随 想

小型冷凍機のこの 30 年の発展を振り返って

井上 龍夫*

Looking Back for the Last 30-year Progress of Cryocoolers

Tatsuo INOUE*

1. はじめに

久しぶりに本誌で小型冷凍機関連の特集企画が組まれた。筆者自身は民間企業で小型冷凍機の研究開発に 30 年ほど携わり、最近その研究開発の現場から退いた。その間、当誌の編集委員を務めた 1996 年からの 10 年あまりの間に小型冷凍機および熱音響デバイス関連の特集を 3 回企画させてもらった。最近の 2 回（2001 年および 2008 年）は「熱音響デバイス」関連の特集であり、小型冷凍機に焦点を当てた企画は 15 年前の 1998 年の特集「熱音響冷凍機」であった。この間冷凍機の特集が組まれなかったのにはそれなりの背景がありそうである。確かに私が関わってきたこの 30 年を振り返ってみると前半の 1980 年代～90 年代はそのあとの 2000 年以降に比べて革新的な進歩がいくつかあったように思う。

今回の特集にあたり、担当編集委員から何か小型冷凍機について私見を書くようにとの依頼があり、あくまでも筆者の個人的な雑感ではあるが、これまでの小型冷凍機の進歩を振り返り、今後の発展に期待するところを少し述べてみたい。本特集のタイトルが「中・小型冷凍機の最近の話題について」であるので、本号に掲載される最近の研究成果の位置付けを皆さんが理解されるためにも、少し過去のことを振り返ることは意義があるかと思いペンを取った。

振り返りの前に、最近の国内の小型冷凍機業界の状況の変化について言及したい。ご存知の方も多いと思うが、ここ数年の間に小型冷凍機のメーカーが相次いで事業の撤退、縮小の道を歩んでいる。日本の小型冷凍機の代表格である S 社の 4KGM 冷凍機が主に MRI 用の超電導マグネット冷却用冷凍機として世界市場を独占している状況は我国の小

型冷凍機技術のレベルの高さを示すものであるが、その一方でそれ以外の用途、市場が広がらず、メーカーでは冷凍機事業の成立性自体が課題になってきている状況もある。

さらに加えてヘリウムの供給不足、価格高騰の問題も深刻になっている。このヘリウム供給問題は別としても、今後の超電導の民生応用、産業化の拡大に向けて、液体ヘリウムや液体窒素などの寒剤に頼らない小型冷凍機による直接冷却がはいよいよ期待されるこの時期に、我国の小型極低温冷凍機の研究開発がトーンダウンすることは、ユーザーの立場である企業や研究者にとっては大きな障害になるのではないかと懸念している。

2. 小型冷凍機のこの 30 年のあゆみを概観する

2.1 小型冷凍機の冷却対象・用途について

ここでいう小型冷凍機とは温度域として 4 K～100 K 程度、冷凍出力として 1 W～100 W クラスとする。またこの温度域で汎用的に用いられる「蓄冷型冷凍機」を対象として、まずはその用途を簡単に振り返ってみる。

1980 年代からの小型冷凍機の主な冷却対象は現在でもその主要用途であるクライオポンプであり、我国の小型冷凍機の産業化はクライオポンプから始まったと言ってもよいであろう。一方、超電導機器は 70 年代から将来の有望な冷却対象、市場として期待されてはいたが、その産業的な利用については MRI 冷却用として普及した 90 年代まで待たなくてはならなかった。

超電導機器は大きく強電応用と弱電応用に分けられる。強電応用は電力関連機器、動力機器そして強磁界利用などである。電力関連には送電ケーブル、変圧器、超電導電力貯蔵 (SMES) などが含まれ、また動力機器として超電導回転機 (モーター、発電機など)、強磁界利用として MRI、NMR、超電導磁気浮上式鉄道などが主な冷却対象であろうか。現在ではそれぞれについて冷凍機を含めた冷却システムの検討や実用化がかなり進んできた。一方、弱電 (超電導エレクトロニクス) としてはジョセフソン効果や磁束量子化現象を応用した SQUID (超電導量子干渉計) や

Received June 22, 2013

* 株式会社コンボン研究所

〒451-0051 愛知県名古屋市中区則武新町 4-1-35

産業技術記念館内

GENESIS RESEARCH INSTITUTE, INC.

4-1-35 Noritake-Shinmachi Nishi-ku, Nagoya, Aichi 451-0051,

Japan

E-mail: tinoue@konpon.co.jp

SFQ（単一磁束量子）素子やそれらの集積回路、様々な光学センサーなどがある。超電導体の低抵抗性を利用したマイクロ波用超電導フィルターも一時期、携帯電話の普及拡大と相まって小型冷凍機メーカー各社が採用競争した冷却対象でもあったが、結果的には我国ではこの用途はほとんど日の目を見ることはなかった。こうしてみると残念ながら MRI や伝導冷却の超電導マグネット以外の超電導機器冷却は現在まで産業化されたものはないと言ってもよいかも知れない。

2.2 小型(蓄冷型)冷凍機の開発経緯

室温から 4 K レベルの極低温までをカバーできる小型冷凍機はヘリウムガスを作動流体とした蓄冷型冷凍機である。この蓄冷型冷凍機の位置づけを Table1 の冷凍方式の一覧に示す。ご存知のように冷凍方式には気体冷凍以外にも磁気冷凍や熱電変換冷凍（ペルチェ素子）という電子系を作業物質とする方式もある。これらもここ数十年その材料開発が進んでいるが、冷却特性が物性に依存する以上、使用温度域が制約されることは避けられない。

以下に蓄冷型の小型冷凍機の種類ごとにその開発経緯を簡単にたどってみたい。

2.2.1 スターリング冷凍機

筆者が小型冷凍機の研究開発に関わり始めた 80 年代前半まではスターリング冷凍機は主に空気液化器などとして 77 K 域の比較的大容量の冷凍機と、その対極の例えば赤外線センサー冷却用で手のひらに乗るような超小型冷凍機が主流であった。スターリング冷凍機は室温部の圧縮ピストンから低温部の膨張ピストンまでバルブなどで遮断されない連続した空間であることから、圧力振動源から寒冷発生部までの一体型構造が可能で、そのコンパクト性が特徴の一つである。この圧縮部から膨張部までが連続した構造のため低温端の温度が下がってくると系内の質量分布が低温側に偏り、低温ピストンの動きが系全体の圧力変動を支

配するようになる。その結果、蓄冷器の低温側の図示仕事は極端に扁平な PV 線図になり、描く面積も小さくなる。このように温度低下に従って 1 サイクルで稼ぎ出す冷凍出力はどんどん低下するので、スターリング冷凍機には高周波駆動が求められ、その耐久性が大きな課題であった。また極低温で冷凍能力を確保するために、80 年代半ばまでは高比熱の蓄冷材の研究は主にスターリング冷凍機を対象に行われてきた。

当時から超電導デバイス（SQUID）冷却を対象としたスターリング冷凍機も検討されていた。具体的には冷凍機から発生する磁気ノイズを極力抑えるために、低温ピストンとシリンダーをプラスチック製とし、蓄冷材も磁性体を使用せずにピストンに吸着している作動流体のヘリウムガスの一部を用い、モーターではなく流体の圧力で駆動するなど様々な工夫による 4 K レベルへの挑戦があった。

2.2.2 GM 冷凍機

GM 冷凍機は先に述べたようにクライオポンプ用の冷凍機としてその量産性と信頼性が高められた。GM 冷凍機の機器構成の特徴は圧縮機と寒冷発生部が配管で分離された配置自由度の高さである。特にその圧縮機は空調用のコンプレッサーをヘリウム用に改造したもので、各社の工夫と改良で耐久性の高い、高信頼性の圧縮機が生産されてきた。そのほとんどが回転型の駆動機構で、さらに油により摺動部の潤滑と放熱を担うという、信頼性の高い技術の組み合わせで構成されている。課題は吐出ガス中の不純物としての油分や水分などをいかに除去するかであったが、フィルターや油分離器などを用いて作動流体の高純度を保つ技術がしっかり確立されてきた。この不純物除去は溜め込み式なので一定時間稼働させると交換などのメンテナンスが必要なことも特徴のひとつであろう。もう一つの重要な要素は寒冷発生部の低温ピストンの駆動と同期した高低圧弁の切り替え機構である。GM 冷凍機の流体制御の最も重要な

Table 1 主な冷凍方式の分類と蓄冷型冷凍機の位置付け

作業粒子	示強変数	現象	冷凍機例		作業物質例
分子	圧力	圧縮/膨張	循環流	・ 空気圧縮冷凍機 ・ ブレイトンサイクル冷凍機	空気 ヘリウム
			往復流	蓄冷型冷凍機 ・ スターリング冷凍機 ・ GM 冷凍機 ・ パルス管冷凍機	ヘリウム
		凝縮/蒸発	・ 蒸気圧縮式冷凍機 ・ 吸収式冷凍機		フロン アンモニア ブタン
		吸収/放出	・ 吸着式冷凍機 ・ ケミカルヒートポンプ		水-ゼオライト 水素-MH
電子	電場	電流	ペルチェ素子		BiTe など
	磁場	励磁/消磁	磁気冷凍		GGG（ガドリニウム・ガリウム・ガーネット）

部分がその弁の切り替えタイミング（ピストン駆動との位相差）で、現在でも改善が続けられている。さらに蓄冷器や低温空間の容積や形状、低温ピストンのシール構造などの工夫や調整によっては、今後もまだまだ GM 冷凍機の冷凍能力の向上の余地があると思われる。

GM 冷凍機の最も基本的な特徴は、高圧および低圧の弁開閉による圧力変動生成である。これは流体密度の異なる空間を仕切る弁を短時間に開くことによる流体の拡散で圧力変動を生成しており、典型的な不可逆過程である。これが GM 冷凍機の本質的な非効率の要因で、スターリング冷凍機との根本的な差といえる。しかしその避けられない非効率要因を持つにもかかわらず、スターリング冷凍機よりもはるかに広く普及したのはやはりその高い信頼性に因るのであろう。

2.2.3 パルス管冷凍機

パルス管冷凍機の最大の特徴は低温ピストンを持たない蓄冷型冷凍機ということである。形式としてはスターリング型と GM 型の 2 種類に区分される。これらはそれぞれスターリング冷凍機、GM 冷凍機の低温ピストン部をそのシリンダー（パルス管）だけ残した形である。スターリング冷凍機や GM 冷凍機の低温ピストンの代わりをパルス管内の流体が行っていることは構造から容易に想像され、この部分はちに「ガスピストン」とも表現されるようになった。

そしてパルス管高温端（室温端）に設置される「位相調節機構」には様々な形式が考案され、80 年代後半～90 年代は次々と新しい形式のパルス管冷凍機が提案、開発される時代になった。恐らく 10 種類にもおよぶ形式が提案され、まさにパルス管冷凍機の全盛期であった。その中で我が国が世界的に見てもこの分野の最先端をリードしていたものと思われる。そして国内の研究開発のけん引役を担ったのが、本低温工学・超電導学会の調査研究会として 1988 年からスタートした「波動冷凍研究会」である。同研究会はその名称を 3 年ごとに変更しながら、現在は「応用熱音響研究会」の名称で毎回 50 人を超える参加者を集める活発な研究会として脈々と継続されている。

このパルス管冷凍機の登場により、冷凍機ユーザーも含めて様々な期待感が広がった。大きな特徴である低温部に可動部がないことは低振動性と低温部へのメンテナンスフリーの可能性を期待させた。実際、この低振動性は振動を嫌うセンサーや繊細な計測装置への小型冷凍機の適用範囲を広げることに貢献した。特に光学系センサーや安定した磁場環境を必要とする計測機器用、1 K 以下の超低温生成装置の予冷系などとして現在も実験室や特殊な計測現場で利用されている。ただ、寒冷発生部の振動は固体ピストンの慣性によりのみ起因するのではなく、作動流体の圧力変動によるシリンダーなどの構造体の伸縮に因るものがその主要因でもあり、パルス管冷凍機でも完全な除去は極めて難し

い。しかし研究者たちはそれぞれの用途に応じて、局所的な除振や防振機構を工夫して冷却ステージの低振動化に努力している。

低温部のメンテナンスフリーも魅力の一つではあったが、競合するスターリング、GM 冷凍機もメンテナンス性を高めており、そのメリットだけではなかなかパルス管冷凍機の優位性を主張できない状況であった。さらに構造や構成も位相調節機構によってはかえって複雑になるものもあり、当初の期待感ほどこれらの魅力は語られなくなった。

研究開発が進むとパルス管冷凍機の課題（欠点）も次第に明らかになってきた。例えばパルス管室温端と蓄冷器室温端と連結する形式（ダブルインレット型など）では作動流体の循環ループが形成され、冷凍機内に一方向流を誘起させ、熱的損失になることは比較的早くから指摘されていた。しかもその一方向流が不安定な場合には冷凍性能自体が大きく揺らぐ原因となり、一時は致命的な課題と認識された。また、パルス管部は極低温部と室温部をパイプで連結しただけの構造であるために、パルス管部の温度分布に起因する対流や渦などいわゆる 2 次流れによる熱損失も問題視された。特に対流の影響はパルス管部の重力方向に対する姿勢で大きく変化するので、パルス管部の取り付け方向の制約につながるようになった。

これら一方向流や対流の問題は重要な研究対象となり、一方向流の安定化策や一方向流を積極的に利用することも試みられた。特に 4 K レベルに到達するパルス管冷凍機は恐らく一方向流の効果無しには実現できなかったであろう。対流についても冷凍能力の取り付け角度依存性を明確にし、また駆動周波数によってはその依存度をかなり抑制できることも分かってきた。

パルス管冷凍機が上記のような特徴を持って登場したが、はたして冷凍能力という基本性能でスターリング冷凍機や GM 冷凍機を超えることができるかどうかは大いに関心の高いことであった。ガスピストンを内包するパルス管部は固体ピストンを持つ従来の冷凍機に対して損失の要因になることは明らかであったが、研究者らの挑戦によりその欠点はほとんど克服されつつあると言ってもよいと思う。振動流体の制御手法、位相調節系そしてパルス管や蓄冷器の構成や配置の自由度などいわばパルス管冷凍機の持つ様々な自由度を駆使して冷凍能力の向上検討が行われ、4 K パルス管冷凍機やセンサー冷却用の超小型冷凍機などではスターリング冷凍機や GM 冷凍機に比べて遜色のないレベルに到達している。さらにパルス管冷凍機は 90 年代半ばまでは低振動の小型冷凍機という方向で開発が進められてきたが、その大型化の方向でも優位性を持つことが次第に明らかになってきた。蓄冷型冷凍機の大口径で質量の大きい低温ピストンの駆動が課題になるが、ガスピストンの駆動であるパルス管冷凍機はこの点でも優位であり、GM 冷凍機などでは実現が難しい 1 kW レベルでも

GM 型のパルス管冷凍機では実証する例が出てきている。

以上、見てきたように、スターリング冷凍機、GM 冷凍機そしてパルス管冷凍機はそれぞれ異なった特徴、異なった発展経緯を持っており、現在ではそれぞれの特徴を生かしてユーザーの要求に応えられる、適材適所の利用ができる時代になったと思う。

3. 小型冷凍機の革新につながった技術

それではこの 30 年間に小型冷凍機の冷凍能力（冷凍出力、効率、到達温度）や寿命、信頼性などを大きく前進させたいくつかのトピックスについて紹介する。

3.1 クライオポンプの需要に育てられた信頼性の確立

前述のとおり小型冷凍機の最初の産業応用はクライオポンプであった。1970 年代からの半導体産業の発展とともにいわゆる真空装置産業もそれに連動して拡大した。特に半導体製造装置として求められたクリーンな真空環境を提供する排気装置として、クライオポンプは大きな一時代を築いた。今でこそターボ分子ポンプが大きなシェアを占めるようになってきたが、80 年～90 年代はクライオポンプの全盛時代であった。そして半導体製品の量産化に伴い、クライオポンプの信頼性確保とそのメンテナンス性の向上は小型冷凍機に求められた至上命題で、各社が競って品質の向上にしのぎを削った。この時代の GM 冷凍機の信頼性向上は後の 4KGM 冷凍機の信頼性への基礎になったのであろう。

3.2 磁性蓄冷材の革新によって実現した 4KGM 冷凍機

小型冷凍機に 4 K への道を開いたのは磁性蓄冷材の開発である。4 K 域への到達には作動流体であるヘリウムの比熱と同レベルの比熱を持つ蓄冷材の必要性が 1970 年代から認識され、様々な物質が評価されてきた。デバイ温度が低いことに由来する比熱の高さで、従来から鉛が低温部の蓄冷材として標準的に採用されてきた。しかし 10 K 以下ではヘリウムガスの比熱が大きくなり、蓄冷材との相対的な熱容量が不足し、到達温度がその付近の温度に留まってしまう。そこで多くの研究者が着目したのが 10 K 付近に磁気相転移を持つ磁性蓄冷材であった。

80 年代後半から希土類元素を含む磁性材料の開発が活発化し、主に Er 系化合物で、10 K 以下で鉛の数倍～10 倍の比熱を持つ物質群が開発された。この磁性蓄冷材により 90 年代前半には 2 段または 3 段の GM 冷凍機で、4 K で 1 W レベルが実現されるようになった。これは GM 冷凍機がピストン駆動とバルブ切り替えタイミングを独立に設定でき大きな図示仕事（PV 線図面積）を極低温で確保できることと、そして低周波駆動により流体損失（圧力損失）を低減できることなどの特徴が活かされた結果である。

磁性蓄冷材による 4KGM 冷凍機技術の確立は応用面でも大きな効果となって現れ、現在の MRI 用冷凍機（液体ヘリウムの再凝縮による完全蒸発ゼロの超電導マグネット

システム）、寒剤を使わない伝導冷却超電導マグネットなどの現在の超電導マグネットの普及はこの成功に負うところが大きい。また、この磁性蓄冷材の研究は低温での広範な磁性材料の知見獲得につながり、磁気冷凍とその作業物質の開発や探索の成果にも直結している。

3.3 リニア駆動と板バネ支持により飛躍的な長寿命を実現したスターリング冷凍機

スターリング冷凍機は本質的な不可逆プロセスを持っていないので、高効率のポテンシャルをもつ冷凍機として期待された。しかし現実的には大きな課題がいくつかあった。振動低減、潤滑機構、潤滑オイルの作動流体からの分離、耐久性確保、メンテナンス性向上などである。前述のとおり、低温部の図示仕事の減少を補うためには回数で稼ぐしかなく、スターリング冷凍機は必然的に高周波駆動となる。この特徴が寿命や潤滑方式、振動などの課題を引き起こしている。これらを一気に解決したのが板バネ支持によるリニア駆動ピストンの非接触（クリアランス）シール技術であった。90 年以降、この駆動・支持方式を採用したスターリング冷凍機の寿命は 10 万時間以上という超長寿命の時代になった。この方式はそのままスターリング型パルス管冷凍機にも採用され、低温可動部が無いという特徴も生かされ、代表的な超長寿命冷凍機として今後の広範な利用が期待されている。

3.4 パルス管冷凍機の登場と熱音響工学の発展

最初のパルス管冷凍機の登場は実は GM 冷凍機とほぼ同時期の約 50 年前まで遡る。しかしその高いポテンシャルが認知されたのはまだ 25 年ほど前である。スターリング冷凍機や GM 冷凍機には当然のように備わっている低温ピストンを持たない冷凍機がそれらと同様に優れた冷凍能力を持つことに 80 年代後半の小型冷凍機研究者は一樣に驚いた。低温ピストンに対して作動流体が仕事をする事でその仕事と引き換えに寒冷を発生するというイメージが一般的だったからである。低温ピストンが無くてもなぜ寒冷を発生し、冷えるのか。この疑問に答えを示したのが熱音響理論の考え方だった。低温ピストンの有無に関係ない寒冷発生であれば、寒冷発生の鍵は蓄冷型冷凍機の共通要素である蓄冷器にあるはずである。

熱音響理論の示した蓄冷器の機能は、単純な熱交換器ではなく、それは積極的な熱輸送の要素であるということだった。重要なことは蓄冷器内の作動流体の挙動を適切に制御することで、その結果蓄冷器内を熱が低温側から室温側に向けてバケツリレーのごとく運ばれることを熱音響理論は示した。この流体挙動を制御する機構がスターリング冷凍機や GM 冷凍機の場合は低温ピストンであり、パルス管冷凍機の場合にはパルス管の室温端に置かれた位相調整器である。

パルス管冷凍機にはその形式によって様々な名称が付けられた。また、その位相調節器部での流体変位と圧力変動

の位相差によって第一世代から第三世代までのパルス管冷凍機の世代区分が表現されるようになった。このようにしてパルス管冷凍機の出現によって、すべての蓄冷型冷凍機の寒冷発生メカニズムの理解が大きく変わることになった。

4. 熱音響工学的な考え方による寒冷発生の理解

熱音響工学では重要な熱力学的物理量はエントロピーである。デバイス内のエントロピーに着目し、エントロピー輸送に伴うエントロピー流の増幅率や増加量によってデバイスの損失や効率が把握されるようになった。寒冷の発生は、従来の理解では恐らく蓄冷器低温端での（断熱的な）膨張で作動流体自体の温度低下がその本質と思われていた。しかし熱音響理論により寒冷発生は蓄冷器によるヒートポンプ作用、すなわち蓄冷器でのエントロピーの汲み上げが冷凍機の本質であることが理解されてきた。従って性能の高い冷凍機を実現するポイントは、如何にエントロピー生成を抑制しながら低温部から室温部に向けてエントロピーを輸送するかということになる。輸送の途中で生成したエントロピーは全て蓄冷器の室温端まで汲み上げ、熱の形で捨てることになり、そのために大量の余分な動力を注ぎ込むことになるのだから。

もう一つ最近あらためて感じるのは定在波と進行波の面白さだ。熱音響理論によって振動流エネルギー変換における定在波と進行波の違いとその活用方法が認識されたように思う。圧力振動源は基本的には定在波生成器だと筆者は思っている。スターリング冷凍機の往復動型の圧力振動源はその一端が閉じられ、断熱されていれば完全な定在波にしかない。そこからわずかにでも外部に仕事を取り出すことで、流体振動のエネルギーが進行波の形で流出し、エネルギー輸送が生ずる。

水面に石を投ずると波紋が広がる。この表面波は進行波である。その広がる波紋のいい位置に木の葉などが引っかかるとその波は木の葉を運ぶことができる。サーファーの波乗りと同じで、これもエネルギー輸送である。

最近、レーザーのパルスが作るプラズマによる電子の加速の話聞いた。これはヘリウムなどの気体に短い時間の高強度パルスレーザーを照射するとレーザー光の照射された空間の気体が電離してプラズマになり、そこに電荷の揺らぎが生じて付近のプラズマが振動する。その振動領域が進行波としてある位相速度で伝搬し、そこにうまく取り込まれた電子群はその振動数で加速を繰り返しながら光速に近い位相速度で移動する現象である。

このような進行波をうまく用いる様々なエネルギー輸送

現象には共通性もありそうだ。エネルギーを運ばない定在波は完全に対称的な波動である。それに対して進行波は定在波の対称性を（時間的にまたは空間的に）破ることで生成される。この辺も素粒子論で出てくる対称性の破れの話と連想させて面白い。

5. おわりに

ここまで筆者が直接関わり、実際に見聞してきた小型冷凍機の約 30 年間のあゆみを概観してきた。あらためて振り返ると 20 世紀の最後の 20 年間の進歩には目を見張るものがあった。それに比べてこの 10 年間については革新的な発展は比較的少なく、その用途拡大に力が注がれたのかも知れない。しかし、冒頭に述べたように国内で見える限り、民間企業の小型冷凍機の研究開発活動は低下していることは否めない。一方、熱音響工学はその舞台が従来の低温工学の場から拡大し、熱音響自励振動などに関心が移ってきているのかも知れないが、研究会活動は活発化している。また熱音響工学とその応用に関心を示す企業も増えてきており、未利用熱や排熱利用の新しいデバイス研究やその応用開発の気運が出てきているようだ。

超電導の発見から約 1 世紀、高温超電導発見から 1/4 世紀が経ち、ようやく超電導技術の本当の開花が見えてきたこの時期に、国内の蓄冷型冷凍機研究が低迷しては将来が危ぶまれる。もし今後の小型冷凍機の研究や産業化にブレークスルーがあるとすれば、恐らく熱音響工学的な視点を取り入れた冷凍機研究でないだろうか。冷凍機の本質を見極め、損失の所在を突き止め、最適な流体制御と革新的な構造を見出すことによって新しい冷凍機の姿が見えてくると思う。そこにこそ若い研究者の皆さんの情熱に期待したい。

井 上 龍 夫

昭和 27 年 5 月 9 日生。昭和 50 年東北大学理学部物理学科卒業。昭和 52 年同大学院理学研究科博士前期課程修了。昭和 56 年同大学院理学研究科博士後期課程単位取得退学。昭和 56 年よりアイシン精機(株)第二技術開発研究所にてスターリング冷凍機など蓄冷型冷凍機の基礎研究に従事。平成 4～9 年の(株)アイシンコスモス研究所への出向勤務含め、主に共鳴管冷凍機、パルス管冷凍機の基礎・応用研究に従事。波動熱輸送調査研究会幹事、低温工学編集委員などを務め、熱音響理論の理解・普及などにも努める。平成 20 年より(株)コンボン研究所勤務。低温工学・超電導学会、日本機化学会会員。