

熱音響現象の理解と応用を目指して

愛知教育大学 理科教育講座 矢崎 太一 (Taichi Yazaki)
Department of Physics, Aichi University of Education

1. はじめに

Newton の音速計算以来「音」と「熱力学」との関係は深い。しかし、自由空間を伝播する音波には「仕事流(音響強度)」は存在するが、エントロピー変動がないため「熱流」を伴わない。だから断熱音波を扱う限り音と熱力学とは殆ど無関係である。細管内を伝播する音波のように断熱音波から脱却すると、「仕事流」と「熱流」が関係した多様な現象が生まれる。温度勾配のある細管内で起こる気柱自励振動や気柱の強制振動による熱流の発生は熱音響現象の代表例である。熱音響現象は熱流と仕事流およびそれらの間の「エネルギー変換」として、変位-圧力-エントロピ-空間で理解されている。熱音響現象は非平衡系で発現する散逸構造の典型例でもある。だから対流やレーザーの発振現象と同様にカオスや乱流など非線形現象の研究対象にもなる。

熱音響現象の背景にはエンジン、冷凍機、発電機、ドリームパイプといった非常に分かりやすい応用分野が広がっている。だから物理学を基礎として、機械工学、熱工学、低温工学あるいは生命工学など、他分野と関連した境界領域に属する。

“Thermoacoustic”を Keyword に欧文誌を検索し、掲載論文数の推移を調べてみた。結果を Fig.1 に示す。1996 年に Honolulu で開催された日米合同音響学会以後に論文数が急増している。これは熱音響に関するはじめての国際会議であった。しかし発表者の殆どが音響学以外の学問分野に所属し、殆どが低温物理学の出身者であった。

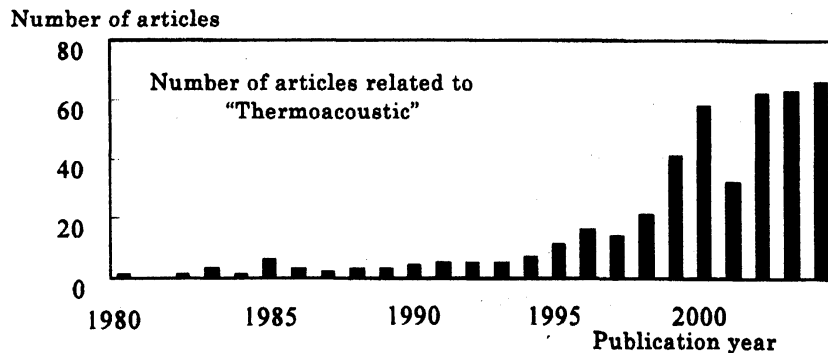


Fig.1 Number of papers found in a topic search of "Thermoacoustic".

熱音響現象やその概念は、振動流体とそれに接する固体壁さえあれば多かれ少なかれどのような系にも内在する。管や多孔質媒質内を伝播する流体音波、エンジンの蓄熱器や冷凍機の蓄冷器の中を往復運動する作業流体、脈動する血流など枚挙に暇がない。おそらく1996年以降の論文数の急増は、熱音響に関する新たな取り組みがなされたからではなく、機械工学や低温工学の研究対象であるエンジンや冷凍機の考え方が、日米合同音響学会を通じて「熱音響という概念」でより広く解釈されるようになったことが原因と考える。その一方で、音響学の分野で熱音響の研究が進まなかったのは、音響学で扱われる「気体音波」の殆どが「断熱音波」を対象としてきたためではないだろうか。

国内の熱音響現象への組織的取り組みは1988年から発足した。低温工学会に調査研究会が設けられ、パルス管冷凍機やスターリング冷凍機の理解を目指した。「波動冷凍研究会」から名称を変えながら、現在では「振動流エネルギー変換・輸送現象研究会」として活動を続けている。研究会の成果は日本機械学会、日本物理学会、日本流体力学会など他学会でも取り上げられた。まさに熱音響現象は多分野に共通する研究テーマと言っても過言ではない。熱音響現象の歴史を含めた概観と、現在の研究の現状について報告する。

2. 様々な熱音響現象

Newtonの大気中を伝播する音の速度理論を記述する論文以来、音と熱力学の関係について詳細な研究がなされている。大気中の音波が断熱的である一方で、細管のような固体壁に囲まれた空間を伝播する音波は断熱音波と異なり熱伝導や粘性効果のため多様な現象が可能となる。その典型例が熱音響現象であろう。

円筒管内の音波伝播の問題は大気中の音速論争と同様に長い歴史がある。Helmholtzは粘性だけを考慮して音の伝播定数を導き、またKirchhoffは粘性と熱伝導の両方の効果を含めた理論を提案した。Kirchhoffの理論はRayleighの著書である「*The Theory of Sound*」の中で詳細に説明されており、現在でも多孔質媒質を伝播する音波研究の基礎

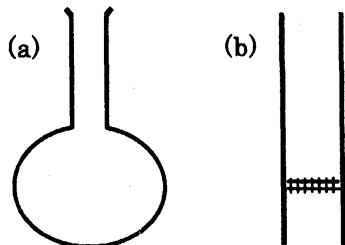


Fig. 2 Thermoacoustic oscillations:
(a) Sondhauss tube, (b) Rijke tube.

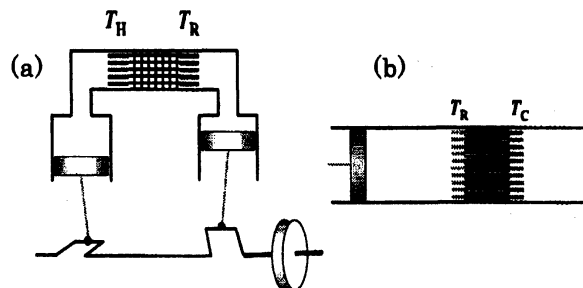


Fig. 3 Thermoacoustic engine and cooler:
(a) Stirling engine, (b) Pulse tube refrigerator.

となっている。Kirchhoff が導出した伝播定数の理論解は非常に複雑な超越方程式で表現されているため、厳密解よりはむしろ彼の“Wide Tube”近似解のほうがよく知られている。しかし、熱音響現象は管壁に形成される境界層がより厚い領域 (Rayleigh の“Narrow Tube”近似の領域) で発生するケースが多い。細管内の音波伝播の問題では粘性効果が支配的であるため、しばしば熱伝導を無視するケースがあるが、熱音響現象にとっては粘性より熱伝導のほうがより本質的である。

初期に観測された熱音響現象の典型例を Fig. 2 に示す。Fig. 2(a) は Sondhauss 管と呼ばれ、フラスコの球の部分を熱すると内部の気柱は不安定になり自発的に振動しだす。また Fig. 2(b) に示すように内径 20mm 程度の円筒管を鉛直に立て、下から 1/4 の場所に金網を入れ熱すると気柱が振動しだす。Rejke 管と呼ばれ、ともに当時の科学誌に掲載されている。国内では同様の現象が「吉備津の釜」として「雨月物語」に記載されており現在でも岡山県の国宝吉備津神社で体験できる。これらの現象はいずれも Kirchhoff の理論とおなじ 19 世紀に報告されている。

1908 年に Kamerlingh Onnes によりヘリウムが液化され低温実験が活発になると、室温から低温部へ通じる配管内で気柱振動が観測されるようになった。発見者に因んで Taconis 振動と呼ばれ、これも熱音響現象の代表例となった。しかし、低温実験にとっては抑制すべき迷惑な現象でもあった。液体 He の液面計としての利用価値もあり現在でも低温実験室で利用されている。熱音響現象に興味を持つ研究者に低温出身者が多いのはこの理由であろう。

熱音響現象が報告された 19 世紀には Stirling Engine (1816 年) が発見されている。Laplace が Newton の音速理論を修正し断熱音速を提案した年のことである。Fig. 3(a) に示すように管内に蓄熱器を入れ両端を高温 (T_H) と低温 (T_C) 熱交換器ではさみ、さらに円筒管の両端を圧縮・膨張ピストンで閉じると、管内の気体が不安定となりピストンが自発的に往復運動し始める。高温部に投入した熱量が動力 (回転運動) に変換される。まさにエンジンである。この現象と熱音響現象との共通点は多い。しかし、Stirling Engine が熱音響現象の範疇として同じ学問領域 (熱音響学) で扱われ出したのは最近のことである。また Fig. 3(b) に示すように円筒管の中に蓄冷器を入れ 2 つの熱交換器ではさみ、内部の気体をピストンで出し入れすると蓄冷器の両端に温度差が生じる。1959 年に発見された現象で Pulse Tube Refrigerator とよばれている。Stirling エンジンと逆現象で、これも最近の熱音響現象の代表例として熱音響学の領域で理解されている。

熱音響現象には自励振動、エンジン (原動機)、冷凍機に並ぶもう一つの代表例が存在する。ドリームパイプとよばれている現象である。温度勾配のある容器内の流体を外部ピストン等で強制振動させると、高温部から低温部への非常に大きな熱流が発生

する。その有効的熱輸送量は振動がない場合の1000倍以上に達する。結果的に流体を振動させただけで金属の熱伝導度を上回る熱輸送が可能となる。特に液体では非常に有効である。哺乳動物の血流に脈動が伴うのは、食物分解によって体内で生じた大量のエントロピーを、脈動によるドリームパイプ効果で体外に効果的に排出できる。だから定常的な生命活動が維持されるのである。人工心臓は単に酸素や栄養を輸送するだけでなく、ドリームパイプの効果を取り入れないと実用化することは難しいのではないだろうか。熱音響現象は生命工学とも密接に関連している。

3. 熱音響学の確立に向けて：エンジンを理解するための新しい階層

3.1 流体力学における安定問題から熱力学におけるエネルギー変換の問題へ

1949年、線形応答の理論で有名なKramersはTaconis振動を説明するために、Kirchhoffの一様温度分布を持つ管内音波伝播の問題を非一様温度分布の問題に拡張し、“Wide Tube”近似を用いて安定問題を議論した。しかし、実験結果の合理的説明には至らなかった。1969-1980年にスイスのRottはKramersの理論を拡張し、管壁での境界層に制限をつけること無しに長波長近似および定在波近似を用いて安定曲線を示した。温度分布は階段型を仮定した。彼の理論的結果はその後の実験によって強く支持された。流体力学的視点からの最初の成功例である。現在、大阪大学の杉本等により、Rottの階段型温度分布における接続条件の問題を取り除くため放物線型温度分布を仮定して安定問題が議論されている。流体力学はTaconis振動などの極めて単純な熱音響現象の安定問題を議論するのには成功した。

1979年、米国のCeperleyは熱音響振動を「ある種の熱機関」とみなすことにより「流体力学」ではなく「熱力学的視点」からの理解をめざす論文を提出した。その後の熱音響現象を運命づける決定的な論文となった。Stirling Engineが熱音響現象の観点から研究されだしたのは彼の功績である。

18世紀にイギリスで始まった産業革命はワットの蒸気機関に代表される動力革命でもあった。以来2世紀経った現在、エンジン製作の技術や性能は目覚しく進歩している一方で、エンジンの基本的理解の方法はカルノーの業績以来なんの進展も見られない。エンジン(エネルギー変換)を新たな観点から理解し、その方法に基づいた新しいデバイス(エンジン・冷凍機および発電機)の可能性を提案していくことは物理学の基本的問題の一つであると考えられる。Stirling Engineは外燃機関の代表例で200年の歴史がある。これらのエンジンや冷凍機の理解は従来「熱力学」の階層でなされてきた(Fig.4参照)。図に示すように、高温熱源から Q_H の熱量を受け取り、「熱」から「仕事」へのエネルギー変換によって外部に仕事量 W を吐き出す。そして残り(Q_C)を低温熱源に吐き出す。このようにエンジンや冷凍機を理解するには「熱量(Q)」や「仕事(W)」なる時間

と空間に依存しない物理量を使い定性的理解と評価がなされてきた。このとき成立する熱力学第一法則，第二法則およびエネルギー変換は

$$\begin{aligned}
 \text{熱力学第一法則} & : Q_H - Q_C = W \\
 \text{熱力学第二法則} & : \frac{Q_C}{T_C} - \frac{Q_H}{T_H} \geq 0 \quad (1) \\
 \text{エネルギー変換} & : \oint Tds = \oint PdV \quad (\equiv W)
 \end{aligned}$$

と書かれる。ここで P と V はそれぞれ圧力と体積を示し，また s はエントロピーを表す。さらにエネルギー変換 W が正であればエンジンを，また負であれば冷凍機の機能があることを示す。

エンジンは「熱」から「仕事」へ，冷凍機は逆に「仕事」によって「熱」を汲み出すエネルギー変換器として従来から(平衡系の)熱力学の分野で扱われてきた。熱音響現象を時空に依存しない熱力学の階層で理解しようとする時，後で示す定在波型や進行波型エンジン・冷凍機の違いが明確にならない。どんな山も遠くから眺めれば皆同じに見えるのと似ている。

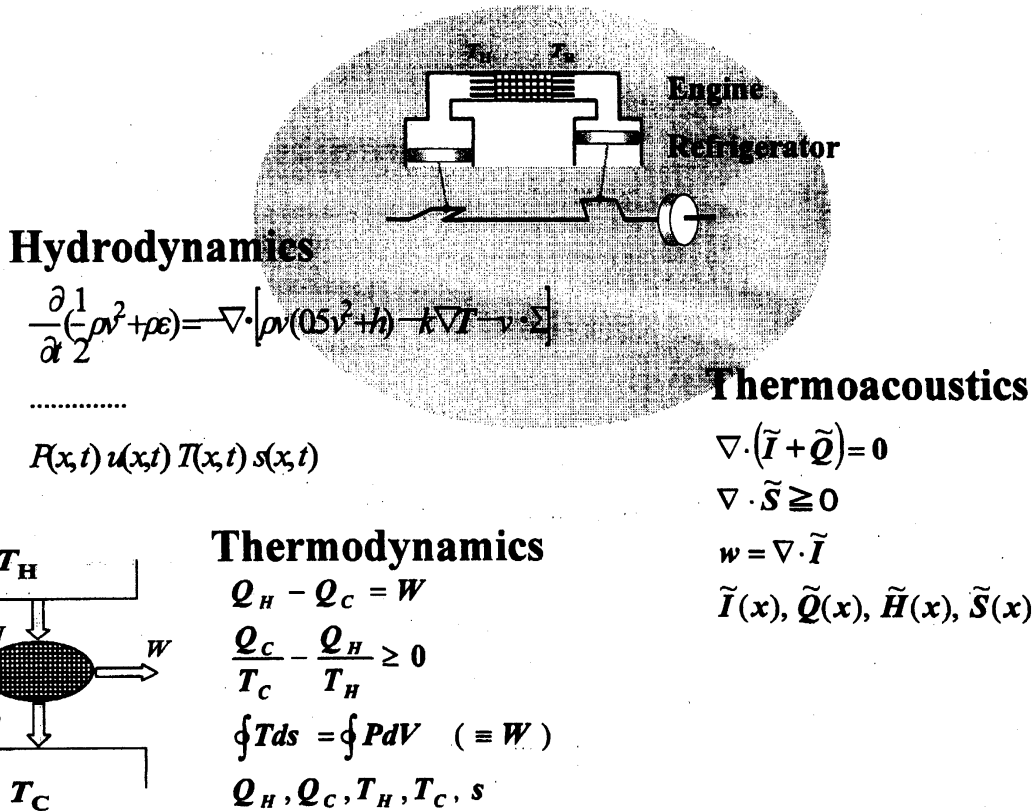


Fig. 4 Learning hierarchy diagram for understanding engines and coolers.

3.2 熱力学から熱音響学の構築に向けて

エンジンや冷凍機をより詳細に理解するためには、熱力学の階層ではなく流体力学に近づいた階層からの理解が必要である。流体力学の階層に近づいて(時間に対しては平均化するが空間依存性は残して)熱音響現象を記述すると、それらの違いが明確になる。熱音響エンジンは「熱流 Q 」から「仕事流(音響強度) I 」へのエネルギー変換として、また冷凍機は「仕事流」から「熱流」への変換として考える。このようにエンジンを理解する基本的概念を「エネルギー」から熱流や仕事流のような「エネルギー流」に視点を変えると、多様な熱音響現象を合理的に分類し理解することが可能となる。振動流体と固体壁との間の熱交換がなければ熱流は存在しない。だからエントロピー変動のない断熱音波を扱う限り熱音響現象とは無縁である。音響学では音響強度すなわち仕事流は扱うが熱流を扱わないのはこのためであろう。

結果的に、熱音響学では、熱力学の諸法則に対応する法則は以下のように記述されている。特に熱力学第一法則は流体力学のエネルギー方程式を時間で積分(時間平均)する事により得られる方程式と一致する。

$$\begin{array}{ll} \text{熱力学第一法則} & \nabla \cdot (I + Q) = 0 \\ \text{熱力学第二法則} & \nabla \cdot S \geq 0 \\ \text{エネルギー変換} & w = \nabla \cdot I \end{array} \quad (2)$$

ここで I は仕事流を示し、 Q は熱流を示す。いずれも「移動量」である。また S はエントロピー流を表す。熱音響学においてエンジンや冷凍機を理解する基本的物理量は主として移動量が用いられる。

Fig. 5に熱力学と熱音響学の2つの学問分野で、エンジンの理解がどの様に異なるかが示されている。熱力学においては「定在波型エンジン」も「進行波型エンジン」も「熱 Q 」を「仕事 w 」に変換と言う意味において両者に差は出ない。その一方で熱音響学においては両者の理解の差は大きく異なる。ここでは I や Q および S はベクトル量を意味する。だから分りやすいように \vec{I} や \vec{Q} および \vec{S} で表現されている。また添え字の R, H, および C は室温, 高温および低温部を意味する。

進行波型エンジン：熱流 Q は高温部から低温部に向かう。その一方で仕事流 I は熱流と逆向きで低温部から高温部へと向かう。蓄熱器の中では熱流と仕事流との間のエネルギー変換が実行される。進行波エンジンのより詳細がFig. 6に示されている。蓄熱器内部の仕事流, エントロピー流および熱流の空間分布の概念図を示す。蓄熱器は外部とエントロピーのやり取りがない。だから式(2)に示す熱力学第一法則は熱流と仕事流の和(エンタルピー流 \vec{H}) は常に一定でなければならない。もし蓄熱器内部の振動流体が壁と局所的等温状態で往復運動するなら、そして作業気体が理想気体であるな

らエンタルピー流は常にゼロでなければならない。蓄熱器では等温可逆過程が成立するからエントロピー生成はない。だから $\text{div}S=0$ が蓄熱器の中で成立する。エネルギー変換 w は蓄熱器内部では常に正である。これは蓄熱器では熱流から仕事流へのエネルギー変換が行われていることを示す。進行波エンジンによるエネルギー変換の機能（役割）は仕事流を高温部の方向に増幅する事である。蓄熱器の役割は①エネルギー変換を行う事。②高温部からのエントロピーおよび蓄熱器内部で生成されたエントロピーを低温熱交換器まで輸送するための「エントロピーの通路」である。

実際にこのような進行波型エンジンは以下のようにループ管を用いて実現される。進行波エンジン(Fig.8b)では共鳴管に課された厳しい境界条件を緩くして「進行波」も励起できるような環境を作る事が重要である。たとえばループ管(全長3m, 内半径20mm程度)を用いる。ループの中に蓄熱器を入れ温度勾配を適当な向きにつけると、それに応じた方向に1あるいは2波長の進行波音波が伝播しだす。蓄熱器の前後で仕事流を観測するとFig. 5あるいはFig. 6に示すように進行方向に増幅されることが分かっている。蓄熱器で出力された出力仕事は管内で散逸される。音波が理想的な蓄熱器を通過するとき仕事流は温度比倍だけ増幅することになる。

Fig.6 で用いられた $\omega\tau$ は、管内の流体と管壁との間の熱交換をコントロールするパラメータである。熱音響現象の分野でよく用いられ、 ω は角振動数を、熱緩和時間 $\tau(=R^2/2\alpha; R$ は流路の内半径, α は気体の熱拡散係数)は流路内の流体要素と壁が熱平衡に達するまでの時間の目安を示す。緩和時間 τ が振動周期に比べて十分短いならば ($\omega\tau \ll 1$), 管内流体の運動は等温可逆的であり、そのときエントロピー変動は最も大きい。 $\omega\tau \gg 1$ ならば流体と壁が熱平衡に達するには長時間を要する。だから流体は常に断熱可逆的でエントロピー変動はない。この環境では「冷凍機」や「エンジン」などの機能は発現しない。 $\omega\tau \sim 1$ では流体が管壁と熱交換するのに有限の時間遅れが発生する。この領域では不可逆性のためエントロピー生成の問題が生じる。

定在波型エンジン：熱流は高温部から低温部の方向である。しかし仕事流は進行波型エンジンと異なり蓄熱器から低温・高温部に湧き出している($w>0$)。この詳細がFig. 7に示されている。エントロピー流についても進行波の場合とは本質的に異なる。蓄熱器内部のエネルギー変換が不可逆的熱力学過程を利用しているためエントロピー生成が必然的に起こる。熱流と仕事流の和であるエンタルピー流は一定であるが、その値は常に有限である。このようなエンジンは両端の閉じた共鳴管内(Fig.8a)で実現される。Sondhauss Tube やRejik Tubeのような初期に観測された熱音響現象は定在波型エンジンに分類される。実験室でも簡単に実現できる事から、よく熱音響現象の演示実験に利用される。進行波に比べて効率は悪いが音響流などの影響は少ない。

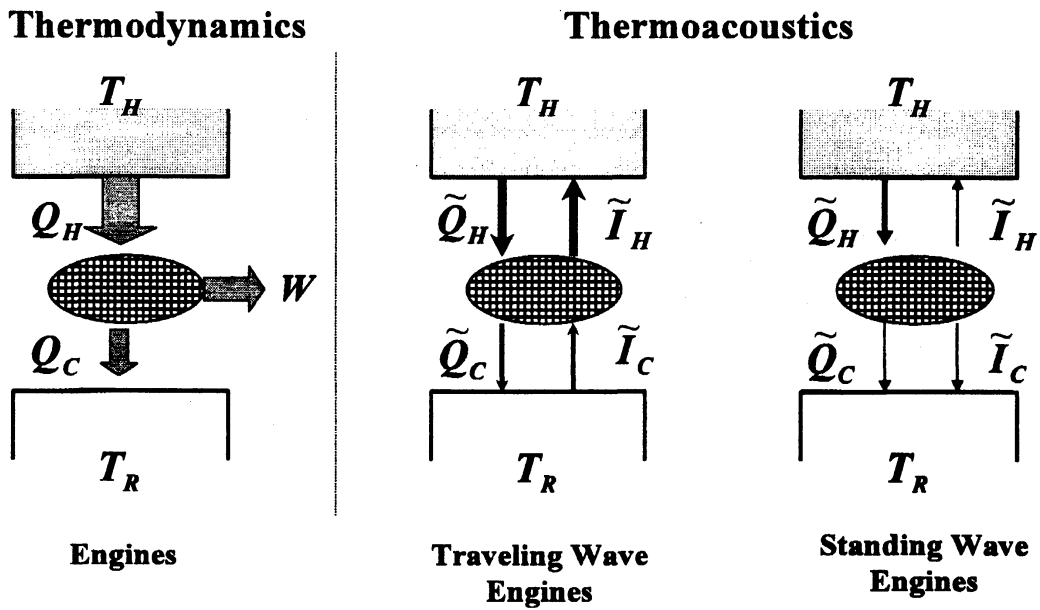


Fig. 5 Understanding of traveling wave and standing wave engines in the fields of thermodynamics and thermoacoustics.

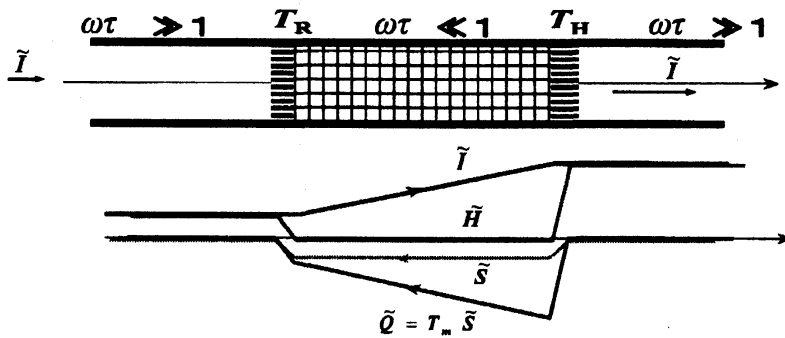


Fig. 6 Energy conversion in traveling wave engines

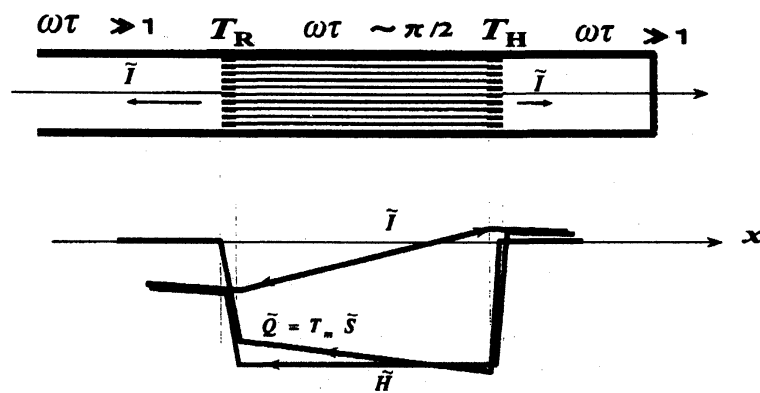


Fig. 7 Energy conversion in standing wave engines

3.3 熱音響冷凍機の開発の歴史と熱音響学における冷凍機の理解

^4He - ^3He 希釈冷凍機や超流動液体Heの物性研究で有名なLos Alamos国立研究所のJ. C. WheatleyはCeperleyの論文に刺激され、定在波型熱音響エンジンの組織的研究に乗り出した。そして、Fig.2(a)の中に熱交換器と蓄熱器を設置することによってFig.8(a)に示すような定在波型熱音響冷凍機と呼ばれる新しいデバイスを試作することに成功した。可動部を持たない冷凍機開発の始まりである。温度勾配により自発的に気柱が振動する現象は19世紀の話題であったが、気柱を強制振動して冷凍機を作成する試みは20世紀の新しい発想である。

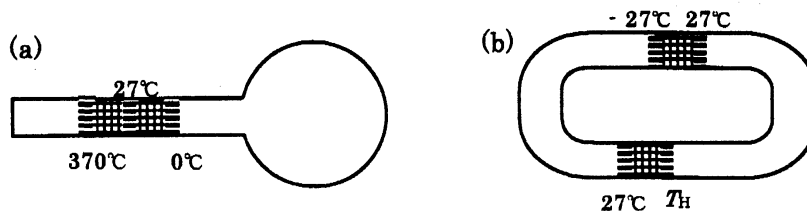
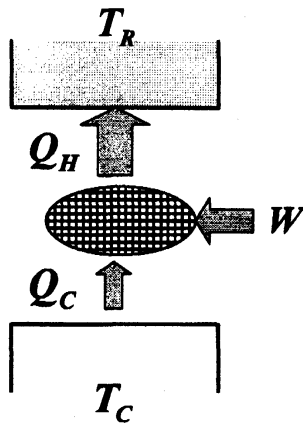


Fig. 8 Thermoacoustic Refrigerators: (a) Standing wave thermoacoustic refrigerator, (b) Traveling wave thermoacoustic refrigerator.

米国が定在波型音響デバイスの基礎・応用研究に集中する一方で、国内では Pulse Tube Refrigerator(Fig.3b)なる冷凍デバイスを理解するための研究会が筑波大学の富永を中心に精力的に行われていた。定在波型デバイスが本質的に不可逆的熱力学過程に頼っている一方、進行波型のデバイスは本質的に可逆過程を利用している。だから効率的には進行波型が有利である。定在波型と進行波型というのは、圧力と変位の位相関係がそれらの波動の位相関係と同じ振動流を意味する。結果的に Pulse Tube Refrigerator や Stirling Engine は進行波型に分類される。研究会の最大の成果は種々の熱音響現象を分類して、それらを統一的に理解する方法を提案したことである。1979年に Ceperley が提案していた進行波型エンジンや熱音響冷凍機(Fig.8b)がループ管を用いて国内で見つかったのも研究会の成果である。これをきっかけに日本、米国および中国が中心となり可動部のない進行波型熱音響冷凍機の開発競争が始まった。

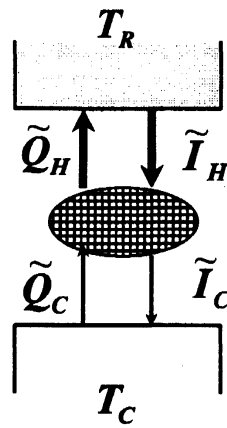
Fig. 8 に示す冷凍機概念図が Fig.9 に示されている。エンジンと同様に熱音響学における冷凍機の理解の方法は熱力学に比べて多様である。Fig.8(b)に示す進行波型冷凍機(ループ管)で実行されるエネルギー変換の様子が Fig.10 に示されている。仕事流と熱流のエネルギー変換の結果($w < 0$)、仕事流と逆向きに熱流が生じ冷凍機が実現されている。その一方で Fig.8(a)に対応する定在波型冷凍機(共鳴管)のエネルギー変換の様子が Fig.11 に示されている。進行波の場合とは異なり仕事流の方向に熱流が生じ冷凍が実現される。これらの事は熱力学の階層からは決して判断できない。熱音響学はエンジンや冷凍機を理解する新しい学問の階層と言える。

Thermodynamics

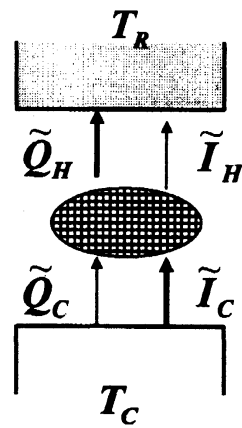


Refrigerators

Thermoacoustics



Traveling Wave Refrigerator



Standing Wave Refrigerator

Fig. 9 Understanding of traveling wave and standing wave refrigerators in the fields of thermodynamics and thermoacoustics.

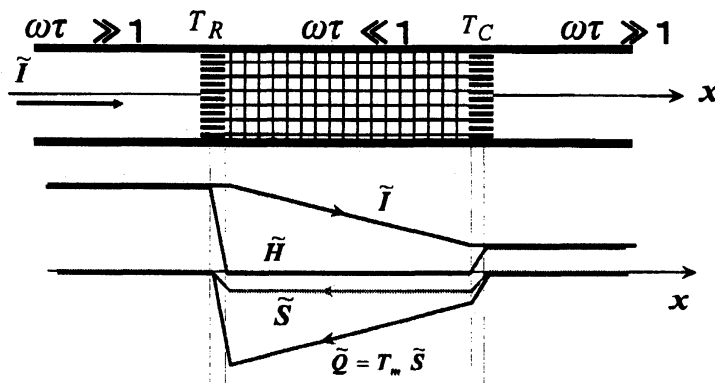


Fig. 10 Energy conversion in traveling wave refrigerators

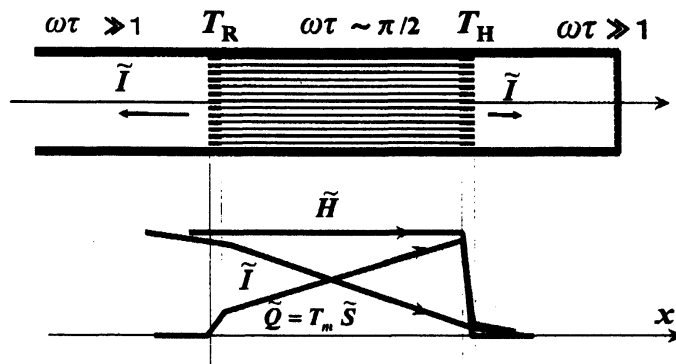


Fig. 11 Energy conversion in standing wave refrigerators

4. おわりに

1980年代は Kirchhoff の管内音波伝播という数理科学の問題が、また Taconis 振動のように迷惑な現象として嫌われた熱音響現象が最先端技術に大化けした時代であった。1990年代は進行波型エンジンが誕生し、熱音響現象やその概念が学問的に認知され始め、さらに環境・エネルギー問題と関連して熱音響現象が広く注目されだした時代の始まりであった。Fig. 1 に示す 2000年代の研究論文の急増はその証拠である。

エンジンや冷凍機以外にも熱音響現象として注目される現象がある。ドリームパイプである。振動流体による高温部から低温部への熱輸送現象は応用性が高い。圧力変動がなくても変位と不可逆過程さえあれば存在し、その有効熱伝導は振動のない場合の 10^3 倍以上にもなる。この種の熱流はエネルギー変換には寄与せずエンジンや冷凍機にとっては迷惑な熱流である。血液の脈動による体内から体外への熱輸送は生命にとっては重要である。しかし基礎研究はほとんどなされていない。

見方を変えれば熱音響現象も熱対流やレーザー発振と同様に、非平衡状態で発現する散逸構造である。だからカオスやフラクタルなど多様な非線形現象が観測されている。特に液体ヘリウムを用いた低温領域では顕著である。対流と異なり周波数が高く、他の実験系より実験しやすい。現在のところ対流で観測されているような高次元の乱流の報告はない。今後、非線形非平衡の問題として注目される実験系である。

熱音響現象は「熱音響エンジン(自励振動を含む)」「熱音響冷凍機」および「ドリームパイプ」に大別され、それらが「熱流」と「仕事流」およびそれらの相互変換によって理解されている。将来、自然界の様々な現象が熱音響現象として理解され応用分野の裾野がさらに広がる可能性もある。背景に分かりやすい応用分野を有する学問領域は決して淘汰されない。

定在波型と進行波型のエンジン・冷凍機を組み合わせれば多くの新しい冷凍機のパターンが可能となる。実験室での基礎研究は楽しいが、実用化の問題を真剣に考えるとそれほど楽観的にはなれない。家庭用の冷蔵庫などは半世紀の歴史があり改良を重ね生活ともうまく調和が取れてしまっている。短所も多いが、構造が単純で安価、低質量、可動部がなく維持管理が簡単などの長所を生かせる新しいニーズを探ることが重要である。たとえば太陽光を利用した砂漠での発電や食物貯蔵用冷凍機、低質量を生かした宇宙でのセンサー冷却用冷凍機、ドリームパイプを利用した車のラジエータ、あるいは天然ガスの一部を燃焼させ海水や地盤の凍結維持など応用例は決して少なくない。200年前に発見され、内燃機関のためにいまだに実用化されていない Stirling Engine も、いまだに国際規模で研究が進められている。それに比べると熱音響現象の組織的研究は始まったばかりである。

参考文献

熱音響現象に関するテキスト

- [1] 富永, 熱音響工学の基礎, 内田老鶴圃, 1998.
 [2] Swift, Thermoacoustics, Acoustical. Society of. America Publication, 2002.

熱音響現象に関する Review paper と解説記事

- [3] Rott,, Adv. Appl. Mech., 20, 135, 1980; Wheatley, Am. J. Phys., 53, 147, 1985.
 [4] Swift, Acoust. Soc. Am., 84, 1145, 1988; Tominaga, Cryogenics, 35, 427, 1995.
 [5] 松下, パリテイ, 1, 6, 1986; 富永, パリテイ, 14, 26, 1999.
 [6] 井上, 低温工学, 26, 98, 1991; 井上, 河野, 低温工学, 29, 9, 1994.
 [7] 琵琶, 冷凍, 79, 874, 2004; 矢崎, 機会の研究, 54, 1207, 2002.
 [8] 富永, 物理学会誌, 55, 326, 2000; 矢崎, ながれ, 24, 395, 2005..
 [9] Garrett et al, Am. Scientist, 88, 516, 2000; Swift, Phys. Today, July, 22, 1955.

熱音響振動の安定性および非線形現象についての論文

- [10] Rott, Z. Angew. Math. Phys., 20, 230, 1969; 24, 54, 1973.
 [11] Yazaki *et al.*, J. Low Temp. Phys. 41, 45, 1980; Phys. Rev. E, 48, 1806, 1993.
 [12] Yazaki *et al.*, Phys. Rev. Lett., 64, 2515, 1990; Phys. Rev. Letts., 58, 1108, 1987.
 [13] Atchley, Kuo, J. Acoust. Soc. Am, 95, 1401, 1994; 95, 1661, 1994.
 [14] 杉本, ながれ, 24, 381, 2005.

定在波型熱音響エンジン・冷凍機

- [15] Wheatley *et al.*, Phys. Rev. Lett., 50, 99, 1983; J. Acoust. Soc. Am, 74, 153, 1983.
 [16] Swift, J. Acoust. Soc. Am, 92, 1551, 1992.
 [17] Merkli, Thomann, J. Fluid Mech, 70, 161, 1975.
 [18] Yazaki, Tominaga, Proc. R. Soc. London, Ser. A, 454, 2113, 1998.

進行波型熱音響エンジン・冷凍機

- [19] Ceperley, J. Acoust. Soc. Am., 66, 1508, 1979;
 [20] Yazaki *et al.*, Phys. Rev. Lett., 81, 3128, 1998; Appl. Phys. Lett., 80, 157, 2002.
 [21] Backhaus, Swift, Nature, 399, 335, 1999; J. Acoust. Soc. Am., 107, 3148, 2000.
 [22] Biwa *et al.*, Europhys. Lett., 60, 363, 2002; Phys. Rev. E69, 066304, 2004.
 [23] Ueda *et. al.*, Appl. Phys. Lett., 81, 5252, 2002; J. Acoust. Soc. Am., 115, 1134, 2004.
 [24] Sakamoto *et. al.*, J. J. Appl. Phys., 43 2751, 2004.

ドリームパイプに関連する論文

- [32] 富永, 低温工学, 25, 300, 1990.
 [33] Kurzweg, Zhao, Phys. Fluids, 27, 2624, 1984.