

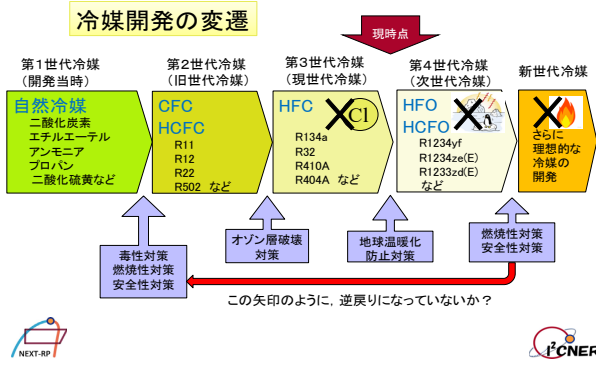
伝 熱

Journal of the Heat Transfer Society of Japan

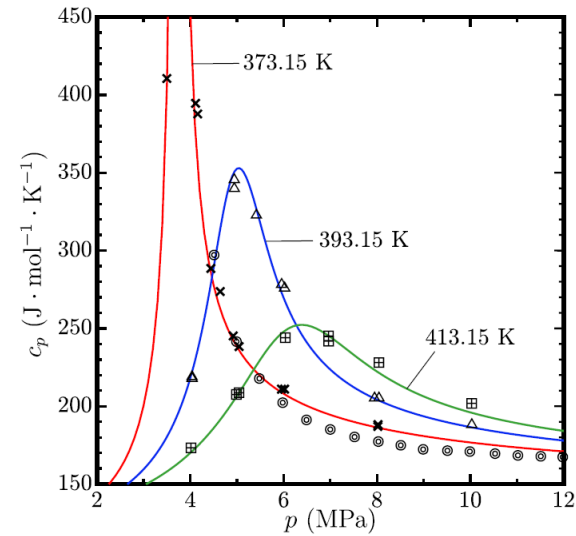
ISSN 1344-8692 Vol. 65, No. 270
2026. 1

The logo for the Heat Transfer Society of Japan (HTSJ) is located in the bottom right corner. It consists of the letters 'HTSJ' in a bold, sans-serif font. The letters are filled with a gradient of colors: 'H' is blue, 'T' is green, 'S' is yellow, and 'J' is red. The letters are outlined in white and have a slight shadow effect.

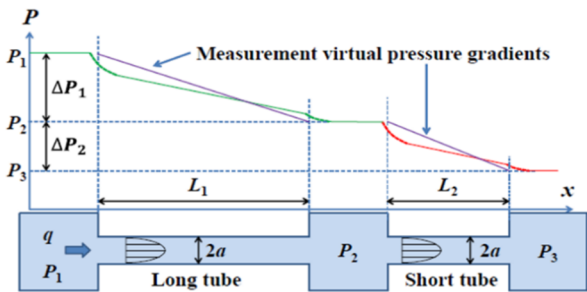
◆特集:省エネ化・低温室効果を達成できる技術及び評価手法の開発(次世代冷媒技術)



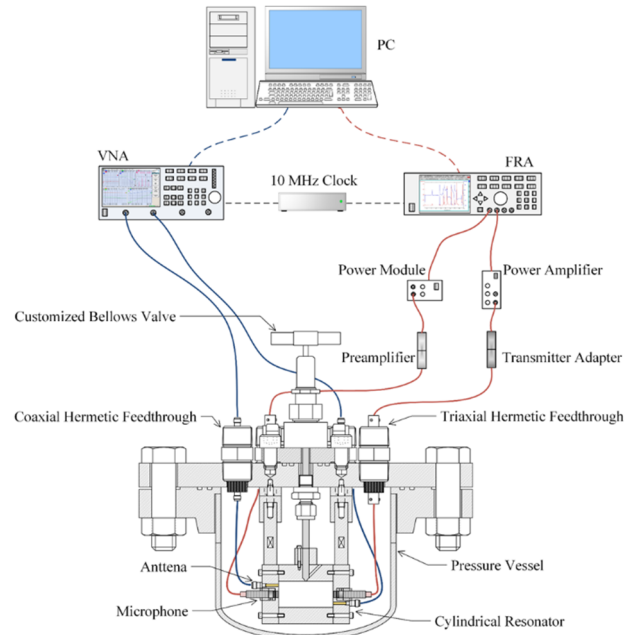
冷媒の変遷の概略 (特集記事「地球温暖化防止に貢献できる次世代代替冷媒の探索 (東之弘)」より)



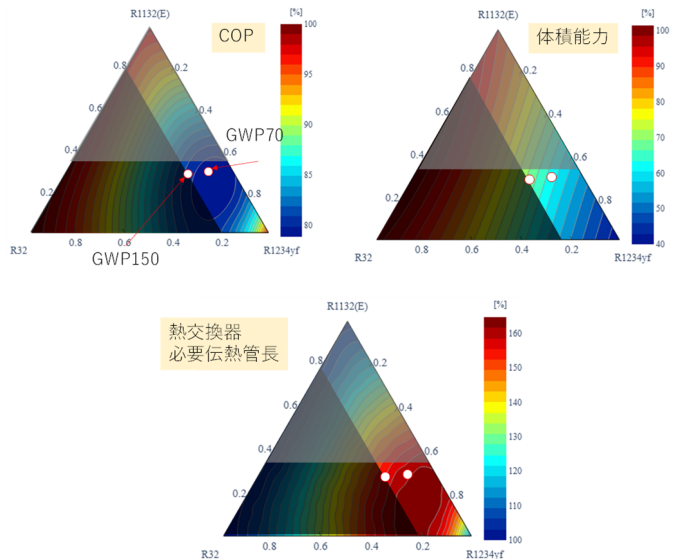
R1234yf に対する Lemmon and Akasaka 式[9]から計算した定圧比熱と実測値との比較: (◎) Liu et al. [10]; (X, △, 田) Lukawski et al. [11] 状態方程式は臨界点近傍の定圧比熱を平均偏差 1.8% で再現している。
(特集記事「低 GWP 冷媒に対するヘルムホルツ型状態方程式の開発 (赤坂亮)」より)



粘度測定 の原理 (特集記事「次世代冷媒の輸送性質 (仮屋圭史)」より)



円筒型音波・マイクロ波共鳴器の概略図[3] (特集記事「次世代冷媒の音速・密度測定 (狩野祐也)」より)



三成分混合冷媒のサイクル計算結果 (JIS 冷房標準 2kW). R32/R1132(E)/R1234yf の組成を変化させ、対 R32 比で COP (上), 体積能力 (中), 凝縮器必要伝熱管長 (下) を示す。灰色および黒色のシェードはそれぞれ、自己分解反応のリスクおよび GWP が 150 以上となる組成範囲を示す。(特集記事「次世代冷媒の音速・密度測定低 GWP 冷媒のサイクル性能 (福田翔, 近藤智恵子)」より)

伝 熱

目 次

〈巻頭グラビア〉

東 之弘 (九州大学)	
赤坂 亮 (九州産業大学)	
仮屋 圭史 (佐賀大学)	
狩野 祐也 (産業技術総合研究所)	
福田 翔 (九州産業大学), 近藤 智恵子 (長崎大学)	…………… 表紙裏

〈特集：省エネ化・低温室効果を達成できる技術及び評価手法の開発（次世代冷媒技術）〉

特集「省エネ化・低温室効果を達成できる技術及び評価手法の開発」にあたって

…………… 仮屋 圭史 (佐賀大学)	…………… 1
地球温暖化防止に貢献できる次世代代替冷媒の探索	…………… 東 之弘 (九州大学) …………… 2
低 GWP 冷媒に対するヘルムホルツ型状態方程式の開発	…………… 赤坂 亮 (九州産業大学) …………… 8
低 GWP 冷媒のサイクル性能	…………… 福田 翔 (九州産業大学), 近藤 智恵子 (長崎大学) …………… 15
次世代冷媒の音速・密度測定	…………… 狩野 祐也 (産業技術総合研究所) …………… 21
次世代冷媒の輸送性質	…………… 仮屋 圭史 (佐賀大学) …………… 28

〈報告〉

ASME Heat Transfer Memorial Award-Science を受賞して	…………… 高田 保之 (九州大学) …………… 34
日本伝熱学会主催 講習会 開催報告「計測技術 ～温度計測と熱物性計測～」	…………… 企画部会産学交流委員会：西剛 伺 (足利大学), 羽鳥 仁人 (ベテル), 坂本 明洋 (日本製鉄), 小林 健一 (明治大学), 小針 達也 (日立製作所), 有賀 善紀 (KOA) …………… 35

〈書評〉

山田幸生著, 診断技術のための生体医用光学入門 近赤外光で身体を診るヘルスケアテックの紹介	…………… 圓山 重直 (東北大学) …………… 38
---	-----------------------------

〈行事カレンダー〉	…………… 39
-----------	----------

〈お知らせ〉

第 63 回日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集	…………… 40
優秀プレゼンテーション賞 (第 63 回日本伝熱シンポジウム) について	…………… 43
編集出版部会からのお知らせ	…………… 44
理事会からのお知らせ	…………… 45
TSE 投稿規定	…………… 46

〈編集出版部会ノート〉	…………… 54
-------------	----------

CONTENTS

< Opening-page Gravure: heat-page >

Yukihiro HIGASHI (Kyushu University)
Ryo AKASAKA (Kyushu Sangyo University)
Keishi KARIYA (Saga University)
Yuya KANO (AIST)
Sho FUKUDA (Kyushu Sangyo University)
Chieko KONDOU (Nagasaki University) Opening Page

< Special Issue: Development of Technologies and Evaluation Methods Capable of Achieving Energy Efficiency and Low Greenhouse Gas Emissions >

Preface to “Development of Technologies and Evaluation Methods Capable of Achieving Energy Efficiency and Low Greenhouse Gas Emissions”
Keishi KARIYA (Saga University) 1
Search for Next-Generation Refrigerants Contributing to Global Warming Prevention
Yukihiro HIGASHI (I2CNER, Kyushu University) 2
Development of Helmholtz Energy Equations of State for Low-GWP Refrigerants
Ryo AKASAKA (Kyushu Sangyo University) 8
Cycle performance of low-GWP refrigerants
Sho FUKUDA (Kyushu Sangyo University), Chieko KONDOU (Nagasaki University) 15
Speed-of-Sound and Density Measurements for Next-Generation Refrigerant
Yuya KANO (AIST) 21
Transport properties of the next-generation refrigerants
Keishi KARIYA (Saga University) 28

< Report >

On Receiving ASME Heat Transfer Memorial Award-Science
Yasuyuki TAKATA (Kyushu University) 34
Report on the Lecture “Measurement Technology
— Temperature Measurement and Thermal Property Measurement —”
Koji NISHI (Ashikaga University), Kimihito HATORI (Bethel),
Akihiro SAKAMOTO (Nippon Steel), Kenichi KOBAYASHI (Meiji University),
Tatsuya KOBARI (Hitachi) and Yoshinori ARUGA (KOA) 35

< Book Review >

Yukio Yamada, Introduction to Biomedical Photonics for Diagnostic Technologies: Healthcare Tech using Near-Infrared Light for Examining the Body: Referral
Shigenao MARUYAMA (Tohoku University) 38

< Calendar > 39

< Announcements > 40

< Note from the JHTSJ Editorial Board > 54

特集「省エネ化・低温室効果を達成できる技術及び評価手法の開発」にあたって
*Preface to "Development of Technologies and Evaluation Methods Capable of Achieving Energy Efficiency
and Low Greenhouse Gas Emissions"*

仮屋 圭史 (佐賀大学)
Keishi KARIYA (Saga University)
e-mail: kariya@cc.saga-u.ac.jp

近年特に顕著になってきた地球温暖化緩和のため、温室効果ガスの排出・利用規制の強化が世界的に進められています。このような規制に対して、冷凍・空調分野においては、現在広く使用されているHFC系冷媒に代わる新しい冷媒の探求が進められており、新規冷媒の研究開発が2010年頃から行われてきました。冷媒に求められる特性として、温室効果や冷凍サイクル性能・伝熱性能は言うまでもありませんが、安全に利用するためには、可燃性や毒性等に関しても重要な議論の対象となります。

冷媒の法的規制は世界各国・地域で様々であり、性能面・安全面における技術的課題を解決するため、新規冷媒の探求は現在に至るまで続いています。最近では、純冷媒だけでなく複数（2-3成分）の冷媒を混合した混合冷媒まで検討の範囲が広がっており、研究開発の進展が期待されています。

日本における新規冷媒の探求に関する取り組みは、国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合研究開発機構（NEDO）がけん引し、その中で、前述のような様々な観点から新規冷媒の評価・検証が進められています。

本特集では、2026年1月号および4月号の2号にわたって、新規冷媒に関するNEDOプロジェクトのこれまでの成果について、プロジェクトメンバーの皆様取り組みを紹介頂きます。本号は「次世代冷媒技術」をサブタイトルとして、我が国における新規冷媒の熱物性の評価状況や研究開発状況について、NEDOプロジェクトにご参画されている皆様に記事をご執筆頂きました。

九州大学 東先生には、これまで利用されてきた冷媒の歴史の変遷や冷媒に求められる性質を解説頂くとともに、新規冷媒のスクリーニング手法、結果および今後の展望についてご紹介頂きます。

九州産業大学 赤坂先生には、冷媒を利用する上で不可欠な状態方程式（ヘルムホルツ型状態方程式）の詳細について解説頂くとともに、新規冷媒に対応する最新の状態方程式の開発手法および成果、今後の展望についてご紹介頂きます。

長崎大学 近藤先生、九州産業大学 福田先生には、熱物性と冷凍サイクル性能の関連性や、冷媒の安全性に関する最新の評価基準および手法について解説頂くとともに、純物質、混合物の冷凍サイクルの性能評価手法および成果についてご紹介頂きます。

産業技術総合研究所 狩野様には、冷媒の熱力学性質のなかでも重要な密度、音速に関する最新の測定手法について解説頂くとともに、その成果についてご紹介頂きます。

本稿筆者の佐賀大学のグループでは、新規冷媒の輸送性質（熱伝導率・粘度）の測定や手法、予測計算モデルの検討を行っております。その成果の一部を本特集にてご紹介いたします。

最後に、本特集へ記事をご提供頂きました5名の先生方に心より感謝申し上げますとともに、読者の皆様にとって有益な特集となることをお祈り申し上げます。

地球温暖化防止に貢献できる次世代代替冷媒の探索

Search for Next-Generation Refrigerants Contributing to Global Warming Prevention

東 之弘（九州大学 I2CNER）

Yukihiro HIGASHI (I2CNER, Kyushu University)

e-mail: higashi@i2cner.kyushu-u.ac.jp

1. はじめに

この原稿を書いている 2025 年の福岡は、10 月中旬になっても気温が 30℃を超えた日が複数日あり、11 月が近づいてようやく秋になったような感がある。気象庁のホームページ [1] によると、今年の日本の 6 月から 8 月の夏の気温は、1991 年から 2020 年の 30 年間の平均を基準とした平年と比べると、+2.36℃高かったという分析がされていた。世界的な温度上昇の基準値ともいえる +1.5℃上昇をはるかに超えている数値であることに改めて驚かされている。気温そのものの絶対値も、人間の体温より高くなったことが日常的で、珍しくなくなりました。この原因として、世間全般では地球温暖化の影響と考えられており、将来を見据えて、地球温暖化防止対策を今まで以上に急いで対処する必要性が強くなっている。我々研究者や技術者は、それぞれの立場で、地球温暖化対策に何らかの貢献ができないかと知恵を絞らざるをえない。

大学生の時から 45 年間、冷媒熱物性を研究テーマしてきた筆者は、エアコンや冷蔵庫、ヒートポンプで使用されている冷媒に関して、性能向上の視点からだけでなく、地球環境問題の視点からも世の中に貢献ができないものかと日々考えてきた。今回の特集では、次世代冷媒開発という共通のキーワードのもとで、地球温暖化対策に対して一緒に取り組んでいる国内の研究者とともに、現在進行している NEDO Project について執筆させていただく機会をいただいた。筆者の担当箇所では、地球温暖化への影響が少なく、安全で性能の良い次世代代替冷媒探索の現状について報告したい。

2. 冷媒の変遷

20 世紀前半、温度を下げる（冷却する）道具として冷凍機が開発された時に用いられていた冷媒は、図 1 にまとめたように、アンモニア・二酸化炭素・

エチルエーテル・プロパン・二酸化硫黄などの自然冷媒であったと言われている。雪氷を利用して物を冷やしていた当時とすれば、機械で人工的に、いつでもどこでも冷却できる冷凍機の発明は画期的で、食品分野や運輸分野、そして冷凍空調分野での技術革新に大きく貢献したはずである。そして、これら冷却技術の発展において重要な位置を占めているのが、熱を実際に移動させる媒体である冷媒である。しかしながら、当時の冷媒は毒性や燃焼性、そして安全性などの面で欠点もあり、使い勝手が良い物質とは言えなかったようである。

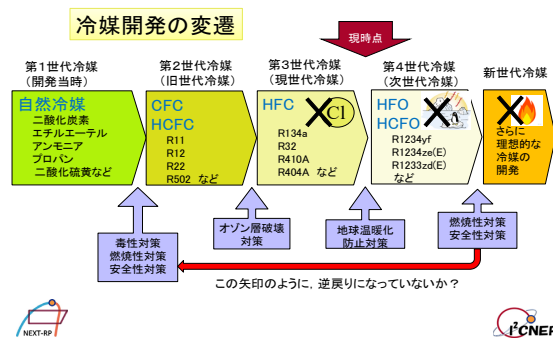


図 1 冷媒の変遷の概略

この不都合を解消すべく、特に安全面を重要視した新しい冷媒として、塩素原子とフッ素原子と炭素原子からなるハロゲン化炭化水素の CFC (Chlorofluorocarbon) 冷媒や、CFC 冷媒に水素原子が加わった HCFC (Hydrochlorofluorocarbon) 冷媒が 1930 年以降に登場した。代表的な CFC 冷媒には 1990 年ころまで冷蔵庫やカーエアコンの主要冷媒として広く使用されていた R-12 (CCL₂F₂)があり、HCFC 冷媒としてはルームエアコンの主要冷媒であった R-22 (CHClF₂) が代表的である。

1970 年代になって、オゾン層破壊が地球環境問題として世界中で問題視されるようになり、CFC

冷媒や HCFC 冷媒の構成原子の 1 つである塩素原子がオゾン層破壊の主たる要因と考えられ、CFC 冷媒や HCFC 冷媒などの通称「特定フロン」が、モントリオール議定書により世界中での全廃が決定される。画期的な発明品であった冷媒が、一気に悪者の化学物質に変わった瞬間である。

とは言うものの、温度を下げる技術の核となる冷媒の存在は貴重なために、「特定フロン」に代わる物質の開発が急務となり、塩素原子を含まない HFC (Hydrofluorocarbon) 冷媒が「代替フロン」として新たに注目されていく。たとえば CFC 冷媒 R-12 の代替品として HFC 冷媒 R-134a が開発され、さらに HCFC 冷媒 R-22 の代替品として HFC 冷媒 R-32 や、R-32 と R-125 の擬共沸混合冷媒である R-410A が採用されるようになる。

初期に使用されてきた「自然冷媒」から「特定フロン」への冷媒転換を第 1 次冷媒転換とすれば、「特定フロン」から「代替フロン」への転換が第 2 次冷媒転換とも言える。この CFC 冷媒、HCFC 冷媒から HFC 冷媒への第 2 次冷媒転換により、モントリオール議定書の国際的な取り組みが成果を上げて、オゾン層破壊問題は一件落ち着いたように世間で騒がれなくなってしまうが、それは単に 1990 年代に入った頃から、地球温暖化問題がさらに強大な地球環境問題として登場したからに過ぎない。そして新たに「代替フロン」から「低 GWP 冷媒」への第 3 次冷媒転換の時代が始まることになる。ここで、GWP とは地球温暖化係数 (Global Warming Potential) のことで、この値が大きい物質ほど、地球温暖化に及ぼす影響が大きく、世界中で GWP をより低くする方向での冷媒への転換が行われていく。この第 3 次冷媒転換において新たに登場するのが、炭素の二重結合を有する、エチレンやプロピレンの分類に属するオレフィン系冷媒 HFO (Hydrofluoroolefin) 冷媒である。

R-1234yf や R-1234ze(E) を代表とする HFO 冷媒は、大気寿命が短いという特徴を逆に利用しているので、大半の HFO 冷媒の GWP は 10 以下であり、HFC 冷媒に比べてはるかに小さい値を持つ。現状の HFC 冷媒を HFO 冷媒に入れ替えるだけで、冷凍機や空調機器が地球温暖化に及ぼす影響を食い止める効果が期待できることになる。しかし実際には簡単な話ではなく、HFO 冷媒の中には毒性を含む安全性や燃焼性、安定性に課題が残る物質も多く、

CFC 冷媒や HCFC 冷媒のように無毒不燃で使いやすい物質とは言い切れない冷媒が多い。そのために、従来のように熱力学的解析による性能評価で冷媒を選択するだけでは不十分で、安全性や環境適合性までも考慮した冷媒探索をしなければならなくなってしまった。

なお、地球温暖化防止に貢献できる次世代低 GWP 冷媒として、自然界に存在する自然冷媒を利用するアイデアがある。人工物ではなく、元々自然界にあるものなので安全であるとの考えであり、「自然」というネーミングが環境に良いイメージをもたらしている。しかし、二酸化炭素は高圧特性に課題があり、プロパンなどの炭化水素は燃焼性に課題がある。アンモニアでは毒性を有するなど、自然物ならば大丈夫というほど簡単な選択ではない。低 GWP かつ環境面で優れている物質だからとはいえ、HFO 冷媒にも自然冷媒にも欠点は未だ残っており、最終結果となる代替冷媒は探し当てられてない。結局現時点では、利用する分野ごとに、HFO 冷媒と自然冷媒を適材適所で使い分けていくという考え方が落とし所になっているようで、冷媒選択において、経済的重視と環境重視が相反する特性を持っていることが、現実では大きな障壁となっている。

3. 次世代代替冷媒のスクリーニング

次世代冷媒探索の取り組みは、まず広い物質群から複数の候補冷媒を絞り込むことから始まる。この絞り込み作業を「スクリーニング」と呼んでいるが、この時、スクリーニングの条件の選定を適切に行うことが重要となる。

家庭用および自動車用のエアコンや冷蔵庫などで用いられる冷凍サイクルの冷媒は、蒸発・凝縮の相変化を利用して熱を動かす媒体なので、流体（液体と気体）であることだけでなく、利用する機器それぞれに対して、適切な温度帯で相変化できることが必要条件となる。冷媒といっても種類は多く、マイナス 100℃ くらいの極低温を作り出す医療用・冷凍装置用冷媒もあれば、冷蔵庫やエアコンのように室温付近前後で扱う冷媒もある。さらに、省エネルギーの視点から注目されてきた中・高温排熱を利用するヒートポンプの作動媒体として利用する冷媒まで、それぞれの温度域に適した冷媒が必要となる。何にでも使える冷媒は存在しないのである。さらに現在使用されている冷媒のほとんどは高 GWP 冷媒

に属するので、大半の冷媒を低 GWP 冷媒に置き換える必要がある。この時の初期スクリーニングに使われるのが熱物性値情報であり、特に全体的な冷媒の使用温度域を表現する臨界点と標準沸点が重要となる。

次に今回探索する冷媒では安全性が鍵になっている。筆者の学生時代、オゾン層破壊が話題となる前は、冷媒選択といえば、性能を向上させるために行う作業であった。しかし、オゾン層破壊問題の出現から冷媒選択の状況は一変した。エアコンも冷凍機も生活に必要な機器になったので、不燃・無毒で地球環境にも影響を及ぼさない物質であることが最重要視されている。さらに、家電製品を想定して考えれば、工場生産で必要とされる冷媒量が、適切な価格で供給される必要がある。加えて、前述したように製品の開発・設計において熱物性値情報も重要となり、最終的には法規制が関わってくるので、国際標準規格に基づいて認証された冷媒であることが必要である。

このようなすべての事情を加味した上で、本稿では冷媒の第1次スクリーニングの推奨する結果として、McLinden ら [2]が報告した結果を表1に引用する。彼らは NIST（米国国立標準技術研究所）の熱物性を扱うグループのメンバーであり、冷媒熱物性の測定および評価の両面で、長い歴史と豊富な知見を有し、さらに、冷媒熱物性データベースの国際標準と考えられている REFPROP[3] を管理運営している。日本の研究者とも冷媒物性情報交換を長年行っており、刊行論文の基盤データベースと直接連携した、高精度で信頼できる熱物性情報データを世界中から集める体制も構築している。現在の NEDO Project と密接に関わっており、表1の結果は、冷媒絞り込みの第一段階としては最も信頼できると筆者は考えている。

そして、表1の29種類の物質をもとに、日本国内の冷媒物性研究者の蓄積した熱物性実測情報と経験を加味し、NEDO Project 冷媒グループで独自に行い、以下の13種類を第2次スクリーニング空調用低 GWP 候補冷媒として絞り込んだ。

- (1) HFO 系冷媒 (HFOs): R-1132a, HFO-1123, R-1132(E), R-1234yf, R-1234ze(E), R-1243zf
- (2) HFC 系冷媒 (HFCs): R-32, R-152a
- (3) 炭化水素 (HCs): R-290, R-1270, R-E170

(4) その他： R-13I1(CF₃I), R-744(CO₂)

なお、安全性、経済性、性能面、さらには地球環境問題対策まで考慮して、単一物質で使える次世代冷媒候補はなくなっていると考えているので、現状では混合冷媒を対象とせざるを得ない。したがって、前述した13冷媒はすべて混合冷媒の成分冷媒として検討していくことになる。

表1 McLinden ら[2]による冷媒絞り込みの結果 (原文より引用)

IUPAC name	ASHRAE designation
Hydrocarbons and Dimethyl Ether	
ethane	R-170
propene (propylene)	R-1270
propane	R-290
methoxymethane (dimethyl ether)	R-E170
cyclopropane	R-C270
Fluorinated Alkanes (HFCs)	
fluoromethane	R-41
difluoromethane	R-32
fluoroethane	R-161
1,1-difluoroethane	R-152a
1,1,2,2-tetrafluoroethane	R-134
Fluorinated Alkenes (HFOs) and Alkyne	
1,1-difluoroethene	R-1132a
fluoroethene	R-1141
1,1,2-trifluoroethene	R-1123
3,3,3-trifluoroprop-1-yne	n.a.
2,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene	R-1234yf
(E)-1,2-difluoroethene	R-1132(E)
3,3,3-trifluoroprop-1-ene	R-1243zf
1,2-difluoroprop-1-ene ^a	R-1252ye ^a
(E)-1,3,3,3-tetrafluoroprop-1-ene	R-1234ze(E)
(Z)-1,2,3,3,3-pentafluoro-1-propene	R-1225ye(Z)
1-fluoroprop-1-ene ^a	R-1261ze ^a
Fluorinated Oxygenates	
trifluoro(methoxy)methane	R-E143a
2,2,4,5-tetrafluoro-1,3-dioxole	n.a.
Fluorinated Nitrogen and Sulfur Compounds	
N,N,1,1-tetrafluoromethaneamine	n.a.
difluoromethanethiol	n.a.
trifluoromethanethiol	n.a.
Iodine Compound	
trifluoroiodomethane	R-1311
Inorganic Compounds	
carbon dioxide	R-744
ammonia	R-717

^aThis fluid has cis (Z) and trans (E) isomers; the predicted values of both were the same.

4. 空調機器用代替冷媒の選択

現在進行中の NEDO Project で主となるターゲットは、世界中でさらに需要が増えていくことが予想されるルームエアコン用の代替冷媒である。この分野の冷媒としては、現状 R-32 や R-410A が広く利用されており、特に R-32 は単一冷媒なので混合冷媒よりも使い勝手がよく、熱力学的性能評価におい

ても、伝熱特性評価においても他の冷媒より優位性が証明されている。ただ残念ながら、IPCC AR4 基準の GWP 値[4]が R-32 は 675, R-410A は 2088 と高い数値であり、地球温暖化対策の点から、より低い GWP の冷媒が必要となっている。

代替冷媒探索における一つの考えとして、同じ温度において飽和蒸気圧がほぼ同じ冷媒であれば、機器の耐圧設計で大幅な設計は生じないと考えられる。加えて材料や冷凍機油の相性がよければ、ドロップイン冷媒として、現状の機器にそのまま冷媒転換するだけで使用できることも期待できる。図 2 には筆者らが実測した冷媒の飽和蒸気圧曲線を P - T 線図上にまとめた。図中のシンボルでプロットしたものは筆者らの研究室で現在までに新たに追加測定した実測値であり、実線は、REFPROP 10.0 で計算できる代表的な冷媒の飽和蒸気圧曲線を追加したものになる。この図より R-32 の飽和蒸気圧曲線に近い熱物性を有する単一冷媒を探すと R-1132(E)と HFO-1123 が対象となる。実はこの 2 種類の冷媒は過去の NEDO Project で開発された国産冷媒であり、代表的な熱物性情報はすでに筆者ら[5-8]が公開している(表 2)。ただし、この 2 つの HFO 冷媒は、GWP 値は低く、熱力学的性質としては条件をクリアしているが、燃焼性や自己分解反応の点で単一冷媒として利用できる可能性が低いことが判明し、現時点ではこの 2 つの冷媒に第 2, 第 3 の成分冷媒を混合した混合冷媒としての使用が検討されている。

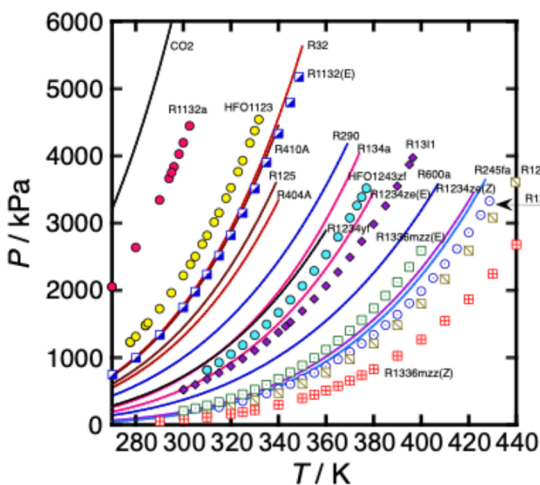


図 2 代表的な冷媒の飽和蒸気圧曲線

表 2 HFO-1123 と R-1132(E)の代表的な熱物性値

	R-32	R-410A	HFO-1123	R-1132(E)
M (kg/kmol)	52.024	72.585	82.025	64.035
Tb (C)	-51.65	-51.4	-61.25	-52.65
Tc (C)	351.26	344.49	331.73	348.82
Pc (MPa)	5.782	4.901	4.549	5.174
ρ_c (kg/m ³)	424	459	504	435
Ps at 25C (MPa)	1.690	1.657	2.123	1.657
GWP (AR4)	675	2088	0.0054	0.0056
ASHRAE safety code	A2L	A1	B2	A2

表 3 R-1132(E)混合冷媒の代表的な熱物性値

	R-474A	R-474B	R-479A	R-479B
(*) composition is mass%	R1132(E)+ R1234yf [23/77]	R1132(E)+ R1234yf [31.5/68.5]	R1132(E)+ R1234yf+R32 [28/50.5/21.5]	R1132(E)+ R1234yf+R32 [23/33/44]
M (kg/kmol)	96.677	91.527	77.318	66.921
Tb (C)	-43.4	-45.8	-50.4	-51.7
Tc (C)	87.8	85.2	79.5	77.6
Pc (MPa)	4.05	4.22	4.75	5.19
ρ_c (kg/m ³)	458	454	450	448
Ps at 25C (MPa)	1.07	1.18	1.46	1.60
GWP (AR4)	3	3	147	299
ASHRAE safety code	A2L	A2L	A2L	A2L
Tglide at 0.1 MPa	7.39	7.44	5.75	2.46

5. R-1132(E) 混合冷媒の可能性

2025 年 10 月の時点で、NEDO Project 冷媒評価グループとしては、2 成分系混合冷媒 R-1132(E)+ R-1234yf を GWP 10 以下を目指す第 1 候補冷媒として考えている。HFO-1123 に関しては、未だ ASHRAE の R 番号の取得ができておらず、キガリ改正のタイムスケジュールを考え、不確定な要素が残っている。また、R-1132(E)に対する第 2 成分で選ぶ冷媒としては、HFO 冷媒のなかでも早い時期に市場への投入が進んだ R-1234yf を選択した。さらに R-1132(E)+R-1234yf の 2 成分系混合冷媒は、すでに 2 種類の混合冷媒、R-474A (23mass%R-1132(E)+77mass%R-1234yf)と R-474B (31.5 mass%R-1132(E)+68.5mass%R-1234yf)が ASHRAE の R 番号を取得済みであることも候補選択理由になっている。表 3 には R-474A と R-474B の代表的な熱物性値と、R-474 系に R-32 を加えた 3 成分系混合冷媒 R-479A および R-479B の基礎熱物性情報もまとめておいた。なお、表 3 の熱物性値情報の計算の一部では、NEDO Project 冷媒評価グループで作成した最新の REFPROP 10.0 用混合パラメータ (非公開) を使って計算した値を掲載している。R-479 系の 3 成分系混合冷媒に関しては R-32 が含まれるために

GWP の値が 10 以下の条件を満たすことは難しい。しかし、R-32 が含まれることで R474 系よりも性能が向上することを期待しており、温度グライドも R-474 系に比べて小さくできると考えられる。混合冷媒を検討する場合に、単一冷媒では存在しない温度グライドが、熱交換器の伝熱性能を低下させることは以前から問題視されていたので、経済的効果まで考えれば、この点はメリットになるはずである。将来的には、環境面と経済面の両立を考えた次世代冷媒を今まで以上に検討する必要が生じると思われる。GWP の最適値はどのくらいの数字になるのかという点も今後議論されていくべきであろう。

6. R-1132(E)+R-1234yf の熱物性測定結果

現時点までに本研究室で測定した R-1132(E)+R-1234yf 混合冷媒に関する最新の熱物性情報の成果を一部紹介する。

6.1 PvT 性質

PvT 性質とは、圧力と比容積（逆数が密度）と温度の 3 次元の関係を表す熱物性で、熱力学状態曲面の最も基本となるデータになる。元来、状態式とは PvT 性質の関係を表現する式であり、最もシンプルなものも理想気体の状態式である。この 3 つの熱物性を絶対測定することが我々の実験の目的であり、状態式作成のために基礎データを取得することに他ならない。今回測定した R-474A (23mass% R-1132(E)+77mass% R-1234yf) の PvT 性質の測定結果を一例として図 3 に示した。ここで、図中○印のプロットが、測定した 5 種類の等密度線に沿って得られた実測値であり、実線は、NEDO Project 冷媒評価グループ内で使用している R-1132(E)+R-1234yf の REFPROP 10.0 用混合モデル（暫定版）を用いた +印の計算値を結ぶように描かれた結果を示している。さらに、この図中には、2 つの成分冷媒、R-1132(E)と R-1234yf の飽和蒸気圧曲線と、筆者が実測値に基づいて作成した臨界軌跡の相関式からの計算結果も示している。この図より、暫定版ではあるが、作成した混合モデルで R-474A 混合冷媒の PvT 性質を精度よく再現していることがわかる。そして本混合系に関しては、他に 3 種類の組成でも同様の測定を終了しており、全組成領域での計算が可能な混合モデルの作成も順調に進んでいる。

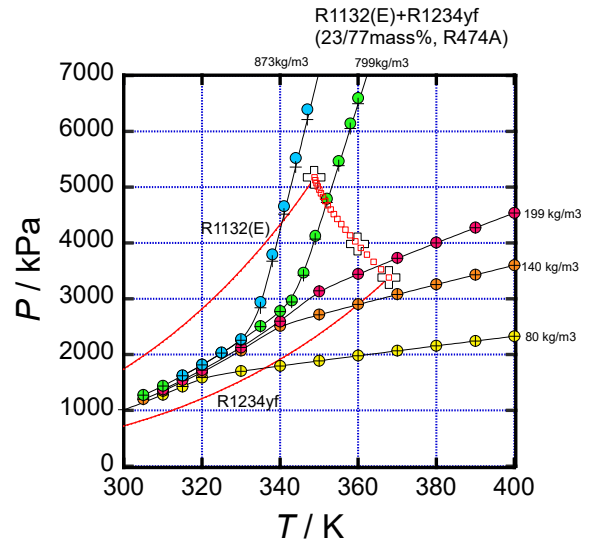


図 3 R-474A (23mass%R-1132(E) + 77mass% R-1234yf)の PvT 性質測定結果。
○印は実測値。+印は計算値。

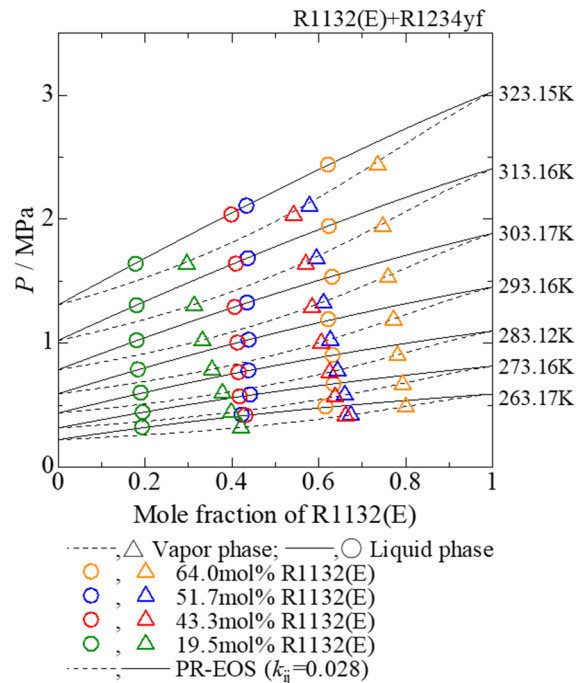


図 4 R-1132(E)+R-1234yf 2 成分系混合冷媒の気液平衡性質測定結果

6.2 気液平衡性質

混合冷媒において気液平衡性質の計算は重要である。気相と液相が共存する 2 相共存状態では、気相と液相で、温度と圧力は共に等しいが、両相での

密度と組成は異なる。この組成の違いを計算するための基礎情報が気液平衡性質である。本研究室における気液平衡測定では、まず温度を安定にさせたのち、圧力を測定し、同時に気相と液相からそれぞれごく少量の試料をサンプリングしてガスクロマトグラフにかけて組成測定を行う。そして組成測定終了後、新たな測定温度を設定した後、前述同様の測定を繰り返して行う。本混合冷媒では、4種類の組成で気液平衡セルへの初期充填を行い、マイナス10℃から50℃まで、10K刻みで測定を行い、代表的な3次状態方程式のPR式に関する混合パラメータ k_{ij} を決定して、気液平衡の関係を明らかにしていった。図4からもわかるように、本混合冷媒は、理想混合に近い非共沸混合冷媒であることがわかり、混合パラメータ k_{ij} も0.028と、ほぼゼロに近い値で計算が可能であった。さらにREFPROP 10.0で用いるヘルムホルツ型状態式からの計算結果とも比較し、精度よく計算できることを確認している。

なお、 PvT 性質と気液平衡性質以外に、本研究室では混合冷媒の気液共存曲線（純冷媒の飽和密度に相当）、混合冷媒の臨界点、そして臨界点の組成依存性を表す臨界軌跡の決定および相関式の作成も行なったことを追記しておく。

7. おわりに

最後に、熱物性値の信頼性とその取り扱い上の注意として一言述べさせていただきたい。現場で広く利用されている冷媒熱物性計算ソフトウェアのREFPROPは、混合冷媒のさまざまな熱物性計算が可能であり、純物質だけでなく、混合物の計算までも簡単にできる非常に優れた計算ツールである。しかし、いくら優れたツールでも、使い方を間違えれば、誤った製品設計を行う数値を導くことになる。

REFPROPで混合冷媒の熱物性計算を行うためには、純成分物質の高精度な状態式と、混合冷媒用の混合パラメータが必要である。前者のREFPROPで利用できる純成分物質の状態式については、ほとんどがジャーナル誌でピアレビューが行われた、実測値に基づいて作成された状態式である。したがって信頼性は非常に高いと考えられる。しかし混合モデルに関しては、高精度の実測値が限られているの

で、混合パラメータ自体に推算値を利用している場合も少なくない。また、いくつかの混合系では、よく似た組み合わせの混合系の混合パラメータを代用している場合もある。実測値に基づいていない混合モデルは、あくまで推算値に過ぎず、正確な熱物性計算ができない可能性がある。このように、冷媒熱物性計算に関しては、純冷媒の状態方程式が高精度で計算できる状態式であるのかという点と、計算したい混合系の混合モデルの混合パラメータが実測値に基づいて決定されたパラメータなのかという2点は、必ず計算前に確認してもらいたい。そして推算値しか使えないとわかった場合は、その状況を認識した上で、設計や性能解析に利用してもらいたい。REFPROPといえども神様ではないことは、認識しておく必要がある。

なお、本成果は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（JPNP23001）の結果得られたものである。

参考文献

- [1] 気象庁ホームページ（2025.9.1 発表）
https://www.jma.go.jp/jma/press/2509/01a/summer_temp_20250901.html
- [2] McLinden, M.O. and Huber, M.L., *J. Chem. Eng. Data*, 65(2020), pp.4176-4193.
- [3] Lemmon, E.W. et al., NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP), Version 10.0 (2018).
- [4] Forster, P. et al., Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing, In: Climate Change 2007, The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA (2007).
- [5] Higashi, Y., et al., *J. Chem. Eng. Data*, 63-2 (2018), pp. 417-421.
- [6] Akasaka, R., et al., *Int. J. Refrig.*, 119 (2020), pp. 457-467.
- [7] Perera, U. A., et al., *Int. J. Refrig.*, 135 (2022), pp. 148-153.
- [8] Sakoda, N., et al., *Int. J. Refrig.*, 140 (2022), pp.166-171.

低 GWP 冷媒に対するヘルムホルツ型状態方程式の開発 Development of Helmholtz Energy Equations of State for Low-GWP Refrigerants

赤坂 亮（九州産業大学）

Ryo AKASAKA (Kyushu Sangyo University)

e-mail: ryo-a@ip.kyusan-u.ac.jp

1. はじめに

冷凍空調分野では地球温暖化係数 (GWP) が小さい新規冷媒 (低 GWP 冷媒) への転換が急務となっている。新たな冷媒の実用化には、その精密な熱物性データと、それらを統一的に表現できる状態方程式が必要不可欠である。状態方程式が整備されて初めて、その冷媒を用いたシステムの性能評価や機器設計が可能になる。

冷媒をめぐるキガリ改正や F-gas 規制等の国際的な動きと、それに向けた各国の対応等は他稿に譲るとして、本稿では、冷媒の状態方程式の理論的背景や、これまで筆者が関わってきた各種の低 GWP 冷媒に対する状態方程式の研究成果について述べる。

2. ヘルムホルツ型状態方程式

2.1 概要

蒸気動力サイクルおよび冷凍サイクルのシステム評価や、熱交換器、圧縮機、配管等の構成機器の設計においては、作動媒体の熱力学的状態量、すなわち飽和状態量、圧力-体積-温度関係 (PVT 関係)、エンタルピー、比熱、音速等をさまざまな独立変数の組み合わせに対して機械的に計算しなければならない。高度に最適化されたシステムを構築するためには、作動媒体の状態量を実測値と同程度の不確かさで計算できるような状態方程式が求められる。さらに、熱力学的な一貫性や導関数の連続性が保証されるために、単一の関数で気液両相の状態曲面を表現できることが望ましい。

ヘルムホルツ型状態方程式 (以下ヘルムホルツ式と略す) はこのような要求を満たす状態方程式の形式の一つであり、対応状態原理をその理論の基礎としている。蒸気工学や冷凍空調工学など、飽和蒸気圧、密度、比熱等の厳密な値が要求される分野では、標準的な状態方程式の形式として広く受け入れられており、ISO17584 (冷媒物性) [1] のような国際規格や熱物性データベース REFPROP [2] にも採用さ

れている。

一般に、ヘルムホルツ式は温度 T および比体積 v (もしくは密度 ρ) を独立変数とし、ヘルムホルツ自由エネルギー a を従属変数として次式のように表現される。

$$a = a(T, v) \quad (1)$$

この関数形は熱力学における 4 種類の基礎方程式 (Fundamental equations) の一つであり、微分演算のみで単相状態における全ての熱力学的状態量を導出することができる。この点がヘルムホルツ式の最大の利点と言える。例えば、圧力 p および定容比熱 c_v は次式のように表される。

$$p = - \left(\frac{\partial a}{\partial v} \right)_T \quad (2)$$

$$c_v = - \left(\frac{\partial^2 a}{\partial T^2} \right)_v \quad (3)$$

ただし、このような一般関係式は各状態量間の関数関係の存在を示しているにすぎず、具体的な関数形が与えられない限り数値として状態量を得ることはできない。熱力学の一般関係式の頂点に位置する基礎方程式に妥当な関数形を与えることが状態方程式開発の目的である。

なお、ヘルムホルツ式を用いる場合であっても、飽和状態の決定においては、いわゆる Maxwell criteria (気液両相の温度、圧力およびギブス自由エネルギーが等しい) を満足するように反復計算が行われる (飽和状態量は数値的にしか求まらない)。

2.2 ヘルムホルツ型状態方程式の関数形

一般的なヘルムホルツ式の形式は式(1)であるが、実際の状態方程式の開発には次式のように無次元化された関数形が用いられている。独立変数として比体積よりも密度の方が好まれる傾向にある。

$$\frac{a(T, \rho)}{RT} = \alpha(\tau, \delta) = \alpha^0(\tau, \delta) + \alpha^r(\tau, \delta) \quad (4)$$

ここで、 τ および δ はそれぞれ無次元温度および無次元密度であり、 α^0 および α^r はそれぞれ無次元ヘル

ムホルツ自由エネルギー α の理想気体部分および残留部分（実在流体と理想気体との差）である。

一般に、温度および密度の無次元化パラメータには臨界温度および臨界密度が用いられる。臨界温度および臨界密度の値は飽和蒸気圧や密度の再現性に大きく影響するため、これらの値の選定は状態方程式の開発において非常に重要である。特に、臨界密度は正確な測定が難しいため文献値にもばらつきが見られる場合があり、最適な値の選定には注意を要する。

理想気体部分 α^0 は個々の分子の並進、回転および振動に起因するヘルムホルツ自由エネルギーを表しており、次式を用いて理想気体の定圧比熱 $c_p^0(T)$ から導出することができる。

$$\alpha^0(\tau, \delta) = \frac{h_{\text{ref}}^0 \tau}{RT_c} - \frac{s_{\text{ref}}^0}{R} - 1 + \ln \frac{\delta \tau_0}{\delta_0 \tau} - \frac{\tau}{R} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{c_p^0}{\tau^2} d\tau + \frac{1}{R} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{c_p^0}{\tau} d\tau \quad (5)$$

理想気体の定圧比熱 $c_p^0(T)$ は、量子化学計算から解析的に求める場合と、実験的に求めた気相音速の補外値から求める場合がある。また、Joback法 [3]などの簡便な推算法が用いられる場合もある。いずれの方法も不確かさが比較的大きいため、これらの方法で決定した値を暫定値とし、音速や比熱の実測値が正確に再現されるように最終的に調整される。 h_{ref}^0 および s_{ref}^0 はそれぞれ任意の基準状態における比エンタルピーおよび比エントロピーの値である。基準状態は用途に応じて決められる。例えば、冷媒では 273.15 K における飽和液の比エンタルピーおよび比エントロピーがそれぞれ 200 kJ·kg⁻¹ および 1.0 kJ·kg⁻¹·K⁻¹ となるように h_{ref}^0 および s_{ref}^0 の値が定められる。このように、ヘルムホルツ式には基準状態における情報も含めることができる。

残留部分は分子間力に起因するヘルムホルツ自由エネルギーを包括的に表現する項である。現時点では、理論的な根拠に基づいて残留部分を正確に表現できる方法は確立しておらず、経験的に決められた関数形を実測値に合わせて最適化（フィッティング）することにより決定されている。つまり、複雑な分子間力の結果として外的に観察される飽和状態量、密度、音速などの巨視的状态量に基づいて関数形が最適化される。このようなアプローチは、分子動力学（MD）計算のように分子間ポテンシャルから相互作用を直接求める微視的手法とは本質的に異なる。

異なる。

残留部分の表現には次式のような関数形が用いられている。

$$\alpha^r(\tau, \delta) = \sum n_i \tau^{t_i} \delta^{d_i} + \sum n_i \tau^{t_i} \delta^{d_i} \exp(-g_i \delta^{e_i}) + \sum n_i \tau^{t_i} \delta^{d_i} \exp[-\eta_i (\delta - \epsilon_i)^2 - \beta_i (\tau - \gamma_i)^2] \quad (6)$$

右辺において最初の Σ は多項式項 (Polynomial terms) と呼ばれ、気体および高圧液体の状態量を表現するために用いられる。また、2番目の Σ は指数項 (Exponential terms) と呼ばれ、高圧気体および液体一般の状態量を表現するために用いられる。さらに、3番目の Σ は Gaussian 項 (Gaussian bell-shaped terms) と呼ばれ、臨界点近傍の状態量の急峻な変化を表現するために用いられる。このような関数形は完全に経験的なものであり、状態量の挙動に各項が果たす寄与の理論的な根拠は薄い。

式(6)における指数や係数は完全に任意というわけではない。例えば、 δ の指数 d_i は正の整数でなければならない。これは、密度が無限小に近づくとき（すなわち理想気体状態に近づくとき）、全てのビリアル係数（第2, 第3, 第4, ...）がいずれもゼロにならなければならないという熱力学的拘束条件による。また、 τ の指数 t_i は実数が許されるものの、負の指数は低温域での状態方程式の挙動を不安定にさせる要因となるため最近では避けられる傾向にある。

一方、式(6)の各項群を構成する項数は任意であるため、かつては高い再現性を求めるために必然的に項数が増える傾向にあった。2000年以前に開発された状態方程式には最大で50項もの項数を有していた（例えば [4]）。しかしながら、項数が増えると実測値の存在範囲を外れた場合に個々の項の寄与のバランスが崩れやすくなり、結果として、安定した外挿性（実測値の範囲を外れた場合の挙動）を得るのが難しくなる。最近では関数形の最適化が進み、20項以下のヘルムホルツ式が一般的となっている。

残留部分の関数形の最適においては、飽和状態量、PVT関係、比熱、音速、ビリアル係数等さまざまな状態量の実測値にフィッティングさせる手法が採られる (Multi-property Fitting)。ただし、状態量の種類によって実測値の不確かさは大きく異なる

ことに注意する必要がある。例えば、気相音速は0.01%程度の相対不確かさで測定することが可能であるが、比熱の測定は非平衡下で行われるため1%程度の不確かさで測定することも難しい。したがって、フィッティングに用いる各実測値には適切な重み付けがなされなければならない。

2.3 熱力学的健全性

式(6)の関数形はあくまで経験的なものであるから、実測値のみを用いた最適化を行うと、状態曲面の曲率や外挿性に問題を生じる。そのため、ヘルムホルツ式の最適化においては、状態曲面の熱力学的健全性(熱力学的に正しい挙動が少なくとも定性的に再現されていること)を担保するための多くの拘束条件を付加した条件付き最適化が行われる。拘束条件は、いわゆる“Greater than and less than concepts”に基づいて評価される。すなわち、状態方程式がその条件を逸脱していれば、逸脱の度合いに応じたペナルティを与える。もし条件を満足していればペナルティはゼロである。このペナルティは実測値と計算値との偏差と同じように目的関数の残差平方和に加算される。ここで、拘束条件のペナルティは実測値の偏差よりも数桁大きくなるように重み付けしておく。このような操作により、熱力学的健全性を重視した最適化が行われ、健全性を満たさない実測値を排除できるとともに、物理的に正しくないデータ点へのオーバーフィッティングを避けることができる。

このような状態方程式の開発手法は、Lemmon and Jacobsen [5]によって初めて提唱され、その後有効な拘束条件の発見が相次いで行われた。現在の状態方程式開発において制御される挙動の一例を以下に示す。

- 臨界等温線の勾配と曲率
- 高温・高圧における等温線
- 定容比熱、定圧比熱、音速等の誘導状態量（ヘルムホルツ自由エネルギーの2階導関数に関係）
- 飽和限界線や直径線（飽和液密度と飽和蒸気密度の平均値）
- 第2、第3および第4 ビリアル係数
- 理想曲線（ideal curves）

図1に、臨界等温線を含む等温線群を $p-\rho$ 線図上に示す。いずれも後述するR1243zfの状態方程式[6]から計算したものであり、熱力学的健全性が完

全に満足されている。すなわち、臨界等温線は、 $\rho < \rho_c$ において正の勾配および負の曲率を有し、 $\rho = \rho_c$ において勾配および曲率はいずれもゼロとなり、 $\rho > \rho_c$ において正の勾配および正の曲率とならなければならない。また、臨界温度以上の等温線群は常に正の勾配を有し、互いに交わることなく一本の線に漸近していかねばならない。

上記の拘束条件は最も基本的なものであり、逸脱した場合は極めて大きなペナルティが与えられる。これ以外にもさまざまな束縛条件を考慮することで、少ない実測値情報からでも広い温度・圧力の範囲で熱力学的に正しく成立する状態方程式を開発することが可能になった。

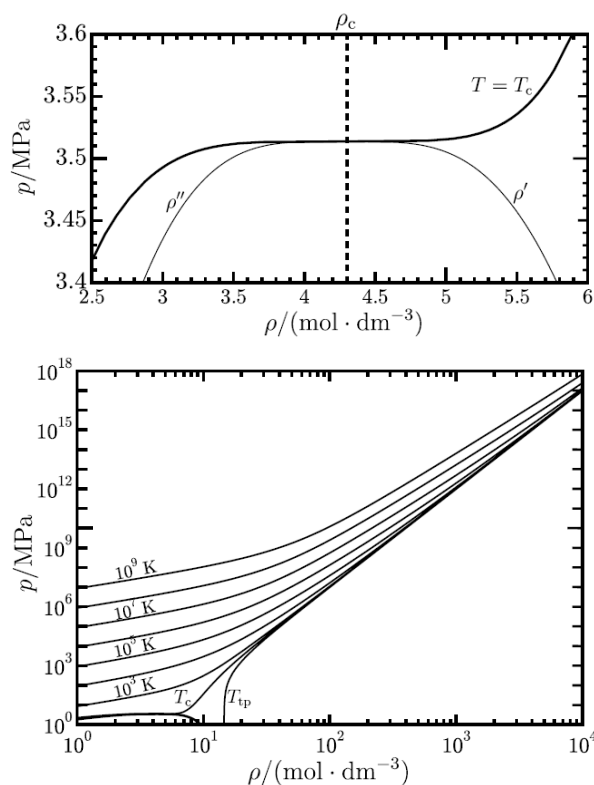


図1 R1243zfの状態方程式[6]から計算した $p-\rho$ 線図上における臨界等温線および等温線

さらに、近年の研究によって、多くの拘束条件を満足する関数形の「雛形」がある程度見出されてきた。最近ではこのような雛形を出発点として関数形を最適化する方法が一般化しており、状態方程式の開発に要する労力は以前よりも少なくなってきた。また、並列計算を行える環境が身近になってきたことから、最適化アルゴリズムの並列化によっ

表 1 第 3 節で取り上げた低 GWP 冷媒の基本定数

	R1234yf	R1233zd(E)	R1336mzz(Z)	R1132(E)	R1224yd(Z)	R1243zf
CAS No.	754-12-1	102687-65-0	692-49-9	1630-78-0	111512-60-8	677-21-4
分子量 ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)	114.0416	130.4962	164.056	64.035	148.4867	96.05113
臨界温度 (K)	367.85	438.86	444.5	348.82	428.69	376.93
臨界圧力 (MPa)	3.3844	3.5828	2.9030	5.1737	3.3340	3.5137
臨界密度 ($\text{mol}\cdot\text{dm}^{-3}$)	4.18	3.704	3.044	6.793	3.632	4.3
偏心因子	0.276	0.304	0.386	0.245	0.325	0.2595
三重点 (K)	121.6	165.75	182.65	184.9	157.8	122.35
標準沸点 (K)	243.692	291.28	306.603	220.512	288.004	247.666
文献	[9]	[11]	[12]	[14]	[16]	[6]

て計算時間の短縮が図られている。

3. ヘルムホルツ型状態方程式の開発状況

冷媒に対するヘルムホルツ型状態方程式の開発状況を述べる。本節で取り上げる低 GWP 冷媒の基本定数を表 1 にまとめて示した。各状態方程式の関数形、実測値の再現性、外挿性等の詳細は該当文献を参照されたい。

冷媒の状態方程式開発において重要となる点は、炭化水素や他の標準物質（水や希ガスなど）に比べて一般に実測値情報が限られているため、少ない実測値から如何にして広い温度・圧力の範囲で成立する式を開発するかということである。そのためには、前節で述べた熱力学的健全性を担保するための拘束条件の選択や重み付けがポイントとなる。

冷媒の熱力学的性質は、臨界温度や標準沸点の違いはあるものの、対応状態原理の観点から見れば似通っており、先に述べた状態方程式の「雛形」を適切に選ぶことで実用上十分な再現性を有する式を比較的短時間で得ることができる。ただし、最適化の入力値となる実測値群に熱力学的な整合性が欠けている場合はその限りではない。

3.1 R1234yf

R1234yf (2,3,3,3-テトラフルオロプロペン) は最も早い段階で実用化された低 GWP 冷媒の一つであり、他の冷媒に比べて多くの熱物性情報が公開されている。現在は、カーエアコン用冷媒として普及しており、また多くの低 GWP 混合冷媒の構成成分としても用いられている。

この冷媒の実用化黎明期には、Akasaka 式[7]や Richter 式[8]が開発された。その後、状態方程式の最適化手法の進化と実測値情報の拡充によって、より高い信頼性を有する Lemmon and Akasaka 式[9]が

開発された。この状態方程式の関数形は、その後に開発された状態方程式の雛形として用いられている。また、この状態方程式は、2022 年に改定された ISO 17584 (冷媒物性) [1]に採択され国際標準式となっている。

図 2 に、Lemmon and Akasaka 式[9]から計算した定圧比熱を実測値とともに示す。一般に、定圧比熱は臨界点において無限大に発散し、その近傍では極大値を示すが、極めて非理想性が強いこのような挙動を状態方程式で定量的に再現するのは困難である。しかしながら、図 2 に示す通り、Lemmon and Akasaka 式[9]は、臨界点近傍の定圧比熱の挙動を正確に再現していることが確認できる。

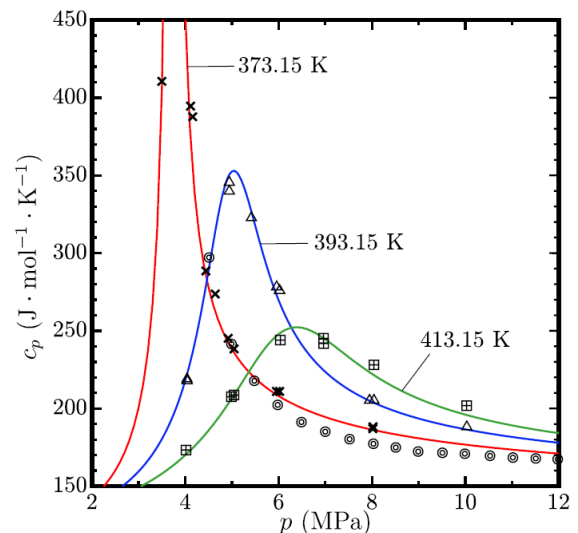


図 2 R1234yf に対する Lemmon and Akasaka 式 [9] から計算した定圧比熱と実測値との比較: (○) Liu et al. [10]; (×, △, 田) Lukawski et al. [11] 状態方程式は臨界点近傍の定圧比熱を平均偏差 1.8% で再現している。

3.2 R1233zd(E)

R1233zd(E)（トランス-1-クロロ-3,3,3-トリフルオロプロペン）は不燃性の低 GWP 冷媒であり，低圧冷媒 R245fa（1,1,1,3,3-ペンタフルオロプロペン）の代替冷媒としてターボ冷凍機や高温ヒートポンプに向けた実用化が進んでいる。

この冷媒の状態方程式としては長らく Mondéjar 式 [12] が使われてきたが，この式は気相音速に対する再現性が低い点が問題視されていた。Akasaka and Lemmon [13] はより信頼性が高い蒸気圧データを用いて関数形を再構築することにより，気相音速に対しても高い再現性を有する状態方程式を開発した。この状態方程式も ISO 17584 [1] に採択され国際標準式となっている。

3.3 R1336mzz(Z)

R1336mzz(Z)（cis-1,1,1,4,4,4-ヘキサフルオロブテン）は不燃性の低 GWP 冷媒であり，R1233zd(E) よりも高い沸点を有するため，より高い温度を供給するヒートポンプや産業廃熱等を利用する有機ランキンサイクルの作動媒体として実用化されている。

McLinden and Akasaka [14] はこの冷媒の蒸気圧，PVT 性質および気相音速を精密に測定し，ヘルムホルツ型状態方程式を開発した。この状態方程式も ISO 17584 [1] に採択され国際標準式となっている。

また，この状態方程式は，McLinden and Perkins [15] によって測定された液相音速も高い精度で再現する。図 3 に，液相音速の計算値と実測値 [15] との偏差の分布を示す。現時点では，液相音速に対して高い再現性を有する式は限られているため，液相音速測定装置を校正するための状態方程式としても用いられている。

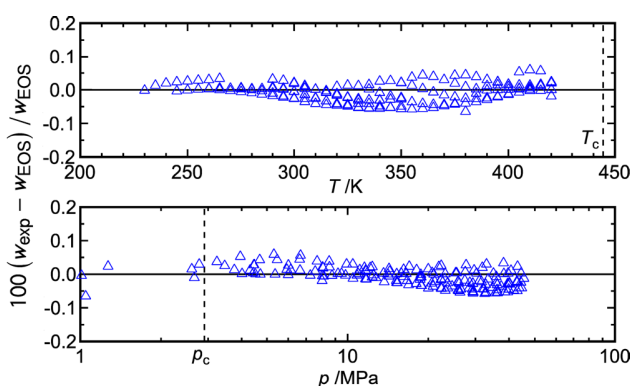


図 3 McLinden and Akasaka 式 [14] から計算した液相音速と実測値 [15] との相対偏差。状態方程式は液相音速の実測値を平均偏差 0.023% で再現している。

3.4 R1132(E)

R1132(E)（トランス-1,2-ジフルオロエテン）は R32 の代替冷媒の一つであり，R32 に近い蒸気圧を有する高圧冷媒である。この冷媒の実測値情報は極めて限定されているが，Akasaka and Lemmon [16] は，R1234yf に対する Lemmon and Akasaka 式 [9] を雛形として用いることによって実用上十分な再現性を有する状態方程式を開発した。この状態方程式は，家庭用空調機への応用が期待されている R1132(E)/32 および R1132(E)/1234yf 混合冷媒の混合モデル [17] にも適用されている。

3.5 R1224yd(Z)

R1224yd(Z)（シス-1-クロロ-2,3,3,3-テトラフルオロプロペン）は不燃性の低圧冷媒であり，R245fa の代替としてターボ冷凍機や高温ヒートポンプ等への応用が始まっている。Akasaka and Lemmon [18] は，R1234yf に対する式 [9] を雛形とし，いくつかの項を追加して再現性や外挿性をさらに高めた状態方程式を開発した。

3.6 R1243zf

R1243zf（3,3,3-トリフルオロプロペン）は微燃性を有する低 GWP 冷媒であり，開発当初は混合冷媒の成分としての実用化が検討されていた。近年の注目度は下がっているものの，比較的早い段階で高純度の冷媒サンプルが流通したこともあり，他の低 GWP 冷媒に比べて多い実測値情報が報告されている。

Akasaka and Lemmon [6] は，これらの実測値群の熱力学的整合性が高いことに注目し，R1234yf 式 [9] に代わる「雛形」となる新たな状態方程式を開発した。新たな関数形の再構築には，熱力学的整合性を有する蒸気圧，飽和液密度，PVT 関係，気相・液相の音速および液相比熱等の実測値が用いられた。この状態方程式の関数形は今後開発される新たな状態方程式の出発点として用いられる予定である。

4. 今後の展望

高度に最適化されたヘルムホルツ型状態方程式は，冷凍空調機器のシステム設計・評価や熱交換器などの要素機器設計に必要な再現性を有するとともに，臨界点近傍における高い数値的安定性や高圧域における安定した外挿挙動を示す。前節で紹介した状態方程式は，冷凍空調分野で広く用いられている REFPROP [2] への組み込みが可能な形で公開さ

れており、低 GWP 冷媒の実用化における基盤情報を構成している。

本稿では詳述しなかったが、混合冷媒に対する状態方程式（混合モデル）の開発も並行して進めている。現時点までに有望な単一成分冷媒の状態方程式開発はほぼ完了しており、今後は、これらを複数組み合わせ合わせた多成分混合冷媒モデルの高度化を行っていく予定である。混合系に対する実測値情報は単一冷媒以上に限定されるため、MD 計算や機械学習によるデータ補完も視野に入れている。また、研究成果を国際的に普及させるため、今後も国際会議や学協会を通じた標準化活動を継続していく所存である。

なお、本稿で述べた成果の多くは国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務（P18005, P23001 等）の結果として得られたものである。

参考文献

- [1] International Organization for Standardization, ISO/DIS 17584 Refrigerant Properties (2022).
- [2] Lemmon, E. W., Bell, I. H., Huber, M. L., McLinden, M. O., NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology (2018).
- [3] Joback, K. G. and Reid, R. C., Estimation of Pure-component Properties from Group-contributions, *Chem. Eng. Commun.* **57** (1987) 233.
- [4] Span, R. and Wagner, W., A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **25** (1996) 1509.
- [5] Lemmon, E. W. and Jacobsen, R. T., A New Functional Form and New Fitting Techniques for Equations of State with Application to Pentafluoroethane (HFC-125), *J. Phys. Chem. Ref. Data* **34** (2005) 69.
- [6] Akasaka, R. and Lemmon, E. W., A Helmholtz Energy Equation of State for 3,3,3-Trifluoroprop-1-ene (R-1243zf), *Int. J. Thermophys.*, **46** (2025) 23.
- [7] Akasaka, R., New Fundamental Equations of State with a Common Functional Form for 2,3,3,3-Tetrafluoropropene (R-1234yf) and *trans*-1,3,3,3-Tetrafluoropropene (R-1234ze(E)), *Int. J. Thermophys.*, **32** (2011) 1125.
- [8] Richter, M., McLinden, M. O., Lemmon, E. W., Thermodynamic Properties of 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf): Vapor Pressure and p - ρ - T Measurements and an Equation of State, *J. Chem. Eng. Data*, **56** (2011) 3254.
- [9] Lemmon, E. W. and Akasaka, R., An International Standard Formulation for 2,3,3,3-Tetrafluoroprop-1-ene (R1234yf) Covering Temperatures from the Triple-point Temperature to 410 K and Pressures up to 100 MPa, *Int. J. Thermophys.*, **43** (2022) 119.
- [10] Liu, Y., Zhao, X., Lv, S., He., H., Isobaric Heat Capacity Measurements for R1234yf from 303 to 373 K and Pressures up to 12 MPa, *J. Chem. Eng. Data*, **62** (2017) 1119.
- [11] Lukawski, M. Z., Ishmael, M. P., Tester, J.W., Isobaric Heat Capacity Measurements of Supercritical R1234yf, *J. Chem. Eng. Data* **63** (2018) 463.
- [12] Mondéjar, M. E., McLinden, M. O., Lemmon, E. W., Thermodynamic Properties of *trans*-1-chloro-3,3,3-Trifluoropropene (R1233zd(E)): Vapor Pressure, p - ρ - T Data, Speed of Sound Measurements and Equation of State, *J. Chem. Eng. Data*, **60** (2015) 2477.
- [13] Akasaka, R. and Lemmon, E. W., An International Standard Formulation for *trans*-1-Chloro-3,3,3-trifluoroprop-1-ene [R1233zd(E)] Covering Temperatures from the Triple-point Temperature to 450 K and Pressures up to 100 MPa, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **51** (2022) 023101.
- [14] McLinden, M. O. and Akasaka, R., Thermodynamic Properties of *cis*-1,1,1,4,4,4-hexafluorobutene [R-1336mzz(Z)]: Vapor Pressure, (p , ρ , T) Behavior, and Speed of Sound Measurements and Equation of State, *J. Chem. Eng. Data*, **65** (2020) 4201.
- [15] McLinden, M. O., and Perkins, R. A., A Dual-Path Pulse-Echo Instrument for Liquid-Phase Speed of

- Sound and Measurements on p-Xylene and Four Halogenated-Olefin Refrigerants [R1234yf, R1234ze (E), R1233zd (E), and R1336mzz (Z)]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **62** (2023) 12381.
- [16] Akasaka, R. and Lemmon, E. W., A Helmholtz Energy Equation of State for Calculations of Thermodynamic Properties of *trans*-1,2-Difluoroethene [R-1132(E)], *Int. J. Thermophys.*, **45** (2024) 174.
- [17] Thu, K., Miyane, K., Higashi, Y., Akasaka, R., Evaluation of R-1132(E)/32 Mixtures: pVT Properties, Critical Parameters and Binary Interaction Parameters, 7th IIR Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants, College Park, MD, USA, June 15-18, (2025).
- [18] Akasaka, R. and Lemmon, E. W., A Helmholtz Energy Equation of State for *cis*-1-Chloro-2,3,3,3-tetrafluoro-1-propene [R-1224yd(Z)], *Int. J. Thermophys.*, **44** (2023) 166.
-

低 GWP 冷媒のサイクル性能 Cycle Performance of Low-GWP Refrigerants

福田 翔（九州産業大学） 近藤智恵子（長崎大学）
Sho FUKUDA (Kyushu Sangyo University) Chieko KONDOU (Nagasaki University)

1. はじめに

地球温暖化抑制のためには、冷媒の直接的な温室効果（GWP: Global Warming Potential）のみならず、電力使用に伴う CO₂ 排出などの間接的環境負荷も考慮する必要がある。したがって、ヒートポンプサイクルの性能は、環境負荷の小さい冷媒を選定する上で極めて重要な指標となる。本稿では、熱物性とサイクル性能の関係に着目し、低 GWP 冷媒の選定指針について概説する。

2 / 熱物性とサイクル性能の関連

2.1 安全で高効率なサイクルに求められる熱物性

ヒートポンプサイクルの最高効率、採用する冷媒の熱力学的特性によって決定される。実際のサイクルでは各種損失が生じるため、冷媒の物性は設計の根幹をなす。高性能・高効率を達成するために、冷媒には以下の特徴が求められる。

性能向上のために望ましい特性：

- ・ 換算温度 80% 程度で運転可能な臨界温度
- ・ 大きな蒸発潜熱
- ・ 高い蒸気密度
- ・ 適切な比熱比（圧縮仕事と過熱度の低減に寄与）
- ・ 高い輸送物性（熱伝達・圧力損失に関与）
- ・ 潤滑油との適切な相溶性

安全性のために望ましい特性：

- ・ 高い電気絶縁性
- ・ 低燃焼性および低毒性
- ・ 高い化学的安定性（自己分解反応を起こさない）

特に比熱比は、圧縮機出口過熱度や圧縮過程の損失を評価する上で重要なパラメータである。安全性の観点からは、表 1 に示す ASHRAE および ISO[1]の冷媒分類基準に基づき、家庭用空調機では A1 または A2L 冷媒が主に採用されている。

さらに近年では、自己分解反応（不均化反応）

の危険性を考慮した新たな安全クラスの導入も検討されている。自己分解反応[2]とは、高温高压条件下で冷媒分子がエネルギーを受け取って分解を開始し、その過程で放出されたエネルギーが連鎖的に反応を伝搬させる現象である。この結果、爆発的な分解が生じるリスクがある。このリスクを抑制するために、安定な物質との混合による反応抑制や熱安定性向上が検討されている。

表 1 ASHRAE 34 / ISO 817[1]で分類される燃焼性と毒性に関わる安全性クラス

強燃性	LFL* ¹ ≥ 3.5 or HOC* ² ≥ 19000 kJ/kg	A3 Propane, Isobutane	B3
燃焼性	LFL* ¹ > 3.5 vol%	A2 R152a	B2
微燃性	and HOC* ² < 19000 kJ/kg	火炎伝搬速度 < 10 cm/s at 23 °C A2L R1234yf, R32,	B2L Ammonia
不燃性		A1 R134a, R410A	B1 R123
燃焼性区分 at 60°C, 101.3 kPa		低毒性 OEL* ³ ≥ 400 ppm	高毒性 OEL* ³ < 400 ppm
* ¹ 爆発下限界濃度, vol%) * ² 燃焼エネルギー (kJ/kg) * ³ OEL (Occupational Exposure Limits: 職業暴露限界値)			

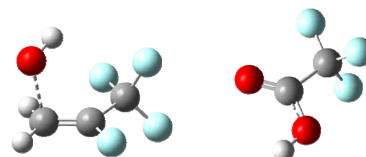


図 1 R1234yf と OH ラジカルとの初期反応（左）と生成物 TFA (Tri-fluoro acetic-acid, CF₃COOH) (右)。水色、灰色、白色、および赤色はそれぞれフッ素、炭素、水素、酸素原子を表す。

と潜熱の比が大きくなると COP は低下する. しかしながら, 顕熱と潜熱の比が最も小さい物質である Water は COP が低い. また, 図 3 と図 4 の結果と比較して, 冷媒におけるバラツキも小さくなっている. つまり, Water のような特異な物質を除き, 純冷媒におけるサイクル性能向上には潜熱と顕熱の比が重要である.

表 2 スクリーニング対象の純物質

R152A	R32	R236EA
CF3I	R40	R245CA
R1130E	R41	R245FA
R1132E	R113	R365MFC
R1234YF	R114	R1216
R1123	R115	R1224YDZ
AMMONIA	R123	R1233ZDE
BUTANE	R124	R1234ZEE
DME	R125	R1234ZEE
ETHANOL	R134a	R1243ZF
ISOBUTAN	R141B	R1336MZZZ
METHANOL	R142B	RC318
PROPANE	R143A	RE143A
R11	R150	RE245FA2
R12	R161	RE347MCC
R21	R218	WATER
R22	R227EA	

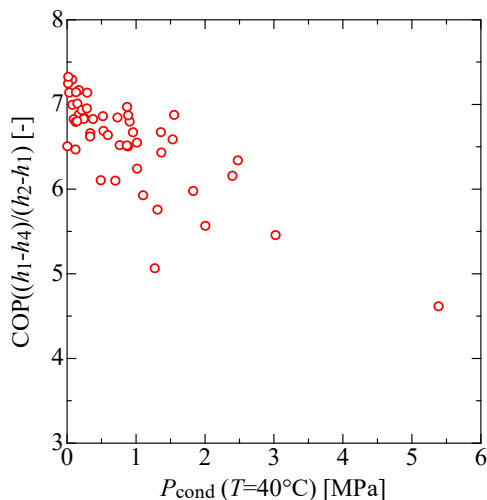


図 3 作動圧力に対する COP

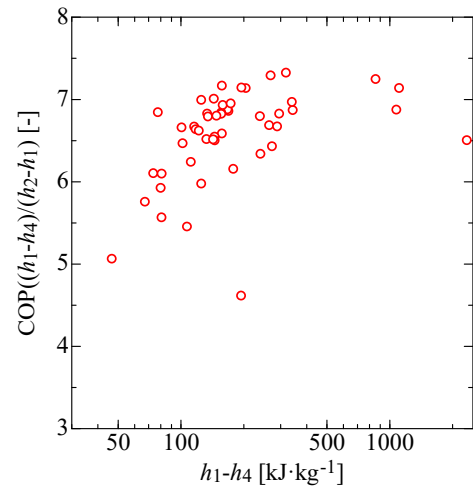


図 4 蒸発器出入口エンタルピ差における COP

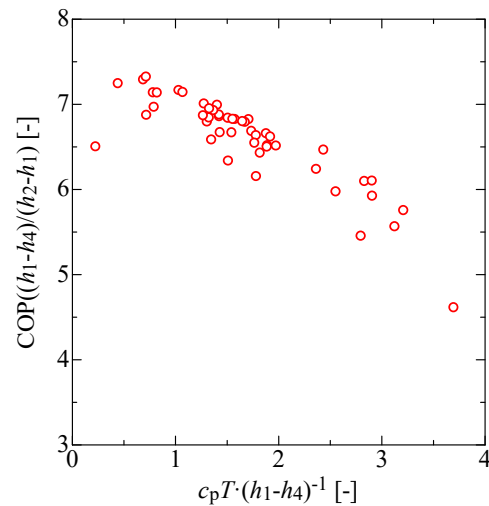


図 5 顕熱と潜熱の比に対する COP

3.2 各国の研究成果

前節で述べた基本的な熱力学的関係に加え, 近年では空調温度域におけるサイクル性能 (特に COP) を指標とした冷媒スクリーニング研究が世界各国で活発に行われている. その代表的な例を以下に示す.

Halon ら[7]は, HC, HFC, HFO 系の 24 種類の純冷媒およびそれらを組み合わせた 2 成分・3 成分混合冷媒を対象とし, 組成比 10%刻みで 44,915 通りの理論サイクルを評価した. その結果, R131I を含む混合冷媒が最も高い COP を示すことが報告されたが, 同時に化学的安定性が低いことも明らかとなった. 次いで, R1234ze(Z) および R1233zd(E) を含む混合系が高い COP を示したが, 体積能力不足に関する検討は十分に行われていな

い。最終的に、R152a/R1234ze(E) (70/30 mass%) が、高い COP と A2L クラスの燃焼性、およびコスト面のバランスから有望とされたが、依然として冷凍能力不足による機器大型化が課題として残る。

このようなスクリーニング研究の多くでは、REFPROP による物性値計算が用いられている。しかし、REFPROP には未登録の物質も多く存在し、また混合モデルの妥当性が検証されていない場合もあるため、これらの結果をもって冷媒候補を断定することには慎重を要する。

McLinden らのグループ[8,9]は、PubChem データベース[10]に登録されている約 60 万種の化学物質を対象にスクリーニングを実施した。スクリーニングを通過した候補物質について、家庭用空調機を模擬したサイクルモデルによる性能評価を行った結果、非可燃性かつ低 GWP の純物質は存在しないことを報告している。一方で、混合冷媒による可能性は残されているものの、性能・安全性・環境負荷の三者間バランスが今後の冷媒開発における主要課題であると結論づけている。

3.3 国内プロジェクトの研究成果

日本国内では、NEDO プロジェクト「次世代低 GWP 冷媒の実用化に向けた高効率冷凍空調技術の開発」において、研究機関・冷凍空調機器メーカー・冷媒メーカーが連携し、世界に先駆けた新規フッ素系冷媒の探索が進められている。以下に、その成果の一部を紹介する。

R1132(E) (cis-CHF=CHF) は GWP が 0.0056 [11,12]と極めて低いが、自己分解反応のリスクが指摘されている。これに対し、安定性に優れ GWP も低い R1234yf (CH₂=CF₃) および高いサイクル性能を持つ R32 を組み合わせた三成分混合冷媒のサイクル性能評価が行われた。図 5 に、各組成における COP、体積能力、必要伝熱管長さの予測結果を示す。体積能力が高い場合には、不可逆損失が低減し、実 COP が幾分高くなる場合がある。予測には、物性値に基づいて構築された高精度状態方程式および混合モデルを用いている。図中の白丸は、GWP=150 および 70 の条件を満たす候補組成を示しており、いずれも自己分解リスクと GWP=150 の閾値近傍に位置する。これらの結果から、COP 低下を抑えつつ体積能力を維持し、熱

交換器の大型化を防ぐためには、安全性と GWP のバランスが極めて重要であることが示唆される。プロジェクトでは、並行して冷媒の安全性評価も進められており[13,14]、最適な組成の探索が続けられている。また、冷媒物性に応じた圧縮機・熱交換器の新規設計および実証実験も進行中である。

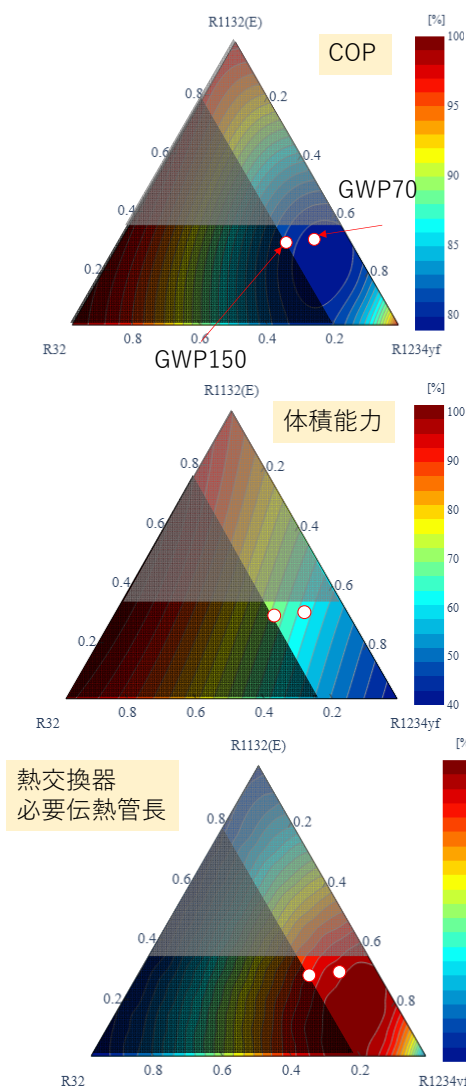


図 5 三成分混合冷媒のサイクル計算結果(JIS 冷房標準 2kW). R32/R1132(E)/R1234yf の組成を変化させ、対 R32 比で COP (上)、体積能力(中)、凝縮器必要伝熱管長 (下) を示す。灰色および黒色のシェードはそれぞれ、自己分解反応のリスクおよび GWP が 150 以上となる組成範囲を示す。

4. まとめ

本稿では低 GWP 冷媒の選定において考慮すべき熱物性、安全性、および環境影響の観点から、近年の研究動向を概説した。現時点では不燃かつ低 GWP の単一冷媒は存在せず、混合冷媒設計の最適化が今後の鍵を握る。特に、自己分解反応や TFA 生成リスクの抑制、安全性と COP・体積能力の両立が課題である。

これらを解決するためには、計算化学などを用いた広範な物質探索、物性の高精度測定とそれに基づく高精度状態方程式の開発、信頼性の高いサイクルシミュレーション、実験的検証を組み合わせた総合的なアプローチが求められる。

謝辞

JST 創発的研究支援事業 JPMJFR2172 (吉田パネル) の支援を受け、大気分解過程における TFA 生成分析を実施しました。また、R1132(E)に関するサイクル評価は NEDO プロジェクト「次世代低 GWP 冷媒の実用化に向けた高効率冷凍空調技術の開発」の一部として実施しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] AHRI, Chapter 2: Chemical, Physical, and Environmental Properties of ASHRAE 34 and ISO 817, in: AHRI Safe Refrig. Transit. Task Force, n.d.
- [2] Zhang, Z., Miyoshi, A., Ito, M., Dang, C., Chen, Y., Hihara, E., Suppression of the HFO-1123 disproportionation reaction by adding R290, *Int. J. Refrig.* 149 (2023) 299–307.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.12.012>.
- [3] ECHA(European Chemicals Agency), Per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS), (n.d.).
<https://echa.europa.eu/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas>.
- [4] Jackson, D.A., Young, C.J., Hurley, M.D., Wallington, T.J., Mabury, S.A., Atmospheric degradation of perfluoro-2-methyl-3-pentanone: Photolysis, hydrolysis and hydration, *Environ. Sci. Technol.* 45 (2011) 8030–8036.
<https://doi.org/10.1021/es104362g>.
- [5] Javadi, M.S., Søndergaard, R., Nielsen, O.J., Hurley, M.D., Wallington, T.J., Atmospheric chemistry of trans-CF₃CH=CHF: Products and mechanisms of hydroxyl radical and chlorine atom initiated oxidation, *Atmos. Chem. Phys.* 8 (2008) 3141–3147.
<https://doi.org/10.5194/acp-8-3141-2008>.
- [6] Russell, M.H., Hoogeweg, G., Webster, E.M., Ellis, D.A., Waterland, R.L., Hoke, R.A., TFA from HFO-1234yf: Accumulation and aquatic risk in terminal water bodies, *Environ. Toxicol. Chem.* 31 (2012) 1957–1965.
<https://doi.org/10.1002/etc.1925>.
- [7] Halon, T., Gil, B., Zajackowski, B., Comparative investigation of low-GWP binary and ternary blends as potential replacements of HFC refrigerants for air conditioning systems, *Appl. Therm. Eng.* 210 (2022) 118354.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118354>.
- [8] McLinden, M.O., Brown, J.S., Brignoli, R., Kazakov, A.F., Domanski, P.A., Limited options for low-global-warming-potential refrigerants, *Nat. Commun.* 8 (2017) 14476.
<https://doi.org/10.1038/ncomms14476>.
- [9] Domanski, P.A., McLinden, M.O., Updating the limited options for low-global-warming-potential refrigerants, *Int. J. Refrig.* 178 (2025) 410–417.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2025.07.011>.
- [10] Kim, S., Thiessen, P.A., Bolton, E.E., Chen, J., Fu, G., Gindulyte, A., Han, L., He, J., He, S., Shoemaker, B.A., Zhang, J., Bryant, S.H., PubChem Substance and Compound databases, *Nucleic Acids Res.* 44 (2016) D1202–D1213.
<https://doi.org/10.1093/nar/gkv951>.
- [11] Tokuhashi, K., Uchamaru, T., Takizawa, K., Kondo, S., Rate Constants for the Reactions of OH Radicals with the (E)/(Z) Isomers of CFCI=CFCl and (E)-CHF=CHF, *J. Phys. Chem. A* 123 (2019) 4834–4843.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpca.9b02454>.
- [12] Tokuhashi, K., Takizawa, K., Kondo, S., Correction to “Rate Constants for the Reactions of OH Radicals with Fluorinated Ethenes: Kinetic Measurements and Correlation between Structure

- and Reactivity,” J. Phys. Chem. A 123 (2019) 382–383.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpca.8b11536>.
- [13] Usui, T., Goto, T., Yoshimura, T., Yamada, Y., Santa, K., Oshime, Y., Takizawa, K., Mizutani, T., Evaluation of self-decomposition of trans-1,2-difluoroethylene by spark ignition, J. Fluor. Chem. 287 (2025) 110463.
<https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2025.110463>.
- [14] NEDO, HFO冷媒の自己分解反応研究会成果報告書「省エネ化・低温室効果を達成できる次世代冷凍空調技術の最適化及び評価手法の開発／次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発／次世代冷媒の安全性・リスク評価手法の開発」（2018年度～2022年度）, (2023).
-

次世代冷媒の音速・密度測定

Speed-of-Sound and Density Measurements for Next-Generation Refrigerant

狩野 祐也（産業技術総合研究所）

Yuya KANO (AIST)

e-mail: yuya-kano@aist.go.jp

1. 緒言

冷凍空調分野で広く使用されてきたフルオロカーボン系冷媒は、オゾン層破壊や地球温暖化への影響が問題視され変遷を遂げてきた。1987年のモントリオール議定書により CFC や HCFC の削減が進められ、さらに 2016 年のキガリ改正では、地球温暖化係数 (GWP) の高い HFC の段階的削減が国際的に合意された。このような背景から、GWP の極めて低い HFO や HCFO といった次世代冷媒の開発が進み、その早期実用化が求められている。次世代冷媒の実用化には、冷凍サイクルの性能評価において基盤情報となる冷媒の熱物性データが不可欠となる。特に、音速や密度といった基礎物性は、熱力学モデルとなる状態方程式の開発に極めて重要となる。本論文では、次世代冷媒の熱物性評価に資する基盤データの蓄積を目的として、筆者らが開発した流体の気相域および液相域における音速・密度の高精度測定手法[1-6]について紹介する。

2. 流体の音速

流体中に励起された音波は、その流体の密度、比熱容量など熱力学諸性質の影響を受けて伝搬するため、音波の伝搬する速度（音速）を測定することによって、流体の熱物性値情報を得ることができる。流体中の音速 w は式 (1) より表わされる。

$$w^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s = \frac{1}{\rho \kappa_s} = \frac{\gamma}{\rho \kappa_t} \quad (1)$$

ここで、 p は流体の圧力、 ρ は密度、 κ_s は断熱圧縮率、 κ_t は等温圧縮率、 γ は比熱比をそれぞれ示す。式 (1) より、流体の密度が既知であれば、音速の測定により流体の圧縮率や比熱比などの情報が容易に得られることになる。

また気相域の音速は、式 (2) に示すような音響ビリアル式で表すことができる[7]。

$$w^2 = \frac{RT\gamma^0}{M} \left\{ 1 + B_a \left(\frac{p}{RT} \right) + (C_a - B_\rho B_a) \left(\frac{p}{RT} \right)^2 + \dots \right\} \quad (2)$$

ここで、 R は気体定数、 T は流体の温度、 γ^0 は理想気体状態の比熱比、 M はモル質量、 B_a は第 2 音響ビリアル係数、 C_a は第 3 音響ビリアル係数、 B_ρ は第 2 密度ビリアル係数をそれぞれ示す。式 (2) を圧力ゼロの理想気体状態に外挿することにより、式 (3) に示すように気相域の音速測定から理想気体状態の定圧比熱 c_p^0 を導出することができる。

$$\lim_{p \rightarrow 0} w^2 = \frac{RT\gamma^0}{M} = \frac{RTc_p^0}{M(c_p^0 - R)} \quad (3)$$

c_p^0 は状態方程式における理想気体項の評価に必要となる基礎物性であり[8]、高精度な状態方程式の開発のために極めて重要な物性値情報となる。

流体の音速測定手法は大きく音波共鳴法 (Acoustic Resonance Method) と超音波パルス伝搬法 (Ultrasonic Time of Flight Method) に分けられる。サンプル密度の小さい気相域では、音響エネルギー散逸が大きく音波が伝搬しにくいいため、できるだけ低い周波数の定在波を利用した音波共鳴法が高精度な音速測定に適している。一方、サンプル密度の大きい液相域では、音響インピーダンス (音速と密度の積) が固体と液体で同程度となるため、音波共鳴法ではサンプルと共鳴器材料との相互作用が大きくなり正確な音響計測ができなくなる。液体中においては超音波パルスは効率的に送受信することができるため、液相域の高精度な音速測定には超音波パルス伝搬法が適している。いずれの手法も、基本的にはサンプル流体中における音波伝搬時間 (s) に相当する量を測定し、音波伝搬距離 (m) の情報と組み合わせて音速 (m s^{-1}) が得られる。

音波共鳴法では、サンプル気体を封入した容器 (共鳴器) 内で音波共鳴を発生させ、その共鳴周波

数 ($\text{Hz}=\text{s}^{-1}$) の測定から音波伝搬時間を得る。超音波パルス伝搬法では、サンプル液体を封入した容器（音響セル）内で超音波パルスを発生させ、パルスが送受信する間の距離を伝搬する時間を測定する。音波伝搬距離に相当する共鳴器内寸法やパルス送受信間距離は、マイクロ波共振法[9]やレーザー干渉法[10]などの計測技術を利用して直接測定するか、音速値がよく知られている水などの参照流体を用いて校正することで間接的に測定する。

3. 気相域の音速・密度測定

3.1 気相域の音速測定

気相域の音速測定のために筆者らが開発した円筒型共鳴器の概略図を図1に示す[1-5]。共鳴器は熱伝導度および電気伝導度が良い無酸素銅製であり、円筒キャビティ長さ約 50 mm、キャビティ直径約 24mm である。サンプル圧力による共鳴器形状の変形を最小限に抑えるため、キャビティ内外圧が等しくなるように SUS316 製の圧力容器内に格納されている。サンプル気体は圧力容器上部から配管を通して圧力容器内に導入され、共鳴器の側面位置に空いているサンプル導入口よりキャビティ内に充填される。なお、音波共鳴計測時には、キャビティを理想的な円筒形状に近付けるため、バルブ機構によりサンプル導入口を閉じることができる機構が設けてある。

音波共鳴は、円筒キャビティ両端の中心軸上に取り付けられた 2 つのコンデンサ型マイクロホンで計測する。マイクロホン自体は金属系材料で構成される部品のため、樹脂系材料への溶解性が高いフルオロカーボン系冷媒中でも使用できるが、マイクロホン信号を増幅するプリアンプなどの電子部品は冷媒中では使用できない。そのため、プリアンプや送信用のトランスミッタアダプタといった電子部品類は恒温槽外の室温雰囲気下に設置し、ハーメチックフィードスルーと三重同軸ケーブルを介して圧力容器内のマイクロホンと接続している。数キロヘルツから数十キロヘルツにおける音波共鳴周波数特性を計測するために、音響信号の振幅と位相のベクトル成分を計測できる周波数特性分析器 (FRA) を使用する。分析器からの出力信号を駆動アンプで増幅して送信用マイクロホンに印加し、受信マイクロホンからの音響信号をパワーモジュールで増幅して分析器に入力する。出力信号周波数をスイー

プすることで、音波共鳴周波数特性を得ることができる。

円筒型共鳴器における長さ方向の音響モード (Longitudinal Mode) の音波共鳴周波数 f_{ac}^l とサンプル気体の音速は、式 (4) の関係式で表される。

$$w = \frac{2L_0(1 + \chi p)}{l} (f_{ac}^l + \Delta f_{ac}^l) \quad (4)$$

ここで、 L_0 は共鳴器内が真空中におけるキャビティ長さ、 χ は共鳴器材料の弾性コンプライアンス、 l は音響モード次数、 Δf_{ac}^l は摂動理論に基づく音波共鳴周波数の補正項[7]をそれぞれ示す。なお、 L_0 の値は、音波共鳴周波数測定と同じ温度下におけるマイクロ波共振周波数測定から求めることができ、気相域の音速の絶対測定を実現している点が本測定装置の大きな特徴となる。マイクロ波共振周波数測定の詳細については次節で述べる。

円筒型共鳴器は図2に示すような液体恒温槽内において温度変動 $\pm 3 \text{ mK}$ 以内で精密温調される。国際温度目盛 (ITS-90) に準拠して校正された標準白金抵抗温度計と精密測温ブリッジを用いて温度を測定し、水晶発振式圧力センサでサンプルガス圧力を直接測定する。本装置による気相域の音速測定の拡張不確かさ (95%信頼区間) は約 0.04% であり、気相域の音速値がよく知られているアルゴンの測定結果[3]からも測定の妥当性が確認されている。

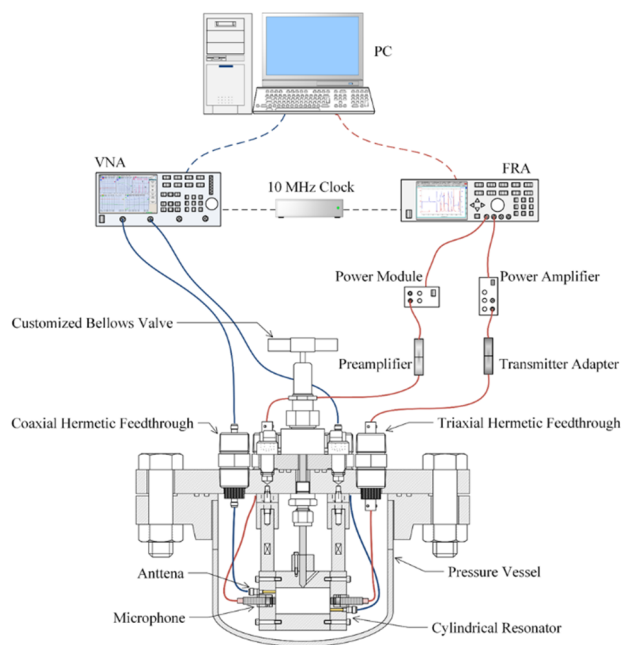
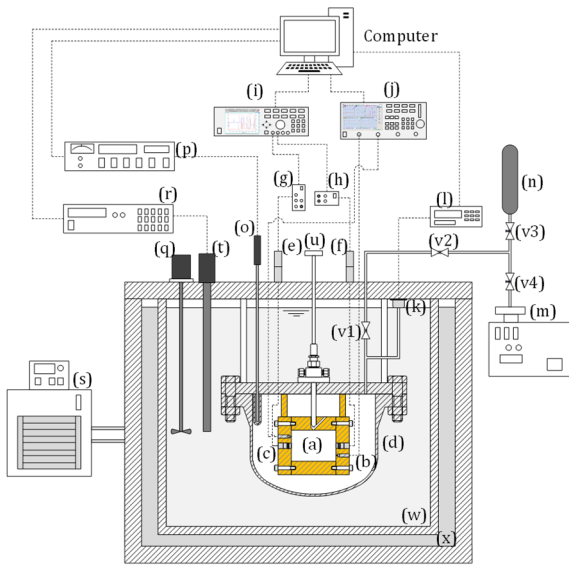


図1 円筒型音波・マイクロ波共鳴器の概略図[3]



(a) acoustic-microwave resonator, (b) microwave antennas, (c) acoustic transducer, (d) pressure vessel, (e) acoustic emitter preamplifier, (f) acoustic receiver preamplifier, (g) acoustic emitter amplifier, (h) acoustic receiver amplifier, (i) acoustic resonance frequency analyzer, (j) microwave resonance frequency analyzer, (k) pressure sensor, (l) pressure monitor, (m) evacuating device, (n) sample cylinder, (o) standard platinum resistance thermometer, (p) AC resistance bridge, (q) centrifugal type stirrer, (r) DC power supply, (s) external refrigerated circulator, (t) sheath heater, (u) sample admission valve, (v1-4) valves, (w) main thermostatic bath, (x) outer thermostatic layer

図2 気相域の音速・密度測定装置の概略図[5]

3.2 気相域の密度測定

気相域の密度測定は、図1に示した円筒型共鳴器におけるマイクロ波共振周波数の測定により、サンプル気体の誘電率から導出する。マイクロ波共振は円筒キャビティ両端に取り付けられた2つのアンテナを用いて計測する。アンテナは銅製セミリジッド同軸ケーブルの端面を平坦に切断して製作し、キャビティ内面と端面がフラットになるように取り付けられている。アンテナと銅製セミリジッド同軸ケーブルを接続し、ハーメチックフィードスルーを通じて圧力容器外にある室温雰囲気下の機器類と接続している。マイクロ波共振はベクトルネットワークアナライザ (VNA) を用いて計測し、円筒型共鳴器内におけるマイクロ波の伝送特性 (Sパラメータ) を計測して共振周波数特性を得ることができる。

円筒型共鳴器における TM モード (Transverse Magnetic Mode) のマイクロ波共振周波数 f_{em} とサンプル気体の誘電率 ϵ_r は、式 (5) の関係式で表される。

$$f_{em} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{\varphi_{pq}}{r}\right)^2 + \left(\frac{\pi s}{L}\right)^2} - \Delta f_{em} \quad (5)$$

ここで、 c は真空中の光速、 r は円筒キャビティ半

径、 L は円筒キャビティ長さ、 φ_{pq} はマイクロ波共振モードの固有値、 s はマイクロ波共振モード次数、 Δf_{em} は摂動理論に基づくマイクロ波共振周波数の補正項[9]をそれぞれ示す。式 (5) より、共鳴器内が真空中とサンプル気体中におけるマイクロ波共振周波数の比をとることで、サンプルの誘電率は式 (6) から求めることができる[1]。

$$\epsilon_r = \left[\frac{(1 + \chi p)(f_{em}^{vac} + \Delta f_{em}^{vac})}{(1 + 2\chi p)(f_{em}^{gas} + \Delta f_{em}^{gas})} \right]^2 \quad (6)$$

ここで、肩文字の“vac”および“gas”は、それぞれ真空中およびサンプル気体中における値を示す。本装置による気相域の誘電率測定の拡張不確かさは約 0.02% であり、気相域の誘電率がよく知られているアルゴンの測定結果[3]からも測定の妥当性が確認されている。

一方で、共鳴器内が真空中において異なる2つのマイクロ波共振モードの共振周波数を測定することで、前節で述べた円筒キャビティ長さ L_0 を以下のように求めることができる。

$$L_0 = \frac{c}{2} \sqrt{\frac{s_2^2 - s_1^2}{(f_{em,s_2}^{vac} + \Delta f_{em,s_2}^{vac})^2 - (f_{em,s_1}^{vac} + \Delta f_{em,s_1}^{vac})^2}} \quad (7)$$

ここで、 s_1 および s_2 は、 $s_1 < s_2$ の関係となる異なる共振モード次数を示す。このように、共鳴器内が真空中におけるマイクロ波共振周波数の測定により、測定温度における円筒キャビティ寸法を真空中の光速 ($299\,792\,485\text{ m s}^{-1}$) に基づいて求めている。

一般に密度が小さい気相域における誘電率は、以下に示す Clausius-Mossotti の式で表すことができる。

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \frac{M}{\rho} = \frac{N_A \alpha}{3\epsilon_0} \quad (8)$$

ここで、 M はモル質量、 N_A はアボガドロ定数、 α は分極率、 ϵ_0 は真空の誘電率をそれぞれ示す。式 (2) に示した気相域の音速と同じように、気相域の誘電率は式 (9) に示す誘電ベリアル式で表すことができる[11]。

$$\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \frac{RT}{p} = A_\epsilon^0 + (B_\epsilon - B_\rho A_\epsilon^0) \left(\frac{p}{RT}\right) + (C_\epsilon - A_\epsilon^0 C_\rho + 2A_\epsilon^0 B_\rho^2 - 2B_\epsilon B_\rho) \left(\frac{p}{RT}\right)^2 + \dots \quad (9)$$

ここで、 A_ϵ^0 は理想気体状態のモル分極、 B_ϵ は第2誘

電ビリアル係数, C_ϵ は第 3 誘電ビリアル係数, C_ρ は第 3 密度ビリアル係数をそれぞれ示す. 式 (9) を圧力ゼロの理想気体状態に外挿することにより, 式 (10) に示すように気相域の誘電率測定から Debye の式に基づいて双極子モーメント μ や分子分極率 α_m を導出することができる.

$$\lim_{p \rightarrow 0} \left(\frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 2} \frac{RT}{p} \right) = A_\epsilon^0 = \frac{N_A}{3\epsilon_0} \left(\alpha_m + \frac{\mu^2}{3k_B T} \right) \quad (10)$$

ここで, k_B はボルツマン定数を示す.

また, 測定した気相域の誘電率データを式 (9) にフィッティングして得られる $A_\epsilon^0, B_\epsilon, C_\epsilon \dots$ の値を用いて, 気相域の密度を以下の式から導出することができる[12].

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{(\epsilon_r - 1)}{A_\epsilon^0(\epsilon_r + 2)} - \frac{B_\epsilon}{A_\epsilon^0} \left[\frac{(\epsilon_r - 1)}{A_\epsilon^0(\epsilon_r + 2)} \right]^2 \\ &+ \frac{2B_\epsilon^2 - A_\epsilon^0 C_\epsilon}{A_\epsilon^0{}^2} \left[\frac{(\epsilon_r - 1)}{A_\epsilon^0(\epsilon_r + 2)} \right]^3 + \dots \end{aligned} \quad (11)$$

本装置による気相域の密度測定の拡張不確かさは約 1% であり, 気相域の密度値がよく知られているアルゴンの測定結果[11]からも測定の妥当性が確認されている.

このように, 開発した円筒型共鳴器による気相域音速・密度測定装置を用いて, 冷媒サンプルの気相域における音速, 誘電率, 密度, 理想気体比熱, 双極子モーメント, 分子分極率など複数の基礎物性を評価することができる. 著者らはこれまでに, 様々な次世代冷媒の状態方程式の開発に活用された基礎物性データを測定・報告している[1-5, 13-15].

4. 液相域の音速・密度測定

4.1 液相域の音速測定

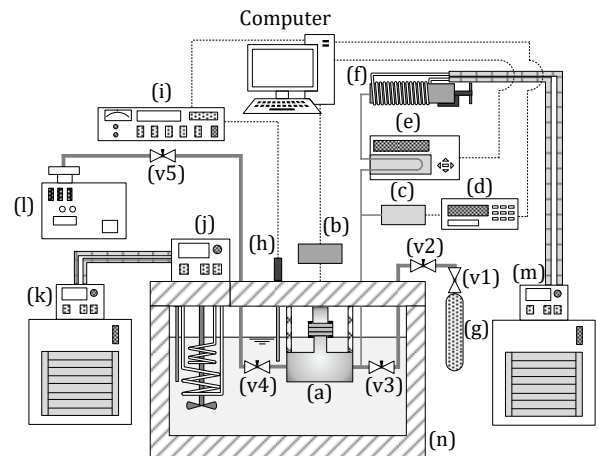
著者らが開発した液相域の音速・密度測定装置の概略図を図 3 に示す. 液相域の音速測定には, 図 4 に示すような超音波パルス伝搬式音速センサ (Anton Paar 社製 L-Sonic 6100) を使用している. サンプル液体中にある圧電素子間で約 4 MHz の超音波パルスを送受信し, パルスが素子間を伝搬する時間 t の測定から式 (12) より音速が求められる.

$$w = \frac{D_0(1 + \alpha T)(1 + \beta p)}{t - C_0(1 + C_1 T + C_2 T^2)} \quad (12)$$

式 (12) の分子項は超音波パルスの伝搬距離に相当

し, D_0 は代表温度での素子間距離, α は温度補償係数, β は圧力補償係数をそれぞれ示す. また式 (12) の分母項は超音波パルスの伝搬時間に相当し, C_0 から C_2 は温度による遅延時間補償係数を示す. 本装置では, 液相域の音速値が精度良く知られている純水 [16] および R1336mzz(Z) [17] を参照流体として測定し, 音速センサの校正を行った. 温度範囲 -10°C から 70°C , 圧力 7 MPa までの範囲で参照流体の音速を測定し, 音速参照値に基づいて式 (12) の各パラメータを最小二乗法で決定した. 決定したパラメータを用いた式 (12) の音速校正式は, 参照流体の音速を平均絶対偏差 0.015% で再現している.

音速センサは液体恒温槽内において温度変動 ± 5 mK 以内で精密温調される. 温度測定に使用した白金抵抗温度計ならびに温度測定器は, 事前に ITS-90 に準拠して校正された標準白金抵抗温度計と比較校正を行っている. ピストン式ハンドポンプにより装置系内の体積を変動させることでサンプル圧力を調整し, 恒温槽外に設置された水晶発振式圧力センサを用いて圧力を測定した. 温度および圧力測定の標準不確かさは, それぞれ 10 mK および 0.6 kPa と見積もられる. 本装置による液相域の音速測定の拡張不確かさは約 0.17% であり, 液相域の音速値がよく知られている R1234yf の測定結果[6]からも測定の妥当性が確認されている.



(a) ultrasonic pulse time-of-flight sensor, (b) ultrasonic sensor controller, (c) pressure transducer, (d) pressure display, (e) oscillation U-tube densimeter, (f) hand piston pump, (g) sample cylinder, (h) platinum resistance thermometer, (i) temperature display, (j) temperature control unit, (k) cooling circulator for thermostat, (l) vacuum pump, (m), heating-cooling circulator for piston pump, (n) liquid thermostat, (v1-v5) valves

図 3 液相域の音速・密度測定装置の概略図[6]

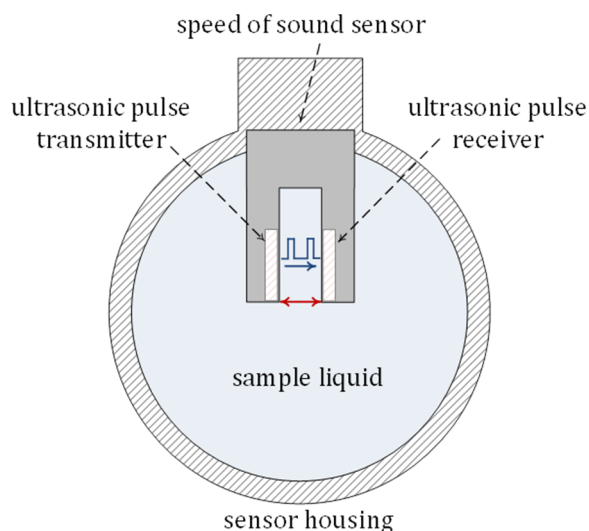


図4 超音波パルス伝搬式音速センサの概略図[6]

4.2 液相域の密度測定

液相域の密度測定には、耐圧仕様の振動式密度計 (Anton Paar 社製 DMA HP) を使用している。図3に示すように、恒温槽外に設置した振動式密度計を恒温槽内にある音速センサの配管系統に連結し、液体サンプルの音速・密度の同時測定を実現している。振動式密度計にはペルチェシステムによる温調機構が備わっており、音速センサと同じ温度に精密温調が可能である。温度測定には、事前に ITS-90 に準拠して校正された細管型標準白金抵抗温度計を振動式密度計のウェル内に挿入して測定している。振動式密度計の U 字管内にサンプル液体を封入した状態の振動周期 τ の測定から、サンプル液体の密度は式 (13) より求められる。

$$\rho = (E_0 + E_1T + E_2T^2)(F_0 + F_1p)(\tau^2 - \tau_0^2) \quad (13)$$

ここで、 E_0 から E_2 、および F_0 から F_1 はそれぞれ振動周期と密度の関係を表す温度および圧力についての装置定数、 τ_0 は U 字管内が真空状態の振動周期を示す。装置定数は、液相域の密度値が精度良く知られている純水[16]および R1336mzz(Z) [17]を参照流体として測定し、振動式密度計の校正を行った。温度範囲 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ から $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、圧力 7 MPa までの範囲で参照流体の密度を測定し、密度参照値に基づいて式 (13) の各パラメータを最小二乗法で決定した。決定したパラメータを用いた式 (13) の密度校正式は、参照流体の密度を平均絶対偏差 0.029% で再現

しており、液相域の密度測定の拡張不確かさは約 0.08% と見積もられる。

このように、開発した液相域音速・密度測定装置を用いて、冷媒サンプルの液相域における音速と密度を等しい温度・圧力条件で同時計測することができる。得られた音速・密度データから式 (1) の熱力学関係式に基づき断熱圧縮率を求めることができるため、次世代冷媒の物性評価に有効な情報を取得することができる。

5. 次世代冷媒の音速・密度測定事例

家庭用・業務用エアコンに使用される冷媒は、HFC である R32 (GWP:675) が現在主流であるが、キガリ改正の目標達成へ向けてより GWP の低い HFO への転換が求められている。しかしながら、純物質で R32 より優れた性能を有する HFO は現状では無く、燃焼性など安全面への配慮からも、混合冷媒の一成分として HFO を使用し、GWP をある程度抑制しながら性能を維持するための研究開発が進められている。著者らは、前節までに紹介した気相域ならびに液相域の音速・密度測定装置を使用し、HFO を含む混合冷媒について精密な物性評価を行うことで、次世代冷媒の早期実用化のための基盤情報整備に取り組んでいる。

HFO を含む混合冷媒の測定事例の一つとして、R32 と R1234yf (GWP:4) の二成分系混合冷媒について、音速および密度を測定した結果を図5および図6にそれぞれ示す。図5および図6ともに、縦軸は NIST で開発された R32/R1234yf の混合モデル [18]からの測定データの相対偏差を示し、横軸は上図が温度、下図が圧力を示している。各図には、混合モデルの開発に使用された NIST の音速データ [19]ならびに密度データ [20]もプロットしている。本測定では R32/ R1234yf の組成比として、アメリカ暖房冷凍空調学会 (ASHRAE) に混合冷媒として登録されている R454C (21.5/78.5 mass%) をターゲットとして、気相域では 21.5/78.5 mass%の組成比の混合冷媒(図中の Δ)について、液相域では 20.1/79.9 mass%の組成比の混合冷媒 (図中の \circ) についてそれぞれ音速・密度データを取得した。

図5に示されるように、音速データについては混合モデルとの平均絶対偏差が 0.44% 程度あり、温度ならびに圧力に対して系統偏差が生じている。本測定データと NIST で測定された音速データは良く一

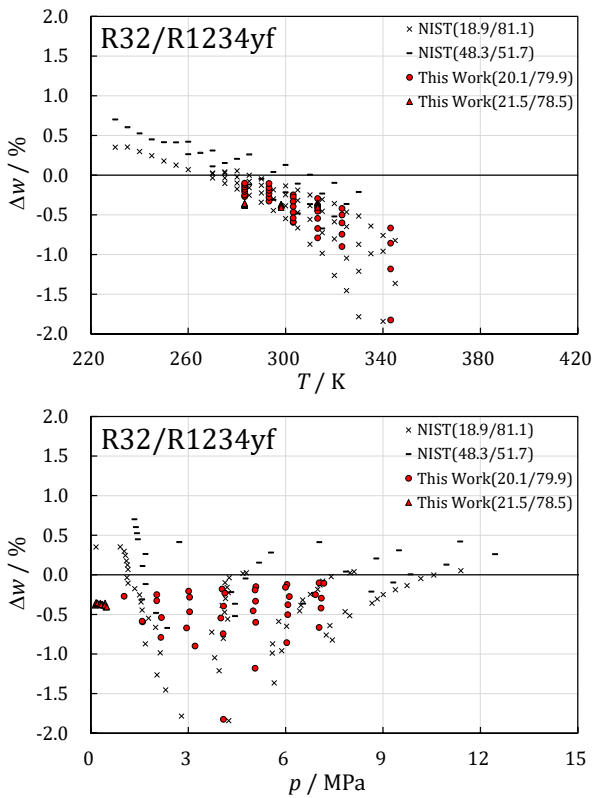


図 5 R32/R1234yf の音速データと混合モデル[18]の相対偏差図（上図：温度依存性，下図：圧力依存性，組成比単位：mass%）

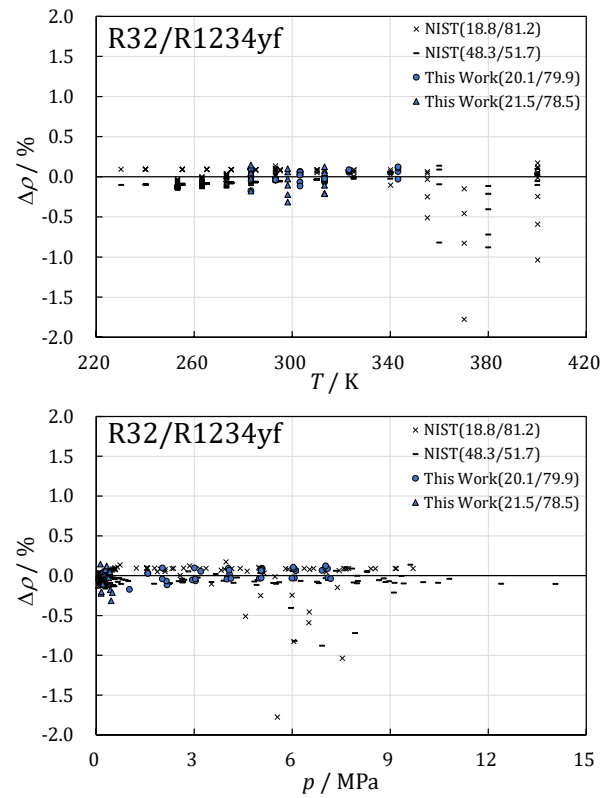


図 6 R32/R1234yf の密度データと混合モデル[18]の相対偏差図（上図：温度依存性，下図：圧力依存性，組成比単位：mass%）

致していることから、音速に関しては混合モデルの再現精度に改善の余地があると考えられる。一方で図 6 に示されるように、密度データについては混合モデルとの平均絶対偏差が 0.08 %程度と良く一致しており、温度ならびに圧力に対しての系統偏差も生じていない。本測定データと NIST で測定された密度データも良く一致していることから、密度に関しては混合モデルが十分な再現精度を有していると考えられる。

6. 結言

本論文では、次世代冷媒の物性評価を目的として開発した、気相域ならびに液相域における高精度な音速・密度測定技術についての概要を紹介した。次世代冷媒の実用化を促進するために不可欠となる基盤情報整備の取り組みが、地球温暖化という人類共通の社会課題解決の一助となることを期待する。

謝辞

本研究は、新エネルギー・産業技術総合開発機構

(NEDO) の委託事業 (JPNP23001)、ならびに JSPS 科研費 JP17H04908, JP24K00827 の助成を受けて遂行されたものであり、ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] Kano, Y., Kayukawa, Y., Fujita, Y., “Dipole moment and heat capacity in the ideal gas state derived from relative permittivity and speed of sound measurements for HFO-1123 and HCFO-1224yd(Z),” *Int. J. Refrigeration*, 118, pp.354–364, (2020).
- [2] Kano, Y., “Thermophysical properties of 1,1,1,3,3,3-hexafluoro-2-methoxypropane (HFE-356mmz) in the vapor phase measured by using an acoustic-microwave resonance technique,” *Energies*, 13, 5525, pp.1–16, (2020).
- [3] Kano, Y., “Multi-property evaluation for a gas sample based on the acoustic and electromagnetic resonances measurement in a cylindrical cavity,” *J. Chem. Thermodynamics*, 159, 106448, pp.1–13, (2021).
- [4] Kano, Y., “Thermophysical properties evaluation for a polar fluid on the basis of the experimentally determined heat capacity and dipole moment in the ideal gas states,” *J. Therm. Anal. Calorimetry*, 148,

- pp.5573–5587, (2023).
- [5] Kano, Y., “Entropy, heat capacity, and thermal conductivity of trans-1,1,1,4,4,4-hexafluoro-2-butene [R1336mzz(E)] derived from the gaseous sound speed measurement,” *J. Chem. Eng. Data*, 68, pp.574–585, (2023).
- [6] 西橋奏子, 狩野祐也, 粥川洋平, 倉本直樹, 「低GWP冷媒の物性評価へ向けた液相域音速測定装置の開発」, 日本冷凍空調学会論文集, 41, pp.377–385, (2024).
- [7] Trusler, J. P. M., *Physical acoustics and metrology of fluids*, Adam Hilger, Bristol, (1991).
- [8] Span, R., *Multiparameter equation of state – An accurate source of thermodynamic property data*, Springer-Verlag, Berlin, (2000).
- [9] Ewing, M. B., Royal, D. D., “A highly stable cylindrical microwave cavity resonator for the measurement of the relative permittivities of gases,” *J. Chem. Thermodynamics*, 34, pp.1073–1088, (2002).
- [10] Zhang, J. T., Lin, H., Sun, J. P., Feng, X. J., Gillis, K. A., Moldover, M. R., “Cylindrical acoustic resonator for the re-determination of the Boltzmann constant,” *Int. J. Thermophys.*, 31, pp.1273–1293, (2010).
- [11] Kano, Y., Kuramoto, N., “Gaseous density calculation by means of relative permittivity measurement,” *Measurement: Sensors*, 18, 100111, pp.1–4, (2021).
- [12] St-Arnaud, J. M., Hourri, A., Okambawa, R., Belanger, M., “Determination of the density in the gas phase with a computer-controlled measuring system of the dielectric constant,” *Rev. Sci. Instrum.*, 66, pp.5311–5316, (1995).
- [13] 西橋奏子, 狩野祐也, 倉本直樹, 「低GWP冷媒 R1132(E)の音速測定」, 2024年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, D323, 福岡, 2024.
- [14] Kano, Y., Nishihashi, K., Kayukawa, Y., Kuramoto, N., “The gaseous sound speed and density measurements for R1132(E) and its binary mixture with R1234yf,” *Proc. 7th IIR Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants*, DOI: 10.18462/iir.tptpr2025.1117, pp.1–6, (2025).
- [15] Kano, Y., Nishihashi, K., Kayukawa, Y., Kuramoto, N., “The gaseous speed of sound and density measurements for binary refrigerant blends of HFO-1123 and HFO-1234yf,” *Proc. 11th JSME-KSME Thermal and Fluids Engineering Conference*, 1164, Okinawa, Japan, Oct. 2025.
- [16] Wagner, W., Pruss, A., “The IAPWS formulation 1995 for the thermodynamic properties of ordinary water substance for general and scientific use,” *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 31, pp.387–535, (2002).
- [17] McLinden, M. O., Akasaka, R., “Thermodynamic properties of cis-1,1,1,4,4,4-hexafluorobutene [R-1336mzz(Z)]: Vapor pressure, (p , ρ , T) behavior, and speed of sound measurements and equation of state,” *J. Chem. Eng. Data*, 65, pp.4201–4214, (2020).
- [18] Bell, I. H., “Mixture model for refrigerant pairs R-32/1234yf, R-32/1234ze(E), R1234ze(E)/227ea, R-1234yf/152a, and R-125/1234yf,” *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 52, 013101, pp.1–20, (2023).
- [19] Rowane, A. J., Perkins, R. A., “Speed of sound measurements of binary mixtures of difluoromethane (R-32) with 2,3,3,3-tetrafluoropropene (R-1234yf) or trans-1,3,3,3-tetrafluoropropene (R-1234ze(E)) refrigerants,” *Int. J. Thermophys.*, 43, 46, pp.1–21, (2022).
- [20] Fortin, T. J., McLinden, M. O., “Vapor and liquid (p - ρ - T - x) measurements of binary refrigerant blends containing R-32, R-152a, R-227ea, R-1234yf, and R-1234ze(E),” *J. Chem. Eng. Data*, 68, pp.1565–1583, (2023).

次世代冷媒の輸送性質

Transport Properties of the Next-Generation Refrigerants

飯屋 圭史 (佐賀大学)

Keishi KARIYA (Saga University)

e-mail: kariya@cc.saga-u.ac.jp

1. はじめに

冷凍空調機器における冷媒性能は、熱力学性質に基づくサイクル性能の計算によりまずは評価される。輸送性質は、その後の行程である実際の熱交換器設計、すなわち伝熱量や圧力損失の見積の際に不可欠となる。

著者らの研究グループでは、次世代冷媒候補である HFO 系の冷媒およびその混合物について、熱伝導率および粘度の測定、予測計算モデルの検討を行っている。本稿では、次世代冷媒の熱伝導率および粘度について、著者らの成果である現時点の測定・計算モデルの公開状況について紹介するとともに、本研究で用いた測定手法および予測計算モデルについて解説する。

2. 次世代冷媒の輸送性質の測定状況

表 1 に本研究グループに関する冷媒の熱伝導率および粘度の測定状況、計算モデルの評価状況についてまとめている。冷媒の物性値の計算には、アメリカの NIST が提供している REFPROP Ver. 10.0 [24] が最も信頼性が高いとされ、広く用いられている。表中には、それぞれの冷媒に対する REFPROP Ver. 10.0 での計算の可否についても示している。REFPROP Ver. 10.0 では、一部冷媒に関して本研究グループの測定結果に基づいて計算パラメータの調整がなされている。表中の ◎ は本研究グループの測定結果を基に計算パラメータを NIST が決定し、公開している冷媒であり、△は REFPROP で輸送性質を計算可能であるが、パラメータフィッティングがなされていない理論計算値が出力される冷媒である。×印は現在のところ REFPROP に収録されていない冷媒を示している。なお、輸送性質に関する REFPROP の計算値は、計算対象物質の実測データの有無によりその不確かさが大きく異なるため注意が必要である。図 1 は REFPROP の Fluid information 画面である。本画面は計算対象の冷媒

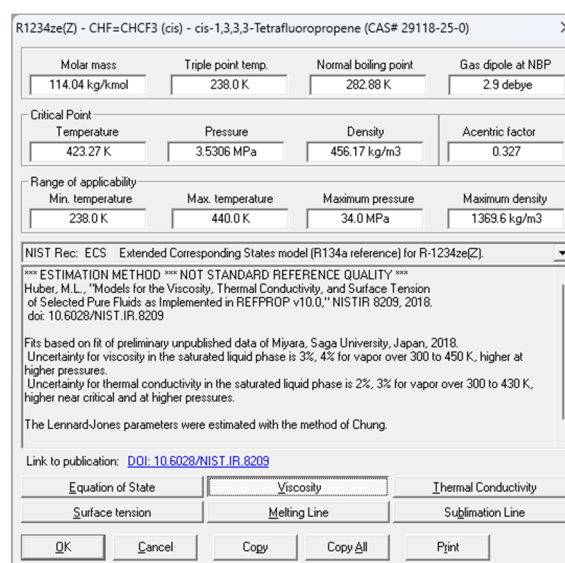


図 1 REFPROP 画面 (Fluid information)

を選択した後、[Substance-Fluid information] を選択し、下のボタンを押下することにより各物性値の計算不確かさを（存在すれば）測定データのソースとともに確認することができる。図 1 は R1234ze(Z) の粘度に関する情報であり、R1234ze(Z) の粘度の REFPROP 計算不確かさは液で 3%、蒸気で 4% と評価されていることがわかる。実測データがない場合の不確かさは 20% と記載されており、特に新規冷媒の計算には注意を要する。

3. 次世代冷媒の輸送性質の測定手法

冷媒の物性値は、実用条件を中心に幅広い条件でのデータ取得が求められる。輸送性質は温度による変化が大きいため、本研究室では温度に関しては冷凍で用いる -40 °C 程度までの低温域から高温ヒートポンプの温度帯に対応可能な 200 °C 程度までをカバーしている。

図 2 は本研究グループが有する粘度測定装置の概略である。本装置は強制循環ループであり、冷媒

表 1 次世代冷媒の輸送性質測定・計算モデル公開状況

Refrigerant (Fluid) name	Thermal conductivity			Viscosity		
	Exp data	Calc model	Calculatable by REFPROP	Exp data	Calc model	Calculatable by REFPROP
Pure fluids						
R1234ze(Z)	[1] [2]	[1] [2]	◎	[2] [14]	[15]	◎
R1336mzz(E)	[3]	[3]	×	[16]		×
R1336mzz(Z)	[4]		◎	[17]		◎
R1132(E)	[5]		×	[18]	[18]	×
R356mmz	[6]	[7]	×	[6]	[7]	×
R1224yd(Z)	[8]		△	[8]		◎
3,3,4,4,5,5-HFCPE	[9]		×	[9]		×
CF ₃ I	[10]		△	[19]		△
R1123	[11]	[11]	△			△
R1233zd(E)	[12]		◎	[20]		◎
Mixtures						
R474A			×	[21]		×
R454A			△			△
R454B			△	[22]		△
R454C	[13]		△	[22]		△
R1123+R32			×	[23]		×

はポンプ（ダブルプランジャーポンプまたはシリンジポンプ）により流量を調整されて流れる。測定部（テストセクション）は恒温槽内部に設置されており、所定の温度で一定に保たれる。冷媒圧力はテストセクションとは別の恒温槽内部に設置されているアキュムレータ内部の冷媒液をヘリウムガスで加圧し、調整している。本装置のテストセクションは長さの異なる 2 本のガラス細管が直接に接続されており、ガラス細管内に冷媒を層流で流すことにより生じる圧力損失を測定し、下式 (1) により粘度 η を算出する。

$$\eta = \frac{\pi(a_l^4 \Delta p_l - a_s^4 \Delta p_s)}{8q(L_l - L_s)} \quad (1)$$

ここに、 $\Delta p, q, L$ および a はそれぞれ細管で生じる摩擦圧力損失、冷媒の体積流量、ガラス細管の長さおよび内半径を示しており、添え字 l, s は 2 本

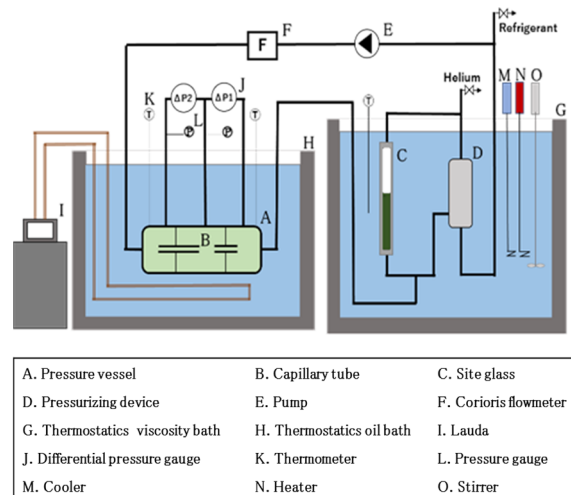


図 2 粘度測定装置概略

のガラス管の long, short を示している。なお、式(1)より明らかである通り、粘度の測定値はガラス細管

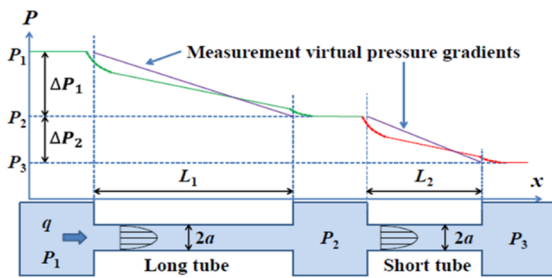


図3 粘度測定の実理

の半径に強い影響を受ける。したがって粘度測定に際して、細管内径は最も注意深く求める必要がある。

図3は本装置における粘度測定の実理を示している。冷媒が細管に流入および流出する際にはそれぞれ流路縮小および拡大に伴う圧力損失が生じ、差圧の測定値はそれらの影響が含まれる。本装置のように長さの異なる2本の細管の差圧を測定することにより流路拡大・縮小に伴う圧力損失の値を測定値から取り去ることが可能となり、このような測定手法はタンデム型細管法と呼ばれている。単細管での測定の際には、流路拡大・縮小に伴う圧力損失の値を装置乗数の形で差し引く必要があり、緻密な装置校正が必要である。図2の装置は、冷媒温度調整に恒温槽を用いており、 -40 から 50 °C 程度が測定レンジである。本研究グループは測定部を電気ヒーターの中に設置した同原理の装置も所有しており、 200 °C 程度までの高温測定が可能である。

図4に熱伝導率測定装置の概略を示す。熱伝導率はよく知られている非定常細線法を改良したものである。一定温度に保たれた長短2本の白金細線に電流を流した際の抵抗値変化に伴う非平衡電位差を測定し、これを温度応答に換算して熱伝導率を算出する。粘度測定装置と同様に、本研究グループは測定可能温度帯が異なる2セットの装置を所有しており、 -40 から 200 °C までの熱伝導率データの取得が可能である。図5は測定に用いた加熱電流の回路図である。冷媒を加熱する白金細線はホイートストンブリッジに組み込まれており、わずかな抵抗値変化を検知できるようにしている。熱伝導率は非定常法で測定するため、細線へ安定した電流の供給が必要である。本装置では試験部と同じ電気抵抗を有するダミー回路にあらかじめ所定の電流を流しておき、測定の際には水銀リレーにより回路を切り替えて試験部へ電流を流す。水銀リレーはチャタリングが発生しにくく、安定した電流の供給が可能で

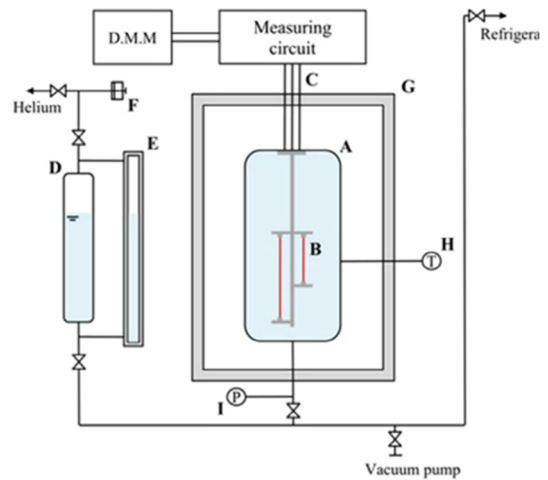


図4 熱伝導率測定装置

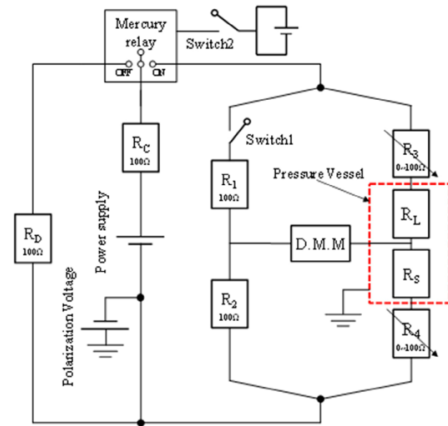


図5 ブリッジ回路

ある。ただし、現在では水銀リレーの使用・入手は困難になっており、今後の装置更新の際にはまた頭を悩ませる必要がある。また、ほとんどの冷媒分子は極性を持っているため、白金細線を通電加熱する際に白金細線と金属製測定容器間に分極電圧が発生し、測定値に大きな影響を及ぼす。測定においては分極電圧を打ち消す向きに測定容器に電圧をかけ、白金細線と測定容器の電位が等しくなるように調整を行う必要がある。

4. 次世代冷媒の輸送性質の計算モデル

取得した粘度および熱伝導率の測定データは、予測計算モデルのパラメータ決定のため用いられる。本章では REFPROP Ver. 10.0 において粘度および熱伝導率の算出に用いられている拡張対応状態原

理について述べる。紙面の都合から本稿では計算手法の概要のみを紹介する。詳細に関しては文献 [25] を参照いただきたい。

拡張対応状態原理 (Extended Corresponding State) とは、計算対象流体の状態が物性値の詳細が既知である参照流体のどの状態に対応するかを算出し、参照流体の対応状態における粘度・熱伝導率の計算結果を計算対象流体に換算して求めるものである。具体的には、計算対象流体の密度 ρ および温度 T から、参照流体の対応密度 ρ_0 および温度 T_0 を下式 (2) および (3) により求める。

$$a^r(\rho, T) = a_0^r(\rho_0, T_0) \quad (2)$$

$$Z(\rho, T) = Z_0(\rho_0, T_0) \quad (3)$$

ここに、 α^r および Z はそれぞれ無次元比ヘルムホルツ自由エネルギーの实在気体項および圧縮因子である。参照流体の粘度は下式により求める。

$$\eta(\rho_0, T_0) = \eta^*(T_0) + \Delta\eta(\rho_0, T_0) \quad (4)$$

式(4)における η^* および $\Delta\eta$ はそれぞれ希薄気体項および残余項である。希薄気体項は $\rho_0 \rightarrow 0$ の極限における粘度で定義され、温度のみの関数である。式(4)により得られる $\Delta\eta(\rho_0, T_0)$ の値を、下式(5)により計算対象流体の $\Delta\eta(\rho, T)$ に換算する。

$$\begin{aligned} \Delta\eta(\rho, T) &= \Delta\eta_0(\rho_{0,v}, T_0) F_\eta(\rho, T) \\ \rho_{0,v}(\rho, T) &= \rho_0(\rho, T) \psi(\rho, T) \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 $F_\eta(\rho, T)$ は参照流体の温度および密度を基準とした参照流体の換算温度および換算密度の関数であり、 $\psi(\rho, T)$ はフィッティングパラメータを係数とした密度および温度の多項式であり、実験で得られた粘度データを用いてパラメータを決定する。得られた計算対象流体の残余項 $\Delta\eta(\rho, T)$ を用いて式(4)を計算し、粘度を求める。粘度の実験データがない場合においても、良い状態方程式があれば式(2) (3) により参照流体の状態を求めることができ、 $\psi(\rho, T) = 1$ として参照流体の粘度から計算対象流体の粘度を求めることができる。このような場合における REFPROP の輸送性質の計算不確かさは最大で $\pm 20\%$ 程度である。

熱伝導率も粘度と同様の手法で計算することができるため割愛し、注意点のみ述べる。熱伝導率の希薄気体項の算出には粘度の希薄気体項が必要で

ある。また、流体の熱伝導率は臨界点および擬臨界点近傍で急激に上昇する特性を有しており、熱伝導率の計算には臨界補正項が存在するが、(擬) 臨界点近傍の熱伝導率データの取得は前述の特性から極めて困難である。臨界補正が必要な状態は限られており、利用頻度もそれほど多くないため、臨界補正項は通常、理論計算値 [26] を用いて算出されている。パラメータ補正の効果の一例として、図 6 および 7 にそれぞれ補正前後の液熱伝導率の測定値と計算値の比較を示す。流体は HFE-356mmz である。

図 6 は ECS モデルにおいて $\psi(\rho, T) = 1$ とした、熱伝導率の測定値を一切用いずに算出された計算結果であり、図 7 は測定データを用いて $\psi(\rho, T)$ に

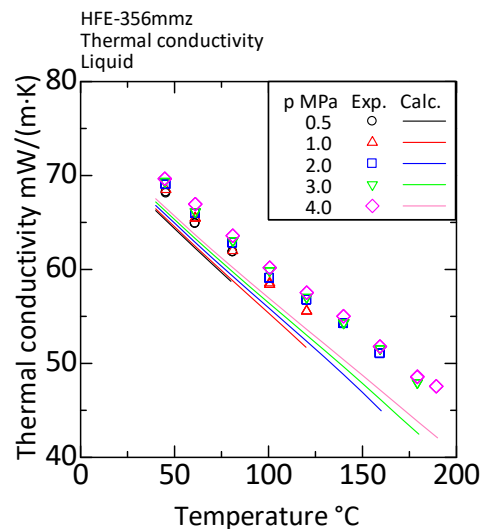


図 6 測定値と計算値（補正前）の比較

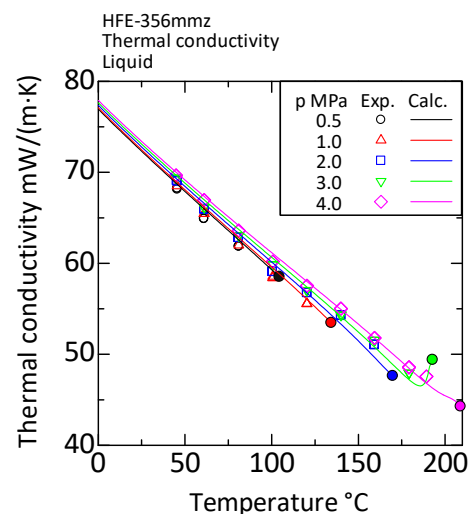


図 7 測定値と計算値（補正後）の比較

よる補正を行った計算値である。実験データの利用により計算値の実験値との偏差は大幅に改善されていることが確認できる。特筆すべきは図6の結果であり、ECSモデルによる理論計算値は測定値と10%程度しか偏差はない。冷媒の種類にもよるが、ECSモデルの適用により、例えば実験データが全くない理論計算値でもそれなりに有用な結果が期待できる。

5. まとめ

本稿では、次世代冷媒の輸送性質の測定状況、測定手法および予測計算モデルについて、本研究グループの取り組みについて概説した。今後の測定および予測計算モデルの発展により、日本が提案する冷媒が広く利用されることを期待する。

謝辞

本稿で紹介した成果の一部は、NEDO（国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託業務（JPNP23001）の結果得られました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] Morshed, M. et al., Empirical models of thermal conductivity of cis-1,3,3,3- tetrafluoropropene (R1234ze(Z)) with measurements using transient hot-wire method, *Int. J. Refrig.*, **158** (2024).
- [2] Mohammad A. I. et al., Application of the extended corresponding states model for prediction of the viscosity and thermal conductivity of cis-1,3,3,3-tetrafluoropropene (R1234ze(Z)), *Sci. and Tech. for the built Env.*, **22**(8) (2016).
- [3] Mondal D. et al., Thermal conductivity measurement and correlation at saturation condition of HFO refrigerant trans - 1,1,1,4,4,4 - hexafluoro-2-butene (R1336mzz(E)), *Int. J. Refrig.*, **129** (2021).
- [4] Md Jahangir A. et al., Measurement of thermal conductivity of cis-1,1,1,4,4,4-hexafluoro-2-butene (R-1336mzz(Z)) by the transient hot-wire method, *Int. J. Refrig.*, **84** (2017).
- [5] 水野将太郎, TUHIN Atiqur R., 仮屋圭史, 宮良明男, 非常細線法による新規冷媒 R1132(E)の熱伝導率測定, 第43回日本熱物性シンポジウム講演論文集, C224 (2022).
- [6] Alam, M.J. et al., Measurement of thermal conductivity and kinematic viscosity of 1,1,1,3,3,3-hexafluoro-2-methoxypropane (HFE-356mmz), *Int. J. Refrig.*, **103** (2019).
- [7] Morshed, M., Kariya, K. and Miyara, A., Reporting of experimental viscosity data and modeling of transport properties of 1,1,1,3,3,3-hexafluoro-2-methoxypropane (HFE-356mmz) using extended corresponding states (ECS) and residual entropy scaling (RES) technique, *Int. J. Refrig.*, **151** (2024).
- [8] Md Jahangir A. et al., Measurement of thermal conductivity and viscosity of cis-1-chloro-2,3,3,3-tetrafluoropropene (R-1224yd(Z)), *Int. J. Refrig.*, **104** (2019).
- [9] Mondal D. et al., Measurement of kinematic viscosity and thermal conductivity of 3,3,4,4,5,5-HFCPE in liquid and vapor phases, *Int. J. Refrig.*, **140** (2022).
- [10] Atiqur R. Tuhin et al., Measurement and Empirical Models of Thermal Conductivity of Trifluoroiodomethane (CF₃I), *Int. J. Thermophysics*, **45**(63) (2024).
- [11] Silvia et al., Thermal Conductivity Measurement and Empirical Model of Low-GWP Refrigerant HFO1123, *Trans. of the JSRAE*, **42**(3) (2025).
- [12] Md Jahangir A. et al., Measurement of thermal conductivity and correlations at saturated state of refrigerant trans-1-chloro-3,3,3-trifluoropropene (R-1233zd(E)), *Int. J. Refrig.*, **90** (2018).
- [13] Md.Owaleur Rahman et al., Measurement of Thermal Conductivity of R-454C in Liquid Phase by Using the Transient Hot-Wire Method, *The 14th Asian Thermophysical Properties Conference (ATPC2025)*, 324-325 (2025).
- [14] Md Jahangir A. et al., Viscosity Measurement of cis-1,3,3,3-tetrafluoropropene (R1234ze(Z)) by Tandem Capillary Tubes Method, *Int. J. Refrig.*, **131** (2021).
- [15] Morshed, M. et al., Application of Extended Corresponding States (ECS) and Residual Entropy Scaling (RES) Techniques for Modeling Viscosity of cis-1,3,3,3-Tetrafluoropropene (R1234ze(Z))

- with Revised Experimental Data, *Int. J. Thermophysics*, **44**(8) (2023).
- [16] Mondal, D. et al., Viscosity measurement for trans-1,1,1,4,4,4-hexafluoro-2-butene (R1336mzz(E)) in liquid and vapor phases, *Int. J. Refrig.*, **133** (2022).
- [17] Md Jahangir A. et al., Measurement of Viscosity of cis-1,1,1,4,4,4-Hexafluoro-2-butene (R-1336mzz (Z)) by Tandem Capillary Tubes Method, *Journal of Chemical and Engineering Data*, **63**(5) (2018).
- [18] Duc Xuan Tran et al., Measurement and Empirical Model of Viscosity of the Novel Refrigerant R-1132(E), *Int. J. Thermophysics*, **46** (2025).
- [19] Atiqur R. Tuhin et al., Experimental Investigation and Empirical Models of Viscosity of Trifluoromethane (CF₃I), *Int. J. Thermophysics*, **45** (2019).
- [20] Akio Miyara, Md. Jahangir Alam and Keishi Kariya, Measurement of viscosity of trans-1-chloro-3,3,3-trifluoropropene (R-1233zd(E)) by tandem capillary tubes method, *Int. J. Refrig.*, **92** (2018).
- [21] Masumoto T. et al., Viscosity Measurement of Low-GWP Refrigerant R474A Using the Tandem Capillary Method, 2025 年度日本冷凍空調学会講演論文集, C234 (2025).
- [22] Tran Xuan Duc et al., Measurement and Prediction Evaluation of Viscosity of Low GWP Mixtures R454B and R454C, *Trans. of the JSRAE*, **42**(1) (2025).
- [23] Mondal D. et al., Measurement of Viscosity of a Binary Mixture of R1123 + R32 Refrigerant by Tandem Capillary Tube Method, *Int. J. Thermophysics*, **41** (2020).
- [24] Lemmon, E. W., Bell, I. H., Huber, M. L., McLinden, M. O. “NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties – REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology”, Gaithersburg (2018).
- [25] Huber L. M., Laesecke A. and Perkins A. R., Model for the Viscosity and Thermal Conductivity of Refrigerants, Including a New Correlation for the Viscosity of R134a, *Ind. Eng. Chem. Res.* **42** (2003).
- [26] Perkins A. R. et al., Simplified Model for the Critical Thermal-Conductivity Enhancement in Molecular Fluids, *Int. J. Thermophysics*, **34** (2013).
-

ASME Heat Transfer Memorial Award-Science を受賞して On Receiving ASME Heat Transfer Memorial Award-Science



高田 保之 (九州大学)

Yasuyuki TAKATA (Kyushu University)

e-mail: takata@mech.kyushu-u.ac.jp

この度、米国機械学会(ASME)より Heat Transfer Memorial Award-Science を受賞いたしました。まず初めに、本受賞に際して推薦状など多大なご支援をいただきました須賀一彦会長、石塚勝元富山県立大学学長、岩城智香子日本機械学会会長に厚くお礼申し上げます。受賞は本来個人的なことなのですが、推薦(応募)から受賞に至る経緯を記しておくことは、多少なりとも未来の受賞者への参考になるのではと考えて、本稿の執筆をお引き受けすることにいたしました。

本賞は、1959年にASMEのHeat Transfer Division (HTD)に創設された賞で、現在は Science, Art, General の3つのカテゴリーに分かれています。本会に例えるなら、学術賞、技術賞、貢献賞でしょうか。我が国からは、これまで東工大の森康夫先生(1982年)、中山恒先生(1992年)が受賞されており、私が3人目となります。

昨年7月末に、ロチェスター工科大学の Satish G. Kandlikar 教授から、同賞に推薦してあげるから応募書類を整えるようにとのメールが届きました。それで8月に推薦状を書いていただけそうな方のリストと Nomination Form の原案を Kandlikar 教授にお送りしました。最終版は見ておりませんが、9月に ASME の WEB に書類一式をアップロードしていただいたようです。

今年の4月になって HTD 表彰委員長の Raj Manglik 教授と事務局から受賞決定のメールが届きました。授賞式は7月8~10日に Denver で開催される Summer Heat Transfer Conference (SHTC) の Award Luncheon で行われるとのことでしたので、急遽旅行の手配をして出席することにしました。

4月下旬には Manglik 教授から SHTC で開催される故 Arthur Bergles 教授の生誕90年シンポジウムでの講演、6月初旬には、また同教授から SHTC の Plenary Lecture の依頼がありました。Plenary の依頼が開催の1か月前?とビックリしましたが、

これもお引き受けすることにしました。

Award Luncheon では他の受賞者とともに Division Chair の Milind Jog 教授から盾と賞状(写真1~3)を頂戴し、受賞スピーチを行いました。世話になった方々への感謝とともに、相変化現象に関するジョークを披露したのですが、ウケはイマイチで大変残念な結果となりました。晴れの席では日頃慣れないことはやめた方がいいみたいです。

今回の受賞で一番感じたことは、「持つべきものは親しい友人」の一言に尽きます。Kandlikar 教授、Manglik 教授など自分の研究を理解して評価してくれる多数の友人のサポートが受賞の決め手となったことは間違いありません。

残念なことに8月末に Manglik 教授の訃報が届きました。体調がよくないと聞いてはいましたが、こんなに早く亡くなるとは思ってもみませんでした。彼は日本の伝熱コミュニティとの関係を常に気にかけてくれていたので、まことに残念でなりません。ご冥福をお祈りしたいと思います。

最後に改めてご支援いただいた方々に厚くお礼申し上げます。どうもありがとうございました。



写真1 授賞式の様子

写真2 盾と賞状



写真3 他の賞の受賞者との記念撮影

日本伝熱学会主催 講習会 開催報告
「計測技術 ～温度計測と熱物性計測～」

Report on the Lecture “Measurement Technology
— Temperature Measurement and Thermal Property Measurement —”

企画部会産学交流委員会：西剛伺（足利大学）、羽鳥仁人（ベテル）、坂本明洋（日本製鉄）、
小林健一（明治大学）、小針達也（日立製作所）、有賀善紀（KOA）

Koji NISHI (Ashikaga University), Kimihito HATORI (Bethel), Akihiro SAKAMOTO (Nippon Steel),
Kenichi KOBAYASHI (Meiji University), Tatsuya KOBARI (Hitachi) and Yoshinori ARUGA (KOA)

e-mail: nishi.koji@g.ashikaga.ac.jp

1. はじめに

産学交流委員会では毎年、産学交流事業の一環として、企業技術者等の実務に直結したテーマで講習会を開催しています。今年度は「計測技術 ～温度計測と熱物性計測～」と題して企画し、11月4日に開催しました [1]。東京両国 KFC ホール 2nd でのオンサイトと、Webex でのオンラインのハイブリッドとし、44 名の方に参加登録頂き（オンサイト 25 名、オンライン 19 名）、盛況のうちに終了しました。本稿では、その概要について報告いたします。

2. 本講習会の構成

今年度、新たな試みとして講演会を2部制にし、「温度計測」と「熱物性計測」の双方を学べるコースとしました。また、座学だけでなく、実製品を知る機会として、ミニ展示会を開催しました。具体的な構成は以下の通りです。

第一部 温度計測

- (1) 温度計測概論
- (2) 放射温度計の正しい使い方
- (3) 熱電対の正しい使い方
- (4) データロガーによる温度計測
- 総合討論

第二部 熱物性計測

- (5) 熱物性計測概論
- (6) 微小材料と薄膜材料の熱物性の測定方法
- (7) DSC を用いた熱容量測定
- ミニ展示会
- 総合討論

3. 各講演の概要

第一部では、最初に、「温度計測概論」と題して、産学交流委員長の西が、温度計測で使用されるセンサの種類について、昨年までの本講習会での講演内容も紹介しながら、説明しました（図1）。

第一部の2件目は、防衛大学校・中村元教授に「放射温度計の正しい使い方」と題して、ご講演頂きました（図2）。冒頭では、小型の放射温度計（赤外線カメラ）による実演を交え説明頂きつつ、放射温度計の測定原理から正しい温度を測定するためのトピックについて解説頂きました。

第一部の3件目は、名古屋工業大学・保浦知也准教授に「熱電対の正しい使い方（図解で学ぶ熱電回路の動作原理と測定誤差要因）」と題して、ご講演頂きました（図3）。図解を用いて、熱電対の測定原理から、測定誤差に関するトピックについて解説頂きました。

第一部の4件目は、日置電機株式会社・中村倅氏に、「データロガーによる温度計測 ～熱電対の利用にあたって～」と題して、ご講演頂きました（図



図1 産学交流委員長・西（足利大学）

4). 実際の熱電対を用いた測定にあたっての注意点や誤差要因を、実測、シミュレーション結果とともにお示し頂くとともに、データロガー使用にあたっての注意点について解説頂きました。

第二部では、最初に、「熱物性計測概論」と題して、産学交流委員の株式会社ベテル・羽鳥委員が熱伝導率の定義と熱伝導率、熱拡散率、熱浸透率の違い、熱伝導率測定法の分類と概要について説明しました(図5)。

第二部の2件目は、産業技術総合研究所・八木貴志先生に「微小材料と薄膜材料の熱物性の測定方法」と題して、ご講演頂きました(図6)。定常法による熱伝導率測定、非定常法による熱拡散率測定について、その特徴とともに解説頂くとともに、グラファイトシートやリュウグウ粒子、放熱材料で使用されるフィラーの測定事例についてご紹介頂きました。

第二部の3件目は、ティー・エイ・インスツルメント・ジャパン株式会社・前田美奈子氏に「DSCを

用いた熱容量測定：原理から測定のポイントまで」と題して、ご講演頂きました(図7)。

上記のご講演後、新たな試みとして、講師所属企業3社(日置電機、ベテル、ティー・エイ・インスツルメント・ジャパン)によるミニ展示会を開催し



図4 日置電機株式会社・中村倭氏



図2 防衛大学校・中村元教授



図5 産学交流委員・羽鳥委員(ベテル)



図3 名古屋工業大学・保浦知也准教授



図6 産業技術総合研究所・八木貴志先生

ました(図8)。ご講演で解説頂いた装置の実製品やパネルを展示頂き、対面聴講者と個別に議論を行って頂きました。

第一部、第二部ともに、総合討論の時間を設け、聴講者から頂いた質問に対して、講師の先生方から丁寧にご回答頂きました(図9)。

4. おわりに

産学交流委員会では、本学会の産学交流を促進するための各種イベントを検討中です。本講習会はその一環として、来年度もハイブリッド開催に向け準備を進めて参ります。開催内容についてご希望があればご連絡頂ければ幸いです。最後に、講師の皆様にはご多忙中のところ、資料作成含め、ご講演頂き、誠に有難うございました。また、ミニ展示会にご対応頂いた各社関係者様に御礼申し上げます。参加者の皆様におかれましても、ご多忙中のところご聴講、議論頂き、ありがとうございました。紙面をお借りして、厚く御礼申し上げます。

リンク

[1] 日本伝熱学会, “日本伝熱学会主催講習会「計測技術～温度計測と熱物性計測～」”, <https://www.htsj.or.jp/committee/lecture/20251104keisokugijutsu/>



図7 ティー・エイ・インストゥルメント・ジャパン株式会社・前田美奈子氏



図8 ミニ展示会の様子



図9 総合討論の様子

山田幸生著, 診断技術のための生体医用光学入門 近赤外光で身体を診るヘルスケアテック の紹介

*Yukio Yamada, Introduction to Biomedical Photonics for Diagnostic Technologies:
Healthcare Tech using Near-Infrared Light for Examining the Body: Referral*

圓山 重直 (東北大学)

Shigenao MARUYAMA (Tohoku University)

e-mail: shigenao.maruyama.b6@tohoku.ac.jp

1. はじめに

みなさんは子供のころに「アンパンマン」のテレビや映画を見たことがあると思います。本コラムの紹介者である昭和世代も、子育て中に「アンパンマン」を見ています。折しも昨年3月～9月に放映されたNHKの「朝ドラ」では、アンパンマンの作者であるやなせたかし夫妻を題材としたドラマを連載していました。

やなせたかしが作詞した歌で、「手のひらを太陽に」という歌があります。そこに「手のひらを太陽に すかしてみれば まっかに流れる 僕の血潮」という歌詞があります。著者の山田幸生氏は、この一節に興味を持ち「なぜ手のひらを太陽にかざすと赤く見えるのか？」を端緒として本書を執筆しています。このコラムでは、光の伝播と生体工学を結び付けた本書について紹介します。

本書は、生体医用光学の研究者だけでなく、ふく射伝熱に携わる熱工学研究者や、医工学全般に携わる研究者・技術者に有用な示唆を与える入門書と言えるでしょう。

2. 本書の内容

著者は、まず上記の歌詞から3つの疑問を提起します。

- ①「指がポーッと赤く輝く」のはなぜ？
- ②「血管の影はみえるが骨の影は見えない」のはなぜ？
- ③「縛ると指先の赤色が少し暗くなる」のはなぜ？

この疑問に対して、光伝播の観点から科学的な解答を与えることによって、読者に光学の生体応用への理解を深めています。

著者は、このほかにも静脈が青く見える理由や皮膚がふやけるとなぜ白っぽく見えるのかなど、私たちが当然のこととして考えていることに明快な説明をしています。さらに、空はなぜ青く偏光しているのか、雲が白いのはなぜか、植物はなぜ

緑色なのかなど、身近な物理現象を光学の視点から明らかにしています。

次に、現在ではスマートウォッチに搭載されている血中酸素濃度を計測するパルスオキシメーターをはじめ、眼科の標準となった光干渉断層撮影(OCT)、近赤外分光法(NIRS)、光CTと呼ばれる近赤外光トモグラフィなどの最新の光診断技術について紹介しています。

さらに、実現が大いに期待され、世界中で数十年にわたって研究開発されているにもかかわらず、実用化のめどが立っていない「非侵襲血糖値測定法」について触れ、科学的原理の解明とその技術展開の間に横たわる大きなギャップも垣間見せてくれます。

3. 本書のバックグラウンド

著者の山田幸生氏は、若いころカリフォルニア大学に留学して C.L. Tien 教授のもとで研究した経緯があります。この頃、熱工学分野では固気混相流の研究が盛んでした。山田氏は、固気混相伝熱の主要素である光散乱微粒子群のふく射伝播に関する研究に携わっていたと推察されます。この研究から、同じ光散乱媒体である生体の光伝播研究に興味を持ったことは想像に難くありません。

研究テーマは突然出現するものではなく、これまで研究者が培ってきた学問との連続性の上に立脚します。このような視点から本書を読むと、新たな魅力が感じられます。

本書は、身の回りの疑問を解決し、最先端の光計測技術を知るだけでなく、新しい分野に挑戦する若い研究者の指針となるものと言えるでしょう。

参考文献

- [1] 山田幸生, 診断技術のための生体医用光学入門: 近赤外光で身体を診るヘルスケアテック, 東京大学出版会, (2025).

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/ウェブサイト
-----	-----	------	------	-------------

本会共催、協賛行事

開催日	行事名	申込締切	原稿締切	問合せ先
2026年				
1月				
2026年1月15日 (木)	第45回 可視化フロンティア「PIV」 講習会 2026	2026年1月9日 (金)		可視化情報学会 東京電機大学 染矢 聡 E-mail:some@mail.dendai.ac.jp/16345@ms.dendai.ac.jp
5月				
2026年5月16日 (土)～17日 (日)	第68回 理論応用力学講演会/第 29回 応用力学シンポジウムに併催 開催	2025年12月20日 (土)	2025年12月20日 (土)	公益社団法人 土木学会 研究事業課 杉野 詞音 〒160-0004 東京都新宿区四谷一丁目外濠公園内 TEL : 03-3355-3559 E-mail : sugino@jsce.or.jp
6月				
2026年6月16日 (火)、23日(火)	第46回 可視化フロンティア「PIV」 講習会 2026-2	2026年6月8日 (月)		可視化情報学会 東京電機大学 染矢 聡 E-mail:some@mail.dendai.ac.jp/16345@ms.dendai.ac.jp

第 63 回 日本伝熱シンポジウム研究発表論文募集

第 63 回 日本伝熱シンポジウム実行委員会

委員長 戸谷 剛

幹事 植村 豪

開催日：2026 年 5 月 26 日（火）～28 日（木）

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

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

アクセス 札幌市営地下鉄 東西線「東札幌」駅から徒歩約 8 分

(<https://www.sora-scc.jp/access/>)

講演申込締切： 2026 年 1 月 23 日（金）

講演論文原稿提出締切： 2026 年 3 月 13 日（金）

早期参加申込締切： 2026 年 4 月 17 日（金）

ホームページ URL： <https://pub.conf.it.atlas.jp/ja/event/htsj2026>

【シンポジウムの形式】

- 講演発表形式は下記の通りです。
 - a) 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
- 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 63 回日本伝熱シンポジウム）について」をご参照下さい。

【参加登録費等】

- 参加申込の時期
早期申込：2026 年 4 月 17 日（金）まで
通常申込：2026 年 4 月 18 日（土）以降
 - シンポジウム参加費

会員一般（不課税）	早期申込：14,000 円	通常申込：17,000 円
共催・協賛学会員一般（課税）	早期申込：15,400 円（うち消費税 1,400 円）	通常申込：18,700 円（うち消費税 1,700 円）
非会員一般（課税）	早期申込：18,700 円（うち消費税 1,700 円）	通常申込：22,000 円（うち消費税 2,000 円）
会員学生（不課税）	早期申込：8,000 円	通常申込：9,000 円
非会員学生（課税）	早期申込：9,900 円（うち消費税 900 円）	通常申込：11,000 円（うち消費税 1,000 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、参加登録費が無料です。

※名誉会員は参加費が無料です。

- 講演論文集の販売について
講演論文集のみの販売は致しませんのでご注意ください。

【意見交換会】

- 開催日：2026年5月27日（水）
- 会場：札幌ビューホテル大通公園（〒060-0042 北海道札幌市中央区大通西8丁目）
- 参加費（早期申込締切：2026年4月17日（金）、それ以降は通常申込）
一般 早期申込：9,900円（うち消費税900円） 通常申込：13,200円（うち消費税1,200円）
学生 早期申込：4,950円（うち消費税450円） 通常申込：7,150円（うち消費税650円）

【参加登録と参加費等の支払い方法】

- 参加登録は本シンポジウムのウェブページから行って下さい。
- 参加費等の支払いをもって「参加登録の完了」とします。
- 参加登録および参加費等の支払方法および期限を設定します（詳細はホームページに掲載します）。

講演申込方法、講演論文集、執筆要綱

【講演申込方法】

- 講演者（登壇者）は、日本伝熱学会会員（ただし、賛助会員と特別賛助会員は除く）に限ります。講演者が日本伝熱学会会員でない場合は、2026年4月1日時点で会員となるように会員申込と会費納付を行って下さい。
- ウェブによる申込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。
- 申込では、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（伝熱シンポのみ）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申込の場合には、本号掲載のお知らせ「優秀プレゼンテーション賞（第63回 日本伝熱シンポジウム）について」をご参照下さい。
- 講演申込される方は、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。
- 講演申込は、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】

- 講演論文または講演アブストラクトの原稿を、PDFファイルで本シンポジウムのホームページから提出して下さい。講演論文はA4サイズで2～6ページ、講演アブストラクトはA4サイズで1ページとします。
- 講演内容を後日、原著論文としてTSE以外の学術雑誌等に投稿する場合は、二重投稿にならないように、1ページの講演アブストラクトを提出することができます。
- 講演論文集として電子版のみを発行し、冊子版は発行しません。
- 講演論文集電子版は参加登録サイトの個人ページを介して公開します。なお、参加できなかった日本伝熱学会会員には、講演論文集電子版をネットからのダウンロードを基本として配布します（ダウンロードが困難な会員は事務局へお申し込み下さい）。賛助会員についても同様の扱いとします。
- 講演論文集電子版はシンポジウム開催日の1週間ほど前から参加登録サイト上で公開します。したがって、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。
- 伝熱シンポ終了後、一定期間を経て講演論文集電子版の参加登録サイト上での公開を終了します。
- 原稿提出締切日までに提出されない講演論文・講演アブストラクトは、講演論文集電子版に掲載されません。

【執筆要綱】

- 下記の①または②を選択して執筆して下さい。
 - ① 講演論文（一般セッション，オーガナイズドセッション，優秀プレゼンテーション賞セッション）
 - ② 講演アブストラクト（一般セッション，オーガナイズドセッション，優秀プレゼンテーション賞セッション）
- 各原稿の書式の詳細ならびにテンプレートは，講演申込サイトにあるテンプレートをご参照下さい。
- 論文表題および著者名は，講演申込時のデータと同じものを同じ順序で書いて下さい。講演申込時のデータと異なる場合には，目次や索引に反映されないことがあります。
- PDF ファイル作成のためのファイル変換時には，「フォントの埋め込みを行う」を設定して下さい。提出前に必ず，返還後の PDF 原稿を印刷して確認して下さい。

【ご注意】

- 講演論文の原稿提出締切後の講演申込の取消し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ご遠慮下さい。
- 講演申込は共著者の許可を得てから行って下さい。
- 論文題目と著者名が，講演申込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ト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。
- 参加登録費，意見交換会参加費等の返金については，学会の規定に沿って行います。
- 本シンポジウムに関する最新情報については，随時更新するホームページでご確認下さい。

【お問い合わせ先】

第 63 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・宇宙航空工学部門 内)
E-mail : sympo2026@htsj.or.jp

優秀プレゼンテーション賞（第 63 回日本伝熱シンポジウム）について

日本伝熱学会 優秀プレゼンテーション賞委員会

委員長 櫻井 篤

幹事 西田 耕介

第 63 回日本伝熱シンポジウムでは、下記の要領で、若手研究者および学生を対象とした優秀プレゼンテーション賞セッションを設けます。日頃の研鑽の成果を披露するチャンスとして、奮ってご応募下さい。

- 開催日：令和 8 年 5 月 26 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。
- 対象：企業・大学・研究機関等の技術者・研究者で、令和 8 年 4 月 1 日現在で 28 歳以下の方。
- 応募資格：発表者は日本伝熱学会の会員（正会員・学生会員）に限ります。発表者が日本伝熱学会会員でない場合は、早期参加申込締切までに会員申込と会費納付を行ってください。**なお、本セッションで発表する方は、応募資格を必ず満たす必要があります。また、過去に本賞を受賞された方は応募することはできません。**
- 応募件数：大学に所属する学生の場合：指導教員（同じ所属大学に限る）あたり 1 名（1 件）
大学以外の研究機関、企業に所属する場合：研究グループあたり 1 名（1 件）
とします。
- 応募方法：第 63 回日本伝熱シンポジウム発表申込時に、本誌掲載の講演申込方法に従って、“優秀プレゼンテーション賞”を選択し、“指導教員または研究グループ長等”を入力してください。
なお、講演論文原稿の様式については一般セッションと同様のものとします。
- 審査・選考方法：複数名の審査員による評価に基づいて選考し、受賞者を決定します。
- 表彰：受賞者はシンポジウム第 2 日の学会総会で表彰されます。



編集出版部会からのお知らせ —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。MLでHPに公募情報が掲載された情報のみを配信します。
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：大宮司 啓文（東京大学）：daiguji@thml.t.u-tokyo.ac.jp
- ・編集出版部会長：長野方星（名古屋大学）：mailto:nagano@mech.nagoya-u.ac.jp
- ・広報委員会委員長：渡部 弘達（立命館大学）：hirowtnb@fc.ritsumei.ac.jp
- ・総務担当副会長補佐協議員：長澤剛（東京科学大学）：nagasawa.t.1752@m.isct.ac.jp
- ・事務局 横川和代（学会支援機構）：htsj-office@asas-mail.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。

理事会からのお知らせ

学会誌「伝熱」の完全電子化に関する検討と

学会論文集「Thermal Science and Engineering」の完全電子化について

日本伝熱学会は、学会誌「伝熱」および学会論文集「Thermal Science and Engineering」の印刷・発送を通じて、会員の皆様に研究成果ならびに学会活動に関する情報を継続的に提供してまいりました。しかしながら、近年の学会財政を巡る状況は一層厳しさを増しており、印刷・発送に要する経費は学会運営上、無視できない負担となっております。学会としては、限られた予算を学会運営体制の強化、シンポジウム・講習会の充実、国際活動の推進、オンラインコンテンツの拡充等、優先度の高い事業へ重点的に配分する必要がございます。

加えて、インターネット環境の普及と高度化に伴い、多くの会員が電子ジャーナルやPDFを用いて論文・記事を読覧することが一般化しております。タブレット端末やノート型パーソナルコンピュータ等により、学会誌・論文集を場所や時間に制約されず読覧できる環境が確立されつつあり、他学会においても同様の完全電子化への移行が進展しております。

これらの状況を総合的に勘案し、学会論文集「Thermal Science and Engineering」については、従来より学会誌「伝熱」と合体して編集・出版してまいりましたが、次回発行号からは完全電子化（印刷版を発行しない形態）へ移行することを決定いたしました。電子版は従来通り、科学技術振興機構が運営する電子ジャーナルプラットフォームJ-STAGE上に掲載し、学会ホームページからもアクセスできる体制を引き続き維持してまいります。

さらに本学会では、学会誌「伝熱」についても、将来的に完全電子化（原則として印刷版を発行しない形態）することを視野に入れ、来年度の時期の頃合いを見ながら、適切な移行時期や移行方法を検討しています。現時点では検討段階であり、具体的な移行時期や方法、移行期間中の取り扱いについては、今後、理事会および関係委員会において慎重に協議のうえ決定いたします。

完全電子化後も、学会誌・学会論文集としての学術的アーカイブ性を従来どおり確保し、学会ホームページおよび電子アーカイブシステム等を通じて、長期的に安定した読覧・参照が可能となるよう、適切な運用体制を構築してまいります。

「Thermal Science and Engineering」の完全電子化および「伝熱」の完全電子化に向けた検討の詳細な方針やスケジュールが固まり次第、あらためて学会誌および学会ホームページ等を通じてご報告いたします。

会員各位におかれましては、本決定の趣旨をご賢察のうえ、学会運営および学会誌・学会論文集の持続的発展のため、何卒ご理解とご協力を賜りますようお願い申し上げます。

日本伝熱学会 会長 須賀一彦
TSE チーフエディター 鈴木雄二

Thermal Science and Engineering (TSE : 日本伝熱学会論文集) 投稿規程

1. 論文内容： 熱科学・工学分野の論文で、以下の特色を有するものを対象とします。
 - (1) 独創性のあるオリジナル論文
 - (2) 未発表のプログラムの主要部分を掲載した数値解析論文
 - (3) 新計測法、データ処理手法を再現可能なように記載した論文
 - (4) 熱科学・工学に係わる論文で他の論文集では掲載され難い特異的な論文
 - (5) 生データを記載した有用な実験研究結果
 - (6) 良く整理された Review 論文
 - (7) その他、エディターが熱科学・工学分野の進展に寄与すると認めた論文
2. 言語：日本語又は英語
3. 投稿資格：特に制限を設けない。
4. 掲載論文の種別と長さ
 - (1) 原著論文：著者の原著であって、一般への公開刊行物に掲載済みまたは投稿中でない論文。
但、本学会主催のシンポジウム等に発表した論文は、原著論文として投稿出来ます。また、本学会以外でも、配布の限定された国内外のシンポジウム等の論文集、紀要、広報誌等に掲載された論文に新たな結果や考察を付け加えた場合も、同じ扱いとします。
論文の長さは、最低2頁以上とし、最大頁は定めず、読者に充分内容が伝わるために必要と認められる頁数とします。
 - (2) ショートノート：原則として4頁以下で、速報的に研究成果を公表するもの。
 - (3) 一般論文・記事：論文に関する討論及びコメントや、研究に関する記事、すでに他の刊行物に掲載された論文等を必要に応じて掲載するもの。長さはとくに定めず、必要と認められる頁数とします。
5. 著作権：原著論文の著作権は、本会に帰属させ、本会の著作権規程に従って取り扱います。ただし著者が将来自らの学術的著作物に用いる場合には、本会が制約を加えることは、原則としてありません(本会著作権規定をご参照下さい)。
また、本誌に投稿されるいずれの種別の論文・記事においても、著作権を他の学会や機関に委譲している部分については、著者の責任において、掲載許可を取得するものとします。
6. 投稿形式および方法：
論文は MS-WORD により記述し、下記の(1)~(3)のいずれかによって、投稿して下さい。
 - (1) 原稿と投稿表紙を、査読と刷り上り配置の確認のために、原則として一旦 pdf ファイルの形式で、電子メールに添付して「9. 投稿先」に記載のチーフエディターにお送り下さい。
 - (2) 日本伝熱シンポジウム論文集からの投稿の場合は、シンポジウム論文集の様式によって執筆し、実行委員会の案内に従ってご提出下さい。
 - (3) あるいは、原稿のコピー3部と表紙1部をチーフエディターあてに郵送でお送り下さい。
いずれの場合も、掲載決定後最終的には、TSE の様式に従った原稿の MS-WORD ファイルおよび署名捺印した投稿表紙を、提出して頂きます。
投稿規程、投稿表紙、原稿書式(テンプレート)は、本学会のウェブサイト上でホーム→Journals→学会論文集、にあります。この形式による投稿が出来ない場合は、チーフエディターにご相談下さい。
7. 論文掲載料： 無料。(2026年1月号より J-Stage でのオンライン公開のみとなるため、カラーページも無料となります。抜き刷りは製作できません。)
8. TSE 編集委員会
編集委員長(チーフエディター)：鈴木 雄二(東京大学)
編集委員(エディター)：
田部 豊(北海道大学)、桑原 不二郎(静岡大学)、多田 幸生(金沢大学)、
岩井 裕(京都大学)、堀部 明彦(岡山大学)、藏田 耕作(九州大学)、
横峯 健彦(京都大学)、大川 富雄(電気通信大学)、宮崎 康次(九州大学)、
千足 昇平(東京大学)、保浦 知也(名古屋工業大学)、下栗 大右(広島大学)、
熊野 寛之(青山学院大学)
幹事：李 敏赫(東京大学)

9. 投稿先 :

チーフエディター 鈴木 雄二

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学 大学院工学系研究科 機械工学専攻

e-mail : tse@mesl.t.u-tokyo.ac.jp TEL&FAX 03-5841-6411

以上

Thermal Science and Engineering (TSE: Transaction of HTSJ) Submission Guidelines

1. Type of paper: An article with either one (or more) of the following category(-ies) in the field of thermal science and engineering
 - (1) Technically original research paper
 - (2) Technically original document of numerical calculation consisting of the major part of unpublished source code
 - (3) Technically original document of new measurement or data processing technique with its details to reproduce the results
 - (4) Technically original research paper on thermal science and engineering in general that may be unique enough to be accepted for publication in other journals
 - (5) Technically original document of valuable experimental research results with law experimental data
 - (6) Well-organized review paper
 - (7) Other type of research paper or document that the editor acknowledges the contribution to the progress of thermal science and engineering
2. Language: Japanese or English
3. Authorship requirement: No restrictions
4. Categories and length of the article:
 - (1) Research paper: Technically original research paper or document of the author(s) that has neither been published nor submitted to publicly accessible journal or publication.
Research papers presented at symposiums and other meetings of HTSJ (Heat Transfer Society of Japan)'s can be submitted as a Research paper. Also, a research paper published in other publication, such as, the proceedings of symposium or other meeting except for HTSJ's, proceedings of university or research institution, newsletter, and relevant publication, with limited distribution and public access can be considered in the same manner if the paper is amended or modified by adding new research results or discussions.
Length of the paper must be prepared so as to sufficiently inform the contents to the readers. It is not shorter than 2 pages, but is not limited with maximum page number.
 - (2) Short note: Less than or equal to 4 pages in general in order to publish the preliminary and quick report of research result.
 - (3) General paper/article: Other paper or article in general, such as, discussions or comments on other article, article on research activity in general, or paper that has already been published in other journals or etc. if it is submitted in legally appropriate manner. General paper/article has no length limitation.
5. Copyright: The copyright of technically original paper or article shall be transferred to HTSJ, and subject to its copyright guideline. HTSJ in principle shall not prevent from the author(s) to use in future the contents of the paper or article in his/her own academic publications. (Please refer to the copyright guideline of HTSJ's.)
The author(s) must get permission prior to the submission to TSE of the use of any part of the paper or article of which the copyright had been transferred to other organization(s), such as academic society(-ies) or publisher(s), from the organization(s).
6. Submission: The article shall be prepared in MS-WORD format and be submitted through either one of the followings:
 - (1) Convert both the manuscript and the Submission Coversheet into pdf format in order to review and to confirm the printing format, and then send it to the Editor in Chief in "9. Submission address."
 - (2) Submission from the proceedings of the Symposium (annual National Heat Transfer Symposium of Japan, organized by HTSJ) shall be prepared by following the Symposium's proceedings format, and the author(s) is advised to submit to TSE according to the guidance of Symposium's executive committee.
 - (3) Send hard copy of manuscript (three copies) and the Submission Coversheet (one copy) to the Editor in Chief by mail.Please note that an electronic version of MS-WORD formatted manuscript and the signed copy of Submission Coversheet shall be submitted by the author(s) if the paper is accepted for publication.
Submission Guidelines, Paper Format and the Manuscript Template can be found on HTSJ's website (Home -> Journals -> Transactions of HTSJ "Thermal Science and Engineering".) Please contact the Editor in Chief if the author has any problem in submitting the manuscript in the above format.

7. Paper publication fee: Free (Please see the pricings for the reprints and color page printings.)

8. TSE Editorial Committee

Committee Chair (Editor in Chief): Yuji Suzuki (The University of Tokyo)

Committee Members (Editors): Yutaka Tabe (Hokkaido University), Fujio Kuwahara (Shizuoka University), Yukio Tada (Kanazawa University), Hiroshi Iwai (Kyoto University), Akihiko Horibe (Okayama University), Kosaku Kurata (Kyushu University), Takehiko Yokomine (Kyoto University), Tomio Okawa (University of Electro-Communications), Koji Miyazaki (Kyushu University), Shohei Chiashi (The University of Tokyo), Tomoya Houra (Nagoya Institute of Technology), Daisuke Shimokuri (Hiroshima University), Hiroyuki Kumano (Aoyama Gakuin University)

Secretary General: Minhyeok Lee (The University of Tokyo)

9. Submission address

Yuji Suzuki, Editor in Chief (The University of Tokyo)

Dept. of Mechanical Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656

e-mail : tse@mesl.t.u-tokyo.ac.jp TEL&FAX 03-5841-6411

10. Color page printing fee

(1) 1 – 2 pages: JPY40,000-

(2) 3 – 4 pages: JPY60,000-

(3) 5 – 8 pages: JPY70,000-

Contact HTSJ for color page printing fee of over 9 pages.

Color printing shall be used so as to effectively express the contents of the paper and not be intended to the use, such as to color-coding the data in a graph.

Above pricing will be effective beginning from the submission acceptance in September 2009.

11. Reprint fee

(1) Black and white pages only: JPY8,000/50 reprints JPY15,000/100 reprints

(2) Including color printing pages: JPY12,000/50 reprints JPY20,000/100 reprints

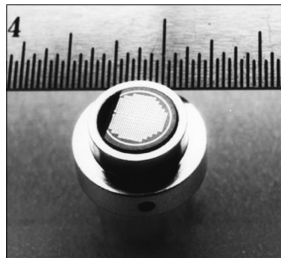
Please order the reprints after the acceptance notice prior to the publication printing process.

Above pricing will be effective beginning from the submission acceptance in September 2009.

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



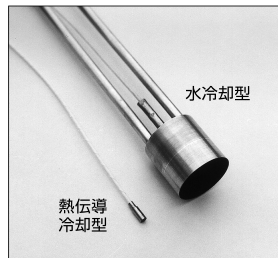
特徴

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

サーモゲージ

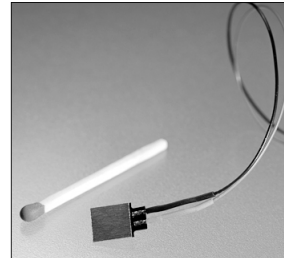


センサー本体の構造は、薄膜フォイル・ディスクの中心と周囲の温度差を測定する、差動型熱電対をとっています。フォイル・ディスクはコンスタンタンで作られており、銅製の円柱形ヒートシンクに取り付けられています。水冷式は取付け場所の自由度が高く長時間の測定が可能です。

使用例

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

gSKIN® 熱流束センサー



「gSKIN®」熱流束センサーはセンサー自身の表面を通過する熱流束を29対の超高感度な熱電対を用いて測定します。センサーは、72m²の広さを持ち、厚さは0.4mmです。レベル-0パッケージ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。

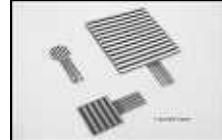
輻射センサーは、輻射熱のみを計測する画期的なセンサーです。特注形状も承っております。

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>

「水と空気」の機能性

射出成形とダイキャスト成形の生産環境を最適化

ファンクショナル・フルイッドは、水に起因する様々な障害を防止し、高効率で安定した冷却工程、製品精度の向上、省エネルギー推進を目的とした製品を提供しています。

「水と空気」の機能性を追求し、生産環境の改革を通じて、お客様の生産技術の向上と、社会課題の解決に貢献します。

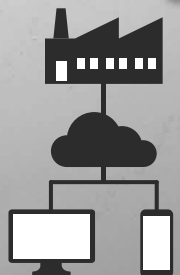
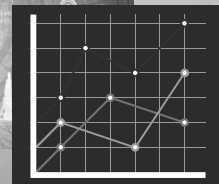
■ 射出成形用二次冷却システムUWT-1000WHX



NEW

■ 遠隔監視システム

冷却水を遠隔監視し、安定生産と省人化を実現。



編集出版部会ノート

Note from the JHTSJ Editorial Board

本号では、特集「省エネ化・低温室効果を達成できる技術及び評価手法の開発」を組ませていただきました。地球温暖化緩和に向けた温室効果ガス排出規制の強化を背景として、冷凍・空調分野では従来のハイドロフルオロカーボン系冷媒に代わる新規冷媒の探索が進められており、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構のプロジェクトを中心に、熱物性評価や安全性評価など多面的な研究開発が進められています。本号では、九州大学 東先生、九州産業大学 赤坂先生、長崎大学 近藤先生、九州産業大学 福田先生、産業技術総合研究所 狩野様、佐賀大学 仮屋先生にご執筆いただき、新規冷媒の歴史的背景から状態方程式、熱物性測定、冷凍サイクル性能評価に至るまで、最新の取り組みをご紹介します。執筆者の皆様にご心より御礼申し上げますとともに、本特集が読者の皆様の今後の研究・開発の一助となれば幸いです。

なお、お知らせで記載させて頂きましたように、学会論文集「Thermal Science and Engineering」につきましては、次回発行号から完全電子化とし、科学技術振興機構が運営する電子ジャーナルプラットフォーム J-STAGE 上で公開する予定です。

長野方星 (名古屋大学)

Hosei Nagano (Nagoya University)

e-mail: nagano@mech.nagoya-u.ac.jp

企画・編集出版担当副会長 宮良 明男 (佐賀大学)

編集出版部会長 長野 方星 (名古屋大学)

委員

(理事) 齊藤 泰司 (京都大学)

(協議員) 石崎 拓也 (宇宙航空研究開発機構), 上野 藍 (名古屋大学), 鎌田 慎 (名古屋大学), 仮屋 圭史 (佐賀大学), 古川 琢磨 (芝浦工業大学), 地下 大輔 (東京海洋大学), 西川原 理仁 (名古屋大学), 山崎 匠 (東北大学)

TSE チーフエディター 鈴木 雄二 (東京大学)

TSE 編集幹事 李 敏赫 (東京大学)

編集出版部会 連絡先: 〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町
名古屋大学 大学院工学研究科機械システム工学専攻
長野 方星
Phone: 052-789-4470, E-mail: nagano@mech.nagoya-u.ac.jp