

# 空気中を音が伝わるしくみ

## — 具体的イメージをともなう小中学校理科指導の視点 —

### Propagation of sound in air

— A viewpoint on science education of elementary and junior high school with picturesque model —

杉村健史, 神田竜也, 畑口紗絵香, 古屋康則, 吉松三博, 仲澤和馬\*)

Takeshi Sugimura, Tatsuya Kanda, Saeka Hataguchi, Yasunori Koya,  
Mitsuhiro Yoshimatsu and Kazuma Nakazawa\*)

岐阜大学教育学部, 理科教育講座 〒501-1193 岐阜柳戸1-1

#### 要 旨

空気中の分子が, その周りの分子との衝突を繰り返し, 音が伝播することは広く知られている。しかし, 空気中の分子どうしの「衝突」を具体的にイメージできるだろうか。そこで, 横波, 縦波, 水面波など, まず「波」について概観した。次いで衝突をイメージするために, 空気の大部分を占める窒素分子の大きさを出発点に, 簡単な計算で得られる分子間の距離が分子の大きさの約10倍であることに着目した。1つの運動する分子を除いて, 他を平均的な位置に固定するというモデルのもとに, 分子が他の分子に衝突するまでに要する距離を求めた。この距離は実測値との間に大きな相違がなく, モデルの有効性を示した。

#### 1. はじめに

音の学習は中学校1年の「身近な物理現象」において行われる。ここでは, 「音はものが振動することによって生じ, 空気中などを伝わる」ことを学習する<sup>[1]</sup>。音は空気中の分子を媒介して伝わるのだが, このしくみを分子レベルで説明させようとする, 的確に説明できる学生は少ない。多くの学生は, 空気中の分子を規則正しく並べて○で描き, 「それぞれの○が順に衝突し, 疎と密のところを伝わっていく」と説明する。このような説明のほとんどは, 「空気ってそんなに『濃い』の?, お互いにほとんど力が働かないのにどのようにして『疎と密』になるの?」という質問で「撃沈」される。

このような説明になる原因の一つとして, 現在の中学校での「音」の学習が「音は波である」ということで結論付けてしまっていることに原因があるのではないだろうか。「音は波である」ということは, その波を伝える媒質(光を除いて)が存在するわけだが, 「波」としてしまうことにより, 水のように密度の高いものや, ばねのように束縛された媒質をイメージしてしまっているのではないだろうか。音の場合, 媒質は空気中に存在する分子である。ある意味で解放された空間で, 空気が「疎」になったり「密」になることをイメージさせることは難しい。空気中の分子の存在様式を具体的にとらえることなく「音は空気を伝わる波である」とすることには, 疑問を持たざるを得ない。その上, 高等学校の教科書の音の伝わり方の項では, まさに「ばねの縦波と同じような疎密波ができる」とされている<sup>[2]</sup>。

では, この際の「ばね」と「音」とをどのように関連付ければよいのであろうか。そして, そのとき分子どうしに作用する力はいったい何なのか。

空気中の分子は電気的に中性ではあるが, 分子どうしがその周りの電子を感じるほど近づくと, 電気的な斥力が働き散乱する。しかし, それほど近づくまでは, 分子間にはたらく力はほとんど無視でき, 分子はほぼ空気中を飛び交っているだけに過ぎない。音は, 音源での物体の振動で力を受けた分子が, その周りの分子に衝突して, さらに衝突された分子がまたその周りの分子に衝突することが繰り返されて伝わっているのである。しかしここで, 「スカスカ」な空気中の分子どうしが衝突することは, イメージできるだろうか。

そこで本稿では, 空気中を音が伝わるしくみを中学生や高校生が具体的イメージを持って理解できるように解説してみたい。これは, 中学校, 高等学校の理科指導のみならず, 小学校第4学年で培う

\*) TEL:058-293-2246 (e-mail:nakazawa@gifu-u.ac.jp)

「粒子的な見方」に関する単元において、空気の状態を理解する上で役立つものとする。

## 2. 波の種類

本稿で取り上げる「音」は縦波である。これ以外に高等学校までに扱う「波」は、横波および水面波、また特殊な例として電磁波（光）がある。まずこれらについて概観しておく。

### 2-1 横波と縦波

横波は、媒質が波の進行方向に対して垂直に単振動して、波として連動していく現象である。横波における半波長ごとの媒質の振動が、1周期を $T$ として $1/4$ 周期ずつ変化するようすを図1に示した。ギターなどの楽器のピンと張った弦やひもの振動、後述する電磁波（光）や地震で発生するS波などが横波である。これに対し縦波は、媒質が波の進行方向に水平に振動してできる疎・密な部分が伝わる。図2には、やはり縦波における媒質が、 $1/4$ 周期ごとに位置を変えるようすを示した。音波や地震で発生するP波が例として挙げられる。

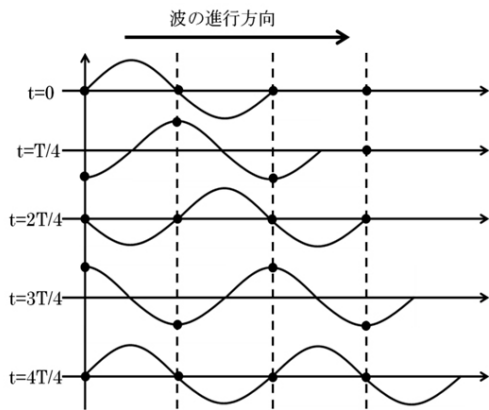


図1. 横波の媒質の振動

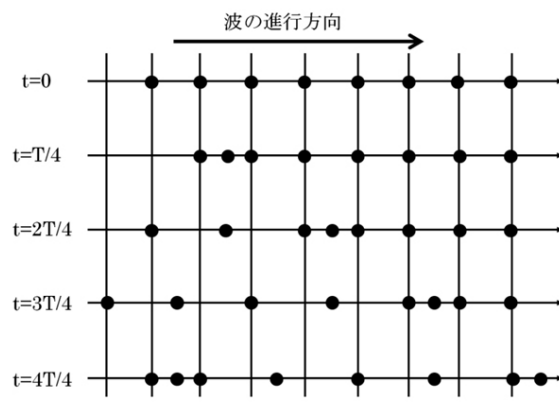


図2. 縦波の媒質の振動

### 2-2 水面波

水面波は、実際に波を起こして水槽の横から観察すると横波のように見えるため、横波であると言われることがあるが、厳密にいうと水面波は縦波でも横波でもなく、双方の振動を合成した波である。

では、水面波の媒質はどのように運動しているのだろうか。水面波の媒質の位置が、 $1/4$ 周期ごとに変化するようすを図3に示した。各媒質は、波の進行方向を含む鉛直面内での円運動を行っているのがわかる。この円運動は、前述の横波および縦波の振動の合成であると理解できよう。図4は、水槽に浮き玉を浮かべて15枚/secで撮影した画像である。この画像からも媒質が円軌道になっているのがわかる。

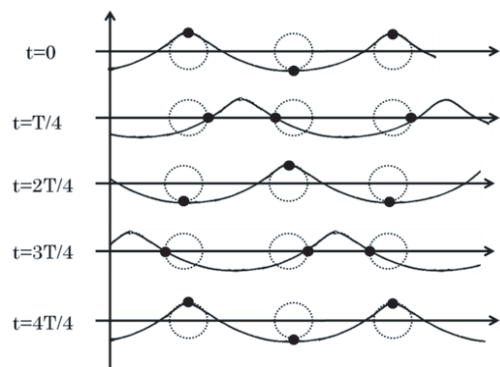


図3. 水面波の媒質の動き

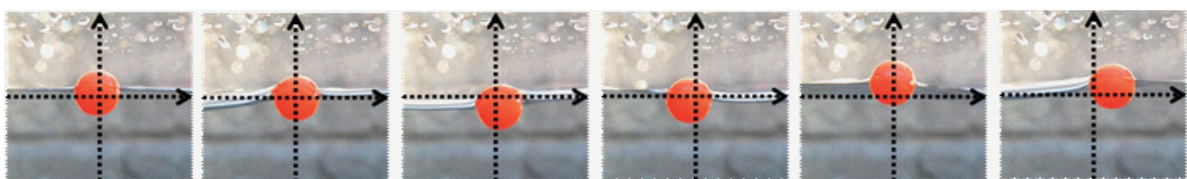


図4. 水面波の媒質の動き (実写)

### 2-3 電磁波（光）

電磁波は、その進行方向に垂直に電場と磁場が振動するが、その振動を伝える「媒質」はない。日常、我々が目にするものは、その物体から放出された光の、電場の成分が強く影響するといわれている。ラジオやテレビなどの「電波」は、電場だけの成分でできているのではなく、「電磁」波である。この電磁波については、別に詳しく述べるのでそちらを参照いただきたい<sup>[3]</sup>。

### 3. 分子レベルで見た音の伝播

中学校学習指導要領では、「音は物体の振動によって生じ、その振動が空気中を伝わること、音の大小や高低は、初温帯の振動の振幅と振動数に関係することを見いださせることがねらいである」とされている<sup>[1]</sup>。この概要は、図5のように示される。すなわち、音源が右方に運動中に空気中の分子に衝突すると、分子は右方へ加速され、逆に音源が左方へ運動中に衝突した分子は減速する。加速された分子は右方にある分子に勢いよく衝突し、衝突した分子は減速し、衝突を受けた分子はやはり右方へ加速する。分子が衝突する付近は分子が「密」なところ、減速した分子が残る付近は分子が「疎」なところとなる。分子が「疎」なところは、左方からくる分子による衝突を受け、「密」な状態へと変化する。このようにして伝わる音が、最終的には鼓膜を振動させ、「音」として我々が認識することになる。

以上の論理に基づいて、音の伝播を分子レベルで考察する。

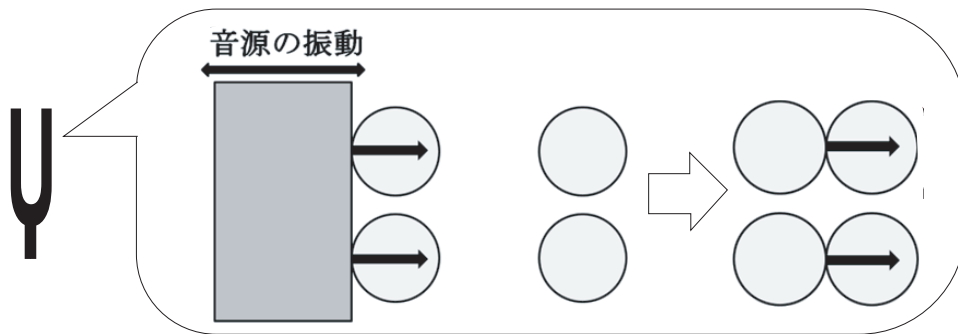


図5. 音源を起点とする空気中の分子による音の伝播。右方の衝突した部分は「密」となる。図2も参照のこと。

#### 3-1 空気中の分子の存在比と窒素分子

空気中の分子の存在比を表1に示す。これらの分子以外に、比率は小さいが、ネオン、ヘリウム、クリプトン、一酸化炭素、水素、オゾンなどが存在する。いずれにしても、空気中では窒素の割合がその大半を占めているので、これ以後の空気中の分子の衝突に関しては、窒素分子の大きさを基準として議論する。

窒素分子は原子2つからなる（化学式： $N_2$ ）ことにより、その大きさは、2つの原子を通る軸上の最も長いところか、あるいは単なる剛体球として平均的な大きさを考えるかで、分子サイズとして異なった値を採用することになる。以下では後者を採用し、“剛体球”の窒素分子の“直径”を $0.41\text{nm}$ <sup>[5]</sup>として議論をすすめる。

表1. 空気中の分子の存在比<sup>[4]</sup>

気体の種類	存在比(%)
窒素	78
酸素	21
アルゴン	0.93
二酸化炭素	0.032
ネオン	0.0018

#### 3-2 空気中での分子分布モデルと平均自由行程

窒素分子どうしの衝突を考えるために、空気中では窒素分子が平均的な位置に均一に存在し、運動しているのは1個だけという、単純化したモデルを採用する。

まず、標準状態 (0 °C, 1 気圧) で 1mol の気体中には、 $6.02 \times 10^{23}$  個の窒素分子が存在することから、その分子間距離は、

$$\left( \frac{1000l}{22.4l} \times 6.02 \times 10^{23} \right)^{\frac{1}{3}} \approx 3.0 \times 10^8 \text{ 個/m}$$

$$\frac{1\text{m}}{3.0 \times 10^8} \approx 3.3 \times 10^{-9} \text{m} = 3.3\text{nm}$$

と推定できる。窒素分子の直径が 0.41nm であることから、図 6 に示すように分子間距離は分子の直径の約 10 倍の距離があることになる。つまり、“動かない” 窒素分子どうしの間には、約 10 個分の窒素分子が入る“隙間”が存在する。

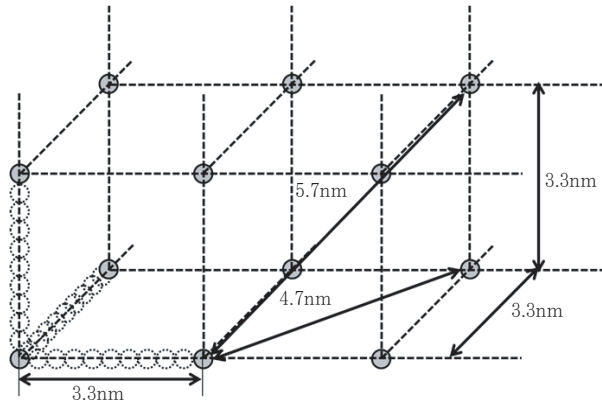


図 6. 標準状態での窒素分子の分布

この隙間を、運動している 1 個の分子が他の分子と衝突せずに移動できる距離は、如何ほどであろうか。分子が一度も衝突せずに運動できる最も長い距離 ( $L_{\max}$ ) は、図 7 のように動くときに得られる。この距離は

$$L_{\max} = \sqrt{3.3^2 \times 3} \times 10 = 57 \approx 60\text{nm}$$

となる。最も短い距離は 3.3nm であり、衝突せずに運動できる平均的な距離は数十 nm 程度となる。

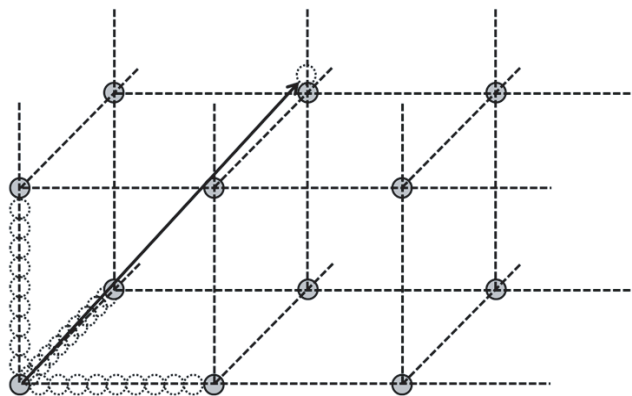


図 7. 運動する分子が衝突せずに動く距離が最長となる場合

気体分子が他の分子と衝突せずに進むことのできる距離の平均は、平均自由行程と呼ばれる。この平均自由行程  $L$  [m] は、圧力  $P$  [Pa]、温度  $T$  [K] および分子の直径  $D$  [m] とすると、

$$L = 3.11 \times 10^{-24} \times \frac{T}{PD^2} \text{ [m]} \quad \text{.....①}$$

という経験式で表される<sup>[6]</sup>。標準状態の窒素分子に当てはめると  $L = 50\text{nm}$  となり、本稿で設定した

モデルの結果と大きなずれはない。このことは、設定したモデルが分子の衝突による音の伝播の説明に有効であることを示している。

### 3-3 音速と温度の関係

空気の温度を高くすると、音の伝播の速さはどうなるであろうか。温度が高くなると、空気中の分子の運動が激しくなる、すなわち分子の運動エネルギーが上昇する。 $n$  個の原子で構成された分子の運動エネルギー  $E$  [J]は、分子の質量を  $m$  [kg]、気温を  $T$  [K]とすると、

$$E = \frac{(2n+1)}{2} \times kT = \frac{1}{2}mv^2 \quad \dots\dots\dots ②$$

で表される。ここで、 $v$  [m/s]は分子の速さ、 $k$  はボルツマン定数 $1.38 \times 10^{-23}$  J/Kである。温度と分子の速さが大いに関係していることが分かる。

一方、温度が高くなると、式①に示すように平均自由行程が長くなる。式①および②より、平均自由行程は温度に比例している ( $L \propto T$ ) のに対して、分子の速度は温度の平方根に比例する ( $v \propto T^{1/2}$ )。したがって、分子の速さの増大とともに平均自由行程が増大することは、周りの分子への単位時間当たりの衝突回数の減少を生み、その結果として温度上昇とともに音が速く伝播するものと考えられる。

本稿のモデルでは、運動する分子を1個としているために、温度と衝突回数との関連を示すことはできないが、空気中の音速  $V$  [m/s]と温度  $T$  [°C]との関係は、

$$V = 331.5 + 0.6T \text{ [m/s]}$$

で与えられることが知られており、温度が高くなると音速も速くなる。

## 4. まとめ

空気中の音の伝播を、具体的にイメージできる分子分布モデルを提示して考察した。このモデルでは、空気を構成する分子の中から、代表的な窒素分子を用いた。標準状態では、窒素分子どうしの間隔(隙間)は、窒素の大きさの約10倍程度であることが、簡単な計算から得られた。次に運動する分子は一つで、他は平均的な位置に静止しているとして、隙間をうまく通って他の分子に衝突せずに運動できる距離を考察した。その距離の最大値は約60 nmであり、経験式から得られる平均自由行程と大きく異なるものではないことが分かった。このモデルでは、単位時間当たりの分子の衝突回数などを議論することはできないが、空気中の分子どうしの衝突で説明される音の伝播を、具体的にイメージしながら理解するには有効である。空気中の小さい分子どうしがどうして衝突などできようか、と考えると、大いに利用できるモデルである。

## 参考文献等

[1] 「中学校学習指導要領解説『理科編』」, 平成20年9月 pp.23-26.  
 [2] 高等学校「物理 I」, 東京書籍, 平成16年2月発行, p.68; ここでは、音の伝わり方について次のように記述されている。「空気が音波の進行方向もしくは逆方向に動くとき、空気が圧縮されて密度が大きくなると、引きのばされて疎になることができる。空気の疎密が交互に現れることにより、ばねの縦波と同じような疎密波ができる(図1)。これが音波である。」そして注釈として、「音波は横波として空気中を伝わることはできない。それは媒質である空気が波の進行方向に対して垂直(波面に平行)に動いたとしても、そのずれを元に戻す力(復元力)がはたらかないからである。」とある。進行方向にも復元力はないはずなのに、どのように疎密な部分ができるのだろうか。  
 [3] 「光の作られ方」, 畑口紗絵香, 神田竜也, 杉村健史, 古屋康則, 吉松三博, 仲澤和馬, 岐阜大学教育学部研究報告(自然科学)第36巻, 2012年3月, pp.11-17.  
 [4] 「理科年表 平成15年(机上版)」国立天文台 p.85

- [5] 「理科年表 平成15年 (机上版)」国立天文台 p.137, 窒素原子のファンデルワールス半径 (0.15nm) と窒素分子の原子間距離 (0.11 nm) から, 0.41 nmと推定した。
- [6] 株式会社シンクロン; <http://www.shincron.co.jp/technical/pdf/03-1.pdf>より