

レイケ管による熱音響自励振動の可視化

井村 立美*、熊澤 克芳**、日影 達夫***
名古屋大学工学部工学研究科技術部

1. はじめに

熱音響と呼ばれる様々な興味深い現象がある。これは、文字どおり熱と音波とが関わり合う現象である。最近では、スターリングエンジン、スターリング冷凍機、GM 冷凍機、パルス管冷凍機に応用され、「音から熱をくみ出す」研究が盛んに行われている。熱音響現象のひとつとして、熱音響自励振動がある。1859年、オランダのレイケにより報告されたレイケ管は、熱音響自励振動系のなかでも、パイプの中に金網を入れた最も簡単な構造である。その方法は、金網をバーナーの炎で加熱し、十分に熱くなったところで加熱をやめる、すると数秒後に音が鳴り始めしばらくして音が鳴り止む。この現象が起こるメカニズムについては、衝撃波や金網付近の空気の膨張と収縮などが考えられているが未だ明確でないのが現状である。

そこで我々は、管内の金網を熱するだけで音が鳴るメカニズムを解明する手がかりの一つとして管内の様子を可視化することができればと考えた。この現象は空気の密度変化が原因の一つとして考えられているため、シュリーレン法とシャドウグラフ法を用いて行うこととし、本研修においてシュリーレン法の技術の習得と、レイケ管による熱音響自励振動現象を可視化する方法について検討することを目的に行った。

2. シュリーレン法とシャドウグラフ法の原理

熱せられた道路などでよく見かける「かげろう」や「シロップを水に溶かすときに見える明暗模様」は光学的方法による可視化が自然に起こった例である。

可視化には様々な光学的方法があるが、ここでは媒質の密度変化による屈折率の変化を利用したシュリーレン法とシャドウグラフ法について述べる。シュリーレン法とシャドウグラフ法の違いは、シュリーレン法がナイフエッジで光束をカットするのに対しシャドウグラフ法ではナイフエッジを使用しない事である。シュリーレン法の方が微小な密度むらに対して敏感に可視化することが可能である。

2.1 シュリーレン法の原理

ドイツ語の“Schlieren”とは空気やガラスのなかにできる光学的なむらという意味である。シュリーレン法の基となるナイフエッジを用いた工学的手法を考え出したのはFoucault(1859)であり、1864年、Toeplerがその原理を流れなどの可視化に応用した。シュリーレン法のもととなる光学系を図1に示す。まず、有限の大きさの光源SをレンズL₁の焦点に置き、レンズL₁, L₂間は平行光線が得られるようにする。測定部Pは平行光線内に置かれる。したがって、レンズL₂の焦点Kでは、光源Sの実像が結ばれる。このため、光源Sから出る光は測定部Pの全域を通過し、K点において像を結ぶ。この焦点Kにナイフエッジを置く。このナイフエッジは、レンズL₂で集光した点光源像の主光束をカットし、被写体で屈折・散乱した光のみを通過させて屈折・散乱した光で像を作るためのものである。また、測定部Pにおけるabの像は、レンズL₂とレンズL₃によって撮影面(スクリーン、フィルム)N上に結ぶ。

*機器・システム技術系、**計測・制御系、***分析・物質技術系

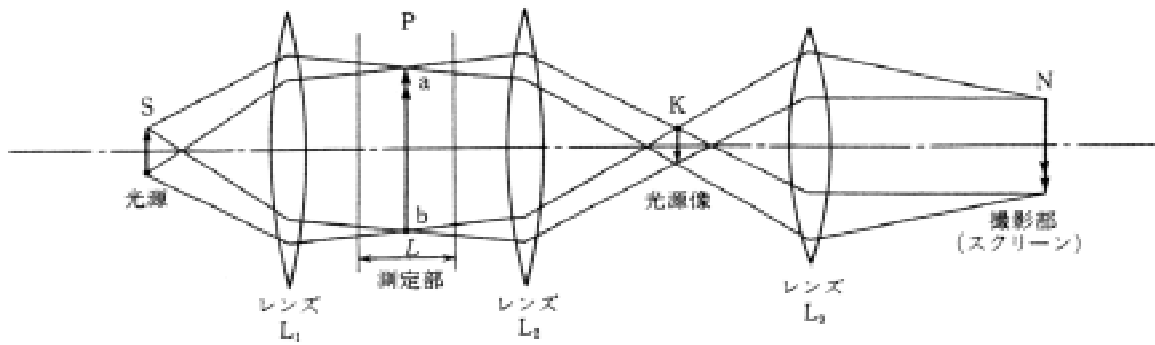


図1 シュリーレン法の基本光学系

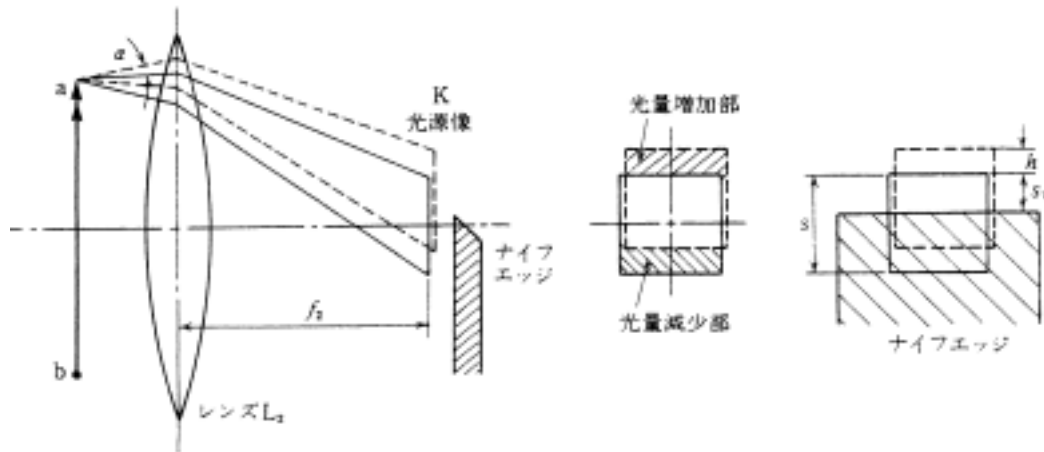


図2 ナイフエッジの原理図

このようにシュリーレン法の基本光学系はS - KとP - Nの2種類から成り立っている。レンズL₁、L₂は通常シュリーレンレンズと呼ばれ、レンズL₃はフィルムに撮影する場合にはカメラレンズに相当する。

ナイフエッジの原理を図2に示す。気体の密度変化に伴い測定部 a 点において光が角変位 α だけ屈折した場合を考えると、この時 K 点における光束の変位は

$$h = f_2 \alpha \quad (1)$$

となる。ここで f_2 はレンズの焦点距離である。

シュリーレン法の光学系のもう一つの特徴ある部品が、焦点Kにあるナイフエッジである。測定部において屈折による光束の変化がないときに、K 点にナイフエッジを図のようにおくと撮影部における光源からの明るさは、 (s_1 / s) 倍に暗くなる。この時の撮影部上の光度を I とする。光束に図のような角変位 α がある場合には撮影部上の a 点では h に比例する分だけ明るくなる。その増分を I' とすると、次式によってコントラスト c が定義される。

$$c = I' / I = h / s_1 \quad (2)$$

式(1)および密度 ρ の変化と角変位の関係を用いると

$$c = f_2 / s_1 \quad f_2 L / s_1 \cdot d / d y \quad (3)$$

ここで L はそれぞれ観測部の光路長、屈折率の密度の係数を表し y は観測部の上方向の座標を表す。
 (3)式によってスクリーン上の像、すなわちシュリーレン像のコントラストは、シュリーレンレンズ L_2 の焦点距離、光路長、屈折率、密度勾配に比例し、 s_1 に反比例する。

2.2 シャドーグラフ法の原理

シャドーグラフ法は 1800 年、Dvorak によって最初に火炎の影写真を得るために用いられた最も簡単な方法である。密度の不均一な流れの中を光線が通過する場合、屈折率が場所によって異なるために、光線の屈折も不均一になり通過した光は場所によって収束したり発散したりして明暗を生じる。この現象の像を結ばせるものではなく、現象の影を利用して密度の情報を得ようとするものである。平行光を利用したシャドーグラフ法の例を図 3 に示す。

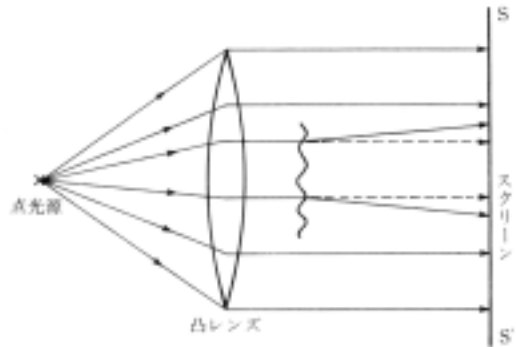


図3 平行光を利用したシャドーグラフ法

3. レイケ管の製作とシュリーレン・シャドーグラフ法の実験装置

可視化に用いたレイケ管は、直径 40mm のガラス管と 40mm 角の真鍮製角パイプの 2 種類を製作した(写真 1)。また、その長さはそれぞれ 700mm とした。シュリーレン・シャドーグラフ法では、ガラス管では平行光が回り込み、管が黒く見えるだけで中は観られない。そこで我々は、ガラスでも平面であれば光源から出る光を通すことから窓を取付ける

ことを考案した。窓ガラスは、パイプ下端より 100mm 上の位置(加熱する金網より少し上)に 2 枚の窓ガラスが平行になるよう、パイプに対して垂直に取付けた。真鍮製角パイプについては、中央にも窓ガラスを設けた(波長の節となる部分)。窓ガラスには、光の透過性のよい必要があるためカメラレンズ保護用フィルター(直径 58mm のスカイライト)を使用することにした。カメラレンズ保護用フィルターを交換使用するためにねじ込み式の窓枠(真鍮製)を取付け、管の気密性を保つために O-ring を用いた。図 4 に角パイプ寸法を示す。また、音源となる金網は、32 メシユのステンレス製である。



写真 1

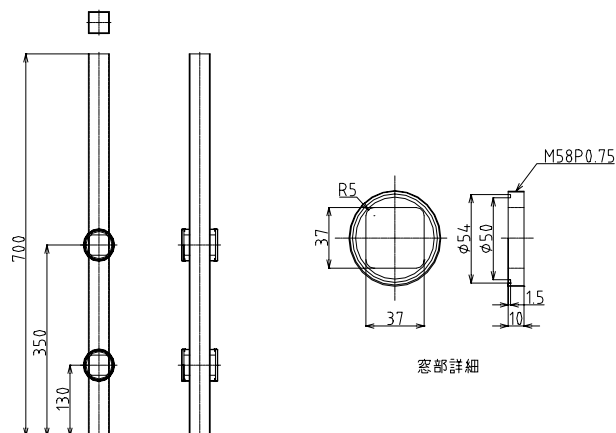


図4 角パイプ寸法

シュリーレン法の実験装置は図 1 に示した光学系を用い、光源には白色水銀灯、レンズは直径 300mm、焦点距離約 800mm (正式な値は不明) の凸レンズを 2 個それぞれ用いた。焦点 k にナイフエッジと、撮影には、500 mm の望遠レンズを使用した。

シャドーグラフ法の実験装置は、シュリーレン法と同様であるがカメラのかわりに、市販のスリガラスに像を写し、それをデジタルビデオカメラで撮影した。

4. 実験の方法

レイケ管の熱音響自励振動の発生方法は、まず管の中にある金網を十分赤くなるまでハンドガスバーナーにより加熱し、赤熱 (600 ~ 1600 程度と思われる) したならば炎を金網より引き戻す。この後、数秒後に自励振動が起こり、音が鳴りはじめる。この時の音の基本周波数は 250 Hz であった。この操作を撮影ごとに毎回繰り返した。(ニクロム線ヒーターでも音は出るが、ヒーターが垂れ下がる等の不具合があった。)

4.1 シュリーレン法による撮影

はじめに、光学系の光軸あわせを次のように行った。まず、光源 S のスリットとレンズ L1 との焦点距離は、レンズ L1 を通過した平行光を平面鏡により反射光として光源 S のスリットに像を結び、その像がスリット径と同じ大きさになるようレンズ L1 の調整を行った。次に、レンズ L2 の位置は、レンズ L1 の光軸に合わせ、レンズ L1, L2 間にレイケ管を置くことを想定し間隔を決めた。レンズ L2 の焦点 K にナイフエッジを置く。最後にカメラを通して光軸や像の大きさ、ピント等の調整を行った。さらに、肉眼で現象が鮮明に観られるようにコントラストは L2 の焦点 k に置いたナイフエッジを調節した。

撮影は、光の漏れ入らない暗い部屋の中で行い、撮影条件は、望遠レンズ絞り F5.6 の開放、シャッタースピードは、オート (およそ 40 分の 1 秒) で行った。また、フィルムは感度 ASA1600 の白黒フィルムを用いた。

4.2 シャドーグラフ法による撮影

図 1 の基本光学系でレンズ L3 の代わりにスリガラスを置くと、シャドーグラフ法である。スリガラスに写し出された像をデジタルビデオカメラや CCD カメラを用いて現象を撮影した。

5. 実験結果と考察

この研修では、自励振動源とパイプの中心を観察するために、二つの窓を設けた真鍮製の角パイプを主に使用した。像のコントラストについては、ナイフエッジ K で上下左右に微調整を行った結果、最も鮮明な画像が得られたのは、光源像の上半分をカットした時であった。

5.1 シュリーレン法による可視化

図 5 は、レイケ管内部における金網付近のシュリーレン写真を示す。写真の中央から上部にかけての幅広い白色部分はナイフエッジによる影響で波動とは無関係である。

(a) は、金網を加熱している状態の写真である。なだらかな曲面をした部分が金網であり、またその中の凸型をした白い中央部分も、赤熱された金網である。この状態では、ほんのわずかの上昇加熱気流がみられる程度であり、音は鳴らない。

(b) は、加熱後数秒後の音が鳴っている状態での写真である。多くの歯型状をした部分は、加熱された空気の流れであり金網メッシュから上部に噴出している。その上部には帯状の波がおよそ 3mm の間隔

で黒と白とに交互に数本出現していることがわかる。

(c)は、音が鳴っている状態の金網下部の写真である。下から金網に向かって空気の上昇が観測される。(d)には、音が鳴っている状態のレイケ管先端部分のシュリーレン写真を示す。この写真は、内径 18mm の円管を使い、 $0.2 \mu\text{sec}$ で発光するキセノン光源による単発光で撮影したものである。レイケ管先端部からは、複雑な模様をした空気の上昇気流がみられる。(連続光である水銀灯で撮影することは、不可能であった)

レイケ管による熱音響自励振動は、音の出ているレイケ管に蓋をすると音が止まる。また、音が鳴っている状態で管を水平にすると音が止み、ふたたび立てると音が鳴ることから、空気加熱上昇気流が大きな関わりを持っていることは間違いないとされている。

シュリーレン写真(a)、(b)から、加熱後数秒後に金網から噴出している気流は、かなり速度の速い上昇気流が金網メッシュを通過していると思われる。この金網メッシュを通過する上昇加熱気流は、気柱内全体の上昇気流よりも速度が速いため、管内の空気は圧縮され圧力の高い密度波(密な部分)ができる。圧縮された密度波は、体積弾性が復元力となり元の状態に戻ろうとして、さらに、次の圧縮された密度

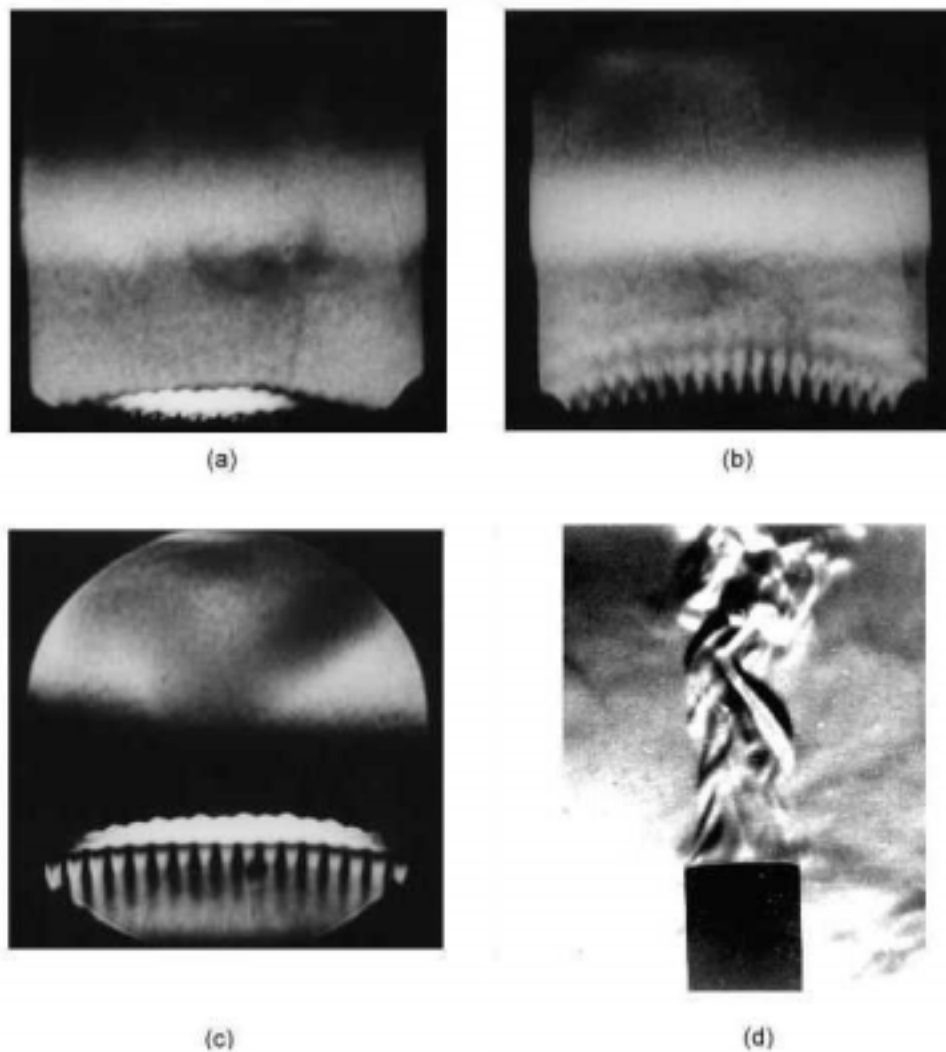


図5 シュリーレン写真

波ができる。この圧縮された圧力波が順次上部に伝えられていくと同時に膨張した圧力の低い疎な部分ができ、これも順次上部に移動していく。このようにして、空気の密な部分と疎な部分が音波として、次々につくり出され音が鳴ると推測される。

5.2 シャドーグラフ法による撮影

音が鳴る現象を視覚に訴えることができるデジタルビデオカメラでシャドーグラフ法により撮影した。しかし、密度差が少なくうまく撮影することができなかった。

6. まとめ

本研修において、シュリーレン法やシャドーグラフ法について知識と多くの経験を学んだ。

空気密度変化の小さい流れ場の可視化は、シュリーレン法においては今まで困難とされてきた。これは、窓の平行度や光学系の精度など平行光線の屈折と散乱が障害になり、明暗がわかりにくいと指摘されてきたからである。

しかしながら、窓ガラスにカメラレンズのフィルターを使用し、平行度を保つことでレイケ管のシュリーレン法による可視化法を少なからず確立することができた。今後、観測窓部における管内の凹凸による乱をなくすための創意工夫が課題となる。

また、レイケ管における音が鳴る現象の可視化について、誰もが成し得ることができなかったシュリーレン写真の撮影に初めて成功した。これを期に自励振動の起因について 解明すると共に、冷凍機の応用に期待されている熱音響エンジンの高効率化やシステムの改良、改善に大きな寄与ができると期待できる。

謝辞

この研修を行うにあたり、適切な助言と御助力をいただいた星野善樹技術長、元技術長坪井淳氏並びにシュリーレン光学系および測定場所をご提供いただいた丹羽文夫技術長に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 熱音響工学の基礎 富永 昭 著 (内田老鶴園)
- 2) 流れの可視化ハンドブック 流れの可視化学会 編
- 3) J. W. S. Rayleigh (J. W. Strutt): "The Theory of Sound" 2nd (Dover, 1896)
- 4) レーザー計測ハンドブック レーザー計測ハンドブック編集委員会 編 (丸善)
- 5) 流体音工学入門 望月 修・丸田芳幸 著 朝倉書店