



課題9 弦の振動と音楽

No.

1. 実験の目的

弦楽器であるギターを題材として自然法則と音楽の関係を理解し、科学と音楽の関係を考察する。

2. 実験方法

< 実験1: 弦の振動 >

弦の長さや張力で音の高さ(周波数)の関係を調べる。

(実験器具)

- ・クラシックギター
- ・メジャー

(実験手順)

- (1) ギターの弦を指で弾き、弦全体の振動の様子をスケッチする。このとき観察できる波を「定常波」と言う
- (2) 糸巻きを回すと、音の高さが変ることを確かめる。このとき張力を大きくすると、音の高さ(周波数)はどのように変化するか。
- (3) ギターのフレットを左手で押さえて弾いてみる。弦の長さを短くすると、音の高さは上がるかどうかを調べる。
- (4) 上記で調べた弦の張力、長さや音の高さの関係は次の式で成り立つ

$$f_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\sigma}} \quad (n=1, 2, 3, \dots)$$

ここで、 f_n は周波数(Hz)、 L は振動する弦の長さ、 F は弦の張力、 σ は単位長さあたりの質量(線密度)であり、 n は自然数である。上記の実験で調べた結果をこの式は矛盾なく説明できるか比較する。

- (5) メジャーで弦の長さを調べ、振動する部分の弦の長さが半分になるように指で押さえて弾き、その時生じる音の高さと、同じ弦を指で押さえないで弾いたときの音の高さとはどのような関係かを調べる。

< 実験2: 音楽と科学 >

・ハーモニク奏法を使って、音階や音色と振動モードの関係を調べる。

(実験器具)

- ・クラシックギター
- ・巻土尺
- ・楽器調律用チューナー
- ・ピックアップアンプ
- ・関数電卓



ここでハーモニック奏法について説明する。ハーモニック奏法とは、ギター
の弦の長さを測り、その半分の長さのところに、左手の指先で軽く触れなが
ら右手でその弦を弾くとクリアな音が出る奏法である。 $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{5}$ 、 $\frac{1}{6}$
の場所でも同様に行うことができて、この奏法を用いると開放弦の倍
音を作り出すことができる。

(実験手順)

(1) 調弦(チューニング)

最初に教科書の手順通りにギターのチューニングを行う。それが終わら
ず第6弦の5フレット目だけを指で押さえてラの音を出して、第5弦(開
放弦)と共鳴することを確認、振動の様子を観察する。また、第5弦目の
7フレット目で強めに弾いたとき、共鳴によって第6弦に生じる振動をエ
スケッチしてよく観察し、スケッチする。またこのときの振動モードはいくつかも調べる。

(2) 振動モード

a. 弦に触れる位置と振動モード

弦長の $\frac{1}{2}$ の位置に触れた場合のハーモニック奏法を行い、弦が1節
(手で触れた場所)の左右両側で振動していることを確認し、スケッチする。また
このときの振動モード n の値はいくつかを定める。またこれを基に弦長
の $\frac{1}{3}$ 、 $\frac{1}{4}$ 、 $\frac{1}{5}$ 、 $\frac{1}{6}$ の位置に触れたハーモニック奏法で生じる振動モ
ード n の値を定める。最後に上記の位置以外に指で触れること
でハーモニック奏法が可能となる場所を調べる。

b. 弦の振動に含まれるモード

ギターを開放弦で弾き、ハーモニック奏法でクリアな音が出た場所
に指で静かに軽く触れ、出る音を確認する。

c. 弦を弾く位置と振動モード

指で弦に触れる位置を弦の長さの $\frac{1}{3}$ の位置に固定し、右手で弦を弾
く位置を変化させて、音が出なくなる場所と最も音が出る場所を探す。
それらの場合の右手と左手の指の位置を画にして、音が出なくなる理由を考える。

(3) ハーモニック奏法と音階

第6弦(Eの音が出る)をさらにゆるめて、より低いド(2C)に調弦し、他の
弦も再調弦する。そして第6弦の $n=2, 3, \dots, 6$ の振動を弦の長さの $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{3}$ 、
 $\frac{1}{4}$ の位置に触れるハーモニック奏法で作る。それぞれの振動の音の高さ
(音名)を決定する。このとき私の班は実験室にあるピアノを利用して
音の高さを調べた。

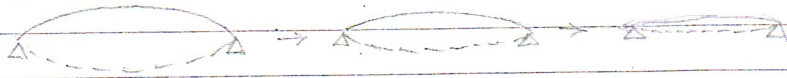


(4) 最終実験

第6弦をド、第1弦をミに再調弦する。次に第6弦で5倍音のハーモニックを弾き(自然音階のミ)、第1弦の開放弦でも弾く(平均律のミ)。2つの音の高さが完全に一致するか調べる。最後に第1弦の調律を変えて上記のように第1弦、第6弦を弾き、2つの音の高さが一致したとき、第1弦の音の高さは当初の平均律ミに比べて、変化の割合はいくら調べる。

3 実験結果

<実験1-(1)>



スケッチをして見て振れ幅は小さくなるものの、この弦全体がほぼ一定の形で振動する様子が観察できた。

<実験1-(2)>

張力が大きくなるで音の高さも高くなった。

<実験1-(3)>

弾く弦の長さが短くなるほど音の高さも高くなった。

<実験1-(4)>

実験1-(2)の張力を大きくすると音の高さ(周波数)は高くなるという結果は式(9.1)でも説明できる。例えば弦の張力をFから4Fにすると振動数 f_n は

$$f'_n = \frac{n}{2L} \sqrt{4F} = 2 \frac{n}{2L} \sqrt{F} = 2f_n \quad \text{となり周波数も高くなる。}$$

また同様に実験1-(3)の結果も式(9.1)で説明できる。弦の長さLを $\frac{1}{2}$ に短くすると振動数 f'_n は

$$f'_n = \frac{n}{2 \cdot \frac{1}{2}L} \sqrt{F} = 2 \frac{n}{2L} \sqrt{F} = 2f_n \quad \text{となり周波数は高くなる。}$$

<実験1-(5)>

開放弦の時の音の高さより、弦の長さが半分になった時の音の高さの方が高いという結果を得た。これは実験1-(4)の後半の結果より弦の長さが半分になると周波数が2倍になる。

<実験1-(6)>

中央で弦をはいた時より端で弦をはいた時の音の方が高かった。という結果を得た。また中央はなめらかな音であつたが端の方は鋭い音があつた。

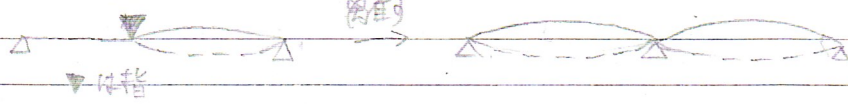
<実験2-(1)>

第5弦の5フレット目を押さえて弾くと第5弦の開放弦と共鳴した。また第5弦の7フレット目を押さえて弾くと第6弦の開放弦と共鳴した。観察した図は左図のようになった。またこのときの振動モードは $n=1$ で基本振動となった。



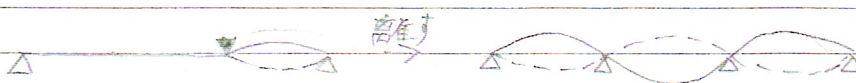


<実験 2-(2)-a>



1/2ハーモニック奏法を行った結果弦が節の左右両側(弾いた反対側)で振動していることを確認がめることができた。また

ハーモニック奏法を行った経過の図を上図のように示した。これから求める振動モードは $n=2$ であることが分かった。また $1/3, 1/4, 1/5, 1/6$ のハーモニック奏法でできる振動モードは上記をもとに予想して考える。例えば $1/3$ を考えると左図のように



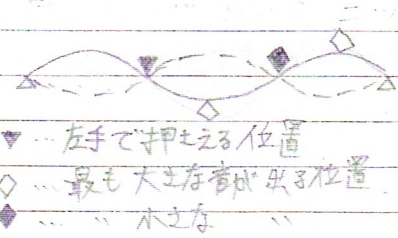
存在を予想でき、それを振動モードは $n=3$ とする。同様に $1/4, 1/5, 1/6$ のハーモニック奏法の

ときの振動モードは $n=4, 5, 6$ と予想できる。また 先に述べたハーモニック奏法以外で可能な場所を調べたところ、弦の $2/3$ の場所のハーモニック奏法で出た音が $1/3$ の場所でのハーモニック奏法の音と同じであることが確認できた。

<実験 2-(2)b>

開放弦でギターを弾いてから、弦の $1/2$ の場所に左指で触れたところ、 $1/2$ でのハーモニック奏法で出た音と同じ高さの音が出たことが確認できた。

<実験 2-(2)c>

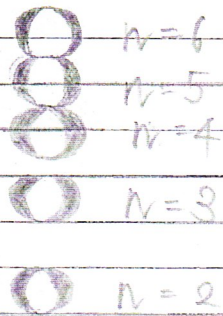
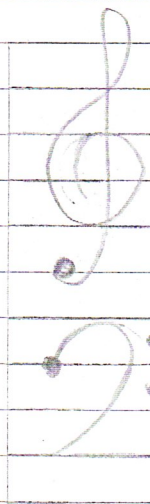


- ▼ ... 左手で押さえる位置
- ◇ ... 最も大きな音がでる位置
- ◆ ... " 木柱 "

弦の $1/3$ でハーモニック奏法を行った結果左図のような結果となった。この理由は腹で振動し音が出るので、左図のように節を振動させても腹が振動せず、音が出にくいからである。

<実験 2-(3)>

それぞれの音の音名を五線上に記録すると



- $n=1 \dots \text{ド} (2C)$
- $n=2 \dots \text{ド} (3C)$
- $n=3 \dots \text{ソ} (3G)$
- $n=4 \dots \text{ド} (4C)$
- $n=5 \dots \text{ミ} (4E)$
- $n=6 \dots \text{ソ} (4G)$

$n=1$ 4 これらの音は和音の構成音である。



<実験2-(4)>

自然音階の三の方が平均律の三よりも高い音が出て、平均律の三の方が低くすばんだということが分かった。そして低くした結果、一致することか、テナーを使って確認できた。

4. 設問

(1) 振動モード $n=1$ のとき 65.4Hz を基準に自然音階のとき倍音で、平均律のとき 2 倍で計算すると下の表のおいになった。また周波数比(平均律/自然倍音)も計算した。

モード	音名	自然音階(倍音) (Hz)	平均律 (Hz)	周波数比 (平均律/自然倍音)
n				
1	ド	65.4	65.4	1.000
2	ド	130.8	130.8	1.000
3	ソ	196.2	196.0	0.999
4	ド	261.6	261.6	1.000
5	ミ	327.0	329.6	1.008
6	ソ	392.4	392.0	0.999

表1: 65.4Hz を「ド」にしたときの自然倍音 ($n=6$ まで) と対応する平均律での周波数

上の表を見ても分かる通り、自然音階と平均律の周波数はドの音以外微妙にずれが生じている。またそのずれは、自然音階の音が大きくなったり小さくなったりと一定のずれではないことも分かる。これらのことから、合奏などで音を合わせたり、和音をつくるのもまっぴらにやりたいなら自然音階、または平均律のみで行った方が良いと言える。

(2) 平均律で「調律された楽器」と、自然音階を和音の中の音に出した場合、上の表のような周波数のずれで「ななり」が生じるから「濁る」音になってしまうと考えられる。

(3) キターを弾く位置の違いで様々なモードの振動が生じる。この組み合わせで弦の振動の周期関数が変わるのであって、モードの種類や割合が違えば当然周期関数の形も変わってくる。このことからたとえ同じ音の高さであっても位置が違えば音に含まれる成分が違ってくるので音色も変わるのである。



5. 考察

実験を通して音楽を科学的に見ると、音階や音色と振動モードの関係は複雑ではあるが、振動を通して全ての楽器にあてはまる普遍性があることが分かった。世界には様々な楽器や演奏があり、他方でその国の人たちの当時の場面(戦争や建国など)で思っている感情や思想がある。それらを音楽の自然科学の普遍性を利用して、様々な音楽形態で表現することによって文化や音楽の多様性が生まれるのである。

音楽がなぜ普遍的でありながらも多様性を持つという矛盾したものになっ
てしまうのか。それは科学が産業革命以降、科学技術として存在しているからと
私は考える。古代から人間は「技術を利用して生活してきた。住居の建て方、食
物のとり方、保存の仕方など、地域によってそれぞれ違っていた。技術は多様性を
持ちながらもその地の人々に「生活の知恵」として使われてきたのだ。しかし、産
業革命が起こると科学という何にも依存しない独立した普遍性のもつもの
を技術として応用し始めると「科学」という位置付けは上記のように
文化に対して矛盾した存在になってしまった。(しかし、普遍的な科
学が技術として文化や生活に介入してくると、生活の知恵としてとても
便利に使うことかできて、近代になると「科学は人間の欲望を応え
ることができるもの」になってしまった。その結果、戦争や民族紛争など
文化にとっぴりと浸りながらも、文化を汚す存在となった。現代では機械
が発達し、機械がほとんどの作業をやりつつある。そうした見えない技
術は「人間の営み」つまり文化を壊れる原因となっている。そのうち科学が
文化を飲み込むか、あるいは19世紀以前のように科学と文化が分離す
る日が近いかもしれない。

参考文献:「文化としての科学/技術」村上陽一郎
岩波出版(2001年)177~(2011/11/7確認)