高圧力研究の新しい展開

2. エネルギー・環境問題と流体の熱物性[†]

渡 部 康 一*

Energy and Global Environmental Issues, and Thermophysical Properties of Fluids

by

Koichi WATANABE*

Key words : Energy, Global environmental problem, Ozone depletion, Global warming,
Alternative refrigerant, Thermophysical property,
Thermodynamic property, Transport property

1 は じ め に

工業技術あるいはそれを支える工学の基礎は、エネルギー、材料および情報の3本柱であると言われるようになって久しい。我々の日常生活をみても、これらの3要素の恩恵に浴さない日々は考えられないといえよう。

世界の人口増加とより便利で、より快適な生活をめざす人間の欲望は、今世紀に入って極めて顕著なエネルギー消費の増加をもたらし、化石燃料に代表される太陽エネルギーの遺産ともいえるエネルギー資源の枯渇も年を追って確実にしのびよってきている。一方、近年のエネルギーの大量消費は明らかに全地球規模の環境問題の大きな一因となっており、様々な局面で環境破壊の元凶とさえ言われている。その意味で、前述の3要素の中で、エネルギーと環境問題とのかかわりは最も大きく密接なものがある。

物理学で学んだように、エネルギーには様々な形態のものがあ、それらの相互間ではいわゆるエネルギー変換が行われている。多様なエネルギー形態の中で、我々人類が最も幅広く活用しているのは熱エネルギーであり、人類が発明・開発してきた蒸気機関、内燃機関、火力・原子力発電プラントなどの熱機関（熱エネルギー変換システム）では、入力として与えられる熱エネルギーを我々が望む形態のエネルギーにいかに効率よく変換し出力するかに先人達の幾多の努力と工夫がむけられてきた。熱力学の基本法則からも明らかのように、入力として与えられる熱エネルギーは、これらの熱エネルギー変換システムで動力や電気エネルギーに100%完全に変換されることはなく、かなりの割合の入力エネルギーは無効なエネルギーとして（多く

の場合、その大半は再び熱エネルギーとして）環境に放出されている。したがって、エネルギーと環境問題とのかかわりは、換言すれば、熱エネルギーと環境問題として議論すべき要素が大きいことがわかる。

さらに踏み込んで考えてみると、いかなる熱エネルギー変換システムでも、入力として与えられる熱エネルギーを、有効な他の形態のエネルギーに変換するためには、エネルギー変換に直接関与する物質系が必要になる。極めてわずかの例外を除けば、現在我々が利用している熱エネルギー変換システムでは、この物質系が固体である場合は皆無に近く、気体や液体の流体系であり、一般に作動流体と呼ばれている。作動流体としては、水・水蒸気、各種のフロン系冷媒、空気、燃焼ガスなど枚挙にいとまがないが、重要な点はこれらの各種作動流体の熱・物理的諸性質（一般に熱物性と総称する）が物質系ごとに異なり、しかも圧力や温度といった系の物理状態によって大きく変化することである。したがって、ある目的のために熱エネルギー変換システムを開発する場合に、構成する要素機器の設計・製作に先だって、そのシステムで用いるべき最適な作動流体を選定する必要がある。この場合に、最適な作動流体とは高性能でエネルギー利用効率の高い熱エネルギー変換システムを構築できる物質系であるばかりでなく、環境にやさしいシステムが実現でき、それ自身環境問題上その使用が容認できる物質でなければならない。

このように論じてくれば、最適な作動流体の選定のための基幹情報として、候補となる流体系の熱物性が広い圧力・温度領域にわたって十分解明されている必要があり、それによってシステムを構成する要素設計

[†] 原稿受理 平成4年8月31日

* 正 会 員 慶應義塾大学理工学部機械工学科 〒223 横浜市港北区日吉, Dept. of Mech. Eng., Keio Univ., Kohoku-ku, Yokohama, 223

が初めて可能になること、さらにこのような地道な科学技術情報の蓄積が、ひいてはエネルギー・環境問題の解決に対する大きな寄与となり得ることが理解できよう。このような背景を踏まえて、本稿では昨今大きな話題となっている地球規模の環境問題について概観し、具体的な例としていわゆる代替フロン物質の熱物性研究をとりあげ、研究の意義、現状などについて言及することによって、作動流体の熱物性研究とエネルギー・環境問題とのかかわりを論じてみたい。

2 地球規模の環境問題

全地球規模の環境問題は、図1に示したように互いに複雑に関連しあう8つの項目に分類・整理できる¹⁾。これらのグローバルな環境問題を、わが国をはじめ先進工業国がその経済発展の過程で数多く経験した公害などによる環境汚染・破壊問題とくらべてみると、後者が比較的局地的な環境問題として発生し、その原因究明と対策も割合に講じやすかったのに対して、前者はまさに全地球規模で考えなければならない極めて大きな問題であることを指摘できる。特に地球規模の環境問題は、各国の経済成長や生活水準の向上、人口・食糧問題といった政治・経済・社会問題と極めて複雑に関連した問題であり、単に科学技術の面からのみ論ずることはできないことを強調しておきたい。

紙幅の制約により、ここでは図1に示した8つの項目のうち主要なものについてその概要をまとめてみる

図1 地球規模の環境問題

と以下の通りである。^{2),3)}

(a) 熱帯雨林の減少：焼畑・移動耕作による過度の火入れ、農牧地への転用、森林資源の過度の伐採などによって、わが国の本州全土の約半分の面積にもあたる1130万haの熱帯雨林が毎年地球上から姿を消しているといわれている。土壌や水資源の保全、気候の安定化、食糧・工業原料の供給、野生動・植物の保護といった熱帯雨林のもつ重要な役割を考えると、年間減少分の約10%（約110万ha）にあたる現在の植林事業を一層推進するとともに、古来木と紙の文化を継承したきた我々日本人にとっても反省すべき点は少なくないといえよう。

(b) 砂漠化：九州と四国の合計面積に相当する約600万haが年々砂漠化の危機にさらされている。乾燥地帯での干ばつや、過度の放牧・耕作、薪炭材の伐採などの人為的原因によって、食糧生産面で深刻な影響が現われ、飢餓や栄養不足に悩む人口が増加し、さらに新たな気候変動が生じて周辺地域の砂漠化に拍車がかかるといった悪循環が生まれている。

(c) 酸性雨：化石燃料の燃焼による燃焼生成物質中の窒素酸化物(NOx)や硫黄酸化物(SOx)の大気中への放出が増加すると、霧や雨滴に溶解していわゆる酸性の雨として地上に降下する問題が酸性雨問題である。通常は雨水の水素イオン濃度(pH値)が5.6以下の場合をいい、最初の被害はスカンジナビア諸国を中心

に湖沼や河川での魚類の減少として1960年以降に顕在化した。pH値に敏感なプランクトンや水生植物が影響を受け、食物連鎖が断たれたためである。1980年代に入ると、特に北部ヨーロッパや北米東海岸地方を中心に酸性雨による森林被害が急速に進んできたが、葉の気孔を冒して植物呼吸に影響する直接要因と土壌の酸性化・変質をもたらす間接的要因によるといわれている。既に北部ヨーロッパでは全森林面積の50%を超える広大な地域での被害が報告されているほか、大理石等の建造物・文化財への影響も顕在化している。

(d) 温暖化：いわゆる温室効果ガスの大気中濃度の増加による地球温暖化問題は最も複雑で、波及効果の大きな環境問題となっている。図2は地球の熱収

支を示したもので、大気圏に到達する太陽からの放射エネルギーを100とした相対値が示してある。地球上に生活する我々人類は、地球をとりまく大気という温室の中で生存しており、大気中の水蒸気や二酸化炭素などの微量ガスが、地表面からの放射赤外線を吸収する温室効果によって、地球と周囲大気の熱収支を微妙に保持していることがわかる。この温室効果によって、地表面温度は約35℃も上昇しており、万一この効果がなければ地表面温度は氷点以下の人類や生物の生存を許さぬ温度レベルになっていると推定されている。

図2 地球大気エネルギー収支

現在、人類が全世界で年間消費しているエネルギー総量は、原油換算で約33億klであり、地表面に到達する太陽エネルギー総量の0.006%にすぎない。しかしながら、増加する生産活動や人口に伴って、表1に示したように主要な温室効果ガスの大気中への放出が急増しており、地球をとりまく大気系での熱収支がくずれ、地表面温度（したがって、地表の約70%の面積を占める海水の温度）の上昇が生じ、温室効果による地球全体の温暖化の進行が懸念されている。特に二酸化炭素の温室効果に対する寄与率は約49%と大きく、全世界で年間約220億t（炭素量換算で約60億t）も大気中に放出されており、しかも年々顕著な増加を示しているのが実情である。開発途上国で今後ますます増大することが確実なエネルギー消費や生産活動の拡大を考えると、この問題の大きさを再認識せざるを得ない。戦後いち早く燃料転換を図り、世界一の省エネルギー技術確立し、その普及を推進してきたわが国としては、このような技術開発の成果を他の国々により積極的に技術移転するとともに、熱エネルギー変換

表1 主要な地球温暖化（温室効果）ガスと特徴

ガス	大気中濃度 (体積 ppm)	年間増加率 (%)	大気中寿命 (年)	赤外線吸収帯 (μm)	温室効果に 対する影響 (%)
CO ₂	350	0.5	~500	2.8, 4.3, 13~15	49
CH ₄	1.7	1.0	7~10	3.3, 7.6	18
N ₂ O	0.31	0.25	150	4.5, 7.8	6
O ₃ (対流圏)	0.02~10	1~2	< 5時間	9.3~9.7	~2
CFC-11	2.3×10 ⁻⁴	5	75	9.2~11.8	5
CFC-12	3.8×10 ⁻⁴	5	110	8.7, 9.1, 10.9	9
H ₂ O	—	0	—	2~3, 5~7	~11

システム・機器の高効率化、自然・未利用エネルギーの活用、森林保護・植林の推進、燃料成分中からの炭素分抽出、さらには二酸化炭素の回収・固定化技術の確立などの諸分野でも一層の努力を重ねる必要があることを強調しておきたい。

3 成層圏オゾン層の保護とフロン問題^{4),5),6)}

地球温暖化問題と並んで火急の課題として重要視されており、既に数年来国際規制が進められている問題が成層圏オゾン層保護とそのためのフロン規制問題である。大気圏のあらましは図3に示した通りで、大気の95%は地表面から高度約20kmまでのところに存在している。その主成分は高度250kmあたりまでは窒素、約2000kmまでの高度では酸素、さらに上空ではヘリウムといわれている。高度約100km程度までの均質圏では、水蒸気やオゾン(O₃)を除くと、乱流・対流効果などにより、大気組成はほぼ一定に保たれている。

大気中のオゾンは広く分布しており、約10%が対流圏に、残りの90%が成層圏に存在している。特に高度約35km付近ではオゾン濃度は6~8ppmと最も高く、この付近の高濃度を示すオゾン分布を一般にオゾン層と呼んでいる。大気中のオゾン量は季節、昼夜の別、太陽の黒点活動などによってかなり大幅に変動することが知られており、特に対流圏オゾンと成層圏オゾンとを区別して論じなければならない点は重要

図3 地球をとりまく大気とオゾン層

である。すなわち、両者とも太陽光による光化学反応によって生成するが、その反応プロセスが異なる点には留意すべきである。前者は地上から放出される炭化水素や窒素酸化物の増加とともにその生成量は増えるものの成層圏高度までは上昇できない。一方、後者は対流圏まで降下して対流圏オゾンの増加に寄与できるので、この点でも後者の役割が重要となる。

太陽光スペクトルの中で、短波長(1~400 nm)域の電磁波は紫外線と呼ばれ、生物学的影響を論ずる都合上、UV-A (320~400 nm)、UV-B (280~320 nm) および UV-C (280 nm 以上) の3つの波長帯に分類される。UV-A はオゾン層で吸収されることなく地表面に到達し、UV-C は成層圏内で散乱・吸収されてしまうので地上には到達しない。一方、UV-B の一部は地表面に到達し、人体をはじめ生物・生態系に影響を与えることが知られている。すなわち、成層圏オゾン量の増減によって、地上に到達する UV-B の量も変動するわけで、オゾン量の減少は人体の皮膚の角質化や微生物の死滅を促進する結果になる。信頼できる観測結果は、数年来南極や北極上空でのオゾンホール³⁾の存在を指摘し、最近では中緯度地帯上空でのオゾン層の減少を報告しているが、これは地上で放出された大気中寿命の長い一部の特定フロン類が成層圏オゾンを破壊し、その濃度が極端に低下し、概念的にはオゾン層そのものが局所的に薄くなった事実を意味している。

オゾン破壊のメカニズムは、塩素原子や臭素原子を含む一部のフロンが成層圏に達すると、紫外線の作用で分解し、それにより生成する塩素や臭素が長期間にわたって成層圏内に残存し、触媒として作用するため、オゾンの生成・消滅を支配する動的バランスが崩れ、オゾン濃度の低下につながるものと考えられている。このようなオゾン破壊の化学反応モデル自体にも議論の余地は多少残されてはいるものの、最近の観測データによれば、特定フロン類のオゾン破壊あるいは温暖化への寄与はもはや否定できず、いわゆるフロン問題が大きくクローズアップされる理由となっている。

なお、特定フロンなどの国際規制の現状については文献^{3),7)}にゆずるが、1972年に発足した国連環境計画(UNEP: United Nations Environmental Program)のもとで、1987年9月にはいわゆるモントリオール議定書が採択され現在までに70カ国以上が同議定書を批准し、締約国会議に加盟・参加している。この締約国会議は、第1回(1989年5月:ヘルシンキ)、第2回(1990年6月:ロンドン)に続いて、第3回(1992年11月:コペンハーゲン)の開催が予定されており、第2回会議の折に決議された CFC (chloro-fluorocarbon)、特定ハロンおよび四塩化炭素の2000

年1月1日全廃とする決定は、さらに前倒しとなり現状では1995年末に加速される見込となっている。また、このような国際規制の加速化に呼応して、現在は過渡的規制対象物質とされている HCFC (hydro-chlorofluorocarbon) 類の国際規制がいよいよ本格化するものと予想されており、特に空調・ヒートポンプ機器用の作動流体(冷媒)として広範囲に使われているフロン-22 (HCFC-22: CHClF₂) の国際規制時期が業界関係者の目下の最大の関心事となっている。なお、フロン類の定義、分子構造に基づく一連の冷媒番号⁴⁾⁻⁶⁾の付け方などについては文献を参照されたい。

4 流体熱物性の種類と研究の必要性

4.1 流体熱物性の定義・種類⁸⁾⁻¹⁰⁾

既述したように、熱物性という用語は、より厳密には熱・物理的性質と呼ぶべきもので、数多くの流体のそれぞれに固有の熱的・物理的性質の総称として用いられている。重要な点は、対象とする流体系の示強因子(示強性状態量、示強変数とも呼ぶ)である圧力、温度あるいは密度に依存して、これらの物性値が変化し、特に気・液両相間の相変化に際してはこれらの変化が極めて顕著に現れる点である。

熱物性の定義は多くの場合かなり広義に解釈され、大半の巨視的な性質が包含される。その分類に関しても、必ずしも統一的でなく便宜的な側面もあるが、表2に示した分類法は比較的一般的でわかりやすいと筆者は考えている。流体系が単一物質系の場合には、表2にも示したように、平衡性質あるいは熱力学性質、非平衡性質あるいは輸送性質、さらにふく射性質を含めたその他の性質といった3グループに分類・整理できよう。平衡性質は流体系が熱力学的平衡状態におかれた場合に現れる諸性質であって、エントロピーを除けばすべて実測が可能であることや表面張力などの一

表Ⅱ 主要な熱物性値の分類

平衡性質 (熱力学性質)	PVT性質、密度、圧縮係数、等温圧縮率、断熱圧縮率、線膨張率、体積膨張率、蒸気圧、融解圧、昇華圧、ビリアル係数、飽和液体密度、飽和蒸気密度、飽和固体密度、エンタルピー、内部エネルギー、エントロピー、定圧比熱、定容比熱、音速、断熱指数、ギブズ関数、ヘルムホルツ関数、ジュール・トムソン係数、等温絞り係数、屈折率、表面張力、界面張力、静的誘電率、双極子モーメントなど
非平衡性質 (輸送性質)	粘性率(粘性係数)、動粘性率(動粘性係数)、熱伝導率、熱拡散率(温度伝導率)、自己拡散係数、相互拡散係数、プラントル数、電気伝導率など
ふく射性質	ふく射率、反射率、平均吸収係数、透過率など
その他の性質*	沸点、融点、凝固点、三重点、臨界点、引火点、発火点、留点、流動点、発熱量、発火エネルギー、蒸発熱、融解熱、昇華熱、溶解度、相平衡、イオン積、爆発限界、絶縁耐力など

* この分類に含まれる物性値の大半は熱力学性質に属するとも考えてよいが、特定の物質系を対象にこれらの名称を用いることも多いのであえてこの分類に含めた。また、相境界や相転移に関与する物性値についても同様である。

部の平衡性質を除けば、熱力学理論によって後述する最も基本的な PVT 性質の実測値情報に基づき解析的な手法で大半の平衡性質を計算できることなどが特徴となっている。一方、非平衡性質は流体系内にポテンシャル量のこう配が存在する際に現れる諸性質であって、例えば系内の速度こう配に基づき粘性率が、温度こう配により熱伝導率が、さらに濃度こう配によって拡散係数がそれぞれ定義される。なお、表 2 には密度や定圧比熱などの平衡性質と上述した非平衡性質に属する粘性率や熱伝導率などの両性質を含む形で定義されるプラントル数、熱拡散率（温度伝導率とも呼ぶ）なども非平衡性質の範ちゅうに含めてある。

さらに実用上多く用いられている流体系には、2 成分混合物に代表される多成分系混合物が存在する。これらの多成分系混合物は多くの場合いくつかの相（系の凝集状態）を示すことが多く、上述した単一物質系（純物質系）に対する熱物性の基本的分類のほかに、例えば気気平衡、気液平衡、溶解度、界面張力といった相平衡性質として分類することもできる一連の重要な性質があり、広義にはこれらの諸性質も熱物性の範ちゅうに含めることができよう。

4.2 流体熱物性研究の意義

前項で概観した流体系の数多くの熱物性はいずれも巨視的な性質として把握することができるが、流体系そのものの微視的な要素に大きく依存していることは明らかである。すなわち、流体系を構成する分子の内部構造、形状、双極子モーメントなどで代表される極性による分子内部の諸性質（分子内性質）と、複数の分子間に作用する相互作用や分子の凝集・集合状態に起因する分子間の影響（分子間性質）とによって決定されるものと考えられる。したがって、このような複雑かつ多様性のある諸因子を完全に考慮に入れた分子論モデルに立脚する理論は現状では確立されておらず、巨視的に把握できる熱物性を何らかの方法で実測せざるを得ないのが実情である。もちろん、比較的単純な流体系（例えば単原子気体など）を対象に、一部の熱物性を分子論的に取扱ひ、個々の熱物性を解明する研究手法も次第に進歩してきてはいるが、依然として比較的低圧下での理想化が可能な系の物理条件の場合に限定されたりすることが多く、特に高圧下での流体系の熱物性をはじめ多成分混合系の示す熱物性の解明には理論モデルの適用はまったくといってよいほど成功していない。

このような背景を踏まえて、流体系の熱物性研究の意義を整理してみると以下のような項目に集大成できよう。

(1) 対象とする流体系の主要な熱物性に関する精密な実測値情報を集積することによって、分子の内部構

造をはじめ分子間相互作用などをより厳密に記述できる理論モデルの構築に寄与することができる。これによって、巨視的な熱物性値情報と分子構造などとの関連性をより完璧に把握するための理論体系を将来確立できる道を拓き得る。

(2) 流体系を取扱う数多くの学問分野において、それぞれの系に固有な熱物性値情報が所期の圧力・温度条件のもとで正確に把握できれば、当該の学問分野の研究の一層の推進・発展に貢献することができる。

(3) 特に工業技術・産業技術の分野について見れば、対象とする流体系の熱物性値情報がより正確に入手できると、研究開発から工業化・製品化に至るあらゆる段階で大幅なコスト削減が可能となり、迅速な研究開発と高性能なシステムや機器の商品化が可能になる。

例えば、高性能な熱エネルギー変換システムを開発する場合に、作動流体となる候補物質に関する主要な熱物性値情報は企画立案、設計、試作、性能試験、実用化設計、生産加工、商品化、運転・管理といった一連のエンジニアリングのどの段階にあっても、必須の基本的情報として極めて重要である。典型的な例として、ある作動流体の基礎的な熱物性が十分解明されていなかったために、必要以上に大きなパイロット・プラントを試作する結果になってしまい、技術開発のためのコストや時間がそれだけ増大してしまうといった事例も散見する。

(4) 過去には予見されなかった社会・経済的諸問題（例えば本稿で主題とした全地球規模の環境問題）などの発生によって、在来の流体系とはまったく異なる視点で新しい流体系をシステムに導入する（環境問題上容認できる代替フロン物質を用いた冷凍・空調システムなど）必要性が生じた場合に、候補となる物質系そのものの開発が当然必要となる。このような場合に、規制対象となる従来の特定フロン類（CFC や HCFC）に代る最適な代替フロン類（HFC）をいくつかの候補物質の中から選定しなければならない。この際、目的とする熱エネルギー変換システムや要素機器の開発と並行して、新規にその最適候補物質をできるだけ容易に、安全かつ低コストで製造するプロセスを確立する必要も生じる。したがって、このような新規物質群の基本的な熱物性がある程度解明された段階で、ハード面の要素機器・システムの検討と新しい製造プロセスの開発が並行に実施できることになる。上述した視点は、環境問題の解決に貢献し得る流体熱物性研究の隠れた側面として重要であることを指摘しておきたい。

(5) 工学的・工業上の応用のためには、できる限り正確かつ簡略な熱物性の推算法を確立することの意義は大きい。このことは、特に実用上重要な多成分混合

系の場合に重要であり、そのためには主要な工業上重要な純物質系の諸性質が十分究明されている必要がある。純物質系の熱物性に関する実測値情報に立脚して、このような混合流体系の熱物性の推算法が経験的に提案できるわけで、この点も流体熱物性研究の大切な一面といえよう。

5 流体熱物性研究の方法論^{9)~11)}

5.1 一般的手法

数多くの流体熱物性を解明するためには、現状では実験的研究に頼らざるを得ないことは既述した。したがって、できる限り高精度で広い圧力・温度領域にわたって個々の熱物性を精密に計測するための測定法の開発が重要であり、最近では電子・OA 機器の発達に呼応して、測定の自動化・迅速化への取組みが盛んである。また、複数の実測値情報が報告・蓄積された段階では、入手できた数値情報の鑑定・評価が重要になり、専門家によるこの種の作業を今後さらに発展させる必要がある。

一般に、信頼度が高いと評価された実測データに基づいて、様々な相関式の作成や状態方程式の開発などに関する解析的研究が進められる。この場合に、対象とする流体系の一連の熱物性の記述に内部矛盾を含まない（熱力学的一貫性のある）解析関数を導入する必要がある点は重要である。

このようにして、一連の相関式・状態方程式が開発されれば、それに基づきいわゆる熱物性値表や各種の熱力学線図が作成され、工学・工業上の応用に幅広く活用される。また、同時に一連の計算機用プログラムを集大成したコンピュータ・パッケージやデータベースの構築なども実施できることになる。

5.2 平衡性質の精密測定¹²⁾

平衡性質の中で、最も基本となる熱物性は系の圧力・体積（密度）・温度間の相互関係を与える PVT 性質、蒸気圧および臨界点における PVT 値を意味する臨界定数値であるといえる。例えば 1995 年末に全廃が予定されている特定フロン CFC-12 (CCl_2F_2) に代るべき代替フロン HFC-134a ($\text{CH}_2\text{F} \cdot \text{CF}_3$) の場合では、この新規物質が製造されるようになった 1986 年以降現在までに約 1000 点近くの PVT 性質に関する実測データが報告されており、チャンピオン・データでは密度の測定精度は 0.01% と高精度である。

一方、PVT 状態曲面の曲率に相当する 2 階微分量により定義される定圧比熱や音速の精密測定も重要であり、HFC-134a では 0.01% の高精度で音速の実測値が報告されている。

5.3 非平衡性質の精密測定¹³⁾

流動性の指標となる粘性率と熱エネルギーの移動・輸送現象の基礎となる熱伝導率の測定が中核となる。

多くの流体系では、前者の精密測定の方が後者のそれよりも若干容易であり、実測値情報も前者の方が多い。

測定法としては、前者については毛细管法、回転振動法（円板や円筒）、落体法（転下球や落下円筒）、ねじれ振動・振動弦法などが開発されており、後者では従来の定常法（同心円筒法や平板法）に代って、非定常細線法などの新しい測定技術が主流になりつつある。なお、HFC-134a の例では、常圧蒸気の粘性率で約 0.5% 程度、圧縮液体の熱伝導率で約 1% 程度の測定精度の実測値が得られている。

5.4 解析的研究

流体系の熱物性を解析的に体系化するための基本は、平衡性質を首尾一貫して表現するための状態方程式の開発である。このための研究は長い歴史をもち、これまでもファン・デア・ワールス状態方程式以来数多くの式が提案されてきている。最近の傾向としては、気・液両相にわたる広い圧力・温度範囲を網羅できる単一の関数形をもつ状態方程式の開発が主流であり、大半が圧力を温度と密度の関数として（換言すれば、ヘルムホルツ関数を温度と密度の関数として）表現する手法が一般的である。HFC-134a や CFC-11 (CCl_3F) の代替物質である HCFC-123 ($\text{CHCl}_2 \cdot \text{CF}_3$) についても、優れた状態方程式がわが国の研究者によって開発されており、両代替フロン物質を対象とした世界的にも最初の完璧な熱物性値表の基礎式になっており、刊行されたこの出版物はフロン問題への新しいチャレンジの好個の成果として国際的にも高い評価を得ている。

6 おわりに

エネルギー・地球環境問題の解決に、その最も基本となる基礎科学・工学の面から貢献している流体熱物性研究に注目し、研究の意義とともに手法のあらましを述べた。広い分野の話題を限られた紙幅でカバーすることは到底不可能であったが、まったく異なる分野で活躍されておられる本誌の読者諸兄姉に多少なりともこの分野の背景や動向をご理解いただく契機となれば幸いである。

参考文献

- 1) 環境庁, 平成 2 年度環境白書, (1991).
- 2) 渡部康一, メカライフ, No.12, 6 (1990) 日本機械学会
- 3) 渡部康一, ターボ機械, 20, 330 (1992).
- 4) 蒔田 董, 化学工学, 52, 601 (1988).
- 5) 蒔田 董, 熱物性, 3, 21 (1989).
- 6) 渡部康一, 地熱, 26(1), 45 (1989).
- 7) 高市 侃, 熱物性, 5, 227 (1991).
- 8) 日本機械学会編, “伝熱工学資料 (改訂第 4 版)”, pp. 307-311 (1986) 日本機械学会
- 9) 渡部康一, 応用物理, 49, 768 (1980).
- 10) 蒔田 董, 高圧力の科学と技術, 1, 12 (1992).
- 11) 蒔田 董, 機械の研究, 42, 781 (1990); 42, 883 (1990).
- 12) 渡部康一, 冷凍, 65, 1144 (1990).
- 13) 蒔田 董, 冷凍, 65, 1153 (1990).
- 14) 日本冷凍協会, 日本フロンガス協会編, “代替フロン類の熱物性”, (1991) 日本冷凍協会
- 15) 渡部康一, 熱物性, 5, 60 (1991).