

# 水波ドップラー効果の定量的測定と教材化

## —高等学校理科新科目「課題研究」に向けた教育的検討—

桐 山 信 一

### 要 約

高校物理を履修して波の学習を行えば、たいいていの波動現象は理解できるようになる。しかし、最近の理工系大学生も物理を履修しない者が増えてきた。ドップラー効果を理解するには、波長や振動数を含む波動概念が形成されていなければならない。模擬授業を行って、中学生が理解可能な波の学習内容を探ったところ、波源の振動が媒質を伝わり波形が移動することは十分に理解できるのではないかという実感が得られた。ドップラー効果を含む多様な自然現象を理解するために、中学校理科の「音と光」の単元で波の基本的な学習が行われるのが望ましい。

高校物理では音波のドップラー効果を扱うが、教科書には適切な実験が見あたらない。そこで、水波ドップラー効果の簡単な観察方法、定量的な側面まで理解可能な指導方法の可能性を探った。水面上に水滴を落下させて生じる波（波長 $\lambda_0$ ）で、水滴滴下部を移動させると水波ドップラー効果が観察される。デジタルカメラで撮った画像から前方波長 $\lambda_1$ と後方波長 $\lambda_2$ を実測し、 $\lambda_0$ と比較するという方法を検討した。さらに、生徒や学生が容易に実施できる方法として、彼らが持っている携帯電話のムービー機能を用いて水波の動画測定を行い、コマ送り再生をして波長変化を測定するという方法を検討した。ドップラー効果では、波長変化 $\Delta\lambda$ （ $=\lambda_0-\lambda_1$ ）が波源の移動速度 $v$ に比例する。 $v$ を変化させて比 $\Delta\lambda/\lambda_0$ との関係を調べれば、ドップラー効果を検証できる。この方法では、画像上での $\Delta\lambda$ と $\lambda_0$ の実測は必要なく、画面上での相対的測定によって比 $\Delta\lambda/\lambda_0$ を求めればよいという簡易さがある。したがって、携帯電話を用いた水波ドップラー効果の検証は、高校物理の探究活動や課題研究の内容としてふさわしいと考えられる。

### 1 はじめに

多くの人は、「波」とは何かを知らない。義務教育の理科には波の学習単元がなく、高校物理を履修しなければ波の学習をすることはないからである。理科系生徒が主に学ぶ物理の単元「波」及び「音」は、生徒にとってわかりやすい内容なのだろうか。

また、波の学習を始める生徒は、波に関連する内容をどの程度既習しているのか。我々が実感する世界のリアリティは粒子と波であるのに、波の学習は理科教育のなかで軽視されてきたのではないだろうか。

高校物理の単元「波動」は、音や光を波動として理解するための基本的内容から成り立っている。そこに現れる屈折、干渉、回折などは波に特有の現象である。ドップラー効果もあらゆる波に生じ得る現象であり、赤方偏移と膨張宇宙など法則の応用面も幅広い。これらの現象は、直接観察しなければ理解できない。そのため、水波を観察させるリップルタンク型の教材が利用されていて、物理教師の自作例も数多くみられる。市販教材としては、OHPを併用し力学的に振動する物体を波源にした水波投影装置や、波源に同期させたストロボを内蔵した水波投影器が普及している<sup>1)2)</sup>。これらはすべて教師が操作し、スクリーンに投影された現象を生徒が一斉に観察する形式の演示実験に用いられる。市販教材は高価なものを除き、ドップラー効果の観察はできない。ゆえに、簡単な仕組みで水波のドップラー効果を検証できる装置の製作が求められている。物理の単元「音」では音波のドップラー効果を扱うが、教科書には適切な実験が見あたらない<sup>3)</sup>。また、ドップラー効果のように定式化された法則を指導する場合、定量的な検証実験があれば法則が納得できるものになると考えられる。こうした事情から、ドップラー効果の観察を簡単に行えるように工夫し、定量的側面まで理解可能な指導法の可能性を探ることは、物理教育の発展にとって重要な研究となり得る。

本稿では、まず波の学習はなぜすべての生徒に必要なのかを論じ、中学生に行った「波の授業」の概要と成果について述べる。次に、波の学習の中でも興味を引くドップラー効果の指導改善に向けた取り組みについて述べる。その中で、水滴落下によってドップラー効果が生じる自作装置を用いた観察方法の教育的検討を行う。続いて、測定したドップラー波長と計算値の関係を検討し、物理における探究活動、課題研究及び生徒実験として実施するための定量的測定法、探究的指導法について示す。

## 2 波の学習はなぜすべての生徒に必要なか

### (1) 学校での波の学習

筆者は、長年にわたり高等学校の物理教員をつとめた。その経験の中で感じた疑問は次のようなものである。なぜ、日本の義務教育の理科カリキュラムに、波の位置づけが見あたらないのか。準義務化している高校では、波動の学習内容は物理Ⅰにある。全高校生の2～3割程度の理科系生徒のうち、約半数が物理Ⅰを選択するにすぎない。高校生の物理Ⅱまでの選択率は10%台である<sup>4)</sup>。文科系生徒は、まず波の学習はできない。日本の小中学校の理科では、音や光は学習内容として取り上げられたり削られたりしてきた。学習内容は音や光の現象面が中心であり、その本質である波の

基本概念を学ぶ学習になっていない。このことは、戦後の学習で一貫している。過去の学習指導要領にも波の学習項目がない。現行学習指導要領においては、小学校では糸電話が教科書から消え、音の学習項目がなくなっている。光も3年生で太陽の光と陰、太陽光による物体の温度上昇を学習するにすぎない。中学校の音の単元では、振動数と高さの関係を学習するだけである。以前は、現象面が学習の中心であるとはいえ、音波、光の分散、スペクトル、紫外線、赤外線など学習が豊富であった。しかし、学習指導要領が変わると学習内容がころころと変わり、小中学校とも昭和53年の理科指導書以来、音や光の学習内容は大きく削られた<sup>5)</sup>。現在、韓国の小中学校では、これも現象面が学習の中心とはいえ、鏡やレンズ、光の分散（虹）など光に関する学習が豊富に行われているといわれる<sup>6)</sup>。

## （2）波の学習の必要性

我々の身の回りには、様々な波が存在する。光や音だけではない。水面の波、海辺でみられるさざ波、また災害の原因となる地震波や津波等々、自然現象だけではなく集団で行うパフォーマンスである「ウェーブ（人波）」も波である。波という言葉は、力、電気、エネルギーと同様に日常用語となっている。しかし、学校教育の理科（物理）では、物体の運動や電磁気を中心に教えている。また、小学校から学習している光は、波としては直観的に分かりにくいものである。水面にできる円形波のように、身近に生じる波動現象が、高校の一握りの物理選択生徒しか学ばないのはいかなものであろうか。高校化学や生物では光が出てくるし神経電流も出てくるから、波長や振動数の概念が必要である。高校地学でも、光、風、海、ジェット気流、地震など波の知識なしには理解できない。さらに、最近になって水や水晶を素材にして、波動という言葉を使ったニセ科学やそれに基づく商法が広まっていることも憂慮される。すべての生徒が同じ内容を学ぶ中学校で、波の学習が行われるべきではなかろうか。波の基本概念が中学生に理解できるならば、波は中学校学習指導要領の理科にはじめて位置づけられる可能性がでてくる。音を、波を基礎として教えることができる。世界には2つのリアリティがあって、それは粒子と波動である。そして、情報やエネルギー伝達は波動を通して行われている。波動は学習者の世界理解に必要なものであり、波動の理解を通して、自然の力学的な理解、エネルギー的な理解も深まるといえるよう。

## （3）波の理解に向けて

波動概念は、図1のように4つの要素から構成される。波とは、波源の振動が媒質を伝わり、波形が移動する現象をいう。この理解が、最も基本的な概念Ⅰであり、本稿では「基本的波動概念」とよぶ。波源で決まる振動数と、媒質で決まる波の速度が波長を決める。この理解が概念Ⅱであり、概念Ⅰはその下位概念である。概念ⅠとⅡを概念Aとする。波の変位は、成分となる波の重ね合わせにより決まる。この理解を概念Ⅲとする。波面は、素元波の重ね合わせで生じる包絡面となる。この理解が概

念Ⅳであり、概念ⅡとⅢはその下位概念となる。概念ⅢとⅣを概念Bとする。概念Bは概念Aより高度な内容であり、反射、屈折、干渉、回折などを統一的に説明できる。筆者は、中学生にも波動概念Aが理解できるのではないかと考え、そのための有効な指導法を開発しようとしている。

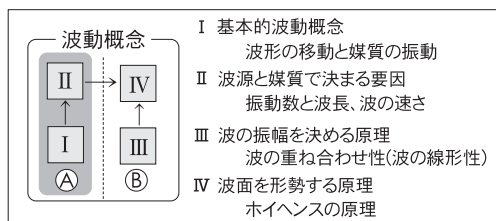


図1 波動概念

#### (4) 中学生対象「波の授業」概要

2006年11月9日(土)、私立関西創価中学校の3年生が、体験学習の一環として創価大学にやってきた。そして、創価大学教員による模擬授業を受けた。模擬授業は、経済学や法学、文学などの文系授業と、生命工学などの理系授業があり、1コマ60分で行われる。生徒はそこから2コマを選択して受講する。その1コマを担当した筆者が、26名の生徒を対象に、「波の授業」を行った<sup>7)</sup>。現場での展開を意識し、指導計画を立てた。

第1次 波のしくみ……2時間(本時1時間目)

第2次 音の現象………4時間

第3次 光の現象………8時間

第1次では、波動概念Aの理解を目指す。本時の目標を基本的波動概念の理解とし、「波を振動の伝搬と波形の移動でとらえて説明することができ、音は波であることがわかる。」に設定した。授業の流れは下記の通りで、[ ]は学習内容、Qは生徒への発問である。

[音叉やスピーカーに触れてみて]

Q<sub>1</sub> どんな動きをしていますか。

(生徒はスピーカーコーンの振動に驚く。)

[つるまきばねで横波と縦波を発生させる]

Q<sub>2</sub> 波が伝わるのに何が必要ですか。

(それを媒質といいます。)

Q<sub>3</sub> 波では何かが移動しているのが見えます。それを何と表現したらよいでしょうか。

(それを波形ということにしましょう。)

Q<sub>4</sub> つるまきばねにビニールテープが付いています。どんな動きをしていますか。

Q<sub>5</sub> 波が伝わる時、媒質は移動していきますか。

Q<sub>6</sub> 横波と縦波の違いをまとめましょう。

[観察のまとめ]

波とは、振動が伝わる現象である。その際、波形は移動するが、媒質は移動せず、振動するだけである。(アンダーライン部は生徒にまとめさせる。)

[作図シート上に横波の伝搬を描く] 省略

以上が概略であるが、目標行動分析にもとづいて作成した形成関係図とコースアウトラインをもとに指導案を作成した。それらの詳細については、本論の流れからはずれるので省略する。

#### (5) 授業の結果と波の学習

基本的波動概念の理解を、①つるまきばねの実験、②横波の作図、③先生の説明、④生徒同士の対話 の4つの要因(教材と指導法)から分析した。結果は、①つるまきばねの実験 が理解に有効で、②横波の作図 は難しかったようである。中学生は「媒質の振動」、「波形の移動」という言葉で波の説明ができたことから、基本的波動概念は中学生でも十分に理解可能なものであると実感した。

中学校での基本的波動概念の理解を基礎に、高校・大学の理科学習を行うとよい、というのが筆者の提案である。そうすれば、子どもたちは高校物理を履修しなくても、基本的波動概念を用いて理科の学習をスムーズにし、世界理解の幅が広がるのである。したがって、文科系の生徒たちにもドップラー効果を理解する素地が作られる。これは、子どもの幸福につながるのではないだろうか。

### 3 水波のドップラー効果の観察

第1種ドップラー効果(波源移動による波長の変化)は、図1の概念Aのみで理解できる現象であり、概念Bを必要としない。波長の変化が見えるような装置を用いて、現象を直接観察すれば理解されやすい。はたして、中学生にドップラー効果が理解できるのか(もちろん定性的にはあるが)、物理を履修していない大学生の反応が参考となると考え、理科教育法Ⅱの授業で見せるための装置をイメージしながら、簡単な仕組みで水波のドップラー効果を検証できる装置を製作した<sup>8)</sup>。

#### (1) 水滴滴下装置と水槽

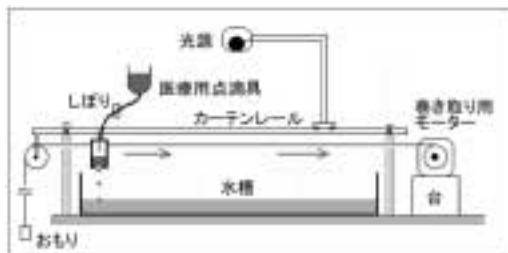


図2 装置の概要

図2に装置の概要を示す。医療用点滴具をカーテンレールに取り付け、工作用モーター（タミヤ 3速クランクギヤボックスセットなど）で水滴滴下部が左右に移動できるように配置する。滴下部（ストローを短く切った物）の移動可能な領域に水槽を置く。モーターで、おもりに働く重力に逆らって糸を巻き取ると、滴下部は右にほぼ等速で移動できる。また、モーターの回転を逆にすると、おもりに働く重力とつり合いながら左にほぼ等速で移動できる。水滴は、医療用点滴具付属のしぼりで滴下の時間間隔（滴下周期）を調整して落下させることができる。高輝度ダイオードの光源によって、水槽の底に写る水波の像を観察あるいは撮影する。

## （2）水波の伝搬

水滴が水面に衝突すると水面の凹凸が円形に伝わり、水波が生じる。目視では水面の凹凸が見えるが、デジタルカメラを向けると水槽の底面に映った水波の像が撮影される。水滴の衝突時、水槽の底面には暗い円形領域ができ（写真1）、それが円形に伝わっていく（写真2）。

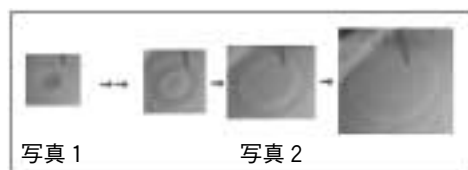


図3

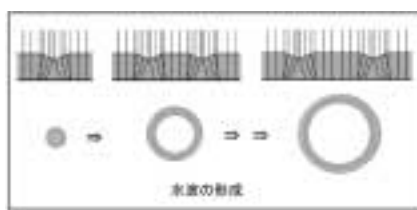


図4

水滴の連続落下で生じる水波の波長 $\lambda$ の値は、写真2の暗円あるいは明円の間隔を測って決めることができる。写真1, 2は、落下距離 $h$ （水滴の落下位置から水面までの距離）が3.0cm、水深 $H$ が2.0cmの場合である。 $h$ が5.0cm以上になると、1滴の水滴落下によって同心円状の複数の波ができてしまうので、波長測定が困難になる。

## （3）水波形成のモデル

衝突によって水面にくぼみが生じたと考えると、光源からの光が屈折して水槽の底面に明暗の領域ができる（図3）。くぼみが波源となって円形に広がっていくというモデルを考えると、図4のような波ができる。図3を写真1に、図4を写真2にそれぞれ対応させると説明がつく。

## （4）波源移動によるドップラー効果の発生

モーターを駆動して水滴滴下部を移動させる。水滴の滴下周期と滴下部の移動速度

を調節すると、写真3のように円形波の間隔が変化する。写真3では水滴滴下部は右に移動している。円形波の間隔を波長と考えると、波長が変化する第一種ドップラー効果が起きていることがわかり、波源前方の波長 $\lambda_1$ と後方の波長 $\lambda_2$ の違いを明確に観察することができる。

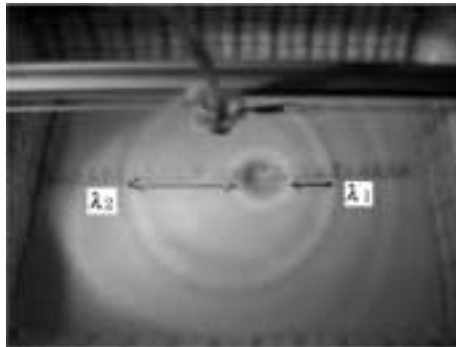


写真3 撮影された波長変化

#### (5) ドップラー効果の検証—教材化の検討1—

ドップラー波長は、水波の波長 $\lambda_0$ を用いると次のようになる。

$$\text{前方波長 } \lambda_1 = (1 - v/V) \lambda_0 \cdots \cdots (\text{ア})$$

$$\text{後方波長 } \lambda_2 = (1 + v/V) \lambda_0 \cdots \cdots (\text{イ})$$

ここで、 $v$ は波源の速度（＝水滴滴下部の移動速度）、 $V$ は水波の速度である。 $\lambda_1$ と $\lambda_2$ を水槽の底に設置したスケールで実測し、関係（ア）（イ）の検証を試みた。

##### ①水波の波長 $\lambda_0$ の測定

滴下部を静止させ、生じる水波の波長 $\lambda_0$ を測定した。

##### ②滴下周期の測定

水滴が20滴落下するのに要する時間 $t$ を測定し、 $T=t/20$ により求めた。この $T$ を円形波の周期とする。振動数 $f$ は、次式で求める。

$$f = 1/T$$

##### ③ $V$ の計算

直接測ってもよいが、水槽が短いのでストップウォッチでは測れない。ここでは、

①②で求めた波長と振動数の積で計算した。

$$V = \lambda_0 \cdot f$$

##### ④ $v$ の測定

滴下部がカーテンレールを20cm移動する時間 $t$ をストップウォッチで測定して、 $v = 20/t$ により求めた。表1に結果を整理した。

$V$ ,  $v$ ,  $\lambda_0$ を式（ア）（イ）に代入すると、ドップラー波長が計算できる。得られた計算値を、測定値

表1

水波の波長 $\lambda_0$	4.03cm
水波の振動数 $f$	3.37Hz
水波の周期 $T$	0.297s
水波の速度 $V$	13.6cm/s
波源の速度 $v$	6.05cm/s

とともに表 2 に示す。本装置は (1) で述べたような簡単な仕組みで、しかも単純な測定ではあるが、計算値と測定値は 5 ～ 6 % 程度の差で一致した。

表 2

	計算値	測定値
前方波長 $\lambda_1$	2.2cm	2.1cm
後方波長 $\lambda_2$	5.8cm	6.1cm

#### (6) 現象を見た学生の感想

理科教育法Ⅱの授業で、現象を撮影した動画を見せた。学生の理解への振り返りとしては、

- ・波がせばまっていくのがわかった。
- ・シミュレーションではそうなるのかと思えなかったが、実際の実験で見ると納得できた。

など、一緒に見せたシミュレーション以上の効果があった。しかし、高校で物理を履修していない学生にとっては、

- ・ドップラー効果の説明がわからなかった。

など、波の概念が形成されていないためにドップラー効果の学習に入っていけないという状況がみられた。このような断絶が、学生の学習意欲を殺いでいる。中学校で波の基礎を学習していれば、ドップラー効果につないでいけたのでは…と痛感された。大学での物理教育にも限界があり、高校物理の(波の)基礎から全てというわけにはいかない。中学校理科で基本的波動概念を学習する単元があればと悔やまれる。

#### (7) 定量的測定の可能性—教材化の検討 2—

高校物理では、ドップラー効果の実験として動いている音源の振動数観測がある。しかし、第 1 種ドップラー効果の本質は波長変化にあるので、実験としては、

- ・波長変化が観察できること。
- ・波長変化がドップラー効果によって生じていることが検証できること。

が必要である。市販教材としては、エアー噴射方式のハンディタイプの水波発生器があるが<sup>9)</sup>、筆者は水面に風を当てるということに違和感をもつ。つまり、波長が変化するのは媒質を押しているからではないかという誤解を生徒に与える可能性が否定できないからである。本装置においては、波長測定はデジタルカメラの動画撮影による他はない。ところで、生徒や学生は携帯電話を持っているが、最近のものは画素の高いカメラを装備しているので、

定量測定法 1：携帯電話によって撮影した動画を理科室のパソコンに送り、パソコンの画面上で波長変化の測定を行う。

定量測定法 2：携帯電話によって撮影した動画を用いて、波長変化を直接測定する。



が考えられる。次の4 授業改善のために では、より現実的で簡易な方法2を検討する。

水波は2次元の波であるから、波源付近はとくに正弦波的ではないという指摘がある<sup>10)</sup>。本装置では、波源から出た水波が0.1秒を過ぎて波源を離れたとき、ほぼ一定の波長となることがわかった。水波の波長測定は、波源近傍では行うべきではないといえる。

#### 4 授業改善のために

3ではデジタルカメラで撮った画像を用いて前方波長 $\lambda_1$ と後方波長 $\lambda_2$ を実測し、 $\lambda_0$ と比較する方法を示した。この方法は生徒実験では実施できないことはないが、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_0$ および波の速度 $V$ の実測を必要とするため、課題研究や探究活動では十分実施可能と考えられるが、通常の授業ではやや難しいと判断される。装置を改良し、授業改善の方途を探った<sup>11)</sup>。

表 3

社	波源移動の扱い	観測者の運動の扱い	写真や実験など	応用・発展
K	$\lambda = (Vt + vt)/ft$ $f \cdot \lambda = V$ による観測振動数の導出	発展扱い $f' = f(V - v_o)/V$ $f'' = f(V - v_o)/(V - v_s)$	写真（水面波の波長変化）	ジェット機の衝撃波 （写真あり）
T	$\lambda = (Vt + vt)/ft$ $f \cdot \lambda = V$ による観測振動数の導出	発展扱い $f' = f(V - v_o)/V$ $f'' = f(V - v_o)/(V - v_s)$	写真（振動針金の移動による水面波の波長変化）	スピードガン 赤方偏移と膨張宇宙
Sa	$\lambda = (Vt + vt)/ft$ $f \cdot \lambda = V$ による観測振動数の導出	本文で定性的記述 公式は記載せず	写真（波源静止の円形波と波源移動の波長変化の両方）	なし
D	$\lambda = (Vt + vt)/ft$ $f \cdot \lambda = V$ による観測振動数の導出	発展扱い $f' = f(V - v_o)/V$ $f'' = f(V - v_o)/(V - v_s)$	実験（向かい合った2人が小型防犯ブザーを投げ合う）	なし
Su	$\lambda = (V + v)/f$ $f \cdot \lambda = V$ による観測振動数の導出	発展扱い $f' = f(V - v_o)/V$ $f'' = f(V - v_o)/(V - v_s)$	写真（水面波の波長変化）	なし

##### （1）高校教科書にみるドップラー効果の扱われ方

ここでは、波源移動の場合の前方波長や後方波長の導出過程、観測者の移動の取り上げ方、写真や実験の有無、ドップラー効果の応用・発展面について、5社の教科書を調べた。表2にみられるように、物理Iの5社とも、波源移動の場合の前方波長や後方波長については、図5のような指導過程はすべて同じであり、いずれも

$$\lambda' = (Vt \pm vt)/ft \cdots \cdots (\text{ウ})$$

を導いている。これらから観測振動数を導出し、音の高低を説明する。このことは、

古い教科書でも同様であった。観測者が移動する場合も含めた内容については、4社が公式を明示している。図や実験については、D社を除く4社が振動片の移動と思われる水面波の波長変化の写真を掲載し、D社が小型ブザーを向かい合った2人が投げ合う実験を取り上げている（水面波の写真はなし）。また、応用・発展面については、K社がジェット機の衝撃波、T社がスピードガンと赤方偏移を紹介し、他の3社は全く取り上げていなかった。物理Ⅱでは、重複を避けたのか、5社ともドップラー効果の記載は全く見あたらなかった。

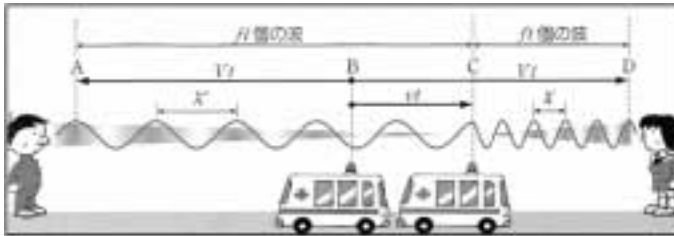


図5 物理Ⅰ教科書より（K社）

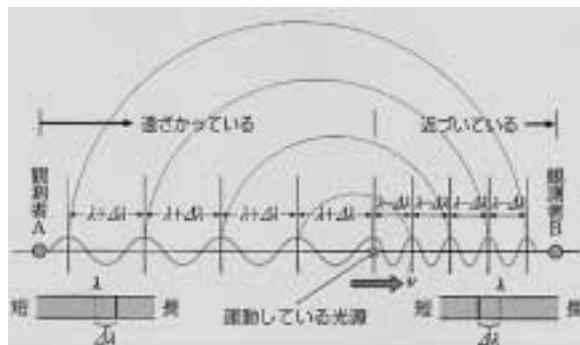


図6 地学Ⅰ教科書より（K社）

一方、地学では、波源移動の場合には前方波長や後方波長そのものではなく、波長変化  $\Delta\lambda$  が移動速度  $v$  に比例する過程を図で考えさせようとしている（図6）。地学Ⅰでは、ドップラー効果を赤方偏移  $\Delta\lambda/\lambda_0$  やハッブル法則という自然認識につなごうとする意図があるからである。地学Ⅱでも、継続してハッブル法則を定量的に扱い、金星までの距離測定、分光連星の観測へとドップラー効果の応用・発展面を充実させている。一つの感想ではあるが、同じドップラー効果の扱いでも、物理では公式導出過程の煩雑さや応用・発展面の記載の貧弱さが感じられ、地学では面白みのある多彩な展開になっているという印象を受ける。さらに、地学では  $\Delta\lambda$  が  $v$  に比例するという原理性、Ⅰ・Ⅱの内容的継続性が認められる。

## （2）波源の移動方法の改良

カーテンレールによる波源の移動はやや安定感に欠ける。そこで、水滴滴下部が等速で安定して移動できる仕組みを製作した（図7）。平行な板で水滴滴下部を挟みな

がら引くと、横ぶれを抑えながら移動させることができる。

### (3) 水滴滴下部の改良と滴下周期の測定

水滴滴下部をストローから駒込ピペット（1 ml）に変えた。図8のようにピペット内のふくらみの部分に空間ができ、そこを水が流れるように落下してくるので安定した水滴を得ることができる。落下する水滴を発光ダイオードと光センサーの間に通し、光センサーの出力をパソコンに導いて水滴滴下周期を求めた。サンプリング周期は1/50sである。3で示したように、滴下周期は0.3秒程度となるので、同程度の場合の結果を図9、10に示す。周期Tと相対誤差e（ここでは、標準誤差ではなく、17個のデータそのものの標準偏差を示した）は、下記の通りほぼ一定であり、水滴落下の定常性が確認された。

図9： $T=0.294 \pm 0.009s$      $e = \pm 3 \%$

図10： $T=0.258 \pm 0.006s$      $e = \pm 2 \%$

この誤差はサンプリング周期の制約によるものであり、水滴落下現象の周期性の精度はより高いと考えられる。

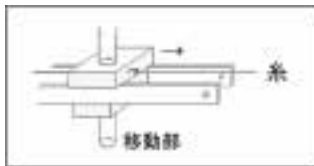


図7 滴下部の移動

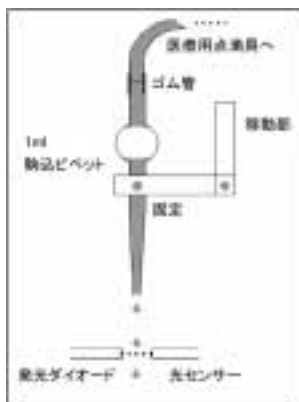


図8 水滴滴下部

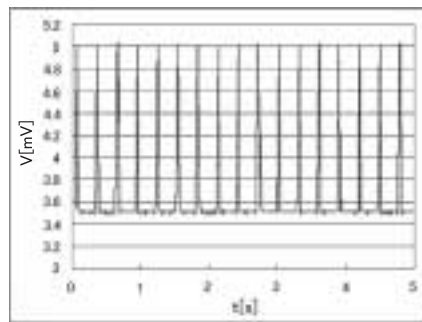


図9 水滴滴下周期 (1)

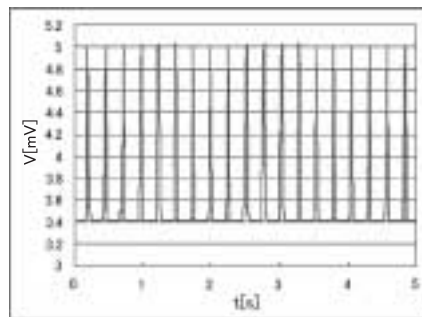


図10 水滴滴下周期 (2)

### (4) 消波板の製作とその効果

水波は容器の壁などで反射し、反射波が生じる（図11右）。円形波をきれいに発生させるには、反射波を消去することが望ましい。桧工作材（品名：サンカク）をつないだ消波板（写真4）を壁面に設置すると反射が消える（図12右）。これは、鋸状の消

波面に衝突した水波がそこで反射を繰り返し減衰してしまうためである。

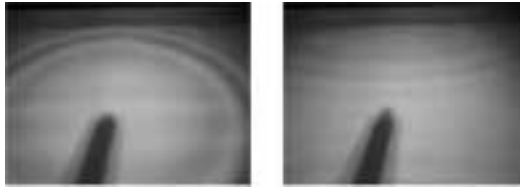


図11 左が反射前、右が反射後

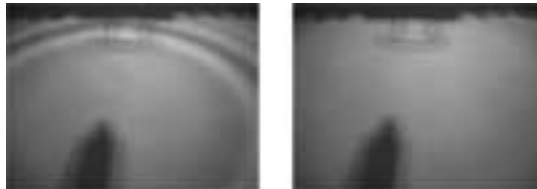


図12 左が反射前、右が反射後



写真4 消波板

#### (5) ドップラー効果の指導—教材化の検討3—

物理Ⅰでは、図13のような指導の順序になっている。その改善策を図14と下記①～③に示す。

- ①波源移動による波長変化（＝本質的要因）を定量的に扱う。
- ②その結果である音の観測振動数は、 $f=v/\lambda$  による定量的説明に先立ち、波を受ける周期の変化を説明する。
- ③赤方変位のような実例の定性的説明を加える。

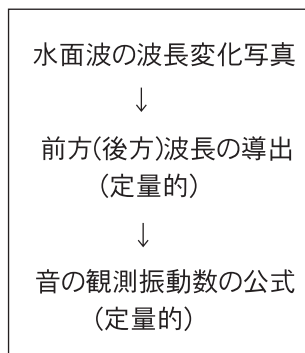


図13

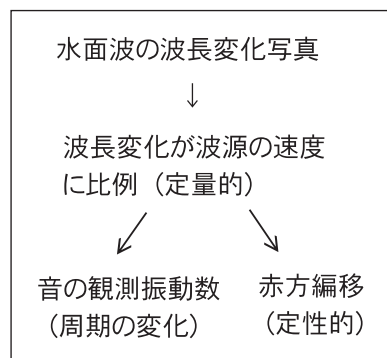


図14

以上のようにすれば、「ドップラー効果があらゆる波（水面波、音波、光波）に特有の現象である」という物理としての自然認識に到達できる。さらに、水面波のドップラー効果が学習者によって測定され、(6)に示した式(エ)による検証が行われるならば、物理Ⅰ・Ⅱにおける探究活動や課題研究として成立するのではないかと考えられる。

#### (6) 携帯電話で撮るドップラー効果

生徒や学生が簡単に実施できる方法として、水波が移動しているところを彼らが持っている携帯電話（以後、ケータイと記述）のムービー機能を用いて動画測定を行い、コマ送り再生をして波長変化を観察するという方法を考えた<sup>12)</sup>。ドップラー効果では、波長変化  $\Delta\lambda$  ( $=\lambda_0-\lambda_1$ ) が波源の移動速度  $v$  に比例する。

$$\Delta\lambda/\lambda_0 = k \cdot v \cdots \cdots (エ)$$

比例定数  $k$  は水波の速度  $V$  の逆数である。式(ウ)と式(エ)は同じ内容であり、互いに導き出すことができる。 $v$  を変化させて比  $\Delta\lambda/\lambda_0$  との関係調べれば、ドップラー効果を検証できる。具体的には、ケータイ動画をコマ送り再生し、画面上で静止させてから透明定規を用いて  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  を測る。そして、 $\lambda_1$  と  $\lambda_2$  の平均を取って  $\lambda_0$  とする。式(ア), (イ)を片々加えると、 $\lambda_0 = (\lambda_1 + \lambda_2)/2$  が導かれる。この方法では、

- ・画面上での  $\Delta\lambda$  と  $\lambda_0$  の実測や  $V$  の測定は必要ない
- ・画面上での相対的測定によって比  $\Delta\lambda/\lambda_0$  を求めればよい

という簡易さがある。また、

- ・自分たちのケータイが測定器になる

という面白さもある。反面、定量性はやや落ちる。

#### (7) 探究活動としての実験方法

物理Ⅰにおける「波に関する探究活動」では、波に関する学習活動と関連させながら観察、実験を通して、仮説の設定、実験の計画、実験による検証、実験データの分析・解釈、法則性の発見など、物理学的に探究する方法を習得させようにする<sup>13)</sup>、とされている。授業で実施する場合、探究活動の項目にそって学習内容を並べると表4のようになる。課題研究として実施する場合は、装置の設計や製作（水槽、滴下部、駆動部、光源など）も生徒に行わせることが考えられる。

相対的測定に用いた装置を図15に示す。透明アクリル板（厚さ3mm）を加工して水槽を自作し、水槽からの透過光を観察することにした。図15のように設置したB4コピー用紙（スクリーン）上に写った水波の透過像を、ケータイで動画撮影を行った。水滴滴下部の移動速度は、モーターに接続する直流電源の電圧を1.7～4.5Vの範囲で変えて変化させる。決まった距離を水滴滴下部が移動する時間をストップウォッチで測定し、水滴滴下部の移動速度を求めた。

相対的測定の実験結果を図16に示す。多少バラつくが、比  $\Delta\lambda/\lambda_0$  が  $v$  に比例することがわかる。

表 4

①仮説の設定

授業で習ったドップラー効果の波長変化が、次式で求められること。

$$\lambda_1 = \lambda_0 (1 - v/V), \lambda_2 = \lambda_0 (1 + v/V) \dots\dots (1)$$

②実験の計画

- ・実験結果と照合できるように、式(1)を変形して式(2)を導いておく。

$$\Delta\lambda/\lambda_0 = k \cdot v \dots\dots (2)$$

- ・測定、データ処理の分担をする。

③実験による検証

- ・波源(水滴の落下点)を移動させドップラー効果を起こす。
- ・ケータイで水面波の動画撮影をする。  
アクリル透明水槽の下部に白いスクリーンを置き、投影した像を撮影する。
- ・ストップウォッチで  $v$  を測る。
- ・波源の速度  $v$  を変えて同様の測定を行う。

④実験データの分析・解釈

- ・撮影した動画をコマ送り再生する。  
ケータイ会社 (au) に問い合わせると、1 コマは 1/15 秒である。
- ・波長変化がよく見える所で静止させる。
- ・画面上で  $\lambda_1, \lambda_2$  を定規で測る (相対的測定)。
- ・ $\Delta\lambda, \lambda_0$  を次式で求める。  
 $\lambda_0 = (\lambda_1 + \lambda_2) / 2$   
 $\Delta\lambda = \lambda_0 - \lambda_1 (= \lambda_2 - \lambda_0)$
- ・比  $\Delta\lambda/\lambda_0$  を計算し、 $v$  との関係をグラフ化する。

⑤法則性の発見

- ・ $\Delta\lambda/\lambda_0 = k \cdot v$  を検証する。
- ・波長変化を実感し、ドップラー効果の理解を深める。

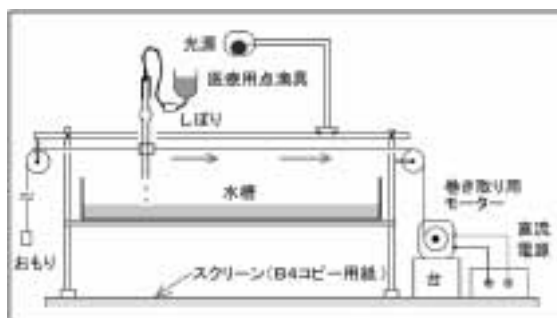


図15 相対的測定に用いた水槽

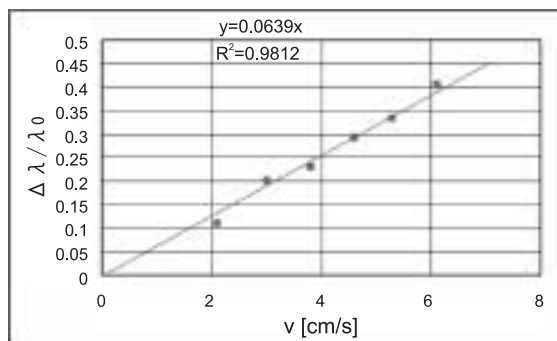


図16  $\Delta\lambda/\lambda_0$ 対  $v$

## (8) 相対的測定の実施可能性

(6)の方法では、画面上での相対的測定によって比 $\Delta\lambda/\lambda_0$ を求めればよいという簡単さがある。(7)では、探究活動としての実験方法を述べたが、ここでは物理を履修していない文科系学生が、水面波のムービー測定、画面上で比 $\Delta\lambda/\lambda_0$ の相対的測定が可能かどうか試みた。使用した水槽を写真5に示す。水槽内壁には写真4で示した消波板が設置されている。写真6は小型旋盤を用いて製作した巻き取り装置である。電池駆動でも水滴滴下部のスピードを3段階に簡単に変更することができる。写真7は高輝度ダイオードを用いた光源部である。

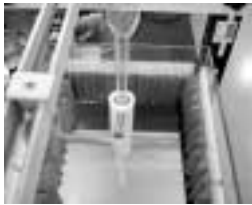


写真5 水槽

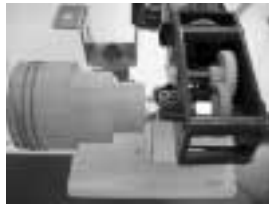


写真6 駆動部



写真7 光源



写真8 撮影中



写真9 測定中

写真8は水波のムービーを撮っているところである。写真9は、画面上でコマ送り再生させ、透明定規で $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ を測定しているところである。波長変化が分かり易い時点を3箇所選んで測定し、3データの平均を取る。写真10、11にケータイ画像を示す。写真11にはドップラー効果が認められる。このような作業を行わせた結果、初めてムービー画像を見る者にとって、波長が読みとりにくく、比 $\Delta\lambda/\lambda_0$ の相対的測定は以外に難しいことがわかった(図17)。学生の読みとりから得られた比 $\Delta\lambda/\lambda_0$ は、同



写真10 円形波 波源静止



写真11 円形波 波源移動

じ画像を筆者が再度読みとって求めたものと比べるとかなりの隔たりがあり，測定には熟練を要すると思われる。よって，現状では本測定は時間的制約の厳しい授業内ではなく，探究活動や課題研究のような探究型学習に向いている。

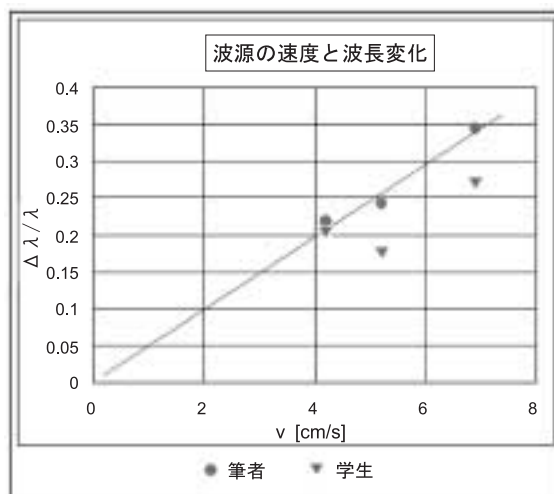


図17  $\Delta\lambda/\lambda_0$ 対 $v$  データ処理比較

## 5 おわりに—新科目「課題研究」に向けて—

PISA の調査結果が公表され，高校生の科学的応用力に課題が見られることが指摘されたのは記憶に新しい。文部科学省は，次期学習指導要領作成に向けて平成19年11月に中教審の教育課程部会における審議のまとめを発表した。中でも目新しいのは，高等学校理科における新科目「課題研究」の設定である<sup>14)</sup>。「課題研究」は，現行の物理Ⅱなどにおける単元「課題研究」を，自然を探究する能力や態度を育て，創造的な思考力を高める観点から一層充実させ進展させるねらいをもっている。

学校で行う課題研究に求められるのは，およそ次のような事柄である。

- ①知識・理解という観点からは，研究対象が学校理科（物理・化学・生物・地学）と接続した内容を有すること。
- ②思考力・判断力育成という観点からは，研究対象が様々な要因を含む現象であること。あるいは特定の要因を抽出するための工夫を要すること。
- ③実験技能・表現力育成という観点から，研究対象が多面的な継続的な測定が可能な現象であること。
- ④学習への関心・興味という観点からは，研究対象が生徒にとって身近な現象であること。

テーマ「水波ドップラー効果の検証」は，以上の観点を踏まえると課題研究のテーマとしてふさわしいと考えられる。



- ①ドップラー効果は、物理・地学の内容として削除されたことのない“基本的自然現象”として認知されている。また、法則の応用範囲も広く自然認識に有用である。
- ②周期性のよい水滴落下をどう実現するか、鮮明な画像を得るためにはどのような工夫が必要かなど、法則の検証には様々な要因が存在する。
- ③水滴落下の周期性、水滴落下部の速度測定、波長変化の相対的測定など多様な測定が可能。
- ④水波は極めて身近に生じる現象である。したがって親近感を持つテーマである。  
そして、今後の課題としては、
  - ・水波ドップラー効果を生徒実験として実施するための装置の単純化・キット化など教材研究
  - ・子どもの波動概念はどのように形成されるのかなどの基礎的研究
  - ・わかりやすく面白みのある有効な指導法の追求といった実践的研究など、単元「波」の授業改善につながる教育研究が求められる。

最後に、日本の物理教科書は、ドップラー効果についての過度の定量化、指導のコンパクト化が進められているように見える。音波の振動数変化などの（入試）問題を解くために必要なことかもしれないが、教育上は波長変化のような本質的事項以外は定性的説明でもよいのではないか。その点、有名な「*PROJECT PHYSICS*」<sup>15)</sup>や「*CONCEPTUAL PHYSICS*」<sup>16)</sup>のような外国の教科書には、定性的だがエネルギー面などを含めて物理的に論じられている。

#### 【参考・引用文献】

- 1) 中村理科総合カタログ2005→2006 vol 49 p245
- 2) ヤガミ理科機器総合カタログ No 54 平成17・18年度版 p285
- 3) 文部科学省教科書 高等学校物理 I（平成14年3月 啓林館）など
- 4) 右近修治：日本物理学会講演概要集第2分冊 p302 24pWA-4, 2006年秋季大会など
- 5) 桐山信一：第26回物理教育研究集会発表予稿集, pp49-52, 1995
- 6) 雲財康雄, 種村雅子：第35回物理教育研究集会発表予稿集, pp15-16, 2005
- 7) 桐山信一：近畿の物理教育13 (2007.3), pp10-13
- 8) 桐山信一：第36回物理教育研究集会発表予稿集 pp 2-5, 2006
- 9) 前掲2) p284
- 10) 福山豊：物理教育 40-3 (1992), p211
- 11) 桐山信一：第37回物理教育研究集会発表予稿集, pp 2-5, 2007
- 12) 桐山信一：第24回日本物理教育学会年会講演予稿集, pp50-51, 2007
- 13) 文部省：高等学校学習指導要領解説理科編理数編, pp68-71, 平成11年12月

- 14) 教育課程部会における審議のまとめ, p90  
[http://www.mext.go.jp/b\\_menu/shingi/chukyo/chukyo3/siryo/001/07110606/001.pdf](http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo3/siryo/001/07110606/001.pdf)
- 15) 渡邊正雄 他訳：プロジェクト物理 3（コロナ社，昭和55年 8 月）
- 16) Hewitt, Paul G.: CONCEPTUAL PHYSICS 8 th edition, 1997

※本研究は，平成19年度創価大学文系学部等教員研究助成金の支給により実施されたものである。関係各位に感謝申し上げます。

# **The quantitative measurement of Doppler effect of water waves and Study for teaching materials**

**—Educational examination for the enforcement of**

**A new subject of the high school science 「Problem studies」 —**

**Nobukazu KIRIYAMA**

If we study senior high school physics and learn the wave, we get possible to understand most wave motion phenomena. However, the university student of science and technology did not study physics increased of these days. Wave motion concept including frequency and wavelength must be formed to understand Doppler effect. We examined the learning contents of the wave which a junior high student could understand by doing practice class. It was judged to be able to understand it enough that vibration of the wave source is transmitted through the medium and a wave pattern moves. For understanding various natural phenomena including the Doppler effect, it is desirable for the basic learning of the wave to be performed at a unit of “a sound and the light” of the junior high school science. We teach Doppler effect of a sound wave in senior high school physics, an appropriate experiment is not found in a textbook. Therefore, we investigated the simple observation method of the water waves Doppler effect and the teaching method how quantitative understanding is possible. A wave with wavelength  $\lambda_0$  occurs when we let a drop of water drop on the surface of the water, and the water waves Doppler effect is observed when we move the dripping part of the drop of water. Using the water waves animation taken with a digital camera, we measured front wavelength  $\lambda_1$  and backward wavelength  $\lambda_2$ , and examined the method of them comparing with  $\lambda_0$ . Furthermore, as the method that a student can carry out easily, we perform the animation measurement of waves on the water with the movie function of the mobile telephone which they have. And we examined a method to observe a wavelength change by top forwarding reproduction. In the Doppler effect, wavelength change  $\Delta\lambda (= \lambda_0 - \lambda_1)$  is in proportion to movement speed  $v$  of the wave source. If we change  $v$  and examine relations with ratio  $\Delta\lambda/\lambda_0$  and  $v$ , we can inspect Doppler effect. By this method, the actual measurement of  $\Delta\lambda$  and  $\lambda_0$  on the image is not necessary. Because we should find ratio  $\Delta\lambda/\lambda_0$  by the relative measurement on the screen, it is easy. Therefore, it is thought that the inspection of the water waves Doppler effect using a mobile telephone is good for the subjects of research activity and the problem study of the senior high school physics.