自然科学総合実験レポート
課題 9「弦の振動と音楽」

[個人情報保護の観点から削除]

[個人情報保護の観点から削除]

表: □正規の授業を受講した
裏: □正規の授業を受講した

1 実験の目的

音楽は、人間の感情や思想を表現する芸術の一形態で、世界中で用いられてきた。表現形態は道具や民族、時代によって異なるが、それらの多種多様な音楽形態のほとんどは五線譜上に表現することができ、飛び飛びの高さの音程を使うという普遍性がある。この普遍性は自然科学の普遍性に由来している。

また、科学的な議論は、比較文化論などの通常「文化系」と分類される学問にも関係がある。そして、文化と自然科学との関係や、社会の中での自然科学の役割を考える際には、科学の普遍性だけでなく科学の適用限界も把握することが必要である。

このような背景から、本実験課題では、まず日常生活に潜む自然科学の普遍性を、具体的な実験と解析を通して、日常のありふれた現象から直感的に理解することを試みる。次に、音楽の多様性と普遍性を具体例として、科学の普遍性と多様性の関係を考察する。

2 実験の原理

今回の実験には、弦楽器 (ギター) を使用した。

はじめに弦の状態と音の高さの関係、弦に現れる振動と倍音について説明する。弦の張力、長さ、線密度と音の高さ (周波数) との関係は、次の式で表されることがこれまでの研究で知られている。周波数の高低は音の高低と一致する。

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

(f_n は周波数 [Hz]、L は弦の長さ [m]、F は弦の張力 [N]、σ は線密度 [kg/m] である。)
ギターでは、フレットを指で抑えることで L を、糸巻きを使うことで F をそれぞれ調節することができる。また、ギターの弦を弾いて出る音は、n がさまざまな値のものが混ざったものであり、その割合が音色を決める。n の値と振動の様子の関係を図 1 にまとめた。

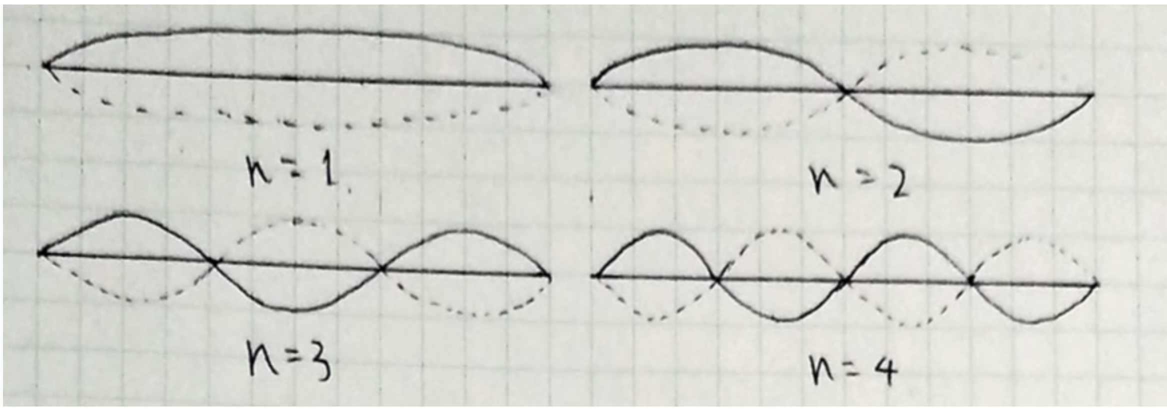

図 1: n の値と振動の様子の関係 ($n = 1$ から $n = 4$ まで)

両端を固定された弦に生じる定常波の空間的な形は三角関数を用いて表現でき、弦の垂直方向への変化の大きさを y、弦の方向を x として、$x = 0$ と $x = L$ を弦の両端とすると、一般に長さ L の弦の振動は次の式で表される。

$$y = y_1 + y_2 + y_3 + \cdots, \tag{2}$$

$$y_n = A_n \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right)\cos(2\pi f_n t) \quad (n = 1, 2, 3, \cdots) \tag{3}$$

A_n は波の振幅、f_n は式 1 の周波数である。振動要素の 1 つ 1 つを n で区別してモードと呼び、$n = 1$ のときは基本振動、$n \geq 2$ のときは倍音と呼ぶ。なお、本レポートではたとえば $n = 2$ のときの倍音を「2 倍音」と呼ぶことにする。なお、$n = 1$ のときの振動数を特に式 2 と 3 からは $x = mL/n$ $(m = 1, \cdots, n-1)$ の位置は定常波の振幅が常に 0 となることがわかり、これを振動の節と呼ぶ。

次にハーモニックス (Harmonics) 奏法という、特定の n の値に対応した倍音を出す演奏法について説明する。弦の一部に軽く触れながら弦を弾き、音を出したら触れていた指先を離す。指を離しても音が残って長く続いていたら、ハーモニックス奏法が成功したと判断できる。この奏法では、弦に指で軽く触れることで、その位置を弦振動の節にしている。この位置が節とならない振動モードは減衰するため、結果として特定の振動モードのみが残ることになる。

続いて、自然音階と平均律について説明する。平均律では、隣り合う音 (半音) どうしの周波数比が $2^{\frac{1}{12}}$ となっている。それに対して、自然音階では隣り合う音どうしの周波数比が有理数になっている (図 2)。

ド	→	レ	→	ミ	→	ファ	→	ソ	→	ラ	→	シ	→	ド
	$\times\frac{9}{8}$		$\times\frac{10}{9}$		$\times\frac{16}{15}$		$\times\frac{9}{8}$		$\times\frac{10}{9}$		$\times\frac{9}{8}$		$\times\frac{16}{15}$	

図 2: 今回の計算に用いた、自然音階の周波数比 (Google Classroom 上の資料より)

最後に、うなりについて説明する。周波数のわずかに異なる 2 つの音を同時に鳴らすことで、周期的に強弱を繰り返す音を聞くことができる。周波数の差がある程度以上になると、うなりとしては認識されにくくなり、全く違う音として聞こえるようになる。2 つの異なる周波数を f_1、f_2 とおくと、1 秒間あたりのうなりの回数 ν は

$$\nu = |f_1 - f_2| \tag{4}$$

となる [1]。

3　実験方法

本レポートでは、たとえば「自然音階の 2E」を「2E(自然音階)」、「平均律の 2E」を「2E(平均律)」と書く。
また、ギターの構造は図 3 のようになっている。

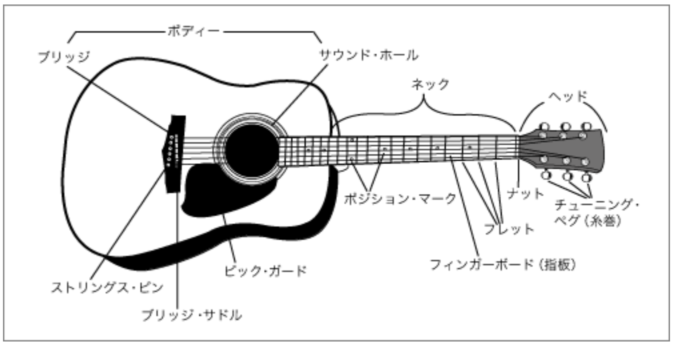

図 3: ギターの部品の名称 出典:[2]

3.1　実験 1 弦の振動

使用器具: クラシックギター、巻き尺
はじめに弦を指で弾き、振動の様子を観察してスケッチした。次に、糸巻きを回すと音の高さが変わるか、変わるとしたら弦の張力をどう変えると音の高さはどう変わるか確かめた。続いて弦の長さを短くするようフレットを押さえたときに音の高さがどう変化するか調べた。

ここで、これまでの実験結果と式 1 を比較して、式 1 によってここまでの結果に説明がつくか検討した。

次に、弦の長さが半分になるよう押さえて弾いたときの音と、弦を押さえず (開放弦で) 弾いたときの音を聴き比べ、式 1 から 2 つの周波数の関係を求めた。なお、弦の長さは巻き尺を用いて測った。

最後に、弦の中央と端を弾いた時の音を聴き比べ、違いを確かめた。

3.2　実験 2 音楽と科学

使用器具: クラシックギター、巻き尺、楽器調律用チューナー (平均律に基づく)、関数電卓、アコースティックギター[1]
はじめに、ギターの弦を開放弦で弾いたときに下表の音 (平均律) が出るように調弦した。

表 1: 開放弦で弾いたときに出るよう調弦した音。なお、2A の周波数は 110Hz であるとする。

第 1 弦	第 2 弦	第 3 弦	第 4 弦	第 5 弦	第 6 弦
4E	3B	3G	3D	2A	2E

次に、正しく調弦されていることを共鳴現象を用いて確かめた。第 6 弦の 5 フレット目だけを押さえて弾き、第 5 弦の開放弦と共鳴することを確認して、振動の様子を観察した。その後、第 5 弦の 7 フ

[1] 受講日にやり忘れた操作があったため、[個人情報保護の観点から削除] に音楽スタジオにてレンタルをして実験を行った。その際、チューナーとしてスマートフォンアプリ「n-Track Tuner」を用いた。

レット目を押さえて弾き、共鳴によって第 6 弦に生じる振動を観察してスケッチ[2]した。また、このとき第 6 弦で観察される振動モードは n がいくつのときに対応するものか考えた。

続いてハーモニックス奏法を用いた実験を行った。
まず、弦の中央に触れた場合のハーモニックス奏法を行い、弦が節の左右両側で振動しているか確かめ、このときの弦に生じている振動モード n の値は何か考えた。次に弦長の $\frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}$ の場所に触れて弾いたハーモニックス奏法で生じる振動に対応した n の値を、これまでの実験から予想した。そして、これ以外にも指で触れてハーモニックス奏法が可能になる場所があるか確かめた。また、ハーモニックス奏法を行う際に弦を弾く位置を変え、音が出なくなる場所と最も大きな音が出る場所を探した。そして、音が出なくなる理由を調べた。

また、音階が成り立つ原理を知るために、ハーモニックス奏法を用いて 1 つの弦に同時に生じている音 (倍音) について調べた。第 6 弦を 2C に調弦し直し、その他 5 本の弦については表 1 の通りに調弦されていることを確かめた上で実験を行った。
まず第 6 弦の $\frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}$ の場所に触れてハーモニックス奏法を行い、チューナーを用いて音の高さを調べた。このとき出た音の音名を記録し、自然音階と平均律の周波数を計算した。これら 2 つの周波数の違いを、第 6 弦の $\frac{1}{5}$ の位置を押さえたハーモニックス奏法で自然音階の音を出したのちに平均律に基づく音を第 1 弦の開放弦を弾いてうなりが聞こえるか調べることで確かめた。[3]。

3.3 追実験 弦を弾く位置と音色の関係

使用器具: 図 4 の装置、スマートフォンアプリ「n-Track Tunar」
図 4 の装置を弦長の $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}$ の位置で弾き、それぞれの位置で弾いた場合の周波数スペクトルを n-Track Tunar で観測した。観測結果を記録するために、スマートフォンの画面を録画した。

4 結果

4.1 実験 1 弦の振動

図 5 は、第 6 弦を開放弦で弾いた際のスケッチである。

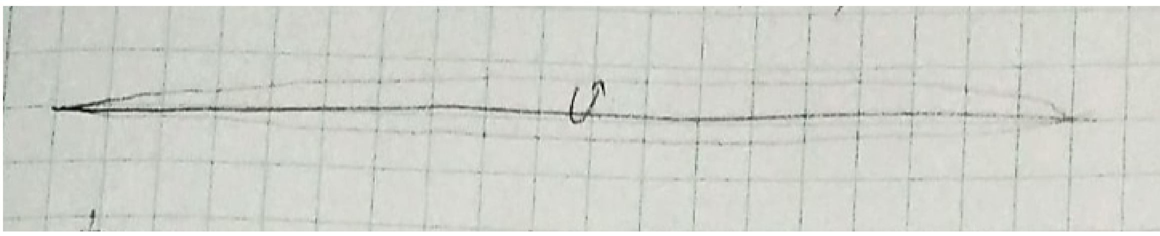

図 5: 第 6 弦 (開放弦) の、振動のようす。定常波がみられた。

[2]受講日にスケッチし忘れたため、後日音楽スタジオで調弦を行った後に同様の操作をしてスケッチした。
[3]受講日に確かめ忘れたため後日音楽スタジオで確かめた。

図 4: アルミニウム製のバットに輪ゴムを取り付け、養生テープで両端を固定したもの。弦長の $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}$ の位置に印をつけてある。

張力を大きくすると音が高くなり、張力を小さくすると音が小さくなった。弦の長さが短くなるようにフレットを押さえると、音の高さが上がった。振動する弦の長さが半分になるよう指で押さえて弾いたときに出た音と、開放弦で弾いたときに出た音を聴き比べたら、同じ音名で1オクターブ違う音であった。また、式1によると、弦の長さが半分になるよう指で押さえて弾いたときの音の周波数は、押さえず弾いたときの2倍である。弦の中央を弾いた音と弦の端を弾いた音を聴き比べたところ、弦の中央を弾いたときのほうがよく響いているように聞こえた。

4.2 実験2 音楽と科学

第6弦の5フレット目だけを指で押さえて弾いたら、第5弦の開放弦と共鳴した。図5と同じように、定常波が発生している様子が観察できた。次に、第5弦の7フレット目だけを押さえて弾いたら、第6弦の開放弦と共鳴した。その様子をスケッチしようと試みたが、肉眼では振動の様子がよく見えなかった。その様子をスケッチすると図6のようになった。このときの第6弦に触れると、弦の中央部分の振動が他の部分に比べて小さかったため、この振動は $n = 2$ に対応すると考えられる。

次に弦長の $\frac{1}{2}$ の位置に触れてハーモニックス奏法を行ったところ、弦が節の左右両方で振動していることが目で見て確かめられた。このとき発生している振動は、$n = 2$ に対応したもので、弦の振動は7のようなものであった。ここで、弦長の $\frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}$ の位置に触れてハーモニクス奏法を行うと、押さえた位置が節になるということと $\frac{1}{2}$ の位置を押さえたときの結果から $n = 3, 4, 5, 6$ に対応した音が出ると考えられる。また、たとえば弦長の $\frac{2}{5}$ の位置に触れた場合も $\frac{1}{5}$ に触れたときと同じ音が出た。

続いてハーモニックス奏法を行う際に弾く位置を変えたところ、弦長の $\frac{1}{4}$ の位置で押さえて行った場合は弦の中央を弾いたときに音がほとんど出ず、弦長のおよそ $\frac{5}{8}$ の位置で最も大きい音が出た。それぞれの場合の左手の位置と右手の位置は図8のようになっている。

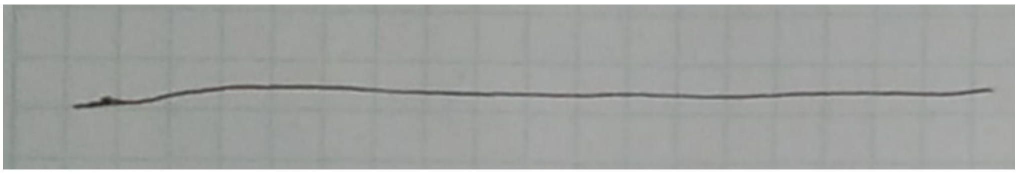

図 6: 第 6 弦の共鳴のようす。肉眼では振動のようすがよく見えなかったが、指で触って確かめた結果から図 1 の $n=2$ の場合のように振動していると推測できる。

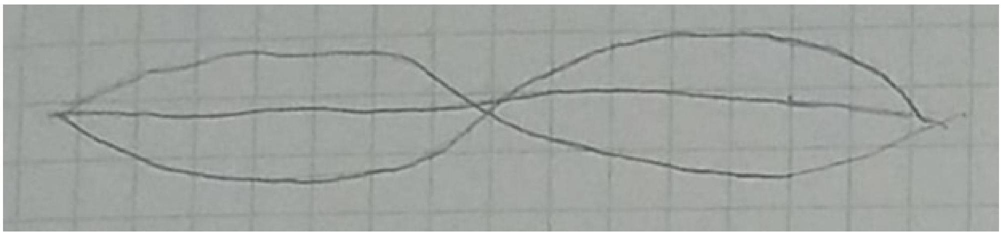

図 7: 弦長の $\frac{1}{2}$ の位置に触れてハーモニクス奏法を行った際の、弦の振動のようす

ここで、第 6 弦を 2C に、他の弦は表 1 の通りに調弦し直した。この状態で弦長の $\frac{1}{3},\frac{1}{4},\frac{1}{5},\frac{1}{6}$ の位置に触れてハーモニックス奏法を行い、$n=3,4,5,6$ に対応した音を出したところ、音の高さは表 2 のようになった。音の高さを五線譜に記すと図 9 のようになる。

図 8: 弦長の $\frac{1}{4}$ の位置で押さえてハーモニクス奏法を行った際の、指の位置

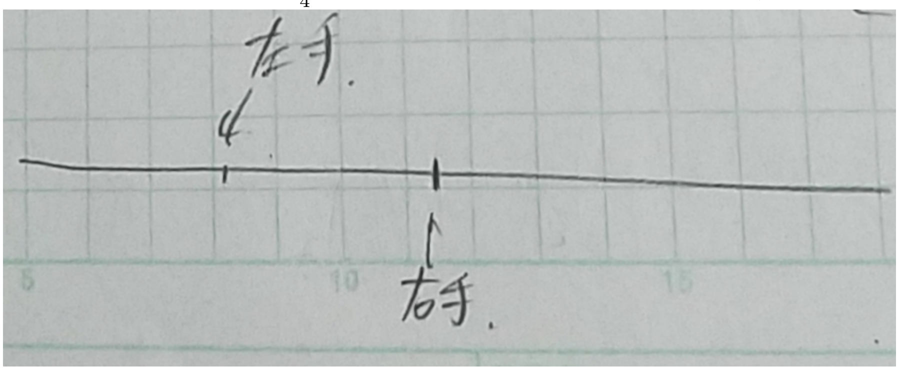

表 2: $n=1$ から $n=6$ に対応した音の高さ (自然音階の周波数は図 2 の比を用いて計算した。)

モード n	音名	自然音階 (倍音) (Hz)	平均律 (Hz)	周波数比 (平均律/自然音階)
1	ド (2C)	65.4	65.4	1.000
2	ド (3C)	130.8	130.800	1.000
3	ソ (3G)	196.2	195.979	0.999
4	ド (4C)	261.6	261.601	1.000
5	ミ (4E)	327	329.596	1.008
6	ソ (4G)	392.4	391.958	0.999

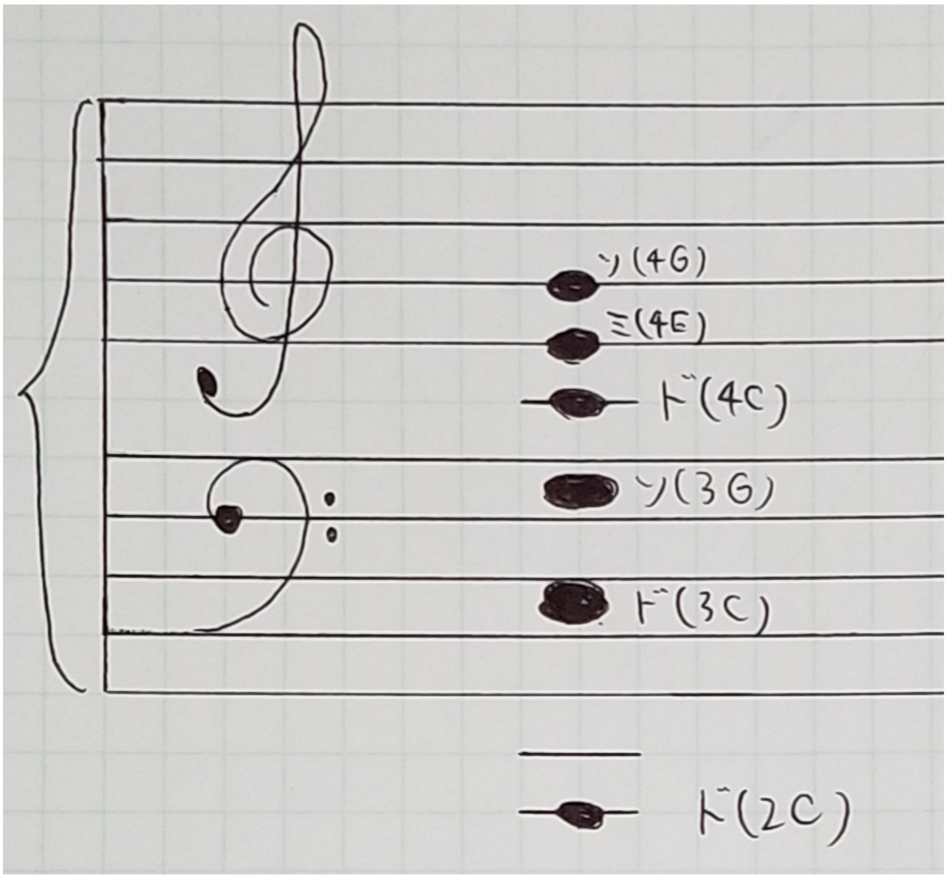

図 9: $n=1$ から $n=6$ に対応した音を五線譜に書いたもの

次に第 6 弦の $\frac{1}{5}$ の位置を押さえてハーモニックス奏法を行って出る 4E(自然音階) の音と、第 1 弦の開放弦を弾いて出る 4E(平均律) の音を同時に響かせたところ、うなりが聞こえた。表 2 に示した計算結果から、音の高さを一致させるには第 1 弦にかかる張力を小さくして音を低して 4E(自然音階) が出るようにすればよいと予想できる。実際に第 1 弦にかかる張力を少しずつ変化させてこの予想を検証したところ、2 つの音が一致したとき第 1 弦の音の高さははじめに調律した 4E(平均律) より低く

なった。このことから、上記の予想は正しいことがわかった。

4.3 追実験

弦長の $\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}$ の位置で弾いた結果、周波数スペクトルは図 10〜14 のようになった。

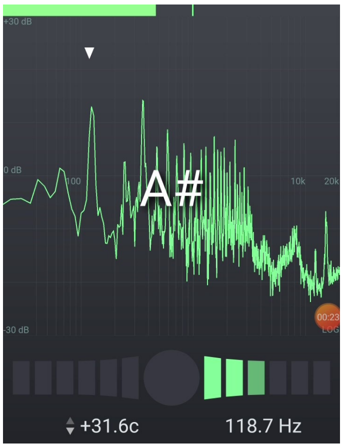

図 10: 弦長の $\frac{1}{2}$ で弾いた結果

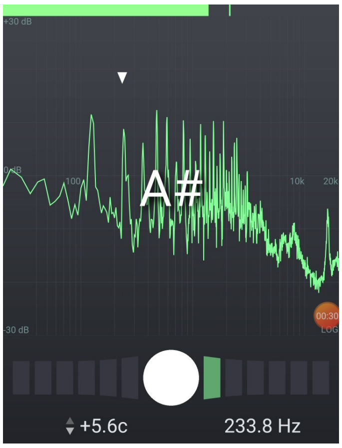

図 11: 弦長の $\frac{1}{3}$ で弾いた結果

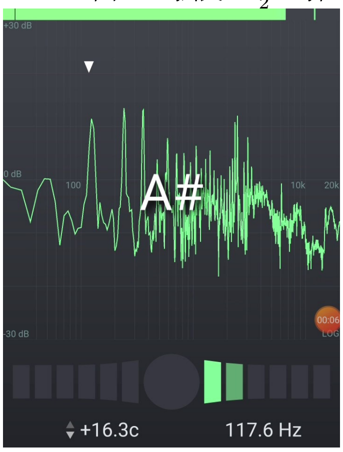

図 12: 弦長の $\frac{1}{4}$ で弾いた結果

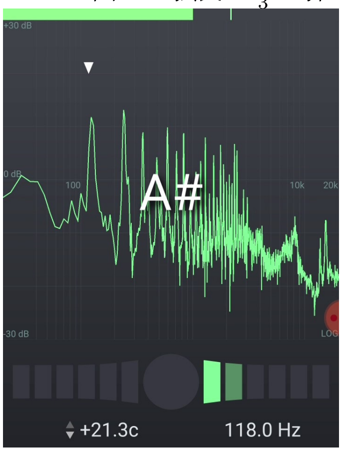

図 13: 弦長の $\frac{1}{5}$ で弾いた結果

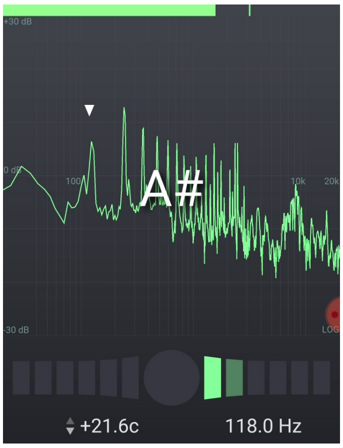

図 14: 弦長の $\frac{1}{6}$ で弾いた結果

5 考察 (設問への回答)

5.1 実験 1

実験結果は、弦の長さを短くするようフレットを押さえると音が高くなることと、弦にかかる張力を大きくすると音は高くなって弦にかかる張力を小さくすると音は低くなるというものであった。式 1 は、周波数は弦の長さに反比例して、弦にかかる張力の平方根に比例するということを表している。音が 1 オクターブだけ高くなると周波数は 2 倍になることと、実験で弦の長さが半分になるよう押さえたら音が 1 オクターブだけ高くなったことから、式 1 によってこの実験結果は矛盾なく説明できると考えられる。

5.2 実験 2

まず、実験では弦長の $\frac{2}{5}$ の位置を押さえてハーモニクス奏法を行っても弦長の $\frac{1}{5}$ の位置を押さえてハーモニクス奏法を行ったときと同じ音が出ることが分かった。このことから、弦長の $\frac{m}{n}(m, n$ は互いに素) の位置を押さえてハーモニクス奏法を行うと、押さえた場所が節になり、その結果として弦長の $\frac{1}{n}$ の位置を押さえてハーモニックス奏法を行ったときと同じ音が出ると推測できる。

次に、弦長の $\frac{1}{4}$ の位置を押さえてハーモニックス奏法を行ったときに弦長の $\frac{1}{2}$ の位置を弾いても音がほとんど出なかった理由は、弦長の $\frac{1}{2}$ の位置が、$n = 4$ に対応する振動の節であり (図 1) 振動しないことだと考えられる。振動の腹にあたる位置を弾いたら大きな音が出たことが、この考えを裏付けている。

また、平均律で調律された楽器で和音を弾くと音が「濁る」と言われているが、この原因は平均律と自然音階の周波数が異なることであると考えられる。楽器の音色はさまざまな倍音が混ざって成り立っており、式 1 と式 3 から n 倍音の周波数は基本振動の周波数を n 倍したものであるとわかる。隣り合う音 (半音) どうしの周波数の比は、自然音階だと有理数なのに対して平均律だと $2^{\frac{1}{12}}$ であり、無理数である。したがって、異なる高さの音を同時に弾くと自然音階で調律された楽器では異なる弦か

ら出る周波数が平均律で調律された楽器よりよく一致すると考えられる。平均律で調律されていると自然音階で調律された場合に比べて異なる弦から出る周波数に差異が現れ、それがうなりを起こして音が濁っているように聞こえると考えられる。

さらに、ギターを弾く右手の位置を変えると音の高さが同じでも音色が変化する。ここまでの実験結果を踏まえて考えると、弦を弾く際に、右手の位置を節にもつ倍音は出ないことが考えられる。そのため、弾く位置によって出る音に含まれる倍音が変わり、それが音色の変化として現れていると考えられる。

5.3　追実験

実験 2 の結果から生まれた仮説を検証するために、図 4 の弾く位置を変えて周波数スペクトルを記録したところ、たしかに弦長の $\frac{1}{2}$ の位置や $\frac{1}{3}$ の位置を弾いたら 2 倍音や 3 倍音は小さくなったが、その一方で弦長の $\frac{1}{5}$ の位置を弾いたときにも 5 倍音は他の位置を弾いたときと同様に出ていた。そのため、今回の結果からは、仮説は少なくとも部分的には正しいということしか判断できなかった。ギターの弦と輪ゴムは伸び縮みのしやすさなどで異なっているため、よりギターの弦に近い素材で弦を作って実験を行うか、ギターを用いて実験を行うかすればより詳しく仮説が正しいか判断できた可能性がある。

さらに、ハーモニックス奏法を行う際に、n の値が大きくなるにつれて押さえてよい場所が狭くなっていくことを考えると、この仮説を検証する際も弾いてよい場所が狭くなっていき、その結果として検証がうまくいかなかったことが推測できる。そして、この問題を解決するには、弦の全長がより長い実験器具を作成して実験を行えばよいと考えられる[4]。

5.4　文化と科学の関係について

はじめに、ヒトの耳がどのようなしくみで音をとらえているか説明する (出典:[3])。
まず、鼓膜の振動は 3 つの耳小骨 (ツチ骨、キヌタ骨、アブミ骨) によって蝸牛に伝えられる。蝸牛は外リンパ液によって満たされていて、3 つの耳小骨によって伝えられた振動は外リンパ液の振動に変換される。この振動が蝸牛管の中を伝搬し、基底膜が運動する。有毛細胞と呼ばれる基底膜に沿って「内側」および「外側」の列を作るおよそ 30,000 の受容器は基底膜の振動を拾い、これに連なるニューロンに信号を伝える。
また、外耳道で 2,000〜3,000Hz 程度の音は共鳴を起こし、強調されるようになっている [4]。活動する有毛細胞の領域は周波数によって異なり、低い音だとアブミ骨から遠く、高い音だとアブミ骨の近くである。このような仕組みで、音波が周波数ごとに分けられる [4]。ここで、音楽的に最も重要な周波数領域はおおよそ 20〜4,000Hz であると言われており, それは基底膜の広がりのうち約 $\frac{2}{3}$ を占めている。[3]

このことから、音楽の大半が五線譜に書き表せることへの説明の一部として、音楽に使われる周波数が似通っていることに対する説明がヒトの耳の構造によってできるということがわかる。つまり、音楽に広く使われる周波数はヒトに「よく聞こえる」周波数であり、そのことには民族や時代を超えた普遍性があると考えれれる。

[4] ちなみに、図 4 の器具の弦は、30cm であった

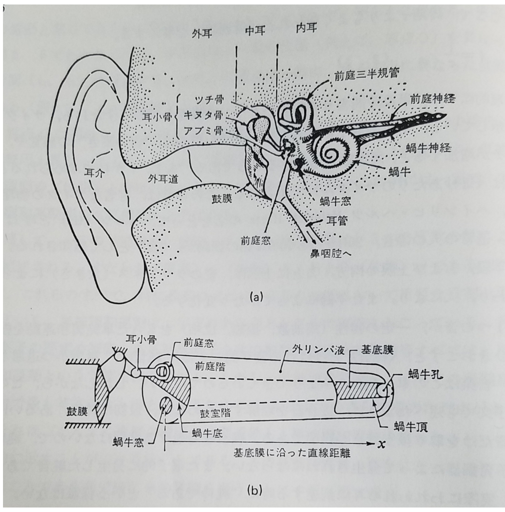

図 15: (a) ヒトの耳の略図 (b) 蝸牛のモデル (引き伸ばして表示されている) 出典:[3]

次に音楽の多様性と科学の関係について考える。

音階にも様々な種類があり、5 音構成による五音音階や、五音音階の音程の広い部分に中間の音を補ってつくられた七音音階がある [5]。当初は、5 音音階を柄のある弦楽器にうつす際や、フレットを指盤に立てる際に、ミとソの間、ラとドの幅が広いことに疑問を持ち、その中間に音を設けて器楽的に処理した (中間律) ものだと想像されている [5]。また、中間律はアイルランドのバグパイプやアラビアの縦笛に残っているという [5]。そして、中間律をもつ七音音階は数学者の寄与によって全音と半音を持つ今日の全音階となった [5]。

全音階にもピタゴラス音階、三分損益法、平均律、純正調などがあり、前の 2 つは音の高さの差が全音 2 個と半音 1 個を含む (完全 5 度) ような弦の長さの比を用いて定義したもの、平均律は 1 オクターブを数学的に 12 等分してつくられたもの、純正調は音律の問題を音響学的に研究して純正な和音が得られるようつくられたものである [5]。

また、モンゴルの伝統的な発声法にホーミーというものがあり、これは舌の位置を調整することで口内で共鳴を起こし、声に含まれる特定の倍音を強調する手法である [6]。

このことから、周波数の比や倍音が音階や一部の表現技法に深く関わっていることがわかる。また、現代でも中間律の音が一部地域の楽器に残っていたり、他の七音音階にもそれぞれ和音の調子に関する問題を持っていたりする [3] ことを考えると、自然科学に基づいてどの音階が「優れている」と一概に言うことはできないと考えられる。ある音階が絶対的に優れていると、自然科学に基づいて言えるのならば、人類はその音階以外は使っていないのではないかと考えられるからだ。そして、このことからそれぞれの音階には優れた点があることや、様々な民族がどの音階を好むのか、そして (ある種の正確性は犠牲にするとしても) どの音階が実用上では最も使いやすいかということが音楽の多様性を生み出していると考えられる。

音楽の多様性を生み出す他の要因としては、たとえば言語ごとに優先的に使われる周波数の違いが考えられる (図 16)。地域によって音の伝わりやすさは異なるから環境音と区別しやすい周波数も地域ごとに異なり、したがって言語ごとによく使われる周波数が異なるのである [7]。そして、ヒトの聴覚はふだん使用されない周波数に対しては馴染まない [7]。これらのことから、音楽に使用される周波数

は民族ごとに異なり、その周波数はその民族が話す言語でよく使われる周波数と重なることが推測できる。

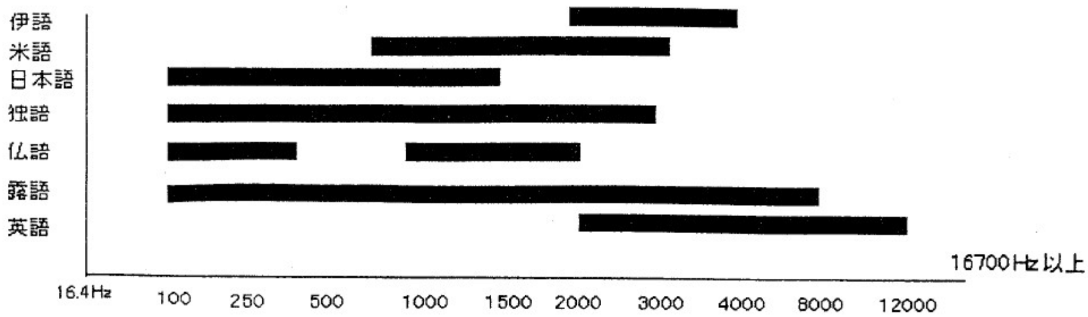

図 16: 言語ごとに優先的に使用される周波数 (出典:[7])

6　結論

今回の実験課題では、はじめにギターの弦にかかる張力や弦の長さを変えることで式 1 の妥当性を確かめ、続いてハーモニックス奏法を行って弦の振動の様子を観察したり、弾いても音が出ない場所はどのようなところか推測したり、$n = 1$ から $n = 6$ に対応する倍音の周波数を計算して、実際に同時に響かせることで自然音階と平均律の違いを確かめたりした。そして、弾く位置と音色の関係について、弾く位置によって出ない倍音があるのではという仮説を立て、実験を行って検証を試みた。

その結果、式 1 は妥当であること、弦を弾いたり共鳴させたりすると定常波が確認できること、さまざまな n の値に対応した振動があることが分かった。また、ハーモニックス奏法を行うと特定の n の値に対応する定常波を発生させられること、ハーモニックス奏法を行う際に定常波の節となる部分を弾いてもほとんど音が出ないこと、同じ音でも自然音階の音と平均律の音では周波数が異なり、同時に響かせるとうなりが聞こえること、うなりを聞こえなくするには弦をどのように調整すればよいかということが分かった。しかし、弾く位置と音色の関係についての仮説は、部分的に正しいと思われるということしか分からなかった。

実験結果と文献調査を踏まえて科学と文化の関係について考えたところ、音楽によく使われる周波数はヒトの耳の構造上聴くことができる周波数であり、このことによって異なる文化や民族でも音楽に用いられる音の高さは一定の範囲に収まることに対する説明がつけられること、音階にも様々な種類があり、それぞれに長所と短所があってどれが優れているとは一概には言えないが、このことが音楽に多様性をもたらしていること、言語ごとに優先的に用いられる周波数の違いが、民族ごとに音楽で使われる音の高さに影響していることを推察することができた。

このように、ギターを使った実験を通して自然科学の普遍性を式 1 の妥当性や倍音の高さという形で確認し、科学と音楽の普遍性や多様性の関わりについて考察することができた。したがって、本実験課題の目標であった、自然科学の普遍性を、具体的な実験と解析を通して、日常のありふれた現象から直感的に理解することや、音楽の多様性と普遍性を具体例として、科学の普遍性と多様性の関係を考察ことは、できたといえる。

参考文献

[1] 大阪教育大学「うなり」 閲覧:2021/11/04
https://www.osaka-kyoiku.ac.jp/~masako/exp/kichu/experiment/theory/unari.html

[2] シンコミュージック・エンターテイメント「ギターの構造と名称」 閲覧:2021/11/16
https://www.shinko-music.co.jp/reading_score_acousticguitar/g-1-1/

[3] Juan G. Roederer 著、高野光司、安藤四一 訳「音楽の科学」(音楽之友社、1981 年)
35 ページ〜39 ページ、189 ページ〜193 ページ

[4] 日本補聴器販売店協会「第 3 章 耳の構造と難聴」 閲覧:2021/11/15
https://www.jhida.org/ha-training/pdf/chapter3.pdf

[5] 黒沢隆朝「音楽講座 楽典〈三訂〉」 73 ページ、103 ページ〜107 ページ

[6] 大阪教育大学「倍音のしくみ ホーミー」 閲覧:2021/11/15
https://www.osaka-kyoiku.ac.jp/~masako/exp/kichu/baion/homi.html

[7] 村瀬邦子「母国語の違いによる音色知覚の差」 情報処理学会研究報告音楽情報科学 1998 年 14 号
85〜92 ページ