

熱工学（熱力学と伝熱工学）の歴史と現状

1. はじめに

熱工学はエネルギーの変化過程を論ずる学問としての熱力学と熱エネルギーの移動について議論する伝熱工学に大別される。熱力学は、理学・工学などの自然科学全体に必須の基礎物理の一つであるとともに、機械工学の分野では、おもに熱エネルギーを機械仕事に変換する熱機関（エンジン）の設計のための学問として発展してきており、自動車、航空機、発電所などのエネルギー機器の設計には不可欠である。さらに、近年では、地球環境との共生したエネルギー活用を考えるとにも重要な役割を担う。一方、伝熱工学は、熱伝導、対流伝熱、放射伝熱と大別される様々な形態での熱移動と物質移動を論ずる。さまざまな自然現象や機械内外での熱移動の問題は、熱機関やエネルギー機器はもとより、程度の差はあれ、あらゆる機械設計に関わる。

本稿では、熱力学および伝熱工学の学問体系について歴史的な視点から振り返るとともに、近年の展開と現状について、人類の持続的発展に向けた地球環境との共生に向けた展開、ナノ・マイクロスケール領域への展開、様々な実機器や生体に関わる熱工学の展開の3つに分類して議論する。

2. 歴史的変遷と基礎的学問体系

2-1. 熱力学

古代ギリシャのアリストテレス(Aristoteless, BC384-BC322)の4元素は、「火」、「空気」、「水」、「土」であり、火すなわち熱は自然界において、空気や水と並ぶ重要な物質と考えられていた。その後、熱がエネルギーの一形態として認識され、熱力学といえる学問が発展したのは19世紀になってからである。

人類は、長い間人力と家畜の力をエネルギーとして利用してきており、一部水車や風車が使われ、熱は物体を加熱することに利用されてきた。熱を動力に変換して利用したのは18世紀初頭、ニューコメン(Thomas Newcomen)の熱機関(heat engine)が発明されてからである。この熱機関はワット(James Watt)によって改良され、18世紀後半に興る産業革命の原動力となった。一方、産業革命にともない、学問としての熱力学も急速な発展を遂げる。様々な熱機関が発明され、技術が発展するにともない燃料消費量の減少が重要な課題となる。この課題に対して、19世紀になり、1824年カルノー(N. L. Sadi Carnot)は、熱を仕事に変換するためには熱の一部を捨てる必要があることや熱機関の効率には上限があることを明らかとした。このころから、熱がエネルギーの一形態として認識されるようになり、マイヤー(Julius R. von Mayer)が熱と仕事の透過性を見だし、ジュール(James P. Joule)が熱と仕事の等量を測定した。すなわち、力学エネルギーから熱エネルギーのように、形態が変わってもその総量は一定であるとする熱力学の第一法則(The first law of thermodynamics)がこのころ確立している。熱機関で、エネルギーを消費することなく継

続的に仕事をする機械（永久機関）は存在しないことになる。自然界のエネルギーは、力学エネルギー、ポテンシャルエネルギー、熱エネルギー、化学エネルギー、電磁気エネルギー、核エネルギーなどに形態によって分類され、現在では、これらの形態を様々に変化させて利用している。

一方、ガリレイ(Galileo Galilei, 1564-1642)の時代に温度計が発明され、それ以来、物体の「温かい」、「冷たい」という状態を示す指標として“温度”が様々な定義で用いられてきた。温度の概念の重要な発展は、下記の熱力学第 0 法則(The zeroth law of thermodynamics)として知られる。物質 1 と物質 2 を接触させて長時間放置すると温度の高い物質から低い物質に熱が移動し熱平衡状態すなわち一定の“温度”となる。さて、物質 1 と物質 2 が熱平衡状態で物質 2 と物質 3 とが熱平衡状態であれば、物質 1 と物質 3 も熱平衡の状態になるとの法則である。つまり、温度とは熱平衡状態を示す状態量と定義できる。1848 年には、トムソン、後のケルビン卿(William Thomson, Lord Kelvin)が熱力学的な絶対温度を提唱した。

これらの準備がそろい、1850 年にはクラジウス(Rudolf J. E. Clausius)によってエントロピー(entropy)の概念が整理され、熱力学の第 2 法則が確立する。熱力学の第 2 法則はしばしば難解な概念であるかのように議論されるが、「熱は低温の物質から高温の物質に自然に移ることはない」という極めて自然な議論である。これは、「ある熱源の熱を外界に何の変化も残さずにすべて仕事に変換する機関は不可能である」という議論と等価であることが示されている。すなわち等量のエネルギーがあっても温度の差がなければ力学エネルギーへの変換はできず、自然な状態では温度の差は必ず小さくなっていき、すべてが熱平衡に向かうことになる。この変化のレベル、すなわち系の乱雑さ（一様さ）を示す指標としてのエントロピーの概念の確立は極めて重要である。

これらの熱力学の理論の進展に支えられて、現在でも自動車のエンジンとして用いられるオットーサイクル(Otto cycle)やディーゼルサイクル(Diesel cycle)、ジェットエンジンのブレイトンサイクル(Brayton cycle)、発電所や冷蔵庫で利用されるランキンサイクル(Rankine cycle)などの熱機関が 19 世紀中に考案され、20 世紀に広く実用化される。

19 世紀後半から 20 世紀初頭にかけては、学問的にも大きく発展し、マックスウエル(James C. Maxwell)、ボルツマン(Boltzmann)、ギブス(Josiah W. Gibbs)らによって多くの粒子の運動から物質の熱的挙動をあつかう統計力学(statistical mechanics)が確立し、プランク(Max K. E. L. Planck)の量子論に始まる量子力学(quantum mechanics)の発展と併せて、現在の物理化学の基礎学問となっている。また、

20 世紀中旬には原子炉による発電が開始され、熱力学は核エネルギーも含めたエネルギー形態の変化を対象として展開している。

2-2. 伝熱工学

伝熱工学は熱エネルギーの移動についての学問であり、熱伝導、対流伝熱、放射伝熱と

大別される様々な形態での熱移動と物質移動を問題とする。1820年代のフーリエによる熱伝導の研究に代表されるように熱の移動に関する学問も歴史は古いが、全般には熱機関などの発展とともに、熱力学と歩調を合わせて展開してきた。自然現象や機械内外で現れる熱の移動形態は熱伝導、対流伝熱、放射伝熱に加えて、相変化や物質移動を含む熱伝達など様々である。

熱伝導の問題の基礎となるのは、物体中の熱流束(単位断面積あたりの伝熱量)が物質の温度勾配に比例するとするフーリエの式である。

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)$$

ここで、 q : 熱流束, λ : 熱伝導率, T : 温度, n : 検査面鉛直方向座標である。

熱伝導の解析は、ビオ(Jean Baptiste Biot 1774-1862)やフーリエ(Jean Baptiste Joseph Fourier)によって1820年代に行われている。その後、様々な形状や境界条件の下での熱伝導方程式の数学的な解析解や近似解が工夫されてきた。近年では、計算機の発展によって複雑な形状や境界条件の非定常問題であってもパソコン上で容易に計算できる。また、様々な気体、液体、固体の熱伝導率も物性値として蓄積されてきている。

対流伝熱は、物理的には熱伝導と同じであるが、流体の流れがあることによってより若干複雑となる。対流伝熱の基礎式として、ニュートンの冷却法則、

$$q = h(T_w - T_\infty)$$

ここで、 h : 熱伝達率, T_w : 壁面温度, T_∞ : 遠方の流体温度。

を用いる。この熱伝達率の概念は、すでに1701年のニュートンの論文に示されているといわれている。ここで、熱伝達率は物性値ではなく、様々な流れの関数として決める必要がある。対流伝熱は、ポンプやファンによる流れがある場合の強制対流と温度場による浮力によって流れが形成される自然対流に分類できる。

強制対流伝熱の問題は、プラントル(Ludwig Prandtl, 1875-1953)、ヌッセルト(Wilhelm Nusselt, 1882-1957)によって展開された。これを記念して熱伝達率の無次元数($Nu = hL/\lambda$)はヌッセルト数と呼ばれている。一方、自然対流の問題は、レイリー(Lord Rayleigh, 1842-1919)やグラスホフ(Franz Grashof, 1826-1893)が基礎を築いており、自然対流の強さを表す無次元数として、レイリー数 Ra とグラスホフ数 Gr という無次元数が用いられる。

対流熱伝達に関しても、現在では、流れが層流であれば数値シミュレーションで比較的複雑な問題も解析可能である。流れが乱流となると乱流のモデル化や直接数値計算(DNS)の技術に依存し、実用的な計算は20世紀末から現在まで発展を続けている。

放射伝熱の問題については、物体表面の放射と吸収の関係を記述したキルヒホフの輻射法則が1860年に発表され、1879年のステファン(Josef Stefan, 1835-1893)の実験と1884年のボルツマン(Ludwig Boltzmann, 1844-1906)の理論によって導かれたステファンボルツマンの式によって放射エネルギーが計算できるようになる。

$$E_b = \sigma T^4$$

ここで、 E_b : 物体表面（黒体）からの面積あたりの放射エネルギー、 σ : ステファンボルツマン定数である。ただし、電磁波の波長に依存した放射エネルギーの正確な記述は、1900年のプランクの輻射の量子論を待つことになる。現在では、複雑な形状の物体の現実的な放射伝熱の計算のプログラムが実用化している。

相変化伝熱では、ヌッセルトの膜上凝縮の理論や1932年に抜山が提案した沸騰曲線などが、よく知られている。

このようにそれぞれの伝熱形態での研究は進んでいたが、伝熱工学という学問体系として整理されたのは1930年代であり、ヤコブ(Max Jakob 1879-1955)の著書がよく知られている。体系化された、伝熱工学は、熱エネルギーの移動をどう制御するかという設計技術であり、熱機関などのエネルギー機器の発展と同期して具体的な適用分野に展開されてきている。熱機関との関連では、たとえば発電プラントの蒸気タービンではボイラや復水器などの熱交換器の設計がその熱効率を左右する。熱機関の総合熱効率を改善するためには、ガスタービンの高温の排気で蒸気タービンを駆動するコンバインドサイクルや燃料電池とガスタービンを組み合わせたコンバインドサイクルなどが、開発されている。これらの複雑なシステムにおいては、熱交換器の効率が極めて重要になる。また、ガスタービン単体でも、熱力学の第2法則によって入り口のガス温度が高ければ高いほど熱効率が向上するが、そのときのブレードの強度を保つために空気を吹き出す冷却技術などでは伝熱現象の解明が極めて重要である。さらに、沸騰水型の原子力発電では沸騰伝熱の制御が極めて重要で、限界熱流束を超えた熱流束が加われば、熱伝達率の高い核沸騰の形態が維持できずに、遷移沸騰から膜沸騰に急速に遷移して材料の温度が急激に上昇するバーンアウト現象が起こってしまう。原子炉の安全設計など関係して沸騰伝熱の問題が大きく取り扱われたのが20世紀後半である。また、同時期の半導体産業の急速な発展とともにナノ・マイクロスケールで伝熱問題が大きくクローズアップされるようになった。

3. 地球環境との共生を目指した展開

20世紀に大幅に発展した熱機関によって人類が消費するエネルギー量は急激に増大し、二酸化炭素排出による地球温暖化、オゾン層の破壊、化石燃料の枯渇など地球レベルでの環境の変化をもたらしている。人類の持続的発展に向けて、環境を含んだ系での熱力学的考察が必須となっている。

従来からの熱機関で取り扱われていた燃焼の問題は、単に燃料の発熱量を求めることから、環境への影響を考慮して SO_x や NO_x の排出を抑制する必要性などもあり、詳細な化学反応の解析へと進んだ。レーザー誘起蛍光(LIF)に代表されるレーザー計測技術と機器の性能向上、化学反応速度データベースとそれを用いる数値解析コードの普及、詳細反応を含む燃焼数値解析がパソコンでも可能になった。また、実用的な乱流燃焼でも詳細反応を考慮した大規模DNSが進展し、乱流組織構造と火炎構造との関係が議論できるようになっており、エンジン内燃焼の研究は、直噴ガソリンエンジンの基礎となる成層燃焼から、HCCI

エンジン内の均質自着火過程まで大きく展開している。また、環境問題と関係して各種の代替燃料の有効利用が必要となり、DME、バイオマススラリー、バイオディーゼル燃料の燃焼特性などの研究も進んでいる。さらに、埋蔵量が多いがCO₂排出量の多い石炭を環境問題と調和させつつ利用するために、石炭のガス化・液化、排出されるCO₂の分離・貯蔵、燃料電池、分散エネルギーシステムなどの技術開発が進められている。

熱機関の媒質となる流体の熱物性値の決定も熱工学の重要な役割である。20世紀の前半には水の蒸気線図の作成に多くの研究が費やされた。現在ではオゾン層破壊のフロン全廃に向け、代替フロンやオゾン層破壊係数0のHFC134aなど、自然冷媒を用いた高性能冷凍機の開発も進められている。

エネルギー変換の効率のさらなる向上に向けて、相燃焼にとってかわり燃料電池(fuel cell)を代表とする化学反応がクローズアップされてきている。また、水素エネルギー導入への期待も高まっている。水素製造技術や利用技術の飛躍的な進歩もあって、水素燃料電池自動車と水素供給ステーションを組み合わせたデモンストレーションなどが進められている。燃料電池は、リン酸型燃料電池(PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell)が従来から開発されていたが、燃料電池自動車や分散電源への応用を目指して、固体高分子型燃料電池(PEFC, Polymer Electrolyte Fuel Cell)の高性能化が進んでいる。さらに、熔融炭酸塩型燃料電池(MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell)や固体酸化物型燃料電池(SOFC, Solid Oxide Fuel Cell)の開発や試験レベルでの導入が加速されている。燃料電池の開発においては、さらなる高効率化、大幅なコストダウン、耐久性の向上、貴金属触媒使用量の削減などの問題の解決に向けた、熱工学の研究が期待されている。さらに、触媒金属を用いた低温燃焼反応などの実用的な利用が進んでおり、化学の分野との垣根を越えて熱工学の研究が進んでいる。

地球環境との共生を目指したエネルギー利用技術として、分散エネルギーの考え方も浸透してきた。小さい出力のガスタービンいわゆるマイクロガスタービンが開発され、注目されるようになった。ガスエンジン、燃料電池、マイクロガスタービンなどで構成される分散電源（さらには、熱利用も重視したマイクロジェネレーション）が注目され、従来の集中発電による電力との系統連携についても研究開発が進んでいる。

4. ナノ・マイクロスケールへの展開

20世紀後半に急速に発展した半導体産業とともに熱工学のマイクロ・ナノスケールへの展開も顕著である。高い熱流束を発生するCPUなどの半導体デバイスなどにおいては、冷却能力によって性能の限界が決まってしまうといわれるほどに熱設計が重要な問題となる。デバイス内部での伝熱の形態としては固体の熱伝導であるが、材料の代表寸法が10~100 nmスケールとなるとマクロなスケールでは現れなかった問題が生じてくる。固体中のフォノンの平均自由行程が代表寸法程度あるいはそれ以下となるために、従来の熱伝導の解析で基礎としていたフーリエの法則の適用に限界が現れる。たとえば、固体材料の熱伝導

率は、厚さが 10~100 nm スケールの薄膜となるとフォノンや電子の表面散乱の割合が増加して、バルク材より減少することが知られている。実験的には、様々な波長のレーザー、波長可変レーザー、フェムト秒レーザーなどの測定手段と利用技術が格段に進むとともに、計算機によるデータ処理能力も飛躍的に向上しており、薄膜の熱物性の測定技術は格段に進歩した。一方、解析的には、フォノンの動力学をボルツマン方程式で解析する方法が進められているが、界面でのフォノンの散乱などの境界条件を決定するにはさらに原理的な分子動力学法による解析が必要となり、マルチスケールな解析については、今後の展開が期待される。

さらに、薄膜の膜厚方向の熱伝導の問題では、代表寸法が小さいために熱伝導抵抗は一般に極めて小さい。このような状況では、薄膜材料中の熱伝導抵抗と比較して、薄膜固体同士の界面での熱抵抗（界面熱抵抗）の寄与が大きくなっていく。従来のマクロな系では、表面の粗さのための実接触面積の減少で理解されて、平滑な界面では無視できた界面熱抵抗が、ナノスケールでは、エピタキシャルな接合面においても無視できない。このスケールでは、界面でのフォノンの反射や透過を正確に把握してはじめて界面熱抵抗が理解できる。最近では、固体面と液体との間での界面熱抵抗についても分子動力学法による解析と実験的な測定が進められてきている。

さて、たとえば直径が数 10 nm のシリコンのナノワイヤについては、薄膜における解析を適用すれば、直径が小さくなるほど熱伝導率が低下するという実験結果を一定のレベルで再現できる。ところが、カーボンナノチューブなどの新規ナノ物質に関しては、単に直径が 1nm という考え方では説明できない。カーボンナノチューブの熱伝導率はダイヤモンドを超えて、現在知られている固体物質中でもっとも高いと期待されており、すべての原子が表面原子であるようなナノ材料については、あらたなフレームワークでの解析が必要となる。

学術的には、分子動力学法シミュレーションによるナノスケール現象や界面現象の解析が進み、気液界面構造、凝縮・蒸発係数の見積もり、液滴・気泡核生成、結晶成長、ナノ・メゾポーラス物質内への吸着などの問題とともに、フラーレン・ナノチューブやハイドライドの生成過程、界面熱抵抗、フォノンの抽出と熱伝導などの解析が格段に進んでいる。また、密度汎関数法や分子軌道法による電子状態の計算やボルツマン方程式によるメゾスケール現象解析も実現している。実験的には、単層カーボンナノチューブの CVD 合成やナノ材料の得意な物性の工学応用の研究が進展している。また、MEMS 加工技術を利用して、マイクロチャンネルの流れ・熱伝達・混合などの検討が進み、マイクロミキサ、マイクロポンプやマイクロバルブの開発、電気泳動に加えて、電気二重層を制御したナノチャンネルなども提案されている。加えて、計測技術として、走査型熱顕微鏡 (SThM) の開発、マイクロ P I V やレーザー誘起蛍光法が実用的な手法として確立しつつある。層流の単層流であれば数値計算による予測が実用的であるが、表面荒さや表面から遠方までにおよぶクーロン力などが顕わとなり、表面の電位の検討や電気二重層などを含めた電界の分布の

把握なども必要となっている。

5. 実用機器設計などへの熱工学の展開

実用機器内の多くの流れは乱流であり，高い熱伝達率を実現するために，相変化をともなう沸騰や凝縮も多用される．これらの複雑な現象の解明と制御は 20 世紀後半に大きく進んだ．この 20～30 年間に急速に発展した乱流の理解，2 方程式モデルや LES などのモデル化，DNS などの直接数値計算技術の発展とともに乱流の数値解析が実用的な対流伝熱の予測レベルまで発展した．また，乱流燃焼のシミュレーションやマイクロデバイスを用いた乱流の制御などの可能性も視野に入ってきている．

核沸騰や膜沸騰熱伝達や膜状凝縮熱伝達については，その熱伝達に影響を及ぼす圧力，流量，温度などの巨視的な物理量の関連はほぼ把握されてきている．ただし，それらの物理量が相変化素過程にどのように作用しているかの解明については，さらなる進展が必要である．また，遷移沸騰域での制御やそこで現れる気泡微細化沸騰など未解明の現象も多い．限界熱流束については，種々の流動状況に対して巨視的な物理量の理解が進展し，限界熱流束の制御もある程度実現している．

実装機器の冷却問題は一般に複雑な複合伝熱問題となり，基本原理のみからの系全体の伝熱構造の把握は困難になってきている．この問題を解決する手段として計算機が有力なツールとして利用されている．たとえば，電子機器冷却では，高性能，薄型化・小型化・軽量化のなかで，発熱デバイスを冷却する様々な手法や放熱器が提案され，相変化やマイクロ流路適用の試みが盛んである．また，半導体製造技術についても単結晶育成制御（チョクラスキー法，フローティングゾーン法，磁場制御），成膜・熱処理（バッチ炉加熱，ランプ加熱，気相反応(CVD)，プラズマ成膜）などの研究が進んでいる．さらに，生産プロセス技術，情報通信，宇宙・衛星技術におけるおいても様々な展開が進んでいる．

生体組織の冷凍・凍結保存，凍結手術，レーザー手術，光による生体診断などの技術の発展とともに，細胞・DNA レベルでの熱・物質輸送，生体組織レベルの熱・物質輸送，低温における生体熱工学，生体の温度・熱流計測，光と生体の相互作用など，生体と関連した熱工学の応用研究も大きく展開してきている．さらに，再生医療における物質移動，細胞内エネルギー消費，細胞及び生体組織の凍結に関わる熱・物質移動，血管内皮細胞における物質輸送とせん断応力，近赤外光を用いた生体診断，全身を対象とした熱解析，人体と周辺環境との熱交換解析などの研究も進んでいる．

参考文献

1. (社)日本機械学会，JSME テキストシリーズ 熱力学，丸善(2007)．
2. (社)日本機械学会，JSME テキストシリーズ 伝熱工学，丸善(2006)．
3. 庄司正弘，伝熱工学，東京大学出版(1999)．
4. マイクロ・ナノ熱流体ハンドブック編集委員会編，マイクロ・ナノ熱流体ハンドブック，

NTS, (2006).

5. (社) 日本機械学会, 機械工学 最近 10 年のあゆみ, 丸善(2007).