

# 計算機シミュレーションによる

## 気柱振動の可視化と開口端反射の本質追究

仲野 純章 (奈良県立奈良高等学校)

山脇 寿 (物質・材料研究機構)

学習者の現象理解を助ける直接観察が難しい現象の一つに、「気柱振動」がある。そして、気柱振動に関連する一現象「開口端反射」に至っては、直接観察が難しいだけでなく、現象の本質も十分把握されていないまま物理教育現場での指導が展開されているという実態がある。我々は、こうした実態を問題視し、固体中の超音波伝播挙動を調べる計算方法を気体中の音波伝播挙動の分析に応用して、これらの現象の可視化を進めてきた<sup>1)</sup>。今回、可視化を進める中で開口端反射の本質に迫る重要な示唆を得たので紹介する。

キーワード：物理教育、可視化、気柱振動、開口端反射

### 1. 問題の所在

物理教育現場で扱われる気柱振動は、気柱が中空管（以下、管と呼ぶ）内で定常波を形成し、気柱共鳴を起こしている状態のものが主となる。そして、一般的な解説書では、気柱共鳴に関する説明として、「開口端や閉口端で気柱振動が反射して定常波ができ、このとき、開口端では自由端反射し、閉口端では固定端反射している」旨の記述が見られ<sup>2)</sup>、図1のような概念図が多用される。

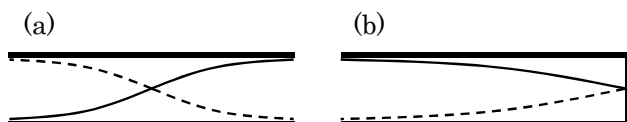


図1 気柱共鳴を表現した概念図；

(a)開管内での基本振動, (b)閉管内での基本振動

ところが、気柱振動の直接観察は容易に叶わず、概念図通りの現象が起こっていることへの納得性確保に課題が残る。予てより、筆者の一人は、物理教育現場で学習対象となる現象の可視化が不十分であれば、その現象に関する学習者の思考過程に支障が出ることを報告するなど<sup>3)</sup>、現象可視化の重要性を主張してきたところであり、気柱振動に関しても何らかの可視化が望まれる。

仮に、気柱振動の直接観察を試みようとした場合、屈折率の僅かな差に起因する光線の進行方向

変化を利用して密度構造を可視化する Schlieren 法を始め、Fresnel 法や光弾性法、鋭敏色可視化法<sup>4),5)</sup>などの応用が考えられる。ただし、これらの技術はいずれも特殊な装置が必要である上、そもそも当該用途への応用事例もなく、有用性は未知数である。そのような中、汎用的に用いられる指導時の演示や実験としては、メロディパイプを振り回す演示、気柱共鳴実験、そしてクントの実験などといった「間接的」な現象確認手法が多い。メロディパイプを振り回す演示や気柱共鳴実験はあくまで気柱共鳴の発生を聴覚的に実感するものであり<sup>6)</sup>、視覚的な現象観察はできない。一方、クントの実験は気柱共鳴が発生している際、空気が振動していない節部に粉末が集まることを視覚的に確認し、定常波の存在を間接的に実感しようとするものであるが<sup>7)</sup>、やはり気柱振動そのものを可視化できている訳ではない。以上のように、気柱振動については、学習者の現象理解を助ける有効な可視化手法に欠けるのが実態である。

気柱振動に関わる現象の中でも、開口端反射は、壁面のない所で「反射」とされる、特にイメージしにくい現象であると思われる。しかしながら、その現象の解明は十分進んでおらず、解説書内での説得力あるメカニズム説明も見られない。従って、教授者側においてもそのメカニズムに対する共通認識が形成されているとはいえず、

種々の解釈が混在する<sup>8)10)</sup>。

以上のような実態を受け、我々は、計算機シミュレーションによる気柱振動の可視化とそれに基づく分析に取り組んできた。

## 2. 目的

計算機シミュレーションによる気柱振動の可視化を試み、物理教育現場での活用にも耐え得る可視化画像の取得可能性を見極めると共に、開口端反射の本質追究に寄与する新たな知見を見いだすことを目的とした。

## 3. 方法

### 3.1. 計算方法の概要

開口端反射を含む気柱振動については、これまで、一次元モデルを用いた計算機シミュレーションが試みられたことはあった<sup>11)</sup>。しかし、空間的な広がりを見せる振動現象を一次元で解析・評価するのは限界があり、現実の系を極端に単純化した中での限定的な考察に留まっている。

今回、我々は、二次元計算機シミュレーションにより気柱での音波の伝播を可視化した。金属などの固体物質に対する超音波を使った非破壊検査というものは、今や一般的である。用いた計算機シミュレーションは、こうした超音波を用いる非破壊検査などに絡む固体中の超音波伝播挙動を調べるために開発したものである。三次元固体を微小立方体に分割し、隣り合う立方体間に働く力と立方体の運動を応力と粒子速度で表現される二段階の弾性波動方程式を基にした離散化式で計算する手法で、改良型差分法<sup>12)</sup>と称している。計算対象の物体を計算機メモリ中に積み木のように構築し、各計算点（微小立方体）の運動を時間ステップ毎に計算する。この手法を用いると、固体同様に、管内の気体、すなわち気柱をも計算対象とすることができる（ただし、あくまで気体を固体のごとく扱うので、流れている気体中での音波の伝播は計算することはできない）。このとき、パスカルの原理に従うそれらの弾性特性を $6\times 6$ の弾性

マトリックス（弾性率テンソル）で表現し、流動しない弾性体として扱う。

### 3.2. 詳細計算条件

詳細計算条件を以下に示す。空気の密度と弾性率  $C_{11}$  はそれぞれ  $1.2\text{kg/m}^3$ 、 $1.39\times 10^5\text{Pa}$  とし、空気中での音速が  $340\text{m/s}$  となるようにした。計算対象の気柱は、一端は閉口、他端は開口した管で構成した。一方、管壁は、音波を完全反射する剛体に近づけるため、鋼の弾性マトリックスを持つが、密度が  $2.37\times 10^6\text{kg/m}^3$  と極めて大きい仮想固体で構成した（註参照）。この仮想固体では、音速は空気中と同じ  $340\text{m/s}$  となる。計算の細かさを示す空間ステップは  $0.5\text{mm}$ 、時間ステップは  $0.5\mu\text{s}$  とし、管形状は、長さ  $500\text{mm}$ （1000 計算点）、内径  $100\text{mm}$ （200 計算点）、管壁厚さ  $2.5\text{mm}$ （5 計算点）とした。なお、計算は三次元で行っているが、誌面垂直方向は周期境界条件を適用することで、二次元化して計算を容易にした（従って、管は平行な板壁である）。気柱での音波の発生については、管長手方向の中央断面に位置する計算点に、周期  $0.1\text{ms}$  正弦波の 2 周期分の変位振動を管長手方向に印加した。これにより、中央断面から 2 方向に向かって位相の異なる平面波が発生・伝播することになる。気柱での音波の共鳴周波数は管長さで決まり、通常、管内径よりも長い波長の音波となるが、それでは、開口端での波の挙動を詳細に観察することが難しくなる。そのため、ここでは、管内径よりも短い波長の音波を用いた。

## 4. 結果と考察

計算結果である可視化画像を図 2 に示す。ここでは、気柱中央断面から発生した音波が伝播する時々刻々の様子を、体積歪みに対応したグレースケールで表現している。この表示では、膨張歪みは明で、圧縮歪みは暗で表現されており、これは、疎密波の表示に相当する。

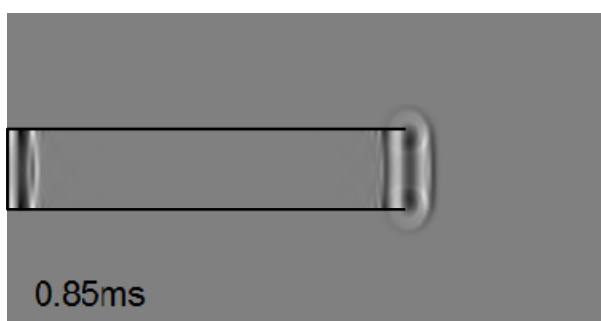
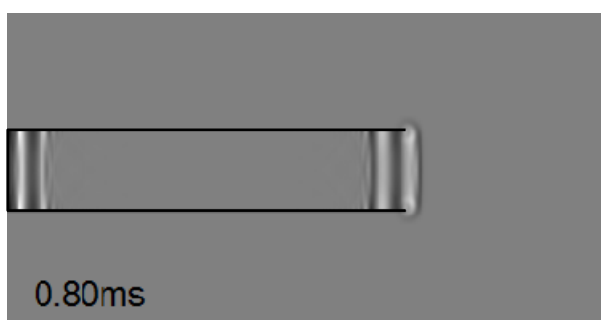
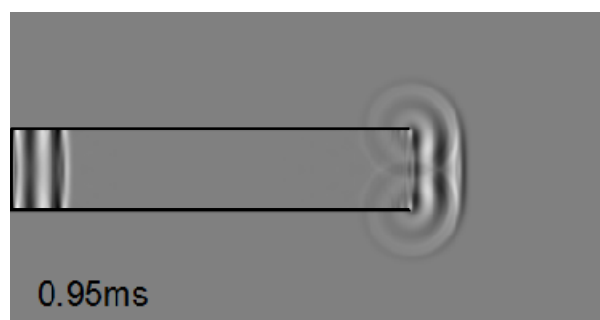
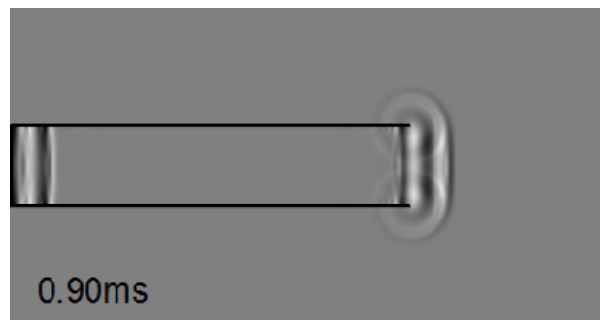
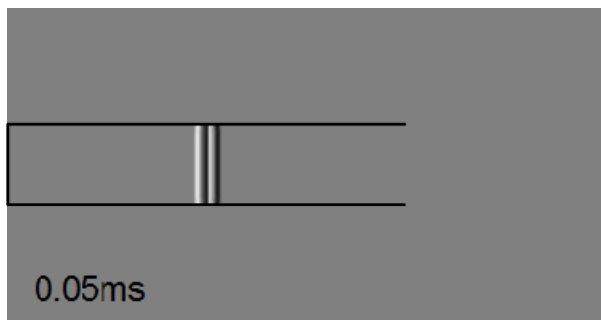


図2 管（長さ：500mm，内径：100mm，左端：閉口，右端：開口）内の気柱中央断面から発生・伝播する音波の可視化画像  
※ 各画像中の時間は音波発生からの経過時間

閉口端に注目すると、気柱を左方向に伝播する音波が閉口端に達した後、右方向へ気柱を逆伝播すると共に、その際、波の明暗パターンが変化なく保持されているのが確認できる。すなわち、閉口端での反射では、疎密波の位相は変化しないことが確認できる。

一方、開口端に注目すると、気柱を右方向に伝播した音波が開口端に達した際、開口部の縁ではほぼ完全な円形の回折波が生じ、その回折波が管の外側だけでなく内側にも逆伝播する様子が確認できる。また、二つの縁からの回折波が、管の内側で重なり、開口端からの「反射波」であるかのように振る舞うのも確認できる。すなわち、この現象が開口端から逆方向に伝わる「反射波」となることがわかる。さらに、管壁に沿って伝播する回折波を管の外側と内側で比較すると、互いに明暗パターンが反転していることが確認できる。すなわち、管の外側へ伝播する回折波は、開口端から出射する波の位相を保持している一方、管の内側へ逆伝播する回折波は位相が反転していることになる。このことは、管の内側を伝播してきた疎密波が開口端で「反射」して管の内側へ戻る場合、「開口端で位相が反転する」とされる一般認識とも合致する。なお、音波の伝播が開口端に達した際、開口端から管の外側にも広く伝播することは、図 2 からも明らかである。気柱共鳴分野の指導では、開口端で起こる現象として「反射」だけに言及するが、より本質的な指導をするとなれば、こうした管の外側への伝播についても触れるべきであろう。

今回の計算結果からは、開口端の縁に限らず、平面の壁に沿って伝播する音波が壁の切れ目や角のような不連続部分に達すると、やはり逆伝播する回折波が発生することが示唆される。音響機器に関する分野では、この現象は少なくとも経験的には認知されており、例えば、スピーカーの振動板から発生した音波を忠実に伝播させることを目的に、スピーカーボックスの前面板と側面板の成す角を滑らかな円弧状に形成する（ラウンドバッ

フル）ことで、角から戻ってくる回折波を抑制する工夫がされている<sup>13)</sup>。

なお、本稿では、空気の流れを伴わない気柱での音波の伝播を研究対象とし、独自の計算機シミュレーションにより開口端反射の本質に迫った。これと目的や方法は異なるが、空気の流れを伴う（空気が圧力室から管を通して外部に放出される）過程での圧力波、すなわち音波の発生について研究した報告がある<sup>14)</sup>。当該研究では、開口端反射についての議論はなく、また、圧力室を開放することで管内を進行する空気の流れを計算の初期条件としているなど、そもそも本稿のように気柱共鳴に関わる音波の現象を計算しているわけではない。しかしながら、その中で示されている彼ら独自の数値解析結果に基づく等圧力分布図からは、圧力波が開口端に達した際、開口端の縁から管内部へ逆伝播しようとする波の存在が確認することができ、我々の結果を補強するような結果が見取れる。

## 5. まとめ

今回、二次元計算機シミュレーションという手段により、開口端反射の本質追究に焦点を当てながら、気柱振動の可視化を行った。その結果、気柱を伝播する音波の時々刻々の様子が、体積歪みに対応したグレースケールで表現された明瞭な可視化画像として得られた。また、可視化画像からは、「管の内側を伝播する音波が開口端に達した際、開口部の縁で管の外側だけでなく内側にも向かう回折波が生じ、これが気柱を逆方向に伝わる波となる」という、開口端反射の本質追究を進める上での重要な示唆も得られた。

今後、計算結果を支持する実測データ取得に向けた実験系設計を検討していくと共に、教育実践上のフィードバックのあり方を検討していきたい。

**註** 鋼などの固体をそのまま管壁に用いると、固体中の桁違いに速い音波も計算する必要があり、計算の細かさを 10 倍以上にする必要が生

じる。その無駄をなくすために仮想固体を用いた。なお、今回の条件では、空気から管壁に侵入・透過する音波は極めて小さく、無視できる。

#### 参考文献

- 1) 山脇寿, 仲野純章: 超音波エレクトロニクスの基礎と応用に関するシンポジウム講演論文集, (2018), 1P1-7.
- 2) 植松恒夫, 酒井啓司, 下田正(編): 物理基礎改訂版, 新興出版社啓林館, (2017), 166.
- 3) 仲野純章: 理科教育学研究, 59(1)(2018), 105-111.
- 4) 安達牧希, 泉野香奈, 昌本慶彦, 山本健: 日本物理教育学会年会第 27 回物理教育研究大会講演予稿集, (2010), 102-103.
- 5) 山本健: 電子情報通信学会技術研究報告, 112(146)(2012), 29-34.
- 6) 本弓康之: 物理教育, 62(4)(2014), 241-244.
- 7) 安達健, 新井洋二, 松田和久: NAGARE, 11(4)(1980), 25-29.
- 8) 石川昌司: 物理教育, 52(1)(2004), 34-35.
- 9) 細谷哲雄, 越後谷恒, 堀亨, 千野司, 高橋暁, 涌井元三, 奥井航, 飯高匡展: MINIMUM, 学校法人市川学園, (2017), 160-161.
- 10) 左巻健男, 滝川洋二(編): たのしくわかる物理実験事典, 東京書籍, (2001), 178-179.
- 11) 舛谷敬一, 吉川晃: 物理教育, 38(3)(1990), 180-183.
- 12) 山脇寿: 非破壊検査, 59(12)(2010), 624-629.
- 13) ヤマハ株式会社: 特許第 5293549 号.
- 14) 青木俊之, 半田太郎, 松尾一泰: 可視化情報学会誌, 20(1)(2000), 447-450.