

# 音叉が形成する音場の可視化

## —理科教育における音叉関連現象への納得性確保に向けて—

Visualization of the sound field formed by a tuning fork

—Toward a clear understanding of phenomena related to a tuning fork in science education—

仲野 純章<sup>1,2</sup>, 山脇 寿<sup>3</sup>

<sup>1</sup>奈良県立奈良高等学校, <sup>2</sup>京都大学大学院理学研究科附属サイエンス連携探索センター,

<sup>3</sup>(元)物質・材料研究機構

Sumiaki Nakano<sup>1,2</sup>, Hisashi Yamawaki<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Nara Senior High School

2-11 Suzaku, Nara, 631-0806 Japan

<sup>2</sup>Center for Science Adventure and Collaborative Research Advancement, Graduate School of Science, Kyoto University

Kitashirakawa Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502 Japan

<sup>3</sup>(Former) National Institute for Materials Science

1-2-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki, 305-0047 Japan

キーワード：理科教育, 音叉, 音波, 音場, 計算機シミュレーション

Key words : Science education, Tuning fork, Sound wave, Sound field, Computer simulation

### 抄録

理科教育で多用される音叉については、その周辺でどのような音場が形成されるか十分に理解されていない。このような中、弾性波伝播の計算機シミュレーション法である改良型差分法を用い、音叉周辺の音場の可視化を試みた。その結果、音叉周辺の疎密波伝播の様子や振幅分布を示す可視化像が得られた。そして、可視化像から、音叉周辺の近距離音場では4方向で大きな音が生じるが、遠距離音場では2方向でのみ大きな音が生じるなどといった音場の特徴が確認された。また、今回明らかとなった音叉周辺の音場の特徴は、単音源周辺に形成される音場を基に捉えたと理解しやすいことが示された。

### 1. 緒言

我が国の理科教育では、小・中・高等学校を通して、音に関連した学びが展開される<sup>[1-3]</sup>。このうち、小学校では、音を出したときの物体の震え方に着目して、「物から音が出たり伝わったりするとき物は震えていること」や「音の大きさが変わるとき物の震え方が変わること」などを理解することが求められる。一方、中学校では、小学校での学びを基礎に、「音は物が振動することによって生じ、空気中などを伝わること」や「音の高さや大きさは物の振動の仕方に関係すること」など、音の性質についてより深く理解することが求められる。そして、高等学校では、音を波動現象として捉え、発生・伝播の仕方を波動現象として詳細

に解釈すると共に、干渉や回折といった音に関する様々な現象を波動現象と関連付けながら理論的に理解することが求められる。

こうした音に関する一連の学びにおける汎用的教具の一つに図1に示すような音叉がある(本稿の図は全て筆者により撮影・作成)。音叉は、アルミニウムや鋼鉄などからなる、底部にハンドルを有したU字型の金属製音源である。音叉を槌で打つと、U字型の湾曲部に節を持ち、両端の腕が互いに近づいたり離れたりする横振動(たわみ振動)が基本的な振動モードとして生じ<sup>[4]</sup>、これに対応した音が生じる。このように、音叉は、単一振動数の音に近い音を容易に出せる手軽な音源として多用され、検定済教科書にも多く記載されてきた。

その一方で、理科教育において音叉が形成する音場について言及されることは少ない。特に、音を波動現象として理論的に理解することが求められる高等学校段階の物理では、検定済教科書に音叉と関連付けた内容が多数見られるものの、音叉から音波がいかに発生・伝播し、音叉周辺にどのような音場を形成するのかといった内容に関する解説は見られない。例えば、高等学校物理の検定済教科書の一つにおいて、「音の干渉」との標題の下、音叉を鳴らしながら耳の近くで回転させ、音叉周辺の音の強弱(図2)を確認させると共に、その理由を考えさせる簡易実験の記載事例がある<sup>[5]</sup>。また、当該教科書に対応した教授資料には、「音叉をゆっくりと回転させると、音が大きく聞こえる所と小さく聞こえる所が交互に現れる。これは、2つの腕による音波が干渉するためである。」との解説が図2同様の概念図を添えて記されている<sup>[6]</sup>。しかし、こうした簡易実験の現象解釈に必要な科学的根拠は教科書や教授資料に詳述されておらず、学習者はもとより、彼らを指導する教員の納得性確保の面で課題が残る。



図1. 音叉と槌

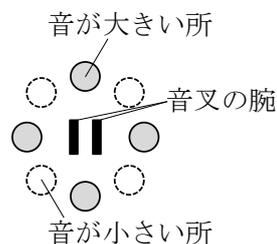


図2. 音叉周辺で聞かれる音の概念図(平面図)

そもそも、音叉周辺の音場に関する議論は古くからなされてきたが、基本的理解は不十分なままである。音叉周辺に形成される音場については、従来、次のように解釈されてきた<sup>[7,8]</sup>：(1) 音叉の腕が外向きに離れる際には、腕の並ぶ方向(図2の左右方向)に空気が収縮して密度が大きくなった密部が送り出され、腕を垂直二等分する方向(図2の上下方向)に空気が膨張して密度が小さくなった疎部が送り出される、(2) 音叉の腕が内向きに近づく際には、腕の並ぶ方向に疎部が送り出され、腕を垂直二等分する方向に密部が送り出される、(3) このようにして疎部と密部が交互に繰り返される疎密波(音波)が4方向に伝播し、音叉周辺の4方向に大きな音が生じる。こうした従来

の解釈を踏まえ、Russellは双極子モデル音源で解析的に音場を計算して、より厳密に音叉の形成する音場の説明を試みている<sup>[9]</sup>。その結果、音叉の至近距離では4方向で大きな音を聞くことができるが、音叉から十分距離を隔てると大きな音が聞こえるのは2方向のみになるなど、従来の解釈からの修正を提起した。ただし、Russellによる一連の解釈過程は、一般に理解を求めるには難解な点が多く、理科教育での引用にも馴染まない。

このような中、超音波計測の分野では、計算機シミュレーションによる固体や空気中の音の伝播の可視化が現象の理解を容易にしている事実がある。そこで、本研究では、計算機シミュレーションを活用して音叉周辺に形成される音場の可視化像を取得し、音叉周辺に形成される音場や各種の音叉関連現象への納得性確保に向けた知見を導くことを目的とした。

## 2. 方法

弾性波伝播の計算機シミュレーション法である改良型差分法<sup>[10,11]</sup>を用い、音源となる音叉から伝播する疎密波が形成する音場を2次元で可視化した。このとき、まず単音源で評価した上で、音叉に見立てた対称2音源での評価を実施した。対称2音源は、単音源を一定の間隔 $W$ で並列に2個配置したものであり、その配置方向において互に対称に振動するものである。

通常音叉は、数mmから数cmの間隔 $W$ を持ち、可聴領域(周波数20Hzから20kHz)の音を発することから、仮に、可聴領域上限の20kHzの音が発せられた場合でも、その波長は約17cmとなり、2音源の間隔に対して極めて大きいものとなる。このように、音叉では、「生じる疎密波の波長は2音源の間隔に対して極めて大きい」という条件が成り立つ。本研究では、この条件を満たす範囲内で、波の伝播や振幅の様子を明瞭に観察できることを考慮し、2音源の間隔 $W$ に対する疎密波の波長を約6.8倍に設定した。すなわち、音源から近い音場と遠い音場の両者を観察でき、かつ空間を伝播する音波の振幅分布を精度よく求められるよう、音源周辺空間の各計算点を複数波長が通過することと計算量を考慮し、計算点を次のように決定した：(空間全体の計算点数)3000点×3000点、(対称2音源の間隔)20点、(長方形音源の寸法)10点×2点。なお、具体的な寸法を例示

すると、対称2音源の間隔  $W$  を 20 mm と仮定した場合、長方形音源の寸法は 10 mm × 2 mm、疎密波の波長は約 136 mm (音速 340 m/s, 周波数 2.5 kHz) となり、計算空間全体は 3 m × 3 m となる。

### 2.1. 単音源での評価

1つの正弦波振動子を音源として、音源周辺における疎密波の伝播を可視化すると共に、音源周辺の振幅分布(空間各点の最大振幅値の分布)を可視化した。このとき、音源の形状差が音場へ与える影響を調べるため、「点音源」と振動方向に垂直な辺が長辺となる「長方形音源」の2種類設定した。

### 2.2. 対称2音源での評価

水平方向に対称に振動する間隔  $W$  で配置された2つの正弦波振動子を音源とし、音源周辺における疎密波の伝播を可視化すると共に、音源周辺の振幅分布を可視化した。ここでも、音源の形状差が音場へ与える影響を調べるため、前述と同じ「点音源」と「長方形音源」の2種類設定した。

## 3. 結果と考察

### 3.1. 単音源での評価

点音源、長方形音源周辺の疎密波の伝播を波面スナップショットとして可視化したものを図3, 4に示す。図中、明部は体積膨張、暗部は体積収縮を示す。なお、音源表面の振幅強度は極めて大きいため、その振動振幅が小さくなるタイミングでの周囲に伝播する波が観察しやすい画像を選んで掲載した。

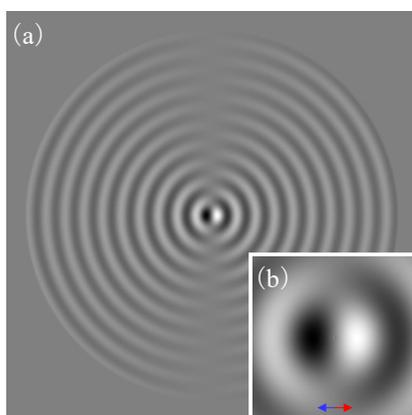


図3. 点音源からの疎密波の伝播；  
(a) 音源周辺の全体像，(b) 音源近傍

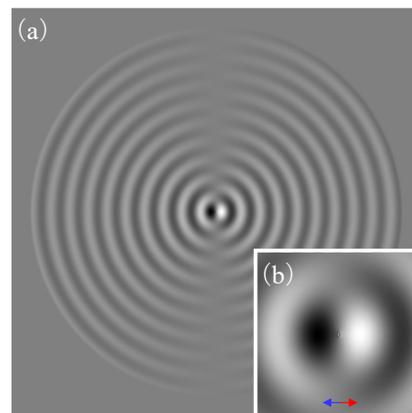


図4. 長方形音源からの疎密波の伝播；  
(a) 音源周辺の全体像，(b) 音源近傍

図3, 4から、単音源を水平方向、すなわち図中左右方向に振動させた場合、音源形状を問わず、図中左右方向に逆位相の疎密波が強く伝播し、一方、これに垂直な図中上下方向には強度が失われた領域が生じることが確認される。

図3, 4で示唆された音源周辺における疎密波の伝播の特徴は、音源周辺の振幅分布を可視化することでより明瞭に確認できる。図5, 6には、点音源と長方形音源周辺の振幅分布をグレー表示で示す。なお、振幅は音源から離れると急激に減少することから、小振幅域での振幅分布を分かりやすくするため、ガンマ値補正による画像強調を行い、適時、小振幅レベルについて等値線を追加した。振幅分布表示は、音源直近の最大振幅値で規格化しており、等値線の色は各図で同じ強度割合を示す。

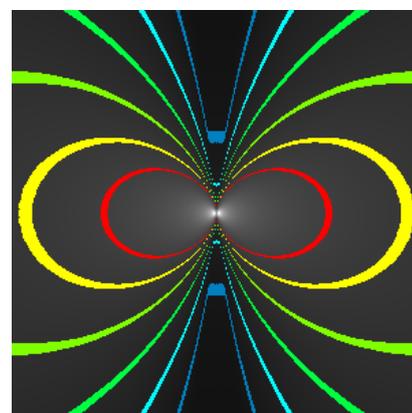


図5. 点音源周辺の振幅分布とその等値線表示

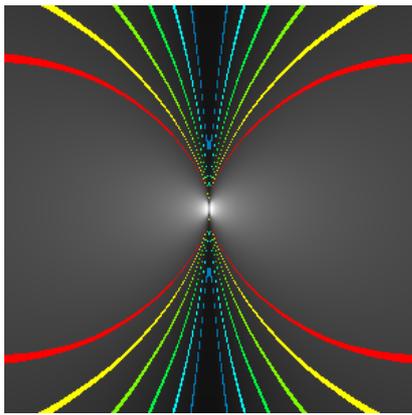


図 6. 長方形音源周辺の振幅分布とその等値線表示

図 5, 6 からは、音源形状を問わず、音源の振動方向である図中左右方向には疎密波が強く伝播し、これに垂直な図中上下方向の強度は弱いといった図 3, 4 で示唆された特徴が見て取れる。ここで、詳細に確認すると、図中上下方向で強度が失われた領域が生じるのは、逆位相の疎密波が出会い、重なることに起因するのではなく、本来的に振幅が生じない方向であるからと解釈できる。また、音源形状により疎密波の距離振幅特性が異なることも分かる。具体的には、点音源に比べて長方形音源は音源の振動方向に音を放射する面積が大きいため、振動方向の音の拡散による振幅減衰率が小さくなっている。このことは、放射面積の拡大による指向性の向上という一般的知見と一致している。なお、波長が振動子の大きさに対して極めて大きいため、指向角が鋭くなる効果は確認できていない。

### 3.2. 対称 2 音源での評価

点音源、長方形音源周辺の疎密波の伝播を波面スナップショットとして可視化したものを図 7, 8 に示す。図中、明部は体積膨張、暗部は体積収縮を示す。図から、2 音源を水平方向、すなわち図中左右方向に逆位相で振動させた場合、音源形状を問わず、図中左右方向には同位相の疎密波が強く伝播し、一方、これに垂直な図中上下方向には、2 音源から十分距離を隔てた所に強度が失われた領域が生じることが確認される。

ここで示唆された音源周辺における疎密波の伝播の特徴は、音源周辺の振幅分布とその等値線表示を示した図 9, 10 において、より明瞭に確認される。つまり、対称 2 音源の並ぶ方向（図 9, 10

の左右方向）では、強い疎密波が伝播し、一方、対称 2 音源を垂直二等分する方向（図 9, 10 の上下方向）では、ある程度の近距離までは比較的大きな振幅が見られるが、より長距離となると、急激に振幅が小さくなる特徴が見て取れる。前述の通り、音叉から至近距離（近距離音場）か十分離れた距離（遠距離音場）かで音圧の指向性パターンに差がある（音叉周辺の近距離音場では 4 方向で大きな音が生じるが、遠距離音場では 2 方向でのみ大きな音が生じる）ことは Russell により指摘されている<sup>9)</sup>が、図 9, 10 に表れた特徴はこれと矛盾しない。なお、図 9, 10 からは、単音源の場合と同様、音源形状により疎密波の指向性が異なる、すなわち、点音源に比べて長方形音源の方が音源の振動方向により高い指向性を持つことも確認される。

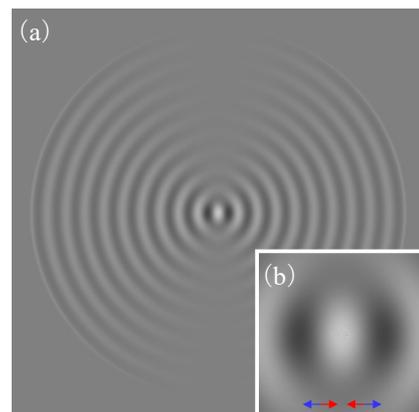


図 7. 点音源からの疎密波の伝播；  
(a) 音源周辺の全体像、(b) 音源近傍

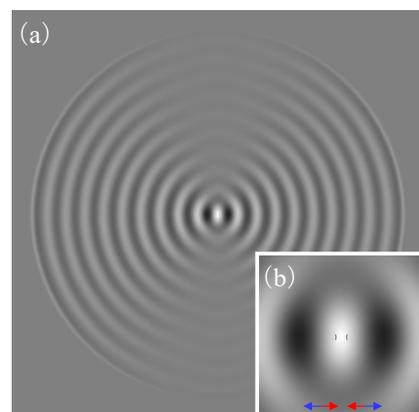


図 8. 長方形音源からの疎密波の伝播；  
(a) 音源周辺の全体像、(b) 音源近傍

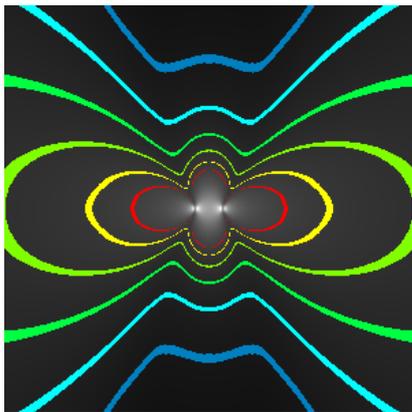


図9. 点音源周辺の振幅分布とその等値線表示

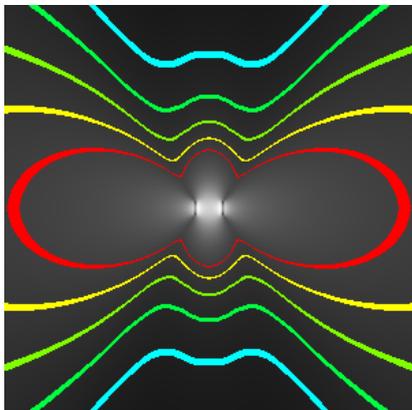


図10. 長方形音源周辺の振幅分布とその等値線表示

ここで、図11に単音源周辺における振幅分布の指向性概念図を示す(図中、青線と赤線は、単音源から左右方向に広がる疎密波が互いに逆位相であることを示す)。対称2音源周辺に形成される音場は、こうした単音源周辺に形成される音場を間隔 $W$ で対称に重ね合わせたものと解釈することができる。そこで、図11で示した単音源周辺における振幅分布の指向性概念図を間隔 $W$ で対称に重ね合わせると図12のようになる。図12から、次のことがいえる：(1) 図中左右方向では、進行方向が同じで逆位相の疎密波が重なることで多少弱め合うが、重なりに間隔 $W$ のずれがあるため、十分な強度を保つ、(2) 図中上下方向に関しては、近距離音場では同位相の疎密波が重なり得るが、より長距離となると振幅が生じない方向性に近づく。このように、単音源周辺に形成される音場を基に対称2音源周辺に形成される音場を捉えると、図7から図10で見た音場の特徴は理解しやすい。前述のRussellによる解釈過程<sup>[9]</sup>は、音叉の形成する

音場をあくまで解析的な計算に基づいて説明しており、広く理解を求めるには難しい側面もある。それに対し、一般にも理解しやすい今回の捉え方は、対称2音源、すなわち音叉周辺に形成される音場の特性、ひいては各種の音叉関連現象に対する納得性確保の上で有効と考えられる。

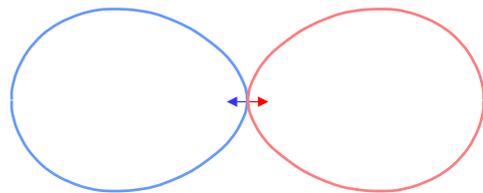


図11. 振幅分布の指向性概念図(単音源周辺)

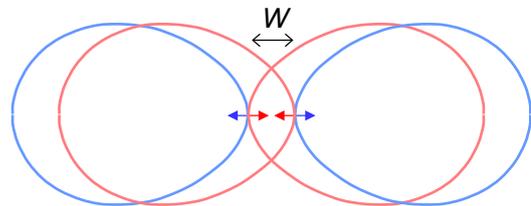


図12. 振幅分布の指向性概念図(対称2音源周辺)

ところで、本研究の知見を踏まえると、本稿冒頭で触れた検定済教科書に記載の簡易実験について、次の懸念点が指摘される。まず、音叉を鳴らしながら耳の近くで回転させた場合に音叉周辺の4方向で音が大きく聞こえるのは干渉に専ら起因する現象であるとする表現は実態に即さないことが懸念される。また、耳と音叉の距離次第では、大きな音を聞くことができるのが2方向に留まる可能性、すなわち、学習者全員で統一的な結果を得られない可能性があり、その場合、教員が有効な解説をできるかについて大いに懸念される。いずれにしても、このような観点から、当該簡易実験については、検定済教科書やその教授資料での記述、あるいは記載自体の見直しの必要性が示唆される。

#### 4. まとめ

音叉は、一定の間隔で並列に2個配置した単音源がその配置方向において互に対称に振動するものであり、生じる音波の波長は2音源の間隔に対して極めて大きいことを特徴とする。本研究では、こうした音叉周辺に形成される音場の可視化

を計算機シミュレーションにより試み、得られた可視化像から、音叉が有する対称 2 音源が振動する場合に形成される音場について次のような知見が導かれた。まず、対称 2 音源の並ぶ方向には強い疎密波が伝播し、同一面内の対称 2 音源を垂直二等分する方向では、ある程度の近距離までは同位相の疎密波が重なり比較的大きな振幅が見られるが、より長距離となると、急激に振幅が小さくなることが明らかとなった。また、その結果として、音叉周辺の近距離音場では 4 方向で大きな音が生じ、遠距離音場では 2 方向でのみ大きな音が生じることが明らかとなった。更に、対称 2 音源の形状により疎密波の指向性が異なる、すなわち、点音源から長方形音源に近づくとつれ、対称 2 音源の並ぶ音源の振動方向により高い指向性を持つことが明らかとなった。そして、今回明らかとなった対称 2 音源周辺に形成される音場の特徴は、単音源周辺に形成される音場を基に捉えると理解しやすいことが示された。

音に関わる現象を学ぶ際に使用できる音源としては、発信器に繋がったスピーカーなど、様々な選択肢がある<sup>[12-14]</sup>。その一つとして、単一振動数の音に近い音を容易に出せる音叉は、理科教育を実践する上で有用であり、例えば「高等学校学習指導要領（平成 30 年告示）解説 理科編 理数編<sup>[3]</sup>」においても、共鳴やうなりを扱う際の音源として音叉を用いることが例示されている。ただし、音叉を用いた演示や実験を導入する、あるいは音叉を題材にして思考活動をさせるなど、理科教育の中で音叉を扱う以上、教員側には音叉が形成する音場に対する本質的な理解が求められよう。また、学習者（特に、高等学校以上の学習者）にとっても、音叉が形成する音場を正しく理解しておくことは、音叉に絡む様々な現象を扱う上で重要である。本研究を通じて得られた可視化像とそこから導かれた知見は、音叉周辺に形成される音場や各種の音叉関連現象への納得性確保に資するものとして期待され、更なる検証の上、追加的な学習内容として理科教育に反映されることが望まれる。

## 引用文献

- [1]文部科学省. 小学校学習指導要領（平成 29 年告示）解説 理科編. 東洋館出版社, 2018, 33-35.
- [2]文部科学省. 中学校学習指導要領（平成 29 年告示）解説 理科編. 学校図書, 2018, 29-32.
- [3]文部科学省. 高等学校学習指導要領（平成 30 年告示）解説 理科編 理数編. 実教出版, 2019, 53-55, 69-71.
- [4]Rossing, T.D. et al. On the acoustics of tuning forks. *American Journal of Physics*. 1992, 60(7), 620-626.
- [5]植松恒夫ほか（編）. 物理改訂版. 新興出版社啓林館, 2021, 160.
- [6]植松恒夫. 物理改訂版教授資料. 新興出版社啓林館, 2018, 121.
- [7]Araki, G. XL. On the intensity distribution of sound from a tuning-fork. *The Philosophical Magazine Series* 7. 1934, 18(119), 441-449.
- [8]Iona, M. Sounds around a tuning fork II. *The Physics Teacher*. 1976, 14(1), 4.
- [9]Russell, D.A. On the sound field radiated by a tuning fork. *American Journal of Physics*. 2000, 68(12), 1139-1145.
- [10]山脇寿. 2 段階弾性波動方程式を基本にした改良型差分法による超音波伝播シミュレーション. 非破壊検査. 2010, 59(12), 624-629.
- [11]Yamawaki, H. Computer simulation for air-coupled ultrasonic testing. *Journal of Physics: Conference Series*. 2014, 520, 012019.
- [12]末廣輝男ほか. スピーカーを用いた気柱共鳴による音速測定. *物理教育*. 1977, 25(3), 121-123.
- [13]北村俊樹. パソコンを使った手軽で精度の良い音波の実験. *物理教育*. 2007, 55(3), 209-214.
- [14]三浦裕一ほか. 学生が自主的に考案する演示実験—音波の干渉を利用した波長の測定—. *日本物理学会講演概要集*. 2016, 71.2, 3217.

---

**Abstract**

---

Regarding a tuning fork, which is often used in science education, what kind of sound field is formed around it is not fully understood. Under these circumstances, we attempted a visualization of the sound field formed around a tuning fork using Improved-FDM for calculation of elastic wave propagation. As a result, visualization images of sound waves and amplitude distribution around tuning forks were obtained. From the images, the sound field characteristics of the tuning fork were confirmed to have four maxima at short distances and two maxima at long distances around the forks. In addition, it was shown that the characteristics of the sound field around the tuning fork are easy to understand if they are interpreted based on the sound field around the single sound source.

---

(受付日：2022年8月1日，受理日：2023年1月26日)

**仲野 純章 (なかの すみあき)**

現職：奈良県立奈良高等学校 教諭・研究推進部長

京都大学大学院理学研究科附属サイエンス連携探索センター 非常勤講師

京都大学総合人間学部卒業。パナソニック株式会社を経て、現職。理科教育学・科学教育学を中心とする研究・実践に従事。京都大学博士（工学）。