

日本音響学会 編
音響テクノロジーシリーズ 21

熱音響デバイス

博士（工学） 琵琶 哲志 著

コロナ社

音響テクノロジーシリーズ編集委員会

編集委員長

千葉工業大学
博士（工学） 飯田 一博

編集委員

東北学院大学
博士（情報科学） 岩谷 幸雄

甲南大学
博士（情報科学） 北村 達也

滋賀県立大学
博士（工学） 坂本 眞一

八戸工業大学
博士（工学） 三浦 雅展

千葉工業大学
博士（工学） 大川 茂樹

東京大学
博士（工学） 坂本 慎一

神戸大学
博士（工学） 佐藤 逸人

（五十音順）

（2017年11月現在）

発刊にあたって

音響テクノロジーシリーズは1996年に発刊され、以来20年余りの期間に19巻が上梓された。このような長期にわたる刊行実績は、本シリーズが音響学の普及に一定の貢献をし、また読者から評価されてきたことを物語っているといえよう。

この度、第5期の編集委員会が立ち上がった。7名の委員とともに、読者に有益な書籍を刊行し続けていく所存である。ここで、本シリーズの特徴、果たすべき役割、そして将来像について改めて考えてみたい。

音響テクノロジーシリーズの特徴は、なんといってもテーマ設定が問題解決型であることであろう。東倉洋一初代編集委員長は本シリーズを「複数の分野に横断的に関わるメソッド的なシリーズ」と位置付けた。従来の書籍は学問分野や領域そのものをテーマとすることが多かったが、本シリーズでは問題を解決するために必要な知見が音響学の分野、領域をまたいで記述され、さらに多面的な考察が加えられている。これはほかの書籍とは一線を画するところであり、歴代の著者、編集委員長および編集委員の慧眼の賜物である。

本シリーズで取り上げられてきたテーマは時代の最先端技術が多いが、第4巻「音の評価のための心理学的測定法」のように汎用性の広い基盤技術に焦点を当てたものもある。本シリーズの役割を鑑みると、最先端技術の体系的な知見が得られるテーマとともに、音の研究や技術開発の基盤となる実験手法、測定手法、シミュレーション手法、評価手法などに関する実践的な技術が修得できるテーマも重要である。

加えて、古典的技術の伝承やアーカイブ化も本シリーズの役割の一つとなろう。例えば、アナログ信号を取り扱う技術は、技術者の高齢化により途絶の危

機にある。デジタル信号処理技術がいかに進んでも、ヒトが知覚したり発したりする音波はアナログ信号であり、アナログ技術なくして音響システムは成り立たない。原理はもちろんのこと、ノウハウも含めて、広い意味での技術を体系的にまとめて次代へ継承する必要があるだろう。

コンピュータやネットワークの急速な発展により、研究開発のスピードが上がり、最新技術情報のサーキュレーションも格段に速くなった。このような状況において、スピードに劣る書籍に求められる役割はなんだろうか。それは上質な体系化だと考える。論文などで発表された知見を時間と分野を超えて体系化し、問題解決に繋がる「メソッド」として読者に届けることが本シリーズの存在意義であるということを再認識して編集に取り組みたい。

最後に本シリーズの将来像について少し触れたい。そもそも目に見えない音について書籍で伝えることには多大な困難が伴う。歴代の著者と編集委員会の苦労は計り知れない。昨今、書籍の電子化についての話題は尽きないが、本文の電子化はさておき、サンプル音、説明用動画、プログラム、あるいはデータベースなどに書籍の購入者がネット経由でアクセスできるような仕組みがあれば、読者の理解は飛躍的に向上するのではないだろうか。今後、検討すべき課題の一つである。

本シリーズが、音響学を志す学生、音響の実務についている技術者、研究者、さらには音響の教育に携わっている教員など、関連の方々にとって有益なものとなれば幸いである。本シリーズの発刊にあたり、企画と執筆に多大なご努力をいただいた編集委員、著者の方々、ならびに出版に際して種々のご尽力をいただいたコロナ社の諸氏に厚く感謝する。

2018年1月

音響テクノロジーシリーズ編集委員会
編集委員長 飯田 一博

ま え が き

熱音響現象を体感するのはそれほど難しくはない。例えば長さが1 m 程度（内径 40 mm 程度）のガラス管の中に金網を入れ、市販のガスバーナーで金網が真っ赤になるまで加熱してガラス管を垂直に立てる。すると、驚くほどの大音響が室内に響き渡る。熱音響現象について説明をするとき、このレイケ（Rijke）管をデモンストレーションとして用いることが多い。レイケ管で熱的に励起される気柱振動は熱音響自励振動の典型例である。富永昭は、彼のテキスト「熱音響工学の基礎」のなかで、「この現象を理解したいと思わない人はいないだろう」と述べている。確かに熱音響自励振動は研究者のみならず、体験した者の感性を刺激することは間違いない。1877 年に出版されたレイリー（J. W. S. Rayleigh）の著書“The Theory of Sound”にはレイケ管とともにソンドハウス（Sondhauss）管も紹介されている。ソンドハウス管は、先端にフラスコ状の球体を持つガラス管であり、球体部分を赤熱すると管内気柱が振動を開始し、管端から音が聞こえてくる。多くのガラス吹き工が経験しているこの現象もよく知られた熱音響自励振動の例である。

自由空間を伝搬する断熱音波とは異なり、管内を伝搬する音波では振動流体と管壁の間で熱交換が可能になる。熱交換の結果として、レイケ管やソンドハウス管に代表される熱音響自励振動を含め、音波による冷却作用、そして高温から低温への熱輸送の促進作用など、断熱音波には見られない熱音響現象が発現する。これらの現象を積極的に応用することにより、最近では「音波エンジン」、「音波クーラー」、「ドリームパイプ」と呼ばれる多様な熱音響デバイスが試作されている。このように熱音響現象は背景に魅力的な応用分野（熱音響工学）を持つ古くて新しい現象である。

世界的な関心事であるエネルギー資源の問題、環境問題に関連して、各種熱源が利用可能な外燃機関であること、可動部品を本質的に利用しないことや、またフロンを使用しないで冷却が実現できるという熱音響デバイスの持つ数多くの利点に注目が集まっている。蒸気機関の発明以来、熱機関は工学の最重要課題であった。その結果として現代の熱機関は高い性能を実現するようになった一方で、複雑で精緻な機構を持つに至った。可動部品を持たないにも関わらず高い性能を発揮する熱音響デバイスは、従来型の熱機関の開発に従事する技術者、研究者にも新鮮な驚きをもたらした。21世紀に入ってから論文数の急増は、音波を用いた新しい熱機関に対する期待感の現れでもある。

熱と音というよくわかっているはずの古典的現象でありながら、熱音響デバイスは比較的新しい学術的トピックスであり、新しい技術シーズでもある。本書は熱音響デバイスに興味を持つ学生や、研究開発に取り組む技術者・研究者のための実用書を期待して執筆した。本文中の数式に関する記述はできるだけ平易に努め、物理的イメージを把握することを優先するように努めた。

1章では、代表的な熱音響デバイスの具体例を紹介し、両端のある共鳴管もしくはループ管という配管構成を有するという共通点を示す。また、スタックや蓄熱器という比較的細い流路を持つ多孔質体が重要な部品であることを解説する。言い換えれば、これらの必須部品のおのおのが果たす役割を理解することが熱音響デバイスの基礎である。そこで、2章以降の内容を以下のように配慮した。

2章では、剛体壁で構成された管内における音波伝搬の問題を紹介し、流体と管壁の間で熱交換の尺度を表す無次元量を導入する。管内音波と自由空間中の音波の違いは振動流体と管壁の熱交換にある。管内音波の問題は熱音響デバイスを理解するための出発点である。

3章では、熱音響デバイスの音場を決定する重要な部品である気柱共鳴管の Q 値を議論する。温度勾配のある気柱共鳴管で生じる気柱自励振動の問題をエネルギー変換の観点から考えるとき、気柱共鳴管の Q 値が重要な役割を果たすからである。熱音響自励振動の音源を考えることで音響学から熱音響学へと

視点を移す。

4章では、熱音響デバイスの中心的物理概念である熱流と仕事流を議論する。熱流と仕事流は熱力学で行われる熱機関の議論と流体力学で行われる振動流の議論を橋渡しする役割を果たす。熱流と仕事流を用いることではじめて熱音響自励振動をある種の熱機関としてみるができるようになる。また、熱流と仕事流により従来型の熱機関の概念図がリニューアルされること、そして新たなデバイスの概念設計が可能になることを示す。

5章では、4章で示した熱流と仕事流に対して流体力学的な議論を行う。そのために流体力学の基礎方程式に基づいて流体要素のエントロピー変動を議論する。これにより、熱音響デバイスの細管流路で無数の流体要素がそれぞれ熱機関として機能することを明らかにする。また、2章で議論する温度が一般的な管内音波の伝搬定数も導出されることを示す。

6章では、流体要素の圧力変動と変位変動の位相差に基づいて、振動流によるエネルギー変換とエネルギー輸送の物理的機構を議論する。非粘性流体の場合の議論は物理的直感を得るのに役立つだろう。この6章が熱音響理論の中心的な成果となる。

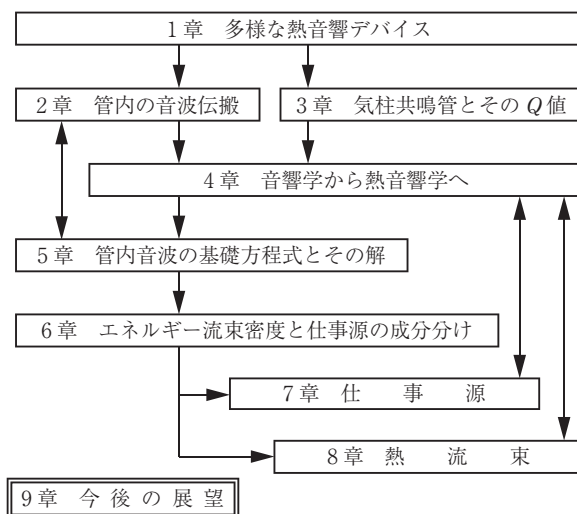
7章と8章では、6章までの熱音響理論が代表的な熱音響デバイスにどのように適用されているかを学ぶ。また、関連するデバイスに対しても熱音響理論が適用できることを示す。

9章では、今後に期待される将来展望を述べている。

次ページの図に各章の関連性をまとめて示している。

執筆にあたっては国内外の文献を参考にしたが、中でも富永昭と矢崎太一の文献や講演の影響は強い。また、井上龍夫の論文も大いに参考にさせていただいた。本書を読まれたあとには、彼らの原著論文を読んでパイオニアの気概や覚悟を感じ取ってほしい。熱流と仕事流をキーワードに、本書が熱音響現象の理解や熱音響デバイスのさらなる発展に少しでも役立てばたいへんにうれしく思う。

本書を完成するにあたっては多くのご助言や励ましの言葉をいただいた。富



各章の関連性

永昭，矢崎太一からは，原稿に対して貴重なコメントをいただいた。また，上田祐樹をはじめとする応用熱音響研究会のメンバーの皆さんとの意見交換や議論は本書の下敷きとなった。兵頭弘晃には編集作業においてお世話になった。また，小林貴之，高山祐介，村岡敬太，田村駿，佐藤萌子，金子駿斗には全体を丁寧に通読したうえで多くの誤りについてご指摘いただいた。もちろん全体を通じて本書の記述に誤りがあれば全面的に著者の責任である。なお，編集委員会の皆様とコロナ社には辛抱強く原稿の完成をお待ちいただいた。末筆ながら皆様に感謝の意を表するしだいである。

2018年5月

琵琶 哲志

目 次

1. 多様な熱音響デバイス

1.1 熱音響デバイスに関わる研究の歴史	1
1.1.1 熱音響研究の黎明期	1
1.1.2 Rott の理論的研究	3
1.1.3 ロスアラモス国立研究所と筑波大学の研究	3
1.1.4 現在の研究動向	5
1.2 熱音響デバイスの分類	6
1.3 音波エンジン	7
1.3.1 熱音響自励振動	7
1.3.2 共鳴管型音波エンジン	9
1.3.3 ループ管型音波エンジン	11
1.4 音波クーラー	13
1.4.1 共鳴管型音波クーラー	14
1.4.2 ループ管型音波クーラー	15
1.4.3 GM 冷凍機とパルス管冷凍機	16
1.4.4 熱駆動型音波クーラー	18
1.5 ドリームパイプ	19
1.6 熱音響デバイスの利点	20
1.7 熱音響デバイスの実用化への試み	21
引用・参考文献	22

2. 管内の音波伝搬

2.1 波動方程式とその解	26
2.2 音速と比音響インピーダンス	29
2.3 管内音波の伝搬定数	33
2.4 補 足	39
2.4.1 管内音波の伝搬定数に関する実験	39
2.4.2 次元解析： $\omega\tau_v$ とレイノルズ数 (Re)	41
引用・参考文献	43

3. 気柱共鳴管とその Q 値

3.1 振動の Q 値	44
3.1.1 Q 値の役割	44
3.1.2 減衰振動と Q 値	45
3.1.3 減衰振動する振動系の Q 値	46
3.2 振動量の複素表示	49
3.2.1 複素表示の方法	49
3.2.2 機械振動系の共鳴曲線と Q 値	53
3.3 音響エネルギーと音響強度	57
3.3.1 流体要素のエネルギーと仕事	57
3.3.2 断熱音波における E と I の関係	59
3.4 散逸のない気柱共鳴管	60
3.4.1 音場の導出	60
3.4.2 気柱共鳴管の Q 値	63
3.5 気柱共鳴管における粘性散逸	65
3.5.1 粘性流体の運動方程式と境界条件	65
3.5.2 運動方程式の解	66
3.5.3 流速変動の図示	67

3.5.4	粘性散逸が起きる場所	68
3.5.5	断面平均流速	70
3.6	散逸を伴う気柱共鳴管	71
3.6.1	音場の導出	71
3.6.2	散逸のある気柱共鳴管の Q 値	73
3.6.3	気柱共鳴管に対する実験例	77
3.7	温度勾配のある気柱共鳴管	80
3.7.1	タコニス振動	80
3.7.2	温度勾配のある気柱共鳴管の Q 値	82
3.8	補足	84
3.8.1	管路と電気回路のアナロジー	84
3.8.2	境界条件が与えられたときの音場	86
3.8.3	無限平板上の流速変動	90
	引用・参考文献	91

4. 音響学から熱音響学へ

4.1	Ceperley の提案	92
4.2	熱機関の伝統的描像	94
4.2.1	熱力学の第一法則と第二法則	94
4.2.2	熱力学的サイクル	97
4.3	熱機関を理解するための新しい概念	98
4.4	定常的振動流場のエネルギー流束密度	101
4.4.1	エンタルピー流束密度, 仕事流束密度と熱流束密度	101
4.4.2	熱流と仕事流	103
4.4.3	熱流と仕事流を使った熱機関の概念図	105
4.5	エネルギー流線図	106
4.5.1	エネルギー流線図の描き方	106
4.5.2	エネルギー流線図による熱機関の図示	107
4.5.3	理想的蓄熱器のエネルギー流線図	110

4.6 エネルギー流の具体例	112
4.6.1 単純熱伝導	112
4.6.2 断熱音波	113
4.6.3 温度勾配のある共鳴管	113
4.6.4 共鳴管型音波エンジンとループ管型音波エンジン	116
4.6.5 スターリングエンジン	117
4.7 熱音響デバイスの概念設計	121
4.7.1 パルス管冷凍機と音波クーラー	121
4.7.2 熱駆動型音波クーラー	124
4.7.3 直列配列蓄熱器を持つ熱音響エンジン	126
4.8 補 足	128
引用・参考文献	129

5. 管内音波の基礎方程式とその解

5.1 流体力学の基礎方程式の線形化	131
5.2 オイラー的記述とラグランジュ的記述	134
5.3 エネルギー流束密度と仕事源のラグランジュ的表現	137
5.3.1 仕事流束密度	137
5.3.2 熱流束密度	137
5.3.3 仕事源	138
5.4 エントロピー変動に対する方程式	141
5.5 温度勾配がないときのエントロピー変動	142
5.5.1 エントロピー変動の動径分布	143
5.5.2 断面平均エントロピー変動	146
5.6 温度勾配があるときのエントロピー変動	147
5.6.1 非粘性流体の場合	148
5.6.2 粘性流体の場合	149
5.7 温度変動と密度変動	151

5.7.1 温度変動	151
5.7.2 密度変動	153
5.8 管内音波の波動方程式	155
5.9 補足：流体力学の基礎方程式の導出	157
5.9.1 保存則	157
5.9.2 連続の方程式	158
5.9.3 運動方程式（ナビエ-ストークス方程式）	159
5.9.4 エネルギー方程式	161
引用・参考文献	164

6. エネルギー流束密度と仕事源の成分分け

6.1 非粘性流体の仕事流束密度，熱流束密度と仕事源	165
6.2 圧力，変位，断面平均エントロピー変動の実関数表示	168
6.2.1 圧力変動	168
6.2.2 断面平均エントロピー変動	171
6.3 仕事流束密度	173
6.4 熱流束密度	175
6.4.1 圧力変動に由来する熱流束密度成分 (Q_{prog} と Q_{stand})	175
6.4.2 変位変動に由来する熱流束密度成分 (Q_D)	178
6.4.3 熱流束密度に関するまとめ	180
6.5 仕事源	182
6.5.1 圧力変動に由来する仕事源成分 (W_p)	182
6.5.2 変位変動に由来する仕事源成分 (W_{prog} と W_{stand})	184
6.5.3 仕事源に関するまとめ	186
6.6 粘性流体のエネルギー流束密度と仕事源	188
6.6.1 振動量どうしの積の時間平均に関する数学公式	188
6.6.2 流体要素の断面平均変位変動と圧力変動	189
6.6.3 粘性流体の仕事流束密度	189
6.6.4 粘性流体の熱流束密度	190

6.6.5	粘性流体の仕事源	193
6.7	補 足	198
6.7.1	マクスウェルの関係式	198
6.7.2	偏微分の性質	199
6.7.3	有用な熱力学的関係式	200
6.7.4	Q_D に対する表記方法	202
	引用・参考文献	203

7. 仕 事 源

7.1	温度勾配による音響パワーの増幅と減衰	205
7.1.1	Ceperley の提案	205
7.1.2	進行波音場における実験	208
7.1.3	定在波音場における実験	213
7.2	音響パワー生成に必要な温度勾配	216
7.2.1	仕事源と温度勾配の関係	216
7.2.2	共鳴管内の気柱自励振動	220
7.2.3	ループ管内の気柱自励振動	222
7.3	蓄熱器におけるエネルギー変換効率	224
7.3.1	エネルギー変換効率の見積り	224
7.3.2	枝管付きループ管型音波エンジン	228
7.4	補 足	230
7.4.1	負荷付きループ管エンジンの作り方	230
7.4.2	ループ型水スターリングエンジン	231
	引用・参考文献	232

8. 熱 流 束

8.1	音波クーラー	234
-----	--------	-----

8.1.1 共鳴管型クーラー	236
8.1.2 ループ管型クーラー	239
8.2 蓄熱器におけるエネルギー変換効率	241
8.3 GM 冷凍機の冷凍能力	244
8.3.1 冷凍能力と音場の関係 (位相差)	247
8.3.2 冷凍能力と音場の関係 (振幅と周波数)	250
8.4 パルス管冷凍機の音場制御	252
8.4.1 オリフィス型パルス管冷凍機	252
8.4.2 イナータンス型パルス管冷凍機	255
8.4.3 位相制御機構の実験的検証	256
8.5 ドリームパイプ	257
引用・参考文献	260

9. 今後の展望

9.1 熱音響デバイスの応用展開に向けて	262
9.1.1 熱音響理論による設計方法	262
9.1.2 振動流場における熱交換器の問題	265
9.2 非線形非平衡系としての熱音響デバイス	267
9.2.1 衝撃波・準周期振動・カオス振動	267
9.2.2 同期現象	269
9.2.3 エントロピー生成最小則	271
引用・参考文献	273
索引	276



多様な 熱音響デバイス

まず、熱音響デバイスに関わる研究の歴史を紹介する。続いて、熱音響デバイスについて機能と形状の観点から簡単に分類し、それぞれについて具体例を紹介する。また関連する既存の熱機関についても説明する。本章で紹介する代表的な熱音響デバイスの基本的なメカニズムについては2章以降で述べる。

1.1 熱音響デバイスに関わる研究の歴史

初期の熱音響自励振動から現在に至るまでの熱音響デバイスと、それらを理解するために貢献した理論的研究（テキストを含む）、および熱音響の国際的な研究集会を図1.1にまとめている。本節ではこの図を見ながら歴史的経緯を簡単に振り返る。

1.1.1 熱音響研究の黎明期

ラプラス（Laplace）による断熱音速の提唱や、スターリング（Stirling）エンジンが発明された19世紀初頭は、現在から振り返ってみれば熱音響分野の黎明期に相当する。電磁気学、流体力学、熱力学からなる古典物理学と同様に、音響学もまた19世紀に大きく進展した。その成果はレイリーの著書¹⁾に詳しく記述されている。この中には粘性と熱伝導を考慮して展開されたキルヒホッフ（Kirchhoff）による管内音波伝搬に関する理論に加え、レイケ管、ソンドハウス管やsinging flameと呼ばれる水素炎により熱的に発生する気柱の自励振動といった熱音響自励振動に関する記述も含まれている。

項目	1970年	1980年	1990年	2000年
理論的研究	1868 キルヒホッフ論文 1877 レイリー, The theory of sound	▲ 1969 Rott 理論 ³⁾ 1979 Ceperley 論文 ²⁷⁾	▲ 1988 Swift レビュー論文 ¹³⁾	▲ 1998 富永, 熱音響工学の基礎 ¹¹⁾ ▲ 2002 Swift, Thermoacoustics ⁴⁶⁾
熱音響自励振動 および 音波エンジン	1859 レイケ管 1850 ソンドハウス管 1969 フルデザイン	1942 タコニス振動の報告 ²⁾ ▲ 1980 タコニス振動に関する系統的実験 ⁸⁾ ▲ 1984 共鳴管型音波エンジン ⁶⁾	▲ 1998 ループ管型音波エンジン ¹⁵⁾ ▲ 1999 枝管付きループ管型音波エンジン ¹⁶⁾	
音波クラー		▲ 1975 Merkl-Thomann の実験 ⁴⁾ ▲ 1982 共鳴管型音波クラー ⁵⁾	▲ 1998 ループ管型音波クラー ²⁸⁾ ▲ 2002 熱駆動型ループ管音波クラー ³⁹⁾	
ドリームパイプ		▲ 1984 ドリームパイプ ⁴³⁾	▲ 1996 自励振動式ヒートパイプ	
スターリング エンジン および 蓄冷式冷凍機	1816 スターリングエンジン ▲ 1960 ベーシック型パルス管冷凍機 ³⁵⁾ ▲ 1959 GM 冷凍機	▲ 1966 フリーピストンスターリングエンジン ▲ 1984 オリファイス型パルス管冷凍機 ³⁶⁾ ▲ 1990 ダブルインレット型パルス管冷凍機 ³⁸⁾ ▲ 1994 イナータンス型パルス管冷凍機 ³⁷⁾		▲ 1996 日米合同音響学会開催 ▲ 2001 第1回国際熱音響ワークショップ
その他		▲ 1988 波動冷凍研究会発足		

図 1.1 熱音響デバイスと関連する研究成果の研究歴。本書に登場する熱音響デバイスの開発年などを示している。

1.1.2 Rott の理論的研究

20 世紀に入り世界各地の低温物理の研究室で液体ヘリウムが入手可能になると、室温部と液体ヘリウム温度の低温部を接続する配管内で発生する強い気柱振動が報告されるようになった。最初の報告者にちなんでこの振動はタコニス (Taconis) 振動と呼ばれている²⁾。流体力学の立場からタコニス振動の線形安定問題に取り組んだのが Rott である³⁾。彼の理論はタコニス振動の発生条件を定量的に予測しただけでなく、Merkli-Thomann が観測した共鳴管内音波による冷却現象⁴⁾の説明にも大いに貢献した。その後、熱音響現象の応用を見据えた組織的研究が行われたのは 1980 年代に入ってからのことである。

1.1.3 ロスアラモス国立研究所と筑波大学の研究

温度勾配のある管内音波という流体力学の基本的問題が新たな展開を見せ始めたのにはロスアラモス国立研究所の Wheatley, Swift や、筑波大学の富永、矢崎の果たした役割が大きい。彼らはともに超流動ヘリウムに関連した低温物理分野の研究者である。Wheatley と Swift は後述するパルス管冷凍機に着想を得て、その動作周波数を可聴域にまで増加させることで共鳴管 (定在波) 型音波クーラーの開発に成功した⁵⁾⁻⁷⁾。同じ頃、富永と矢崎はタコニス振動に関する系統的实验を開始し、Rott 理論の正当性を裏付ける実験的証拠を提示した⁸⁾。富永はその後、パルス管冷凍機に興味を持ち⁹⁾、振動流体の圧力と流速の位相差に注目して音波エンジンや音波クーラーにおけるエネルギー変換と熱輸送のメカニズムを理論的に研究した。彼の理論は前述の熱音響自励振動のみならず、スターリングエンジン、パルス管冷凍機や GM 冷凍機のような振動流を用いた一般的な機器にも適用されることを示し、エンジンや冷凍機の種類と理解を飛躍的に向上させた。彼の理論的定式化はドリームパイプにも応用され、現在では熱音響デバイスの基本的な理解の方法として世界的にも受け入れられている¹⁰⁾。

Wheatley と富永の功績として特筆すべきは、流体力学的な側面のみが強調されてきた熱音響現象を、「熱流」と「仕事流」という新しい物理概念を用い

て熱力学的側面から理解することを試みたことだろう。流体力学は流れ場の時空発展を議論する。しかし熱機関の作業物質が流体（気体）であるとはいえ、熱機関で実行されるエネルギー変換を議論することは難しい。一方、平衡系の熱力学では「熱」と「仕事」のエネルギー変換や効率を議論するが、エネルギー流は登場せず、もちろん時間や空間も現れない。4章で示すように、熱流と仕事流は管内の定常的振動流に対して流体力学のエネルギー方程式から定式化される。熱流と仕事流で与えられたエネルギー方程式を体積分すれば熱力学第一法則が得られる。いわば、熱力学と流体力学を接続する物理概念が熱流と仕事流であり、熱音響現象を理解するうえで最も重要な物理量となる。共鳴管内の熱音響自励振動において、気体の圧力変動と流速変動の同時計測を通じて仕事流を初めて実験的に決定したのも矢崎と富永である。これ以来、仕事流の測定技術は、熱音響デバイスの物理的理解や性能評価にとって必要不可欠になっている。

高温と低温という二つの代表温度を持つ熱機関は本来、非平衡状態にある。熱流と仕事流は、熱機関を非平衡熱力学系として記述するために有効な物理概念でもある。すでに述べたように熱機関は平衡状態の熱力学で用いられる熱と仕事を用いて説明されてきた。熱機関の理解の仕方はカルノーの時代から、進展もないまま今日に至っている。今後、熱音響デバイスの理解を足がかりとして、熱流や仕事流が熱機関を含む自然現象を説明するための有力な概念になるものと確信している。

富永は1988年に自ら設立した波動冷凍研究会を通じて熱流と仕事流に関する研究成果の普及に努めてきた。この研究会は名称を変更しながら現在も国内の熱音響研究の中心的役割を果たしている。その結果、熱音響自励振動や音波による冷却現象のある種の熱機関として理解する手法が国内の技術者や研究者に受け入れられるようになった。1998年、研究会の成果は熱音響の最初のテキスト「熱音響工学の基礎」として富永によって出版された¹¹⁾。同年、矢崎らは世界に先駆け、仕事流を直接的に観測することによりループ管を用いた進行波型音波エンジンの実現に至った。ループ管エンジンのエネルギー変換メカ

ニズムがスターリングサイクルと同等であることが実証され、低い効率が欠点とされていた音波エンジンにとって大きなブレークスルーとなった。およそ30年間に及ぶ研究会の啓蒙活動と活発な研究活動が、国内外の熱音響研究を牽引する現在の大きな原動力になっていることは明らかである¹²⁾。

米国では Wheatley の死後、彼の研究は Swift をリーダーとする研究グループに引き継がれた。ロスアラモス研究所の研究成果は Swift によってレビュー論文として1988年に米国音響学会誌に掲載された¹³⁾。現在でも熱音響を研究する多くの研究者の文献として使用されている。彼は熱音響デバイスの設計を行うための数値シミュレーションコード DeltaEC を完成させるとともに、多くの実用化プロジェクトを主導した¹⁴⁾。1999年にはループ管エンジン¹⁵⁾を改良した枝管付きループ管エンジンが開発され、その成果が Nature 誌に掲載された¹⁶⁾。内燃機関と遜色ない効率が達成され、世界的に熱音響エンジンが注目され実用化研究が加速するきっかけとなった。

1.1.4 現在の研究動向

図 1.2 は、“thermoacoustic” というキーワードで学術雑誌に掲載された年ごとの論文数を示している。学術論文数が1990年代後半から徐々に増え始めたのは、熱流と仕事流に基づく理解の仕方とその合理性が世界に受け入れられ

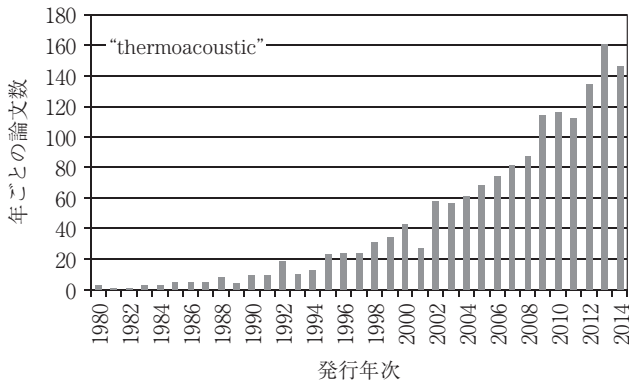


図 1.2 論文数の推移

索引

【あ】

圧縮率	57
圧力変動の進行波成分	168
圧力変動の定在波成分	168
安定曲線	222

【い】

位相	27
位相速度	36
イナータンス型	
バルス管冷凍機	17, 255
インダクタンス	84

【う】

運動エネルギー	57
運動方程式	29, 131

【え】

エネルギー散逸	44
エネルギーの緩和時間	45
エネルギー方程式	101
エネルギー流線図	107
円管内音波の特性音響	
インピーダンス	72
円管内音波の波数	36
エンタルピー	198
エンタルピー流	111
エンタルピー流束密度	102
エントロピー生成	95
エントロピー生成最小則	271
エントロピー流	104
エントロピー流線図	109

エントロピー流束密度	103
------------	-----

【お】

オイラー系	134
オイラー的	
エントロピー変動	141
オイラー的温度変動	152
オイラーの変動量	136
オイラーの密度変動	154
オリフィス型パルス管	
冷凍機	17, 121, 253
音圧	27
音響エネルギー密度	58
音響強度	58, 103
音響パワー	58
音響パワー増幅率	209
音響乱流	42
音響流	265
音響粒子速度	27
音響レイノルズ数	42
音源	9, 115
音速	27
温度が一樣な管内の	
波動方程式	155
音波エンジン	6
音波クーラー	6, 14

【か】

カオス振動	269
カルノー効率	96
カルノーサイクル	97
管路のイナータンス	84
管路のコンプライアンス	84

【き】

ギフォードマクマホン	
冷凍機	16, 244
ギブスの自由エネルギー	198
キャパシタンス	84
境界層の厚さ	34
共鳴管型音波エンジン	9
共鳴管型音波クーラー	14
局所的比カルノー効率	225
局所的比カルノー COP	242

【け】

減衰定数	36
------	----

【こ】

効率	95
----	----

【さ】

細管の場合の近似式	38
最小対数温度勾配	219, 220
最適位相角	247
作動気体	7

【し】

時間平均	52, 102
自己調節機構	223
仕事源	104, 196
仕事流	3, 100, 103, 105
仕事流束密度	103
実効的熱伝導率	259
瞬時の音響エネルギー	
密度	58

準周期振動 269
 衝撃波 268
 自励振動式ヒートパイプ 7, 20
 進行波 28
 進行波音波エンジン 116
 振幅の緩和時間 47

【す】

スタック 7, 220, 237
 スターリングエンジン 12, 92, 117
 スターリングサイクル 97
 ストローク数 42

【せ】

成績係数 96
 線形安定性解析 80
 線形化した運動方程式 133
 線形化した連続の方程式 133
 線形近似 132

【そ】

増幅率 206
 ソンドハウス管 10

【た】

対数温度勾配 217
 体積流速変動 84
 タコニス振動 80
 ダブルインレット型
 パルス管冷凍機 17
 単位体積当りの
 エントロピー生成 104
 断熱圧縮率 59, 200
 断熱音速 32
 断熱音波の波数 35
 断面内に関する
 ラプラス演算子 65
 断面平均 102
 断面平均エントロピー変動 146

断面平均密度変動 154
 断面平均流速 70
 断面平均流速に対する
 運動方程式 155

【ち】

蓄熱器 12, 15, 92, 107,
 206, 224, 241
 中立安定曲線 81
 長波長近似 132

【て】

定圧比熱 200
 定在波 63
 定在波音波エンジン 116
 定積比熱 200
 伝達行列 89, 263, 264
 伝搬定数 156

【と】

等温圧縮率 200
 等温音速 32
 同期現象 269
 動粘性係数 35
 特性インピーダンス 30, 72
 特徴長さ δ 217
 ドリームパイプ 6, 19, 257

【な】

内部エネルギー 198

【ね】

熱音響自励振動 7
 熱拡散係数 33
 熱緩和時間 34
 熱駆動型音波クーラー 6, 18, 124
 熱交換器 7, 107, 265
 熱膨張率 33, 200
 熱輸送の一般式 131
 熱浴 94
 熱力学的過程 31

熱力学的関係式 33
 熱力学の第一法則 94
 熱力学の第二法則 95
 熱流 3, 100, 103, 105
 熱流束密度 103, 192
 粘性緩和時間 35
 粘性係数 65
 粘性流体に対する
 運動方程式 65

【の】

ノイマン関数 67

【は】

波数 27
 波動方程式 27
 腹 63
 パルス管エンジン 10
 パルス管冷凍機 16
 半値幅 55

【ひ】

比音響インピーダンス 30
 非粘性流体の場合のオイラー
 的エントロピー変動 148

【ふ】

フェーザ 49
 複素振幅 49
 節 63
 物質微分 136
 太管の場合に
 正当化される近似解 37
 プラントル数 σ 36

【へ】

平面波 27
 ベーシック型
 パルス管冷凍機 17, 121
 ベッセル関数 67, 70
 ベッセルの微分方程式 66

— 著者略歴 —

琵琶 哲志 (びわ てつし)

- 1993年 名古屋大学工学部応用物理学科卒業
1995年 名古屋大学大学院工学研究科修士課程修了 (結晶材料工学専攻)
1999年 名古屋大学大学院工学研究科博士課程修了 (結晶材料工学専攻)
博士 (工学)
1999年 名古屋大学助手
2006年 東北大学助教授
2007年 東北大学准教授
2013年 東北大学教授
現在に至る

熱音響デバイス
Thermoacoustic Device

©一般社団法人 日本音響学会 2018

2018年7月25日 初版第1刷発行

検印省略

編者 一般社団法人 日本音響学会
発行者 株式会社 コロナ社
代表者 牛来真也
印刷所 新日本印刷株式会社
製本所 牧製本印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10
発行所 株式会社 コロナ社
CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844 · 電話 (03)3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-01136-4 C3355 Printed in Japan

(新宅)



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられています。
購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めていません。
落丁・乱丁はお取替えいたします。