

目次

はじめに.....	2
第1章 果物の共鳴.....	6
第2章 自然界から生まれる音階 ～スイカの音階～.....	18
第3章 平面楽器、ポリゴノラの誕生.....	28
第4章 ポリゴノラの音階.....	48
第5章 お寺の鐘と教会の鐘とポリゴノラ.....	75
第6章 三角形、四角形、五角形、六角形ポリゴノラ.....	79
第7章 整数倍音、楽器の音、自然の音.....	94
第8章 聖歌、モーツアルト、ノイズミュージック、尺八、そしてポリゴノラ..	115
対談 「ポリゴノラの魅力と未来」.....	128
付録 1.....	158
付録 2.....	171
付録 3.....	174
付録 4.....	184
付録 5.....	187
付録 6.....	189
付録 7.....	191
あとがき.....	194

はじめに

ポリゴノーラは、自然界の音をもとに作られた楽器です。自然界の音にはもともとドレミの音がありません。別の音階があります。これに気づいたのは、果物から聞こえる音です。

果物は人に至福のひとつときを与えてくれます。ところが果物には当たりはずれがあり、食べごろを外すことがあります。未熟な果物を切ってしまうとは取り返しがつきません。ところが切らなくてもおいしい果実を見分ける方法があります。それは、音・振動を使う方法です。

昔からスイカをたたいて、おいしいスイカを選ぶスイカ名人がいました。スイカの音は、ポンポンとかボンボンと、はっきりした音程感がありません。その音を調べると、いろいろな高さの音が出ていることがわかりました。その高さは、一番低い音を1とすると、2番目は1.4倍、3番目は1.8倍、4番目は2.1倍の高さの音が出ていることがわかりました。一番低い音をドにすれば、2番目はファ[#]、3番目はラ[#]、4番目はレになります。一緒に鳴らすと、大変不協和な和音です。それで、スイカをたたくと不協和な音程感のないポンポン、あるいはボンボンという音が聞こえるのでしょうか。でもスイカ名人は、その音・音色を聞いてスイカの良し悪しを判断します。

皆様のなかにはピアノを弾いた方がおられると思います。例えばドの鍵盤を押すと、「ド」が出ます。でも、同時に「1オクターブ上のド」や、「2オクターブ上のド」が鍵盤を押していないのにピアノから出ています。これが音程感のあるドの音がでる理由です。1オクターブ、2オクターブ上の音を2倍音、4倍音といいます。スイカたたいたときの音が音程感を与えないのは、スイカの出す倍音が整数(1、2、3、4倍音など)ではなく、非整数(1.4、1.8、2.1など)だからだと思います。

スイカの非整数の不思議な音のことを、ある音楽家に話すと、「美味しいスイカの音を別のスイカに聞かせると、そのスイカは美味しくなりませんか？」と聞かれました。そこで、

スイカの音をシンセサイザーで合成してまず私が聞いてみました。なんと、その音はインドネシアの民族音楽ガムランで演奏されるボナンという楽器の音色にそっくりでした。ボナンは鍋をひっくり返したような楽器で、西洋楽器にはない形です。

インドネシアではスイカがたくさんできます。でも、インドネシアの人々がスイカの音をまねるためボナンという楽器を作ったのではないでしょう。おそらく、自然界から聞こえる音、森、水、波、風の音を表現しようとしたのではないかと私は思います。日本でも尺八の名人の理想とする音のひとつは、竹林を吹き抜ける風の音だそうです。

ガムランの演奏はよく森の中で行われます。その音楽は森の音と一体になるのでしょう。ガムランの音階は西洋音階とはまったく異なっています。西洋音階（12音階）は弦の振動を基にしています。一方、ガムランは5音階です。スイカは球体です。ガムランで使われる音階がドレミでないのは、弦ではない楽器の出す音色に原因があるのではないかと私は考えるようになりました。

そこで球体から出る音で音階ができないかと考えました。ドイツの物理学者、ヘルマン・ヘルムホルツ（第1章のコラムを参照）の書いた本をヒントにしました。不協和度という考え方です。この考え方で球体の音階はできました。次に、球体の楽器を作ろうとしました。木の球で作ると、なんと直径が1メートル以上でないとヒトには聞こえないことがわかりました。こんな重くて大きな木球を舞台に何個もぶら下げてコンサートはできません。その音をシンセサイザーで作ればと思いました。しかし、シンセサイザーの音は、どうも人工的で、生の楽器ほどの面白味がありませんでした。理由は、生の楽器が発生するアタック音がシンセサイザーではできないからだと思います。ギターでもヴァイオリンでもピアノでさえ、弾き始めの最初の百分の1秒ほどの音にアタック音があります。アタック音とは音が生まれる最初の音のことです。ギターでは弦を爪あるいはピックで弾く瞬間、ヴァイオリンでは弦を弓でこする瞬間、ピアノでは弦をハンマーがたたく瞬間に出る短い音です。

アタック音は非常に複雑な音で人工的には作れません。でも、このアタック音に楽器の特徴が最もよく現れています。例えば、ギターとピアノの音を録音して、最初のアタック音を消して、その音を聞くと、どちらの楽器かわかりません。人は、楽器から出る最初の百分の1秒ほどの音で、なんの楽器かわかります。それがわかる耳をヒトが持っていることに驚きます。自然界から聞こえる獣の鳴き声で、その動物が何かわかることは必要だったはずで。

楽器の出すアタック音は非常に複雑で CD やスピーカーでは完全には再現できません。生のヴァイオリンやピアノの音を楽しむために多くの人がコンサートホールに足を運ぶ理由がここにあります。

球体の音階をだす楽器は重くて大きすぎるので作るのをあきらめ、平面の音階と楽器をつくることにしました。平面には円形、長方形、正方形、三角形など多数あります。いずれも、叩けば振動し、ヒトの耳に聞こえる音が出ます。平面楽器から出る音は、やはり弦から出る整数倍音ではなく、「非整数倍音」でした。よく考えれば、弦をもとにした音は自然界にはひとつもありません。

木々のざわめき、川のせせらぎ、鳥のさえずり、虫の鳴き声、潮騒など全てが、弦から出ている音ではありません。

平面（円盤、三角形、四角形など）の振動を基に新しい音階を作り、新しい平面楽器を青銅で作りポリゴノラと名づけました。この本で提案する音階は平面楽器の振動をもとにして生まれたもので、ドレミとは違う音階です。この音階はこれまでにはない新しい音楽をつくる可能性があるのでは、と感じています。

平面音階のもとになる「非整数倍音」は、日本に古くからある、尺八や琵琶あるいは浄瑠璃の謡や演歌には豊かに含まれています。「非整数倍音」を愛でる民族は日本人だけではありません。地球上で伝承されてきた音楽や楽器には、ほとんど「非整数倍音」が含まれ

ています。またジャズ、ロック、浄瑠璃、演歌は「非整数倍音」の宝庫です。今流行りのノイズミュージックは、整数倍音の音楽に飽きた人々に受け入れられているような気がします。しかし非整数倍音を含む音楽を作るためには、非整数倍音で互いに響く音階が必要です。

最近では AI で音楽が作れるようになりました。AI はこれまでドレミを使って作曲された膨大なデータを学習して曲を作るので、人間にはそれ以上のものがないかもしれません。しかし、ここで紹介する新しい音階は AI が学習するデータがまだほとんどないので、人の創造力が大いに発揮できるでしょう。

これまでポリゴノーラについては、コンサート（東京 2015 年、神戸 2016 年）、CD（2017 年）、シンポジウム（つくば 2018 年）などで紹介してきました。また、灰野敬二氏は全国のコンサートでポリゴノーラを演奏しています。

新しい音階とポリゴノーラからどのような音楽が生まれるかは、この本を読まれる皆様にお任せします。本書は、自然界にあふれる非整数倍音の音色を出す楽器ポリゴノーラと、この楽器から科学的に生まれた新しい音階について述べたものです。この考え方、方針は間違っているかもしれません。また、その音階から生まれた音楽が人の心を動かさなければまったく意味がないと思っています。でも、この本を読まれた方が、この新しい音階や楽器に興味を持ち、新しい音楽を作ろうとしてくださることを心から願います。

2023 年 5 月 24 日

櫻井 直樹

第1章 果物の共鳴

1 果物の食べ頃

果物を振動させて「取り頃」「食べ頃」を知る研究があります。例えば、収穫したての未熟なメロンは、青くさく硬くて甘くありません。しばらく置いておくと熟して果肉は軟らかく甘みが増し、香りもよくなり食べ頃になります。それを過ぎると、腐って食べられなくなります。

最近、甘さ（糖度）を光センサで測定し、表示している果物もあります。でも、メロンは熟しすぎても糖度はそのままです。熟しすぎると変な匂いや味がしてメロンらしい風味がなくなります。そこで、果物の熟度を糖度ではなく、硬さで判定する必要ができました。これは、次のような考えに基づいています。

未熟な硬い果実は、食べ頃を迎えると適度な軟らかさになり、腐り始めるとさらに軟らかくなります。一度軟らかくなった果物が、また硬くなる、ということはありません。つまり一方通行で逆戻りしません。それで、果物の硬さを測れば熟度がわかることになります。

しかし、これまでは細い棒を果物に直接差し込み、硬さを測っていました。これでは、果実に穴が開いて売れません。穴を開けずに果実の熟度がわかれば、その果物が売れます。そこで非破壊試験が研究されました。

アメリカのアボット（Judith A. Abbott）は1968年に「共振」という現象に着目し、つるしたリンゴにスピーカーを当て、その反対に昔使われていたレコード針を当てました。レコード針とはレコードの溝にわずかに刻まれた凸凹を電圧信号に変える装置です。スピーカーをあてたリンゴのわずかな震えを調べるには、当時は最適なセンサでした。彼女は、スピーカーで低い音から高い音まで、いろいろな音を出し、特にリンゴが強く震える振動数（共振）を観測しました。その後、リンゴが古く軟らかくなると、共振振動数が低くなっていくことが分かりました。

この方法で、穴を開けずにリンゴの硬さ（熟度）を共振から判定できるようになりました。

2 共振（共鳴）とは

人の話に深く感動したときに、「あの人の話に共鳴した」と言います。この表現は人の心の動きを表したものですが、本質をとらえています。人の話に感動するとき私たちの心はその話に反応して大きく揺れ動くので、共鳴という言葉が使われるのだと思います。

共鳴は音に関する言葉で、振動を表現するときは共振といいます。物体を振動させると、その素材や大きさにもよりますが、特定の振動数で大きく揺れ始めます。例えば地震があると、建物が揺れます。地震の揺れと建物の揺れが一致すると共振し、建物がだんだんと大きく揺れ、最後には倒れることもあります。建物には、決まった揺れの周期があります。つまり、地震の揺れと建物の固有の揺れの周期が合うと、地震の1回1回の力が建物に加算され、大きく揺れだします。

あなたがブランコに乗っている子供の背中を押すときにも共振が経験できます。ブランコの揺れにあわせて子供の背中を押すとだんだんと揺れが大きくなってゆきます。あなたの押すタイミングがブランコの揺れる周期と一致しているので、ブランコに力が加算されます。

また、真偽のほどは定かではありませんが、昔、源義経が牛若丸と呼ばれていたころの話です。牛若丸は「お寺の大きな鐘を小指一本で動かしてみせる」といいました。周りの大人は、「そんなことできるものか」といったそうです。そこで彼は、小指を鐘に当て、ある一定の周期で少しずつ鐘を押したそうです。最初、鐘は眼に見える動きはしなかったのですが、そのうちに大きく揺れだしたので、みなたいそう驚いたそうです。牛若丸は鐘が撞木で撞かれたときにわずかに動く、その動きを注意深く観察し、鐘の揺れる周期を覚えて、その周期を思い出しながら、小指で繰り返し鐘を押したのでしょう。これも共振現象の一つです。

スイカを例にとり、共振振動数を知る現代の方法を説明します。スイカを振動台の上に載せます（図1-1）。

振動台は1秒間に1回の上下運動（1 Hz）から1秒間に1000回の上下運動（1000 Hz）までだんだんと速く震えます。1秒間に1回の振動を1 Hz と表します。このとき、スイカの天辺がどのように震えているかを測定装置で観察すると、図1-2（ア）のようなグラフが得られます。

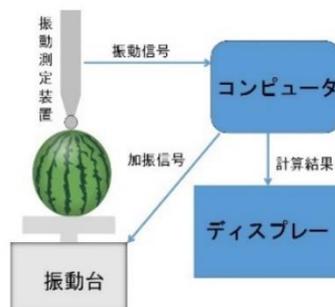
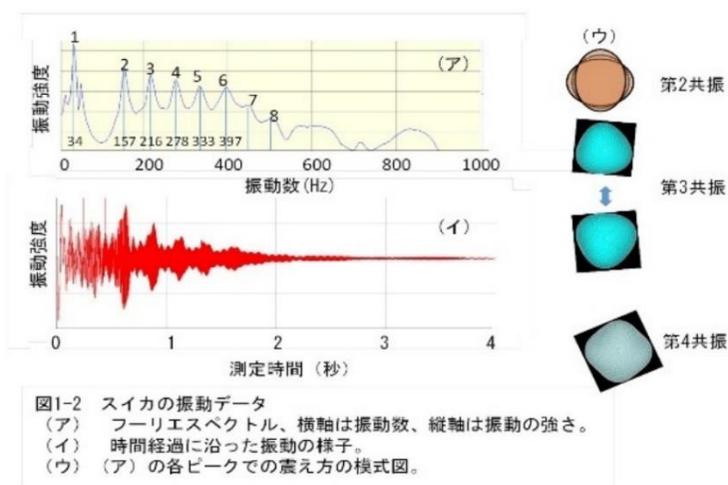


図1-1 スイカを振動させて共振を観察する装置の概略図

図1-2（ア）の横軸は振動数で、一番左が0で右にいくほど振動数が高くなります。この振動数は、音程を示すのと同じ単位なので、左ほど低い音、右ほど高い音に対応します。縦軸は、スイカの天辺の振動の強さを示します。振動数がだんだん大きくなる（右に行く）に従って、スイカの震えかたは強くなったり弱くなったりします。このスイカでは、低いほうから34、157、216、278、333、397 Hzの振動数で大きく震えています。その様子はとんがった山（ピーク）で示されます。このピークのとこ



るがスイカの共振点です。そこで、振動数の低い左側からピークに、番号をつけます。左から、第1共振、第2共振、第3共振……という順です。グラフでは、ピークの頭に数字で示しました。スイカの共振は第6共振くらいまではっきりと出ています。スイカをたたいた時に聞こえる音は、このピーク全部の混ざった音です。つまり、スイカをたたくと、複数の音が同時にでているということです。

生のデータは、図1-2 (イ) のようになります。この赤いグラフでは、横軸が時間です。低い振動数から、高い振動数まで、4秒間でだんだんと上げています。するとある時刻で、強く震えていることがわかります。図1-2 (ア) とはずいぶん様子が違います。図1-2 (ア) はどの振動数でスイカが共振したかを一目瞭然にしてくれます。図1-2 (イ) から (ア) を作る方法は、フランスの数学者フーリエ (1768～1830) が発明しました。そこで、図1-2 (ア) のグラフを、彼の名前を取り「フーリエスペクトル」と呼びます。

3 共振を見る方法 ～ フーリエスペクトル ～

[図1-2 (イ)] で得られた元のデータの波がどのような波の集まりからできているかを書き直したものが、フーリエスペクトル [図1-2 (ア)] です。ある複雑な波がどのような波の集まりでできているか調べると、波のなかには、全体の振動に大きく貢献している波もあれば、ほとんど貢献していないのものもあるはずですが、そこで、横軸に時間ではなく、波の振動数をとって、縦軸に貢献度 (強度) をとると [図1-2 (ア)] ができます。スイカがどの振動数で共振するかを見るにはフーリエスペクトル (ア) のほうが元の振動 (イ) より優れています。

グラフの第1番目の共振ピーク (34 Hz) はスイカ全体のごく一部分しか振動せずスイカ全体の情報を反映していません (Terasaki ら、2001)。そこでこれ以降では第1共振は考えません。第2共振からはスイカ全体が震え果実の肉質が反映されます。そこで、第2共振振動数 (157 Hz) を基本振動数とすることにしました。

共振が起きているときのスイカの形を特殊な方法で観察し、それを模式図であらわすと図1-2の右列 (ウ) に書いた図のようになります。第2共振でスイカが震えているときは、風船を上から押し下したり、引っ張ったりしたような様子で共振します。第3共振で震えるときは“三角おにぎり”のような形で震えます。そのおにぎりの先端

は、振動ごとに反転します。あるときは、三角おにぎりの先端は上に、次は下にと
った具合です。それを両矢印で示しました。第4共振では、サイコロのような形を
とって振動します。この場合、サイコロは45度に傾いて振動します。

スイカの硬さは、スイカの重さと、第2共振振動数から計算できます。スイカは未
熟だと硬く、適熟ではシャリシャリし、過熟になると軟らかくなり果肉が砂のよう
にサラサラして食感が悪くなります。第2共振はスイカが軟らかくなると下がります。
収穫したスイカを部屋に置いておくと、だんだんと軟らかくなります。そこで、食
べころは果肉の軟らかさだけで判断できます。畑でスイカの硬さを測れば、いつ収
穫すればよいかもわかります。またメロンのように、収穫後に軟らかくなりおいし
くなる果物は、あらかじめおいしい硬さが分かっていたら、メロンの硬さを測る
だけで、あと何日で食べころになるかを予測することができます。この原理で、
果物の食べころを収穫時の硬度で予測するサービス「coro-eye」が展開されてい
ます。

※coro-eye®はサトーホールディングス株式会社の登録商標です。

4 スイカの共振ピークの並び方

さて、このように第2共振を基準(1.00)とし、それ以上高い共振を比で表すと次
のようになります。

第2共振振動数	(157 Hz)	(レ [#])	→	1.00
第3共振振動数	(216 Hz)	(ラ)	→	1.38
第4共振振動数	(278 Hz)	(ド [#])	→	1.77
第5共振振動数	(333 Hz)	(ミ)	→	2.12
第6共鳴振動数	(397 Hz)	(ソ)	→	2.52

このスイカでは基本振動数は157 Hzで、ドレミであらわすと、レ[#]となります。ほ
かの振動数もカッコ内に書きましたが、レ[#]、ラ、ド[#]、ミ、ソとなります。ピアノで
この音を同時に弾けば、大変不協和な音です。“1次元の弦”を使ったピアノで音
では、これらの5つの音を同時に弾くと不協和に聞こえますが、スイカのような3次
元の物体から出る場合は不協和といえるのでしょうか。

第2共振を1.00として第3、第4、第5などの共振振動数の比は、1.38、1.77、2.12、2.52と小数点が付きます。この数字を非整数といいます。スイカが共振する音の順番が整数倍ではないことは大変重要なことです。

ピアノやギターやヴァイオリンのように弦が震える楽器では、倍音は整数倍(1.00、2.00、3.00……)です。整数倍音とは、元の音(例えばド)に対してちょうど2倍の高さの音(ド)、すなわちオクターブ上のド、3倍高い音(ソに当たります)、4倍高い音(2オクターブ上のドに当たります)のことで、弦は整数倍音だけ出します。

スイカは球体です。球体から出る音は非整数倍音しか出ません。

弦から出る倍音が整数倍であることがドレミの音階と深い関係にあります。そこでまず、その関係について述べます。

5 ドレミの音階は弦から生まれた

現在使われているドレミの音階は、弦の振動をもとに約2600年前にギリシャで生まれました(小方、2007)。弦の振動を説明するために、2つの支点間に張られた一本の弦(図1-3)を使って説明します。

ほとんどすべての弦楽器は2つの支点到に支えられた弦を弾いたり(ギターやハーブなど)、たたいたり(ピアノ)、こすったりして(ヴァイオリン)、音を出します。音を出す弦の震え方は一通りではありません。管楽器も管の中で同じようなことが起こっています。図1-3の(イ)は、2つの支点到に張られた弦の中心をつまんで弾く様子が描かれています。真ん中をつまんで弦を放すと(ウ)のように震えます。次に真ん中に新たに支点を設けその半分の位置(元の弦長の1/4の点)をつまんで離すと、(エ)のように震えます。このとき最初の音の1オクター

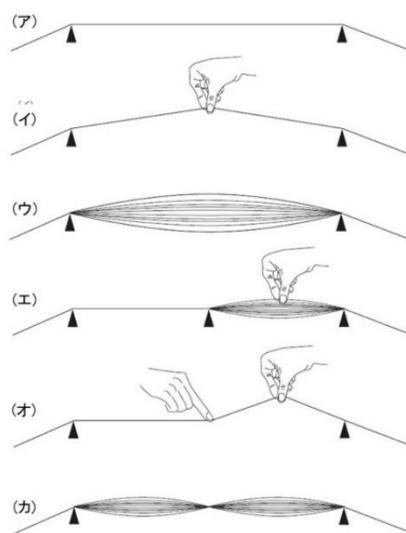


図1-3 弦の長さとお音高の関係

ブ上の高い音（2倍音）が出るということが知られています。最初の音をドとすれば、1オクターブ上のドです。この音は振動数で言うとちょうどもとの音の2倍になります。つまり弦の長さを半分（ $1/2$ ）にすると、振動数が2倍になります。ところが、新たに支点を設けなくても（オ）のように軽く指を弦の真ん中に触れて弦全体の $1/4$ の位置の弦をつまんで弾き、弦に触れていた指を離しても、（カ）のような震え方をします。これは弦の振動を知る上で大変重要な性質です。つまり弦は（ウ）のような振動もするが、支点間の距離が元のままでも（カ）のような振動も同時にします。

次に、図1-4をご覧ください。同じように弦が2つの支点の間に張られています。右の支点にかなり近いところをつまんでいます。この状態で手を離すと、弦は複雑な振動をします（Powell, 2011; Sethares, 1999）。

イ、ウ、エ、オのように別々に書きますが、弦をはじくとこのような複数の振動が同時に起こります。1枚の図で描くのは難しいので、それらを別々に分けて描いたとお考えください。

この弦からは、どのような音が出るのでしょうか。図1-4の（ウ）からは弦の長さが $1/2$ なので元の音の2倍の振動数、すなわちオクターブ上のドが出ます。（エ）は弦の長さが $1/3$ です。そこで（エ）では元の音の3倍高い音が出ます。元の音をドとすると、1オクターブ上のソです。4倍音は2オクターブ上のドに相当します。

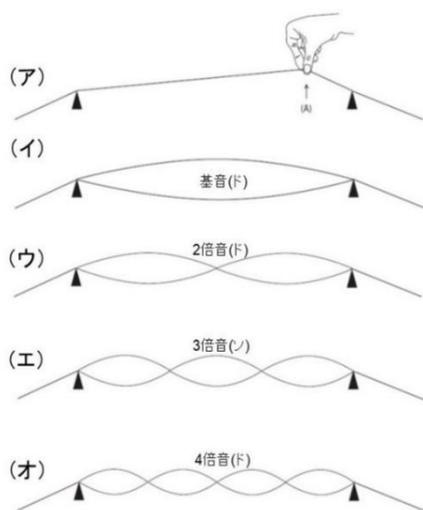


図1-4 弦の振動に含まれる整数倍音

このように、元の振動数の2倍、3倍、4倍の音が出ているのでそれらを倍音と呼びます。したがって、一本の弦を弾く場合でも、実は支点（駒）の近くを弾いたり（ギター）、たたいたり（ピアノ）、こすったり（ヴァイオリン）すると、ドを弾いているつもりでも、その1オクターブ上のド、ソ、さらに2オクターブ上のドが同時に出ています。ソの音なんか聞こえないといわれるかもしれませんが、ヴァイオリンや、ギターは駒（ブリッジ）の近くを弾きますし、ピアノも弦を止め

た位置から約 $1/8 \sim 1/9$ のところをハンマーでたたくので (安藤 1996)、どの楽器でもドを弾けば、同時にド、ソ、ドという倍音が混ざります。

ピアノの鍵盤の中央のドを弾くと、弦が震えて基音の 262Hz の音が出ます。Hz は 1 秒間に震える単位です。262 Hz の音は弦の震え方で示せば、図 1-4 (イ) で、1 秒間に 262 回震えます。しかしそれだけではありません。ピアノのドの音をフーリエ解析にかけると図 1-5 のようなグラフが得られます。このグラフからわかることは、ピアノの鍵盤を一つたたいても、複数の共鳴音が同時に鳴っていることです。

横軸は振動数で音の高さを示します。左は低い振動数 (低い音)、右は高い振動数 (高い音) を示します。ピークの高さは音の強さを表します。左から右にかけてたくさんのピークが出ています。一番低い振動数のピークが 261.6 Hz がドの基音のピークを示します。基音よりも高いところにたくさんのピークが出ています。その数は見えるだけでも 13 あります。つまり、13 倍音 (約 3400 Hz) まで見えています。鍵盤は一つしかたたいておらず、震えている弦も 1 本ですが、実はこんなにたくさんの音がピアノから出ています。しかし、私たちの耳には基本のド (262 Hz) の音しか認識できません。これは私たちの耳の仕組みです。

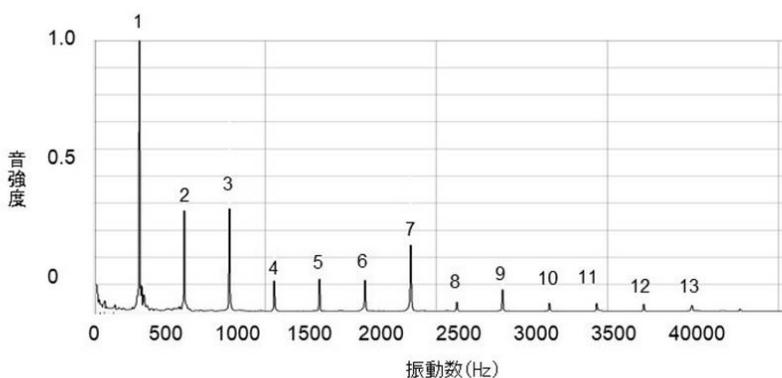


図1-5 ピアノのド(261Hz)のフーリエスペクトル
縦軸は基音(261Hz)の音の強さを1.0とした相対強度を示す。ピーク上の番号は、倍音番号を表す。倍音のピークは等間隔に並んでいる。このことは、2, 3, 4倍音の音高は、基音の2, 3, 4倍であることを示す。

ところで、ドに対応する倍音は、1、2、4、8倍音です。先に説明しましたように、ほかの倍音例えば3、6、12倍音はソの音に対応しています。5と10倍音はミに対応しています。これが和音の基本です（付録1）。

図1-5を見ると、13倍音までみえていますが、その中で1、2、4、8倍音がドの音に当たります。つまり13ある倍音のうち4つの音がドを主張するので、我々の耳はこれをドと認識するのでしょうか。また1、2、4倍音のドの強度を積算すると、全体の65%となります。ほかの倍音よりもうんと強い音の強度を占めています。3の倍数の3、6、9、12倍音はソ、ですが、ソ（3、6、9倍音）の強度の積算は17%となります。

このように、弦から出る音には、元の2倍、3倍、4倍高い音が含まれます。これらは、2倍音、3倍音、4倍音と呼びます。弦の長さが1/2になれば2倍音、1/3になれば3倍音が、1/4になれば4倍音が出ます。倍音の倍率は、2.00、3.00、4.00、と小数点以下が0です。そこで、このような倍音のことを「整数倍音」と呼びます。

ヘルムホルツ（コラム1参照）はドを基音にして、2倍、3倍、4倍から16倍音まで五線譜に書きました（図1-6）。ドの倍音を重ねて書いただけで、この中にドレミの音階も、主要な和音であるドミソも出てきます。



音階	ド	ド	ソ	ド	ミ	ソ	シ♭*	ド	レ	ミ	ファ*	ソ	ラ*	シ♭*	シ	ド
倍音列	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16

図1-6 ヘルムホルツの著作に載っている倍音列の五線譜への記載

66Hzのドから始まり4オクターブ上のドまで続いている。星印は平均律の音階と少しずれている音を表す。音符の左についている斜めの棒は右下りの場合（第7、13、14倍音）は五線譜上の音符より少し低い場合、右上がりの場合（第11倍音）は五線譜上の音符より少し高い場合を示す。

参考文献

- 安藤由典 (1996) 楽器の音響学、音楽之友社
- 小方厚 (2007) 音律と音階の科学 (ブルーバックス)
- 櫻井直樹 (2012) 共振振動を用いた青果物の非破壊熟度判定技術と装置の開発、*Techno Innovation* 84 : 36-41.
- Abott, J. A., G. B. Backman, R. F. Childers, J. V. Fitzgerald and F. J. Matusik (1968) Sonic techniques for measuring texture of fruits and vegetables, *Food Technol.* 22: 101-112.
- Helmholtz, H. L. F. (1862) “On the Sensations of Tone”, (A. J. Ellis 英訳), Dover Publications, Inc., New York.
- Powell, J. (2011) 響きの科学、(小野木明恵訳、早川書房)
- Sethares, W. A. (1999) “Tuning, Timbre, Spectrum”, *Scale*, Springer.
- Terasaki, S., Wada, N. Sakurai, N. Muramatsu, R. Yamamoto and D. J. Nevins (2001) Nondestructive measurement of kiwifruit ripeness using a laser Doppler vibrometer. *Transaction of American Society of Agriculture and Engineering* 44: 81-87.

コラム1 日本人の音感覚(1) ～非整数倍音～



ヘルマン・ヘルムホルツ(1821～1894)

ドイツの物理学者ヘルムホルツ(1821～1894)は、“人はなぜ和音を心地よく感じるか”、について研究し「音色の感覚」という本を書きました。音の感覚を初めて物理の言葉で説明した大変優れた本でした。この本を英訳したのは、同時代のイギリスの数学者エリス(1814～1890)です。エリスは本を訳しながら、いろいろな国の音階を調べ、訳本の後ろにたくさんの表をつけました。その表にはインドネシアのガムランの音階やアラブの音階がでています。彼は、それらがドレミではないことを認めています。また、明治初期の日本の楽器についても調べ、

箏や琵琶の音階も、ドレミでないことが出ています。ドレミが日本に入ってきたのは、明治からです。

ドレミ音階は弦からでる音をもとに生まれました。弦から出る音の並び方(音列)は「規則的」です。ドレミは、ピタゴラスによって、この規則的な音列をもとにして、2600年前に生まれました。人は弦から出る倍音を発見し、長い年月をかけてドレミの音階に発展させました。ところで、弦から出るたくさんの倍音列は、わたくしたちの耳には、全部は聴き取れません。一番低い音が高音を与えます。一方、音色は高い倍音列の1個1個の強度バランスで作られます。音色の違いは耳の良い人には聴き取れます。

自然界の音も1個の物体から同時にたくさんの音が出ています。その出方は弦とは違い「不規則」です。だから、わたしたちは自然界の音色はピアノやギターのと澄んだ音色と違うと感じます。その音色は何となく濁っています。川のせせらぎ、木の葉のざわめきなどを思い出してください。

日本に古くからある琵琶の音は、弦を使っているのに澄んだ音がしません。濁っています。尺八もフルートのように澄んだ音だけでなく、例えば風の吹くような、かすれた音を出せます。三味線は中国から伝えられたといわれています。その後、三味線は3本の弦のうち一番太い糸を弾くと、さわりという部分に弦が当たり、ビリついた音が出るよう日本で改良されました。日本人は、わざと澄んだ音が出ない仕組みを作りました。

スペイン南部に残るジブシー音楽フラメンコでも、歌や踊りの伴奏に使われるギター(フラ

メンコギター)は、わざと弦の高さを低くして弾くとビリついた音が出ます。ロックギターも澄んだ音をほとんど使いません。

あとで述べるポリゴノールをたたくと、自然界の音と同じく、その音の高さよりも高い倍音が「不規則」に出てきます。しかし、ビリついた音ではありません。1個1個の音は澄んでいて、同時に出る高い倍音列が不規則に並んでいるだけです。でも、明らかに、弦の音色とは違います。

私たちが野外で耳にする、木のざわめき、雨の降る音、川のせせらぎ、滝の音、竹林を吹き抜ける風の音、鳥の声、虫の音、すべて不規則な音の並びでできています。

古来日本人はこのような自然界の音に敏感であったような気がします。

俳句や和歌に自然界の音がよく詠まれています。

古池や 蛙飛び込む 水の音 (松尾芭蕉)

ほととぎす 鳴きつる方を ながむれば ただ有明の 月ぞ残れる

(後徳大寺左大臣)

夜を込めて 鳥の空音は はかるとも よに逢坂の 関はゆるさじ

(清少納言)

俳句や和歌に詠まれた自然界の音は、ピアノやギターの音とは違います。カエルが跳びこむ水の音や、鳥の鳴き声は弦とは違った音です。それらは澄んではいません。

自然界には、弦から出る澄んだ音は一つもありません。

西洋音楽は弦から出る澄んだ音をもとに教会音楽を中心に発展してきたような気がします。確かにその音色は、自然界の音とは違い、地上にはない天上の音を再現しているかのようです。それ以外の人類の音楽は、自然界の澄んでない音を使って音楽を作ったのかもしれない。

ドレミは弦から出る澄んだ音を基に生まれ発展しました。自然界の音を基にすると、ドレミとは違う音階ができます。自然界の音で音楽を作るには、ドレミとは違う「自然界音階」が必要だと思います。これについて第2章から説明します。

第2章 自然界から生まれる音階 ～ スイカの音階 ～

スイカの「非整数倍音」から音階ができます。この音階はドレミではありません。

スイカ名人はスイカをたたいてその振動（音）から、熟度、割れを判断します。小さな割れだけではなく、その場所も的確に判定します。まさに名人芸です。その名人の後ろにぴったりついて2年間教えを受けていた若い人がいました。2年目の収穫が終わったころ、私がおその若い人に尋ねました。「たたいてスイカを良し悪しが、わかるようになりましたか？」驚いたことに、「ぜんぜんわかりません」という答えでした。なぜ名人はスイカの音がわかり、若い人にはそれがわからないのか、この音階の研究をしていてなんとなくわかるようになりました。

1 スイカとガムラン楽器“ボナン”

スイカの倍音の列をもう一度見てみます。それらは

1.00、1.38、1.77、2.12、2.52 ……

でした。このような倍音を含む音がスイカをたたいたときにでる音なのです。この音の並びの基音（一番低い音）をドとして平均律であらわすと、

ド、ファ \sharp 、ラ \sharp 、ド \sharp 、ミ

となります。ピアノで弾けば大変不協和な和音です。ドとファ \sharp は、典型的な不協和な音の組み合わせです。またド \sharp は、ドとは半音しか違っていませんので、これも不協和な音です。しかし、スイカから出る音はスイカ自身が震えて出している音です。

弦から出ている音ではありません。それを、不協和と言ってよいのでしょうか？

さらに、ピアノでは、このスイカの音を正確に再現することはできません。なぜならピアノの音には、それに付随する整数倍音が同時にでてしまうからです。例えばドの鍵盤を弾くとド、ド、ソ、ド、ミなどの整数倍音がでます。ファ[#]からは、ファ[#]、ド[#]、ファ[#]、ラ[#]などが出ます。ラ[#]からは、ラ[#]、ファ、レがでます。ド[#]からは、ド[#]、ソ[#]、ファがでます。ミからは、ミ、シ、ソ[#]が出ます。結局前ページに書いた、スイカから出る音ド、ファ[#]、ラ[#]、ド[#]、ミをピアノで弾くと、「ド、ド[#]、レ、ミ、ファ、ファ[#]、ソ、ラ[#]、シ」と、ドから次のドまでの鍵盤を黒鍵も含めて全部弾いたような音が出ます。当然、協和しません。すなわち、スイカの出す音をピアノで再現することはできません。そこでシンセサイザーで非整数倍の倍音を人工的に作り、スイカの出す音を忠実に再現するにしました。この音をスピーカーで聞くと、インドネシアのガムランで使われる、ボナンという楽器の音色にそっくりでした。

ガムランはインドネシアの合奏音楽で、いろいろな楽器が使われています。その中でもボナン（図2-1）という楽器が出す音にスイカの音は似ていました。ボナンは、真鍮で作った天ぷら鍋を逆さまにしたような楽器で、その天辺におへそのような出張りのついた楽器です。中は中空になっていて、おへその部分を布を巻いた棒でたたいて音を出します。



図2-1 インドネシアの音楽、ガムランで使われる楽器の一種、ボナン
真鍮で作っている中が中空の楽器。上面に出ているおへそのような
ところをたたいて演奏する。

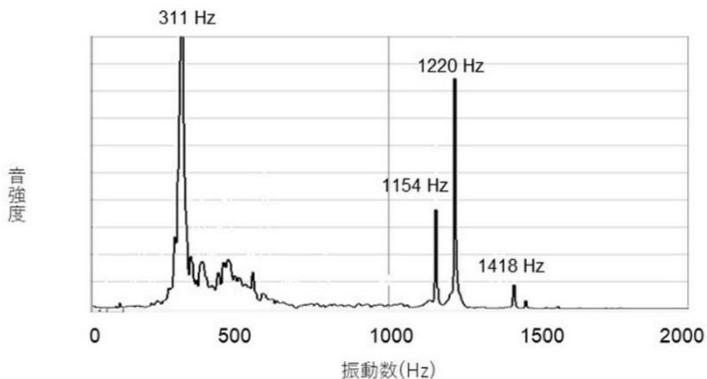


図2-2 ガムランで使われるボナンのフーリエスペクトル
ピークはピアノ（図1-5）と比べて不規則に並んでいる。

ガムランでは西洋のドレミではない音階を使います。その音階には 2 種類あります。いずれも西洋のドレミとは違います。つまり弦を基本としない楽器を使う音楽は、ドレミとは違う音階で始めてよく響きあうのではないかと考えられます。

楽器ボナンの出す音を分析すると、「整数倍音」が出ず、「非整数倍音」が出ていました（図 2-2）。

スイカよりはかなり複雑です。図 2-2 を見ると、0～1500 Hz までに主要なピークが 4 本見て取れます。一番背の高いピークは 311 Hz です。そのほかにも 1154、1220、1418 Hz など、4 本のピークが出ています。

311 Hz の音を基音（1.00）とすれば、それ以上の高いピークの比は

1.00、3.71、3.92、4.56

となり、やはり整数の比ではなりません。ピアノの倍音の並び方（図 1-5）と比べても、ずいぶん不規則であることが分かります。スイカと同じように、ボナンも「非整数」倍音を出すことがわかります。

ボナンは非整数倍音を出す楽器で、ガムランはドレミとは違う音階を使っています。それでは、同じ非整数倍音を出すスイカにもスイカに相応しい音階を作れないだろうか、と考えられます。そのヒントは、コラム 1 で名前を出したヘルムホルツの提唱した「不協和度」という理論です。

2 スイカの音階を作る

第1章でドレミが弦の整数倍音をもとに生まれた話をしました。ヘルムホルツは不協和度理論を用いてドレミを説明しました (Helmholtz, 1862)。彼はヴァイオリン奏者を自分の前に立たせ、二つの音を同時に弾かせました。最初は同じ音を2つ鳴らし、一方だけを少しずつ高くする実験をしました。少しだけ2つの音が離れると聞くに耐えない不協和な音がしますが、2音が離れるに従いその不快度は減少し、同じ音ではないのに、あるところで心地よく響きます。それを通り過ぎるとまた不協和度が増します。そして完全に1オクターブ離れると2つの音は混じり合い協和しました

途中で一度心地よく2つの音が混じり合った所が、ドとソの関係だったのです。彼はこのようなことが起こる理由は、弦が整数倍音を出すからだ、と結論しました。ドとソの関係は、振動数で言うと1.5倍、弦の長さで言うと2/3倍の関係です。そこでドとソがなぜ協和するか（不協和度が低いか）を、A : 100 Hz と B : 150 Hz の2つの音で説明します。

Aの音は100 Hzです。弦から出る音なので、200、300、400、500、600 Hz という整数倍音が同時に出来ます。Bは150 Hzの音で150だけではなく、300、450、600 Hz が出来ます。AとBの出す倍音をみると、Aの第3倍音(300 Hz)は、Bの2倍音(300Hz)と一致しAの6倍音(600 Hz)はBの4倍音(600 Hz)と一致します。これが、心地よく二つの音(ドとソ)が混じり合う秘密です。ド、ミ、ソがなぜ3和音で協和するのか、また純正律と平均律ではその和音の響きが違うか、など詳しいことは付録1に載せました。

このヘルムホルツの不協和度理論を、さらに深め、倍音列から音階を作る理論を発展させたのが、Promp と Levelt (1965)です。彼らは、音を聞く人間の感性を考慮に入れて不協和度からドレミを作る式を作りました(付録3参照)。彼らの式を使い、整数倍音を入れると、ドレミの音階に当たるところの不協和度が低くなります。つまり不協和度の低いところをピックアップすれば、ドレミの音階が作れるというわけです。

そこでこの式を、スイカに当てはめると次のような音階ができました（表 2-1）。もとの倍音は、11 ページに示したように、1.00、1.38、1.77、2.12、2.52 でした。これらの数字を式に入れて、不協和度を計算して、音階を作ると、表 2-1 のスイカの音階ができます。

この音階は、ドレミとはまったく異なる間隔で並んでいます。また 4、7、9、10 番目（下線）の音は、もとのスイカの出す非整数倍音と一致しています。またドレミの音階と違うのは、2.00 という数字がないことです。平均律では各音階は半音を同じ間隔にしていますので、1.06 倍ずつ大きくなります。それを書き出すと、表 2-1 の右の列ようになります。

13 番目に 2.00 という音階が出ています。これは 1 オクターブ上のドです。スイカの音階とドレミがまったく違うことがわかります。スイカの音階の 4 番目の音は、音階の 1 番目の第 2 倍音と同じ高さです。そこで、音階番号 4 番目の音を出すスイカと

番号 1 番目の音を出すスイカを同時にたたけば、音階番号 1 の第 2 倍音 (1.38) と、音階番号 4 の基音 (1.38) が同じ音高でよく協和します。ちょうど 1 オクターブ上のドの音が下のドの第 2 倍音と一致するのと同じ理屈です。

これらのスイカの音階を、ピアノに移しても、うまく響きません。なぜならピアノは「整数倍音」しか出せず、「非整数倍」が出ないからです。非整数倍音からできた音階は、非整数倍音を出す楽器同士で初めて協和します。

音階番号	スイカ	平均律	音名
1	1.00	1.00	ド
2	1.19	1.06	ド#
3	1.29	1.11	レ
4	<u>1.38</u>	1.19	レ#
5	1.42	1.26	ミ
6	1.54	1.33	ファ
7	<u>1.77</u>	1.41	ファ#
8	1.83	1.50	ソ
9	<u>2.12</u>	1.59	ソ#
10	<u>2.52</u>	1.68	ラ
11		1.78	ラ#
12		1.89	シ
13		<u>2.00</u>	ド

3 スイカの音階を出す楽器

そこでスイカの出す非整数倍音が出る楽器を作ろうと思いました。お寺の木魚のように中空ではなく、中が詰まっていなければなりません。どのような材質を選ぶにしても、スイカと同じような球体の形をしていることが必須です。球体の形をしているからこそ弦には出せない非整数倍音が出るからです。そこで、いろいろな楽器は木で作られているので、まず木で球形の楽器を作ろうと思いました。

スイカが第2共振振動数で振動しているとき、その形は風船を押ししたり、引っ張ったりしたように震えていることが実験で観察されました [図 1-2 (ウ)]。その様子を図 2-3 に再掲しました。

このような震え方をしているときに出る音が、スイカの基音に当たります。

そこで、直径 30 センチの木製の球の基音を計算してみました。それは、何と 130000 Hz でした。これは人の聴覚の限界 20000 Hz をはるかに超える超音波で耳には聞こえません。通常のピアノは、50 Hz から 4400 Hz くらいまでをカバーしているので誰にでも聞こえます。4400 Hz の音を出す木の球直径を計算すると、1.6 メートルになりました。重さはマツで作ると、1350 kg になります。より低い音を出すにはもっと直

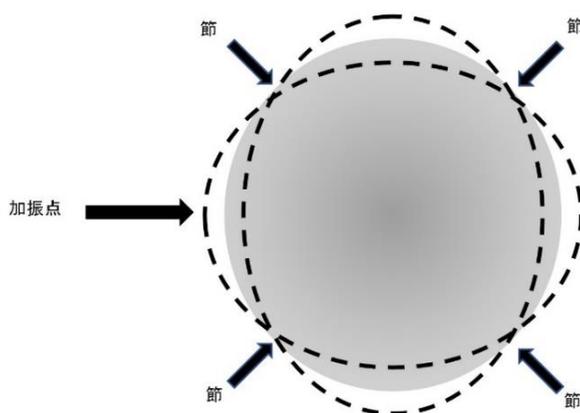


図2-3 スイカの振動する様子

スイカを第2共振振動数で振るわせると、図のように風船を上から押さえたり引っ張ったりしたように震える。斜めの矢印は、振動しないので節を示す。

径を大きくせねばなりません。こんな大きな重い楽器を何個もコンサート会場に吊るせません。そこで木はあきらめて、金属で作ろうとしました。ところが計算するとさらに直径が大きくなりました。

球体楽器を作るのはあきらめました。

でも、まだ2つの方法があります。

- ① スイカそのものを楽器にする
- ② シンセサイザーを使い電子音でスイカの音を作る

しかしどちらも採用しませんでした。その理由は、

- ① スイカそのものは楽器にできない

スイカをたたくと、ボンボンという耳に聞こえる音がします。それはスイカの中身が木に比べてうんと軟らかいからです。実際に木はスイカの3000倍硬いです。それでスイカの音は耳に聞こえ、同じ大きさの木球は音が高すぎて聞こえません。読者の中には、お寺でつかう木魚を思い浮かべる人もいるでしょう。木魚は人の耳に聞こえる音を出します。その秘密は、木魚の中がくりぬかれているからです。しかし、中空の木球は中身のないスイカと同じで、別の非整数倍音を出します。ですから中空の楽器でスイカの音階を作ることはできません。中空の物体の出す倍音をもとにすれば、中空楽器の音階を作ることはできます。

スイカそのものを楽器にする方法はどうでしょう。

スイカを楽器として採用するために、低い音には大きなスイカ、高い音には小さなスイカを割り当てます。そのために、たくさんのスイカを準備して、その中からちょうど目的の音を出すスイカを選ぶのは大変です。もし幸運にも音階通りのワンセット選べたとしても、明日も同じ音を出すとは限りません。スイカは収穫後だんだん軟らかくなるので、その音はだんだん低くなります。全部のスイカが同じように低くなれ

ばまだしも、ばらばらに低くなればお手上げです。スイカを楽器にすると、今日選んでも明日は音が狂ってもう使えません。そもそも冬はスイカがありません。

② シンセサイザーでスイカの音を作る

シンセサイザーはいろいろな音を人工的に作れます。普通のシンセサイザーでは、整数倍音を発するドレミの音を作りますが、中には倍音の倍率を人工的に変えることのできるシンセサイザーもあります。そこで、非整数倍音を作れるシンセサイザーで人工的にスイカの音を作りました。その音を聞くと、あまり面白くありませんでした。その理由はアタック音です。

アタック音とは、楽器の音が出るときの、最初の出だしの音です。実際のギター之音とピアノの音を調べてみると、最初の音の出る瞬間が大変複雑で、ギターとピアノで違うことがわかりました。ちなみにアタック音の部分を人工的に取り除いて、後ろだけを比べて聞いてみると、ピアノかギターかわかりませんでした。

ギターとピアノの音は弦から出ています。ギターはピックあるいは爪で弦をはじきます。ピアノは弦をハンマーでたたきます。発音機構が違うのに、シンセサイザーで作ると同じに音に聞こえます。

つまり、ギターらしさ、ピアノらしさは最初の短い時間の複雑な波形に凝縮されています。この部分は非常に短く、百分の一秒ほどです。この複雑な波形は、シンセサイザーは自動的に作れません。そこで、サンプリングという手法がとられるようになりました。つまり、本物の楽器を演奏して最初の部分だけをコンピュータに取り込み、その後、音の波と倍音列を付け加えるのです。

ギターやピアノの微妙な音色の違いを聞き分けるという耳の能力は素晴らしいです。でもこの能力は音楽だけに使われているわけではありません。知らず知らずのうちに日常会話で発揮されています。人類の言語には、子音と母音があります。日本語の母音は、「あ・い・う・え・お」の5つです。これだけでは複雑なことが伝えられないので、私たちは子音と母音を組み合わせるとたくさんの音を作りました。子音には、

か (k)、さ (s)、た (t)、な (n)、などがあります。「か」をうんと伸ばすと、最後は「あ」になります。「か」という発音は誰でも聞き分けられます。「か」を特徴付けている音は最初の一瞬だけです。その時間もやはり百分の一秒です。「か」を特徴付けている短時間の波形は大変複雑ですが、それは「さ」でも「た」でもない「か」に特徴的な波形です。この区別を私たちは毎日しています。この子音を聞き分ける能力はヒトの進化で獲得されたものでしょう。この能力があるからこそ、ギターとピアノの音色の差が百分の1秒のアタック音だけでわかるのだと思います。

つまり、シンセサイザーでスイカの音階を人工的に作っても、音の立ち上がりのアタック音が作れません。アタック音のない音はすぐに飽きてしまいます。

結局、スイカの音階を実現してくれる楽器を作ることはできませんでした。スイカは球で3次元の立体です。弦は1次元です。その中間は2次元です。2次元は平面です。そこであたらしい音階と楽器が平面から生まれました。

参考文献

Helmholtz, H. (1862) On the Sensations of Tone, (A. J. Ellis 英訳), Dover Publications, Inc., New York.

Prompt, R. and W. J. M. Levelt (1965) Tonal Consonant and Critical Bandwidth, J. Acoust. Soc. Am. 38: 548-560.

コラム2 ベトナムのゴングと音階



ゴングの演奏風景(ベトナム中部高原コントウム省)

ゴングは1人が1枚持ち、紐で左手でぶら下げ、右手に持った小さな棒で円盤の中心をたたく。出た音は、左手で素早くミュート(消音)する。一番左に見えるゴングはコブ付きゴングで、低音を担当する。(柳沢英輔氏撮影)

ベトナムの中部高原には、ゴングという楽器を使う音楽が残っています。ゴングは真鍮製で、縁のあるお盆のような円盤楽器です。一人が一つのゴングを持ち、小さな木の棒で中心付近をたたきます。音階のある8~9個のゴングセットで、それぞれのタイミングで音を出し、音楽を演奏します(写真)。

ゴングセットがどのような音階を持っているかを調べると、全くドレミではありません

でした。また、その音階の中に振動数がちょうど2倍のオクターブの音はありませんでした。

長い間ゴングを使用していると音が狂ってきます。ゴングの調律は調律師がします。調律師は、ゴングのいろいろな部分をハンマーでたたき、音高や倍音の出方を調整します。いくら調律方法を間近で見ても、その原理はよくわかりません。ところが違う村で調律されたゴングのセットを調べると、驚くべきことに2つのゴングセットの音程間隔は全く同じでした。調律師同士が相談して調律してないのに、調律が同じになるのは、彼らの体にゴングの音階が染みついていてとしか考えられません。

ゴング調律師は、高齢の方が多く、それを引き継ぐ若い人がほとんどいません。いつかゴング調律の方法がわからなくなるのではと危惧されています。

参考文献

柳沢英輔 (2019) 「ベトナムの大地にゴングが響く」 灯光舎