気柱管内に発生する音響定常波の可視化

—定常波における振幅と音圧の状態検証とレーザーによる可視化—

吉村 時郎¹⁾, 藤原 英史²⁾, 川北 裕司³⁾

Visualization of the sound ordinary wave generated in an air column pipe

—The state of the amplitude and sound pressure in an ordinary wave. And visualization by laser.—

Tokiro YOSHIMURA, Eiji FUJIWARA and Hiroshi KAWAKITA

ABSTRACT

Since "Kundt's experiment", it has been well known that an acoustic stationary wave in an air column regularly places particles of powdered wood or foamed polystyrene at each loop of the wave in parallel stripes, but no one has never revealed why it makes the particles form a row in stripes. Although the movement of a medium on a stationary wave seems to play a critical role in this phenomenon, there was no visual material filming the clear images of the state of a stationary wave in an air column. The present study has a purpose to investigate and visualize the behavior of a medium on a stationary wave. The procedure of the study was as follows: While an acoustic stationary wave was being generated in an air column filled with cigarette smoke, the micro particles of the smoke were visualized through a laser scanning visualization system and filmed with a high-definition video camera.

Keywords: kundt's experiment, visualization by laser, an acoustic stationary wave, the micro particles

1. 緒 論

1866年のクントの実験¹⁾以来、気柱内に発生する音響定常波によって、管内にまかれた木粉が定常波の腹に集まることは知られている。今日では、本来の目的である音速計測より現象の面白さから、音の可視化という面で注目され、多くの教育現場で利用されている。また、音源にスピーカーを使用し、木粉から発泡スチロール粒子にかえることで、よりダイナミックに定常波を見る装置も考案されている。著者も平成7年からアクリル管を使ったクント管を自作し、音響定常波観測装置(Fig. 1.1)として教材研究を行ってきた。この装置を使うことで観測できる定常波の形状と、入射波の条件との関係は次のとおりである。

- (1) 気柱内で発泡スチロール粒子は弦の基本振動の様に、定常波の腹の中心を頂点とした Sin カーブを描く。(Fig. 1.2)
- (2) Sin 形状の山を形成している発泡スチロール粒子は、壁状に並んでいて、壁の方向は波の進行方向と垂直である。壁は一枚一枚が粒子一個分の厚さで薄く、上から見ると、縞状に並んでいる様に見える。(Fig. 1.3)
- (3) 入力波の振動数を変えて倍振動での山の形状や縞の幅を調べると、明確な法則性はなかった。

- (4) 入力波のアンプ出力を変えると、山の高さは高くなるが、縞の幅は一定であった。
- (5) 縞の幅は気柱管内にまく粒子の形状や材質による。

結果は全て既知のものであり、再確認できただけであった。しかし、なぜ木粉や発泡スチロール粒子がこのような形状を作るのか、理論的に解明した研究報告はなく、展示会などで説明に窮していた。当初、波動理論から導き出せると考え、倍音や波動方程式の関係性を調べた。定常波の式²⁾は次のようになる。

$$\text{入射波} \quad \xi_1 = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) \quad (1)$$

$$\text{反射波} \quad \xi_2 = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} + \pi \right) \quad (2)$$

$$\text{合成波} \quad \xi = 2A \cos 2\pi \frac{t}{T} \cdot \sin 2\pi \frac{x}{\lambda} \quad (3)$$

式(3)から、定常波の形状が sin カーブを描くことは説明できる。また、腹の位置で山が高くなっていることは媒質の速度ポテンシャルが重要な役割を果たしているはずである。そこで、音響エネルギーの影響を考え、内部の音圧と媒質粒子の運動を調べた。理論上、定常波における内部状態は次のように定義される。

「腹では媒質が最大振幅で振動し、音圧は一定である。」
「節では媒質の運動は無いが、音圧の単位時間当たりの変化量は最大である。」²⁾

1) 正会員 小松原学園小松原高等学校 (〒336-0017 埼玉県さいたま市南区南浦和 3-21-8 ☎048-885-1488)

2) (株)ドキュメンタリーチャンネル

3) 新日本空調(株) 技術研究所

そこで、内部の音圧を測定するためコンデンサーマイクを節と腹の位置に埋め込み測定した。すると、測定器の値は理論で定義されたとおりの驚くほど明快な値を示した。これをきっかけにして、腹では振幅が最大で媒質が激しく振動しているならば、発泡スチロール粒子や木粉はそれによって集められたもので、すなわち、壁と壁の距離-縞-は媒質粒子(空気分子)の実際の往復距離ではないかと、考えた。この説は矛盾点も多く、成立するものではなかったが、実際、明確に否定する映像資料(媒質の運動を直接撮影したもの)も無かった。

媒質の運動を直接可視化することは、クントの実験の解明において、大きなテーマであり、管内にまく粒子は様々な物質が試されてきた。中でも、究極の微粒子である煙を入れての実験も早いうちから試みられたが、色々な要因で成功していなかった。

本研究では、著者らは次の(a)(b)、2つの実験を行ない定常波の新しい可視化に成功した。

(a) 移動式測定器を用いて、気柱管内における音圧と媒質の振動状態を同時に測定した。

(b) レーザーによる微粒子可視化システムを用いて、煙を満たした気柱管内の定常波の撮影に成功した。

これらの実験過程における改良点や結果を動画資料とあわせて紹介したい。

Fig. 1.1 A sound standing wave observation device.

A ordinary wave. Frequency 510Hz.

Fig. 1.2 A ordinary wave. Frequency 343Hz.

Fig. 1.3 Close-up photography. It has stood in a line like a board.

2. 実験方法と改良点

2.1 実験(a)腹と節における音圧と振幅の状態検証

2.1.1 改良点(測定器作成)

これまで内部の音圧の測定は、アクリル管の側面にコンデンサーマイクを埋め込み測定していたが、固定式であり、多様な倍振動に対応できなかった。また、媒質の振動は他のもので観測しなくてはならないため、使い勝手が悪かった。そこで、音圧と振幅状態が同時にわかる可動式の測定装置(Fig. 2.1)を作成した。これによって、気柱管内を自由に移動し、音圧と振幅の状態を同時かつ、連続的に観測することが可能となった。

2.1.2 測定装置概要

1mの長さの棒の先に2cm四方のアクリル板を取り付け、コンデンサーマイクとセロハン片を設置した。マイクは外部の精密テストと接続している。音圧は静圧なので媒質の衝突による動圧の影響を受けないように水平に配置した。セロハン片は媒質の振動を効率よく受けるように、帆の形で振動面に垂直にたてた。(Fig. 2.1)

Outline figure

Fig. 2.1 Measuring instrument

2.1.3 測定手順

操作 1. 開管で2倍振動の定常波を起こし、腹と節の位置をテープでマーキングする。

- 操作 2. 開口端から測定器をゆっくりと挿入し、テスト
ーの変化とセロハンの動きを同時に観察する。
- 操作 3. 次に、アンプのレベルを下げ、マーキングされ
た腹と節の位置に測定器を置き、徐々にアンプ
のレベルを上げて観測する。
- 操作 4. 全て Hi-Vision camera で記録する。

2.2 実験(b)レーザーによる定常波の可視化

気柱管内に煙を入れストロボ光源をあてて定常波を観
測することは、これまで度々行われてきたが、目視はも
ちろん、映像にはっきりと定常波の特性をとらえたもの
は報告されていない。煙が拡散する速さが早く、通常の
ストロボ光源では媒質の振動を確認するまでにはいたら
なかった。今回は、より強力な光源としてレーザーによ
る観測手法¹を採用した。サブミクロンレベルの微粒子
の補足が可能で、気柱管内に残った微量な煙もはっきり
と浮き上がらせた。システムの概要は以下のとおり。

2.2.1 装置概要

気柱管内の煙の撮影には微粒子可視化システムを利用し
た(Fig.2.2)。光源としては波長 532nm の DPSS(Diode
Pumped Solid State)レーザーを用いた。光源からのレーザー
光を、ガルバノミラーを用いシート状にし気柱管内に照射し
た。気柱管内の煙粒子からの散乱光をハイビジョンカメラで
捉え気柱管内の空気動きを可視化できるようにした。

Fig. 2.2 Particulate visualization system.

2.2.1 改良点1(四角柱気柱管の作成)

当初、共鳴管に円柱のアクリル管を用いていたが、レ
ーザー光が乱反射し、うまく管内に入射しないので四角
柱のアクリル管(Fig2.3)を作成した。円柱も四角柱もホ
イヘンスの法則から内部にできる定常波は2次元的に同
じである。

Fig.2.3¹⁾ The acrylics pipe of a square pole. We irradiated a laser for the side of the quadratic prism perpendicularly to prevent the reflection of the laser.

2.2.2 改良点2(音漏れ防止)

煙をいれて一番困ったことは煙が隙間から外部へ噴出
すことであった。閉管の共鳴は密閉して行うが、少しで
も隙間があると見る見る内部の煙は薄くなり、レーザー
に反射しなくなった。また、各辺の目止めをしっかりと行
わないとそこで乱流が起き、内部に竜巻状の渦流を起こ
した。入れ歯安定剤を用いて丁寧な目止めをした。

2.2.3 測定手順

- 操作 1. 気柱管内にタバコの煙を吹き入れ、端を塞ぎ、密
閉する。そのまま数分待ち、管内の気流を安定さ
せる
- 操作 2. 発信器を調整し、閉管で $1/2\lambda$ の定常波をつくる。
アンプのレベルを上げ観測する。
- 操作 3. ガルバノミラーの振動数を調整して定常波の倍
振動付近にし、動きを確認する。
- 操作 4. 同様に 1λ の定常波について行ない、全て
Hi-Vision camera で記録する。

3. 結果と考察

3.1 実験(a)の結果

腹と節における音圧と振幅の状態は検証実験の結果、
文献²⁾で定義された通りであった。Fig. 3.1

Fig. 3.1¹⁾ Sound pressure and amplitude in belly and paragraph of standing wave. The same value as the theory was indicated.

3.2 実験(b)の結果

実験 2.2 レーザーによる定常波の可視化の結果は
Fig.3.2 に示すとおりである。振動数 512Hz については
動画を結果の最終行に添付した。注目すべきは乱流が起
きていない点である。はじめ、煙を吹き込んだときにで
きた渦模様がそのままの形で振動している。この綺麗な
渦の模様は振動をとめるまで最後まで残っていた。

In an air column pipe of 1m in length, the standing
wave of the wavelength $1/2\lambda$ is made. It inputs with a
right speaker, and it reflects on a left reflection edge.
Frequency 171Hz.

1. 「微粒子可視化システム」新日本空調(株) (〒391-0013 長野
県茅野市宮川字墨筋内 7033-182 Tel0266-73-9611) 所有

The one that the vicinity of fixed edge was expanded. The paragraph is made in the edge. Frequency 171Hz.

This figure is a belly of an ordinary wave. The arrow shows the oscillating direction. Frequency 171Hz.

Frequency 341Hz.

Fig. 3.2⁴⁾ The whirlpool pattern did not disappear and expansion and contraction was repeated. The arrow in figure indicates the direction and the width of the vibration as an image. It is not actual width of displacement. Frequency 512Hz. [Link of this image to animation](#).

3.3 考察

実験 3.2 の結果から解ったことは、共鳴中の気柱内で縞は見られず乱流や激しい渦もなかった。観察できた現象は、「腹から節にかけて音場が安定して一様に伸縮を繰り返している。」ということであった。よって、縞の幅は媒質の往復距離ではないことは証明された。では、縞の幅と壁の高さ(Fig. 1.3)はどこから来るのだろうか。これまで観測されたことを整理すると、この形状は「気柱管内に撒く粒子と媒質の運動との相乗効果から生まれるもので、粒子の材質や形状に影響される。」となる。また、定常波の腹における現象であり、sin 形状を描くことから、

媒質の速度ポテンシャルに起因していることは容易に想像できる。タバコの煙を入れ、内部の空気の乱れが少ない安定した媒質の動きを観察できた中に、発泡スチロール球一粒を気柱の中に入れると、その一粒だけで、管内の空気が大きく乱されてしまった。結果として、レーザー光線を使った観察ができなかった。シリカの粉末を入れたときは、シリカの粉末粒子がランダムに動く減少が見られたその挙動は、タバコの煙の粒子とちがいで、規則性のないかなり激しい動きであった。共鳴時、管内の空中の何もないところで、あたかも何かにぶつかったかのように、シリカの粉末粒子の運動の向きが変わる発泡スチロール球や、シリカの粉末は、タバコの煙よりも、体積、質量ともあるので、体積、もしくは質量がある程度大きな方が、挙動が激しいというところがとても興味深い。今後は気体成分の影響及び粒子の材質や形状、特性など物性面からの検証を行い、全容解明につなげたい。

5. まとめ

レーザーによる可視化システムによって、従来のストロボ技術では見ることはできなかった音響定常波中の煙粒子の運動がはじめて可視化されたことは、今後、同様の微粒子による運動解析法に大きな影響を与えるはずである。これまでの数値解析と CG による可視化に加え、実写が加わることでより正確な分析と理解が進展する。優れた撮影技術と計測技術からなる可視化技術は物理現象の研究に不可欠なものであり、基礎となる物理教育においては、その授業方法を根本から変える Factor になっている。今後も物理現象の可視化に精力的に取り組んでいきたい。

謝 辞

資料画像及び動画を提供いただいた(独)科学技術振興機構、及び、山口東京理科大学加納誠教授、東京理科大学柳澤三憲教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 物理学辞典改訂版 培風館 (1992) 物理学辞典編集委員会編 pp.559-560
- 2) 大学演習 一般物理学 pp.99-100
- 3) The Illustration of Sound Field Distribution in a Model Room by Means of Dust Figure. Kozi SATO, Masaru KOYASU, Shun-ichi NAKAMURA (Kobayashi Institute of Physical research), Keiichi KUBO (Aeronautical Research Institute, Tokyo University), Yuriko MIYAHARA (Gakushuin University) (Received January 28, 1960) 日本音響学会誌第 16 巻第 1 号 (1960)
- 4) 出展: Fig. 2.3-3.2 は独立行政法人科学技術振興機構 (JST) より、理科ねっとわーくのデジタル教材画像の転載許可を得て掲載しています。無断で複製・転載することは禁じられています。