

高等学校物理「ドップラー効果」の理解度向上に向けた教材提案および定量的評価

—等速円運動の課題を克服し、等速直線運動を活用した新たな教材開発—

石田裕太郎*・重松 宏武**

A Proposal for Teaching Materials and Quantitative Evaluation to Improve Understanding of the “Doppler Effect” in High School Physics: Development of Teaching Materials Utilizing Uniform Linear Motion after Overcoming the Problem of Uniform Circular Motion

ISHIDA Yutaro*, SHIGEMATSU Hirotake**

(Received September 29, 2023)

高等学校理科物理分野で学習する音のドップラー効果について、五感を用いた『定性的理解』と1波長の長さを時間に換算し、その波長の変化を具体的に比較する『定量的理解』の双方からドップラー効果の理解度向上に寄与する教材の提案並びに定量的評価を行った。実験教材には音源を等速直線運動させる方法を採用することにより、音源を円運動させた場合に発生する「うなり」の影響を無効化させ、さらに、日常生活における救急車の接近・離反の現象体感を容易に再現することが可能となった。ステッピングモーターを動力として音源を高速移動させることにより、『聴覚的』に音の高さの変化を体感し、同時に観測した波形から『視覚的』に1波長の長さの変化を捉えることを通じて、ドップラー効果の原理を理解するための学習に結びつけることが期待できる結果を得た。

はじめに

高等学校理科物理分野をはじめ、学問としての物理学の特徴は「できるだけ単純化した条件下で、自然の事物・現象について観察、実験を行い、観測及び測定された量の間の関係からより普遍的な法則を見だし、さらに、その法則から新しい事物・現象を予測したり、説明したりすることができることである」と高等学校学習指導要領解説に示されている（文部科学省、2019）。ゆえに、理科、特に物理を学習することとは、単に現象の抽象化や法則化の知識を詰め込むことではなく、「観察・実験」から我々の五感を使って自然現象と向き合い、それを表現することだと言える。しかし、実際は観察・実験に費やす時間は限定的であり、教科書に記載された公式を活用した机上における学習にとどまっているのが現状である。

そこで、日常生活の中で起こる身近な物理現象に注目し、五感を用いた観察と同時にその現象を定量的に評価

することを通じて、真の理解につなげる教材を作製することを試みた。日常生活の中には運動、光、音、電気、磁気など様々な物理現象が起こっているが、五感で変化を容易に感じとれること、さらに比較的簡単な式展開で表される事象を条件に検討した結果、「ドップラー効果」を採用することとした。

ドップラー効果は救急車の接近・離反によりサイレンの音の高さが異なって聞こえる現象であり、検証実験として、タコ糸にくくりつけた音源を人の手によって疑似的に等速円運動させ、固定したマイクで音を観測させる実験が行われている（例えば、植松 他、2020）。この実験においては「周波数測定ソフトを活用した音の振動数の変化」や、「ドップラー効果の式から算出した音源の速さと実測から求めた音源の速さの比較・検討」を行うが、手動による速度の不均一が実験の精度を低下させることや、体感的・聴覚的に認識する音の変化がドップラー効果ではなく、実際は「うなり」であることなど、

* 山口県警察 ** 山口大学教育学部, 〒753-8513 山口市吉田1677-1, shigema@yamaguchi-u.ac.jp

実験そのものに課題が多い。また、過去においては、エア・トラックを用いて観測者（ワイアレスマイク）を等速直線運動させる実験（那波、1979）、CR位相発信回路によって信号を音変換した音源を回転させながら「うなり」によってドップラー効果を観測する実験（島田 他、1973）、記録タイマーを用いて音源と観測者の移動速度を計測しドップラー効果の式に当てはめる実験（草鹿、1975）、ステッピングモーターを用いて反射板を動かし、超音波の反射音のドップラー効果から物体の移動速度を測定する実験（別所、2003）などが報告されている。これらは特別な電気回路や実験装置を必要としており、汎用性が低いことから容易に同様な実験を行うことは困難であった。また、近年においては、ドップラー効果を確かめられる振動数測定ソフトを開発し、音源の移動による音量の変化をドップラー効果による振動数の変化と誤った認識をさせないような教材製作とその実践（池尻、2022）が報告されている。

いずれの研究も、振動数の変化、つまり1秒あたりの音波の数の変化を測定することでドップラー効果を実験的に理解しているが、波長の変化、つまり1波長あたりの時間の变化を測定することで音のドップラー効果を理解するといった活用はなされていない。一方で、高等学校学習指導要領解説では音のドップラー効果の学習について「例えば、水波実験器を用いて直線運動する波源から媒質に広がる波面の様子を観察させるなどして、波長の変化と音のドップラー効果とを関連付けて理解させることが考えられる。」とあるように、ドップラー効果は波長の変化から振動数の変化に繋げることが示されている（文部科学省、2019）。

そこで、我々はドップラー効果を体感しながら波長の変化を観測できるように特別な電気回路を組むことなく、広く安価に販売されている既製品を活用すること、さらに小さなパソコンと携帯電話の両方の性質を有し、近年、普及率が高いスマートフォンを活用（具体的には音響に関するフリーのアプリケーションの活用）することにより、容易に製作できる教材の開発を試みた。なお、ドップラー効果には「音源のみが動く場合」、「観測者のみが動く場合」、「音源も観測者も動く場合」の3つのパターンが考えられるが、①：現象を理解することを目的とするならば、よりシンプルな構成が望ましいこと（動くものはどちらか一方が好ましく、その選択は等速移動が容易にできる音源の方が適切である）、さらに、②：多くの「高校物理」の検定教科書（國本 他、2020；佐藤 他、2020；田村 他、2020；三浦 他、2020）及び研究事例（溝上、2016）が音源のみが移動しているケースが採用されていることから、構造的にシンプルかつ他者との比較ができることを考慮して本研究においても「音源のみが動く場

合」を採用することとした。ちなみに前者の検定教科書においては、音源となるブザーを紐に繋いで回転させたり、ボールに似たててキャッチボールさせたりする実験が行われ、一方、後者の溝上は安価な簡易ドップラーボール教材の提案とその評価を示している。なお、我々はドップラー効果を、聴覚を用いて正しく体感、理解できる教材となるよう心掛けた。

本論文では、第1章において教材製作のために理解しておかないといけないドップラー効果（音源のみが動く場合）について簡単に解説を行う。続く第2章では、現行の検定教科書に掲載されている、手動で音源を疑似的に等速円運動させるドップラー効果の予備実験の結果と課題を示し、第3章では手動の代わりに採用したモーターによる等速円運動を活用したドップラー効果の実験の結果と課題を示す。これら明らかとなった課題を克服した教材として等速直線運動させた音源を用いたドップラー効果の実験を第4章において提案し、さらにその評価・性能について報告する。

1. ドップラー効果の原理

ドップラー効果とは音源と観測者の間の相対運動がある場合において、観測者に静止の場合とは異なった波長や振動数が観測される現象であり、発信源と観測者が近接する場合には観測者が観測する音の振動数は増加し、逆に遠ざかる場合には減少が起こる。音は振動数が多いほど高くなり、振動数が少ないほど低くなる特徴をもつことから、振動数の変化が我々に聞こえる音の高低に影響を与えている。本章ではこの現象を簡単な数式を用いて解説を行い、教材の特性を理解する上で基本となる物理的な数式を紹介する（植松 他、2020）。

始めに、音源及び観測者（前後2者）共に静止している場合を考える（図1）。

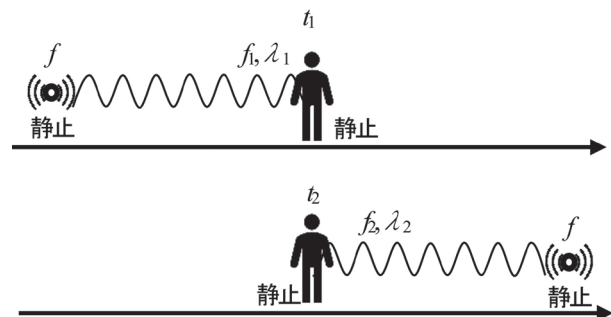


図1 観測者と音源共に静止している場合。音源からは振動数 f の音が発信されており、前方後方それぞれに伝わる音の振動数と波長を f_1, λ_1 （前方）、 f_2, λ_2 （後方）と表す。

ここで、音源が発する音の振動数を f 、音を発し始めて経過した時間を前方後方それぞれ t_1, t_2 、大気中を伝わる音速を V とする。その時、伝わる音の前方の波長を λ_1 、後方の波長を λ_2 とすると、音源が静止していることから前後に伝わる音は等価であること（同一の性質を持つこと）から波長の関係は

$$\lambda_1 = \lambda_2 \quad (1)$$

と表される。よって観測者の前方の音源が時間 t_1 だけ、また、観測者の後方の音源が時間 t_2 だけ音を発したときの波長は、音波の移動距離 Vt_i ($i = 1, 2$) 中に ft_i 個の波が入っていることから、音源が発する音の波長 λ と観測者に伝わる音の波長 λ_1, λ_2 はそれぞれ

$$\lambda_1 = \frac{Vt_1}{ft_1} = \frac{V}{f} (= \lambda) \quad (2)$$

$$\lambda_2 = \frac{Vt_2}{ft_2} = \frac{V}{f} (= \lambda) \quad (3)$$

と表され、観測者が聞く音の波長は音源が静止している場合に発する音の波長 λ と等価であることが分かる。

ここで、音源の前方で観測される振動数を f_1 、後方で観測する振動数を f_2 とすると、波の性質を表す関係式（振動数と波長と速度の関係） $V = f_i \lambda_i$, $i = 1, 2$ より、前方後方共に観測される振動数が、音源が発する振動数 f と等しいことが導かれる。

$$f_1 = f_2 = f \quad (4)$$

以上のことから、音源と観測者（前後2者）が静止している場合においては、観測者が聞く音の高さは音源が発する音の高さと変わらないことが分かる。

次に音源のみが動く場合について考える（図2）。音源は速さ v で等速直線運動すると仮定し、音を発し始めて時間 t が経過後、音源は vt だけ移動する。音源が移動しても音源が発する音が媒質を移動する速さは変化しないことから、音波は $t=0$ の地点から球状に Vt だけ移動する。このとき、音源の前方で観測される波長を λ_1 とすると

$$\lambda_1 = \frac{Vt - vt}{ft} = \frac{V - v}{f} \quad (5)$$

と表される。一方、音源の後方で観測される波長 λ_2 は

$$\lambda_2 = \frac{Vt + vt}{ft} = \frac{V + v}{f} \quad (6)$$

と表される（植松 他、2020）。

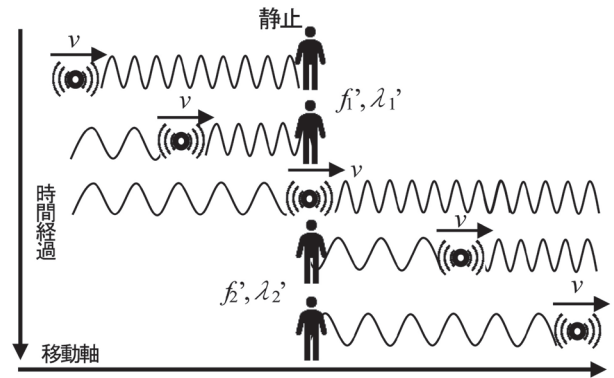


図2 観測者を固定し、音源のみが動く場合。音源からは振動数 f の音が発信されており、前方後方それぞれに伝わる音の振動数と波長を f_1', λ_1' （前方）、 f_2', λ_2' （後方）と表す。

得られた図2及び(5), (6)式を、移動している音源1つと前後で静止した観測者（前後2者）による1次元モデルとして改めて描き直した図を図3に示す。

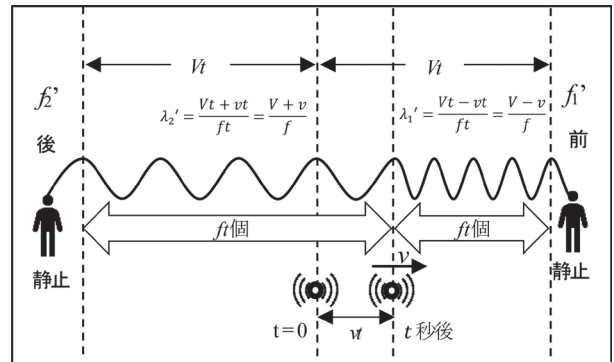


図3 観測者を固定し、音源のみ動く場合における波長の変化。図2に示した t 秒後における状態を1次元で表す。

図から読み取れるように、前後の観測者が観測するそれぞれの音は波長と共に振動数の変化も生じさせており、それぞれ、音源の前方では

$$f_1' = \frac{V}{\lambda_1'} = \frac{V}{V - v} f \quad (7)$$

後方では

$$f_2' = \frac{V}{\lambda_2'} = \frac{V}{V + v} f \quad (8)$$

と表される。よって、音源が発する音の振動数と音源の前後で観測される音の振動数の大小関係は

$$f_2' < f < f_1' \quad (9)$$

と表すことができる。

つまり、音源が観測者に近づいているときは、音源が静止しているときよりも音が高く聞こえ、一方で、音源が観測者から遠ざかっているときは、音源が静止しているときよりも音が低く聞こえるようになる。これが数式

を用いた救急車の接近・離反によりサイレンの音の高さが異なって聞こえる現象の説明である。

本研究ではドップラー効果による音の変化を波長の変化から捉えるために、ソフトを用いて解析・算出された1波長あたりの周期 T を比較する。周期の算出方法としては「音源の速度 v から計算により求める間接的に求める方法（間接測定）」と「ソフトで実測した波長から直接求める方法（直接測定）」の2つを用いる。前者は(7)、(8)式により理論上の公式から導かれる予想値（それぞれの振動数の逆数が周期となる）であり、後者は実際に実験から得られた実測値である。これら2つの方法で音源が接近するときと離反するときの波長の変化（周期の変化）を静止しているときの値と共に表1にまとめる。

表1 間接測定及び直接測定により導かれる周期の定義

	接近	静止	離反
音源の速度 v から算出した間接測定値	$T_1' = \frac{1}{\frac{v}{V-v}f}$ ($= \frac{1}{f_1}$)	$T = \frac{1}{f}$	$T_2' = \frac{1}{\frac{v}{V+v}f}$ ($= \frac{1}{f_2}$)
ソフトで実測した1波長(周期)の直接測定値	T_{1d}	$T = T$	T_{2d}
固定値	V (気温には依存), v, f		

ここでは音源が静止している状態における音の周期を T とおき、全て定数である音速 V (気温には依存)、音源の速度 v 、音の振動数 f から機械的に算出される周期 T_1' 、 T_2' とソフトを用いて観測された波長から直接導かれた周期を T_{1d} 、 T_{2d} と定義している。理論上は $T_1' = T_{1d}$ 、 $T_2' = T_{2d}$ の関係となる。後者の周期 T_{1d} 、 T_{2d} を用いて算出される波長の長さ

$$\lambda_{1d} = VT_{1d}, \quad (10)$$

$$\lambda_{2d} = VT_{2d} \quad (11)$$

を比較し、水波実験器のように視覚的にドップラー効果による現象を捉えられることを目指した。

2. 疑似的等速円運動（手動）を活用した予備実験

始めに、検定教科書に掲載されている測定方法に準じた予備実験を行い、「ドップラー効果」を学習する上での利点や課題の整理を行った(植松 他、2017 検定)(図4)。採用した測定条件・手法は以下の通りである。

- 1) 音源はワイヤレスBluetoothスピーカー (EWA、A106Pro) を使い、タコ糸の一方に固定した。音源の振動数は『聴覚的』に音の変化を捉えやすい比較的高い振動数1000 Hzとした(詳細は第4章参照)。
- 2) 一人がタコ糸のもう一方をつかみ、努めて等速 v に

なるよう心掛け、手動で円運動を行った。この回転半径 r は実験室内もしくは教室内での実施を想定し、比較的短い0.3, 0.5, 1.0 mの3種類を採用した。

- 3) 【実験1】もう一人がストップウォッチを用いて10回転に要する時間 $10T$ [s] を計測し、計算により平均周期 T [s] を求めた。
- 4) 【実験2】ソフト (WavePad音声編集ソフト)¹⁾ の入ったPCに接続したマイク (サンワサプライ株式会社、MM-MC24) を円運動の接線上に配置し、音源がマイクに接近したときの周波数 (振動数) f_1 [Hz] を測定 (直接測定) した。対比のために固定された音源の周波数 (振動数) f [Hz] も同様に測定を行った。

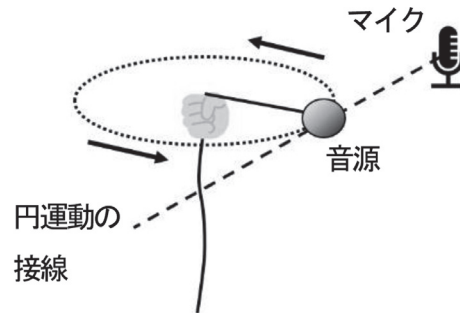


図4 手動による実験のモデル図

上記の測定条件・手法に従った実験から得られた波形の例 (半径 $r=0.3$ m) を図5に示す。なお、音は媒質の疎密が重なって進行する縦波 (疎密波) である (植松 他、2020) が、今回使用するソフトは縦波を横波変換した波形が観測される。

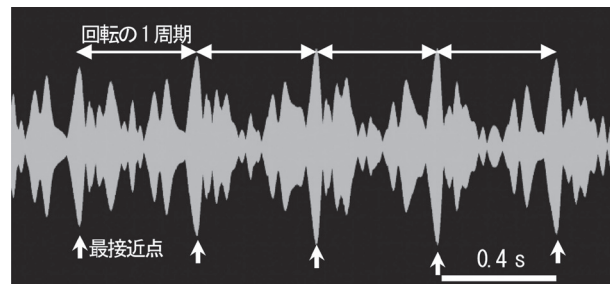


図5 半径0.3 mで音源を手動で回転させたときの波形 (一部抜粋)。横軸は時間[s]を表し、形が最も大きく表れている箇所がマイクに最接近しているときである。

我々はマイクからの距離がもっとも近い位置の振幅 (音の強弱) が最大、そして一番遠い位置が最小となるなどらかな周期性のある変化を期待したが、音源から届く振動数が異なる複数の音によるうなりと思われる現象が確認された。同様に聴覚による音の変化もドップラー効果というよりうなりを聴いているように感じ取れた。【実験1】により直接求めた回転周期並びに【実験2】

に従い、最接近点直前をFFT解析した結果の振動数を表2に示す。【実験1】は人為的に周期を変えることが可能であるが、一般論として回転運動を保つためには回転半径が短いほど周期を短くする必要があることからそれに準じて任意の値を採用した。また、【実験2】からは第1章で説明した通り、音源が近づく場合における振動数が増加することが確認された。

表2 疑似的等速円運動(手動)による実験結果

回転半径 r [m]	【実験1】 音源の回転 周期 T [s]	【実験2】 観測された音の振動数[Hz]	
		静止 f	接近時 f'
0.3	0.422	1000	1016.5
0.5	0.473		1025.6
1.0	0.651		1033.9

次に、これら得られた結果から同一の物理量(音源の速度)に変換し比較することを試みた。具体的には【実験1】においては

$$v = \frac{2\pi r}{T} \quad (12)$$

と表される円運動の速度の関係式から、【実験2】は(7)式から導かれた関係式

$$v_i = \frac{V(f_i' - f)}{f'} \quad (13)$$

からそれぞれ音源の円運動の速度を間接測定により算出し、その結果を表3に示す。なお、音速 V は339.0 m/s(測定日の気温12.5℃)とし、不一致度は速度 v_i 【実験2】を基準にした速度 v 【実験1】のずれと定義した。

表3 音源を疑似的等速円運動(手動)させたときの速度。()内の単位はkm/hである。

回転半径 r [m]	【実験1】 速度 v [m/s]	【実験2】 速度 v_i [m/s]	不一致度 [%]
0.3	4.467 (16.1)	5.503 (19.8)	18.8
0.5	6.642 (23.9)	8.462 (30.5)	21.5
1.0	9.578 (34.5)	11.115 (40.0)	13.8

検定教科書の記載内容に従うと、【実験1】、【実験2】から間接測定により導かれたそれぞれの速度の比較(一致するかどうか)を行うこととなっている(植松他、2020)。我々が得た結果からは表3から分かるように、良い一致をしたとは言えないものの、不一致度は概ね2割程度に収まり、手動で等速を維持した円運動の結果としては相応に評価できる結果が得られたと考える。しかしながら、人為的に等速かつ円運動の軌道を保つことは困難であり、例えばグループ実験においてはグループ間の不一致度のばらつきが大きかったり、再現性にも課題があったりすることからドップラー効果を学ぶ生徒

の疑問を誘発させるのではないかと考え、より正確な等速円運動を実現するために動力を自動化したものを作製し、再測定を試みることにした。

3. モーターによる等速円運動を活用した実験

第2章で示した実験は体感的・聴覚的な変化を感じ取ることができるが、円運動そのものを等速に保つことは困難であり定量性に欠けることが明らかとなった。そのため、等速円運動するモーターを動力として採用し、改めて円運動によるドップラー効果の検証を行うことにした。

始めに、扇風機の交流モーターを再利用し、モーターの回転軸に木の板(長さ910 mm、幅57 mm、厚さ5 mm)を取り付け、回転中心から300 mmの位置に固定した音源(ワイヤレススピーカー)を回転させる方法を試みた。この方法は手動で音源を回転させる方法と比較して、円運動の速度の一定性は向上するものの、トルクの弱さから十分な速度が得られないこと、さらに、モーターの固定が難しく、事故リスクが高いことから、本実験への採用には至らなかった。代替案として市販のインダクションモーター(株式会社日本サーボ、IHF9S60)を採用、これを台座に固定して音源を回転させる方法を考案した(図6)。構成としては、250×420×13 mmの平板の中央にモーターを固定し、回転軸の先に12×32×910 mmの長板を設置した。回転中心から300 mmの位置の一方にワイヤレスBluetoothスピーカー(EWA、A106Pro)を、もう一方に同一質量のおもりをバランス調整として固定した。なお、回転半径は変更することは可能である。

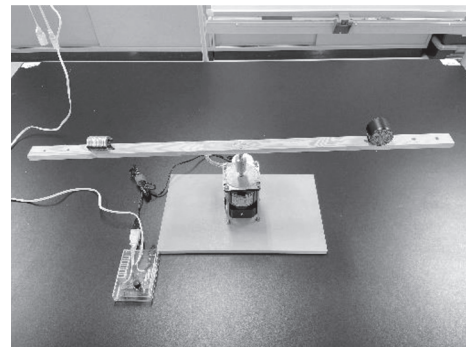


図6 モーターを用いた等速円運動によるドップラー効果実験機。モーターに取り付けられた木材にスピーカー(右側)とバランス調整のためのおもり(左側)が取り付けられている。

図6の実験機を用いた実験方法を簡潔に以下に示す。

- 1) スマートフォンとワイヤレス接続したBluetoothスピーカーを音源とし、手動による等速円運動の実験

同様に振動数固定の1000 Hzの音を発信させた。

- 2) モーターを用いてスピーカーを等速回転運動させ、その回転をデジタルタコメータ（株式会社ライン精機、TM-7010）を用いて計測を行った。採用したモーターの負荷並びに安全性を考慮し、 $r=0.3$ mの時の2回転/s（速度は約3.8 m/s）を最大回転数とし、半径0.5, 1.0 mの時は少し遅めの約1回転/sとした。
- 3) 円運動の接線上、スピーカーと同じ高さに設置したマイク（サンワサプライ株式会社、MM-MC24）を用いて、音源から発する音を観測し、ソフト（WavePad音声編集ソフト）を用いて波形を計測した。
- 4) 計測した波形から音源が回転運動して最接近点直前の箇所をFFT解析することで振動数を求めた。

以上の手順で実験を行い、得られた波形を図7、観測された振動数を表4、(12)及び(13)式により算出した音源の速さを表5にそれぞれ示す。図7中の楕円はFFT解析を行った最接近点直前の箇所を指す。なお、音速 V は337.4 m/s（測定日の気温9.8℃）とした。

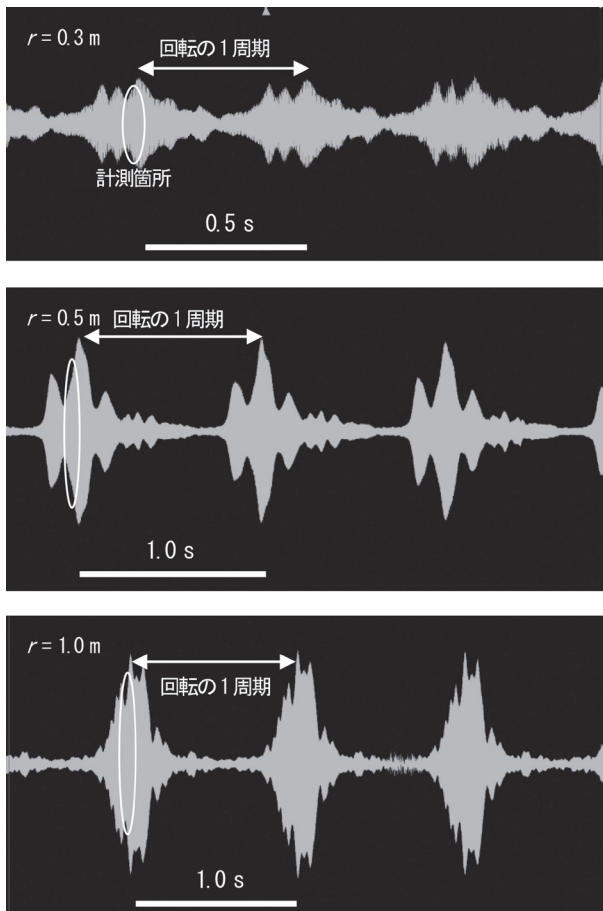


図7 半径0.3 m, 0.5 m, 1.0 mで音源を回転させたときの波形（一部抜粋）。横軸は時間[s]。形が最も大きく表れている箇所がマイクに最接近しているときである。

表4 等速円運動(自動)による実験結果

回転半径 r [m]	【実験1】 音源の回転 周期 T [s]	【実験2】 観測された音の振動数[Hz]	
		静止 f	接近時 f_i
0.3	0.50	1000	1014
0.5	0.96		1012
1.0	1.00		1020

表5 音源をモーターで等速円運動させたときの速度。
()内の単位はkm/hである。

回転半径 r [m]	【実験1】 速度 v [m/s]	【実験2】 速度 v_i [m/s]	不一致度 [%]
0.3	3.770 (13.6)	4.658 (16.8)	19.1
0.5	3.272 (11.8)	4.000 (14.4)	18.2
1.0	6.283 (22.6)	6.615 (23.8)	5.0

回転半径は同じ0.3 mかつ回転速度に比較的近い図5と図7上図を比較すると振幅の変化に改善は見られたもののうなりの影響をまだ受けていることがわかる。また、図7中図及び下図からは同じ周期のものにおいては回転半径がより大きいものの方が独立した音源の移動となり、適切な条件となっていることがわかる。また、間接法により導かれた音源の速度を手動による結果（表3）と比較すると、回転半径が小さい0.3 m, 0.5 mの場合は若干の向上しか見られなかったが、比較的長い1.0 mにおいては回転周期が長くなったにも関わらず、飛躍的な向上が見られた。このことは手動による測定値の曖昧さが結果に大きく影響したことと同時に半径の小さい周期においてはそもそも測定が難しいことを表している。ゆえに、半径をより長くすることにより、精度良い結果が得られることが期待される。なお、手動・自動両方の回転運動を用いた測定において以下の課題が明らかとなった。

- ・音源を回転させることによって聞こえる音の変化は「うなり」に近いものであり、特に回転半径は短い場合は顕著に影響を受ける。
- ・ドップラー効果による音の振動数の変化（波長の変化）をより大きくするためには、回転半径及び回転数をさらに大きくする必要があるが、それは事故の危険性が増すことを意味する。

これらの課題から、手動及び自動による音源の回転をもって、ドップラー効果の実験として授業等で扱うことは、生徒が正しく体感、理解するという観点においては、ハードルが高いものであると考える。過去の研究からも、音源を回転させる実験では音源の接近と離反を短時間で繰り返すことから、生徒にとって実験の要点が分かりにくいと言われており、むしろ救急車の場合のように接近

と離反が一度きりとなる直線運動の方が視覚と聴覚の協応作業が容易である(岩崎、2014)。以上のことより、従来、検定教科書で採用されている音源の回転運動ではなく、音源の直線運動を用いて定性的にも定量的にも正しくドップラー効果を体感、理解できるよう改善を試みることにした。

4. 等速直線運動を活用した「ドップラー効果」

本章では従来の音源の等速円運動による実験の課題を克服し、体感的・定量的により正確に理解しやすい測定方法として採用した等速直線運動を活用した実験について述べる。始めに、用いた実験装置について解説を行う。

【実験装置】

モーターでタコ糸を巻き取ることでタコ糸に繋いだ音源を引っ張って等速直線運動させる方法を採用した。回転軸が地面と平行になるようにモーターを台座に固定し、回転軸に半径93.1 mmの円筒形ハイベッセル容器(アズワン株式会社、No. 3000)の底面を固定し自動車のタイヤのように回転させることで、容器の側面でタコ糸を巻き取れるようにした。以下に具体的に用いた製品、並びに製作した。装置の概念図と実際の写真を図8にそれぞれ示す。

■巻き取り装置

- ・モーター 2台 (オリエンタルモーター株式会社、ACスピードコントロールモーター、M315-401及びSCM590A-JA)

(備考) 最大出力が異なる2種類のモーターを準備した。以下、M315-401(最大出力15 W、起動トルク55 mN・m、質量1.2 kg)をモーター①、SCM590A-JA(最大出力90W、起動トルク470 mN・m、質量3.3 kg)をモーター②と定義する。なお、モーター①は歯切りシャフトタイプのため、ギアヘッド3GN3K(減速比3)を装着し、モーター②は丸シャフトタイプのためギアヘッドは用いなかった。なお、詳細は後述するが、モーター①を用いた実験においては、音源の速度は約20 km/h、高性能のモーター②はその3倍の速度を出すことが可能であったが安全面を考慮して2倍の約40 km/hでの実験を行った。

- ・ハイベッセル容器(アズワン株式会社、No. 3000)
- ・デジタルタコメータ(株式会社ライン精機、TM-7010)
- ・タコ糸30 m(綿100%)

■音源

- モーター①(M315-401)の場合

- ・ワイヤレススピーカー(EWA、A106Pro)
- ・発泡ポリスチレン
- ・マイクロファイバークロス
- モーター②(SCM590A-JA)の場合
- ・ワイヤレススピーカー(EWA、A106Pro)
- ・木板(150×120×11 mm)2枚
- ・スポンジ(270×240×50 mm)1枚
- ・油粘土(300 g)(高速化によるバランス安定化のため)
- ・マイクロファイバークロス

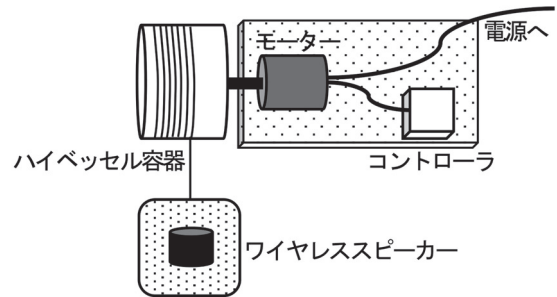
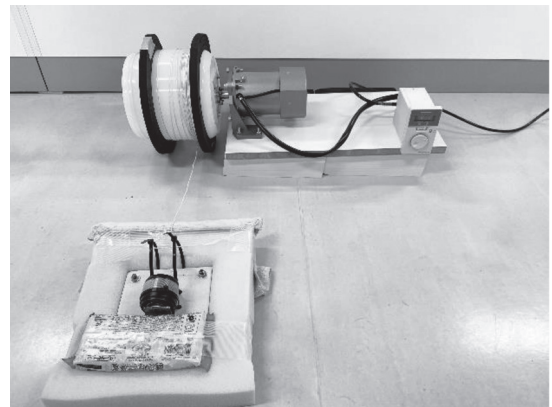


図8 実物の写真(上図)と実験装置の概念図(下図)。巻き取り装置(それぞれの図の上部)と音源(同下部)からなる構成である。

なお、実験装置を作製するにあたり、以下の3項目の条件に注目して改善を図った。個々の項目について詳細に説明を行う。

- ① 等速運動を保つ。
- ② 音源の移動速度の高速化を図る。
- ③ 装置全体の静粛性を保つ。

条件①については、直線運動の動力となるモーターにステッピングモーターを採用することで、ステッピングモーターの特徴である「パルス信号によって回転角度・回転速度を正確に制御できる」²⁾、「小型・高トルク」であることを活かし、音の波形の計測中に限りなく正確に音源が等速直線運動をするようにした。なお、直線運動

を用いた事例（羽浦、2018）では簡易速度測定器を用いて音源の移動速度を計測しているが、我々は音源が移動するときの容器の回転数をデジタルタコメータを用いて測定することで、音源の速度を正確に算出できるようにした。

条件②については、第3章で示したような従来の音源の円運動では、モーターで回転させる物体が音源に加えて、音源を固定するための長板とバランスの重りを必要としていた。ゆえに、慣性モーメントが増大することで、モーター駆動にかかる負荷が大きくなり、それに起因する事故の危険性もあったことから、音源の移動速度（周速）を大きくできなかった。一方、直線運動では、モーターにかかる負荷は音源の重さと床との接触による摩擦のみであり、モーターの性能を最大限活用できるようになった。さらに、回転軸に固定したハイベッセル容器は半径93.1 mmであり、1回転当たりの移動距離の向上、すなわち高速化に役立った。

条件③については、動力であるモーターと音源であるワイヤレスBluetoothスピーカーを分離することで、音源が発する音以外の音の影響を最小限に抑えることを可能とした。さらに、実験では音源をなめらかな床で滑らすため、音源を固定した台座にマイクロファイバークロスを張り、床との接触による騒音を軽減させた。また、音源のバランスをとるためにも一定数の質量が必要となることから油粘土を用いて安定を図った。

続いて、直線運動を活用したドップラー効果の実験方法について示す。

【実験方法】

直線運動ということより、廊下などの長い空間で良いと当初考えていたが、近接する壁からの音の跳ね返りが影響することより、広い空間である体育館を用いることとした。なお、広い空間という意味では静寂な屋外が最適ではあるが、日中は外からの音の影響が避けられないこと、並びにより良い精度（滑らかな床により得られる等速運動と音の静寂性の維持）を得るために体育館、具体的には山口大学第一体育館（吉田キャンパス）が最適と判断した。以下の手順に従い、始めにモーター①（M315-401）、続いてより高出力のモーター②（SCM590A-JA）を用いて同様の測定を行った。

1) 体育館の出入口側から反対の壁側の方向にメジャーを用いて20 mを測り、壁側に巻き取り装置を、出入口側に音源を置いた。両者の中間地点である10 mの位置にマイク（サンワサプライ株式会社、MM-MC24）を設置し、PCに接続した。このとき巻き取り装置と音源はタコ糸で繋がった状態である。なお、出

入口側を原点として0, 10, 20 m地点に温度計を設置し、実験中の気温を測定した（図9）。

- 2) 音を発さない状態でモーターを起動させ、タコ糸に繋がった音源を引っ張った。このときデジタルタコメータを用いて、タコ糸を巻き取るハイベッセル容器の側面で回転数を計測した。
- 3) 2) を5回繰り返し、音源を引っ張るときの回転数の平均を求め、そこから直線運動の速さを算出した。
- 4) 実験は3人（A、B、Cとする）で行った。AはPCで音の収録を、Bはモーターの電源の操作を、Cは音源の設置をそれぞれ担当し、Aの合図でBがモーターを起動してタコ糸を巻き取り、Cが巻き取った音源を音源のスタート地点に設置するという分担で行った。
- 5) ワイヤレスBluetoothスピーカーとスマートフォンを接続し、振動数100 Hzから1000 Hzまで（モーター①では800 Hzまで）の純音をそれぞれスピーカーから出しながら音源を引っ張った。モーターが起動すると同時にAはPCで録音を開始し、音源がマイクに最接近する時間を記録した。この時間は波長の解析の際に音源が接近するときと遠ざかるときの基準とした。
- 6) 5) で得られたそれぞれの振動数の波形データから、音源がマイクに最接近した0.3 s前後を近づくと、遠ざかるときとし、それぞれの時間の波長を20周期（ $20T[s]$ ）測定し1周期当たりの平均値 $T[s]$ を算出した。結果から音源が動いているときと音源が静止しているときの1波長の周期を比較した。

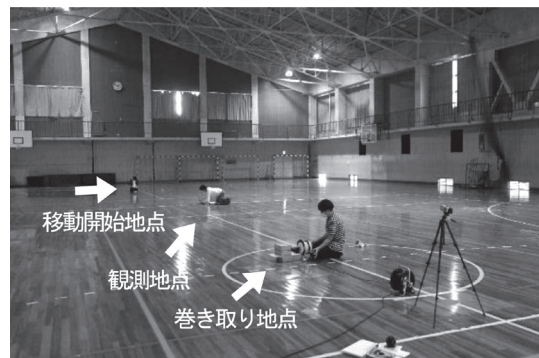


図9 体育館での実験の様子。写真手前が巻き取り装置。

直接得られるデータの一例として、モーター①を用いて設定振動数200Hzの音源を直線運動させたときに観測された波形（音源の移動開始から終了までの全景）と任意の地点A, B, C, Dにおける波形（拡大）を図10に示す。なお、地点A, B, C, Dそれぞれにおいて、音源の移動による振幅の強弱の変化は大きいですが、全ての領域において下図に示すように周期性の良い波が観測された。

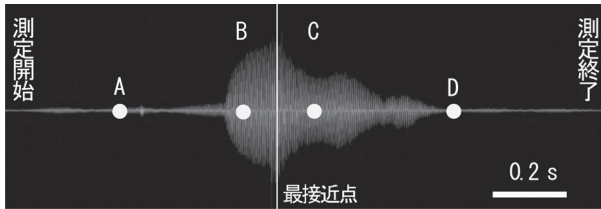


図10 モーター①、設定振動数200 Hzで実験したときの波形の全景（上図）と各地点を拡大したときの波形（下図）。地点A, Bは近づくとき（下左図）、地点C, Dは遠ざかるとき（下右図）の波形である。比較しやすいように地点B, Cにおける振幅（縦軸）に対して地点A, Dにおける振幅は5倍した値が示されている。

上図から、音源が直線運動しながらマイクに近づくにつれて振幅（音の大きさ）は増大し、最接近した後に減衰していく様子を読み取れる。最接近点を軸として線対称な波形が観測されることを期待したが、体育館という広い空間においても音の跳ね返り等の影響を受け、残響が尾を引くような形状となった。図10下図の地点A, Bと地点C, Dはそれぞれ音源が近づくときと遠ざかるときの波形を5周期分で比較したものであるが、AとB、CとDそれぞれの波長の長さは等しく、実験において等速直線運動が正確に再現できたことが読み取れる。

次に、モーター①による設定振動数200 Hz実験の接近Bと離反Cそれぞれの位置における波形の様子を図11に示す。この波形からそれぞれの周期 $T_{1d} = 4.95 \times 10^{-3} \text{s}$ 、 $T_{2d} = 5.10 \times 10^{-3} \text{s}$ が直接、算出された。このことは上図における10波長の時間が下図においては9.75波長分に相当することを意味し、単位時間あたりにおける波長の数の差が明確に観測された。このことは音源が観測者に接近することにより振幅の増大を伴いながら波長 λ_{1d} は (10) 式に従い若干短い一定値（実測値 $\lambda_{1d} = 1.7117 \text{ m}$ ）となり、一方、離反するにあたり振幅は減少しながら波長 λ_{2d} は (14) 式に従い若干長い一定値（実測値 $\lambda_{2d} = 1.7636 \text{ m}$ ）となる様子がわかる。また、(5), (6) 式を用いた間接的計算値に従うとそれぞれ 1.7015 m (λ_1), 1.7565 m (λ_2) となり実測値と良い一致をした値を得た。ここで音源の移動速度 v はデジタルタコメータによる実測値 5.5 m/s

(19.8 km/h)、音速 V は室温からの計算値 345.8 m/s (測定日の気温 23.9°C) を採用した。なお、モーターは性能限界の最大速度を使用しており、 5.5 m/s という一般自転車より少し速い速度を得た。

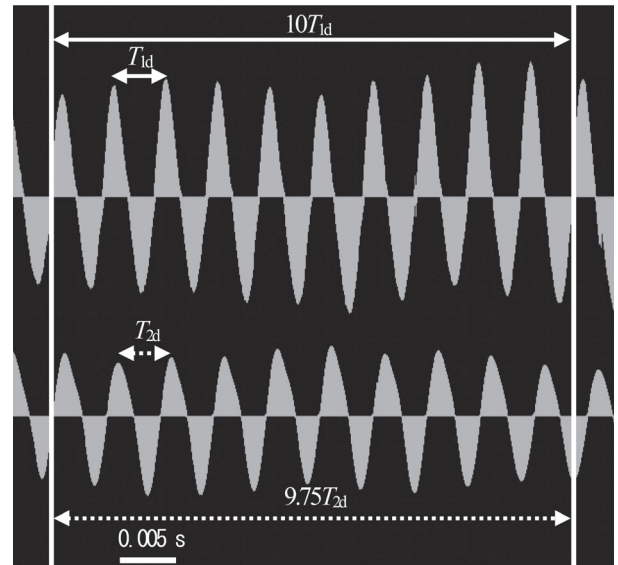


図11 設定振動数200 Hzで実験（モーター①）を行ったときの波形。音源が近づくとき（地点B、図上側）と遠ざかるとき（地点C、図下側）を比較したもの。縦の白線は近づくときの10周期分を表している。

一例として設定振動数200 Hzの場合における接近と離反の振動数を (7), (8) 式により算出すると、近づくときが 203.26 Hz 、遠ざかるときが 196.84 Hz となり、音源の移動による振動数の変化が明確に示された。同様な変化は異なる振動数においても期待されることから、測定を行った全ての設定振動数 $100 \sim 800 \text{ Hz}$ における結果を表1に基づいて表6に示す（表中の計算値 T_1' , T_2' は表1中に示した式を用いて算出した値である）。なお、それぞれの設定振動数における音源が静止している時の換算周期 T も表中に示しており、理想的には「接近時の周期 T_1' または $T_{1d} < T < \text{離反時の周期 } T_2'$ または T_{2d} 」となることを期待される。

表6 モーター①を用いた実験で設定した振動数 f に対する1波長の周期の理論値 ($T=1/f$)、計算値、実験結果(実測値)。

振動数 f [Hz]	1波長の周期 ($\times 10^{-3}$)				
	接近		静止	離反	
	T_1' [s] (計算値)	T_{1a} [s] (実測値)	T [s] (理論値)	T_2' [s] (計算値)	T_{2a} [s] (実測値)
100	9.84	9.95	10.00	10.16	10.15
200	4.92	4.95	5.00	5.08	5.10
300	3.28	3.30	3.33	3.39	3.40
400	2.46	2.45	2.50	2.54	2.55
500	1.97	2.00	2.00	2.03	2.05
600	1.64	1.65	1.67	1.69	1.70
700	1.41	1.40	1.43	1.45	1.45
800	1.23	1.20	1.25	1.27	1.30

モーター①を用いた実験では、最大出力でも音源の移動速度は20 km/hに満たず、その場で観測しているとよく聞けばドップラー効果が実感できるといった程度であった。また、1波長の時間については、500Hzの接近時を除くと0.00002~0.00010 sという非常にごくわずかな変化が観測された。波長の視覚的な変化を捉えるために図11で波長を比較すると、近づくときの10周期に対して遠ざかるときは9周期+3/4周期となっており、ドップラー効果によって波長が変化していることを視覚的に確認できる。周期 T [s] の数値のみの比較では波長の変化を捉えにくい。水面波の実験のように実際の音波を図のように比較することで波長の変化が捉えやすくなっている。

次にドップラー効果をより顕著に現すことが期待される出力がモーター①より大きいモーター②による実験結果を考察する。なお、性能的には約3倍の約60 km/hの速度を出すことが可能であるが、実験の安全性を考慮して性能限界の2/3程度(約40 km/h)を使用することとした。

モーター②による設定振動数200 Hz実験の接近Bと離反Cそれぞれの位置における波形の様子を図12に示す。上図における10波長の時間が下図においては9.5波長分に相当することから、モーター①よりも単位時間あたりにおける波長の差は0.5波長分大きくなっており、波長の数の差は大きく表れた。音源が観測者に接近するときは振幅の増大を伴いながら波長 λ_{1a} は式(10)により若干短い一定値(実測値 $\lambda_{1a}=1.636$ m)となり、一方、離反するにあたり振幅は減少しながら波長 λ_{2a} は(11)式に従い若干長い一定値(λ_{2a} 実測値=1.721 m)となる様子がわかる。モーター①と同様に、(5)、(6)式を用いた間接的計算値に従うとそれぞれ1.631 m (λ_1')、1.743 m (λ_2')となりモーター②でも良い一致をした値を得た。このときの音源の移動速度 v は実測値11.12 m/s (40.03 km/h)、音速 V は室温からの計算値337.4 m/s (測定時の気温9.8℃)を採用した。

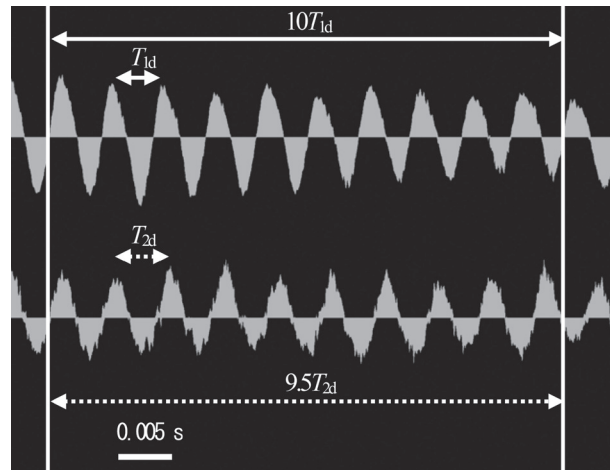


図12 設定振動数200 Hzで実験(モーター②)を行ったときの波形。音源が近づくとき(図上側)と遠ざかるとき(図下側)を比較したもの。縦の白線は近づくときの10周期分に合わせてある。

200 Hzでの接近と離反の振動数を(7)、(8)式により算出すると、それぞれ近づくときが206.82 Hz、遠ざかるときが193.62 Hzとなった。同様な変化は異なる振動数においても期待されることから、測定を行った全ての設定振動数100~1000 Hzにおける結果を表1に基づいて表7に示す。なお、設定振動数100 Hzに関しては、低振動数ゆえにスピーカーから発せられる音量がかなり小さく、離反するときの波形をソフトで観測することができなかったため欠測となっている。

表7 モーター②を用いた実験で設定した振動数 f に対する1波長の周期の理論値 ($T=1/f$)、計算値、実験結果(実測値)。

振動数 f [Hz]	1波長の周期 ($\times 10^{-3}$)				
	接近		静止	離反	
	T_1' [s] (計算値)	T_{1a} [s] (実測値)	T [s] (理論値)	T_2' [s] (計算値)	T_{2a} [s] (実測値)
100	9.67	9.85	10.00	10.33	-
200	4.84	4.85	5.00	5.16	5.10
300	3.22	3.25	3.33	3.44	3.40
400	2.42	2.45	2.50	2.58	2.55
500	1.93	1.95	2.00	2.07	2.05
600	1.61	1.65	1.67	1.72	1.75
700	1.38	1.38	1.43	1.48	1.45
800	1.21	1.20	1.25	1.29	1.30
900	1.07	1.05	1.11	1.15	1.15
1000	0.97	0.95	1.00	1.03	1.05

モーター①に比べてモーター②の場合の移動速度はおよそ2倍となり、聴覚的にもドップラー効果がよく感じられるようになった。1波長の時間については0.00002~0.00015 sまでの変化が全ての振動数において変化がみられ、高速化による改善が得られた。図12中の波長を比較すると、近づくときの10周期に対して遠ざかるときは

9周期+1/2周期となっている。モーター①を用いた結果に比べて近づくとときと遠ざかるときの周期の差が大きくなっており、波長の変化が視覚的に大きく捉えられる。音源の移動速度を上げることによって、視覚的な波長の変化がより顕著となり、波長の変化と音のドップラー効果を関連付けて理解することに繋げられる結果を得た。一方で、音源の移動が高速化したことで測定される波形は音源の揺れの影響を受け、モーター①の場合に比べて粗い場合があった。加えて、起動トルクがモーター①に比べて②が約8.5倍と強力化したことから、音源がモーターに到達するときの電源オフ操作を確実に行わないと、モーターを操作する人や音源をキャッチする人の怪我につながりかねないことから、十分に安全に配慮し、安全対策として音源のソリをスポンジにし、キャッチはヒットバックを用いた。

2つのモーターを用いたドップラー効果の実験(表6, 7)から、設定振動数 f (音源が静止しているとき)に対する「1波長の周期の差」と「振動数の差」を図13に示す。前者は音源が接近・離反するときに観測された波形を設定振動数(静止時)の1波長の周期と比較した差であり、『視覚的』な波長の周期変化の増減を意味する。後者は音源が接近・離反するときに聞こえる音の振動数を設定振動数との差であり、『聴覚的』に捉えられる音の高低変化を意味する。

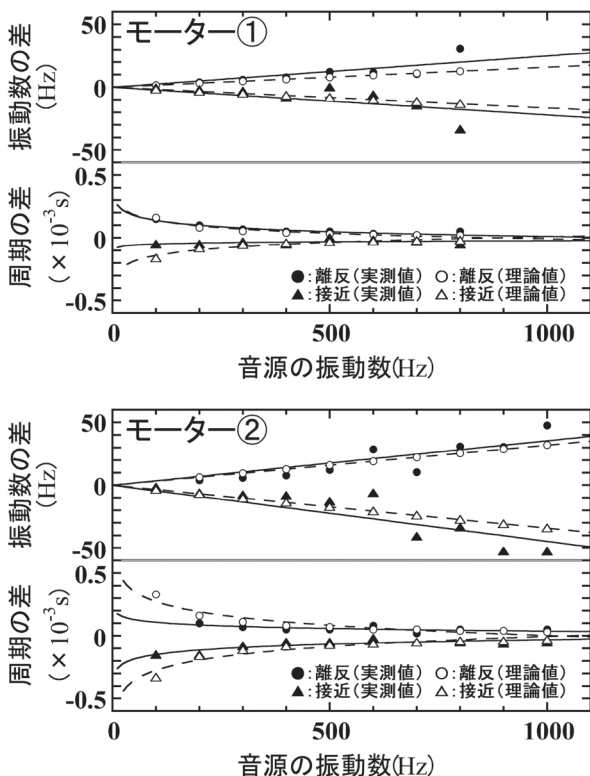


図13 モーター①(上図), ②(下図)それぞれの設定振動数 f に対する1波長の周期の差と振動数の差。実測値と理論値が重なる箇所がある。

この図から、設定振動数 f が低いほど1波長の周期の差は大きくなり、図11, 12のように波長の変化を『視覚的』に捉えることに適していることがわかる。一方で、振動数の差は設定振動数 f が高いほど大きくなり、ドップラー効果による音の変化を『聴覚的』に捉えやすくなることがわかる。加えて、モーター①よりも音源を速く移動(速度 v)させたモーター②の方が周期、振動数ともに差が大きくなっており、音源を高速で動かすほど『視覚的』、『聴覚的』にドップラー効果による音の変化を捉えやすくなると言える。

5. まとめ

「ドップラー効果を、聴覚を用いて正しく体感、理解できる教材を開発すること」を目的とし、研究に臨んだ。実験を通して、これまで高等学校物理のドップラー効果の実験で多くを占めてきた「音源を回転させる」方法から、より生徒の実態・経験に即した「音源を直線運動させる」方法を見出し、①『聴覚的』にはうなりではなく、正しいドップラー効果による音の変化を、②『視覚的』には波形の時間変化を活用することにより、現象そのものを正しく理解できる実験教材が開発できたと考える。

等速直線運動を活用した実験では、音源を約20 km/hとその2倍の約40 km/hで移動させる2つの方法で行い、速度が大きいほど実験で活用できる振動数の幅が広がり、本研究の目的をより正確に表せることが示された。しかし、高速化することは事故の危険性が増すことを意味しており、本実験を通して、音源の最大移動速度は40 km/h程度と考える。また、実験場所は学校体育館を用いることで教室や廊下の狭い空間で起こる反響音の課題は解決し、さらに屋外で行う場合の騒音の課題も解決できるため学校現場に適した教材と考える。

直線運動を活用したドップラー効果の実験教材は既に市販されており³⁾、これを活用することにより聴覚による定性的理解は十分可能である。しかしながら、本教材は波長の長さを周期の時間によって定量化することで定量的かつ視覚的にドップラー効果を理解することが可能であり、本教材を活用することで音のドップラー効果の学習がより生徒の実感を伴ったものになることを期待したい。

参考文献

- 池尻直史(2022)「ドップラー効果を確かめられる振動数測定ソフトの開発」令和3年度東レ理科教育賞受賞作品集(第53回), 35-38.
- 岩崎泉(2014)「保有する聴覚を活用したドップラー効果の実験」平成25年度東レ理科教育賞受賞作品集(第45回), 10-13.

- 植松恒夫 他 (2020) 文部科学省検定済教科書 令和3年度高等学校理科用 (2017 検定) 『物理 改訂版』啓林館.
- 草鹿堅一 (1975) 「記録タイマーによるドップラー効果のモデル実験」 固体物理23, 221-223.
- 國本正和 他 (2020) 文部科学省検定済教科書 令和3年度高等学校理科用 (2017検定) 『改訂版 物理』数研出版株式会社.
- 佐藤文隆 他 (2020) 文部科学省検定済教科書 令和3年度高等学校理科用 (2017検定) 『物理 新訂版』実教出版株式会社.
- 島田昌敏・岡本哲行 (1973) 「回転法によるドップラー効果の実験」 固体物理20, 295-297.
- 田村剛三郎 他 (2020) 文部科学省検定済教科書 令和3年度高等学校理科用 (2017検定), 『改訂 物理』第一学習社.
- 那波信男 (1979) 「エア・トラックによるドップラー効果の実験」 固体物理27, 35-38.
- 羽浦賢司 (2018) 「力学滑走台を用いた音のドップラー効果の実験」 平成29年度東レ理科 教育賞受賞作品集 (第49回), 40-43.
- 別所進一 (2003) 「ドップラー効果による速度測定－学生実験への導入－」 物理教育51, 85-89.
- 三浦登 他 (2020) 文部科学省検定済教科書 令和3年度高等学校理科用 (2017検定) 『改訂 物理』東京書籍株式会社.
- 溝上忠彦 (2016) 「簡易ドップラーボールの作製」 北海道立教育研究所附属理科教育センター 研究紀要 28, 24-27.
- 文部科学省 (2019) 『高等学校学習指導要領 (平成30年告示, 令和3年一部改訂) 解説 理科編 理数編』実教出版株式会社.

注

- 1) WavePad音声編集ソフト,
<https://www.nch.com.au/wavepad/jp/download-now.html>
(参照2023年9月1日).
- 2) オリエンタルモーター株式会社, “ステッピングモーターとは”,
https://www.orientalmotor.co.jp/products/stepping/overview_1/
(参照2023年9月1日).
- 3) ドップラーロケット, ナリカ社製 カタログNo : C15-8351,
<https://www.rika.com/product/detailed/C15-8351>
(参照2023年9月1日).