

伝わる現象である。例えば、水面の波（図 1-2 の表面波）、音波、光があげられる。波動を伝えるものを**媒質**という。波動は媒質そのものが移動するのではなく、媒質で表された形つまり**パターン**が移動する現象である。

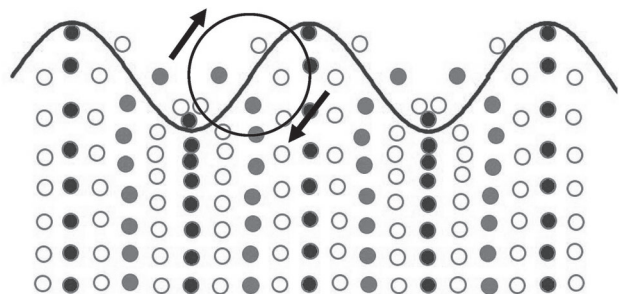


図1-2 表面波（動画m1-3^[4]）

音と風を比べてみよう。ろうそくの炎を口の前において大声を出しても炎は消えない。しかし、ふっと風（息）を送ると消える。大声は媒質である空気の波であり、それに対して風は、空気そのものの移動である。

表面波の**動画 m1-3**を見てみよう。図の上部の赤色曲線が水面に現れる表面波すなわち媒質の表面のパターンを表している。この波の山や谷の部分に注目すると、それらが右から左へ移動していることが分かる。しかし、媒質を表す丸の並びの先端すなわち波面を見ると、それらは、図 1-2 の上部に示した円のように、その場で円運動をしている。

波動は媒質そのものの移動ではないので、例えば、海の波の力を利用した**波力発電**というのは、簡単そうでじつは難しい。波の進行方向の力は物を押し続けられないから、そのままでは発電に使えない。媒質の動きをうまく力に変える工夫が必要である。

音波は粗密波で縦波

音波は、空気などの弾性の性質を持つ物体（弾性体）を**媒質**（伝達する物）とする**粗密波**である。**弾性**とは、バネのように、力によって形や体積に変化を生じた物体が、力を取り去ると再び元の状態に回復する性質である。**粗密波**とは、媒質の密度が粗になる部分と密になる部分ができ、それが波になったものである。音波は、空気だけでなく水中や金属中も伝わる。

粗密波を図 1-3 に示す。図の下に粗密がそれぞれ薄くまたは濃く示されている。図の上の方には粗密をグラフで示してある。上の方ほど密で、下の方ほど粗である。グラフの横軸は位置を表し、縦軸は気圧を表す。音波は、大気圧を基準にして、プラス・マイナスに上下するわずかな圧力の変動分である。音によるこの圧力変化を**音圧**という。この図の圧力変化の尺度はだいたい図式化してある。ふだん聞いている音声の音圧は、大気圧の約 1 千万分の 1 である。

音波は進行方向に振動しているので**縦波**と呼ばれる（図 1-4）。**動画 m1-1**を見てもらいたい。丸の列で示した媒質を見ると分かるように、密度が密になったり粗になったりしている。媒質はその場で矢印方向に振動している。それは、丸の列の動きを見れば分かる。動画では**粗密のパターン**が赤の曲線で表されている。曲線では上の方が密のところ、下の方が粗のところである。粗密のパターンが右から左へ移動していることが分かる。

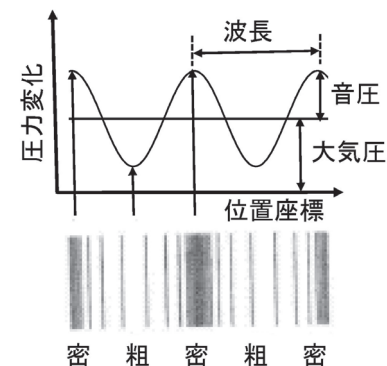


図1-3 粗密波

松尾芭蕉の聞いた音

伊江島タッチウの頂上で手をたたき、音を録音した。比較のため自宅室内で同様に録音した。録音した音の波形を図1-9に示す。横軸は時間で、長さは0.5秒である。(音1-1)が頂上での音、(音1-2)が自宅での音である。音を聞いてみよう。どのように聞こえるだろうか。

タッチウの頂上での音は、防音室で聞いた音とそっくり聞こえる。音が短く、すぐ消える。自宅室内のものは聞き慣れた音である。この2つの図を見比べると、聞いた感じのとおり、頂上の音は短いことが分かる。すなわち残響がほとんどないのだ。室内の音は明らかにそれより長い。

普段、私たちは室内の音に慣れている。残響のない音は聞く機会があまりない。このような音は屋外では体験できるが、たいてい周囲の雑音のため、室内の音との違いに気づかない。違いを知るには屋外の静かな環境が必要である。普段楽器を弾いている人は、屋外の音と室内の音の響きの違いを知っている。合唱をする人は、山では、他のメンバーの声がよく聞こえるように、皆で輪になって歌う。

芭蕉が聞いたのがこの音であったとすれば、「岩にしみ入る音」の実体が音響学的に明らかになったと言える。

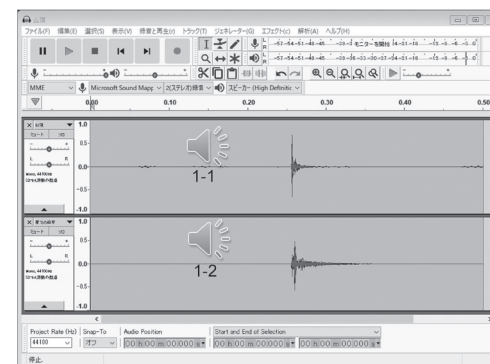


図1-9 伊江島タッチウの頂上での拍手音（上）と室内での拍手音（下）

コラム 1-2

静けさの音 ～音が無いとシーンと聞こえるのか～

読者は、まったく音の無い静かな状態を体験したことがあるだろうか。私は、幼いころ石垣島で夜中に起きたとき、生まれて初めてこれを経験した。音がまったく無いと何かが聞こえてくるのか。

都会では防音室と呼ばれる実験室でこれを体験することができる。防音室は、外部から音が入らないように鉄板の壁で囲われている。壁の内側には吸音材が張られている。壁に達した音は、ほぼ完璧にそこで吸収される。反射音がほとんどないということだ。

反射音のない世界は、ずいぶん非日常的だ。圧迫感さえ感じられる。

まったく音が無いとき、たいていの人には「シー」というような雑音が見えてくる。音が無いと「しーん」と聞こえるのだ。私はこれを静けさの音 (sound of silence) と呼んでいる。

これは物理的な音波ではなく、耳の内部の雑音であり、生理的な音と

した正弦波それぞれの時間方向のずれのことだが、図では位相がゼロになっている。

図 2-5 右の図のようなスペクトルが与えられると、これから逆に、左上の図のような周期信号の波形を再構成することができる。これがフーリエの証明したことである。

波形とスペクトルの例

波形とスペクトルの関係を実感できるアプリとして Composit がある。これを使った結果をいくつか示そう。このアプリでは、波形を音データにして聞くこともできる。

波形を表す図の横軸は時間 (Time) であり、それが分かるように「 $\rightarrow t$ 」と示す。また**スペクトル**の横軸は周波数 (Frequency) であるので「 $\rightarrow f$ 」と示す。以後多くの図でこのように明示してあるので、図が波形であるのかスペクトルであるのかをしっかりと区別してもらいたい。

図 2-6 は、図 2-5 の波形をこのアプリで表示したものである (音 2-7)。図の上方にスペクトル、下方に波形が示されている。スペクトルの振幅の値は、スライド式で変えられるようになっており、そのスライドの下に振幅の数値も現れる。これを操作して図 2-5 右のスペクトルを作ると、図 2-5 左上の波形が現れる。

図 2-7 にスペクトルを操作して作った**方形波**^{ほうけいは} (四角形のような波の繰り返し、音 2-8) を示す。図のスペクトルのところをみよう。この波形は、基本周波数の奇数 (1, 3, 5, 7) 倍の周波数を持つ成分波だけで作られていることが分かる。図 2-8 には、偶数 (2, 4, 6) 倍の周波数を持つ成分波だけで作ることができる**三角波** (三角形のような波の繰り返し、音 2-9) を示す。音を聞いてみると、この 2 つは、音の高低は同じだが、音色が違って聞こえることが確認できる。これが国語辞典で調べた「音色の (2)」の意味である。

スペクトル



2-7

波形

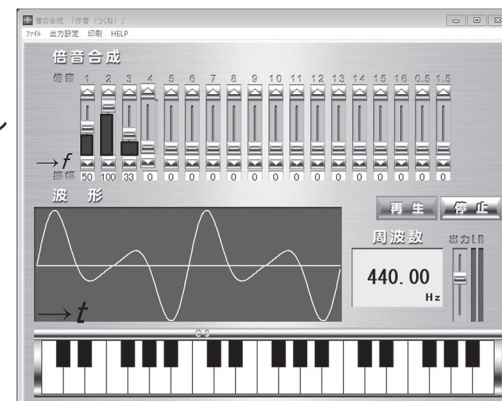


図 2-6 図 2-5 の波形とスペクトル

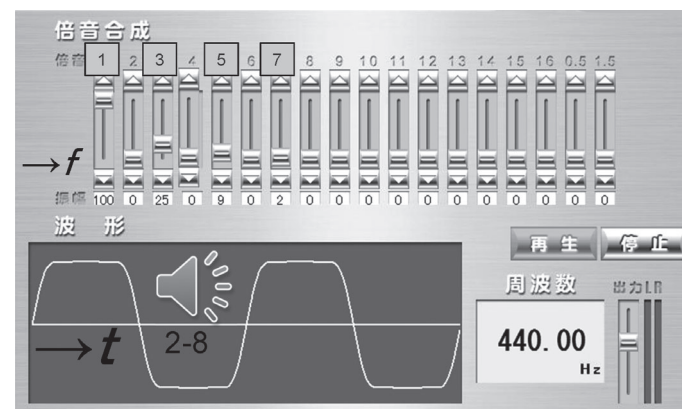


図 2-7 方形波

フーリエが示したように、どのような形の周期信号の波形もこのようにして作ることができる。

スペクトルを変えて、**いろいろの波形**の音を作った。スペクトルと波形を図 2-9 に示す (音 2-10) (音 2-11) (音 2-12) (音 2-13)。聴き比べてもらいたい。聞いた感じは、音の大きさ・高さ・音色のうち、何が同じで何が

琉球音階

3-24



律音階

3-25



陽音階

3-26



陰音階

3-27



図3-11 琉球音階と日本音階

日本の伝統的な音階はテトラコードの2番目の音がひとつだけであり、その音をどれにするかで音階が決まる。その採り方は半音単位で考えると4つしかない。図3-11のピアノの鍵盤を見ると分かる。2番目の音をミにしたものが琉球音階だ。レにしたものは律音階だ。ほかにはレ#とレbがある。それぞれ陽音階（民謡音階）と陰音階（都節音階）になる。

試聴してもらいたい。律音階（音3-25）は、雅楽・声明みやこぶしなど中世以前に成立した音楽で多用されている。聞いてみると古い時代が思い浮かべられる。陽音階（音3-26）は、日本の五音音階のうち1オクターブ内に半音をまったく含まないものだ。私には民謡の調べが感じられる。陰音階（音3-27）は、近世邦楽で最も支配的な音階だ。私には純日本的な京都のイメージが浮かんでくる。

琉球音階は、他の日本音階とだいぶ違うように聞こえる。だが、その説によれば、日本の音階体系を補完するために必要不可欠な存在なのだ。

琉球文化と日本文化の一体感を感じさせる理論だ。

言語に関する日本と琉球の一体感については、8章で説明する。

エコーがかかった歌声、心地よいのはなぜか

カラオケで歌うとき、多少エコーをかけたくなる。エコーをかけると歌がうまく聞こえるような気がするからだ。これはどうしてだろうか。カラオケのエコーの効果については、スペクトルと音階の考えを利用して説明することができる。

エコー（反響）^[12]とは、音波が障壁にあたり、反射して再び耳に達する現象で、こだまのことである。同様の用語で、残響^[13]がある。これは、音源が振動をやめた後も、室内の壁などへの反射によって、引き続いて聞こえる音である。残響時間は、音圧レベルが60dB減衰するのに要する時間であり、これが短いほど音の明瞭度が高い。残響は、主としてエコーが何度も起こってできる。

コンサートホールなどでは残響時間が長い方がいいと言われる。会議室などでは残響時間が短い方がいい。このことは人工的にエコーを作って確かめることができる。

図3-12に示すように、同じ時間遅れ（エコー）のある話し声とオーケストラの音（楽音）をコンピュータで作った。時間遅れは0.1秒と0.2秒にした。0.2秒のものは右に置いた。これらの音を原音と聞き比べてみよう。

話し声（音3-28）は、エコーの音が混じっているので聞き取りにくい（音3-29、音3-30）。これは、体育館でスピーカーから流れる話し声などを聞いて知っている人も多いただろう。ところが楽音（音3-31）はまるでエコーが無いかのように調和して聞こえる（音3-32、音3-33）。楽器音の中からエコーを聞き取るのは難しい。信じられないほどの違いである。これはどうしてだろう。

そのわけは、これまでの議論から、次のように考えられる。オーケストラなどの音楽の音では、音階の音を使っているのだから、エコーで遅れてやってきた音と現在の音が重なっても濁らないからだ。現在の音とエコーがハーモニーを作っているとも言える。

摩擦音、破擦音、破裂音

摩擦音、^{はざつ}破擦音、破裂音の物理的要因を一気に知ることができる不思議な例をここで紹介しよう。日本語の子音の分類（図4-2）をもう一度見てみよう。この中で、破裂音のところを横に見ていくと調音位置が同じもので有声音と無声音のペアがある。これらのペアの間で有声音と無声音の違いとして感じられるのは、上述のようにVOTの違いによるということが分かった。

図4-2の縦軸は調音様式の違いを表している。それでは、調音様式が異なると子音音素の特徴はどのように変わるのだろうか。子音の長さだけで音素が変化する興味深い例を示す。この例は、「シーサー」(/siisaa/、沖縄の屋根獅子のこと)という単語にも現れる [ʃi] (シ) の音であり、図4-6の(音4-11)～(音4-15)に示す。

それぞれ聞いてみよう。最初の(音4-11)は [ʃi] (シ) である。これの子音部を半分にした音を、(音4-12)に示す。選択部を白く塗った部分で示している。これを聞いてみると [tʃi] (チ) に聞こえる。子音部をさらに短くし半分にした(音4-13)は [ti] (ティ) と聞こえる。さらに短くした(音4-14)では、上の破裂音で考察したように [di] (ディ) となる。さらに短くして子音部がなくなった(音4-15)は、[i] (イ) に聞こえる。ただし、これらの音は微妙なので、このように再生できないパソコン等もある。また、文字を見ながら聴くと、見えたとおりに聞こえるようになる。

図4-2の「日本語の子音の分類」を見ると、これら [ʃ] [tʃ] [t] [d] は、調音位置がほぼ同じで、調音様式が異なることが分かる。調音様式の違いによって母音開始までの時間が違う。母音開始までの時間の違いで有声音と無声音の違いが現れることは、前節で述べた。ここでは、**摩擦子音、破擦子音、破裂子音**の違いもこの長さにあるということが分かった。しかも**破擦音 [tʃ] の長さ**が、破裂音 [t] と摩擦音 [ʃ] の中間であるというのは興味深い。破擦音は破裂音と摩擦音が同時に発声されたものだからだ。

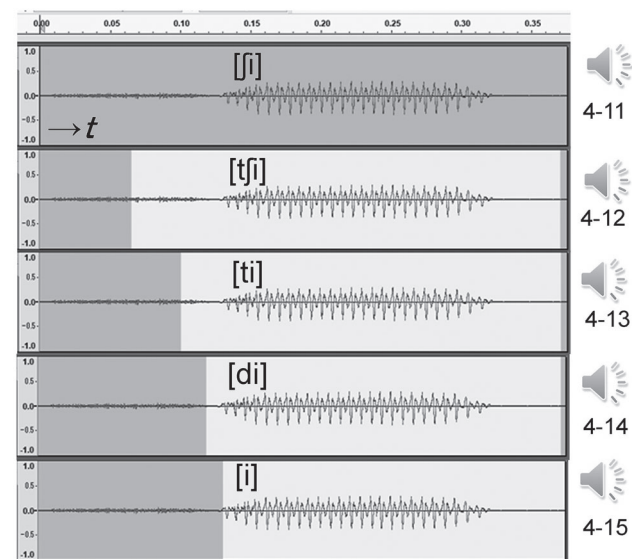


図4-6 摩擦音、破擦音、破裂音

なお、子音の開始時点が破裂性の音に聞こえるのは、これらの実験音では、音声の始まりにおいて無音から急激に音が始まるからである。

モデル構成的研究法

本書ではモデルということばがよく出てくる。科学の分野で**モデル**^[11]とは模型のことを指している。特に、実際の対象がそもそも最初から分かっていないとき、それはかくあるであろうと理論的に想像して構成されたモデルを**構成モデル**という。太陽系のモデル、原子模型などは、この種のモデルである。

モデルを作って研究を進めることは古くから行われてきた。これを**モデル構成的研究法**という。特に、コンピュータが使用されるようになって、