

高校物理における音波の解説

2018年1月12日 京大理 佐々真一

はじめに

高校生「音波が壁にぶつかったら固定端反射して・・・」

大学の先生「いや、音波は自由端反射で密度の位相はとばないよ」

高校生「はい、密度は、「疎は疎に、密は密に」反射するので位相はとびません・・・」

大学の先生「いや、だからそれを自由端というのであって・・・」

高校生「壁にぶつかるのだから固定端で・・・」

二人「いったい、あなたは何をいっているのですか？」

ネット上や実生活でこういう齟齬を見聞きする機会が結構あった。このノートでは、高校物理の教科書を参考にしながら、高校物理における音波の用語と考え方の解説をしたい。

音波の記述 - 何の波 ? -

音波とは、媒質（例えば、空気）の「密度のむら（疎密）」や媒質中の粒子の変位が伝搬する波のことをいう。密度の濃淡があれば、それに応じて圧力の濃淡が生じるので、密度の波は圧力の波とも考えられるし、単位時間当たりの粒子変位は速度なので速度の波とも考えられる。このように、音波といっても、その実態はさまざまであり、密度波、圧力波、変位波、速度波などを考えることができる。「音波」というのはそれらの総称のように使われている。

音波の生成 - 音源 -

空間のある一点で密度の時間変化を強制的に与える装置がある考える。「点音源」とは通常このような装置のことである。空間のある一点で何かを小さく振動させて変位の時間変化を強制的に与える装置もありえる。このようにして、外部的な装置によって生み出された、(ある点での)密度の時間変化や変位の時間変化が空間的に伝搬していく。音波の形は、音源での時間変化で決まる。例えば、密度を時間の関数として周期的に変動させる装置の場合、その密度変化が周囲に（1次元空間なら左右対称に）一定速度で伝搬していくので、密度波は空間座標の関数として周期的になる。

音波の伝搬 — 速度、密度、圧力の循環 —

音源から生成された「波」が一定速度で一定の向きに伝搬する。2次元空間や3次元空間で考えるなら、源からありとあらゆる方向に等しく音は伝搬するが、簡単のために、1次元空間だけを考える。一定速度で伝搬するだけだが、その仕組みは簡単ではない。まず、ある点において、後方の粒子の速度が前方の粒子の速度よりも大きいとき、渋滞が生じて密度が増える。密度が増えると圧力は増える。そして、ある点において、後方の圧力が前方の圧力より大きいとき、その点での速度が増える（加速する）。こういう風に、波の伝搬は、速度の空間変化⇒密度の時間変化⇒圧力の時間変化⇒圧力の空間変化⇒速度の時間変化⇒速度の空間変化という風に、速度、密度、圧力がぐるぐると循環しながら、その影響が伝搬していく。ここで、速度と書いているのは、単位時間あたりの変位のこと、教科書の変位と同じものだと考えてよい。したがって、速度の波と変位の波の形は同じである。ある場所での密度の時間変化がその場所での圧力の時間変化を導くことから、密度の波と圧力の波も波の形は同じであることがわかる。しかし、速度の空間変化が密度の時間変化を導き、圧力の空間変化が速度の時間変化を導くことから、密度（あるいは圧力）の波と変位（あるいは速度）の波は異なる形になる。音源で周期的な時間変化が生成されている場合には、空間的には半波長ずれる。

音波の壁での反射 — 言葉をめぐる混乱 —

音波が壁にぶつかる時の様子は、伝搬に比べると遙かに簡単である。壁にぶつかった粒子はそのまま跳ね返るだけである。つまり、壁で速度は反転する。（それ以外の壁を考える必要は全くない。）この極めて簡単なことに関して混乱しているのは、音波の実態が、変位波だったり密度波だったりするからである。まず、単位時間あたりの変位が速度なので、変位波も壁に入射すると符号を変える。入射波と反射波を合成すると、壁での変位はゼロになっている。変位波で記述すると、壁で変位がゼロにとめられて波の形が時間的に空間的に変化しているように見える。このため「音波は壁で固定端反射する」とよばれる。これは媒質の粒子が壁でぶつかって速度が反転する描像からすると直観的である。

ところが音波には（波の形が違う）もう一つの実態がある。密度波である。密度とは単位体積あたりの質量なので、壁にぶつかって反射したとしてもその値は変わらない。これはこれで直観的である。ただ、変位の符号が反転することと、密度の値が変わらないこととの関係が少し

分かりにくい。壁の近くで密度勾配のある波がぶつかる様子の絵を書くのがいい。密度勾配が正の密度波がぶつかることを考えよう。この密度波の真ん中での変位は正である。(密度勾配が大きい方にずれているはずだから。)ぶつかったところで「速度」を反転させると、変位は負になる。すると、密度勾配が負の波が反射されることになる。これは、密が密に疎が疎に反射されることを意味する。これを図で書いて納得するのは、高校物理の山場のひとつであろうが、5年もすれば完全に忘れるだろう。

さて、音源で周期的に波が生成される場合、変位波の符号の反転は波の位相をパイずらすことに相当する。このため、「変位波は固定端反射で位相がパイずれる」、という言い方もする。ここまでは全く問題ない。しかし、しばしば、「音波は固定端反射で位相がパイずれる」という言い方になっている場合もあるようだ。ここが危険ゾーンである。音波の実態としては、密度波もある。密度波は反射で値が変わらないのだから、しいていうなら、「密度波は固定端反射で位相がずれない」ということになる。このような表現もみかけたし、これはまだ正しい。しかし、さらに、位相がずれない反射として、自由端反射というのがあったから、「密度波は固定端反射で自由端反射する」というと、正しいかもしれないが、何をいっているのかもはや意味不明になる。言葉を語源にまで戻すと、「速度が反転することで合成変位がゼロに固定される壁で密度波が反射されるとき、密度波は自由端反射のように振る舞う」となる。視点が変わっているのである。それなら、いっそ、音波の壁での反射を、「密度波は壁で自由端反射する」とだけ言えばいい。ただし、この場合には、もっとも分かりやすい描像として導入した「音波は壁で固定端反射する」はもはや使えず、「変位波は壁で固定端反射する」と正確に言って区別する必要がある。

さて、言葉が混乱する「危険ゾーン」だけでなく、その近くに完全な間違いがある。「密度波が固定端反射で位相がパイずれる。」というフレーズである。これは「固定端反射」という言葉にひきずられて、危険ゾーンの複雑な言葉を間違っって単純化してしまった例である。物理的な描像ではもちろんありえない。

さらに、やっかいなことに、大学以降では、音波は偏微分方程式と境界条件で記述するので、言葉が完全に変わる。壁での境界条件は、密度や圧力は自由境界、変位や速度は固定境界である。特に、密度波で記述することが圧倒的に多くなり、変位波を使うことはほぼない。そこでは、「音波が固定端反射する」という言葉すら、もはや完全に意味不明になる。

高校物理での音波の扱いについて、何らかの検討が必要なように思うが、そのための資料として(忘れないうちに)整理した。