

## ■音の3要素の心理的・物理的側面

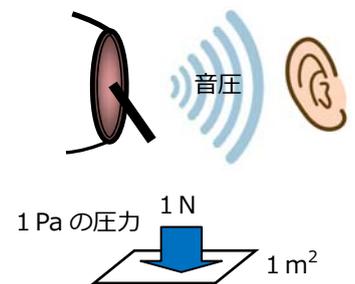
音は「大きさ」「高さ」「音色」という3つの要素で規定され、これらは音の3要素と呼ばれています。このレポートではこれら3要素の心理的・物理的な側面に迫ってみることにします。

### 【1】音の大きさ・・・物理的には音圧と周波数、心理的には人間の聴覚感度

#### ●音圧(Pa)レベル・・・基準となる音圧からの比較レベル値

・太鼓を強く叩けば「大きな音」が、弱く叩けば「小さな音」がするように、空気の圧力の大小変動の度合いにより大きな音や小さな音となって聞こえますね。音は鼓膜に圧力をかけて振動させ、その結果人間は音を感じるわけですが、この音の圧力を「**音圧**」と呼んでいます。音圧が高い場合は大きな音、逆に低い場合は小さな音として聞こえます（「音の雑学」参照）。ただし、音圧が2倍になれば音の大きさも2倍に感じるかという経験上そういうものでもありません。

・音圧はPa（パスカル）を単位として表されます。1 Pa というのは1 m<sup>2</sup>の面に1 N（ニュートン）≒0.1kgの力が働いている状態です。耳の感度は非常に高く、例えば0.0002Pa（0.02gの力！）程度の非常に小さな音圧の音も“ささやき声”として聞き取ることができます。音圧1 Paの音ともなると大変大きな音ということになりますね（もっとも、音の大きさは音圧だけで決まるわけではなく音の周波数にも関係します。このあたりのお話はあとの方でできます）。



※1 気圧は約 1000 ヘクト Pa=10 万 Pa なので、0.0002Pa は 1 気圧の 100 億分の 2 という極めて小さな大きさですね。

・成人が聞き取ることのできる音を「**最小可聴音**」といいますが、その音圧はなんと 0.00002Pa

(20μPa)\*とわずかなもので、一方、飛行機などの爆音の音圧は 20Pa 程度ですから、倍率にして

少なくとも 100 万倍程の広範囲な音を聞きとる性能を人間の耳は持っていることになります。

・さて、音の大きさを比較表現する場合、最小可聴音の音圧を基準としてその何倍かと表現すればよいと考えられますが、そうすると飛行機の爆音のような大きな音は 100 万倍の音ということになり、ゼロばかりが並んで煩わしく、不便極まりないことになります。そこで登場するのが**ウェーバー・フェヒナーの法則**で、これは「人間の感じる感覚強度は刺激量の**対数**に比例する」というものです。この法則を活用して音の大きさの比率尺度を設定しています。この比率尺度を「**音圧レベル**」といい、次式で定義されます。(P<sub>L</sub> : 音圧レベル)

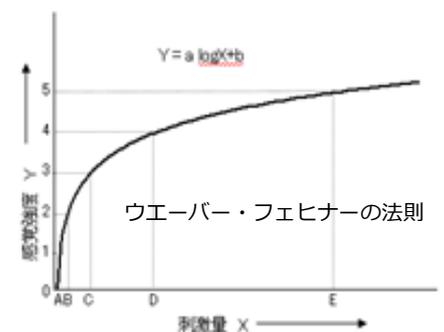
$$P_L = 20 \times \log \frac{P}{P_0} = 20 \times \log \left( \frac{\text{対象音の音圧}}{\text{最小可聴音圧}} \right) [\text{dB}]$$

最小可聴音圧は P<sub>0</sub>=20μPa ですね。また、単位のデシベル (dB) は、一般的にある物理量を基準となる物理量との比の常用対数によって表したものです。音圧レベル 40dB の音であれば

	音圧 (Pa)	倍率	音圧レベル (dB)
最小可聴音	0.00002	1 倍	0
囁き声	0.0002	10 倍	20
図書館の音	0.002	100 倍	40
普通の会話	0.02	1,000 倍	60
混雑した町	0.2	10,000 倍	80
飛行機の爆音	20	1,000,000 倍	120

※通常なんとか我慢ができる最強の音の音圧でも 2 Pa 程度といわれています。

\*最小可聴音の周波数は 1kHz



$$40 = 20 \log \frac{P}{P_0}, \quad \frac{P}{P_0} = 10^2$$

となつて、基準音圧 ( $20 \times 10^{-6} \text{Pa}$ ) の 100 倍の音圧 ( $20 \times 10^{-4} \text{Pa}$ ) ということになりますね。上の式を使って  $P$  と  $P_0$  の大きさの関係と音圧レベルの関係を求めると次のようになります。

P が $P_0$ の 1 倍だったら :	$20 \times \log 10^0 = 20 \times 0 = 0 \text{dB}$
P が $P_0$ の 10 倍だったら :	$20 \times \log 10^1 = 20 \times 1 = 20 \text{dB}$
P が $P_0$ の 100 倍だったら :	$20 \times \log 10^2 = 20 \times 2 = 40 \text{dB}$
P が $P_0$ の 1000 倍だったら :	$20 \times \log 10^3 = 20 \times 3 = 60 \text{dB}$
P が $P_0$ の 10000 倍だったら :	$20 \times \log 10^4 = 20 \times 4 = 80 \text{dB}$
	⋮

**Q1>** 元の音から 4dB 上げると音圧は何倍となるか？

A1> 元の音の音圧を  $P_A$ 、4dB 上げた音の音圧を  $P_B$  とすると

$$4 = 20 \left( \log \frac{P_B}{P_0} - \log \frac{P_A}{P_0} \right) = 20 \log \frac{P_B}{P_A} \quad \therefore \frac{P_B}{P_A} = 10^{1/5} = 1.58 \text{ 倍}$$

**Q2>** 会話の 60dB と図書館の 40dB との音の大きさの差はどれくらいか？

A2>  $60 - 40 = 20 \text{dB}$  なので、会話の声は約 10 倍となります。

### ●音の強さのレベル・・・基準となる音エネルギーからの比較レベル値

・「音圧レベル」のほかに「**音の強さのレベル**」があります。「音の強さ」は単位時間あたりに単位面積を通過する音のエネルギー (単位:  $\text{W}/\text{m}^2$ ) のことで、音圧  $P$  の 2 乗に比例します。W はワットです。

・音の強さもそのまま音のエネルギーで表すことは少なく、聞き取れる最低の基準音の強さ (エネルギー) との比を常用対数で表現し、これを「**音の強さのレベル**」と呼んでいます。

音の強さのレベルを  $I_L$ 、対象の音の強さを  $I$ 、基準音の強さを  $I_0$  とすると  $I_L$  は

$$I_L = 10 \times \log \left( \frac{I}{I_0} \right) = 10 \times \log \left( \frac{I}{10^{-12}} \right) \text{ [dB]}$$

と表されます。基準音のエネルギー  $I_0$  は  $10^{-12} \text{ [W}/\text{m}^2]$  と求められています。

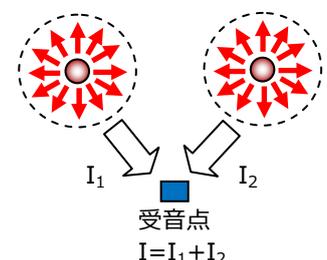
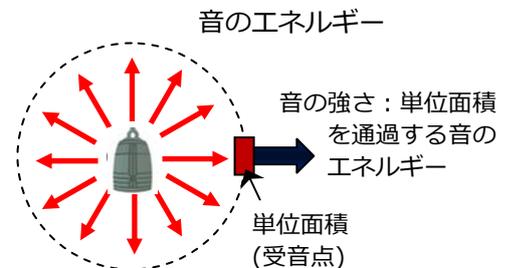
また、音の強さレベル  $I_L$  と音圧レベル  $P_L$  の関係は  $I \propto P^2$  であるので

$$I_L = 10 \times \log \left( \frac{I}{I_0} \right) = 10 \times \log \left( \frac{P^2}{P_0^2} \right) = 20 \times \log \left( \frac{P}{P_0} \right) = P_L \text{ [dB]}$$

となり、単位面積をとる面を受音点とすれば実用上同じになります。

・さて、音の強さ  $I_1$ 、 $I_2$  の 2 つの音源があり、受音点での合成音の強さレベル  $I_L$  を求めてみましょう。  $I = I_1 + I_2$  なので、 $I_L$  は

$$I_L = 10 \times \log \left( \frac{I}{I_0} \right) = 10 \times \log \left( \frac{I_1 + I_2}{I_0} \right)$$



となります。例えば 60dB と 80dB の 2 つの音源を合成した場合は

$$60 = 10 \times \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right), \quad \therefore \frac{I_1}{I_0} = 10^{\frac{60}{10}}, \quad 80 = 10 \times \log\left(\frac{I_2}{I_0}\right) \therefore \frac{I_2}{I_0} = 10^{\frac{80}{10}}$$

なので、合成音の強さのレベル  $I_L$  は

$$I_L = 10 \times \log\left(\frac{I_1}{I_0} + \frac{I_2}{I_0}\right) = 10 \times \log\left(10^{\frac{60}{10}} + 10^{\frac{80}{10}}\right) = 80.04 \text{ [dB]}$$

となります。2 つ以上の音源の場合も同様に計算できます。

Q3> 80dB で吠える犬が 3 匹で吠えたら何 dB になるか？

A3> 約 85dB

$$I_L = 10 \times \log\left(3 \times 10^{\frac{80}{10}}\right) = 84.77 \text{ [dB]}$$

## ●ラウドネスとラウドネスレベル・・・心理量

### 1)ラウドネス・・・人間が感じる音の大きさ

- 人間が感じることができる、いわゆる可聴音は音圧で 20μPa~20Pa、周波数では 20Hz~20 kHz の範囲といわれています(20kHz 以上は超音波と呼ばれます。ちなみに犬の場合はおよそ 40Hz~60kHz)。  
一般に人間の聴覚は 1kHz~5kHz で感度が高く (4kHz 付近で最高感度)、赤ちゃんの泣き声やいろいろな環境音などに多く含まれる周波数はこの領域にあります。これよりも周波数が低くても高くても聴覚の感度は低下するので、音の音圧が高くても低周波数や高周波数では小さい音として聞こえることとなります。また、音圧を一定として、たとえば周波数 3kHz で大きく聞えた音は周波数を 30Hz に落とすと小さな音として聞こえることとなります。

- さて、前節で音の強さを「音圧」という“物理量”で表しましたが、人間が聴覚で感じる“心理量”とは必ずしも 1:1 に対応しているわけではなく、同じ周波数において音圧が 2 倍になっても心理量である聴覚の感覚は、音の大きさが 2 倍になったとは感じません。音の大きさを人間の耳に感じる**感覚量(心理量)の大きさを表したものを「ラウドネス」と呼び、ソーン (sone) という単位で表します。**1 ソーンというのは

**1 sone : 「周波数 1kHz、音圧レベル 40dB の純音\* (基準音) の大きさ」**

とされます。音の大きさが 2 倍に感じるまで音圧レベルを上げれば、この音は 2 ソーンとなり、逆に大きさが半分に感じられるまで音圧レベルを下げれば 0.5 ソーンということとなります。

- ラウドネスを  $L$  で表すと 1kHz・純音のラウドネスは次式で与えられます。

$$L = 2^{\frac{(P_L - 40)}{10}} \text{ [sone]} \quad (P_L : \text{音圧レベル[dB]})$$

1kHz の純音では、 $P_L=40\text{dB}$  の時は  $L=1\text{sone}$ 、 $P_L=50\text{dB}$  では  $L=2\text{sone}$ 、 $P_L=60\text{dB}$  では  $L=4\text{sone}$ 、また  $P_L=30\text{dB}$  では  $L=0.5\text{sone}$  となります。このように 1kHz の純音では音圧レベルが 10dB 大きくなるとラウドネスは

1kHz 純音 音圧レベル	ラウドネス (L)	基準に対す る倍率
30dB	0.5sone	0.5 倍
40dB	1sone	基準
50dB	2sone	2 倍
60dB	4sone	4 倍
80dB	16sone	16 倍
100dB	64sone	64 倍

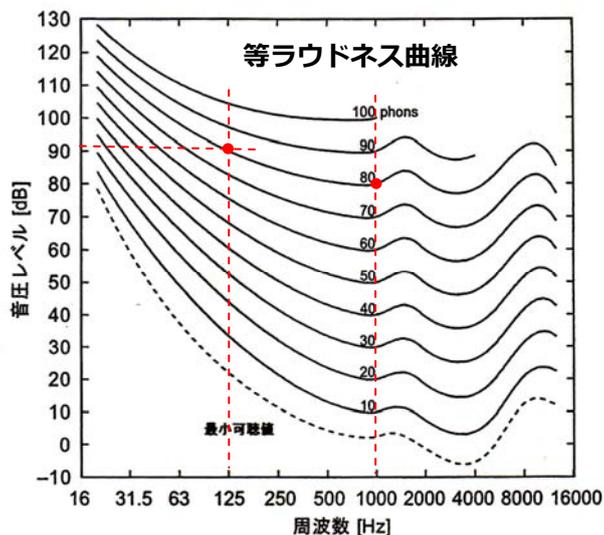
※音圧レベルが 10dB 増加するごとに音の大きさは約 2 倍になる。

2倍(2sone)に、つまり音の大きさが2倍になったように感じます。逆に音圧レベルが10dB低くなるとラウドネスも半分(0.5sone)となり、音の大きさが半分になったように感じます。このような傾向は他の周波数においてもほぼ同じ傾向を示しますが、低周波数になるにしたがって音圧レベルとラウドネスの比率が大きくなり、20Hz付近では音圧レベルを10dB大きくするとラウドネスは約4倍になります。

\*純音とは正弦波で表される音で、いわゆる倍音などを含む単音とは異なります。

## 2)ラウドネスレベル・・・1kHzの純音と同じ大きさに聞こえる音の大きさ

- ラウドネスレベルというのは周波数1kHzの純音と同じ大きさに聞こえる音の大きさのことで、単位としては「フォン」(phon)が使われます、例えば、1kHz・音圧レベル60dBの音と同じ大きさに聞こえる音の大きさを(その音の周波数の値にかかわらず)60フォンといいます。
- さて、音圧レベル(dB)を縦軸、周波数(Hz)を横軸にとって、例えば40フォンとなる音の音圧レベルと周波数の交点をプロットしていくと一つの曲線を描きます。このようにしていろいろなフォンの音のdB-Hz曲線を描いたものは右図のようなものになり、これを「等ラウドネス曲線」と呼んでいます(聴感曲線ともいう)。要するに「音の大きさの等高線」です。
- 右図で、例えば80フォンの等ラウドネス曲線に注目してみましょう。周波数1kHzでは音圧レベルが80dBとなりますが、周波数を125Hzまで落とすと音圧レベルを約90dBにまで上げないと同じ大きさに聞こえないことが分かります(低周波数側では聴覚の感度が悪いため)。
- 最小可聴音のカーブを見ると、最小可聴音圧 $P_0$ の周波数は約1kHz程度であることが分かります。



## [2] 音の高さ・・・物理量：音の周波数 心理量：音の高さ（感覚量）

### ●高い音と低い音・・・周波数が上がると音は高くなるが。。

- お寺の梵鐘はゴ〜とお腹に響くどっしりとした低音を響かせますが、仏前のリンはチ〜と鋭く高い音を響かせますね。梵鐘にもよりますが、京都妙心寺の梵鐘の周波数は大体129Hz、仏前のリンはその約10倍の1.4kHz程度らしいです。
- さて、八長調の音階の周波数を右の表に示しました。周波数が高くなるほど高い音階になっていることがわかります。そこで、音の高さは周波数によって表せると考えられますが、ここで物理量と感覚量の違いが再び顔をだします。周波数は物理的に定義された「物理量」ですが、「音の高さ」は人間の聴覚が感じとる「感覚量」であるということです。物理量と感覚量のズレはすでに見てきたように両者の関係は単純ではないですね。早い話、2kHzの音は1kHzの2倍の高さの音には聞



八長調音階	周波数(Hz)
ド	262
レ	294
ミ	330
ファ	349
ソ	392
ラ	440
シ	494
ド	523

こえません。したがって物理量である周波数で音の高さを表しても、感覚的にはピンとこないなあ~ということになります。

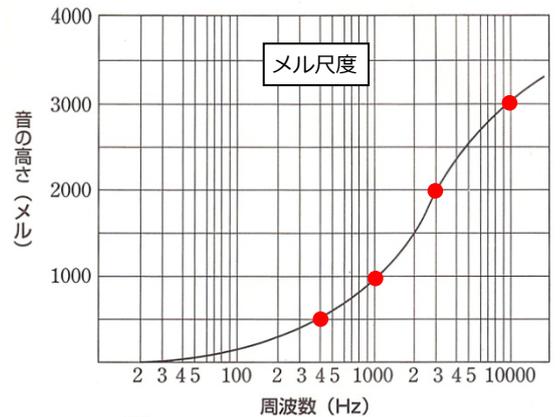
### ●メル尺度・・・音の高さの感覚的スケール

- ・そこで、音の高さを表す**感覚的尺度**として「**メル尺度**」(mel scale)が設定されました (mel という名称は melody からきているとのこと)。

「**音圧レベル 40dB、1kHz の純音を基準音として、その音の高さを 1000 メル**」

と定義しています。音の高さが基準音の 2 倍に感じられるまで周波数を上げれば、この音は 2000 メル、逆に高さが半分に感じられるまで周波数を下げれば、この音は 500 メルとなります。

- ・メル単位の音の高さと周波数の関係を図示したものが右のグラフです。このグラフから基準音の 2 倍の高さである 2000 メルの音の周波数は 3kHz、基準音の半分の高さである 500 メルの音の周波数は 400Hz であることがわかります。周波数で比較すると、これらの音の周波数は基準音の周波数(1kHz)の 2 倍や半分には一致していません。このように、感覚量と物理量のズレは周波数が高くなるほど大きくなり、基準音の 10 倍の 10kHz の音でも音の高さは基準音の高々 3 倍の高さに感じるといった具合です。



<日常音の周波数帯域>

	20	30	100	200	500	1k	2k	5k	10k	20kHz
日常会話										
小鳥の鳴き声										
犬の鳴き声										
車の騒音										
ピアノの音										
太鼓の音										
クラリネット										

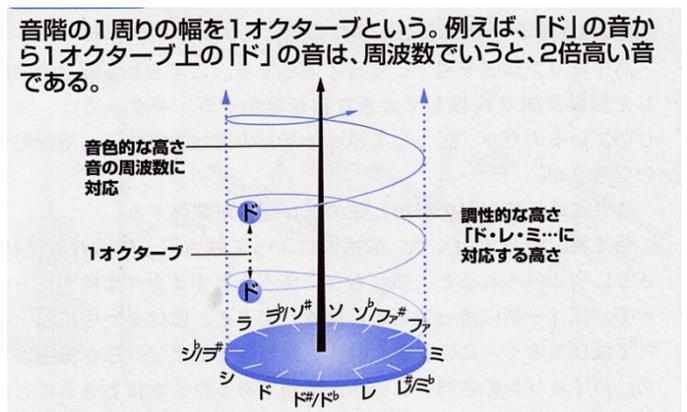
(<http://a011w.broadband.ip/qpa/e/on05.htm>)

音の高さ	倍率	周波数	倍率
500 メル	0.5 倍	400Hz	0.4 倍
1000 メル	1.0 倍	1000Hz	1.0 倍
2000 メル	2.0 倍	3000Hz	3.0 倍
3000 メル	3.0 倍	10000Hz	10 倍

### ●オクターブと音のらせん

- ・先ほどの八長調の音階の表をご覧ください。表の最初の「ド」の 1 オクターブ上が最後の「ド」で、周波数は 2 倍になっています。**オクターブ**というのは感覚量ではなく、周波数が 2 倍になる音程関係のことで、オクターブ上がるごとに周波数は 2 倍となる**物理量**です。1 オクターブ上の音をもとの音の「倍音」とか「2 倍音」といいますが、これは周波数の関係をいっているのですね。
- ・音階を鳴らしたときドレミファソラシドで音が 1 周したような気がしますね。1 オクターブ上の音は周波数が 2 倍とありますが何か共通点を感じます。これは「**オクターブの類似性**」と呼ばれる現象で、人間の聴覚の特性からきているとのこと。このことは縦軸に音の周波数に対応する音色的な高さをとると、図のようならせんの構造で表せます。らせんの 1 周が 1 オクターブに相当し、らせん上の真上が 1 オクターブ上の音になります。

<音の高さのらせん構造>



※あるひとつの音（主音）を中心に他の音が秩序づけられ従属的な関係をもつことを音楽用語で「調性」という（Weblio 辞書）

### [3] 音色・・・ヒトが感じる音の印象

同じドの音でもギターとバイオリンでは“音色”が違ふことは誰でも経験していますね。音の3要素の3つ目の「音色」は「きれいな音」とか「迫力ある音」というように、ヒトが音を聞いたときの印象を言葉に表した心理的なものですから、「音色」を物理的に説明しろといわれてもその関係は複雑で大変むつかしく、また、わからないことも多くあるようです。

#### ●音色の因子・・・音色を言葉で括ると

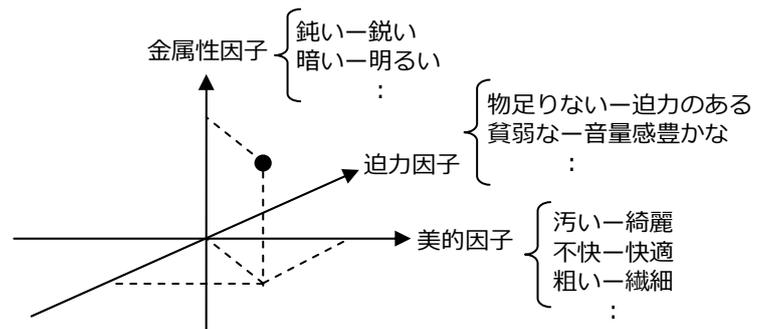
・音色は、音が大きいー小さい、あるいは高いー低いといったような、いわば1次元的な表現で表すことはできません。「明るい音」とか「迫力のある音」「豊かな音」といったように、音色は人が音を聞いた印象で表現されるため、音色を表す表現語は非常に多くあります。言葉の数は無数に近いものの、共通した印象というくりでとらえると、実は次の3つの因子に集約できることがわかりました。それは「**迫力因子**」「**金属性因子**」「**美的因子**」と呼ばれ、印象表現を表す言葉としては次のようなものが代表的です。

○**迫力因子 (迫力あるー貧弱な)**：響く、豊かな、音量感がある、力強い、広がりがある、等

○**金属性因子(鋭いー鈍い)**：鋭い、硬い、柔らかい、明るい、華やかな、軽やか、等

○**美的因子 (快いー不快)**：美しい、快い、潤いがある、情趣豊かな、澄んだ、艶がある、等

・聞いた音の音色はこれら3つの因子が程度の差をもちながら組み合わさったものと考えられますので、右図のような3次元の音色因子空間を考えると、原則的にその座標点で表されることとなります。



#### ●音色因子に関する物理量・・・音圧レベルと周波数

・音色因子と周波数や音圧レベルの物理量との関係は次のようになっています。

**[迫力因子]**・・・主に音圧レベル(dB)と関係し、周波数の影響もあります。周波数が低く、音圧レベルが高くなるほど「迫力のある」音色になり、逆に周波数が高く、音圧レベルが低いほど「もの足りない」音色になります。

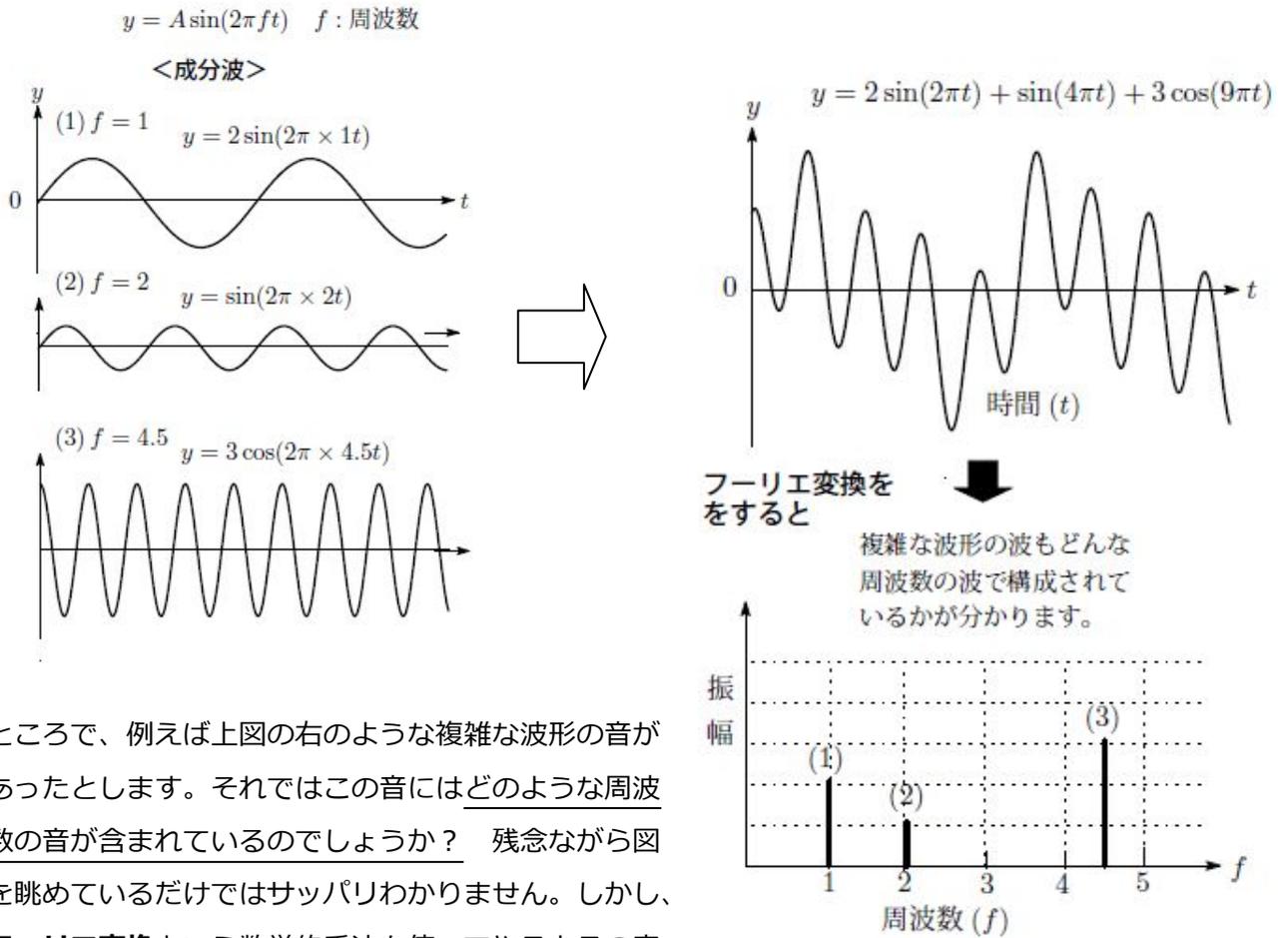
**[金属因子]**・・・主に周波数と関係し、音圧レベルの影響もあります。周波数が高く、音圧レベルが高いほど「鋭い」音色になり、逆に周波数が低く、音圧レベルが低いほど「鈍い」音色になります。

**[美的因子]**・・・物理量との関係は他の因子のように単調なものではなく、1kHz、70dBで最も「きれい」になり、周波数の関数としては山形のカーブを描くようです。

#### ●音色と波形・・・複雑な波形が音色を醸し出す

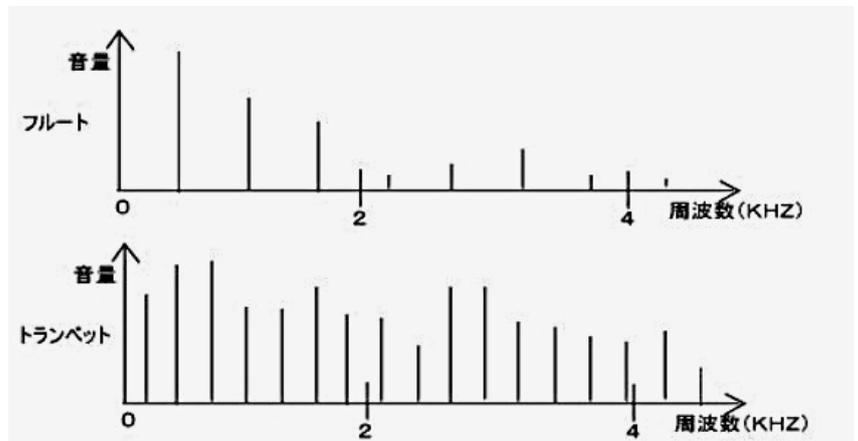
- ・楽器によって音色は異なりますね。例えばバイオリンでもフルートでも「ラ」の音は440Hzですが、明らかに音色は違います。バイオリンは高い倍音をたくさん含みますが、フルートは倍音が少ないなど、楽器によって含まれる倍音が異なります。クラリネットの独特の音色は、3倍、5倍、7倍など、ほとんど奇数の倍音ばかりを含むことからきているといわれています。
- ・音は正弦波で表されますが、実際耳にする音はいろいろな正弦波が重ねあわされた音です。例えば図に

示すような3つの波を重ね合わせると右のような波形になります。実際に楽器の音の波形を見ると非常に複雑な波形をしています。楽器の音色は含まれる倍音によって異なると説明しましたが、言い換えると楽器の音色はどんな周波数の音を含んでいるかということに大きく関係するということですね。



ところで、例えば上図の右のような複雑な波形の音があったとします。それではこの音にはどのような周波数の音が含まれているのでしょうか？ 残念ながら図を眺めているだけではサッパリわかりません。しかし、**フーリエ変換**という数学的手法を使ってやるとその音に含まれる周波数成分が一目瞭然にわかります。実際にやってみると、この音には  $f=1, 2, 4.5\text{Hz}$  という周波数成分の音から構成されていることがわかります。フーリエ変換の数学的なお話はここでは省略しますが、要するにある複雑な波形からどんな周波数の波形が含まれているかを見つける手法と理解しておけばいいと思います。

右図は、柔らかい音色のフルートと鋭い音色のトランペットの周波数成分をフーリエ変換で抽出したものです。柔らかい音は倍音成分が少なく、鋭い音は倍音成分が多く含まれることがわかります。



~ここまでお付き合いいただきまして大変お疲れ様でした~

※参考文献：

- 1) 日本音響学会編 「音のなんでも小辞典」2012.6.1 (講談社)
- 2) 中村健太郎 「図解雑学 音のしくみ」2007.5.10 (ナツメ社)
- 3) 岩宮眞一郎 「よくわかる最新音響の基本と仕組み」2007.11.15 (秀和システム)

## ■おまけ： 基準周波数とは

ト音記号の五線譜の中の「ラ」の音の周波数 440Hz を基準周波数といいますが、これも下表に見るようにいろいろ変遷があったようです。

時代	名称など	基準周波数
15～16世紀 ルネサンス時代	ベネチアン・ピッチ	466Hz
17～18世紀 バロック時代	バロック・ピッチ	415Hz
18世紀 バロック時代の後期	ベルサイユ・ピッチ、フレンチ・ピッチ	392Hz
18世紀 ヘンデルによる	ヘンデルの音叉	422.5Hz
18世紀 モーツァルトによる	モーツァルト・ピッチ	422Hz
18～19世紀 古典派時代	古典派ピッチ	430Hz
1859年 フランス政府による	フランス政府によって制定されたピッチ	435Hz
19世紀 ヴェルディによる	ヴェルディ・ピッチ	432Hz
1884年 イタリア政府による	イタリア政府によって制定されたピッチ	432Hz
1925年 アメリカ政府・団体による	アメリカ政府・団体によって制定されたピッチ	440Hz
1939年 国際会議による	ロンドン国際会議によって制定されたピッチ	440Hz
1953年 ISOによる	ISOによって制定された国際基準値	440Hz
20世紀 カラヤンによる	カラヤン・チューニング	446Hz
現在 ウィーン交響楽団、 ベルリン交響楽団など	現在も使われている基準値以外のピッチ	444Hz～448Hz

( <https://acoutis.jimdo.com/acoustics/基準周波数 a-440hz-って何/>)