。しかし、ユーザーの考える「多少」の範囲に図8のような結果が含まれるのかどうかは、検討に値する課題であろう。

計測器メーカーが第三者機関に性能試験の依頼をあまりしない理由としては、コストがかかること、メーカー独自の性能試験でも大きな問題が生じていないこと、ユーザーが性能試験の信頼性までは注目していないこと、等が考えられる。従って、ユーザー側から信頼性の高い性能試験を望む声が高まれば、それに積極的に応える計測器メーカーは必ず出てくるはずである。微量水分計の機種選定の際には、販売担当者に第三者機関による性能試験を行ったのか、測定範囲全てにおいてSIトレーサブルとなる性能試験を行ったのか(測定下限は-100℃としながら性能試験は-70℃まで

しか行っていない機種も実際に存在する)等について質問して、きちんとした回答が得られるメーカーを探すことが重要となる。ユーザーにとっては手間増えることになるが、このようなユーザーの姿勢がよい計測器メーカーを育てることにつながっていく。高性能で信頼性の高い微量水分計の普及には、ユーザーの果たす役割が大きいことを指摘して本稿を終えたい。

参考文献

- [1] http://semicon.jeita.or.jp/STRJ/ITRS/2007/14%202007_ITRS_Yield_Japanese_v2.0.pdf
- [2] http://www.tn-sanso-giho.com/pdf/26/tnscgihou26_01.pdf
- [3] A. O' Keefe, D.A.G. Deacon, Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources, *Rev. Sci. Instrum.*, **59** (1988) 2544-2551.
- [4] H. Abe, H. Kitano, N. Matsumoto, C. Takahashi, Uncertainty analysis for trace-moisture standard realized using magnetic suspension balance/diffusion-tube humidity generator at NMIJ, *Metrologia*, **52** (2015) 731-740.
- [5] 橋口幸治, キャビティリングダウン分光法を用いたガス中微量水分の高効率な計測技術に関する調査研究, *計測と制御*, **55-7** (2016) 618-626.
- [6] H. Abe, H. Kitano, Improvement of flow and pressure controls in diffusion-tube humidity generator: Performance evaluation of trace-moisture generation using cavity ring-down spectroscopy, *Sens. Actuators A* **136** (2007) 723-729.
- [7] 阿部 恒, ガス中微量水分測定の信頼性の飛躍的向上-計量トレーサビリティの確立と計測器の性能評価, *Synthesiology*, **2-3** (2009) 223-236.
- [8] <http://www.npl.co.uk/publications/euramet-1002-international-comparability-in-measurements-of-trace-water-vapour>.
-

高温・高湿度域の湿度計測と利用の最前線

Frontier of Measurement and Utilization of High Humidity over Boiling Point Temperature

伊與田 浩志 (大阪市立大学)

Hiroyuki IYOTA (Osaka City University)

e-mail: iyota@eng.osaka-cu.ac.jp

1. はじめに

2017年夏の気温は、全国的に7月が例年よりも高かったようである。高い気温（乾球温度）の中では、ヒトは発汗量や皮膚血流を増加させるなどの自律神経活動による体温調節機能を働かせて、正常な体温を維持しようとする。日陰であれば、体表面温度を汗などの水分蒸発によって気温よりも低い温度（湿球温度程度）に下げることができる。周囲の「湿度」が低いほど汗の蒸発が促進され、夏場でも涼しく過ごすことができる。

このように、湿度は、我々の生活や生命維持と密接に関係するため、非常に身近な言葉の一つであり、また、空気調和、農学、気象学、化学工学などの複数の学術分野において空気（気体）を扱う際、空気に含まれる水蒸気の量を表すための重要な概念でもある。

さて、湿度の表現方法は複数あり、絶対湿度のように分野によって異なる定義で使われているものがある。また、水の沸点温度（大気圧では100℃）以上の高温域では、相対湿度のように常温域とは異なる感覚で意味を理解することが求められる定義もある。そこで本稿では、主に大気圧100℃以上の高温の湿り空気あるいは過熱水蒸気を対象に、食品加工を例にしながら、利用状況、湿度の表現、計測の必要性と課題、計測装置の開発や動向について述べる。

2. 湿度の表現方法

2.1 食品加工における高湿度空気の利用

農産物や水産物など、食品として扱われる材料の多くは水分を多く含んでおり、消化性や風味の向上、安全性の確保のために加熱調理されることが多い。この加熱調理の際には、目的に応じて適切な加熱条件を実現できる装置が用いられる。

例えば調理用オーブンをを用いる場合、高温の気体中で、表面に水分が存在する材料を加熱することに

なる。このとき、気体側の水蒸気分圧が材料表面の水蒸気分圧より低い場合は水分蒸発が起こり、逆に気体側が高い場合は材料表面で水蒸気が凝縮し材料表面に凝縮熱が加えられると同時に水分も付与される。つまり、気体の水蒸気分圧（湿度）は、加熱中の材料の水分量や温度の履歴に大きく影響を与える因子の一つといえる。

高い水蒸気分圧の気体を利用し、材料の水分蒸発を抑えた加熱の代表的な方法として蒸し加熱があり、水分を蒸発させることなく水の沸点温度近くまで材料を加熱できる。また、スチームコンベクションオープン（スチコン）など、高温のオープン庫内への水蒸気供給機能を有する調理用オープンが家庭用、業務用ともに身近なものになってきている[1-3]。これらのオープンは、庫内を320℃程度までの任意の温度に調整することもできる。つまり、大気圧、100℃以上で、室内空気の水蒸気分圧（約1 kPa）から、水蒸気分圧が大気圧に等しくなる過熱水蒸気（約101 kPa）までの広い湿度範囲の気体を、食品の加熱調理に手軽に利用することができるようになった。

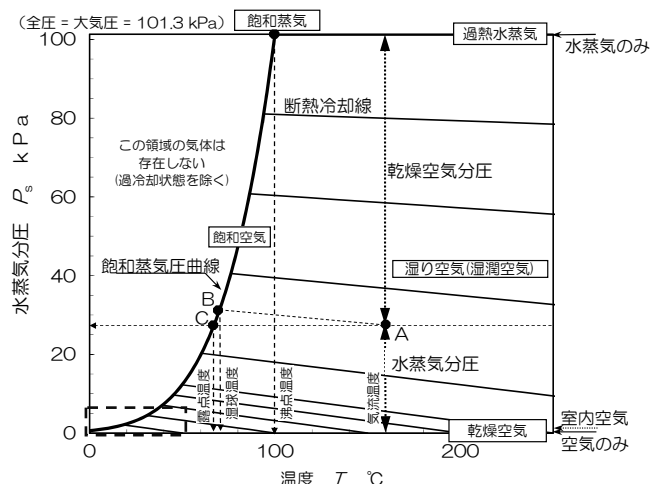


図1 過熱水蒸気・高温湿り空気の利用チャート

空調で広く用いられている空気線図をもとにして、図1に、横軸の温度を250℃まで、縦軸を水蒸気分圧とし水蒸気みの状態(大気圧=水蒸気分圧)まで拡張したチャートを示す。図1の左下に示す点線枠が、一般的な空気線図で示されている領域である。同図中には例として湿り空気(点A)の湿球温度(点B)と露点温度(点C)の読み取り方も示している。

図より、100℃以上では実在可能な湿度(水蒸気分圧)領域が全圧まで広がるのがわかる。また、次章でこれらの領域の湿り空気の利用例を紹介するが、このような広範囲な温度、湿度の湿り空気の積極的な利用と研究開発のためには、高温中でも測定可能で簡便に利用できる湿度計測技術が求められる。

2.2 相対湿度の定義と吸着式湿度センサ特性

湿度を表す定義として、日常生活では、一般に次の相対湿度が広く用いられている。

$$\text{相対湿度}[\%rh] = \frac{\text{水蒸気分圧}}{\text{その温度における飽和水蒸気圧}} \times 100$$

図1に示したとおり、常温域では仮に100%rhであっても水蒸気分圧は全圧に対して低く、水分の絶対量も少ない。一方、冒頭で述べたように、ヒトはそのわずかな変化を肌で感じることができる。また、食品を例にすると、水分を吸着しやすい材料(例えばクッキーやスナック菓子など)は、相対湿度に応じて、その力学的な性質が変化する。このように、その形状や力学的な性質が湿度によって変化することを利用することにより、湿度計測ができる(例えば毛髪湿度計など)。また、水分の吸着による材料の電気的な性質(電気伝導率や静電容量)の変化を利用し、感湿材料として高分子や金属酸化物などを用いた吸着式の湿度センサは、すでに広く使用されている。

ここで、吸着式の湿度センサを、大気圧で水の沸点温度(100℃)以上で使用することについて考える。まず、図1で示したように、100℃以上であれば空気と水蒸気の割合は任意であるが、水蒸気分圧が大気圧を超えることはない。そのため、沸点温度よりも高い温度では、空気を含まない水蒸気の中であっても100%rhになりえない。

図1の縦軸を水蒸気モル分率として、温度を350℃に拡張した図上に等相対湿度線を示したものを図2に示す。例えば、大気圧、200℃の場合は、相対湿度の最大値は6.5%rhである。したがって、相対湿度により出力(静電容量など)が変化をする吸着式のセンサを使用し、気体中に含まれる「水蒸気量」(水蒸気分圧など)を測定する場合、一般に温度が高くなるほど不確かさが増大する傾向になる。また、センサ部の温度(測定対象の気体の温度として扱われる)を正確に測定することも重要である。

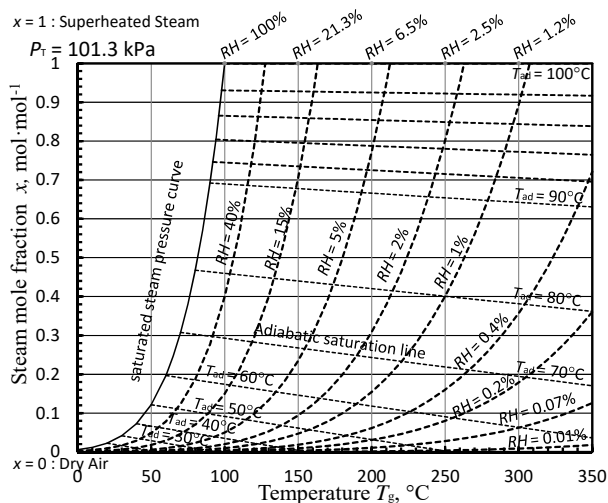


図2 高温高湿度域に拡張した湿度図表と相対湿度(RH)

沸点温度よりも高い温度で相対湿度の意味を考えると、相対湿度、センサ出力、センサ温度の関係を理解すれば、100%rhになりえないことはイメージしやすい。しかし、沸点温度未満(水蒸気分圧<全圧)の場合のように、所定の圧力、温度の空気中に存在することが可能な水蒸気量の上限に対する割合として相対湿度を理解することは適切ではなくなる。

2.3 湿度表現と露点温度

湿度は、気体に含まれる水蒸気の割合を表す概念的な言葉であり、先の相対湿度のほか、絶対湿度(混合比)、水蒸気モル分率、水蒸気分圧、露点温度など、目的に応じて多くの表現が用いられる。しかし、例えば、絶対湿度の表現は化学工学や空調設備分野(kg-steam/kg-dry air)と、農学や気象分野(kg-steam/m³-air)では定義が異なっており、前者での定義は一般には混合比(mixing ratio)と

呼ばれる[4]. この定義では、空気を含まない過熱水蒸気の場合、分母が0となるため無限大となる。また、蒸気工学の分野では「湿り」の意味が水(液体)を意味し、空気の湿度計測の分野では空気中に含まれる水蒸気(気体)を意味する。このような言葉の使い方の違いも、特に高湿度域では注意が必要である。

湿度計測の精度を評価する際、湿度の表現として露点温度が使用され、その測定には一般に鏡面反射式露点計(光学式露点計)が用いられる[5]。同露点計は、例えば国家標準(特定標準器)の国際比較にも使用される。気体の露点温度から水蒸気分圧への換算方法として、IAPWS-IF97, Wexler-hyland, Wagner-Prussなどの多くの式が知られており、JISでは、Sonntagの式が用いられている[4]。化学工学分野では、水以外の溶剤などにも用いることができる飽和蒸気圧の推算式としてAntoineの式が知られており、物質に依存する3つの定数のみを用いた式で表される[6]。これらの近似式による値は、50~100℃では、最大0.2%程

度の差であり、大気圧下ではいずれの式も使用できるが、気体中の水蒸気の絶対量を求めたい場合には、特に高湿度になるほど正確な全圧の値が必要になる。

なお、これらは、単一成分(液相:水-気相:水蒸気)の場合の飽和蒸気圧を求めるための式である。実際の測定対象となる湿り空気の場合は、空気中の気体成分の影響で飽和蒸気圧はわずかに変化するため、増加補正係数により補正が必要な場合がある。0~90℃の大気圧の空気中では、その影響による差は0.6%未満で事実上無視できるとされている。実際の食品加熱等の際には、更に気体中にわずかながら様々な水溶性の成分が存在する可能性があり、食品の表面近傍の水分にも、水と相互作用のある溶質が溶存している場合が多い。その表面で水分蒸発が起これば、表面の溶質濃度が上昇して、材料表面の水分活性が低下する(露点温度や水蒸気分圧が変化する)可能性も考えておく必要がある。

表1 近年の沸点温度以上での高湿度空気の用途、計測ニーズや水蒸気利用の例

<p>【農産物・食品分野】</p> <p>①農水産物の表面加熱(ブランチング, 熱殺菌) ・主に大気圧近傍で100~130℃の水蒸気を利用, 微細な高温水滴を飛散させた気体(アクアガス)の利用[7]. ・200℃程度, 湿度制御されている高湿度空気を利用した種子の消毒法[8].</p> <p>②食品の加熱・焼成 ・温度が180℃以上の水蒸気や高湿度空気を庫内雰囲気(熱風)として利用. スチームコンベクションオープン, パン・菓子の焼成など[1-3]. ・蒸し加熱では意図的に空気を混入させることで露点温度を沸点温度(100℃)以下に下げることがある。乾燥防止のために意図的に湿り飽和蒸気を利用する場合がある。ハード系のパン焼成の際には、一般に焼成の初期に湿度を上げるための操作が行われる。</p> <p>③材料開発(造粒) ・造粒のためのバインダとしてアクアガスを利用[9].</p> <p>④レトルトパックや缶詰の加熱・殺菌工程 2気圧程度の水蒸気を利用。パック内の圧力上昇による破損防止のため、レトルト内で圧縮空気を混入させて全圧を高める手法がある。</p> <p>⑤国産木材(主にスギ)の高速乾燥と高品位化 100℃~120℃程度の高温高湿度空気や過熱水蒸気を乾燥に利用[10]。木材乾燥では、乾燥による割れ防止に高湿度空気を用いるなど、湿度管理が重要。近年は木材の耐久性向上のため、200℃近傍による熱処理材(例:サーモウッド)などもある。</p> <p>⑥タバコ葉や農産物の乾燥 高速乾燥のために100℃以上の高温を利用し、湿度管理をしながら乾燥を行う場合がある。タバコ葉の乾燥では乾燥中の湿度管理は必須。</p>	<p>【医療分野】</p> <p>⑦滅菌装置 沸点温度付近の水蒸気を利用。空気が存在すると水蒸気分圧が低下して露点温度が低下するため、空気の混入率を下げるのが必須[11].</p> <p>【材料開発と製造】</p> <p>⑧燃料電池 動作中の内部は~800℃程度の高温状態で、湿度は性能に影響する重要な因子の一つ。電池用部材の製造や性能評価の際にも湿度管理が重要。</p> <p>⑨耐環境試験(自動車用樹脂材料, 電子部品) 例えば相対湿度85%程度を維持しながら、冷却と加熱(氷点下~125℃程度)を繰り返す試験など。自動車関係を中心にセンサ類の高温対応化、並びにMEMSプロセス技術を用いた高性能湿度センサの量産化が進んでいる[12].</p> <p>⑩セラミックスの脱脂・乾燥, 焼成 製造工程において炉内に水蒸気を供給することがある。近年大幅な時間短縮や品質向上のために高温の水蒸気の利用研究が進められている。</p> <p>⑪樹脂やゴム, 繊維の染色(捺染)工程 加水分解など水とかわる反応が利用されている。その生産設備やプロセスの最適化など。</p> <p>⑫金属部品 工場の作業環境改善や時間短縮のために、ワークの加熱や洗浄への過熱水蒸気利用、鋳造時の中子製造へ高湿度空気などの利用報告がある[13].</p> <p>【燃焼】</p> <p>⑬燃焼制御による高効率化 自動車のエンジンの吸気空気の湿度測定。エアフローセンサーに使用[12].</p> <p>【環境】</p> <p>⑭熱分解, ガス化, 炭化など 湿度を含めたガス組成の分析と制御が望まれる。</p>
--	---

3. 高温での湿度計測のニーズと方法

3.1 計測の重要性

食品や農産物は水分を多く含んでおり、かつ温度感受性の強い材料である。図3に、食品の加熱に際して、食品の状態に影響を与える温度依存性のある因子を示す。食品を加熱する際、気体の湿度は、露点温度や湿球温度など、食品の温度や水分量に影響を与える重要な操作パラメータとなる。

湿度の影響を示す実験結果の例として、加熱中の食パンのクラム部分の色変化を図4に示す。大気圧下で200°C、1.5 m/sの気流中で、高温の室内空気と過熱水蒸気中で焼成した場合のCIE-L*a*b*表色系のa*値（数値が大きいと赤味が強い）の変化を比較した結果である。通常、焼成は高温の空気中の方が短時間で焼き色がつくが、食パンの場合、試料が多孔性であること、凝縮水を吸収する性質を持つことなどから、過熱水蒸気（高湿度）条件の方が、着色が早くなった例である。

そのほか、気流中に置かれた水の蒸発速度は、所定温度（逆転点温度、170~300°C程度）以上では湿度が高いほど大きくなることが報告されている[15]。

- 酵素活性
- デンプンの糊化
- タンパク質の熱変性
- 低沸点成分の気化
- 拡散係数
- 水への溶解度
- 水の表面張力
- 水溶液の粘性、力学的性質
- 化学的な反応性

図3 食品の品質や性状に影響を与える温度依存性を有する因子の例

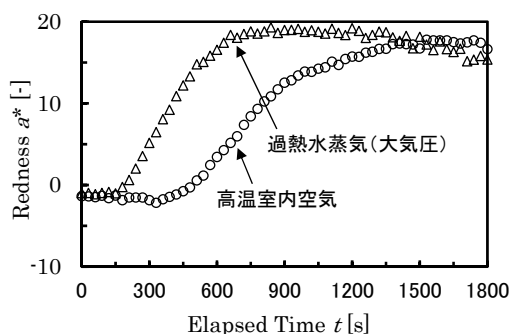


図4 熱風中で焼成時の食パンクラム部の色変化(200°C, 可視域分光反射率より算出)

さらに、ヨーロッパでは、製品品質の向上、CO₂排出量削減、省エネルギー化を目指して、産業用（食品加工や乾燥用）オープン内部（高温かつ非定常条件）の湿度計測に関する取り組みが国際プロジェクトとして進められている[16]。

沸点温度以上を含めた広範囲な温度・湿度の計測と制御操作によって、本節並び表1に示したような各種材料の加工や製造において、品質向上とともに、高湿度の排気の低減や庫内の湿度分布の最適化などによる省エネルギー化の可能性も残されている。

3.2 高温域での湿度計測

高温用の湿度計として、吸着式では200°Cまで、限界電流式では250°C（特注により更に高温対応可）までの高温度域で使用できるものが市販されている。抽気が可能な場合は、測定可能な温度まで気体を冷却して測定することもできる。抽気が測定値に影響する等の問題がある場合は、抽気した気体を戻すことで解決できる場合もある。露点計は一般に大型で抽気式のものが多いが、プローブ型も販売されている。そのほか、ヒートパイプを利用した新たな計測方法も提案されている[17]。また、MEMS技術の進歩により、125°Cまで使用できる比較的安価な吸着式湿度センサも急速に普及している。そのほか、ガス組成分析にも利用できる分光学的な手法（FT-IR, Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS)など）を用いた湿度測定装置も開発及び商品化されている。現在はまだ高価であるが、MEMS技術や大量生産によるコストダウンに期待したい。

筆者らは医療用ガーゼや多孔質材料を湿球のウィックとして用いた簡易湿度測定法の実用性について検討しており、乾湿計の原理を理解した上で使用すれば、沸点温度以上の高温でも手軽に湿度測定ができる方法として提案している[18]。また、湿球のガーゼの代わりとして開発した多孔質プローブを図5に示す。専用の基台に取り付けることで、内部流路に水の自動供給が可能で、プローブに設けた細い穴を利用して温度センサや水分計（静電容量電極）を取り付けることができる。後述する湿度標準発生装置で発生させた湿度と、プローブ温度から求めた水蒸気モル分率を比較した結果例（200°C）を図6に示す。定常時、300°Cま

ではその偏差が 0.04 mol/mol で測定が可能であった[19]. なお, 水を扱うために長期間の連続測定には不向きであり, 長期安定性の課題は残されている.

その他, 100°C以上で保温したシリンジで所定の体積を抽気し, 密閉した後に冷却することで非凝縮性気体の体積を測定することができる. その体積割合から湿度を求める簡便な方法もある.

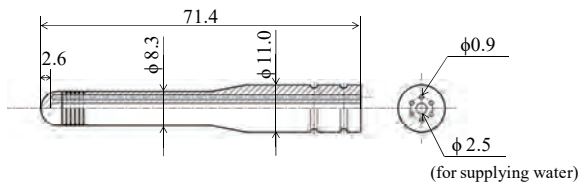


図5 湿球温度測定のための多孔質セラミックスプローブ (射出成形法により製造)

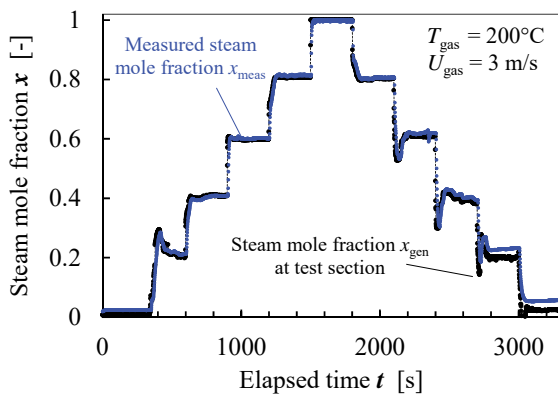


図6 発生湿度との比較実験結果

4. 湿度標準

4.1 湿度標準

湿度測定に関して, 独立行政法人産業総合研究所計量標準総合センター (NMIJ) では, 図7に示す露点温度範囲で湿度標準を供給している[20]. 湿度測定の比較的新しいニーズとしては, 表1にもある通り, 半導体製造や燃料電池, 二次電池などがある. 一方, 食品機械に使用されるような露点温度 95°C以上の湿度標準は, 燃料電池や環境試験関連で測定ニーズはあるものの, 現在のところ研究開発中とされている.

4.2 発生方法

湿度標準の発生方法としては, JIS[21]において, 二温度法, 二温度二圧力法, 分流法 (図8)などが定められているが, いずれの方式も, キャリアガスとして空気が必要であり, 空気を温度管理された水中にバブリングあるいは接触させて (この部分を飽和槽と呼ぶ), 水温と同温度の飽和空気を得る方法を用いる. 高湿度を得ようとする, 飽和槽での供給熱量が大きくなり, 大気圧で 95°C以上の露点温度の発生には不向きな点も多い. 筆者らは図9に示すような, 過熱水蒸気と高温空気を混合させて湿度標準を発生させる方法を水蒸気混合法として提案し, 国家標準と比較しながら有用性の確認を進めている[22-23]. 単純な構成であるが, 飽和槽を用いないために熱容量が小さいこと, 空気を含まない過熱水蒸気域まで校正が可能であ

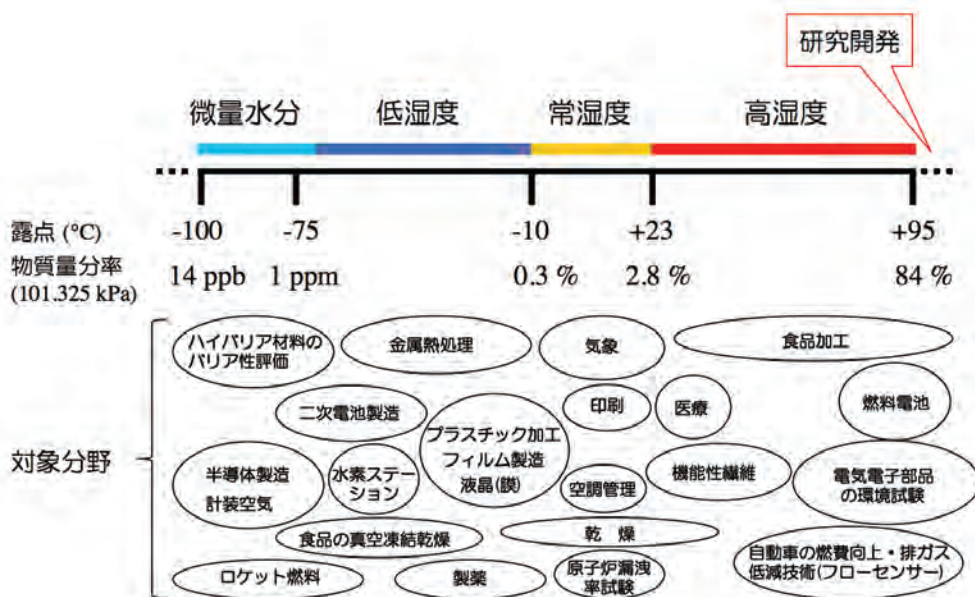


図7 日本での湿度標準の供給範囲 (NMIJ 提供)

ることなどの特徴を有している。

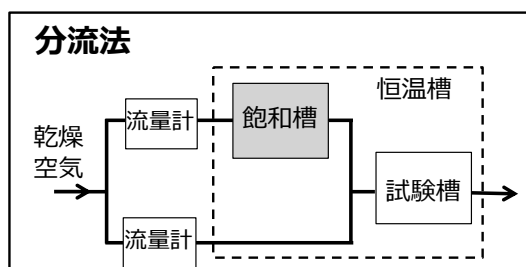


図8 分流法による湿度発生装置の構成

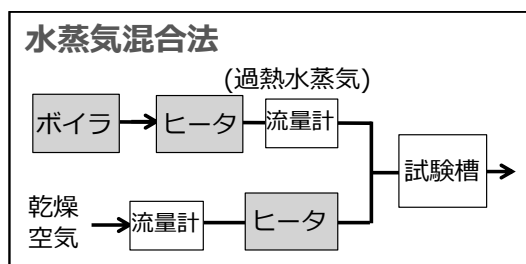


図9 水蒸気混合法による湿度発生装置の構成

5. おわりに

筆者は、湿度の測定、高温高湿度領域とは、乾燥や食品加工の分野から関わりを持った。食品加工分野では、乾燥を抑えることのできる加熱方法、殺菌方法として水蒸気や高湿度空気が積極的に利用されている。その一方で、空気や水蒸気は身近な物質で手軽に使用することができるが、水蒸気は物性面で特異な性質を持っており、高純度化という観点も含めて、更なる高度利用の可能性を有していると考えている。

これまでの湿度の研究においては、空気が含まれない過熱水蒸気は対象となっていなかった。一方、蒸気工学の分野では、非凝縮性気体である空気が水蒸気に混入すると、伝熱面近傍で水蒸気の移動が阻害されるために伝熱量が大きく減少することから、空気混入を利用技術として扱う例はほとんどなかった。そのため、湿り空気(湿度)の利用と、水蒸気の利用の間にギャップがあったように感じる。大気圧下 100℃以上で、空気から過熱水蒸気までの幅広い湿度範囲が連続しているものと考えて利用することは、湿度並びに蒸気利用の両方の観点からも有益であると考えている。

最後になったが、長い歴史と社会的背景の中で、空気、水蒸気を様々な目的で利用するための技術

向上に取り組まれた多くの技術者、研究者の方々に敬意を表し、今後の水蒸気利用と湿度計測技術の発展を願いながら結びとしたい。

謝辞

本報告の一部は、JSPS 科研費 No.15K06114 による補助を受けて実施した研究活動の成果を含んでいます。ここに、研究を実施するにあたりご協力、情報提供をいただいた、公的研究機関、大学等の研究者の方々、(株)第一科学、神栄テクノロジー(株)、ヴァイサラ(株)、マイクロ・イクイップメント(株)、(株)チノー、エスペック(株)、(株)アミスタ、三浦工業(株)の諸氏をはじめ、多くの方々に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 杉山久仁子, 冷凍, 88 (2013) 620.
- [2] 山形純子, 伊與田浩志, 西村伸也, 日本食品科学工学会誌, 59-10 (2012) 491.
- [3] 門馬 哲也, 酒井 昇, 中門 千晴, 福岡美香, 高見星司, シャープ技報, 94 (2006) 10.
- [4] Japanese Industrial Standards, JIS Z 8806: 2001.
- [5] 独立行政法人製品評価技術基盤機構, 技術的要求事項適用指針(湿度:湿度測定機器等), JCT22000-14. (2015)
- [6] 日本化学工学会編, 化学工学便覧第7版, 丸善 (2011) 13.
- [7] 五月女格, 農業食料工学会誌, 78-3 (2016) 204.
- [8] 野田崇啓, 伊與田浩志, 日高靖之, 井上保, 横江未央, 農業食料工学会誌, 76-6, (2014) 555.
- [9] 五月女格, 井上孝司, 片桐孝夫, 竹内博一, 津田升子, 岡留博司, 五十部誠一郎, 日本食品工学会誌, 15 -1 (2014) 25.
- [10] 小林功, 木材工業, 65-2 (2010) 52.
- [11] 「医療現場における滅菌保証のガイドライン 2010」, 日本医療機器学会, 東京 (2010).
- [12] 星加浩昭, 応用物理, 85-1(2016) 33.
- [13] 井出勇, 関徹, 西田伸司, 早藤孝平, 平松潤子, 鑄造工学, 87-2 (2015) 130.
- [14] Iyota, H., Sakai, H. and Mamiya, Y., Food Science and Technology Research, 19-6 (2013) 939.
- [15] Yoshida, T. and Hyodo, T., Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop, 9 (1970) 207.

- [16] <http://www.empir-hit.eu/> (2017.9.5 参照)
- [17] Yamauchi, S. et al, *Sensors and Actuators A: Physical*, 250 (2016) 1.
- [18] 伊與田浩志, 一色翔悟, 井上保, 山形純子, *日本機械学会論文集*, B78 (2012) 1267.
- [19] 三浦孝平, 松本泰希, 伊與田浩志, 森川暉大, 辻岡哲夫, 田中倫明, 上杉直輝, *熱物性*, 30-1 (2016) 9.
- [20] https://unit.aist.go.jp/mcml/rg-gh/humidity_standards.html (2017.9.5 参照)
- [21] Japanese Industrial Standards, JIS B 7920: 2000.
- [22] 吉岡 秀矩, 伊與田 浩志, 三浦 孝平, 湯谷 智, 辻岡 哲夫, 阿部 恒, 第 53 回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2016) K111 (on CD-ROM)
- [23] 湯谷 智, 吉岡 秀矩, 伊與田 浩志, 阿部 恒, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会予稿集 (2017) 7p-A411-6 (on CD-ROM)

日本における大雨の長期変化

Long-Term Changes of Heavy Rainfalls in Japan

藤部 文昭 (首都大学東京)

Fumiaki FUJIBE (Tokyo Metropolitan University)

e-mail: ffujibe.bs@gmail.com

1. はじめに

地球温暖化に伴う変化の1つとして、大雨など極端な現象の増える可能性が指摘されている。日本でも、2016年に相次いだ北日本の台風被害や2017年の九州北部豪雨など、大きな災害が繰り返されるたびに「異常気象」が増えてきたという議論が出る。また、都市化による気候変化も強い降水を増加させる一因になるとされる。その一方、気象の「異常さ」はいつの時代にも語られていたという指摘があり、極端な現象が本当に増えているのかどうかについては実証的な評価に基づいた見極めが求められる。

本稿では、過去の観測データに基づき、地球温暖化や都市化に伴う日本の気候変化、特に大雨・強雨の変化の実態を紹介する。また、これらの将来変化の予測についても触れる。なお、地球温暖化や気候変動の実態については気候変動に関する政府間パネル (IPCC)、気象庁、日本気象学会などから報告物や解説書が出ている[1-6]。

2. 大雨増加の実態と将来の予測

図1は世界と日本の平均気温の変動を示す。1901~2016年の116年間に、世界の平均気温は $0.78^{\circ}\text{C}/100$ 年の率で上昇している。この間、大気中の二酸化炭素濃度は1900年には300ppm弱だったものが、2015年には400ppmになった。一方、日本の気温は $1.23^{\circ}\text{C}/100$ 年の率で上昇し、世界の平均気温に比べて上昇率が大きい。日本付近は海面水温の上昇率が大きい傾向があり[2, 3]、これが気温の上昇率が大きいことの一因かも知れない。また、図1に使われた地点の一部は都市にあるため、都市化の影響が加わって昇温率が若干($0.3\sim 0.4^{\circ}\text{C}/100$ 年)大きく計算されている可能性がある[7] (注1)。

図2は、国内51地点の資料から求めた1901~2016年の年降水量・年最大日降水量および年間降

水日数(降水量1mm以上の日数)の変化を示す。年降水量は若干減る傾向があるが($-3.3\%/100$ 年)、この減少は統計的に有意ではない。一方、年最大日降水量は、年ごとの変動は大きいが期間を通じて見れば増加傾向がある。1次回帰による増加率は $8.6\%/100$ 年であり、これは危険率5%で有意である。図は省くが、大雨に関する別の指標として降水量100mm以上の日数を見ると、 $27\%/100$ 年の増加が認められる。これに対して降水日数は減少し、その変化率は $-13.9\%/100$ 年である。このように、年降水量には目立った変化がないが、強い降水はより強くなる一方、降水日数は減少し、従って無降水日数は増えている(注2)。

もっと短時間の強雨を対象にした研究も行われている。図3は、アメダスによる国内983地点の資料を使い、1979~2013年の35年間における年

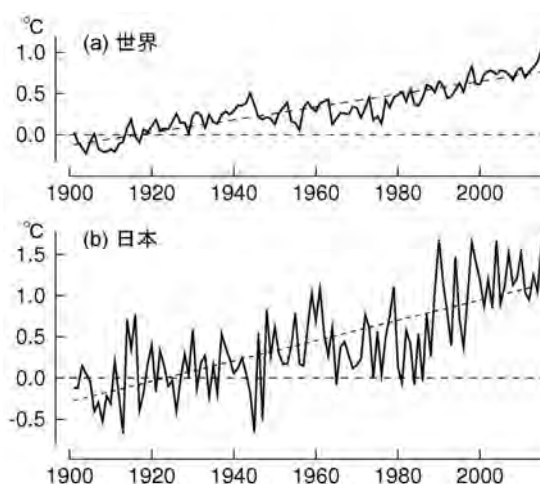


図1 世界と日本の年平均気温の経年変化. 1901~2016年. 気象庁データによる (http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/db/database_temp.html). 1901~1930年の平均値を基準とし、それからの偏差を示す. 点線は1次トレンド(1次関数を当てはめたもの)。

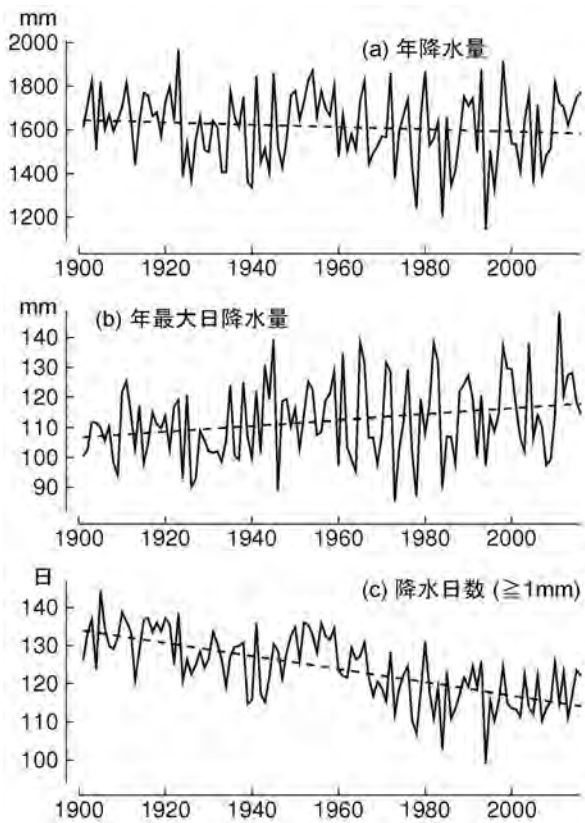


図 2 日本の年降水量・年最大日降水量および年間降水日数（降水量 1mm 以上の日数）の経年変化。1901～2016 年。国内 51 地点のデータによる。点線は 1 次トレンド。

最大 1 時間降水量（以下 P_{max} ）の経年変化を示したものである[8]。全国の年平均気温と日本近海海面水温の変化を併せて示す。 P_{max} 、気温、海面水温ともに増加・上昇傾向があり、それぞれのトレンドは 10 年当たり 3.6%、0.29°C、0.21°C である。また、年々の変動においても気温や海面水温の高い年に P_{max} の大きい傾向が見られる（図 3 の縦の点線）。図 4 は年ごとの値（図 3 の 1 次トレンドからの偏差）をプロットしたものである。 P_{max} と気温・海面水温との間には、0.6 前後の正相関がある。

大雨の強さや頻度は世界の多くの地域で増加している。IPCC は 1950 年以降の「大雨の頻度、強度、大雨の降水量」の変化について、「減少している陸域より増加している陸域のほうが多い可能性が高い」と評価している[1]。降水日数の変化傾向は地域によって異なるが、中国東部や韓国でも日本と同様、減少傾向が認められる[9, 10]。

将来、大気中の二酸化炭素がさらに増えたとき

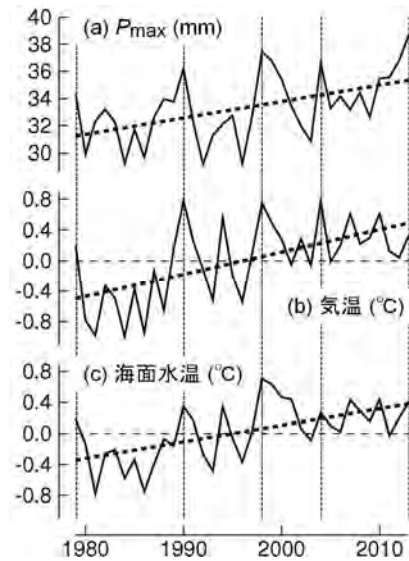


図 3 日本の年最大 1 時間降水量 (P_{max})、年平均気温、および近海海面水温の経年変化[8]。1979～2013 年。気温と海面水温は平年値（1981～2010 年の平均値）からの差を示す。

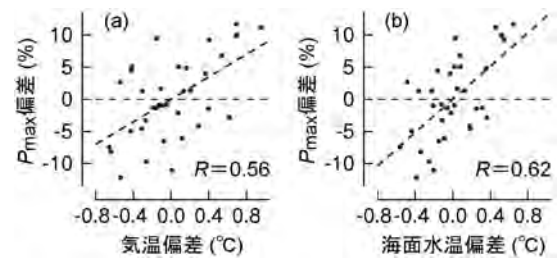


図 4 P_{max} と気温・海面水温の偏差（図 3 の 1 次トレンドからの差）の関係[8]。点線は 1 次回帰、 R は相関係数。

の気候については、数値気候モデルを使った予測が行われている[4]。二酸化炭素濃度の大幅な上昇を想定した場合（RCP8.5 シナリオ；2100 年の二酸化炭素濃度は 936ppm、メタンと一酸化二窒素を含めた二酸化炭素換算濃度は 1313ppm）、今世紀末（2081～2100 年）の日本の気温は近年（1986～2005 年）よりも 4.5°C 上昇すると予測される。図 5 は、降水量 100mm 以上の日数および 50mm 以上の時間数の変化を示したものである。どちらも全国的に増加し、現在と比べた増加率は数十%になる。表 1 はその他の要素の変化を示す。年降水量の変化は小さいが（2%弱）、無降水日数は増加する。すなわち、過去 1 世紀に起きた変化と同

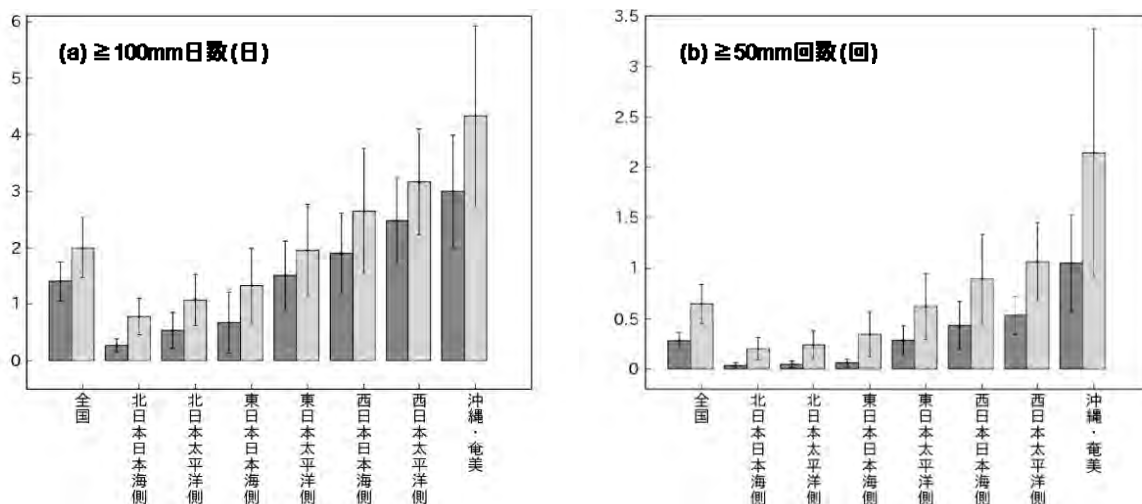


図5 (a) 降水量 100mm 以上の 1 地点当たりの年間日数[4]. 対になった各 2 本の棒グラフのうち、左側 (濃灰色) は近年 (1986~2005 年), 右側 (淡灰色) は今世紀末 (2081~2100 年) の計算結果を示す. 縦棒は年々変動の標準偏差を示す. (b) 1 時間降水量 50mm 以上の年間回数[4].

様の傾向が今後も続くことが予測される. また, IPCC は今世紀末にかけての世界の「大雨の頻度, 強度, 大雨の降水量の増加」について「中緯度の大陸のほとんどと湿潤な熱帯域で可能性が非常に高い」とし, 「干ばつの強度や持続期間の増加」についても「地域規模から世界規模で可能性が高い (確信度は中程度)」と評価している.

表 1 高排出シナリオ (RCP8.5) における今世紀末の日本の気候変化 (平均値と標準偏差) [4].

要素	変化量
年平均気温 (°C)	4.5 ± 0.6
年降水量 (mm)	-31.9 ± 185.5
年最大日降水量 (mm)	32.8 ± 22.8
年間 100mm 日数 (日)	0.6 ± 0.5
年間 50mm 回数 (回)	0.4 ± 0.2
年間無降水日数 (日)	8.1 ± 5.2

3. 大雨増加のメカニズム

地球温暖化に伴って大雨が増加する理由として, 最も重要なのは大気中の水蒸気量の増加であると考えられている. 気温が 1°C 上がるごとに, 飽和水蒸気量は 6~7% 増える. これは, 熱力学の Clausius-Clapeyron の式によることから, Clausius-Clapeyron 効果 (以下 CC 効果; 上記の増加率は CC 率) と呼ばれる. 地球温暖化が進展し

ても相対湿度はあまり変わらないと考えられるので, 温暖化とともに水蒸気量が増え, その分, 強い降水が起きやすくなると予想される.

特に, 降水の強さの上限値は大気中に最大限存在できる水蒸気量, すなわち飽和水蒸気量に依存するだろう. この観点から, 極端な降水 (例えば, ある気温のもとで観測される降水のうち, 強い方から 1% とか 5% のもの) の強さと気温との関係を CC 効果と比べつつ調べる研究が行われている [11]. それによると, 極端降水の強さは気温とともにほぼ CC 率か, CC 率よりもやや大きい割合で増加する. 増加率が CC 率よりも大きい理由としては, 気温上昇に伴う雲の性質の変化, 例えば積雲系の雲の増加などが考えられている. また, 短時間の強雨 (10 分間降水量や 1 時間降水量) のほうが, 長時間の大雨 (日降水量など) よりも CC 効果が明瞭に現れる傾向がある. 短時間降水の強さは雨雲 (積乱雲) の強さと直接関係するのに対し, 長時間の大雨は, それをもたらす降水システムの特性に支配されるため, 飽和水蒸気量の影響は見えにくいのであろう.

図 2 の場合, 年最大日降水量のトレンドを気温のトレンドと比べると, 気温の上昇率は 1°C 当たり約 7% であり, CC 率に近い (ただし, 図 1b の日本の気温上昇が都市化によって過大に表現されているとすれば, 年最大日降水量の増加率と気温

上昇率の比は CC 率よりもやや大きいかも知れない)。図 4 の年々変動においても、 P_{\max} の変化率は気温の変化 1°C に対して $7.6 \pm 4.7\%$ 、海面水温に対しては $9.5 \pm 6.7\%$ であり、CC 率と同程度か、それをやや上回る[8]。

しかし当然ながら、大雨の強さは CC 効果だけで決まるわけではない。大雨を支配する要因はたくさんあり、飽和水蒸気量は 1 つの要素に過ぎないからである。地球温暖化が進めば、気温の上昇だけでなく低気圧の活動度や卓越風(季節風など)に変化が生じ、変化のしかた次第では大雨が起きにくくなることもある。年々の変動においても、各年の気圧配置の特徴に応じて大雨の起きやすい年や起きにくい年がある。実際、図 4 と同様の図を夏季の西日本や南西諸島に限定して作ると、 P_{\max} と気温の相関はむしろマイナスになる[8]。これらの地域では、高温の夏は晴れの日が多く、降水の機会そのものが少ないため、 P_{\max} も小さいのではないかと考えられる。

なお、地球温暖化につれて降水日数が減少する理由については、1 つの見方として、「一度の降水イベントでもたらされる降水量は増加するが、飽和に達するまでに、かえって長い時間が必要になる可能性がある」という説明がなされている[4]。

4. 都市化に伴う降水の変化

地球温暖化と並ぶもう 1 つの気候変化は、都市化による昇温すなわちヒートアイランドの進展である。図 6 は東京都心の気温の変化を示す(注 3)。1901~2016 年の気温上昇率は $3.0^{\circ}\text{C}/100$ 年であり、世界や日本全体の上昇率を大きく上回る。この上昇のうち 1°C が地球温暖化によるものだとすれば、都市化によって約 2°C の昇温が起きたことになる。東京以外の大都市でも、全国平均の上昇率より速いペースで気温が上がっている[5]。

ヒートアイランドは地球温暖化と同様、人間活動が作り出した気候変化であるが、メカニズムは別である。地球温暖化の主因は、大気中の二酸化炭素など温室効果気体の増加による温室効果の強まりであるのに対し、ヒートアイランドの成因は地表の熱収支の変化にある。具体的には、(1) 人工的な熱源から熱が排出される、(2) 植生の減少やコンクリートなど非透水性の地表が増え、蒸発が抑制される結果、気化熱の吸収が減少する、

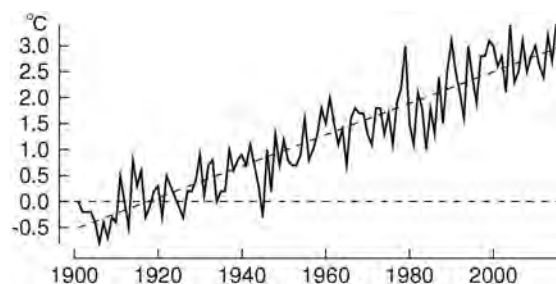


図 6 東京都心の年平均気温。1901~2016 年。図の表しかたは図 1 と同じ。

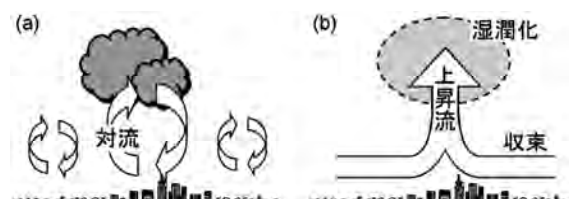


図 7 ヒートアイランドが降水の発生を促すメカニズム。(a)は都市の強い加熱によって対流が高く発達する効果、(b)は都市への風の収束に伴う上昇気流が水蒸気をくみ上げる効果を表す。

(3) 建物に囲まれた空間で熱の滞留や放射(日射と赤外線)の吸収が進む、などである。

都市化もまた、強い降水の増加をもたらすのではないと言われる。しかし、たとえそうだとしても、降水増加のメカニズムは地球温暖化によるものとは異なる。上記(2)に書いたように、都市では地表面からの蒸発が抑制されるため、大気中の水蒸気量はむしろ減少する。そのことは長期間のデータから確認される[12]。それにもかかわらず降水が増えるとすれば、水蒸気を集中させ雲の発達を促す何らかの作用が働いているはずである。図 7 は、考えられるメカニズムを示したものである。a は、都市地表面の強い加熱によって大気中对流が発達し、積雲が発生しやすくなることを表す。b はヒートアイランドの高温が風の収束を引き起こし、水蒸気が都市の上空へくみ上げられて、雲が発達しやすい状態になることを表す。一般に、都市が大気に与える熱量は暖候期の昼間に最も大きいと考えられ、図 7 の a も b も昼間の状態を想定している。実際に、首都圏の鉄道沿線の

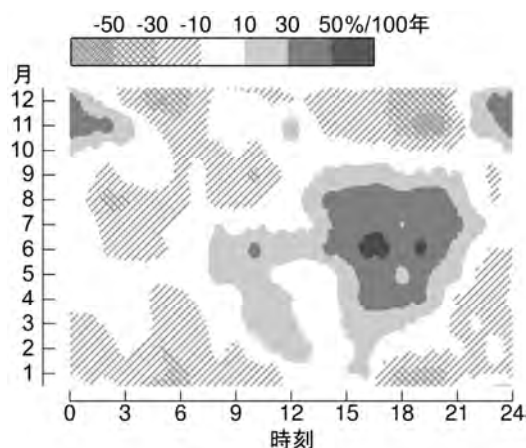


図 8 東京の非継続的降水の経年変化率[15].
1890～2008 年の毎時データによる.

市街地では、田園地帯に比べて夏の日中の雲量が多いことが、気象衛星データを使った研究によって確認されている[13]. また、新宿副都心などの高層ビル群が障壁になって上昇気流が生じ、雲の発達を促すという見方もある[14].

図 8 は、東京都心の 114 年間の毎時データを使って「非継続的降水」(前 6 時間の降水量が 1mm 未満である場合の降水)の増加率を月別・時間帯別に評価したものである。春～夏の夕方を中心に、100 年当たり数十%の増加が認められる。空間分布においても、東京都心の非継続的降水は東京周辺のアメダス地点に比べて暖候期の夕方に数十%多い[15]. また、数値気象モデルを使ったシミュレーションにより、東京とその周辺では都市の存在によって夏の降水量が増えることが認められている[16, 17]. しかし、他の都市についてはデータの不足や地形の複雑さなどが障害になり、本当に降水が増えているかどうかの検証は容易ではない。メディアでは時として「ヒートアイランドの進展によって都市のゲリラ豪雨が激増・・・」という類の言説を見かけるが、これはイメージ先行という感じがする。

5. 個別の大雨と気候変動との因果関係

ここまで論じてきたのは、統計的な観点から見た地球温暖化や都市化と降水との関係である。前の段落で触れた数値シミュレーションも、数百日間を対象にした計算結果の統計に基づいている。一方、九州北部豪雨のような大雨災害が起きると、

「この大雨は地球温暖化のせいか」と問われることがある。

この問題はタバコとガンの関係に似ている。喫煙とガンとの因果関係は、統計的には明らかだとされる。しかし、タバコを吸わなくてもガンになることはあるし、ヘビースモーカーがすべてガンになるわけではない。従って、ヘビースモーカーがガンになったとしても、間違いなくタバコのせいだ(すなわち、当人がタバコを吸わなければガンにはなり得なかった)とは言えない。これと同じように、地球温暖化による大雨の増加が本当だとしても、個々の大雨事例と地球温暖化との因果関係を Yes か No かで論ずることは無意味である。要は確率の問題である。

最近では、個々の極端現象と地球温暖化との因果関係を確率的に評価する試みが行われるようになった。これは、地球温暖化が進んだ状態とそうでない状態について、それぞれ数値気象モデルによる大量の計算を行い、対象とする現象が起きる確率を比べるものである。このアプローチはイベント・アトリビューション(event attribution)と呼ばれる。イベント・アトリビューションは大量の計算を要するが、計算機器の進歩とともに適用例が少しずつ増えてきた。日本の大雨を対象にした例としては、2012 年の九州北部豪雨(7 月 11～14 日)にこの方法を適用したところ、人為的な地球温暖化の寄与は小さく、大雨は自然の変動による場所が大きかったという結果が得られている[18].

極端現象の発生が確率的だということには、もう 1 つの意味がある。それは、確率の大小を別にすれば、激しい現象はどの時代にも起こり得るということである。実際、地球温暖化が進む前の明治・大正時代に、近年起きたことのないような特異な現象がいくつか記録されている。例えば、1896 年 9 月には彦根で 1 日に 596.9mm の大雨が降り、琵琶湖の溢水を引き起こした。この観測値に単純な統計理論(Gumbel 分布)を当てはめると、その生起頻度は数百万年～数億年に 1 回と算定される。このような大雨が現代に起きたら甚大な被害が出るかも知れない。地球温暖化の進展につれて大雨が増えることはおそらく本当であり、それを念頭に置いて将来の防災体制を強化していくことは大事だが、また同時に、最近の数十年間に経験して

いないような現象が今年や来年に起きるかも知れないことを、心の隅に置いておくことが求められると思う。

謝辞

本稿の一部は、日本学術振興会の科学研究費助成事業「過去 120 年間におけるアジアモンスーン変動の解明」(基盤研究 (S), 課題番号 26220202, 代表者: 松本 淳) の成果である。

注

注 1: 図 1 から分かるように、日本の気温は世界の平均気温に比べて年々の変動幅が大きい。その理由は地域の狭さにある。気温の変動は、ある地域が高温傾向なら別の地域は低温傾向というように、場所によって変化の向きが違いため、世界全体を平均すればそれらが打ち消し合い、変動が小さくなる。

注 2: 1960 年代に降水量観測の自動化が行われ、それに伴って観測の最小単位が 0.1mm から 0.5mm へ変更された。その前後の観測値を接続する際の仮定の置き方によっては、降水日数の減少率は図 2c よりも小さくなるが、減少が有意であることに変わりはない。

注 3: 気象庁による東京の観測場所(露場=ろじょう)は 2014 年 12 月に移転した。新しい露場は旧露場よりも年平均気温が 0.9°C 低いことが報告されているため、図 6 では 2015 年以降の観測値に 0.9°C を加えて利用した。

参考文献

- [1] IPCC, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Cambridge University Press (2013). 日本語による概要は http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/ipcc/ar5/ipcc_ar5_wgl_spm_jpn.pdf 参照。
- [2] 気象庁, 異常気象レポート 2014 (2015).
- [3] 気象庁, 気候変動監視レポート 2016 (2017).
- [4] 気象庁, 地球温暖化予測情報第 9 巻 (2017).
- [5] 気象庁, ヒートアイランド監視報告 2016 (2017).
- [6] 日本気象学会, 地球温暖化—そのメカニズムと不確実性, 朝倉書店 (2014).
- [7] Fujibe, F., Evaluation of background and urban warming trends based on centennial temperature data in Japan, *Pap. Meteorol. Geophys.*, **63** (2012), 43.
- [8] Fujibe, F., Relationship between interannual variations of extreme hourly precipitation and air/sea-surface temperature in Japan, *SOLA*, **11** (2015), 5.
- [9] Zhou, B. et al., Changes in temperature and precipitation extreme indices over China: analysis of a high-resolution grid dataset, *Int. J. Climatol.*, **36** (2016), 1051.
- [10] Choi, Y., Trends in daily precipitation events and their extremes in the southern region of Korea, *Korea Soc. Environ. Impact Assess.*, **11** (2002), 189.
- [11] Utsumi, N. et al., Does higher surface temperature intensify extreme precipitation? *Geophys. Res. Lett.*, **38** (2011), doi:10.1029/2011GL048426.
- [12] 気象庁, ヒートアイランド監視報告 (平成 24 年) (2013).
- [13] Inoue, T. and Kimura, F., Urban effects on low-level clouds around the Tokyo metropolitan area on clear summer days, *Geophys. Res. Lett.*, **31** (2004), doi:10.1029/2003GL018908.
- [14] 高橋日出男, 中村康子, 鈴木博人, 東京都区部における強雨頻度分布と建築物高度の空間構造との関係, *地学雑誌*, 120 (2011), 359.
- [15] Fujibe, F. et al., Long-term change and spatial anomaly of warm season afternoon precipitation in Tokyo, *SOLA*, **5** (2009), 17.
- [16] Kusaka, H. et al., Mechanism of precipitation increase with urbanization in Tokyo as revealed by ensemble climate simulations, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, **53** (2014), 824.
- [17] Seino, N. et al., Numerical simulation of urban impact on precipitation in Tokyo: How does urban temperature rise affect precipitation? *Urban Clim.* (2016), doi:10.1016/j.uclim.2016.11.007.
- [18] Imada, Y. et al., Contribution of atmospheric circulation change to the 2012 heavy rainfall in southern Japan, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **94** (2013), S52.

スーパー台風の数值解析 Numerical Analysis on Super Typhoons

竹見 哲也 (京都大学)

Tetsuya TAKEMI (Kyoto University)

e-mail: takemi@storm.dpri.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

台風とは、熱帯地域で発生する低気圧（熱帯低気圧）のうち北西太平洋で発生するもののことであり、最大風速が 17.2 m s^{-1} 以上に達したものを言う。平均すると台風は、年間 25.6 個発生し、11.4 個が日本に接近し、2.7 個が日本に上陸する。台風は、災害に至る影響が最も大きな気象擾乱であり、かつては、昭和の三大台風（室戸台風、枕崎台風、伊勢湾台風）のように 3000 名を超える死者・行方不明者を出すほどであった。しかし、伊勢湾台風が起こった 1959 年以降は、ひとつの台風で何千名も亡くなるという事象は発生していない。とは言え、近年でも一度の台風で何十名の方が亡くなることは起こっている。したがって、防災上、台風の強さや経路の予測は極めて重要である。

一方、台風の発達や移動の物理機構には、いまだに未解明な点が多く、そのため、災害としての影響が大きいかかわらず、台風の予測精度は十分とは言いがたい。特に、台風が急速に発達する過程や台風はどこまで強くなるのかといったことについて分かっていないことが多い。

ここでは、最大規模の強度を持つ台風を対象として、台風の最大発達強度の理論、数値モデルにより再現される台風の強度について概説する。また、気候変動により変化する大気条件の違いによる台風強度への影響について述べる。最後に、台風強度に係わる研究課題についてまとめる。

2. 台風の構造と規模

まず、台風の構造の概要を述べる。台風は、水平規模が数 100 km から 1000 km 程度の大きさを持つ渦状の擾乱である。その回転性の流れ場は、第一近似として、台風中心向きの気圧傾度力と中心から外向きの遠心力およびコリオリ力がバランスした状態にある。この台風中心に対する同心円状の回転性の流れ場のことを一次循環と言う。

ところが地表面では、摩擦力が作用するため、上記のバランスが成り立つ風速よりも弱くなる。このため、風速に比例して決まる遠心力およびコリオリ力が弱くなり、結果として三者の力のバランスが崩れて気圧傾度力の中心向きの作用が勝るため、地表面では流れ場が中心向き成分を持つようになる。地表面付近での中心向き成分の流れ場のため、大気下層では台風中心に向かう流れが収束することになる。中心に収束する流れは、中心付近で上昇流に転じる。中心に向かう下層の流れは水蒸気を豊富に含むため、上昇流に転じると水蒸気が凝結して積乱雲が発達することになる。水蒸気の凝結に伴い潜熱が放出されるため、中心付近で大気は加熱されることになる。このため中心付近には、暖気核と呼ばれる暖気が蓄積された状態が形成される。上昇流が対流圏界面に達すると、今度は流れ場が中心から離れる外向きになる。このように、下層での中心向きの流れ、中心付近での上昇流、上空での外向きの流れという一連の流れ場は、台風を鉛直断面から見たときに形成されるものであり、二次循環と呼ばれる。

このように台風の流れ場は、水平面での回転流である一次循環と鉛直断面で形成される二次循環とが共存した状態にある。そこで鍵となるのが中心付近での水の相変化に伴う加熱である。加熱効果により二次循環は強化されることになり、同時に、二次循環に見合うような一次循環も強化されることになり、一次循環と二次循環とが相互に関連し合いながら台風は発達していくのである。

ここで台風の強さについて触れておく。台風の強さの指標として、地表面での中心気圧や最大風速が用いられる。気象庁では、表 1 のように台風の強さと大きさの階級を決めている。表 1 の大きさの判定において風速 15 m s^{-1} という基準は、強風半径に該当するものである。この階級に基づき、例えば天気予報においてある台風が「大型で猛烈な台風」と称された場合には、その台風は強風半径が 500 km を

超えて 800 km 未満で最大風速が 54 m s^{-1} 以上に達したことを意味する。

一方、米国では、熱帯低気圧（ハリケーン）の強さを Saffir-Simpson スケールにより表 2 の通りに階級分けされている。この米国の基準は、米国ハワイにある米軍合同台風警報センターでも使用されるため、米国機関向けの台風情報として、北西太平洋での台風にも適用されている。「スーパー台風」とは、この米国の風速基準により最大風速が 67 m s^{-1} 以上になった台風のことをいう[1]。

日本と米国の風速値の基準が異なることについて注意すべきことがある。それは、それぞれでの風速値の取り扱いの違いである。日本での風速値は 10 分間の平均風速であるが、一方、米国では 1 分間の平均風速として測られる。一般に、平均風速値は平均化時間が長くなるほど小さくなる[2]。世界気象機関 (WMO) のガイドライン[3]によれば、1 分平均風速に対する 10 分平均風速の比率は、海上では 0.93 とされている。したがって、米国基準での「スーパー台風」は、日本基準では「猛烈な台風」の階級の中でも特に強いものに分類される。

表 1 気象庁による台風の強さと大きさの階級

強さの階級 (最大風速)	
強い	$33 \text{ m s}^{-1} \sim 44 \text{ m s}^{-1}$
非常に強い	$44 \text{ m s}^{-1} \sim 54 \text{ m s}^{-1}$
猛烈な	54 m s^{-1} 以上
大きさの階級 (風速 15 m s^{-1} 以上の半径)	
大型	500 km ~ 800 km
超大型	800 km 以上

表 2 Saffir-Simpson ハリケーンスケール

カテゴリー	最大風速
5	70 m s^{-1} 以上
4	$58 \sim 70 \text{ m s}^{-1}$
3	$50 \sim 58 \text{ m s}^{-1}$
2	$43 \sim 49 \text{ m s}^{-1}$
1	$33 \sim 42 \text{ m s}^{-1}$

また、最大風速と中心気圧との間には、統計的にはある一定の関係があることが知られている。最大風速が大きいほど中心気圧は低くなる[4]。この統計によれば、Saffir-Simpson スケールでカテゴリー5 の最強階級の熱帯低気圧の中心気圧は、920 hPa 程度以下となる。よって、スーパー台風の強さは、おおそカテゴリー5 に対応するため、その中心気圧

は 920 hPa 程度以下に発達していると見積もられる。

3. 台風の最大強度理論

前節で台風の構造と発達の際略を述べた。台風の発達において台風中心付近での積乱雲の発達による加熱効果が大事であるが、とは言え、台風は無限に強くなるわけではない。周囲の大気の下で、台風には発達の上限值が存在するのである。この台風の最大強度を説明する理論はいくつかある。中でも Emanuel [5, 6, 7] の理論は、台風の発達に関するエネルギーのやりとりを熱機関と捉えている点に独自性を持つ。そこで、ここでは Emanuel の理論を紹介する。

台風の鉛直断面の循環（二次循環）を模式的に示すと図 1 のようになる。水平面で見ると台風は回転性の流れ場を持っているが、鉛直断面では大気下層では中心に向かう流れ場が形成されている。いま、台風中心から十分に離れた地表面での地点 a から二次循環に伴うエネルギーのやりとりを考える。

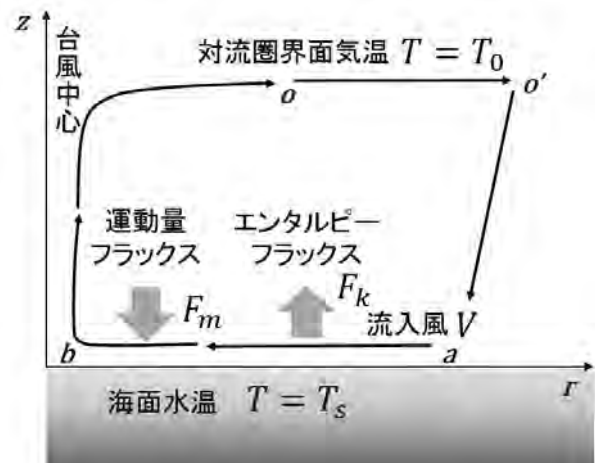


図 1 台風の鉛直断面の概念図。

地表面付近の大気下層では、地点 a から中心付近の地点 b まで中心に向かう流れ場（インフロー）が存在する。Emanuel の理論では、このインフローの領域において海面から大気に熱および水蒸気の輸送によってエネルギーが供給され、台風の発達が決まるものと捉える。海面水温 (T_s) は一定とみなすことができるため、地点 a から b の過程は等温過程とみなせる。

中心付近に達した流れ場は上昇流に転じる。中心付近で水蒸気が凝結し、積乱雲が発達し、台風中心

に対して軸対象の壁雲が形成される。上昇流が対流圏界面に達すると水平方向に広がる流れ場となり、鉛直断面では中心から外向きの流れ場(アウトフロー)となる。積乱雲の発達に伴う上昇運動の過程は、水の相変化を含めて考えると断熱的であるため、地点 b から o への過程は、断熱過程とみなせる。

大気上層でのアウトフローは、地点 o から遠方の o' まで広がる。この領域では、対流圏界面の極めて低い温度 (T_o) で台風は冷却されるものと捉えることができる。対流圏界面温度は一定とみなすことができるため、地点 o から o' への過程は等温過程とみなせる。

最後に、台風中心から十分に離れた地点では、台風循環の全体をひとつの系と見ると質量保存の要請から、下降流となる。ここでは断熱的に下降すると考えてよいので、地点 o' から a の過程は断熱過程とみなせる。

以上をまとめると、

- $a \rightarrow b$: 熱源 T_s に対する等温過程
- $b \rightarrow o$: 断熱過程
- $o \rightarrow o'$: 冷源 T_o に対する等温過程
- $o' \rightarrow a$: 断熱過程

となり、一連の過程はカルノーサイクルと捉えることができる。Emanuel [5]は、台風をカルノーサイクルという熱機関と捉えることにより、台風の発達における海面から大気へのエネルギー供給の重要性に着目し、台風の発達理論を構築した。台風循環をカルノーサイクルとみなすことで、以下に述べる通り、台風の最大発達強度が導かれる。

海面で供給される全エネルギーフラックスは、地表摩擦に起因する運動エネルギーフラックス、および熱・水蒸気の輸送を含めたエンタルピーフラックスとの和となる。まず、運動量およびエンタルピーフラックス F_m, F_k は、バルク法により次式の通り定式化される。

$$F_m = -C_D \rho |V| V$$

$$F_k = C_k \rho |V| (k_s^* - k)$$

ここで、 ρ は空気密度、 V は海面上での風速、 k_s^* および k は海面上での飽和空気のエントルピーおよび海面上の大気下層でのエンタルピー、 C_D と C_k は運動量およびエンタルピーの交換係数である。したがって、運動エネルギーフラックスは、

$$F_{ke} = F_m \times V = -C_D \rho |V|^3$$

一方、台風のように強風時では、粘性による散逸

加熱効果が無視できず、台風のエネルギー収支においては必要不可欠な要素であることが指摘されている (Bister and Emanuel [8])。よって、図 1 の模式図においては、大気境界層全体で評価した散逸過熱

$$D = C_D \rho |V|^3$$

が台風のエネルギー収支で考慮すべき要素となる。

次に、図 1 の鉛直断面で示される二次循環において、半径 r での海面フラックスを台風の外側地点 a から中心付近地点 b まで積分すると、得られるエネルギーは、カルノーサイクルの熱効率 $(T_s - T_o)/T_s$ をかけることで、

$$P = \frac{T_s - T_o}{T_s} \int_a^b \{ [C_k \rho |V| (k_s^* - k) + C_D \rho |V|^3] dr \times 2\pi r \}$$

$$= 2\pi \frac{T_s - T_o}{T_s} \int_a^b [C_k \rho |V| (k_s^* - k) + C_D \rho |V|^3] r dr$$

となる。一方、大気境界層内でのエネルギーの全散逸量は、

$$D = 2\pi \int_a^b C_D \rho |V|^3 r dr$$

となる。海面から得られるエネルギーと大気中で失われる散逸量とがバランスしたときに、台風強度は最も発達した平衡状態になると言える。つまり、上記の式で $P=D$ となるときに、台風が最大強度に達したと言える。この式から、台風の最大強度時の風速が、

$$|V_{max}|^2 = \frac{C_k T_s - T_o}{C_D T_o} (k_s^* - k) \quad (1)$$

として得られる。

この最大風速は、海面水温と対流圏界面温度、海面付近での大気気温と水蒸気量の情報があれば求まることになる。輸送係数の不確実性はあるものの、気象予報モデルによる出力値である格子点値からも台風の最大強度を見積もることができることを意味している。このように、最大風速の式(1)は、台風内部の構造についての詳細な気象量の情報を必要としないため、適用性が非常に高い。

Bister and Emanuel [10]は、式(1)と同等な表現として、海面でのエンタルピーフラックスの代わりに大気の密度成層の不安定度を考慮した次式を提案した。

$$|V_{max}|^2 = \frac{C_k T_s}{C_D T_o} (\text{CAPE}_s^* - \text{CAPE}) \quad (2)$$

ここで、CAPE (Convective Available Potential Energy) とは、地表面付近の空気塊を仮想的に断熱上昇させ

て得られる浮力を鉛直積分した量であり、大気成層が不安定なほど大きな数値をとる。CAPE_s*は海面付近の飽和を仮定した空気塊を断熱的に上昇させたときに得られるCAPEの値である。式(2)の計算には、海面水温や海面付近での気象情報に加え、上空の気温や水蒸気量の3次元の情報も必要となる。このような3次元気象情報は、格子点値として容易に得られるため、式(2)から最大風速を算出することも容易である。むしろ、大気成層の不安定度を考慮するため、式(2)のほうが実用的であると言える。重要なことは、式(1)にしても式(2)にしても、日々の天気予報に使われる気象予報モデルのみならず、気候モデルによる将来気候のシミュレーションデータからも将来気候条件での海面水温と大気状態の情報があれば、将来気候での台風の最大強度も推測することが可能となるのである。

Emanuelによる台風の最大強度理論は、台風の発達を阻害する周囲の条件を除外し、静穏な大気という理想化した条件を仮定している。そのため、多くの場合には、現実の台風が最大強度まで達することはない。一方、台風の力学的なバランスを超えるような非定常な振る舞いにより、台風が最大強度を超えて発達する可能性も指摘されている[9]。このように現実の状況を考慮すると定量的に台風強度が決まるとは言いがたいが、しかし、海面水温と大気の情報さえあれば台風の最大強度の見積りができるという利点から、Emanuel理論は有用である。

Emanuel and Nolan [11]は、台風の発達に影響を及ぼす周囲大気の状態(大気下層での渦度、大気中層での相対湿度、対流圏内の高さ方向の風速差)と最大強度の式とを組み合わせて、台風発生に関する指標(Genesis Potential Index)を提案した。この指標により、より現実的な大気条件での台風発生の可能性を診断することが可能となり、気象・気候予測において幅広く利用されている。

4. 極端台風の再現シミュレーション

スーパー台風のように極端に強い強度を持つ台風の構造や発達機構を調べるには、台風の内部構造を時空間に詳細に野外で観測することが極めて困難であるため、数値気象モデルを用いたシミュレーションが有用な手段となる。気象モデルは、大気の流れを記述する運動方程式、水の相変化や大気放射による加熱効果を記述する熱力学の式に加え、雲・

降水の形成過程を記述する輸送方程式、乱流効果を表現する式、放射伝達を記述する式、大気と地表面との熱や水の輸送を記述する式など、多数の偏微分方程式を数値的に解くものである。気象予報の現業で日々利用されているほか、最近では、様々な機関で調査研究にも利用されている。

本稿では、米国国立大気研究センターで開発されたWeather Research and Forecasting (WRF) モデル[12]によるスーパー台風の再現シミュレーションについて述べる。対象とする台風は、2013年の台風30号(ハイエン)である。

2013年の台風30号は、フィリピンに上陸し、暴風・高潮により甚大な被害をもたらした。気象庁のベストトラックデータによると、その最盛期の発達強度は中心気圧が895 hPa、最大風速は65 m s⁻¹に達し、カテゴリー5に分類される台風であった。また、上陸時の中心気圧が900 hPaを下回っていたと推定されている。被害軽減・防災の観点からは、このような猛烈な台風の経路・強度を的確に予測することは極めて重要である。台風30号発生時の気象場によりEmanuel理論から算出すると、最大発達強度は897.2 hPaであった[13]。つまり、2013年台風30号は理論上発達可能な状況まで実際に発達したと言える。このように極端な強度は気象モデルによって数値的に再現可能かどうか、ということについて数値実験により調べた[14]。

数値気象モデルWRFの初期値・境界値として、米国環境予測センター(NCEP)のFinal Analysisによる大気解析値を用いた。海面水温には、気象庁MGDSSTデータを用いた。シミュレーションの初期時刻は2013年11月5日00 UTCとした。計算領域は、ネスティング機能を用いて、計算領域を段階的に小さくしながら水平解像度を上げ、台風中心付近の活発な積乱雲活動を表現できるようにした。外側領域を領域中心位置が東経130度・北緯10度として4000 km×2000 km・格子幅3 kmとし、ネストした内側領域を2000 km×700 km・格子幅1 kmとした。計算領域の鉛直層数は56である。

数値シミュレーションの結果、最も強くなったときの台風の中心気圧は896.6 hPa、海面付近での最大風速は67.2 m s⁻¹となった。これはベストトラックによる観測値とほぼ同じであり、数値モデルによりスーパー台風のような極端な台風の再現に成功したと言える。図2に、シミュレートされた台風が最も強くなった時点(2013年11月8日00 UTC)での高度2 kmの水平面での降水強度(レーダー反射強度に換算して表示)の分布を示す。気圧が最低になっている台風中心を囲むように同心円状に強雨域が分布していることが分かる。この強雨域は眼

の壁雲に対応するものである。また、同心円状の壁雲の直径は小さく、中心から外向きに気圧が急速に大きくなっている。すなわち、動径方向の気圧勾配が極めて強いことが分かる。この強い気圧勾配により、接線方向の風速も極めて強くなるのである。

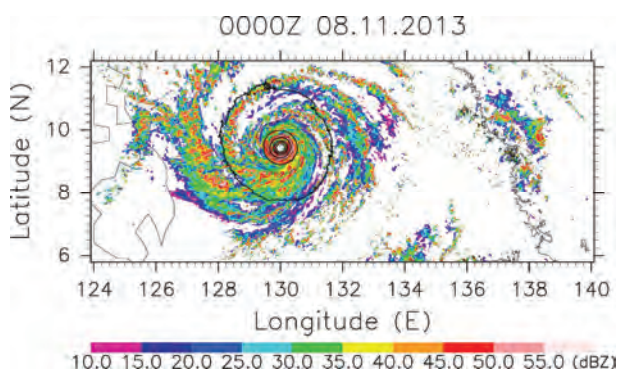


図2 数値モデルでシミュレートされた2013年台風30号(ハイエン)。2013年11月8日00 UTCでの高度2 kmの水平面でのレーダー反射強度(単位dBZ)の分布を示す。実線の等値線は等圧線を示す。

次に、内側に設定した1 km格子のネスト領域をなくして3 km格子の外側領域のみとした場合、シミュレートされる台風の強度は変わるのかどうかについて調べた。この実験では、単純に1 km格子のネスト領域を除去するのみで、他の設定は変えないこととした。この場合には、台風経路はベストトラックによく一致していたものの、最大強度は924.4 hPaとかなり弱くなった。解像度が粗くなったことで台風強度の再現性が悪くなったといえる。このことから、台風強度を定量的に表現するためには、水平解像度を少なくとも1 kmと設定することで、台風中心付近の積乱雲活動と壁雲の形成を陽に表現することが必要であることが示唆される。

一般的に、数値モデルによるシミュレーション結果は、計算格子間隔と同じ空間分解能で物理的に意味のある数値が得られるわけではない。数値モデルには、計算安定性確保のため、様々な時間・空間のフィルターがかけられており、計算格子幅の空間規模ではシミュレートされた物理現象が強く減衰されてしまう。目安として、計算格子幅の6倍程度以下の空間スケールについてはシミュレートされた現象が数値計算手法による影響を受けていると考えたほうがよい[15, 16, 17]。このように数値モデルには、物理的に意味のある実効的な空間分解能は計算格子幅の数倍はあると言える。したがって、単一

の積乱雲の水平スケールが数 km~10 km程度ということを考えて、積乱雲を解像するためには最低でも1 km程度の格子間隔が必要であると言える。

また、台風30号のように台風中心のサイズが小さい場合には、やはり高い分解能が必要であると言える。このことから、ここで述べた数値シミュレーションにおいて900 hPaを下回るような極端な強度が再現できたのは、格子間隔を1 kmとしたためであると言える。ここで述べた数値実験では、積乱雲に伴う運動や加熱を表現することができたため、台風30号の急発達過程や最盛期の強度がよく再現できたのである。

5. 気候変動による影響

昭和の三大台風のひとつである伊勢湾台風は、1959年9月に発生し、最低の中心気圧が895 hPaまでに発達した極端な台風である。伊勢湾台風の接近・上陸により、5000名を超える死者・行方不明者が生じた。これは、日本において過去100年間で生じた風水害の中で最も多くの人的被害である。気候変動に関する政府間パネル(IPCC)による第5次報告書(AR5)によれば、観測された過去のデータから、人為的な影響で地球温暖化は確実に進行しており、このまま将来にわたって温暖化が進むと、台風については、その発生数は変わらないか若干の減少傾向であるが、最強部類の台風の強度は増大することが予測されている。このことから、台風を含む熱帯低気圧の将来変化による災害リスクの増大が懸念されている。

このような背景のもの、気候変動による自然災害、水資源、生態系・生物多様性への影響を評価するため、気候変動リスク情報創生プログラムにおける4つの主要テーマのひとつとして、「課題対応型の精密な影響評価」が2012年度から5年計画で進められた[18]。ここでは、伊勢湾台風を対象として温暖化による台風への影響について述べる。

伊勢湾台風といった特定の事象が仮に温暖化した環境で発生した場合に、その強度がどのように変化するかを調べるうえで、擬似温暖化という手法が有効である。Sato et al. [19]は、気候予測実験における将来気候と現在気候との各気象要素の差を温暖化差分として定義し、ある気象現象の初期条件・境界条件で使う格子点解析値に温暖化差分を上乗せし、擬似的な温暖化気候を表現する手法を考案した。

この手法を用いて温暖化差分を長期再解析値 JRA-55 [20]による 1959 年 9 月の気象場に加算することで、伊勢湾台風の温暖化影響を評価した。

温暖化した将来気候では、海面水温が上昇し、気温は対流圏全層で上昇する。ところが気温の上昇幅は、下層よりも上層のほうが大きいことが知られており [21]、大気は安定化することになり、積乱雲の発達を全般的には抑制する方向に向かう。また、大気の相対湿度は現在気候と将来気候とで有意な変化が認められないことから、気温が上昇することで、対流圏に含まれる全水蒸気量（可降水量）が増加することになる。すなわち、水蒸気量の増加によって、積乱雲は、いったん発達すると、強い降水をもたらすような強度になることが予想される。さらに、対流圏界面付近の変動により、上層の気温は低下する [22]。以上のような海面水温の上昇、対流圏の安定化、対流圏界面付近の気温低下、水蒸気量の増加は、Emanuel 理論による式(2)によれば、台風の発達を促進・抑制双方の効果を及ぼすことになる。このように、温暖化した気候条件では、各要因が複雑に作用して台風の強度が決まることになる。

気象モデル WRF を用いた伊勢湾台風の擬似温暖化実験 [23]により得られた台風の強度変化を表 3 にまとめた。温暖化差分として、全球気候モデルによる現在気候の再現実験と様々な将来の海面水温パターン [24]により実施された将来気候の予測実験との差から求めたものを用いた。表 3 には、複数のパターンで計算した結果の幅を示す。

表 3 伊勢湾台風の再現実験および擬似温暖化実験 (PGW) による最盛期の台風強度。中心気圧と最大風速の単位はそれぞれ hPa と $m s^{-1}$ 。擬似温暖化実験では、海面水温 (SST) と気象場 (ATM) の双方を気候差分とした場合と SST のみを気候差分とした場合の二通りある。

台風強度	中心気圧	最大風速
観測値	895	—
1959 年再現	899.5 – 909.0	55.4 – 61.8
PGW	SST+ATM	879.4 – 898.1
	SST	859.7 – 876.8
		64.6 – 66.5
		71.1 – 73.3

まず再現実験では、気象庁ベストトラックデータによる観測値と比べ、伊勢湾台風が良く再現されていると言える。擬似温暖化状態から、将来気候での伊勢湾台風は、1959 年 9 月条件よりも、最盛期

においてその強度は強まることが分かる。大気の安定化という負の効果よりも、水蒸気量の増加と海面水温の上昇という正の効果が勝ることで、台風は強まる。また、海面水温のみを気候差分として加算した場合には、台風の中心気圧は 860 hPa を下回るという異常な強さとなる。この異常な強さは、大気の安定化という抑制効果がないため、最悪の場合に強化する上限とみなすことができる。

以上述べた結果は、WRF モデルによる数値実験により得られたものである。用いる数値気象モデルが違えば、台風の構造や強度変化の表現性も変わることが予想される。そこで Kanada et al. [25]では、4 種類の気象モデルにより伊勢湾台風の擬似温暖化実験を行い、モデル相互の比較をした。その結果、将来の温暖化気候条件のもとで、伊勢湾台風級の極端台風は強まるというロバストな傾向が得られた。強度変化の定量的な評価にはまだ課題は残るものの、海面水温、大気安定度、圏界面付近の温度構造、大気中の水蒸気量といった Emanuel 理論で考慮された各要素の総合的な効果として、伊勢湾台風級のスーパー台風は温暖化により強まると言える。

気候変動リスク情報創生プログラムでは、伊勢湾台風の他に、1991 年台風 19 号、2004 年台風 18 号、2011 年台風 12 号、2013 年台風 30 号といった甚大な風水害をもたらした極端台風の温暖化影響を調べた。いずれの台風でも、最盛期の強度は温暖化条件で強まるという傾向が明らかとなった。一方、北上してから北日本で被害をもたらす台風については、温暖化気候では、最盛期の強度は強まるものの、北上するにつれて強度が急速に弱まり、北海道・東北地方に至ると強度が弱くなるという興味深い傾向が得られた [26, 27]。地球大気の南北の温度勾配（傾圧性）の変化が影響しているものと考えられ、今後は、様々な特徴を持つ台風の強度変化を緯度別に評価することが必要である。

6. おわりに

本稿では、スーパー台風と呼ばれるような極端に強い台風を対象として、周囲の気象条件の違いが及ぼす影響を定量的に評価する理論や数値気象モデルによる表現性について述べた。さらに、将来気候の温暖化条件のもとで、スーパー台風のような極端台風の強さがどのように変化するかについて最新の成果に基づきまとめた。

スーパー台風といった台風の強さの階級は、海面での台風中心の最低気圧や海面付近での最大風速という指標により決められている。一方、台風により引き起こされる災害の観点からは、台風の強さのみが災害発生に関係しているわけではないことに注意する必要がある。例えば、日本の風水害の中で記録史上最も高額な保険金支払額の事象（日本損害保険協会調べ）であった1991年台風19号の場合には中心気圧は最盛期で925 hPaであった。一方、平成以降の台風の中で犠牲者数が1・2位の2004年台風23号や2011年台風12号の場合には、最盛期の中心気圧がそれぞれ940 hPaおよび970 hPaであり、「猛烈な台風」の階級とはなっていなかった。しかしながら、それぞれの台風により、近畿地方北部や南部で顕著な大雨災害が発生した。2016年でも、東北地方に上陸して北日本各地で豪雨災害が発生した台風10号の場合には、中心気圧は最低で940 hPaであった。このように、災害の観点からは、強さという単一の指標だけではなく他の因子、例えば経路や移動速度の影響も考慮する必要がある。

また、気候変動による変化では、海面水温の上昇という効果がしばしば強調される傾向にあるが、Emanuel理論によれば、大気の安定度や上層の気温の変化も台風強度に影響を及ぼすことが分かる。それぞれ台風の発達を促進したり抑制したりする効果があるため、各要素の影響をひとつひとつ定量的に評価し、総合的な結果として台風強度がどのように変化するかについての理解を深めることが重要である。

謝辞

本稿で述べた研究成果の一部は、文部科学省・統合的気候モデル高度化研究プログラム・テーマD「統合的ハザード予測」および日本学術振興会・科学研究費16H01846の支援を受けました。関係各位に感謝いたします。

参考文献

- [1] Dunnavan, G. M. and Diercks, J. W., An Analysis of Super Typhoon Tip (October 1979), *Mon. Wea. Rev.*, **108** (1980) 1915-1923.
- [2] 光田寧, 堀口光章, 最大瞬間風速と突風率の測定について, *京都大学防災研究所年報*, **36B-1** (1993) 17-25.
- [3] Harper, B. A., Kepert, J. D. and Ginger, J. D., Guidelines for Converting between Various Wind Averaging Periods in Tropical Cyclone Conditions, WMO/TD- No. 1555 (2010).
- [4] Knaff, J. A. and Zehr, R. D., Reexamination of Tropical Cyclone Wind-Pressure Relationships, *Wea. Forecasting*, **22** (2007) 71-88.
- [5] Emanuel, K. A., An Air-Sea Interaction Theory for Tropical Cyclones. Part I: Steady-State Maintenance, *J. Atmos. Sci.*, **43** (1986) 585-605.
- [6] Emanuel, K. A., The Maximum Intensity of Hurricanes. *J. Atmos. Sci.* **45** (1988) 1143-1155.
- [7] Emanuel, K. A., Tropical Cyclones. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **31** (2003) 75-104.
- [8] Bister, M. and Emanuel, K. A., Dissipative Heating and Hurricane Intensity, *Meteor. Atmos. Phys.*, **65** (1998) 233-240.
- [9] Bryan, G. H. and Rotunno, R., The Influence of Near-Surface, High-Entropy Air in Hurricane Eyes on Maximum Hurricane Intensity, *J. Atmos. Sci.*, **66** (2009) 148-158.
- [10] Bister, M. and Emanuel, K. A., Low Frequency Variability of Tropical Cyclone Potential Intensity. 1. Interannual to Interdecadal Variability, *J. Geophys. Res.*, **107**, D24 (2002) 4801.
- [11] Emanuel, K. A. and Nolan, D. S., Tropical Cyclone Activity and Global Climate, 26th Conf. Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami, Florida, 3-7 May 2004 (2004) 240-241.
- [12] Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Duda, M. G., Huang, X. Y., Wang, W. and Powers, J. G., A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Tech. Note, **NCAR/TN-47+ STR** (2008) 113 pp.
- [13] Takayabu, I., Hibino, K., Sasaki, H., Shiogama, H., Mori, N., Shibutani, Y. and Takemi, T., Climate Change Effects on the Worst-Case Storm Surge: A Case Study of Typhoon Haiyan, *Environ. Res. Lett.*, **10** (2015) 064011.
- [14] Mori, N. and Takemi, T., Impact Assessment of Coastal Hazards due to Future Changes of Tropical Cyclones in the North Pacific Ocean, *Wea. Clim. Extremes*, **11** (2016) 53-69.
- [15] Takemi, T. Rotunno, R., The Effects of Subgrid

- Model Mixing and Numerical Filtering in Simulations of Mesoscale Cloud Systems, *Mon. Wea. Rev.*, **131** (2003) 2085-2101.
- [16]Skamarock, W. C., Evaluating Mesoscale NWP Models Using Kinetic Energy Spectra, *Mon. Wea. Rev.*, **132** (2004) 3019-3032.
- [17]Bryan, G. B., Spurious Convective Organization in Simulated Squall Lines Owing to Moist Absolutely Unstable Layers, *Mon. Wea. Rev.*, **133** (2005) 1978-1997.
- [18]Takemi, T., Okada, Y., Ito, R., Ishikawa, H. and Nakakita, E., Assessing The Impacts of Global Warming on Meteorological Hazards and Risks in Japan: Philosophy and Achievements of the SOUSEI Program, *Hydrol. Res. Lett.* **10** (2016) 119-125.
- [19]Sato, T., Kimura, F. and Kitoh, A., Projection of Global Warming onto Regional Precipitation over Mongolia Using a Regional Climate Model, *J. Hydrology*, **333** (2007) 144-154.
- [20]Kobayashi, S., Ota, Y., Harada, Y., Ebata, A., Moriya, M., Onoda, H., Onogi, K., Kamahori, H., Kobayashi, C., Endo, H., Miyaoka, K. and Takahashi, K., The JRA-55 Reanalysis: General Specifications and Basic Characteristics, *J. Meteor. Soc. Japan*, **93** (2015) 5-48.
- [21]Takemi, T., Nomura, S., Oku, Y. and Ishikawa, H., A Regional-Scale Evaluation of Changes in Environmental Stability for Summertime Afternoon Precipitation under Global Warming from Super-High-Resolution GCM Simulations: A Study for the Case in the Kanto Plain, *J. Meteor. Soc. Japan*, **90A** (2012) 189-212.
- [22]Emanuel, K., Solomon, S., Folini, D., Davis, S., and Cagnazzo, C., Influence of Tropical Tropopause Layer Cooling on Atlantic Hurricane Activity, *J. Climate*, **26** (2013) 2288-2301.
- [23]Takemi, T., Ito, R. and Arakawa, O., Robustness and Uncertainty of Projected Changes in the Impacts of Typhoon Vera (1959) under Global Warming. *Hydrol. Res. Lett.*, **10** (2016) 88-94.
- [24]Mizuta, R., Arakawa, O., Ose, T., Kusunoki, S., Endo, H. and Kitoh, A., Classification of CMIP5 Future Climate Responses by the Tropical Sea Surface Temperature Changes, *SOLA*, **10** (2014) 167-171.
- [25]Kanada, S., Takemi, T., Kato, M., Yamasaki, S., Fudeyasu, H., Tsuboki, K., Arakawa, O. and Takayabu, I., A Multi-Model Intercomparison of an Intense Typhoon in Future, Warmer Climates by Four 5-Km-Mesh Models, *J. Climate*, **30** (2017) 6017-6036.
- [26]Ito, R., Takemi, T. and Arakawa, O., A Possible Reduction in the Severity of Typhoon Wind in the Northern Part of Japan under Global Warming: A Case Study, *SOLA*, **12** (2016) 100-105.
- [27]Takemi, T., Ito, R. and Arakawa, O., Effects of Global Warming on the Impacts of Typhoon Mireille (1991) in the Kyushu and Tohoku Regions. *Hydrol. Res. Lett.*, **10** (2016) 81-87.

日本伝熱学会特定推進研究推進課題報告書

*Report of Specific Promotion Researches
in Heat Transfer Society of Japan*

特定推進研究企画委員会

花村 克悟 (委員長・東京工業大学)

円山 重直 (八戸工業高等専門学校)

Specific Promotion Research Planning Committee

Katsunori HANAMURA (Chairperson, Tokyo Inst. Tech.)

*Shigenao MARUYAMA (National Institute of Technology,
Hachinohe College)*

1. はじめに

特定推進研究企画委員会は 2012 年に日本伝熱学会に設置され、我が国の抱える科学技術的課題への対応や今後の発展に寄与すると考えられる研究開発課題を選定し、課題ごとに研究グループを設置して検討を進めていただいています。現在までに特定推進研究課題として 8 件の課題が選定されています。このたび「伝熱工学が作る医療機器の新展開」(主査: 谷下一夫, 早稲田大学)の課題につきまして最終報告が提出されました。報告書作成に向けて 4 年あまりにわたってご尽力いただきました委員各位に心より敬意を表します。以下にこの課題のエグゼクティブサマリーを記載し、会員の皆様に検討結果の概要をご紹介します。

なお、過去に終了した課題

(<http://www.htsj.or.jp/announcement/1010.html>)

も含め、報告書の詳細につきましては、それぞれの主査までお問い合わせください。

2. 「伝熱工学が作る医療機器の新展開」

HTSJ-FY2016-03

主 査: 谷下一夫 (早稲田大)

tanishita@aoni.waseda.jp

副主査: 円山重直 (八戸高専)

maruyama-o@hachinohe-ct.ac.jp

我が国が長期的問題として抱える高齢化人口ピラミッド問題は解決していかなければならない課題の一つである。我が国が目指す 2050 年の社会は、現在の壮年期人口が老年に入るときであり、「全世代の国民が健康に生活できる『健康寿命』の長い社会」が求められている。この問題解決のバックキャストिंगとして、医学、熱工学、流体工学という“個の知”から、それらを融合させ、人

体をシステムとして捉える“システムとしての知”の創出により、成人病への早期対応、つまりは未病の診断、病気の早期発見・治療法の確立と、そのための医療機器開発が必要である。

一方、我が国の医療機器需要は平成 23 年現在で 2.4 兆円であり、米国・欧州に次いで 3 番目だが、多くを輸入に頼っているのが現状である。我が国は、ものづくり大国としての優れた技術力と年間約 40 兆円に及ぶ医療の先進国としての実績がありながら、医療機器の開発・実用化の面では欧米に大きく遅れを取っている。これを受けて、政府が「健康・医療戦略」(平成 25 年 6 月および平成 26 年 7 月閣議決定)を策定し、医療機器産業振興を進めているところである。

その中において、低侵襲診断治療の実用化や再生医療の実現化を目指す医療イノベーションが加速的に進んでおり、医学と工学の融合が益々強まり、先端の工学の医療現場への導入が益々盛んになってきている。大学でも医工学研究科の設置など、医学と工学を結ぶ学問領域の研究が盛んに行われている。日本伝熱学会でも伝熱と生体に関する研究者は多く、先端的な医工学研究も行われている。さらに、ハイパーサーミア(温熱治療)、集束超音波や冷凍治療、手術中の体温管理など、実際の医療で伝熱が基幹テクノロジーとなっている。

本研究課題は、このような問題を解決するために、今後伝熱研究者が目指すべき医工学研究の方向性を明確にし、さらに伝熱研究者と医療関係者・医療機器メーカーとの橋渡しを可能にする場を創生して、医療ニーズと先端的な伝熱工学のシーズとのマッチングを実現させ、伝熱工学を軸足とする革新的医療機器開発の基盤を構築する事を目的とする。この基盤を基に将来の伝熱医療機器

産業を創成させて、我が国独自のものづくり技術を医療分野に活用させる。現在の我が国の医療産業の空洞化を一刻も早く解決するためには、本課題の役割が大きいと思われる。

本研究では、上記の背景と現状に鑑み、医学と伝熱工学、流体工学の研究分野を融合して、人体を熱流動システムとして捉えた「熱流体医科学」を展開し、体表面の精密測定により体内の循環系や各部位の疾病との関係を明らかにする学理の展開を提案した。従来、血液検査や組織検査など、生体要素の分析により疾病の診断を行ってきた。本提案では、これまでの病理検査とは全く異なり、生体の全体的な熱や血流などの動態を解明する。さらに、生体内システムの熱物質移動現象の逆問題解析により、未病状態での疾患の診断を実現することで、従来の分析科学から生体の統合科学への飛躍展開を目指すものである。

生体システムは、呼吸循環系と代謝系を中心に深部温度を一定に保ちつつ物質の移動を制御することによって、エネルギー代謝を行っている。これらの移動現象は、主に血流・リンパ流・体表面の伝熱現象・人体各部の代謝による熱生成など、体内の熱物質移動と脳・神経を中心とした情報の伝達が複雑に関連した現象である。また、人体の温度分布や血流などの移動は完全に一様ではなく、図1に示すように局所的な温度や血流動態の変化が病変の進行や抑制に深く関係する。

熱流体医科学の展開により、日本独自の視点からの革新的な診断・治療システムを構築することができて、従来の医学とも工学とも異なる新たな学術領域である熱流体医科学を発展拡充しながら、革新的治療・診断機器の産業分野における、日本の国際競争力の向上に資することが期待される。

このように、伝熱工学の知見をふまえて人体を総合熱流体システムとして深く理解し、新たな医療機器開発を目指すことは、学術および産業的にも発展の期待できる領域を創生することに繋がる。新たな医療工学の1分野として他分野の研究者と協同しながら日本伝熱学会が主導的に推進すべきテーマである。

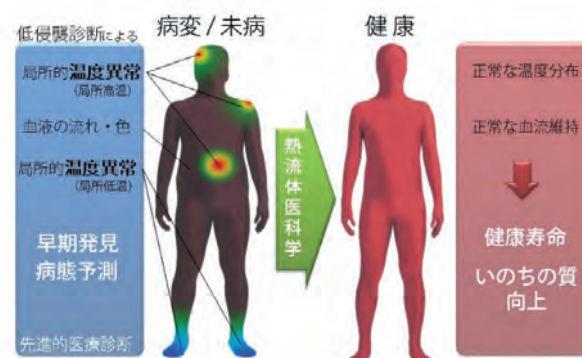


図1 「いのちの質向上」に向けた熱流体医科学の概念図

行事カレンダー

本会主催行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2018年					
3月	12(月)～15(木) The 10th International Conference on Boiling and Condensation Heat Transfer (ICBCHT10) (開催場所:長崎ブリックホール)	2017.8.31	2017.11.30	Secretary General: Prof. Ichiro Ueno (上野 一郎) Dept. Mechanical Engineering, Fac. Science & Technology, Tokyo University of Science 2641 Yamazaki, Noda, Chiba 278-8510, Japan E-mail: ich@rs.tus.ac.jp TEL: +81-4-7124-1501 ext.3912 (office) / 3952 (student office) FAX: +81-4-7123-9814	
5月	29(火)～31(木) 第55回日本伝熱シンポジウム (開催場所:札幌コンベンションセンターSORA)			実行委員会委員長 大島 伸行 北海道大学大学院工学研究院 機械宇宙工学部門	

本会共催, 協賛, 後援行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先	掲載号
2017年					
7月	10(日)～2019年12月末日 EU Green Gateway to Japan (開催場所:東京)			日本能率協会 産業振興センター Tel: (03)3434-0998, Fax:(03)3434-8076 E-mail: noriyasu_kamioki@jma.or.jp	
9月 10月	29(金)～1(日) The Institute of Materials and Systems for Sustainability 2017, IMaSS (持続型社会のための材料とシステムに関する国際会議 2017) (開催場所:名古屋大学)	2017.4.15	2017.6.15	ICMaSS2017 Office c/o Inter Group Corp. TEL: +81-52-581-3241 Fax: +81-52-581-5585 E-mail: icmass2017@intergroup.co.jp	
10月	9(月)～12(木) The 6th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flow (ICJWSF-2017) (開催場所: 米国シンシナチ大学)	2017.3.24	2017.6.30	ICJWSF-2017 組織委員会 副議長 内山 知実 (名古屋大学 未来材料・システム研究所) E-mail: uchiyama@is.nagoya-u.ac.jp	
10月	16(月)～17(火) 日本機械学会関西支部第351講習会「応力計測の基礎とその応用(デモンストレーション付き)」 (開催場所:大阪科学技術センター)	2017.10.10		一般社団法人日本機械学会関西支部事務局 〒550-0004 大阪市西区鞆本町 1-8-4 大阪科学技術センタービル内 Tel: 06-6443-2073 Fax: 06-6443-6049 E-mail: info@kansai.jsme.or.jp	
10月	17(火) No.17-102 講習会(見学会付)「プラントオペレーションのスマート化最前線」(開催場所:東京電力フェエル&パワー株式会社 常陸那珂火力発電所、日本原子力発電株式会社 東海テラパーク)	2017.10.4		日本機械学会 [担当職員 櫻井恭子] Tel: 03-5360-3505 E-mail: sakurai@jsme.or.jp	
10月	17(火)～21(土) 日本地熱学会平成29年学術講演会 (開催場所:函館アリーナ他)	2017.8.28	2017.8.28 (講演要旨)	行事委員会事務局 E-mail: gyouji2017-grsj-ml@aist.or.jp 〒305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第7 国立研究開発法人産業技術総合研究所 地質調査総合研究センター研究戦略部 坂口圭一 Tel: 029-861-3897 Fax: 029-861-3747 〒963-0298 福島県郡山市待池台 2-2-9 国立研究開発法人産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所 シュレスタ・ガウラブ、山谷祐介 Tel: 029-861-2328 Fax: 024-963-0828	
10月	18(水)～19(木) 第45回日本ガスタービン学会定期講演会 (開催場所:松山市総合コミュニティセンター)	2017.6.23	2017.9.1	公益社団法人 日本ガスタービン学会事務局 Tel: 03-3365-0095 Fax: 03-3365-0387 E-mail: gtsj-office@gtsj.org	
10月 11月	31(火)～2(木) 第8回マイクロ・ナノ工学シンポジウム (開催場所:広島国際会議場)	2017.7.14	2017.9.8	第8回マイクロ・ナノ工学シンポジウム 実行委員会 実行委員長: 三木 則尚 (慶應義塾大学) E-mail: miki@mech.keio.ac.jp プログラム委員長: 宮崎 康次 (九州工業大学) E-mail: miyazaki@mech.kyutech.ac.jp 実行委員会事務局: 日本機械学会 担当職員 熊谷理香 E-mail: kumagai@jsme.or.jp	
11月	1(水)～2(木) 日本機械学会関西支部第352講習会「実務者のための流体解析技術の基礎と応用(各種シミュレーション技術の適用事例紹介及びデモ展示付き)」 (開催場所:大阪科学技術センター)	2017.10.18		一般社団法人日本機械学会関西支部事務局 〒550-0004 大阪市西区鞆本町 1-8-4 大阪科学技術センタービル内 Tel: 06-6443-2073 Fax: 06-6443-6049 E-mail: info@kansai.jsme.or.jp	

行事カレンダー

11月	1(水) ～ 4(土)	The 12th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (12th ISEM'17-Kanazawa, Japan) (開催場所: 金沢歌劇座)	2017.5.12	2017.7.14	〒951-8518 新潟市中央区旭町通 2-746/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:025-368-9309 E-mail: office-jsem@clg.nigata-u.ac.jp	
11月	3(金・祝) ～ 4(土)	可視化情報全国講演会(室蘭 2017) (開催場所: 室蘭工業大学)	2017.7.7	2017.8.25	実行委員長 〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1 室蘭工業大学 機械航空創造系学科 TEL:0143-46-5304 E-mail: hdkawai0@mmm.muroran-it.ac.jp 河合 秀樹 幹事 〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1 室蘭工業大学 機械航空創造系学科 TEL:0143-46-5374 E-mail: oishi@mmm.muroran-it.ac.jp 大石 義彦	
11月	7(火) ～ 9(木)	第38回日本熱物性シンポジウム (開催場所: 産業技術総合研究所つくばセンター 共用講堂)	2017.6.30	2017.8.18	実行委員会 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 物質計測標準研究部門 熱物性標準研究グループ 山田 修史 〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1 つくば中央第3 E-mail: info_38thJSTP_ml@aist.go.jp Tel: 029-861-4166 Fax: 029-861-4039	
11月	13(月) ～ 15(水)	第55回回燃焼シンポジウム (開催場所: 富山国際会議場)	2017.7.14	2017.9.8	第55回回燃焼シンポジウム事務局 〒930-8555 富山県富山市五福 3190 富山大学 工学部機械知能システム工学科 熱工学研究室内 実行委員長 手崎 衆 E-mail: sympo55@combustionsociety.jp	
11月	14(火) ～ 17(金)	第17回マイクロ・ナノテクノロジーのエネルギー応用国際会議(Power MEMS2017) (開催場所: 金沢文化ホール)	2017.7.7	2017.9.30	〒160-0016 東京都新宿区信濃町 35 番地信濃町煉瓦館 5 階 一般社団法人日本機械学会総合企画グループ 小阪雅裕	
11月	25(土)	第20回スターリングサイクルシンポジウム (開催場所: 明星大学日野校(東京都日野市))	2017.7.7	2017.10.13	実行委員長 齊藤 剛 明星大学 TEL: 042-591-9614 FAX: 042-591-9594 E-mail: tsaito@me.meisei-u.ac.jp	
11月	30(木)	日本機械学会関西支部ステップアップセミナー2017「高付加価値商品開発とものづくり」 (開催場所: 大阪科学技術センター)	2017.11.1		一般社団法人日本機械学会関西支部事務局 〒550-0004 大阪市西区靱本町 1-8-4 大阪科学技術センタービル内 Tel: 06-6443-2073 Fax: 06-6443-6049 E-mail: info@kansai.jsme.or.jp	
12月	1(金)	コロイド先端技術講座 II 第6回 E-Colloid 「次世代エレクトロニクスを拓くコロイド界面」(開催場所: 化学会館)			(公社)日本化学会コロイドおよび界面化学部会 Tel: 03-3292-6163 Fax: 03-3292-6318 E-mail: desc@chemistry.or.jp	
12月	1(金) ～ 3(日)	The 11th Pacific Symposium on Flow Visualization and Image Processing (PSFVIP-11) (開催場所: 熊本大学)	2017.4.30.	2017.8.15.	E-mail: info@psfvip11.jp	
12月	7(木) ～ 8(金)	第7回潜熱工学シンポジウム (開催場所: 岡山大学自然科学研究科)	2017.9.16	2017.10.21	〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1 岡山大学大学院自然科学研究科 実行委員長 堀部 明彦 連絡先: 幹事 山田 寛 TEL: 086-251-8046 E-mail: y.yamada@okayama-u.ac.jp	
12月	9(土)	2017年度計算力学技術者(CAE技術者)認定事業 (固体力学分野の有限要素法解析技術者・熱流体力学分野の解析技術者・振動分野の有限要素法解析技術者) (開催場所: 詳細は、 http://www.jsme.or.jp/cee/cmnte.html)	2017.8.1 ～ 2017.8.17		〒160-0016 東京都新宿区信濃町 35 番地信濃町煉瓦館 5 階 一般社団法人日本機械学会事業企画 G 石澤	
12月	9(土) ～ 10(日)	第41回人間-生活環境系シンポジウム (開催場所: 信州大学 繊維学部)	2017.8.25	2017.10.11	山岸明浩 〒380-8544 長野県西長野 6 の口 信州大学教育学部 TEL: 026-238-4187 E-mail: yamaaki@shinshu-u.ac.jp	

行事カレンダー

12月	12(火)	第1回燃料・燃焼・エネルギーシンポジウム 「未来のエンジンを知る～燃焼技術の最先端」 (第4回広島大学エネルギー超高度利用研究拠点シンポジウム) (開催場所: 全国家電会館 5F 講堂 (東京都文京区湯島))			松村 幸彦 〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1 広島大学 学術院 (理工学分野, 機械・総合工学ユニット) バイオマスプロジェクト研究センター長 エネルギー超高度利用研究拠点(HU-ACE)副代表 hu-ace-info@ml.hiroshima-u.ac.jp 参加申し込み http://i-aeu.sakura.ne.jp/hu-ace171212/	
12月	12(火) ～ 14(木)	第31回数値熱流体力学シンポジウム (開催場所: 京都工芸繊維大学 松ヶ崎キャンパス)	2017.7.21	2017.10.20	〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎橋上町 京都工芸繊維大学 機械工学系内 CFD 実行委員会事務局 FAX: 075-724-7300 URL: http://www.nagare.or.jp/cfd/cfd31/	
12月	19(火) ～ 20(水)	第26回微粒化シンポジウム (開催場所: 産業技術総合研究所 臨海副都心センター 別館)	2017.9.1	2017.10.23	〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 工学部 7号館 東京大学大学院工学系研究科航空宇宙工学専攻 「第26回微粒化シンポジウム」参加担当幹事 井上 智博 TEL: 03-5841-0351 E-mail: inoue@rocketlab.t.u-tokyo.ac.jp	
2018年						
1月	25(木) ～ 26(金)	第46回ガスタービンセミナー (開催場所: 首都大学東京 南大沢キャンパス)			公益社団法人 日本ガスタービン学会 http://gtsj.org/	

第 55 回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集

第 55 回日本伝熱シンポジウム実行委員会
委員長 大島伸行
幹事 戸谷 剛

開催日：平成 30 年 5 月 29 日（火）～5 月 31 日（木）

会場：札幌コンベンションセンター (<http://www.sora-scc.jp/index.html>)

所在地 〒003-0006 札幌市白石区東札幌 6 条 1 丁目 1-1 電話 011-817-1010（代表）

アクセス 新千歳空港から新札幌駅まで JR で約 28 分，新札幌駅から東札幌駅まで札幌市営地下鉄東西線で約 13 分，東札幌駅から徒歩約 8 分。

札幌駅より大通駅まで札幌市営地下鉄南北線で約 2 分，大通駅から新札幌駅まで札幌市営地下鉄東西線で約 6 分，東札幌駅から徒歩約 8 分。

講演申込締切：平成 30 年 1 月 19 日（金）

講演論文原稿提出締切：平成 30 年 3 月 16 日（金）

事前参加申込締切：平成 30 年 4 月 13 日（金）

ホームページ URL：<http://htsj-conf.org/symp2018/index.html>

【シンポジウムの形式】

- 講演発表形式として
 - a) 通常の一般セッション（口頭発表）
 - b) オーガナイズドセッション（口頭発表）
 - c) 学生および若手研究者を対象とする優秀プレゼンテーション賞セッションを実施します。
- 1 講演あたりの割当時間は，一般セッションでは 15 分（発表 10 分，個別討論 5 分）で，各セッションの最後に総合討論の時間（5 分×セッション内の講演件数）を設ける予定です。オーガナイズドセッションについては，オーガナイザーの指示に従って下さい。
- 優秀プレゼンテーション賞セッションについては，本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞（第 55 回日本伝熱シンポジウム）について」をご参照下さい。

【研究発表申込方法】

- 一般セッションと優秀プレゼンテーション賞セッションの講演者（登壇者）は，日本伝熱学会会員（学生会員，賛助会員，特別賛助会員を含む）に限ります。講演者が日本伝熱学会会員でない場合は，会員申込と会費納付を行って下さい。（オーガナイズドセッションについては，各セッション募集に従って下さい。）
- 原則としてウェブによる申込みに限らせて頂きます。本シンポジウムで準備するウェブサイトから必要なデータを入力して下さい。ウェブによる申込みができない場合には，実行委員会事務局にお問い合わせ下さい。
- 申込みの際に，一般セッション，オーガナイズドセッション，優秀プレゼンテーション賞セッションのいずれで発表するかを選択して下さい。優秀プレゼンテーション賞セッションにお申込みの場合には，本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞（第 55 回日本伝熱シンポジウム）について」をご参照下さい。
- 発表申込み時に，論文要旨（日本語で 200～250 字）を入力して下さい。講演論文集の抄録として科学技術振興機構（JST）のデータベースに登録します。
- 講演発表申込みは，講演者 1 名につき 1 題目とさせていただきます。
- 講演の採否およびセッションへの振分けは，実行委員会にご一任下さい。

【講演論文集電子版】

- 講演論文集として電子版のみを発行し，冊子版は発行しません。講演論文はウェブ上で一定期間公開し

ます。日本伝熱学会会員は講演論文電子版を事前にウェブから読むことができます。

- 講演論文集電子版を参加者に配布します。なお、講演論文集電子版は参加できなかった日本伝熱学会会員にも希望があれば配布しますので、シンポジウム終了後に日本伝熱学会事務局にお申込み下さい。
- 講演論文の長さは1題目あたりA4サイズで4～6ページです。講演論文の作成様式は、1段組み50字×46行です。
- 講演論文原稿の執筆要綱は会誌1月号の「お知らせ」と本シンポジウムのホームページに掲載します。
- 講演論文原稿は、原則としてPDFファイルで提出して頂きます。
- 原稿提出締切日までに提出されなかった講演論文は、講演論文集電子版およびウェブに掲載されません。十分にご注意下さい。

【講演論文の公開日】

- 講演論文は、会員を対象にパスワードを配布し、シンポジウム開催日の1週間程前からウェブ上で公開します。従って、特許に関わる公知日はシンポジウム開催日よりも早くなりますので、ご注意ください。
- 会員が当該講演論文を後日原著論文として学術論文誌等に投稿される場合に配慮し、本講演論文集が限られた範囲に配布されたものであることを明確にすべく、シンポジウム終了後、一定期間を経て講演論文の公開を終了します。

【参加費等】

- シンポジウム参加費
会員一般（事前申込：12,000円、会場申込：15,000円）
非会員一般（事前申込：15,000円、会場申込：18,000円）
会員学生（事前申込：6,000円、会場申込：7,000円）
非会員学生（事前申込：7,000円、会場申込：8,000円）
※特別賛助会員は1口につき3名、賛助会員は1口につき1名、参加費が無料になります。
※会員とは、日本伝熱学会会員のほか、共催・協賛学協会の会員を含みます。
※講演論文集電子版は参加者全員に配布されます。
- 講演論文集電子版
講演論文集電子版のみの販売：5000円（シンポジウム後の販売になります。）

【懇親会】

- 開催日：平成30年5月30日（水）
- 会場：札幌コンベンションセンター
- 参加費：一般（事前申込：8,000円、会場申込：10,000円 同伴配偶者無料）
学生（事前申込：4,000円、会場申込：5,000円）

【交通と宿泊】 交通と宿泊につきましては、本シンポジウムのホームページをご参照下さい。

【ご注意】

- 講演申込みの取消および講演論文原稿の差替えは、シンポジウムの準備と運営に支障をきたしますのでご遠慮下さい。
- 論文題目と著者名が、講演申込み時と論文提出時で相違しないように特にご注意下さい。
- 口頭発表用として実行委員会事務局が準備する機器は、原則としてプロジェクタのみとさせていただきます。パーソナルコンピュータは各自ご持参下さい。
- 参加費、懇親会費等は参加取消の場合でも返金いたしません。
- 本シンポジウムに関する最新情報については、随時更新するホームページでご確認下さい。
- その他、ご不明な点がありましたら、実行委員会事務局までe-mailまたはFAXでお問い合わせ下さい。

【お問い合わせ先】

第55回日本伝熱シンポジウム実行委員会事務局
北海道大学 大学院工学研究院 機械宇宙工学部門内
E-mail : symp2018@htsj-conf.org FAX : 011-706-7192

優秀プレゼンテーション賞（第55回日本伝熱シンポジウム）について

日本伝熱学会 学生会委員会
委員長 田部 豊

第55回日本伝熱シンポジウムでは、下記の要領で、学生および若手研究者を対象とした優秀プレゼンテーション賞セッションを設けます。日頃の研鑽の成果を披露するチャンスとして、奮ってご応募下さい。

- 開 催 日：平成30年5月29日（火） シンポジウム第1日
- 発 表 形 式：発表者1名あたり、発表内容をまとめた1枚のアピールスライド提出とポスタープレゼンテーションを行う形式をとる予定です。アピールスライドは冊子体として配布されると共にスライドショーとして会場にて案内される予定です。詳細については、決定し次第、シンポジウムのホームページに掲載いたします。
- 対 象：企業・大学・研究機関等の技術者・研究者で、平成30年3月31日現在で28歳以下の方、または、申込当日に学生である方（ただし、社会人大学院生を除く）。
- 応 募 資 格：発表者は日本伝熱学会の会員（正員・学生員）に限ります。発表者が日本伝熱学会会員でない場合は、講演論文原稿提出までに、会員申し込みを行ってください。**なお、本セッションで発表する方は、応募資格を必ず満たす必要があります。また、過去に本賞を受賞された方は応募することはできません。**
- 応 募 件 数：指導教員または研究グループ長等あたり、1名（1件）とします。
- 応 募 方 法：第55回日本伝熱シンポジウム発表申込時に、本誌掲載の研究発表申込方法に従って、“優秀プレゼンテーション賞”を選択し、“指導教員または研究グループ長等の氏名”を入力してください。なお、講演論文原稿の様式については一般セッションと同様のものとします。
- 審査・選考方法：複数名の審査員による評価に基づいて選考し、受賞者を決定します。
- 表 彰：受賞者はシンポジウム第2日の学会総会で表彰されます。

日本伝熱学会主催講習会「省エネのための機器の熱設計」

開催日 2017年11月17日(金) 10.00～17.10(その後、技術交流会～19.30)

会場 東京八重洲ホール B2ホール

地図 (http://yaesuhall.co.jp/halldetail/hall_n/, <http://yaesuhall.co.jp/accessmap/>)

要旨 人間を取り巻く環境の中で、機器の『省エネ』は持続的な社会を実現する上で必要不可欠です。そのため、各家庭で使用されるヒートポンプ、家電といった機器、データセンタを構成する情報機器等の熱設計の重要性が増しています。本講習会では、『省エネのための機器の熱設計』をキーワードに、上記の機器を対象とした熱設計、熱交換器とヒートポンプ、沸騰冷却装置、及び接触熱抵抗の基礎を学びます。これを機に『省エネのための機器の熱設計』を基礎から学んでみませんか？

題目・講師

10.00 ～ 10.10 / 開催の挨拶 日本伝熱学会/産学交流委員長 近藤 義広 (日立製作所)

10.10 ～ 11.20 / ①機器の熱設計 松島 均 教授 (日本大学)

11.30 ～ 12.40 / ②熱交換器とヒートポンプ基礎 飛原 英治 教授 (東京大学)

12.40 ～ 13.40 / 昼食休憩 (お弁当をご用意しています)

13.40 ～ 14.00 / ①及び②の Q&A セッション

14.10 ～ 15.20 / ③沸騰冷却と熱輸送デバイス基礎 永井 二郎 教授 (福井大学)

15.30 ～ 16.40 / ④接触熱抵抗の基礎と熱抵抗低減 富村 寿夫 教授 (熊本大学)

16.50 ～ 17.10 / ③及び④の Q&A セッション

17.40 ～ 19.30 / 技術交流会

定員 先着 40名

参加費 (資料集1冊込み)

学会員 25,000円, 非会員 35,000円, 特別賛助会員 (※1) 企業の方 20,000円, 学生 15,000円

※1 特別賛助会員は通常の賛助会員と異なりますので、ご注意ください。会員の種別は伝熱学会ホームページの「事務局からのお知らせページ」(<http://www.htsj.or.jp/about/140.html>)を参照ください。また、特別賛助会員、賛助会員の一覧は賛助会員ページ (<http://www.htsj.or.jp/about/1365.html>)を参照ください。

資料集 本セミナーに申し込まれた方1名につき1冊準備します。資料集のみの販売はいたしません。

申込方法 伝熱学会ホームページ上の申込フォームからお申し込みください。

また、参加費はクレジットカード決済(口座振込の場合は下記問合せ先へ要相談)となります。

申し込み期限 2017年10月31日

問合せ先 (公社)日本伝熱学会(担当 大澤) / 電話 (03) 3259-7919 / FAX (03) 5577-7939
/ E-mail : office@htsj.or.jp



編集出版部会からのお知らせ —各種行事・広告などの掲載について—



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

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

対象	対応	具体的な手続き (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：大竹浩靖（工学院大学）：ohtake@cc.kogakuin.ac.jp
- ・編集出版部会長：田川正人（名古屋工業大学）：tagawa.masato@nitech.ac.jp
- ・広報委員会委員長：元祐昌廣（東京理科大学）：mot@rs.tus.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐協議員：志村祐康（東京工業大学）：general-affairs@htsj.or.jp
- ・事務局：大澤毅士・村松佳子：office@htsj.or.jp

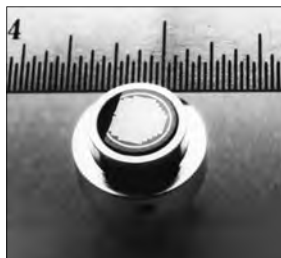
【注意】

- ・原稿は Word ファイルまたは Text ファイルでお願いします。
- ・HP はメンテナンスの都合上、掲載は申込月の翌月、また削除も希望掲載期限の翌月程度の時間遅れがあることをご了承願います。
- ・ML では、原則としてテキスト文の送信となります。pdf 等の添付ファイルで送信を希望される場合はご相談ください。

熱流束センサー

熱流束センサーは、熱エネルギーの移動密度 (W/cm^2) に比例した直流電圧を出力します。
弊社の製品は、大変手軽に高速・高精度で熱流量の測定をすることができます。
特に応答速度の早いこと、センサーからの出力レベルが高いことが特徴で、
熱流束マイクロセンサー (HFM) では、応答速度最高6マイクロ秒を達成しています。

熱流束 マイクロセンサー



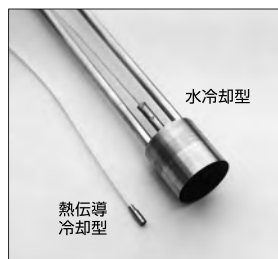
特徴

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

使用例

- エンジン内壁の熱伝達状態観察
- ロケットエンジンのトラバース実験
- タービンレード熱風洞試験
- 自動車用エアバッグ安全性試験
- ジェットエンジンバックファイヤー試験

サーモゲージ



センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタントで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

使用例

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

gSKIN® 熱流束センサー



「gSKIN®」熱流束センサーはセンサー自身の表面を通過する熱流束を29対の超高感度な熱電対を用いて測定します。センサーは、 $72m^2$ の広さを持ち、厚さは $0.4mm$ です。レベル-0パッケージの最適化ポリマーと1-レベルパッケージの金属の構造になっています。

使用例

- 電気・電子機器内の発熱・放熱状態測定
- 熱交換器の効率測定
- パイプの放熱状況測定
- 暖房および換気自動システムの測定
- 熱移動/熱放出の即時応答測定

熱流束センサー 校正サービス

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



センサテクノ株式会社

URL

www.senstech.jp

〒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

E-mail

info@senstech.jp



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

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

CAPTEC 社(フランス)

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

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

熱流束センサー



サイズ: 5×5mm～300×300mm
 厚み: 0.4mm (平面用・曲面用)
 温度範囲: -200～200°C
 応答速度: 約 200ms
 オプション: 温度計測用熱電対内蔵
 形状: 正方形・長方形・円形
 特注品: 高温用・高圧用・防水加工

輻射センサー



サイズ: 5×5mm～50×50mm
 厚み: 0.25mm
 温度範囲: -200～250°C
 応答速度: 約 50ms
 オプション: 温度計測用熱電対内蔵
 形状: 正方形・長方形・円形
 波長領域: 赤外/可視+赤外

MEDTHERM 社(アメリカ)

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

熱流計/輻射計



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

応答速度: 50ms以下*
 再現性: ±0.5%
 較正精度: ±2%
 オプション: 輻射窓・視野角指定等

*応答速度は、熱流束レンジによって異なります。

超高速応答同軸熱電対

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



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

【最小プローブ径】
 0.015インチ(約0.39mm)

【熱電対タイプ】
 T型(銅/コンスタンタン) -270°C～+400°C
 J型(鉄/コンスタンタン) -210°C～+1200°C
 E型(クロメル/コンスタンタン) -270°C～+1000°C
 K型(クロメル/アルメル) -270°C～+1372°C
 S型(白金10%ロジウム/白金) +200°C～+1700°C

ITI 社(アメリカ)

ITI(International Thermal Instrument Company)社は、1969年の設立以来、高温用熱流板や火災強度熱流計など、特殊な用途に対応した製品を提供しています。特注品の設計・製造も承っております。

高温用熱流板



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

水冷式 火災強度熱流計



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

当社取扱製品の適用分野

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

有限会社 テクノオフィス

〒225-0011 神奈川県横浜市青葉区あざみ野 3-20-8-B
 TEL. 045-901-9861 FAX. 045-901-9522
 URL: <http://www.techno-office.com>

編集出版部会ノート

Note from the JHTSJ Editorial Board

今月号の特集は「湿度・水分計測の最前線と自然界における水分輸送現象」をテーマに、極限領域における湿度・水分計測の標準化に関する最新の研究動向と、自然界における水分輸送現象として降雨・台風について、それらの実態と気候変化に伴う将来予測に関する最新の研究動向を取り上げました。

本号では、以上の各項目について、関連領域の第一線で活躍されている研究者の方々から計4件のご寄稿を頂きました。まず、湿度・水分計測に関して、ごく微量の水分（霜点温度-100℃、大気圧下でのモル分率14ppb）が問題となる、半導体製造など工業分野での水分計測で不可欠な微量水分標準の開発と計測の現状、また、その真逆に近い大気圧で100℃以上の高温の湿り空気あるいは過熱水蒸気を対象とした、湿度の表現方法、計測装置の開発や動向について、ご執筆いただきました。ついで、地球温暖化ならびに都市温暖化の観点から、自然界における湿度・水分輸送と降雨・台風の実態とそれらの将来予測に関して、地球温暖化や都市化に伴う日本の気候変化、特に大雨・降雨の変化の実態、またそれらの将来変化の予測についてご執筆頂きました。加えて、最大規模の強度を持つ台風（スーパー台風）を対象として、最大発達強度の理論、数値モデルにより再現される台風強度、気候変動が台風強度に与える影響などについてご執筆いただきました。

伝熱研究に従事されている読者の方々に、湿度・水分の極限領域における計測と自然現象に与える影響の実態と将来予測について、研究のおもしろさと重要性について現状を知って頂き、ご自分の研究の活性化に役立てていただければ幸いです。

最後に、本特集の内容に賛同頂き、多忙な時期にもかかわらず、ご寄稿頂きました執筆者の皆様には厚く御礼申し上げます。

西村 伸也（大阪市立大学）

Nobuya Nishimura (Osaka City University)

e-mail: nisimura@mech.eng.osaka-cu.ac.jp

企画・編集出版担当副会長 中部 主敬（京都大学）

編集出版部会長 田川 正人（名古屋工業大学）

委員

（理事） 梅川 尚嗣（関西大学）、永井 二郎（福井大学）、星 朗（東北学院大学）

（協議員） 青木 修一（東邦ガス）、岩井 裕（京都大学）、巽 和也（京都大学）

長野 方星（名古屋大学）、西村 伸也（大阪市立大学）、服部 康男（電力中央研究所）

保浦 知也（名古屋工業大学）、村上 陽一（東京工業大学）

TSE チーフエディター 花村 克悟（東京工業大学）

TSE 編集幹事 伏信 一慶（東京工業大学）

編集出版部会 連絡先： 〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町

名古屋工業大学大学院電気・機械工学専攻（しくみ領域）

田川 正人

Phone & Fax: 052-735-5343 / E-mail: tagawa.masato@nitech.ac.jp