

# 音波の反射や干渉を理解するための図法の工夫

(2017 年度阪大・京大入試ミス問題を考える)

立命館慶祥中学校・高等学校 石川 昌司

高校物理では、音波などの縦波を、縦波 $\leftrightarrow$ 横波変換に基づく変位波で扱うことが多いが、そのことにより音の干渉などの問題では深刻な不都合を生じることがある。この問題の解決策として「縦ベクトル（仮称）」なる図法を工夫してみた。さらに、2017 年度の大阪大学と京都大学の入試問題をこの図法で扱うことで、その有用性を検証した。

**キーワード** 音波、密度波、変位波、縦ベクトル、反射、干渉、入試ミス

## 1. はじめに

2018 年 1 月から 2 月にかけて、大阪大学と京都大学で前年度の物理の入試問題にミスがあったことが発表され、関係者に衝撃を与えた。2 つの大学で出題された該当の問題を見ると、どちらの問題も、ひとつの音源から出た音が 2 つの異なる経路を伝わった後に再び出会うとき、音がどうなるかを問う問題であった。筆者は、かつて、このような音波の干渉問題では、一般的に高校物理で指導されている縦波 $\leftrightarrow$ 横波変換に基づく変位波の描像での説明を安易に試みると事実を見誤る危険性があると警告したことがある<sup>1)2)</sup>。残念ながら、大阪大学のミスも京都大学のミスも、その落とし穴に完全にはまっていた。

上の文献にも書いたが、このような誤りを避けるための最良の方法は、音波を変位波ではなく密度波——圧力波でも同じだが本稿では密度波という名称で統一する——で扱うことなのだが、現行の高校物理の教科書では、密度波は極めて限定的にしか扱われない。それゆえ、教師や生徒が、音波を密度波で自然に扱えるようになるには、もう少し時間がかかると思われる。そこで、密度波に至る過渡的な扱いとして、音波の反射や干渉を正しく理解するための図法を工夫してみた。

なお、この図法による説明は、2018 年 1 月に札幌日大高校の 3 年生総合進学コース化学選択者 11 名と、2018 年 4 月に立命館慶祥高校 3 年生 S P コース物理選択者 22 名を対象に試したところ、どちらの学校の生徒にも特に問題なく受け入れられたことを申し添える。

## 2. 縦ベクトル（仮称）

音波は言うまでもなく縦波である。そこで、縦波が伝わる経路に沿って、変位ベクトルの向きが等しい連続した点の集合の線分に変位と同じ向きをもたせたものを、

新たに「縦ベクトル（仮称）」として定義する。(図 1)

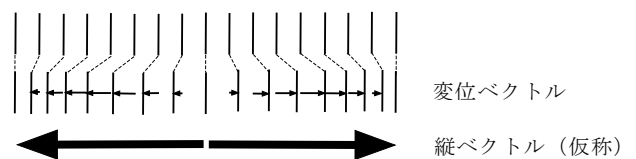


図 1 縦波の縦ベクトル表示

この「縦ベクトル」は、基本的には長さが半波長の真っ直ぐな有向線分であるが、媒質の境界では曲がったり、切断されたりするものとする。

以下に、縦波が固定端で反射する様子および自由端で反射する様子を縦ベクトルで説明した図を示す。(図 2、図 3)

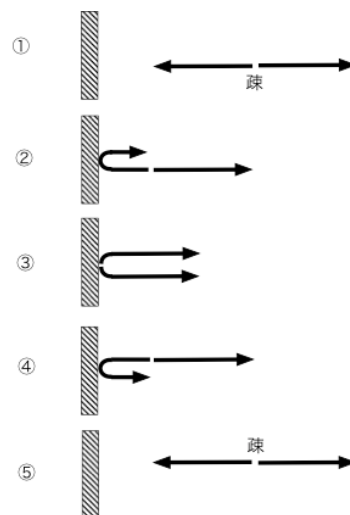


図 2 固定端でのパルス波の反射

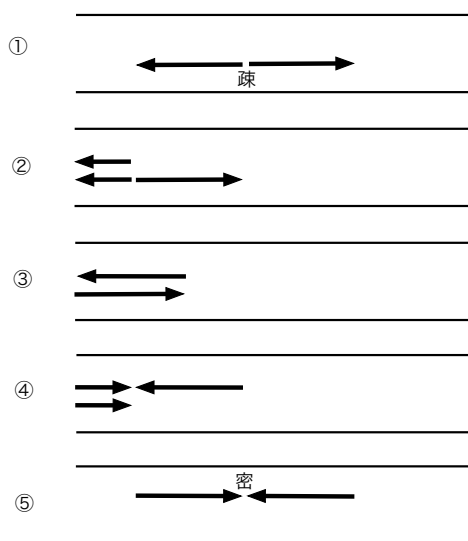


図3 自由端でのパルス波の反射

両図とも、パルス波の反射を、①反射前、② $\lambda/4$ 反射、③ $2\lambda/4$ 反射、④ $3\lambda/4$ 反射、⑤反射後に分けて書き表したものである。

固定端では「疎」は「疎」のまま――同様に「密」は「密」のまま――反射し、自由端では、「疎」は「密」に――同様に「密」は「疎」に――反転して反射することがわかる。

### 3. 大阪大学の2017年度入試問題について

大阪大学の問題の概要は次のとおりである。

「音さを固定壁の近くに置き、壁面に垂直にとったy軸に沿って音さを移動させる。また、壁から遠く離れたy軸上の位置にマイクロフォンを固定する。y軸の正の方向に音さの位置を少しずつ変えながらマイクロフォンで観測すると、音の強さが周期的に変動した。マイクロフォンには、音さからの直接音と、壁で反射してから届く反射音の2種類の音が届く。マイクロフォンに届く音が強くなるときの、音さと壁との距離dと音の波長λとの関係を示せ。必要であれば、自然数としてn (n=1,2,3,...) を用いてよい。」

はじめに、この問題を、密度波の描像で考えてみる。

ひとつの音さから逆方向に同時に出発した密度波が、それぞれ別の経路を通過してマイクロフォンに達する。ひとつの音さから逆方向に伝わる密度波の位相は互いに同位相であるとする。また、「固定壁」での反射では密度波の位相は変化しない。したがって、マイクロフォンに届く音が強くなるのは、音さからマイクロフォンまでの音の道のりの経路差が波長の整数倍になるときである。

故に、正答は $2d = n\lambda$ または  $2d = (n+1)\lambda$  .

次にこの問題を変位波の描像で考えてみる。

「縦ベクトル」の図は次のようになる。(図4)

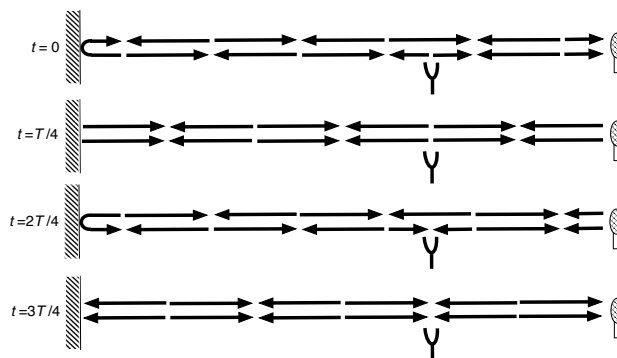


図4 音さからの音を、直接音と壁からの反射音の両方で観測する大阪大学の入試問題を縦ベクトルで表示した図 (d = 2λの場合)

図4では、音さと壁との距離が波長のちょうど2倍の場合を描いた。この条件では、マイクロフォンに届く音は、常に、直接音と反射音の変位の向きが揃う。したがって、重ね合わせの結果、変位の絶対値が大きくなり、強い音が観測されることがわかる。すなわち、正答は $2d = n\lambda$ または  $2d = (n+1)\lambda$  . 当たり前だが、密度波の結論と同じになる。

試しに $2d = (n - 1/2)\lambda$ の場合の縦ベクトルの図を書くと、マイクロフォンの位置では変位波の向きが直接音と反射音で常に互いに逆向きになり、音が弱められることがわかる。

ちなみに、音さと壁の間は定常波になる。定常波では変位の節の位置で音が強く聞こえる。しかし、この問題ではマイクロフォンに届く音は進行波であり、進行波の場合は、合成波の変位の振幅が大きい場所ほど音が強く聞こえる。

ところで、大阪大学では、当初 $2d = (n - 1/2)\lambda$ を正答としていたが、外部からの指摘と内部での調査・検討の結果、誤りを認め、最終的には下記の3つの解答のすべてを正答としている。そのことについて、2018年1月12日に大阪大学が公表した「解説」<sup>3)</sup>には次のような説明がある。「音さには複数の振動モードがある。逆位相振動モードのときの正答は $2d = n\lambda$ または  $2d = (n+1)\lambda$  , 同位相振動モードのときは $2d = (n - 1/2)\lambda$  . (中略) 問題では振動モードを特定していなかった。よって、三つの解答に対しいずれも満点を与えた。」

ここで言う音さの同位相振動モードとは次の図のような振動モードのことである。(図5)

矢印は音さの変位の向きを表している。実際に音さがこのような振動をしていると仮定すれば、それに応じて図4は書き換えられ、正答は $2d = (n - 1/2)\lambda$  になる。

しかし、筆者には、後付の言い訳のように聞こえてしかたがない。

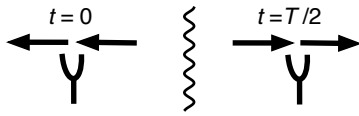


図5 音さの同位相モード

$$L = \frac{c}{2f} \sqrt{1 - \left(\frac{U}{c}\right)^2} \left(n + \frac{1}{2}\right)$$

次に変位波による説明を試みる。

「縦ベクトル」の図を描いてみると次のようになる。(図6)

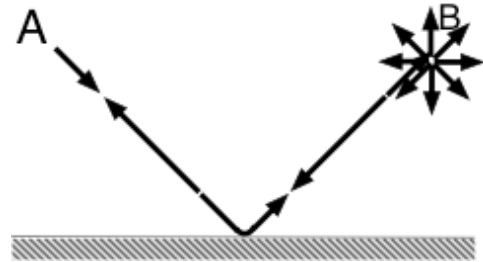


図6 Aを發し壁で反射してBに届く音と、Bのそばに置いた音源からの直接音の干渉

#### 4. 京都大学の2017年度入試問題について

京都大学の問題設定は、大阪大学よりも若干複雑であるが、概要は、次のとおりである。

「音源を載せた車が壁と平行に等速直線運動している。自動車の運転手には、音源からの直接音と壁で反射してから届く音の両方が届く。2つの音が干渉して弱めあうための、車と壁の間の距離 $L$ はいくらか。ただし、音速を $c$ 、車の速さを $U$ 、音源の振動数を $f$ 、 $n$ を負でない整数とする。」

一般に音源や観測者が動いている場合はドップラー効果を考えなければならない。まず、反射音から考える。今、音源である車は同時に観測者でもあるので音源の速度と観測者の速度は同じである。また、壁で反射して車に戻る音波の経路を考えると、車で発した音が壁に向かって進んでいくときの音の向きと車の進む向きがなす角度は、音が壁で反射して車に戻ってきたときの音の進む向きと車の進む向きがなす角度に等しい。このことにより、正味のドップラー効果は生じないことがわかる。もちろん、直接音にもドップラー効果は生じない。したがって、この問題では、静止した音源が発した音を、静止した観測者が聞くと考えても、同じ結果が得られることになる。それゆえ、簡単のためにそのように考えることにする。

2018年2月1日に京都大学から「解説」<sup>4)</sup>が発表されている。この資料全体がたいへん興味深い内容を含んでいるのだが、この中に、音源について、次のような説明がある。「本問題における音源は、『全方位に』という表現でも示されているように、等方的な音波を出す点波源を想定している」。この文から、この音源から出る音波は、密度波でも変位波でも球対称と想定されていることがわかる。

では、はじめに、密度波の描像で考えてみる。

壁 $M$ での反射の際に位相変化はなく、密度波の振動の向きはない。したがって、 $\theta$ を音の進む向きと壁に対する垂直な向きの間の角とすると、 $2L / \cos \theta$ の距離を音が伝わるのに要する時間が音源の振動の周期の半整数倍になるとき、直接音と反射音が弱め合う。故に正答は次の通りである。

前述したとおり、ドップラー効果による振動数変化は起きないので、簡単のため、反射して届く音が発された点 $A$ も、この音が観測される点 $B$ も動かないものとして描いた。

$B$ の位置で、音が弱め合う条件を考える。この問いに答えるのはなかなか難しい。第一に、 $B$ (=観測者)の近くに置かれた音源から $B$ に届く直接音の変位の向きが、この音源が $B$ から見てどの方向にあるかによって全く違ってくるので、合成波の変位の大きさは、両者の位置関係に著しく影響されるが、問題文からはこの位置関係に関する情報が何も読み取れない。第二に、そもそも「音波が弱め合うとき」とは、合成波の振幅が小さい状態を指しているのか、音が小さく聞こえる状態を指しているのか、問題文ではどちらとも明言していない。これらが、その困難の原因である。

ちなみに、京都大学は、当初正答を、

$$L = \frac{c}{2f} \sqrt{1 - \left(\frac{U}{c}\right)^2} (n + 1)$$

と考えていたようだが、外部からの指摘の後、最終的に、この問題は“問題の不備”で解けないと結論し、受験生全員に得点を与えると発表した。

#### 5. おわりにかえて～速度波

音波を扱う方法には、変位波、密度波、速度波の描像のそれぞれがある。

前章までは、変位波と密度波に基づき考察したので、最後に速度波について述べる。

速度波は、変位波と同じくベクトル波の一種であり、音響工学的にはリボンマイク（ベロシティ・マイクともいう）が検出するのは、この速度波であると思われる。速度波は、変位波と同じく、固い壁での反射の前後でベクトルの法線成分が反転する。その理由は気体分子が壁で跳ね返る際に速度の法線成分が反転するからである。速度波は、変位を時間で微分した波であり、同一地点同一時刻における位相が $\pi/4$ 異なること以外は本質的に変位波と同じ性質を持つ。「固い壁で反射するとき変位波の位相は逆転する」という高校物理の常識は、高校生になぜそうなるのかと質問されたときにはたと困った状況に陥る<sup>1)</sup>が、速度波ならばその理由は明快である。教育研究が進めば高校物理の指導に活用できる可能性が開けるかも知れない。

阪大や京大のような入試ミスがあると、物理教育関係者からは音波は扱いにくいという印象を持たれてしまうかも知れない。しかし、筆者は、音波は身近な物理現象のひとつであるから、高校物理の重要な教材であり続けることが望ましいと考えている。入試ミスは本来あってはならないことではあるが、これを貴重な教材として議論し、より教材の理解を深めるきっかけになれば、よい教訓として未来につなげることができるだろう。物理教育を豊かで活力に満ちたものにするためには、できるだけタブーをつくらないことがよいと信じている。

なお、本稿の内容は既発表の文献<sup>5)</sup>に加筆し、再構成したものである。

## 文 献

- (1)石川昌司：音波の反射の指導で気になっていること，物理教育 VOL.52 NO.1，日本物理教育学会，2004
- (2)石川昌司：音波の指導で気になっていること，物理教育研究 VOL32，日本物理教育学会北海道支部，2004
- (3)大阪大学：平成 29 年度大阪大学一般入試(前期日程)等における理科問題（物理）[3]A の解説，2018
- (4)京都大学：平成 29 年度京都大学一般入試における物理問題 III (4) の解説，2018
- (5)石川昌司：縦波の伝わる経路に沿って『縦ベクトル』を書く図法の工夫～2017 年度阪大・京大入試ミス問題を考える，北海道の理科 No.61，北海道高等学校理科学研究会，2018，[http://www8.plala.or.jp/stoneriver/ronbun/TATE\\_vector/TATE\\_vector.pdf](http://www8.plala.or.jp/stoneriver/ronbun/TATE_vector/TATE_vector.pdf)