目次

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って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、いろんな高さの音が同時に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分かりました。一番低い音をドにすれば、2 番目はファ$^{\sharp}$、3 番目はラ$^{\sharp}$、4 番目はレになります。一緒に鳴らすと、大変不協な和音です。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。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、<u>非整数</u>（1.4、1.8、2.1 など）だからと思います。

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す。

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つくりポリゴノーラと名づけました。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でき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。

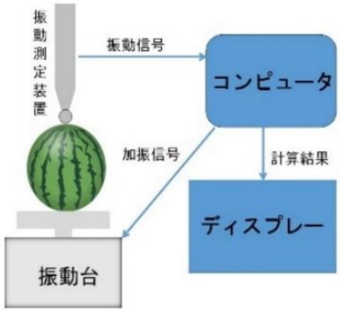


図1−1　スイカを振動させて共振を観察する装置の概略図

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

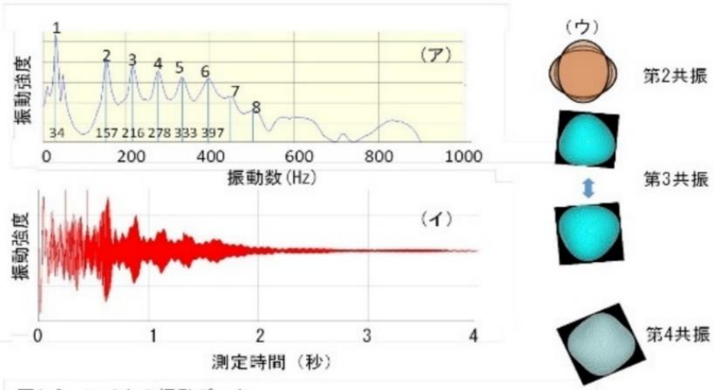


図1-2　スイカの振動データ
（ア）　フーリエスペクトル、横軸は振動数、縦軸は振動の強さ。
（イ）　時間経過に沿った振動の様子。
（ウ）（ア）の各ピークでの震え方の模式図。

ろ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あるはずです。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、次は下にといった具合です。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れば、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、果物の食べご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）のことです。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 つの支点に支えられた弦を弾いたり（ギターやハープなど）、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

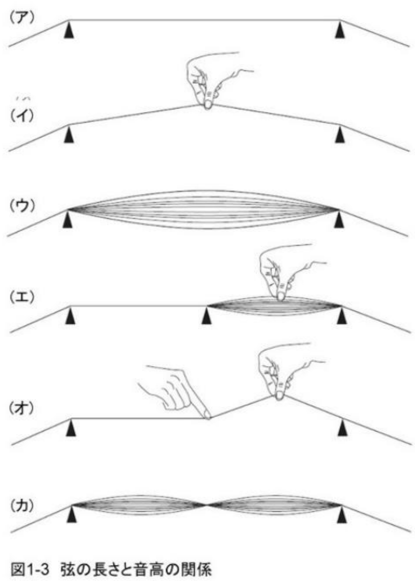


図1-3　弦の長さと音高の関係

ブ上の高い音（2 倍音）が出る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が、つまむ位置が違います。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。

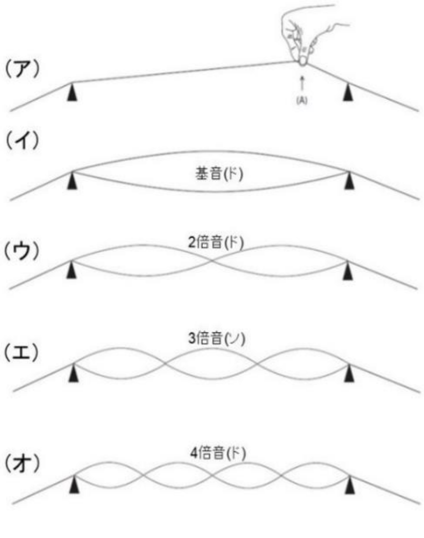


図1-4 弦の振動に含まれる整数倍音

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 1／8〜1／9 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。

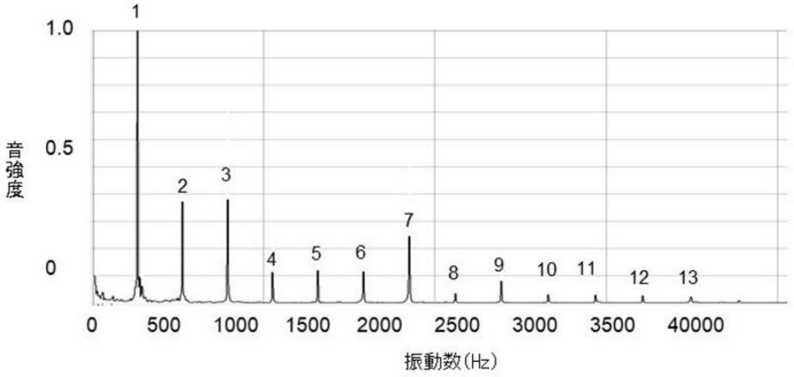


図1-5　ピアノのド(261Hz)のフーリエスペクトル
縦軸は基音(261Hz)の音の強さを1.0とした相対強度を示す。ピーク上の番号は、倍音番号を表す。倍音のピークは等間隔に並んでいる。このことは、2，3，4倍音の音高は、基音の2，3，4倍であることを示す。

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。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。

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 Inovation　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.

Helmhortz, 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。一番低い音が音高を与えます。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プ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ラをたたくと、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ません。

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$^{\#}$、ラ$^{\#}$、ド$^{\#}$、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$^{\#}$は、典型的な不協和な音の組み合わせです。またド$^{\#}$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、スイカのだ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っ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
真鍮ででき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。

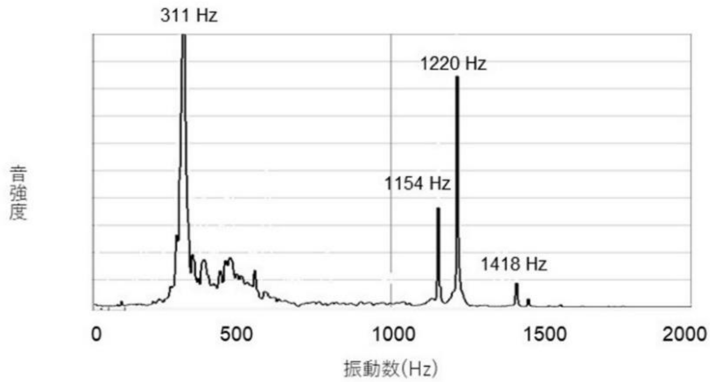


図2-2　ガムランで使われるボナンのフーリエスペクトル
ピークはピアノ（図1-5)と比べて不規則に並んでいる。

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ると思います。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、弦の長さでいうと 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ます。B は 150 Hz の音で 150 だけではなく、300、450、600 Hz がでます。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。

表2-1　スイカの音階とドレミの音階

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

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。

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

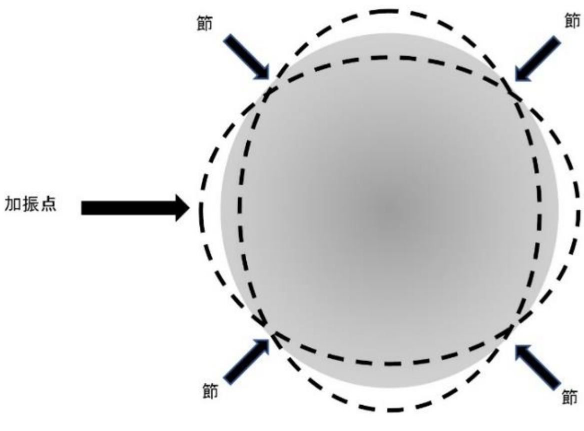


図2－3　スイカの振動する様子
　スイカを第2共鳴振動数で振るわせると、図のように風船を上から押さえたり引っ張ったりしたように震える。斜めの矢印は、振動しないので節を示す。

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、中空の木の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。実際のギターの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のではありません。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て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.

Promp, 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ゥム省）
　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る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

第 3 章　平面楽器、ポリゴノーラの誕生

（ポリゴノーラの音源 QR コード）

１　ポリゴノーラの名前の由来

生物は時間とともに変化します。人間なら歳を取り、果物なら腐ります。しかし、金属や、乾かした木はなかなか朽ちません。オーケストラで見られる弦楽器や金管楽器は 200～300 年前の古いものがたくさんあります。そこで平面の楽器も木や金属で作ることを考えました。作ってみるとその音の高さは数百 Hz という人の耳にちょうどよい高さになりました。

まず円盤楽器から作り始めましたが、その後正三角形、正方形、正五角形、正六角形の平面楽器も作りました。だんだん種類を増やすに従い、その楽器に名前をつける必要が出てきました。正三角形はもっとも辺の少ない平面です。辺の数は正方形は 4、五角形は 5、六角形は 6 です。どんどん辺の数を増やしていくと、最終的には円になります。つまり”無限多角形”を円と考え、この平面楽器に総称として「ポリゴノーラ（Polygonola)」という名前をつけることにしました。Polygon とはギリシャ語で “多角形”を意味する言葉です。Ola というのはスペイン語で“波”を表します。 “多角形”の平面楽器から音の“波”を出すので、Polygon-ola つまり「ポリゴノーラ（Polygonola)」を造語しました。

正三角形は、トリゴノーラ、と名づけてもいいでしょう。“三”は“Tri”なので“Trigonola”です。四角形（Quadrangle）は、クアドローラ（Quadrola)、五角形（Pentagon）はペンタゴノーラ（Pentagonola)、六角形（Hexagon）はヘキサゴノーラ（Hexagonola）となります。円盤は、Disc なのでディスコーラ（Discola）です。

以下の節では、まず円盤が出す音について詳しく説明します。

２　円盤の振動の様式（クラドニ図形）

スイカを振動させたときに風船を上から押したり引っ張ったりしたように震えるという説明をしました。そこで、円盤をたたくとどんな音や倍音が出るのか、音が出るとき円盤はどのように震えるかを調べました。このときに大いに役立つのが、クラドニという人が発見した方法です。

クラドニ（E. F. F. Chladoni, 1756～1827、ドイツの物理学者）は、平面の振動の様子が眼に見える方法を記しました。振動している平面に砂をまくのです。すると振動するところは砂が跳ねるのでその場所にとどまれません。振動しない場所があればそこに砂が移動して集まります。フライパンを使った実験を図３−１に掲げました。

フライパンの底に白い砂を敷いて底の一か所をきまった振動数（音）で振動させてみると、いろいろな砂の模様ができます。図３−１の（ア）では、1081 Hz という振動（音）でフライパンの底を振動させました。するとフライパンの縁（ふち）に砂が集まり、白いドーナツのような環状の模様ができました。これはフライパンの周縁は振動していないが、まんなか付近が激しく振動して砂がそこから弾き飛ばされ縁（ふち）に集まったこ

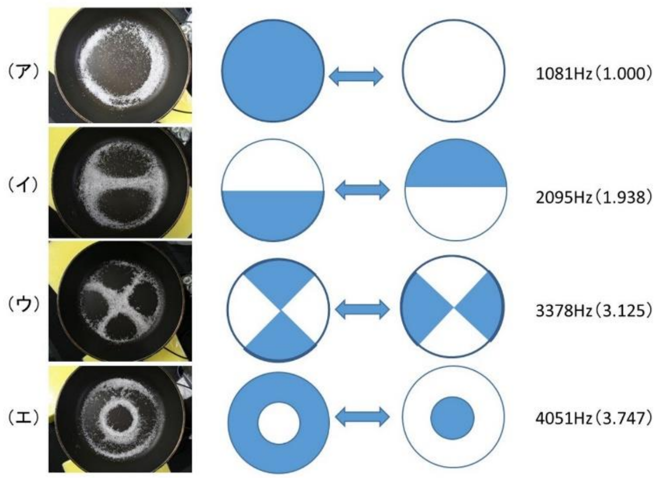


図3−1　クラドニの図　フライパンに砂を敷きフライパンの下から振動を与えた。

とを意味します。その様子を右の模式図に示しました。つまり（ア）では、ある時はフライパンが紙面の下にへこんだ状態ですが、次の瞬間には紙面の上に盛り上がっていることを示します。振動しているときはそれを交互に繰り返しています。ただしフライパンの周縁部は振動しません。

（イ）は、（ア）よりも高い振動数 2095 Hz で振動させた時のものです。砂はフライパンの外縁だけでなく、フライパンの中心をとおってまっすぐ水平線上に集まりました。これは、この砂の線の上側と下側は激しく震えていて、白い砂のある線では、ほとんど震えていないことを表しています。線の部分を節（ふし）といいます。弦の振動でも振動しないところを節といいますが、同じです。これを模式的に示したのが右の図です。円の下半分と上半分が塗り分けられています。これは、下半分が紙面の上にあるとき、上半分は紙面の下にあり、逆に下半分が紙面の下にあるときは上半分が紙面の上に出るという動きを繰り返していること示しています。（ア）と（イ）の中間の振動数でフライパンを震わせても、このような模様は全く出ません。共振しないからです。1081 Hz と 2095 Hz の振動数を与えたときだけ、フライパンに撒いた砂が図の（ア）や（イ）のような模様を作ります。

（ウ）では、フライパンにまかれた砂は×印になっています。これは節が 2 本の線になっていることを示しています。右の模式図で説明すれば、×印で囲まれた 2 つの相対する上下の部分が紙面の下にあるときは左右の白い部分は紙面の上にあり、次の瞬間にはその逆になっていることを示しています。

最後に、（エ）では、中心に小さいドーナツ状のもう一つ円ができています。この振動は右の模式図のように説明できます。中心の円が紙面の下にあるとき、外側の部分は上にあり、次の瞬間では、中心の円が紙面の上に飛び出し、外側の部分が下に沈むという振動です。2 つの円のうち、左では外側の色のついた円は紙面の下にへこんでいる様子を、右の白い円は紙面の上の盛り上がっている状態を示しています。

このようないろいろな振動パターン（模様）を振動様式といいます。この様式には 2 種類あります。中心に“直線”が通る振動様式と、中心に“円”の模様ができる様式です。本書では便宜上、直線の節線が中心を通る様式はピザを切るときの様子と似

ていますので、ピザ様式［(イ）と（ウ)]、節線が円状にできるのは、ドーナツに似ているので、ドーナツ様式［(ア）と（エ)］と呼ぶことにします。(ア)（イ)（ウ)（エ）に共通しているのは、フライパンの外縁に、いつも砂がたまることです。これは、一番外側はいつも振動していないことを示しています。

このように砂の模様が綺麗にできるのは、特定の振動数でフライパンを振動させたときのみです。その振動数は、フライパンをたたいて発生する音とおなじです。

図 3−2 にはこのフライパンをたたいた時に見られる音のフーリエスペクトルを示しています。いろいろなピークが出ていますが、例えばそのピークのうち 1081 Hz のピークに注目してみましょう。先ほどの図 3−1（ア）で示したドーナツ様式が出るのは、1081 Hz の振動数でフライパンを振動させたときです。2095 Hz にもピークが出ていますが、この振動数でフライパンを振動させると、図 3−1（イ）のようなピザ様式が出ます。逆に言うと、この音が出ているときは、フライパンの底は、このような様式で震えていることになります。

図 3−2 でみられるようにフライパンをたたくと、たくさんのピークが同時に出ていますが、たたいたときにはフライパンの底はいろいろな様式で振動しており、その

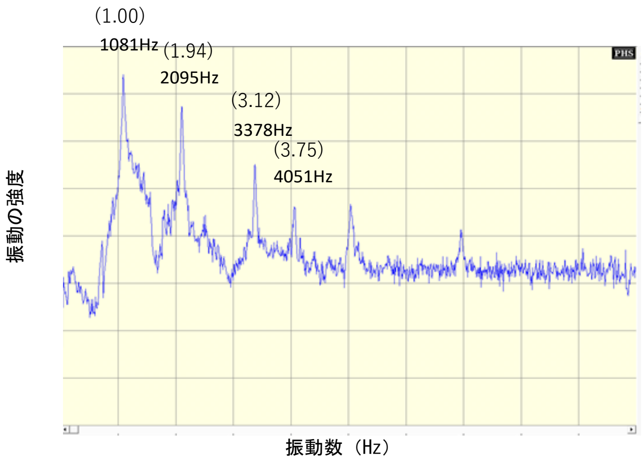


図3-2　フライパンをたたいた時に出る音の共鳴スペクトル
　フライパンをたたいてその音をマイクにとり、フーリエ解析にかけて共鳴スペクトルを取った。図3-4と比較するとそれ座俺のピークのすそ野が広がっている。

様式一つ一つがそれぞれの音と対応しています。したがって、図 3−2 からわかるように、フライパンを単純にたたくといろいろな音が混じって出ていることがわかります。この共鳴ピークも基音を 1081 Hz（1.00）とすると、ほかのピークは整数の比で並んでいません（1.94、3.12、3.75)。またフライパンの振動様式は下に述べるように周辺が固定された振動と呼ばれ、その周囲（縁）は常に節になるのでいつも白い砂がたまります。

周辺が固定されている円盤と、周辺が固定されていない円盤では出る音が全く違います。音色が違います。どちらの円盤からも非整数倍音が出ますが、周辺が固定されている円盤と、自由に震える円盤はまったく違う倍音がでます。フライパンは周囲が固定されているとみなせます。いわゆるフライパンの外側についている“かえし”の部分は振動を抑制します。円周を固定した縁構造は太鼓やタンバリンにも見られます。たたく円盤の縁に何かついていたり、円盤の縁が何かに固定されたりしているのです。ボナン、ゴング、ティンパニーや和太鼓もそうです。余韻の少ない音がします。銅鑼（大きなゴング）は、唯一の例外です。

以下に周辺が固定された円盤の振動と周辺が自由に振動する円盤の振動について説明します。

３　円盤の周辺固定と周辺自由振動

（１）　円盤の周辺固定振動

和太鼓に代表されるような打楽器の出す音はあまり音程感がありません。ティンパニーはある程度の音階が出せる楽器です。ティンパニーではたたく場所が膜の端と決まっており、中心をたたくと音程感のある音が出ません。また、ティンパニーの底はすぼまっています。この構造こそ音程感のある音を出す秘密です（Rossing, 1983)。それでもティンパニーでは 4〜5 の音程しか出せません。

ゴングはベトナムで使われている円盤状の楽器ですが（コラム 2 参照)、これも縁がスカートのようになっているので、周辺の振動は、ある程度制限されていることが

分かりました。

太鼓やティンパニーの音は周囲が完全に固定された膜の振動から出ます。また、フライパンも周囲の振動が抑制されています。どれも面の振動で、弦ではありません。面の振動では整数倍音が出ません。面の振動で音程感のある音を出すことが難しい原因がここにあります。

この困難を克服したのがトリニダード・トバゴで発明された打楽器スチールパンです。棄てられたドラム缶の底をハンマーでたたいて滑らかな凹面を作り、そこにさらに多数のいろんな大きさの楕円形のふくらみをつけ、その楕円の大きさを変えてドレミの音程を出すように作られた楽器です。この技術は大変むつかしく、基音以外に3倍音を出すために特殊な技術が必要です。ドを基音とすれば、3倍音まで、つまりド、ド、ソがでると、スチールパンでドの音程が出ているように感じます。しかし、4倍音以上の整数倍音は出ませんが、逆にこれがスチールパン独特の音色を生みます。

周囲が固定された円盤の出す倍音の比率は計算で求められます（Leissa, 1993)。表3－1（上段）に示します。

振動比率の理論値（上段）

n	m			
	0	1	2	3
0	1.000	3.893	8.722	15.484
1	2.081	5.954	11.754	19.486
2	3.414	8.279	15.056	23.758

上の表の（0 0）を1081とおいたときの計算値（中段）

n	m			
	0	1	2	3
0	**1081**	**4208**	9429	16738
1	**2250**	6436	12706	21064
2	**3691**	8950	16276	25683

フライパンの実測値（下段）

n	m			
	0	1	2	3
0	1081	4051		
1	2095			
2	3378			

表3－1　周辺固定円盤の振動数の比率　nは、縦の節の直線の本数；mは、円の節数の数。上段、円の節も縦の節の直線も無いとき（0 0）を、1.000とした。中段、上段の表の（0 0）の値に1081を入れたときの各振動様式の計算振動値。下段、実測されたフライパンの振動数

ここでｎとｍの表記がありますが、ｎは円盤を横切る節直線（ピザ）の本数、ｍは円の節線（ドーナツ）の本数とします。表し方は（ｎ　ｍ）とします。周辺が固定される場合は図３−１のように白い砂がいつもフライパンの外縁部にたまります。そこで、その節はｍには数えません。図 3-2 に示した（ア）～（エ）の振動様式はそれぞれ（0　0）（1　0）（2　0）（0　1）とあらわせます。

この表３−１（上段）によると、直線が横に１本だけの図３−１（イ）（１　0）の振動数は、（ア）（0　0）の 2.081 倍であると予測されます。

これが理由でなんとなく、オクターブの音が出ているような気がします。スチールパンでは、2 倍音を出すことは容易です。実際に基準の 1081 Hz を 2.081 倍すると 2250　Hz となり（中段）、観測された 2095 Hz（下段）に近いことがわかります。また同様に図３−２（ウ）はｎが 2、ｍが 0、すなわち（2　0）なので 3.414 倍（上段）です。これは、整数倍音の 3 倍音からかなり外れるので、スチールパンで 3 倍音を作るには技術がいります。フライパンでは出ません。1081 Hz を 3.414 倍すると 3691 Hz となり（中段）、3378 Hz（下段）が観測されています。円の節線がもうひとつが現れる（0　1）では 1081 Hz の 3.893 倍で、4208 Hz と出ていますが、これも実測値の 4051 Hz に近いです。周囲が固定された円盤では、1 倍、2.081 倍、3.414 倍、3.893 倍の倍音が元々出るので、スチールパンではそれを調整して、1、2、3、4 倍音が出るように調整しています。このように周囲を固定された円盤の共鳴振動数は理論的に計算できます。

（２）　円盤の周辺自由振動

世の中で、どの面も自由に振動できる円盤楽器は銅鑼を除けば存在しませんでした。しかし、銅鑼には論理的な音階がありません。ガムランでも円形の銅鑼（ゴング）は使われますが、大きさの違う 2 種類の音程を出す銅鑼が主として使われます。そこで周辺が自由に振動する円盤楽器を作り、円盤楽器のための音階を作れば、新しい響きと音楽が実現するのではないかと考えられます。

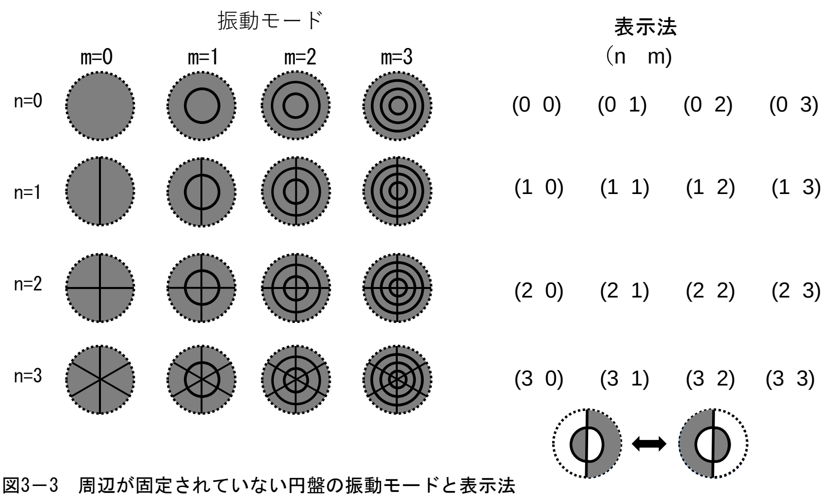


図3－3　周辺が固定されていない円盤の振動モードと表示法
nはピザモード、mはドーナツモード、と本書では呼ぶことにする。円盤をたたいて出る様子を示すが、すべてが出るわけではない。円盤をたたくと（0　1）モードが最低音（基音）として出る。
右下の図は、n=1,m=1のモードの場合の振動を示している。青色の部分は紙面の下へ、白色の部分は紙面の上に出ていることを示す。ある一瞬は左の状態で、次の瞬間は右という風に、これを交互に繰り返して振動する。

周辺が自由に振動できる円盤の振動様式は、図 3－3 のようになります。

振動の様式は、周辺固定の円盤の場合とほとんど同じです。ドーナツ様式や、ピザ様式があります。が、ただひとつ違いがあります。それは周辺がいつでも自由に振動するという事です。円周の外縁が節になることはありません。いつでも振動しています。そこで図 3－3 の円の周辺は実線でなく破線で示しています。これは周辺がいつも自由に振動していることを表しています。

図 3－2 の周辺固定のフライパンをたたいたときのスペクトルのピークのすそに注意してください。ピークのすそが広がっています。図 2－2 に示したボナンでもピークのすそが広がっています。一方、周辺自由振動の円盤のスペクトルを図 3－4 に示しました。ピークのすそはほとんど広がらず、非常に細くて鋭いピークがたくさんあります。すそが広がるということは、中心のピーク以外の振動、つまりそれより低い音や高い音が一緒に混ざり音がぼやけます。

周辺自由振動の円盤ではすその狭い鋭いピークがはっきり出ているので、音が鮮明に聞こえます。周辺固定と自由の大きな違いです。

円盤の周辺自由振動では倍音の強さも周辺固定と異なります。周辺が自由に振動

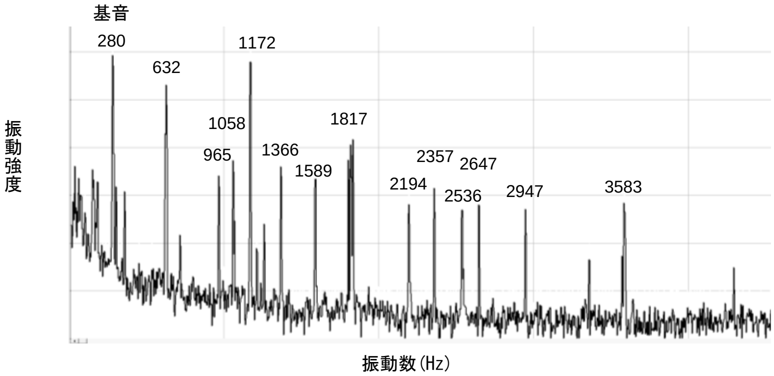


図3－4　周辺が自由に振動できる円盤をたたいたときの共鳴スペクトル
一つ一つのピークは鋭く、ボナンやフライパンのようにすそが広がっていない。

する円盤では、音の強度（ピークの高さ）は基音（280 Hz）の約 5 倍の振動数のもの（1172 Hz）でも基音と同程度強く出ています。周辺が固定された円盤の場合（図3－2）は倍音は基音の 7 倍ほどまでで、そのピークの高さはどんどん低くなります。周辺自由振動の円盤は、たたいたときに出る基音や倍音のピークが鋭く音が鮮明です。その音は深く余韻が長く美しい音色がします。フライパンをたたいたときとはまったく別です。ボナンも余韻がほとんどありません。外周部のスカートの縁構造が自由な周辺振動を妨げるからと思われます。

このように円盤の振動には、周辺固定と、周辺自由な 2 つの振動があります。後者を周辺自由振動といいます。ポリゴノーラは周辺自由振動できる仕組みを持った新しい楽器です。ジャズで使うシンバルは中心が固定されており、端をたたくので全く違う音色がします。

次に分かったことは、周辺が自由に振動するためには、「円盤全体が自由に振動する支持方法」が非常に重要であるということです。

円盤を空中に浮かせれば理想的ですが、重力のある地球上では難しいです。ゲームセンターにあるサッカーゲームのように、台に小さな穴を開けて空気を噴出して、プラスチックの円盤を浮かせる構造も考えられますが、たたくたびに円盤が台に当たり、余計な雑音が入ります。

そこで、ポリゴノーラを支持するためにロープ、針、木、スポンジ、ゴム、ヘチマタワシを試しました。最終的にたどり着いたのが「メラミン樹脂」でした。商品名では「激落ちくん」として売られている白いスポンジ樹脂です。これを小さく切って並べ、その上に円盤を乗せます。たたくと余韻が長く、深く澄んだ音がし、クラドニ図形を作らせて調べると、円盤の振動がすべて出ており、妨げられていないことがわかりました。

しかし、机の上に小さな「激落ちくん」を置いてその上に円盤を乗せてたたいても、余韻はそこそこですが、音色があまりよくありません。円盤の下に向かう振動が机に吸収・反射されて、空間に広がらないからでしょう。幅 20 センチ、高さ 10 センチ、厚さ 1 センチほどの長方形の木の板 2 枚を十字型に組み合わせ、十字の上端に「激落ちくん」を置いてその上にポリゴノーラをおいたり、直径 1 センチ、長さ 10 センチのアルミの棒 3 本の上に「激落ちくん」を小さく切って乗せ、その上に円盤を乗せたりしました。こうすると余韻の長い、強くて美しい音色がすることがわかりました。

※激落ちくん®　はレック株式会社の登録商標です。

４　周辺自由振動する円盤楽器

このようにメラミン樹脂で支持された円盤をたたいて、複数の共鳴振動数を決定し、その振動をひとつずつ別々に円盤に与えながらクラドニの図形を描くと図 3－3 のようになりました。この図は節線が実線でかかれていますが、いつも一番外の円周は破線であることに注意してください。つまり円の一番外の縁はいつも自由に振動しています。またドーナツのような丸が描かれている振動様式がありますがこれは中心が振動している模様です。シンバルのように中心が固定されていると、この模様は出ません。つまりこの音色はシンバルからは出ません。中心と周辺の自由振動を実現する楽器「ポリゴノーラ」の音色の特徴は、このドーナツ様式の音にあるといえます。

次に図 3−3 の右に書いてある括弧の数字を説明します。表 3−1 にも出てきましたが、n は中心を横切る直線（ピザ）の節線を表します。この節線が 0 本の場合は一番上の段の行になります。n＝0 の行です。ピザ節線が 1 本なら n＝1 となります。図 3-3 では上から 2 段目の行に相当します。2 段目の行は、ピザの節線が 1 本出ているものばかりを集めています。右に行くにしたがって、円（ドーナツ）の節線が 0、1、2 と増えていきます。

ドーナツの節線は m で表します。m＝0 はドーナツ節線が一つも出てこない振動様式です。図 3-3 では一番左の縦の列に相当します。ここではドーナツの節線は 0 で、下に行くに従いピザの節線（n）の数だけが増えていきます。カッコ内に書かれた数字では n が最初で、m を後ろに表記します。(0　0）はピザの節線もドーナツの節線もありません。(0　1）はピザの節線が 0 本で、ドーナツの節線が 1 本です。(1　0）は逆に、ピザの節線が 1 本で、ドーナツの節線が 0 本です。この表記を使えば、(2　3）のように、ピザ節線が 2 本でドーナツ節線が 3 本のような複雑な振動様式も簡単に表すことができます。

図 3−3 の右下に、円の振動と節の関係を例示しました。例は（1　1）の振動様式です。ピザの節線が 1 本、ドーナツの節線が 1 本です。ある瞬間は白の部分が紙面の上で、色がついているほうが下だとすると、次の瞬間にはその逆になります。

重要なことは円盤をたたくとこれらの振動様式が同時に多数現れ、たくさんの音が同時に出ることです。振動様式によって出てくる音の高さは違います。n や m が増えるに従い、出てくる音の高さが高くなります。この時の、n と m の関係については付録 2 に詳しく述べました。

５　円盤楽器からでる多様な音色

たたく場所を中心から少しずつずらすとどうなるでしょうか。それを比較したのが、図 3−5 です。

一番上の段は中心をたたいたときのスペクトルです。2 段目は中心から半径の 1／4 離れたところをたたいたスペクトルです。1／4 をたたくと一番上では見えなかった新しいピークがたくさん出現します。たたく場所により、出てくる音が少しずつ増えます。中心をたたくとピークが 8 本、中心から 1／4 離れたところをたたくと 21 本、中心から 1／2 のところをたたくと 27 本､中心から 3／4 のところをたたくとピークが 28 本出ます。

中心をたたくと、ドーナツモードの振動が主で、出る音も少なく音色は単純です。しかし、たたく場所が端に行くに従い出る音の数が増え、ピザモードの振動（音）が増え、音色が複雑になります。

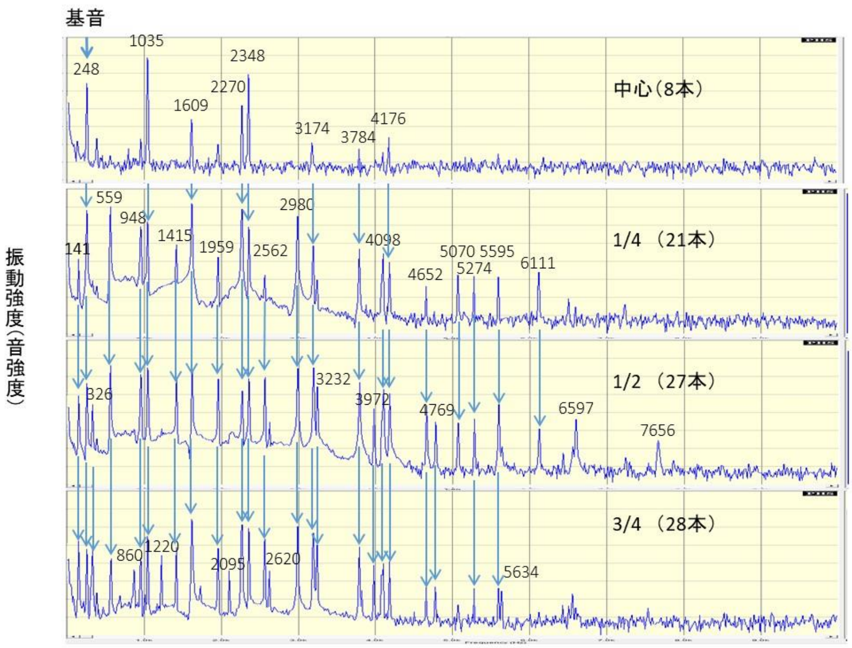


図3−5　青銅円盤(厚さ2ミリ、直径233ミリ)の、たたく位置を変えた時のスペクトル。図中の1/4、1/2、3/4の表記はそれぞれ中心から1/4、1/2、3/4の位置をたたいた時のスペクトル。()内は主要スペクトルの本数。

中心から 1／4 の所をたたいた場合、中心と比べるとピザの数が多いです。ピザ様式の音が増えたことにより、ピークの数は中心の 8 本から 21 本に増えました。

図 3−5 の 3 段目のように中心から 1／2 のところをたたくと、さらにピークの数が 6 本増え、27 本になりました。4 段目のように中心から 3／4 はずれたところをたたくと、28 本のピークが出ました。

中心から 3／4、逆に言うと端から 1／4 をたたいたときの音色は、中心とずいぶん違います。中心はピザ様式の音が出ず、ドーナツ様式の音が主で単純な音色がします。端をたたくとピザ様式に由来する多くの倍音が出て音色が複雑になります。どこをたたいても、基音とした 248 Hz（0　1）の音は出ます。耳にはこの音高が残ります

このように、たたく場所によって音色が変わることは、円盤に最適な音階を作るときに重要なポイントとなります。これまでの円盤の倍音の結果を弦と比べると以下の 2 つのことがわかりました。

1． 円盤は弦よりも複雑な倍音列を発生する

弦の時は、整数倍音しか出ません。また 2 章の図 1−5 で示したように、ピアノでは、せいぜい十数本しか出ていません。それに比べると、図 3−5 でみられる多数のピークから、円盤から出る音は、大変複雑であることを示しています。またその並び方は、非整数倍です。

2． たたく場所により、倍音列の出方が変化する

図 3−5 に示したように、端をたたくと、中心よりたくさんのピークが出ます。これは、中心をたたいた時には出なかったピザ様式の音が多く出るからです。実際に端をたたくと、中心の音色とは全く違い音色がします。ギターで弦の真ん中を弾いたソフトな音色と、弦を止めているブリッジの近くを弾いた時のハードな音色の違いと原理的に同じです。

n	m				
	0	1	2	3	4
0		0.679	0.390 0.841	0.256 0.590 0.893	0.192 0.441 0.692 0.909
1		0.788	0.498 0.872	0.351 0.645 0.908	0.272 0.499 0.724 0.928

表3-2 ドーナツの節線の中心からの位置
　数字は、円の節線の位置を中心からの半径の比率であらわしている。0.500は中心と端の真ん中を通る節円を示す。

図 3−3 に出ている節線のちょうど上をたたくと、そこが強制的に震えることになりますので、そこに節線を持つ振動様式が出にくくなります。たとえば、円盤のちょうど中心をたたくと、すべてのピザ様式の節は中心を通っていますので、ピザ様式の音が出にくく、だからドーナツ様式の音ばかりになります。図 3−5 で中心をたたいた時のピークが少ない理由がここにあります。それでは m＝１の円の節線の真上をたたくとどうなるでしょうか。

それを知るには（0　1）のときに出る円の節線が円盤のどこに出るかを知らねばなりません。それを計算で出したのが表 3−2 です。

これを見ると基音がでる振動様式（0　1）では、節円（輪線）は中心から半径の 0.679 倍のところにできるということがわかります。

m＝2 の欄には数字が 2 つあります。ドーナツの節円が 2 つできるからです。2 つの節円のうち内側の円は中心から 0.390 離れており、外側の円は 0.841 離れているということです。m＝1 のときの節円の真上をたたくと（0　1）の音が出にくくなります。中心から 0.679 離れた所および端をたたいた時のスペクトルを比較しました（図 3−6)。

上段が中心を、中段が中心から半径で 0.679 離れたところをたたいた時のスペクトル、下段が端をたたいた時のものです。0.679 離れたところをたたくと（0　1）様式

の振動に由来するピークのが出ないことがわかります。また（0　4）のピークが非常に小さくなりました(破線矢印)。これは、表3−2のm＝4のところを見ると、3番目に0.692という数字が見えます。0.679の位置をたたくとこの0.692に近いので、(0　4）も出にくくなると思われます。中心から0.679のところをたたくと、(0　1）様式に由来する音が小さくなるので、基音が出にくくなり、音色が変わります。このように、たたく位置をほんの少し変えるだけで、音色が大きく変わるのがポリゴノーラの特徴です。

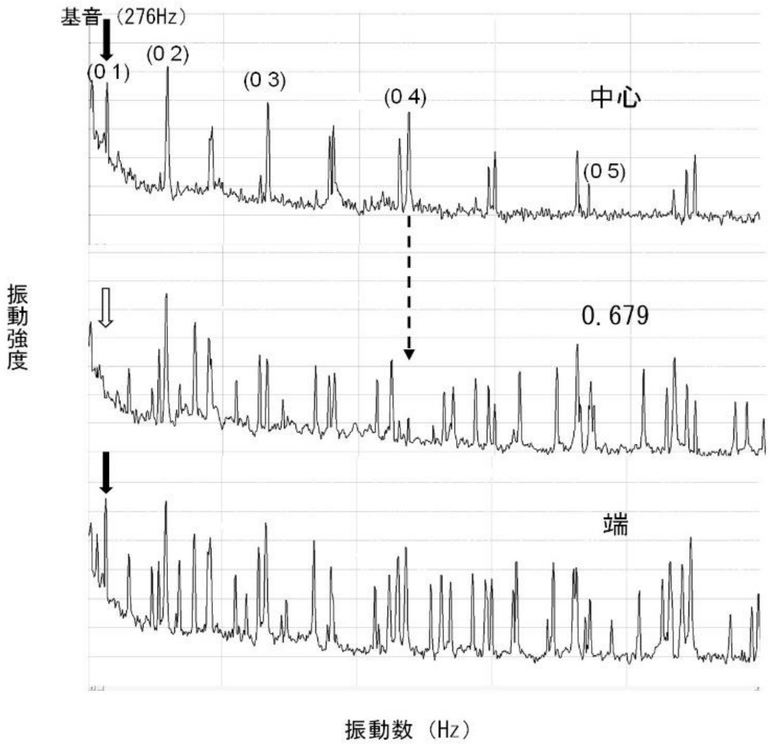


図3-6　中心、中心から半径で0.679離れた場所、端をたたいた時のスペクトル
黒矢印は、基音（276Hz）を示す。中心から0.679離れた所をたたくと、その振動（音）が出ない（白矢印）。また（0　4）のピークもほとんど出ていない。端をたたくと両方とも出る。カッコ内の数字は図3-3に示したモードを表す。中心をたたくと、ドーナツモード（0　m）の音が主となる。

６　余韻について

これまで説明したように、円盤をたたくといろいろな音が出ます。基音に対してその比を計算すると、いろいろな非整数倍音が出ていることがわかりました。また、たたく場所で非整数倍音の出方に違いのあることも分かりました。ここでは余韻すなわち時間的にもスペクトル（音色）に変化が起こることを説明します。

円盤をたたいた直後とあとでは、ずいぶんスペクトルの本数や相対的な強度が変わります（図 3—7）。

上の段の 4 つの図はそれぞれ、中心、1／4、1／2、3／4 の位置をたたいた直後のスペクトルです。下の段はたたいてから 7 秒後のスペクトルです。

例えば中心をたたいた時、最初は図 3—5 で説明したように 8 本のピークが見えますが、7 秒後には 2 本が残るだけでそれ以外の 6 本は消えています。基音となる（0 1）のピークは 7 秒後にはかなり弱くなっています。つまり余韻の長い音が 2 個残り、それ以外の音はたたいた直後は鳴るけれども、すぐに消滅してしまうことを示してい

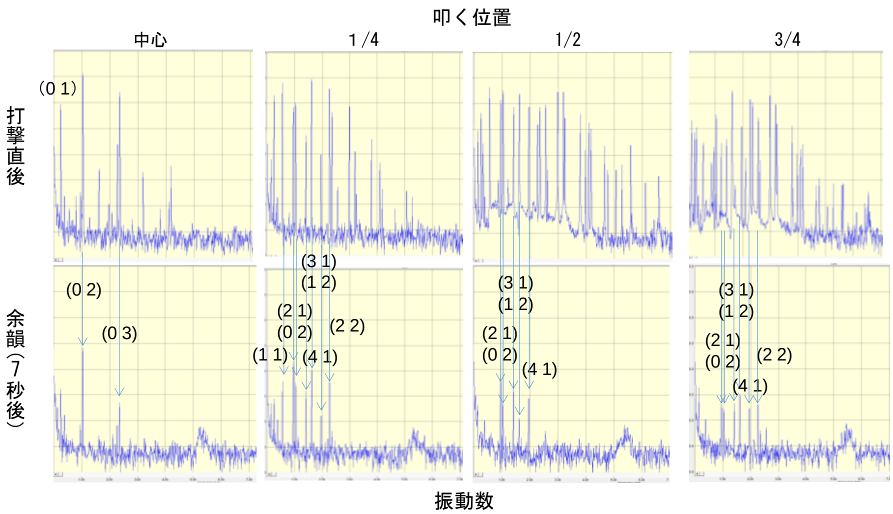


図3-7　余韻を示すスペクトル
　上のスペクトルは円盤をたたいた直後のスペクトル。下は、たたいてから7秒後のスペクトル。（　）内は余韻で残る主要な振動モードを示す。余韻はピザモードが長い。

ます。中心をたたいて7秒後に強く残るピークの2本は、振動モードであらわすと（0 2）と （0 3）です。

中心から1／4の距離のところをたたいた場合は、直後にはたくさんピークが出ていますが、7秒後には7本に減っています。それらは振動モードであらわすと（0 2）、（1 1）、（2 1）、（3 1）、（4 1）、（1 2）、（2 2）です。1／2のところをたたいた場合は7秒後には（0 2）、（2 1）、（3 1）、（4 1）、（1 2）の5本になります。3／4のところをたたいた場合は、（0 2）、（2 1）、（3 1）、（4 1）、（1 2）、（2 2）の6本になっています。これらのことから、たたく場所により、たたいた瞬間の音も違うし、余韻も違うことが分かります。このように円盤の音色は、たたく場所、たたいてからの時間によって変化します。

余韻とは時間がたっても鳴っている音のことを言います。そこで、グラフの書き方を変えてみます（図3－8）。このグラフは横軸が時間、縦軸は音の高さです。

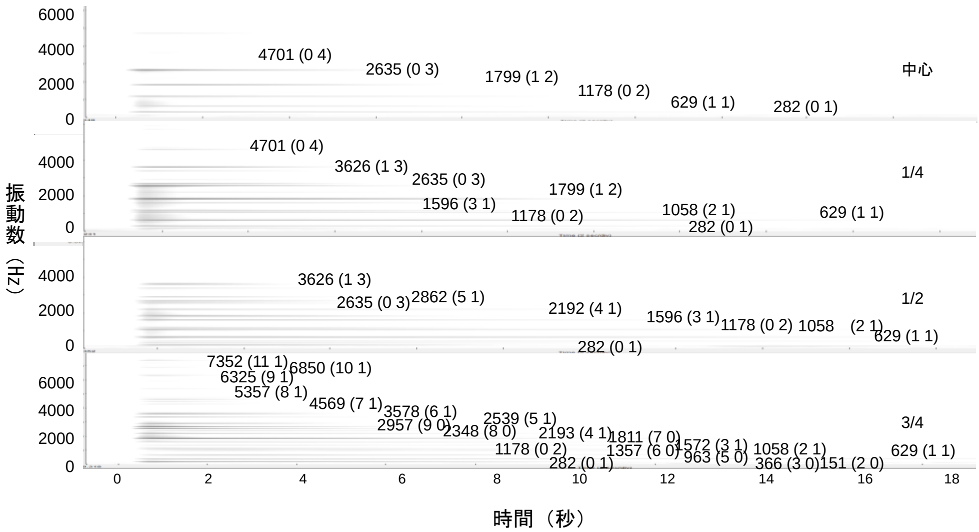


図3－8 余韻を示すグラフ
上から中心、中心から1/4、1/2、3/4はなれた所をたたいたときの音の強さと振動数を示す。

音が出ると横線として表され、音の高さは横線の上下位置で、強さは線の濃さに出ます。図 3－8 にはたたく場所による余韻の違いを、振動数と様式で示しています。一番上が中心をたたいたときで、一番下が中心から 3／4 の場所をたたいたときのグラフです。数字は振動数で、余韻が終わったところに書いています。カッコ内は振動の様式表示です。

中心をたたいたときの一番上のグラフを見ると、特徴的なドーナツ様式の（0　1）、（0　2）、（0　3）、（0　4）の音が出ていて、282 Hz すなわち基音（0　1）の音の余韻が弱いながらも一番長く出ています。それ以外の音は（1　1）と（1　2）ですが、（0　1）の音の余韻が一番長いです。ところが、中心から 1／4 はなれたところをたたくと事情が変わります。一番長い余韻は（1　1）の 629 Hz の音です。ドーナツ様式の（0　1）、（0　2）、（0　3）、（0　4）は出ることは出ていますが、いずれも余韻が短く弱くなります。その代わり、ピザ・ドーナツ混合様式の（1　1）、（2　1）、（3　1）が出ています。

中心から 1／2 はなれたところをたたくと、基音の 282 Hz（0　1）は余韻がさらに短くなり、混合様式の（1　1）、（2　1）、（3　1）の余韻が長くなります。混合様式は（5　1）まで出ています。一番余韻が長いのが、（1　1）様式の 629 Hz の音です。

中心から 3／4 はなれたところをたたくと、（n　0）様式の音が（9　0）まで出て、さらに、混合様式の（n　1）様式も（11　1）まで出ています。時間が 10 秒以上でも、（n　0）と（n　1）の様式の音が出ており、ドーナツ様式（0　m）の音は余韻としてはほとんどありません。

以上のことから、余韻はたたく場所により変わり、中心をたたいたときはドーナツ様式の音が余韻としてのこり、端をたたくと（n　0）や（n　1）のようなピザ様式の振動が余韻として残ることがわかりました。

重要なことは、ギターと同じで、ポリゴノーラもたたく場所によって音色が変わるということです。

ポリゴノーラの多様な音色は下の QR コードから聞けます。

灰野敬二氏『Red Bull Music Academy Tokyo 2014』 での講演と
円盤ポリゴノーラの演奏

小沼純一氏のポリゴノーラの紹介文と神戸公演での
三角ポリゴノーラの演奏（桜井真樹子氏）

灰野敬二氏の東京公演での円盤ポリゴノーラの演奏の一部

神田佳子、稲野珠緒両氏による東京公演での
円盤ポリゴノーラの演奏の一部
（『First Flight』作曲：一ノ瀬トニカ）

コラム３　スチールパン

～～～

スチールパンはカリブ海の島国トリニダード・トバゴで 1930 年頃に作られ、20 世紀に作られた最も成功したアコースティック楽器のひとつといわれます。一説では、島がイギリス領であったころ、音楽を禁じられた人々が石油のドラム缶を水平に切り、底をへこませてたたいたことからスチールパンが生まれたそうです。へこませた底にさらに小さなサイズの異なる凹面を作ると、異なる音高が作れます。これを発展させてドレミの音階が出るスチールパンができました。周辺は固定されています。

内部に作られたへこみは完全な円ではなく、わずかに楕円形をしています。この形が、3 倍音すなわち基音がドとすれば 1 オクターブ高いソの音を生む秘密です。また小さく凹型にへこませた形が、2 倍音に近い音を出す秘密です。全部で 3 つの倍音（ド、ド、ソ）が出ます。楕円からはこの 3 つの倍音しか出ないので、我々の耳にはピアノのような、澄んだ音程感のある音色としては聞こえず、スチールパン独特の音色が聞こえます。

最近では、持ち運びに便利なハンドパンが広まっています。これは凸面を 2 つ重ねた、どら焼きのような形をしています。膝の上に置いて手指でたたいて演奏できるので、ストリートミュージシャンに人気です。

スチールパン
内部の楕円形の部分を撥でたたくと、大きい楕円は低い音、小さい楕円は高い音を出す。

ハンドパン
スチールパンを裏返しにしたような形をしており、膝の上に置いて演奏できる。下にも蓋がついており、全体としては、どら焼きのような形をしている。

第 4 章　ポリゴノーラの音階

弦の振動で出てくる整数倍音からドレミの音階ができることを第 1 章で述べました。倍音の数字を入れる音階を作ってくれる式があります（付録 3 参照)。式に頼らずに同じ音階を作る方法は付録 7 に記しました。付録 3 の式に円盤で観測された非整数倍音の数字を入れると、円盤の音階ができます。しかし、どの非整数倍音を何個選ぶかで計算される音階が異なります。弦の場合は入れる数字は一通りの 1、2、3、4 という整数値だけです。しかし、円盤の場合は表 4−1 にあるようにたくさん数字があります。

この表は、(0　1）の振動比を 1.000 としたときの、それぞれの振動数（音）の比をまとめたものです。音階を作るためにこの数字のどれを何個選べばよいのでしょうか。たたく場所により出る音の組み合わせが変わります。

	ドーナツ節線										
ピザ節線	m = 0	m = 1	m = 2	m = 3	m = 4	m = 5	m = 6	m = 7	m = 8	m = 9	m = 10
n = 0	−	1.000	4.231	9.642	17.222	26.969	38.883	52.963	69.210	87.623	108.203
n = 1	0.278	2.216	6.545	13.043	21.708	32.540	45.537	60.702	78.032	97.529	119.193
n = 2	0.779	3.726	9.159	16.750	26.503	38.421	52.505	68.754	87.169	107.751	130.498
n = 3	1.499	5.514	12.069	20.760	31.606	44.613	59.784	77.120	96.621	118.287	142.119
n = 4	2.437	7.574	15.270	25.069	37.013	51.113	67.374	85.797	106.385	129.137	154.055
n = 5	3.594	9.899	18.757	29.675	42.722	57.918	75.272	94.785	116.461	140.301	166.305
n = 6	4.969	12.487	22.525	34.572	48.730	65.027	83.475	104.081	126.847	151.776	178.867
n = 7	6.564	15.334	26.572	39.759	55.033	72.435	91.983	113.683	137.542	163.560	191.741
n = 8	8.377	18.437	30.894	45.231	61.629	80.142	100.792	123.590	148.543	175.654	204.925
n = 9	10.410	21.795	35.488	50.987	68.516	88.144	109.901	133.800	159.849	188.054	218.417

表4-1　周辺が自由に振動する円盤の共鳴周波数比の理論値
n はピザモードの節線の数、m はドーナツモードの節線（節円）の数を表す。
n=0、m=1 の時の振動数比＝１を基準としている。

図4-1　不協和度曲線を使った音階の作成
倍音に弦の整数倍音1.00～9.00を入れて計算しグラフにした。谷の音の高さを順にとれば音階ができる。ただし、9倍音までででは、ド#とシができない。

最初にドレミの音階が式でできるか試しました（図 4－1)。曲線を描くために使った整数倍音は 9 個です。縦軸は耳障りの悪さをとったもので不協和度と定義されています。横軸は最初の音（ド）に対する音の高さの比です。

このグラフの場合は 2 倍まで、すなわち 1 オクターブ上のドまで示しました。振動比でドの 1.5 倍のソが最も不協和度が低い（谷が深い）ので、ドとソがよく協和することがわかります。谷を選ぶと、ドレミの音階ができます。また、ソの不協和度を示す数字は、10 です。1 オクターブ上のドは、元のドとよく混じりあうので不協和度の数字は 0 に近くなっています。つまり谷の深さは元のドと協和する程度を示すといえます。もちろんこの理論は近代のもので、古代の人は知りません。昔の人は感覚だけでこの原理に近い音を選びドレミの音階を作り上げたのでしょう。

1　ドーナツ音階

次に図 4−2 では円盤のドーナツ様式の音階を作るために、ドーナツモードの非整数倍音の数字 9 個を式に入れて不協和度を計算しました。使用した非整数倍音 9 個は表 4−2 に示しました。このグラフと計算で出た谷を拾い出して音階を取ると、表 4−2 右の列のようになります。

表4-2　ドーナツモードの音階の作成

ドーナツモード	使用倍音比	音階番号	音階比
(0　1)	1.00	1	1.00
(0　2)	4.23	2	1.27
(0　3)	9.64	3	1.31
(0　4)	17.22	4	1.36
(0　5)	26.97	5	1.44
(0　6)	38.88	6	1.57
(0　7)	52.96	7	1.65
(0　8)	69.21	8	1.79
(0　9)	87.62	9	1.96
		10	2.26
		11	2.28
		12	2.57
		13	2.80
		14	3.08
		15	3.25
		16	4.03
		17	4.07
		18	4.23

音階番号 1 の円盤と番号 18 の円盤を同時にたたくと、番号 1 の第 2 倍音（4.23）と番号 18 の基音（4.23）が協和します。18 番目の 4.23 という音高は、最初に計算をするために入れたドーナツモードの（0　2）と同じ数字が表れますので、音階はここで止めました。ドーナツだけの振動様式の数字を入れて計算すると、不協和度の低い音階ができます（図 4−2）。

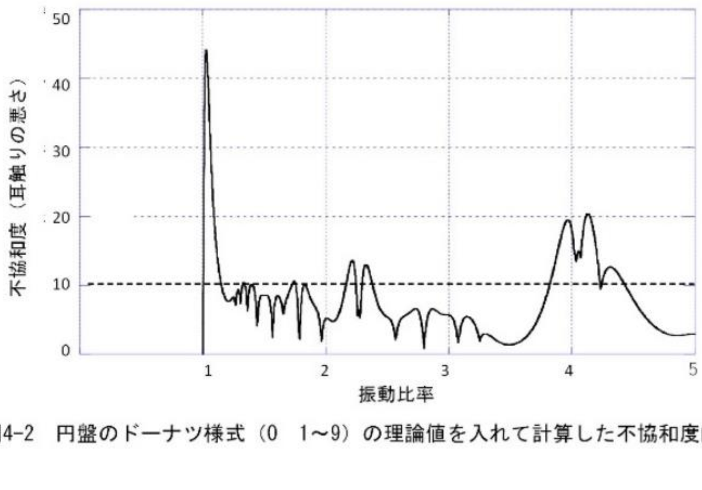


図4-2　円盤のドーナツ様式（0　1～9）の理論値を入れて計算した不協和度曲線

たとえば基音から振動比 5 までのほとんどの音階（谷の位置）の不協和度は 10 以下です。図 4－1 に示した不協和度はソがかろうじて 10 くらいです。ドレミの音階（図 4－1）では、ソ以外の不協和度はすべて 10 以上です。円盤のドーナツ様式からできる音階は、振動比 3 倍までは不協和度がすべて 10 以下で、この音階は互いによく協和する響きを約束してくれそうです。ところがここにひとつ大きな難点があります。それは、円盤を叩いて出る実際の非整数倍音の数です。図 3－5 で示しましたように、最もドーナツ様式の振動が出やすい、中心をたたいたときでさえ、(0　4) までですなわち 4 本くらいしか出ません。図 4－2 では（0　9）まで 9 個の数字を使いましたが、実際に出ているのは（0　4）までです。

それで､実際に出ている(0　4)の数字､17.22 より少し多めの数字をあと 2 個(26.988 と 38.883）使って不協和度を計算すると図 4－3 になります。ずいぶん谷の数が減ったことがわかると思います。しかも、基音の 2 倍音までに音階が 3 個しかありません。さらに 1 番目（1.00）と 2 番目（1.44）の間がかなり開いています。ドレミならこの間に、レ・ミ・ファと 3 音が入ります。　ドーナツ様式だけの非整数倍音で音階を作ると、不協和度は低いけれど、間隔の広い音階ができます。それはそれでよいのかもしれません。

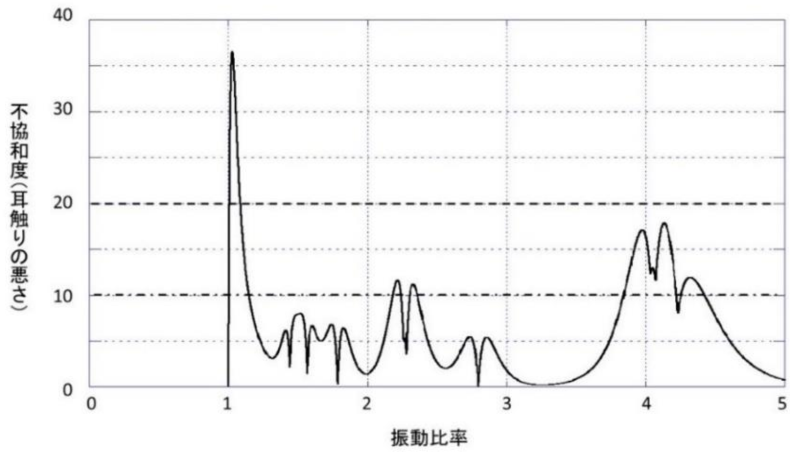


図4-3　実際に観測される円盤のドーナツ様式（0　m=1～6）の非整数倍音の数字を入れて計算した不協和度曲線

２　ピザ音階

次に、ピザ様式だけの倍音列で音階を作りました（図 4―4)。ピザ振動様式は（2　0）から（9　0）までの 8 個の数字を用いました。ピザ様式は円盤の端をたたくと出る非整数倍音です。用いた非整数倍音の数字は表 4―3 に示しました。

表4-3　ピザモードの音階の作成

ピザモード	使用倍音比	音階番号	音階比
(2　0)	1.00	1	1.00
(3　0)	1.92	2	1.24
(4　0)	3.13	3	1.25
(5　0)	4.61	4	1.32
(6　0)	6.38	5	1.38
(7　0)	8.42	6	1.47
(8　0)	10.76	7	1.59
(9　0)	13.37	8	1.63
		9	1.68
		10	1.83
		11	1.92

ここでは（2　0）を基準（1.00）にしました。この数字を入れて不協和度を計算すると図 4―4 のようになりました。その谷を拾うと表 4―3 の右の列に示した音階ができます。

11 番目の音は 1 番目の音の 1.92 倍の音です。音階 11 番の基音は、1 番目の円盤の第 2 倍音（3　0）と一致します。このことは 1 番目と 11 番目の円盤を同時にたたくとよく協和するということです。ピザ様式だけで音階を作った場合は、1.92 が新しいオクターブになると考えられます。振動比が約 2 倍までに音階は 11 できました。

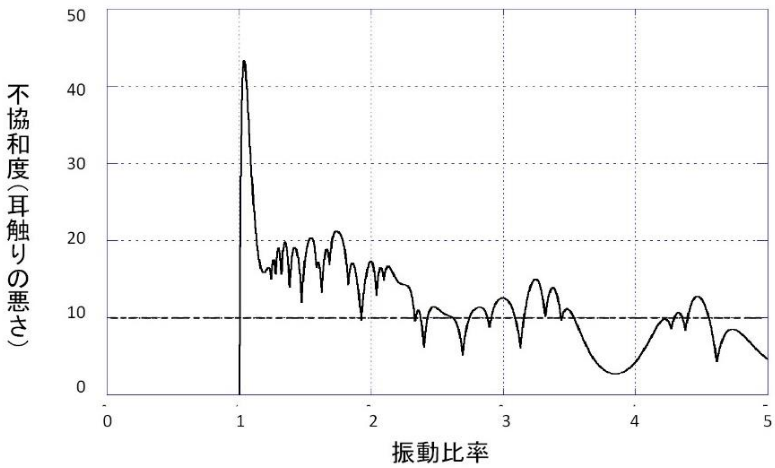


図 4 -4　円盤のピザ様式（n=2～9）の振動から出てくる非整数倍音の数字を入れて計算した不協和度曲線

この場合２番目（1.242）と３番目（1.246）の音階の間隔が狭すぎるのが気になります。1.24 と 1.25 はわずか 0.3％しか離れていません。平均律の半音の間隔は 5.95％ですので、0.3％は半音の１／20 です。

また、不協和度の値がドーナツ様式の音階より高いのも気になります。例えばドーナツ様式では振動比が２倍まではすべて不協和度が 10 以下ですが、ピザ様式では振動比２倍までのほとんどすべての音階が 10 以上です。つまりピザ様式の音階の不協和度はドーナツ様式より高くて少し不協和な音階となります。

ドーナツ様式の音階は不協和度が低いが間隔が広く、ピザ様式は音階の間隔は狭いが、不協和度が高い音階ができました。また実際にたたいてもドーナツ様式の高次の倍音は出にくいので使える数字が少ないこともわかりました。

３　混合音階

そこで、円の節がひとつだけできて、ピザの線が増える様式を採用することにしました（n　1）。表示すると（0　1）、(1　1）、(2　1）、(3　1）……　です。

表4-4　混合モードによる音階の作成

混合モード	使用倍音比	音階番号	音階比
（0　1）	1.00	1	1.00
（1　1）	2.22	2	1.18
（2　1）	3.73	3	1.20
（3　1）	5.51	4	1.23
（4　1）	7.57	5	1.26
（5　1）	9.90	6	1.31
（6　1）	12.40	7	1.37
（7　1）	15.33	8	1.48
(8　1)	18.44	9	1.55
(9　1)	21.80	10	1.68
		11	1.80
		12	1.86
		13	2.03
		14	2.22
		15	2.49
		16	2.66
		17	2.78

この様式は円盤の真ん中にひとつ円ができ、縦に線が 1、2、3 本と入っていきます。計算に使った非整数倍音の比は表４－４に示しました。この非整数倍音は中心以外をたたくと必ず全部出ていました（例えば図３－6)。不協和度を計算すると図４－５のようになりました。この図の谷をとってできた音階を表４－４の右の列に示しました。

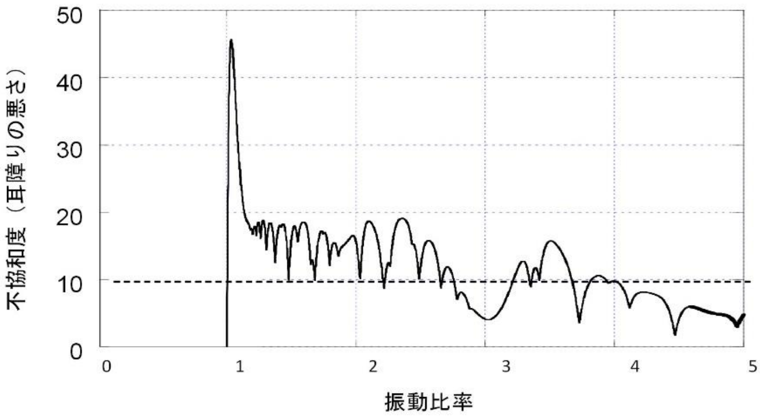


図4-5　円盤のピザとドーナツの混合様式（n=2～9 1）の振動から出る非整数倍音の数字を入れて計算した不協和度曲線

この音階でも 14 番目の音階は最初の円盤が出す第 2 倍音（2.22）と一致します。それで、音階の 1 番目の円盤と 14 番目の円盤を 2 枚同時にたたけば協和します。この音階の協和度は振動比 2 倍まで、すべて 10 と 20 の間に入っています（図 4－5)。

ここまで述べてきた円盤の音階の特徴を振動様式別にまとめると、次のようになります。

	様式	音程間隔	不協和度
1	完全ドーナツ様式	間隔広い	低い
2	完全ピザ様式	間隔狭い	高い
3	ピザ･ドーナツ混合様式	間隔適度	適度

完全ドーナツ音階は不協和度の低い、つまりよく協和した音階ができますが、音程間隔がまばらです。完全ピザ音階では音程間隔は狭い音階ができますが、協和が良くありません。ピザ・ドーナツ混合では、その中間の音階ができました。

これらの不協和度を比較するために 3 つの不協和度曲線を重ねました（図 4－6)。ドーナツ様式の音階は、数は少ないのですが、その不協和度は振動比 3 倍までは非常に低いです。つまりよく協和する音階です。振動比 2 倍までは混合様式のほうが完全

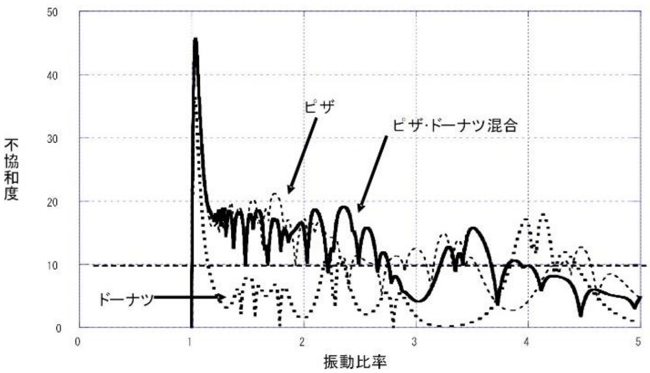


図4-6　円盤のドーナツ（0　1～6）、ピザ（2～9　0）とピザ・ドーナツ混合様式（2～9　1）の不協和度曲線の比較

ピザ様式より不協和度が低いことがわかります。これら 3 つの振動様式からできた音階は一長一短がありました。それらをドレミの音階と同じ土俵で比較することを次に考えます。

４　協和度から見た各音階の比較（協和度表）

3 つの方法（ドーナツ、ピザ、混合）でできた音階が音階同士でどれくらい協和するかを、比較することにしました。このために協和度表を作りました（詳しい説明は付録 4)。まず、ドレミの音階の協和度を示します（表 4－5)。

表4-5　平均律（ドレミ）の協和度表（9倍音まで）

音名	倍音列									一致数
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
ド	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	9.000	8
ド#	1.059	2.119	3.178	4.238	5.297	6.357	7.416	8.476	9.535	7
レ	1.122	2.245	3.367	4.490	5.612	6.735	7.857	8.980	10.102	7
レ#	1.189	2.378	3.568	4.757	5.946	7.135	8.324	9.514	10.703	7
ミ	1.260	2.520	3.780	5.040	6.300	7.560	8.819	10.079	11.339	7
ファ	1.335	2.670	4.005	5.339	6.674	8.009	9.344	10.679	12.014	7
ファ#	1.414	2.828	4.243	5.657	7.071	8.485	9.899	11.314	12.728	7
ソ	1.498	2.997	4.495	5.993	7.492	8.990	10.488	11.986	13.485	7
ソ#	1.587	3.175	4.762	6.350	7.937	9.524	11.112	12.699	14.287	7
ラ	1.682	3.364	5.045	6.727	8.409	10.091	11.773	13.454	15.136	7
ラ#	1.782	3.564	5.345	7.127	8.909	10.691	12.473	14.254	16.036	7
シ	1.888	3.775	5.663	7.551	9.439	11.326	13.214	15.102	16.990	6
ド	2.000	4.000	6.000	8.000	10.000	12.000	14.000	16.000	18.000	6
								協和度比率		86.54%

ここでは左の列に音名を次の列に振動比を掲げました。ドから始まり、次がド♯です。ド♯は、ドより 1.059 倍（5.9%）振動数が高いです。音階番号 13 番の数字は、ちょうど 2.00 ですが、これは元の音の振動数のちょうど 2 倍高い音という意味です。すなわち 13 番目の 2.00 は、1 オクターブ上のドとなります。

行は倍音列（1～9）を示します。ここでは整数倍音列なので 1.00 の 2 倍 3 倍はそのまま 2.00（1.00×2）、3.00（1.00×3）となります。次の 2 列目のド♯では音階は元のドの 1.059 倍です。ド♯の第 2 倍音は 1.059 の 2 倍音なので 1.059×2＝2.119 となります。第 3 倍音は 1.059×3＝3.178 となります。これを進めていくと第 9 倍音は 1.059 の 9 倍で、9.535 となります。

このようにそれぞれの音階の倍音列を第 9 倍音まで書き出すと、表 4－5 が出来ます。ドの第 2 倍音は 2.000 ですが、この値は音階番号 13 番（1 オクターブ上のド）の基音である 2.000 と一致しています。この表は、表計算ソフトで簡単に作れます。

ソの比は平均律では 1.498 で完全に 1.500 ではありません。これは純正律と平均律の違いです。ここではこれ以上詳しくは述べません。両者の差はわずか 0.13%の違いです。平均律の半音は上にも述べましたように 5.946%です。ですから 0.13%は半音の約 50 分の 1 にあたります。この 2 音を別の音と区別できる人はほとんどいません。どれくらい離れれば 2 音を異なる音と認識できるのでしょうか。これを本書では 1.487%にしました。この値は半音の 1／4、すなわち 1／8 音に当たります。この基準は、モーツアルトの少年のころの逸話からとりました。彼は半音の 1／4 を聞き分けたといわれています。一般の人はこれ以内の 2 音のずれはわからないことにします。すると、表 4－5 の色づけができるようになります。

同じ色はどこか別の音階の、何番目かの倍音と協和するということを示しています。例えば、ドの 4 倍音は 4.000 ですが、ファの 3 倍音は、4.005 です。両者の違いはわずか 0.125%で 1.487%よりも小さいので、協和していることにします。このようにして、それぞれの音階が別の音階の倍音とどれくらい協和しているかを合計したものを協和度（%）と定めました。一番右下の数字はこの協和度を%であらわしたもので、86.54%となります。86.54%とは、ある音あるいはその倍音がそれ以外に 1 つ以上の

表4-6 ドーナツ様式（上段）とピザ様式（下段）から作られた音階の協和度表

	倍音列									
音階	1	2	3	4	5	6	7	8	9	一致数
1	1.00000	4.23100	9.64200	17.22200	26.96900	38.88300	52.96300	69.21000	87.62300	7
2	1.44200	6.10110	13.90376	24.83412	38.88930	56.06929	76.37265	99.80082	126.35237	2
3	1.56600	6.62575	15.09937	26.96965	42.23345	60.89078	82.94006	108.38286	137.21762	3
4	1.78600	7.55657	17.22061	30.75849	48.16663	69.44504	94.59192	123.60906	156.49468	4
5	2.27800	9.63822	21.96448	39.23172	61.43538	88.57547	120.64971	157.66038	199.60519	5
6	2.79700	11.83411	26.96867	48.16993	75.43229	108.75575	148.13751	193.58037	245.08153	4
7	4.03300	17.06362	38.88619	69.45633	108.76598	156.81514	213.59978	279.12393	353.38356	5
8	4.23100	17.90136	40.79530	72.86628	114.10584	164.51397	224.08645	292.82751	370.73291	0
								協和度比率		46.88

	倍音列								
音階	1	2	3	4	5	6	7	8	一致数
1	1.00000	1.92400	3.12900	4.61400	6.38100	8.42800	10.75600	13.36600	7
2	1.24200	2.38961	3.88622	5.73059	7.92520	10.46758	13.35895	16.60057	3
3	1.27700	2.45695	3.99573	5.89208	8.14854	10.76256	13.73541	17.06838	3
4	1.32000	2.53968	4.13028	6.09048	8.42292	11.12496	14.19792	17.64312	4
5	1.38300	2.66089	4.32741	6.38116	8.82492	11.65592	14.87555	18.48518	3
6	1.47400	2.83598	4.61215	6.80104	9.40559	12.42287	15.85434	19.70148	3
7	1.58600	3.05146	4.96259	7.31780	10.12027	13.36681	17.05902	21.19848	2
8	1.62600	3.12842	5.08775	7.50236	10.37551	13.70393	17.48926	21.73312	4
9	1.68400	3.24002	5.26924	7.76998	10.74560	14.19275	18.11310	22.50834	2
10	1.82600	3.51322	5.71355	8.42516	11.65171	15.38953	19.64046	24.40632	4
11	1.92400	3.70178	6.02020	8.87734	12.27704	16.21547	20.69454	25.71618	3
							協和度比率		49.35

音と協和している、という割合が全体で 86.54％ということです。この平均律のドレミの協和度表で特徴的なことは、第 7 倍音の約半分の音階はほかの音と協和しないことです。そのため、第 7 倍音の列の後半は白くなります。

一方、ドーナツ様式の倍音列を 9 つまで採用したときの音階の協和度を調べた結果は、表 4−6 上段に示しました。ちょうど音階番号 1 の第 2 倍音が 4.231（赤色）なので、音階として 4.231 が出てくる第 8 番目までの音階を使って計算してみました。その協和度は 46.88％と平均律に比べると大きく劣ります。

ピザ様式の倍音列を 8 つまで採用したときの音階の協和度は表 4−6 の下段に示しました。この場合、基音の第 2 倍音（1.924、赤色）が音階に出てくる第 11 番目の音階までを使って計算しました。その結果、右下に示した協和度の数字は 49.35％となりドーナツ様式より少しだけ上です。

表4-7 ドーナツ・ピザ混合モードから作られた音階の協和度表

	倍音列										
音階	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	一致数
1	1.00000	2.21600	3.72600	5.51400	7.57400	9.89900	12.48700	15.33400	18.43700	21.79500	9
2	1.18200	2.61931	4.40413	6.51755	8.95247	11.70062	14.75963	18.12479	21.79253	25.76169	4
3	1.20200	2.66363	4.47865	6.62783	9.10395	11.89860	15.00937	18.43147	22.16127	26.19759	4
4	1.22800	2.72125	4.57553	6.77119	9.30087	12.15597	15.33404	18.83015	22.64064	26.76426	4
5	1.26100	2.79438	4.69849	6.95315	9.55081	12.48264	15.74611	19.33617	23.24906	27.48350	5
6	1.30700	2.89631	4.86988	7.20680	9.89922	12.93799	16.32051	20.04154	24.09716	28.48607	5
7	1.37300	3.04257	5.11580	7.57072	10.39910	13.59133	17.14465	21.05358	25.31400	29.92454	5
8	1.47900	3.27746	5.51075	8.15521	11.20195	14.64062	18.46827	22.67899	27.26832	32.23481	7
9	1.54900	3.43258	5.77157	8.54119	11.73213	15.33355	19.34236	23.75237	28.55891	33.76046	6
10	1.68100	3.72510	6.26341	9.26903	12.73189	16.64022	20.99065	25.77645	30.99260	36.63740	6
11	1.79500	3.97772	6.68817	9.89763	13.59533	17.76871	22.41417	27.52453	33.09442	39.12203	5
12	1.86100	4.12398	6.93409	10.26155	14.09521	18.42204	23.23831	28.53657	34.31126	40.56050	6
13	2.03100	4.50070	7.56751	11.19893	15.38279	20.10487	25.36110	31.14335	37.44555	44.26565	7
14	2.21600	4.91066	8.25682	12.21902	16.78398	21.93618	27.67119	33.98014	40.85639	48.29772	8
									協和度比率		64.29

最後に、ピザ･ドーナツ混合モードの倍音列を 10 個採用したときの音階の協和度を表 4－7 に示しました。その協和度は 64.29%で完全ドーナツ、完全ピザ様式よりも高いです。しかし、平均律には劣ります。

このように作られた新しいオクターブ内で協和する割合を比べると平均律の音階が、円盤で作られたどの音階よりも優れていることがわかります。しかし、円盤の音階の一致数（表の一番右の列）を見ると、どの音階もどれか 1 つ以上の別の音階のどれかの倍音と必ず協和しています。ですから、いわゆる和音という組み合わせが、円盤の音階でも実現できます。

例えば、完全ドーナツ音階（表 4－6 上段）で言いますと、音階番号 1 の第 4 倍音は、17.222 ですが、これは音階番号 4 の第 3 倍音（17.21883）および音階番号 7 の第 2 倍音（17.06362）とほぼ一致しています。このことは音階番号、1、4、7 の 3 つの円盤を同時にたたくと、3 者は協和することを意味しています。

また同じく音階番号 1 の第 5 倍音は、26.988 ですが、これは音階番号 3 の第 4 倍音（26.96965）音階番号 6 の第 3 倍音（26.96588）とほぼ一致します。このことは、音階 1、3、6 の円盤を同時に叩けば協和することを意味しています。

このことから、例えば、音階番号 1、3、4、6、7 の 5 つの円盤を同時にたたくと、これら 5 つの音が互いに協和する可能性を秘めています。

５　新しいオクターブ　（循環音階）

音階の作成の前節で何度も出てきましたが、ヘルムホルツの不協和度計算で谷間から出した音階には、偶然か必然か必ず元の音の第 2 倍音が含まれます。そこでこれを新しい折り返しとして、その上にさらに音階を積み上げました。

平均律のドレミでドの音の 1 オクターブ上の音はドですが、1 オクターブ上のレは次のようにして求めます。ドが 1.000 ならば 1 オクターブ上のドは 2 倍の 2.000 でした。レはドの 1.12246 倍の振動数の音なので、1.12246 を 2 倍すると 2.24492 倍となります。これで 1 オクターブ上のレができました。このように平均律では 1 オクターブ上のドの上に同じ比率で音を積み重ねて次の音階を作っています。

そこで同じようにピザ・ドーナツ混合様式の音階の 2 オクターブ目の音階を作りました。1 オクターブ上の音は 2.22 でした。そこで音階番号 2 の数字 1.18 に 2.22 を掛けます。すると 2.62 という数字が得られます。これが 15 番目の音階となります。これを繰り返すと、表 4－8 になります。

表4-8　循環音階の作成

音階番号	第1音階	第2音階	第3音階
1	1.00	2.22	4.93
2	1.18	2.62	5.83
3	1.20	2.66	5.92
4	1.23	2.73	6.06
5	1.26	2.80	6.21
6	1.31	2.91	6.46
7	1.37	3.04	6.75
8	1.48	3.29	7.30
9	1.55	3.44	7.64
10	1.68	3.73	8.28
11	1.80	4.00	8.87
12	1.86	4.13	9.17
13	2.03	4.51	10.01
14	2.22	4.93	10.94

全部で 3 つ列がありますが、左から 2 番目の列が元の音階で、3 番目の列がひとつ上の音階です。4 列目がもう一つ上の音階です。これを続けていけば、無限にこの音階を繰り返せます。2 オクターブの中に 27 個の音がありますが、これで協和度をもう一度計算してみます。比較のために平均律のドレミも 2 オクターブで協和度を計算しました（付録 5）。

その結果、平均律の 2 オクターブの協和度は全体で 96.0%と 1 オクターブのときより若干増えました。ピザ･ドーナツ様式の音階は 2 オクターブの音階では全体の協和度が 88.0%と飛躍的に向上しました。

以上の検討から、円盤の代表的な音階はピザ･ドーナツ混合様式の音階を 1 オクターブを 2.22 として重ねて作ることにしました。本当は “オクターブ”には 8 という意味が含まれています。ドレミファソラシドは全部で 8 音あるので 8 を意味するオクタというギリシャ語が使われているからです。

ここで示した音階は同じ比で積み重なっていきますので、循環音階ともいえます。表 4－8 の右の列の音階は第 2、第 3 循環音階というべきでしょう。

６　オクターブ（音階の折り返し）は 2.00 を越えてよいのか

ピザ･ドーナツ混合様式の循環音階の折り返しは 2.22 としました。平均律では 2.00 です。2.00 ではない 2.22 という比が、円盤楽器の新しいオクターブ（音階の折り返し）になります。これは音階の区切りとしてよいのでしょうか？

アメリカ･ウィスコンシン大学のセザレス教授は、2005 年に面白い実験結果を発表しています。セザレス教授は 2 つの音を作りました。1 つは、450 Hz を基音にして、上にその整数倍音である 900、1350、1800 Hz の音を含む音、2 つ目は 900 Hz を基音にして、上に 1800、2700 Hz の整数倍音を含む音、この 2 つの音をシンセサイザーで作りました。整数倍音が含まれている 2 つの音を一緒に被験者に聞かせると被験者は全員、「900 Hz の音は 450 Hz の 1 オクターブ上の音」と認めました。次に 450 Hz の振動音のみ、900 Hz のみの振動音だけを人工的に作り（弦で作ると自然に整数倍音が含まれてしまうのでシンセサイザーで人工的に作ります）、被験者に両者を聞かせると、被験者は 900 Hz は 450 Hz と合っていないと判断します。900 Hz から少しずつ音を上げて、「どこが合いますか」と尋ねると、945 Hz（基音 450 Hz の 2.1 倍）の音が、整数倍音をふくまない 450 Hz の 1 オクターブ上の音と認めることを明らかにしました。彼はこれをもって、「オクターブは死んだ」と言っています。

このなぞは次のように説明できます。450 Hz の音を弦で作ると整数倍音が自動的に出るので、その音は 900、1350、1800 、2250、2700 Hz の音を自動的に含みます。そこでこの音を、同じく整数倍音を含む 900 Hz（倍音に 1800、2700 Hz を含みます）の音と一緒に聞かせると、2 つの音は協和しているように聞こえるのです。なぜなら 450 Hz の第 2 倍音 900 Hz はまさに、900 Hz の基音と一致しています。900 Hz の第 2 倍音 1800 Hz は 450 Hz の第 4 倍音と重なります。900 Hz の第 3 倍音は 450 Hz の第 6 倍音（2700 Hz）と一致します。

ところが 900 Hz や 1350 Hz の整数倍音を含まない 450 Hz の音を作り、同様に整数倍音を含まない 900 Hz の音を作り、両者を聞かせると、私たちの耳には 1 オクターブとは判断できないのです。つまり私たちが当然と思っていた 1 オクターブという絶対的な音階の区切りは、「整数倍音を含む音にだけあてはまる」ことをセザレスは述べています。逆に言いますと、これまで述べてきた基音の 2.216 倍の音を一区切りとする循環音階は、ヒトの脳が一区切りと判断すればそれでよいといえます。しかし、ヒトの脳はそんなに簡単に新しい区切りを受け入れることができるのでしょうか？

脳のある部分に振動数地図が存在することが知られています。ラット（ネズミの一種）の実験ではありますが、脳の振動数地図が学習によって書き換えられることが示されています（ワインバーガー、2005）。つまり、音の高さの捉え方は、学習や習慣によって変化することを示しています。この結果は、人の脳でも整数倍音しか受け付けないのではなく、それ以外の音（非整数倍音あるいはそれを基にした音階）も受け入れる可能性を示しているといえるでしょう。ただ、普段からどういう音に囲まれていて、どの音に注意を向けているかが重要であることを示しています。ベトナムのゴングの音階に 2.00 倍のオクターブがないことは、弦ではなく平面楽器を使っているからかもしれません。しかし、現代のベトナムの若い人は整数倍音の音楽に囲まれています。

また、ヒトが音の高さを判断するのは左脳の側頭部らしいのですが（Ball、2010）、もともと絶対音感を持っている人は 100 人に 1 人くらいで、ヒトは相対的な音の高さには敏感です（Powell、2011）。したがって、どのような音階でも、相対的な音の高さ

の並び方が重要です。必ずしも 2 倍高い振動数を 1 オクターブとする音階を作る必要はないかもしれません。

表 4−3 に示したピザ･ドーナツ混合様式の音階は、各音階の間隔が平均律のように均一ではありません。複雑です。平均律では各音階の間隔はすべて前の音の 1.05946 倍となっており単純で均一です。

この章の最後に、新しい音階を用いて PAD で作られた音楽が聴ける QR コードありますが、これを聴いてドレミではない音階で作られたことに気づく人はどれくらいいるでしょう。何の違和感もなく受け入れられるかもしれません。

7　ポリゴノーラの材質と設計について

最後にポリゴノーラの楽器の性質について述べたいと思います。ポリゴノーラには以下の 4 点が重要です。

① 素材
② 厚さと大きさ
③ 支持
④ 演奏する道具

以下にこの順番で解説します。

① 素材

ポリゴノーラの素材には、金属、ガラス、木材、プラスチックなどがあります。また金属でも、鉄、銅、青銅、真鍮、アルミなど多数ありますが、どのような響きを求めるかで素材が決定します。その要因は、響き（余韻）と音色です。それぞれの素材について簡単に記します。

1．金属

鉄：　普通の鉄（軟鉄）は響きが悪いです。これは鉄が結晶構造をしていないことと関係しているかもしれません。鉄は粘りがあり強靭なので、ギターやピアノの弦として使われています。しかし、軟鉄は硬くはないのです。そのためか、円盤にしてたたいてみても余韻に乏しいです。ステンレスや炭素含量の高い「鋼鉄」は響きがよくなります。しかし普通のステンレス（SUS304 など）では、少し単純な倍音構成となる傾向があります。そのため音色が単純で、くすんだようになります。炭素含量の高い鋼鉄製の円盤では余韻は長いのですが、隣接した共鳴ピークが融合せず個別に振動するので、隣接したピークから生じる唸りなどが気になることがあります。

銅：　全くポリゴノーラに向いていません。余韻がないのは軟らかいためと思われます。また軟らかいので、たたくと変形します。そのため基本的にはポリゴノーラに向いていません。

真鍮：　真鍮は銅と亜鉛の合金です。いろいろな硬さがつくれます。硬いので伸び率が銅よりも低いです。オーケストラで使われる多くの金管楽器やシンバルは真鍮で造られています。円盤にしてたたくと、音色が少しにごります。あまり硬くはないので、たたいていると変形します。ジャズなどで使われる、シンバルは真鍮で作られていますが、たたいたり、伸ばしたり、裏返したりして、表面が硬くなるように作られています。

青銅：　青銅は銅と錫（スズ）の合金で硬いです。最近ではリンを少し加えて腐食しないリン青銅が利用されています。リン青銅でポリゴノーラを作ると理論通りの振動（音）がすべて出ます。また余韻は長く、音色としては豊かです。薄いポリゴノーラを作るのは、鋳造では難しいでしょう。隣接した共鳴ピークが融合する傾向があるので、鉄とは異なり、唸りの少ない澄んだ響きがします。昔から、青銅が銅鐸、お寺の

鐘の材料として使われたのもうなずけます。

アルミ：　余韻が短く、響きはよくありません。また、変形に対しては強くないので、薄い円盤にはできません。アルミの合金でアルミより硬いジュラルミンならポリゴノーラができる可能性はあります。

2　ガラス：　ガラスにもたくさんの種類がありますが、普通のガラスでは 3 ミリ以下ではたたくと割れやすいです。パイレックスでは 5 ミリくらいの厚さなら普通のマレットで十分たたけます。ただし、響き（余韻）はありません。ガラスはその構造が結晶ではないからかもしれません。また、ポアソン比（物質の性質を表す指標の一つ）は大方の金属（0.30～0.35）より低く，0.23 です。不思議なことに、ガラスの円盤は中心をたたくとほとんどドーナツ様式だけが出て、端をたたくと、ほとんどピザ様式だけが出ます。そのため中心を外してたたくと、中心よりも低い音［(20) 様式の音］が主に出て、中心をたたいた時に出る基音よりも極端に低い音が出ます。たたいた音は木琴に近いので、余韻の少ない音です。特殊な楽器として使える可能性はあります。しかし、たたいて割れた時のことを考えるとポリゴノーラとしてガラスを採用するのは現実的ではないでしょう。

3　木：　金属に比べて硬くないためか、振動様式の種類が少ないです。そのため単純な響きがします。また余韻が短いです。ただし、樹種によって硬さに大きな差があります。例えば、カシ（樫）はキリ（桐）の 3 倍の硬さがあります。硬い木はポリゴノーラ楽器としてかろうじて成立するでしょう。全般的に木はプラスチックよりやや硬いです。

4　プラスチック：木と同じでやわらかいプラスチックは全くポリゴノーラに向きません。硬いといわれるポリカーボネートや、アクリル樹脂でも金属に

は、はるかに及びません。

5　サヌカイト：香川県に世界に唯一存在するといわれるサヌカイトという石があります。わずかに水を含む石で、厚さ 1 センチくらいの円盤にするとよい音がします。ガラスに似た音がして、余韻はそれほど長くありません。金属とガラスの中間といった音色がします。

これらのことから、ポリゴノーラの素材として金属が向いているのではないかと考えられます。そこでこれらの素材の性質を図 4－7 にまとめました。縦軸の伸び率は、素材を引っ張って、切れるときの最大の伸び率で、伸びやすさを表します。横軸の引っ張り強さは、引っ張りに耐える強さを示します。

リン青銅には銅と錫の配合率によりいろいろな種類があるので、それらをまとめて楕円で囲った点で表しています。この位置を見ると、リン青銅は伸び率が低く、引っ

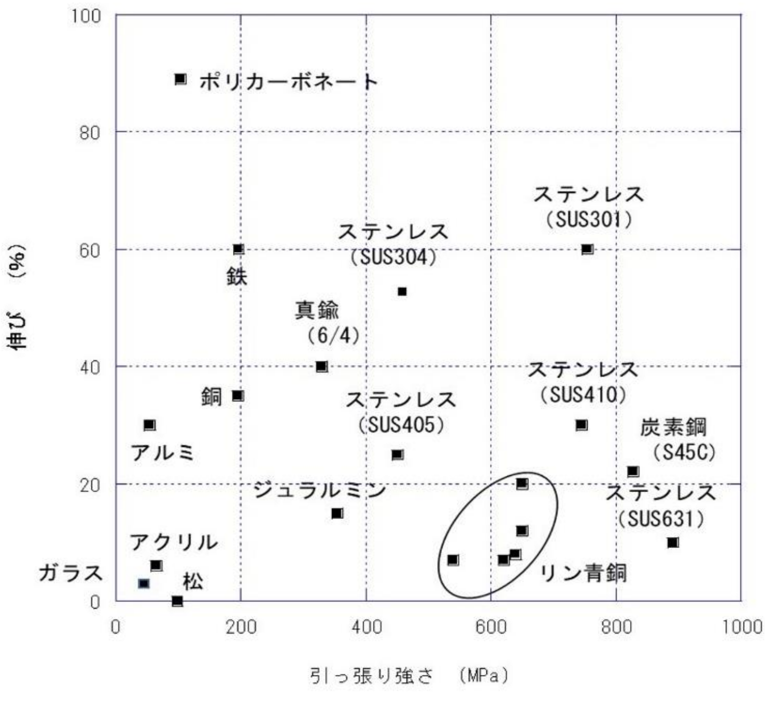


図4-7　いろいろな素材の引っ張り強さと伸び率

張り強さではステンレスなどのグループと同じくらいの高い値を持っています。リン青銅の引っ張り強さは普通の鉄の 3 倍ほどあります。昔から銅鐸やお寺の鐘に青銅が使われていたことは、偶然ではないと思われます。

引っ張り強さで見るとアルミ、銅、鉄などは金属なのに、ガラス、ポリカーボネート、アクリルに比べ高々2 倍程度の強さしかありません。それに比べ真鍮やジュラルミンは引っ張り強さが鉄などに比べてさらに 2 倍強いです。リン青銅、炭素鋼、ステンレスの 3 種類の金属はジュラルミンよりさらに 2 倍以上強いです。傾向としてはやわらかい銅、鉄は伸びやすく、硬い青銅、炭素鋼、一部のステンレスは伸びにくい傾向があります。

リン青銅には錫の配合率の違うたくさんの種類がありますが、どれも鉄の 3 倍、ジュラルミンの 2 倍ほどの強さがあります。リン青銅は伸びが少なくたたいてもあまり変形しない利点もあります。それで、昔から打楽器としては青銅が評価されてきたのでしょう。青銅以上に硬くて伸びにくい金属、例えば炭素鋼やステンレスは昔はありませんでした。

倍音の出方は金属では本質的に変わりません。試した材質ではガラスとサヌカイトが、少し別の音色がします。本書で示したいろいろなポリゴノーラのデータはリン青銅（合金番号 C5191、質別 H）で作ったポリゴノーラでとられたものです。結局、リン青銅の腐食しにくく、硬くて伸びにくい性質がよい音色と余韻を生むのでしょう。

②　楽器の厚さと大きさ（円盤の場合）

円盤の厚さは倍音構成に影響を与えます。直径に対する円盤の厚さの比が大事です。

実際の円盤楽器を作るときは、音の高さを決めるうえで、厚さだけでなく円盤の直径も考えねばなりません。円盤の直径は次の式で計算できます。

$$\text{円盤直径} = \frac{2\times\lambda}{\sqrt{2\pi f}}\left\{\frac{Eh^2}{12\times\rho\cdot(1-\sigma^2)}\right\}^{(1/4)}$$

ここで、λ は振動様式の固有値と呼ばれるもので、この場合は基音の様式の振動数を目標振動数にしますので、(0　1) 様式の固有値 (3.019) を代入します。f は目標振動数 (Hz) です。例えば、ド (C4) を目標とすれば、261.63 を代入します。E は素材のヤング率です。青銅の場合、110×10^9 (Pa) の値です。h は円盤の厚さ、ρ は密度、σ はポアソン比と呼ばれるものです。ポアソン比は正確に測ることは難しく、大体の値 0.33 を用います。

この式を音の高さでまとめると以下のようになります。

$$f=\frac{h}{D}\times\frac{2\lambda^2}{\pi^2}\sqrt{\frac{E}{12\times\rho\ (1-\sigma^2)}}$$

f が音の高さ (周波数)、h が厚さ、D が円盤の直径です。

この式から 2 つのことが分かります。

(1) D (直径) 分母にあるので、直径が大きいほど低い音がでる

(2) h (厚さ) が分子にあるので、同じ直径でも厚さが薄いほど低い音が出る

(1) については、ピアノの一番左の鍵盤はラ (27.5 Hz) の低い音を出しますが、これと同じ音を出すためにはリン青銅の円盤なら厚さ 2 ミリなら直径が 96 センチと計算できます。

(2) については、例えば同じ直径が 10 センチの円盤でも厚さが 2 ミリなら 1265 Hz の音 (ミ) が出ますが、厚さが 10 ミリならその 5 倍の 6323 Hz の音が出、これはピアノの最も右の鍵盤 (4186 Hz) よりさらに高い音となります。

直径と厚さの比はポリゴノーラの音色に大切です。同じ厚さで大きな円盤と小さな円盤を作ると、小さな円盤の方が厚さに対する直径の比が小さくなります。この場合小さな円盤からは倍音に乏しい音色が出ます。したがって直径が小さな円盤で豊かな倍音を出すには厚さを薄くする必要があります。厚さと直径の比は、大体 100 くらいがよいと思われます。厚さが 2㎜ なら直径は 200 ㎜です。直径が 100 ㎜なら厚さは 1 ㎜です。

③　円盤の支持の方法

第3章3節でも述べましたが、ポリゴノーラが楽器としてすばらしい音を発することができたのは、円盤の支持の仕方に大きく依存します。中心を棒で止めてしまうと、ドーナツ様式の音がまったく出ません。

ポリゴノーラ円盤をガムランのボナンと同様に2本のロープで支えてみました。ある程度の音はしますが、余韻がよくありません。振動する円周部分にロープがさわるからでしょう。3本の針の上に円盤を支持してみましたが、針と円盤の間でビビリが生じます。また針で支えるということはそこに重さが集中するので、特定の振動様式の振動を強く抑えるので使えませんでした。そこでいろいろなスポンジを試しましたが、どれも音がくすみ、よくありません。昔、お風呂で体をこするのに使ったヘチマも試しました。これはかなりうまくいきましたが、「激落ちくん」にはかないませんでした。

「激落ちくん」は白いスポンジのような形をしています。お掃除道具の一種としてお店で売っています。「激落ちくん」は、メラミン樹脂を泡状（フォーム）にしたものです。「激落ちくん」を高さ1.5センチ、直径2センチくらいの円柱状に切って、3本のアルミ円柱の上に置きポリゴノーラを乗せるといい音がします。中心をたたいても端をたたいても、余韻の長い澄んだ美しい音色がします。

また厚さ1センチ、縦20センチ、横10センチほどの長方形の木板を十字型に組み、十字の上4か所に「激落ちくん」を両面テープで貼り付けてポリゴノーラをおく方法もあります。アルミの棒の上でも、木の板の上でも、机から10センチほど離すことが重要です。あまり机に近いと、音がこもります。

「激落ちくん」を使う方法には、ひとつだけ難点があります。大きくて、重いポリゴノーラは、たたいても動かないのですが、小さくて軽い円盤はたたくと動き、最悪の場合は下に落下します。小さいポリゴノーラは重量が軽いので、たたくと「激落ちくん」の上で跳ねるのです。

たたいてもポリゴノーラが落ちないように、糸でつるす方法があります。実際に円盤の端にひとつ穴を開け、糸で吊るしてたたくと、いい音がするのですが、一度たたくと円盤がくるくる回り2回以上たたけません。そこで、第３章５節で説明した、円の節円の位置に注目することにしました。中心から 0.679 離れた位置の円状の位置に正方形の頂点で４つ穴を開け、糸でつるしてたたいてみました（図４−8)。この場合、0.679 の位置に糸を通しているので、基音の振動（0　１）は保証されます。

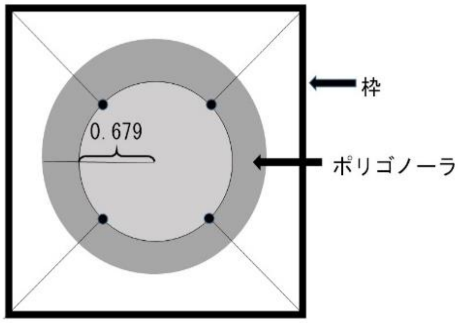


図4-8　円盤を糸で吊るす方法
　中心から半径の0.679離れた所に正方形の頂点を置き、穴をあけて糸で吊るした。

　また、4 点で支えているので、n＝1、2 の振動は保証されます。ですから（0　1)、（1　1)、(2　1) の振動は妨げられません。ただ、図 3−6 と比べると、(1　1) (2　1) など、0.679 のところに円が１つできる様式が、少し増強されます。

※激落ちくん®　はレック株式会社の登録商標です。

④　　演奏する道具の選択

　たたく道具としては、マリンバやビブラホンで使われる、毛糸などが先に巻いてある撥(ばち)（マレット)、祭囃子で使われる鉦(かね)をたたく小さな鹿の角、仏具の鉦をたたくための撞木(しゅもく)（一心など)、あるいは木魚をたたく撥などがあります。ポリゴノーラは、たたくものに応じて音色が変わります。硬いものでたたくと、高い倍音が出やすいです。軟らかいものでたたくと、高い倍音が抑えられ軟らかい音がします。これは、面が軟らかいとたたいた瞬間に撥の打面が広がるので、細かい振動様式、つまり高い音が出にくいからと思われます。

　細かい振動様式とは、たとえば（10　0）のようなピザ振動様式です。この場合は円盤に 10 本の直線が現れます。直径が 10 センチの円盤では、節線と節線の間隔は中心

から 1／4 のところでわずか 4 ミリです。軟らかいものでたたくと、この節線を 1 本以上同時にたたいてしまいます。そこでこのピザ様式の高い音が出にくくなります。一方、硬いと尖ったものでたたくとこのピザ様式の高い音は、はっきり出ます。つまり高い音がたくさん出ることになります。音色としてはキンキンしたハードな音がします。逆に軟らかい物でたたくと高いのピザ倍音が出ないので、ソフトな軟らかい音がします。

また面が軟らかい物でたたくと、音が高くて振動が速い場合、次の振動が起こっても、まだ表面にたいたものが接触したままの可能性があります。硬いものならすぐに跳ね返りますが、軟らかいものは、たたいた直後の短い時間、振動面に接触したままになります。これも、高い倍音が出にくくなる原因です。たとえば金属、木、ゴムでたたいた場合は、この順番に音がソフトになります。たたくものが軟らかいと高い倍音の振動が妨げられるからと思われます。

最後に灰野敬二氏により発見された、たたいた後に見られる不思議な現象についてご説明します。円盤をたたいた後、手のひらを円盤の近く（1 センチ程度）にかざすと、手のひらに振動が伝わってきます。これを水平に動かすと、音にビブラートがかかります。手の指を広げるとその現象は起こりません。おそらくドーナツ様式の音が手のひらで干渉を受けているようですが、詳しいことはわかりません。これをはっきりさせるためには、放射される音を目で見えるようにしなければなりません。残念ながら空気中を伝わる音を目で見る方法はまだ発明されていません。

もうひとつ不思議があります。円盤の端をたたくと、（2　0）振動様式の音が強く出ます。この音は基音よりも低いですが、そのままでは大変聞き取りにくいです。ところが耳を円盤の水平面に近づけると低い音がはっきりと聞き取れます。（2　0）の音は、円盤の表面、裏面ではほとんど聞こえないのに、境面のごく狭い範囲だけで聞こえるのです（図 4－9)。

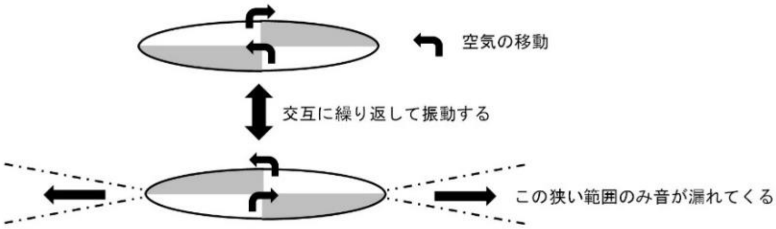


図4-9　（2　0）様式の音が円盤の上下方向で聞こえず、赤道面でのみ聞こえる理由
白い部分は上に持ち上がり、色の付いた部分は下に下がっている状態を示します。
円盤の表面と裏面では、振動が相殺されて音が出ません。

これはおそらく位相の問題です。つまり音を波と考えれば、山と谷が消しあうのではないかと思われます。これは次のように説明できます。

（2　0）では、図4－9の影に分けたところ1／4の面が上に振動した場合、その両隣の白い2面は下に振動し、もう一つの影の1／4は上に振動します。次の瞬間はこれが逆転するのですが、よく見ると隣同士が反対の振動を、つまり影が上なら白は下に振動します。そうするとその間では空気が押されたり引かれたりするだけで、振動として、つまり音として放射できません。しかし円盤の端では水平面で相殺されない音がわずかに漏れて、円盤の水平面に放射状に広がり、少し聞こえるのではないかと思われます。

水平面のわずかに聞こえる（2　0）の振動をしっかりと拾い取るために、円盤の端にピエゾ素子を貼り付けました。ピエゾ素子とは、振動を電圧に変えるもので、アコースティックギターなどに取り付けられています。

ピエゾ素子を円盤の端に取り付け、円盤の端をたたいて、その振動をアンプを通してスピーカーで聞くと、西洋の教会の鐘の音がしました。

円盤型のポリゴノーラでは端をたたくと西洋の教会の鐘のような音がし、中心をたたくと日本のお寺の鐘に似た音がすることがわかりました。日本のお寺の鐘は西洋の教会の鐘とは形が違います。西洋の鐘は先がラッパのように広がっていますが、日本の鐘は先端がそのままで円筒形です。日本の鐘は円盤をすぼめたような形をしています。円盤のポリゴノーラの端から1／4くらいをたたいた音が、日本の鐘に近いのかもしれません。日本の梵鐘については次の章に記します。

参考文献

ワインバーガー、N.M.（2005）脳を揺さぶる音楽、日経サイエンス 2005 年 3 月号

Ball, P. （2010）音楽の科学－音楽の何に魅せられるのか？－（夏目大訳）河出書房

Leissa, A. （1993） Vibration of Plates, Acoustical Society of America.

Powell, J.（2011）響きの科楽、(小野木明恵訳、早川書房)

Rossing, T. D. （1983） ティンパニーの物理学、楽器の科学、日経サイエンス

Sethares, W. A. （2005） Tuning, Timbre, Spectrum, Scale, Springer.

Taylor, C. （1992）音楽と楽器の科学－音の不思議をさぐる－（佐竹淳･林大訳）
大月書店

コラム４　　ポリゴノーラの音を PAD に割り付ける

〜〜

これまで、ポリゴノーラをたたく場所、たたく道具によって、さまざまな音色が出ることを説明してきました。ポリゴノーラの音は実際に楽器をたたいて聞くのが一番ですが、青銅製の楽器は制作費が高くつくので、デジタル技術を使って、簡単にポリゴノーラの音が再現できないかを考えました。そこで最近のデジタル技術を利用して、MIDI パッドコントローラー（以下 PAD と略）に円盤のポリゴノーラの音階を割り付けてみました（下図）。そのためには、たたく場所とたたく道具を選ばねばなりません。

試しに採用した、たたく場所と、道具は次の通りです。

たたく場所：　中心から 3/4（端から 1/4）

たたく道具：　 2 種類　　一心（材料　木製、仏具用）

マレット（材料　毛糸、マリンバ用）

表１　PAD用16音

音階番号	音高比率
1	1.00
2	1.06
3	1.12
4	1.17
5	1.23
6	1.29
7	1.31
8	1.36
9	1.41
10	1.47
11	1.53
12	1.59
13	1.65
14	1.71
15	1.81
16	1.87

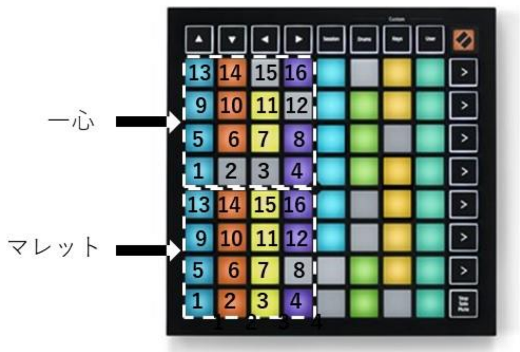


図1　　PAD（Novation Launchpad Mini）への割り付け
　左下の破線の16キーはマレットの音をサンプリングして作った音階。左上16キーは一心の音をサンプリングして作った音階。

たたく場所に選んだ中心から 3/4 という場所は、様々なモードの音がバランスよく出る場所です。たたく道具として選んだ一心とマレットは、それぞれ特徴のある音色を作ります。

音階は円盤ポリゴノーラの倍音を 15 個使って 16 音作りました。その

音階は、表 1 の通りです。音階の協和度は 86.6%でした。PAD への割り付けは図のようにしました。それぞれの音は、計算された音高に近い円盤ポリゴノーラの音をまずサンプリングし、そのあと音楽ソフトで音高を調節して決めた音高に合わせました。マレットはソフトな音色、一心はシャープな音色がします。本物の音に比べて、低音があまり聞こえない欠点はあります。

　和音の組み合わせの例としては、

«1-14-16»　«1-5-8»　«2-4-6-12»　«3-5-13»　«3-9-11»

«2-15»　　«5-8»　«6-9»　«7-15»　«13-15»

　などがあります。

　下の QR コードから、PAD に振り分けた音を使って作曲された音楽（『PAD-Polygonola Demo I & II』作曲・演奏：一ノ瀬トニカ）が聴けます。これを聞くと、この音楽で使われているポリゴノーラの音階がドレミではないことにほとんど気づきません。

PAD-Polygonola Demo I　　　　PAD-Polygonola Demo II

第 5 章　お寺の鐘と教会の鐘とポリゴノーラ

日本のお寺の鐘と、西洋の教会の鐘の音色は違います。両方とも同じような形はしていますが、先端が少し違います。この少しの違いが音色におおきな違いを生みます。

日本のお寺の鐘（梵鐘）の中で名鐘の一つに数えられている三井寺（円城寺、滋賀県）の鐘の音を分析すると、鐘から出てくる音（倍音の並び）は、大変ポリゴノーラに近いことがわかりました。三井寺の鐘とポリゴノーラの音を比較したのが表 5−1 です。

三井寺の梵鐘から出る音を低いほうから番号を振ると、約 10 個の音が出ていることがわかりました。1 番低い音（47 Hz）は、ほとんど人の耳には聞こえない低い音です。明らかに聞こえる音は 2 番目（109 Hz）からです。三井寺の梵鐘は音色が良いとされています。その理由は 2 つあると思います。一つめは、よく聞こえる 2 番目の音

表　5-1　三井寺の梵鐘とポリゴノーラの比較

三井寺梵鐘			ポリゴノーラ		振動様式	
番号	音高（Hz）	比率	音高（Hz）	比率		
1	47	**1.000**	248	**1.000**	**(0 1)**	ドーナツ
			326	1.315	(3 0)	
2	109	**2.319**	559	**2.254**	**(1 1)**	混合
			860	3.468	(5 0)	
			948	3.823	(2 1)	
3	216	**4.596**	1220	**4.919**	**(0 2)**	ドーナツ
4	253	**5.383**	1415	**5.706**	**(3 1)**	混合
5	320	**6.809**	1635	**6.593**	**(1 2)**	混合
6	323	6.872			?	
7	350	7.447	1959	7.899	?	
8	409	**8.702**	2095	**8.448**	**(4 1)**	混合
			2270	9.153	(2 2)	
9	466	**9.915**	2348	**9.468**	**(0 3)**	ドーナツ
			2562	10.331	(5 1)	
			2620	10.565	(5 1)	
10	567	**12.064**	2980	**12.016**	**(3 2)**	混合

（109 Hz）です。この音は、ドレミに当てはめるとラ（110 Hz）の音で、昔の呼び方でいうと黄鐘と呼ばれる音高です。

二つめは、音の高さの並び方です。1 番目の音（47 Hz）が耳にあまり聞こえないので、2 番目の音を基音とします。2 番目の音高（109 Hz）を基音とすると約 2 倍高い音が 3 番目（216 Hz）に出ています。さながら 1 オクターブ上のラです。さらに約 3 倍高い音が 5 番目（320 Hz）に、約 4 倍高い音が 9 番目（466 Hz）に、約 5 倍高い音が 10 番目（567 Hz）に出ています。つまり、弦の様にピッタリではありませんが、基音を 1.0 としたとき、整数倍音、2.0、3.0、4.0、5.0 に、ほぼ近い音が三井寺の鐘から出ています。そのため、この鐘の音を聞くと、音程感のある澄んだ響きが感じられます。このような整数倍音に近い音を出す梵鐘は三井寺のほかにはほとんど見当たりません。もともと梵鐘は整数倍音を出せる構造はしていないのですが、三井寺では偶然か、あるいは特殊な技術で作れたということではないでしょうか。しかし、重要なことは、三井寺の梵鐘からは弦のようにきっちりとした整数倍音は基本的には出ていないということです。

興味深いのは、この三井寺の鐘の音の並びがポリゴノーラとよく似ていることです。表 5−1 の真ん中のポリゴノーラの音列を見てください。基音が 248 Hz の音の並び方を比で表すと、その比は、三井寺の梵鐘の比とよく似ています。似ているものを太字で示しました。三井寺で出る 10 個の音のうち 8 個の音の並び方がポリゴノーラとほぼ同じです。その振動様式はピザの線が全くない純ドーナツの震え方（3 種）と、ピザとドーナツの混合の震え方（5 種）です。ポリゴノーラが日本の梵鐘によく似た音色を出す理由はここにあると思われます。

ポリゴノーラは整数倍音ではなく、非整数倍音を出します。次の第 6 章に述べますが、自然界に満ち溢れる音は、非整数倍音の音です。日本人は梵鐘に自然界の非整数な倍音を感じているのではないでしょうか？

西洋の鐘の音は、日本の梵鐘とは違います。形は先が広がっています。この広がりは、整数倍音を出しやすい構造です。また、鐘の内部にぶら下げられた舌が、日本の梵鐘よりもかなり鐘の外縁に近い部分に当たることも、整数倍音を出しやすい仕組み

です。実際「カリオン」という、ドレミの音階を出す鐘の組み合わせがあります。

日本の梵鐘は自然界の音（非整数倍音）をそのまま出し、西洋の鐘はいろいろ改良して弦の音（整数倍音）に近づけたといえるかもしれません。

参考文献

櫻井直樹・林皇志・D. van Beers・桜井真樹子　（2020）日本の梵鐘の部分音と振動モードについて、人間環境科学、27：3～13.

フレッチャー、N. H. & ロッシング、T. D.　（2002）楽器の物理学、シュプリンガー・ジャパン

コラム５　地球の音色

～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～

2004 年 12 月 26 日、インドネシアでスマトラ―アンダマン地震（日本ではスマトラ沖地震と呼ばれる）が起こりました。この時、世界中の観測地点で、地震波が観測され、それをまとめたものが、2005 年に論文として出されました。地球も見方によれば、スイカと同じ球体です。地殻（皮）があり、中にマントル（果肉）があります。地震は、ちょうどスイカ名人がスイカをたたいた時と同じ振動を地球に与えます。報告によると、地震波の周期は、53.9 分、35.6 分、20.5 分などが観察されています。これを周波数で書くと、0.31mHz、0.47mHz、0.81mHz などと記述できます。１mHz とは千分の１Hz のことで、1000 秒に 1 回、つまり約 17 分に 1 回の振動です。もちろんこの振動は人の耳には聞こえません。そこで、0.31mHz を基準として、比で書くと、これらの振動は、1.00・1.52・2.10・2.61・3.06 となります。0.31mHz は聞こえないので、最初の周波数を 200Hz にして、この比を用いてシンセサイザーで音を作り、聞いてみると、スイカとよく似た音が聞こえました。このことから地球をたたくと、スイカと同じような音がすることがわかります。ただし、私たちの耳にはその生音は聞こえません。宇宙でもこのような音が鳴っているかもしれませんが、私たちの耳には聞こえません。もっとも真空の中で音は伝わりませんが。

参考文献

Park et al.,（2005） Earth’s oscillations excited by the 26 December 2004 Sumatra-Andaman earthquake. Science 308: 1139-1144.

第 6 章　三角形、四角形、五角形、六角形ポリゴノーラ

円以外の多角形のポリゴノーラも作成できます。まず辺の数が最少の三角形です。三角形には正三角形、二等辺三角形、直角三角形がありますが、まず正三角形を説明します。三角形の場合も、①素材の選定、②厚さと大きさの計算、③支持の方法、④楽器をたたく道具の選択、を考えねばなりませんが、①、③、④は円盤の場合と同じですので、この節では「②厚さと大きさの計算」について説明します。

１.　トリゴノーラ（正三角形楽器）

正三角形の板（高さ 180 ㎜、厚さ 2 ㎜）の周りが自由に振動する場合の振動の様式は図 6－1 のようになります。

この場合、正三角形の中にさらに小さな正三角形が 4 個できる模様を示す振動数（384 Hz）が基音になります。内部の逆正三角形が下にへこんでいるとき、外の黒い 3 つの正三角形が上に飛び出している振動様式です。次の瞬間は逆に、内部の逆三角

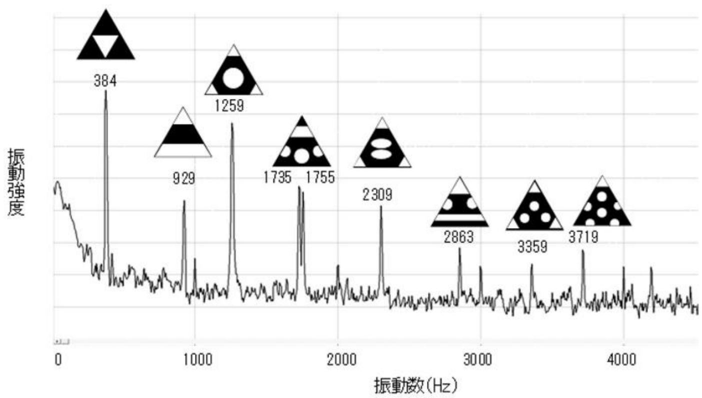


図6-1　正三角形（リン青銅、高さ180ミリ、厚さ2ミリ）の振動スペクトル
重心をたたいた時のスペクトル及びクラドニ図形

形が飛び出し、外側の 3 つの三角形がへこみます。真ん中の逆三角形の中心が全体の正三角形の重心になります。この重心をたたくと図 6－1 のようなさまざまな音が生じます。

三角形の振動様式をよく見るとわかるのですが、たたいた後、三角形の頂点はいつでも震えています。そこで頂点のどれかを指でつまむと余韻が瞬時に止まります。いわゆるミュートです。円盤ではミュートは難しいです。円周のどこかの端を指で触っても、その場所を節とするピザ様式の余韻は消えません。

表6-1　三角形の音階の作成

倍音列比	音階番号	音階比
1.00	1	1.00
2.42	2	1.24
3.28	3	1.30
4.52	4	1.39
4.57	5	1.46
6.01	6	1.61
7.46	7	1.83
8.75	8	≪2.12≫
9.69	9	2.12
10.92	10	2.27
	11	2.42

さて正三角形をたたいた時に基音となる 384 Hz を 1.000 とすると、第 2 番目のピーク 929 Hz の比は 2.42 となります。これを順に 1259、1735、1755、2309、2863、3359、3719、4195 Hz ととっていくと表 6－1 の左の列のような倍音列比の数字が出ます。そこでこれを基に不協和度を計算し、新たな正三角形音階を求めると、表の右の列のようになりました。ただし、音階番号 8（比 2.117）と音階番号 9（比 2.118）はあまりにも近いので番号 8 の 2.117 はとらないことにします。そうすると正三角形の新しい音階が 10 個できます。最後の音階（2.42）は音階番号 1 の三角形の第 2 倍音（2.42）と同じ値です。つまり、基音に対して第 2 番目の倍音まで全部で 10 個の音階ができたことになります。この場合 1 オクターブは、2.42 になるのかもしれません。

次に正三角形の設計について述べます。正三角形の振動と厚さや大きさの関係は次の式であらわせます（Leissa, 1993)。

$$a=(\lambda/2\pi f)^{1/2} \times (D/\rho h)^{1/4}$$

ここでａは正三角形の底辺からの高さ（m）です。ｆは目指す音（振動数、 Hz)、ρは密度、ｈは厚さ（m)、Ｄは以下の式で定義されています。

$$D=Eh^3/(12\times(1-\sigma^2))$$

Ｅはヤング率、σはポアソン比です。E、σ、ρ等は使う材料によって異なりますので、適切な値を使います。ポアソン比 （σ） は、測るのが難しいので正確な値が知られていませんが、リン青銅の場合は大体 0.33 と見積もられています。λは正三角形の各振動様式の固有値で、一定の値を取ります。

２　クアドローラ（四角形楽器）

四角形には正方形と長方形があります。まず正方形から説明します。

正方形の青銅板をたたくと図６－２のようなスペクトルが出ます。

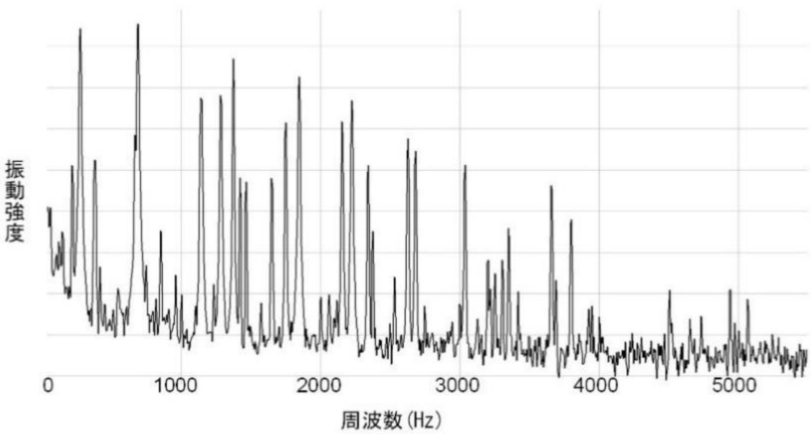


図6-2　正方形ポリゴノーラのスペクトル
1辺180ﾐﾘ、厚さ2ﾐﾘの正方形のポリゴノーラの中心をたたいた。

円盤や正三角形の場合（図 4－1）と比べると、ピークの数が大変多いことに気づきます。またクラドニ図形を見ると図 6－3 のようないろいろな様式が確認できます。この振動ピークの値は、次のような式で予測できます（Leissa, 1993)。

$$\lambda = m^2 + (a/b)^2 \times n^2$$

ここで a と b は、四角形の 2 つの辺の長さですので、正方形なら a／b は 1 となります。また m と n は 1 以上の整数の数字が入ります。そこで正方形の場合、上の式は a＝b なので

$$\lambda = m^2 + n^2$$

となります。

このｍとｎに 1, 2, 3 という数字を当てはめていくと表 6－2 の表 A のような数字λの列ができます。m＝1、n＝1 の時の 2 に対して他のλの値がどのような比になるかを示したのが同じ表の B です。

表6-2　**正方形の共鳴ピークを予測するλの値**
表A、 λの値：表B、m=1, n=1 のλを1としたときのその他の比率。

表A		m						
		1	2	3	4	5	6	7
n	1	2	5	10	17	26	37	50
	2	5	8	13	20	29	40	53
	3	10	13	18	25	34	45	58
	4	17	20	25	32	41	52	65
	5	26	29	34	41	50	61	74
	6	37	40	45	52	61	72	85
	7	50	53	58	65	74	85	98

表B		m						
		1	2	3	4	5	6	7
n	1	1	2.5	5	8.5	13	18.5	25
	2	2.5	4	6.5	10	14.5	20	26.5
	3	5	6.5	9	12.5	17	22.5	29
	4	8.5	10	12.5	16	20.5	26	32.5
	5	13	14.5	17	20.5	25	30.5	37
	6	18.5	20	22.5	26	30.5	36	42.5
	7	25	26.5	29	32.5	37	42.5	49

この表から、m＝1、n＝1 の時の音を基音と決めて、その音の振動数を 1.00 とするとその上のピークに対してこのような比で倍音が並ぶことになります。

実際にどのようなピークが出たかを図 6－2 を参考にして見ると、主要なピークは表 6－3 のようになります。

表6-3　正方形倍音比の実測値と理論値

実測Hz	実測比	理論値
277	1	1
667	2.41	2.5
688	2.48	2.5
1136	4.1	4
1283	4.63	5
1380	4.98	5
1749	6.31	6.5
1857	6.7	6.5
2155	7.78	?
2232	8.06	?
2348	8.47	8.5
2378	8.58	8.5
2630	9.49	9
2693	9.72	10
3037	10.96	10
3199	11.55	12.5
3318	11.98	12.5
3434	12.4	13
3661	13.21	13
3819	13.92	14.5
4310	15.56	16
4508	16.27	17
4519	16.31	17

表 6－3 では、2155 Hz と 2232 Hz に対応する理論値はありませんが、ほかのピークの出方はほぼ全て表 6－2 で予測した通りに出ています。これから正方形の板の振動はほぼ理論通りに出ていることになります。しかし、ここで注意すべきは 2.5、5.0、6.5、8.5、10.0、12.5、13.0、17.0 の数字が 2 つずつ出ていることです。実際に 2.5 の理論値に当たるピークは 667 Hz と 687 Hz に 2 本出ています。この両者が全く同じ振動数なら問題ないのですが、わずかにずれます。これは比にすると 3.0%のずれで、不協和な音として認識される音高のずれです。

2 つの音が出る理由は、おそらく正方形の縦と横の長さが少しだけ違うか、あるいは、正方形の中の金属の性質が不均一で、縦と横で震え方が少し違うからと思われます。正確に縦横の長さが同じで、全体が均質な金属の正方形なら、2 つの音は出ずに、ひとつのまとまった音が出るのではないかと思われます。

理論上一つの音が出るはずなのに 2 つの音が出てしまうのは音色に大きく影響します。かなり接近した 2 音が多数存在するので、澄んだ単純な音がせず、シャーンという複雑な音がします。正三角形は単純な 1 つの独立したピークが、ある間隔で並んでいますので、このようなことはありません。正方形では、理論通り 2.5 倍なら 2.5

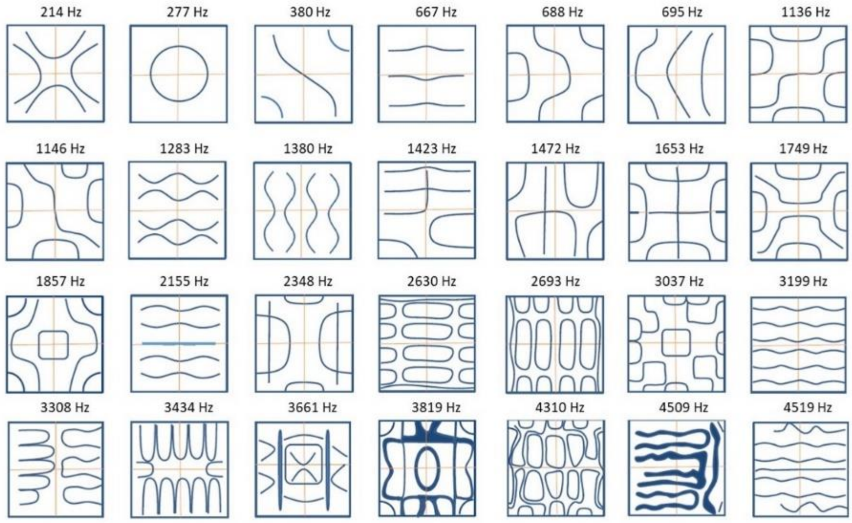


図6−3　正方形のクラドニパターン

倍のピークがまったく同じところに 2 本重なっていればいいのですが、少しずれるのです。これが正方形楽器の弱点です。

正方形で 2 つの振動が出る説明は、正方形の板の振動を目で見えるクラドニのパターンを取ってみるとよくわかります。図 6−3 では図 6−2 で得られたピークの振動数を個別に板に与えて、板の上に軽い粉末状のものをまいてできるクラドニの模様を写したものです。

例として［688・695 Hz］を取り上げます。この模様は、180 度回転させると同じになります。同じ振動様式とみなせますので、本来なら同じ音が出るはずです。寸法が縦横正確に同じでなく、金属の性質が不均質なら、2 つのパターンから出る振動数は若干異なります。

688 Hz と 695 Hz はわずか 7 Hz しか違いません。しかし、7 Hz の違いでも 1 秒間に 7 回の周期ですので、耳の良い人には 1 秒間に 7 回の唸りが聞こえます。このようなことが別の音でも生じるので、全体として、単純ではない複雑な音になります。

1136 Hz と 1146 Hz でも、どちらかを 90 度回せば重なります。同じ振動様式なのに二つの音が出ます。両者はわずかな差ですが、10 Hz の違いは、1 秒間に 10 回の唸

りを生じます。

図 6−1 の正三角形の場合も、スペクトルをよく見ると接近したピークが見えますが、その数は 5000 Hz まででわずか 2 本です（1730・1755 Hz と 4195・4229 Hz)。それに比べ正方形では 4000 Hz までで 6 本あります。正三角形でもよく見ると 377 Hz、1261 Hz、3354 Hz ではクラドニの模様が点対称になっていますので、実際は 120 度ずつずれた振動に基づいた音 3 個出ていると思われます。図 6−1 をよく見ると、1261 Hz や 3354 Hz のピークの裾野はほかのピークと比べて広くなっています。これらは、3 本のピークが合わさったためかもしれません。

正三角形では 3 本がまとまりやすく、正方形では、2 本がわかれやすくなる理由はよくわかりません。3 本目があるとまとまりやすいのかもしれません。

このように三角形と正方形では発生する音のピーク数がかなり違い、その結果音色に大きな違いが出ます。聴いた印象から言うと、正三角形は澄んだ、もの悲しい音がします。正方形は明るい印象の音色です。　図 6−4 は横と縦の比が 1：1.618 の黄金比と呼ばれる長方形ポリゴノーラで中央と端をたたいた時のスペクトルです。時代劇の火事の場面で出てくる半鐘のような音がします。

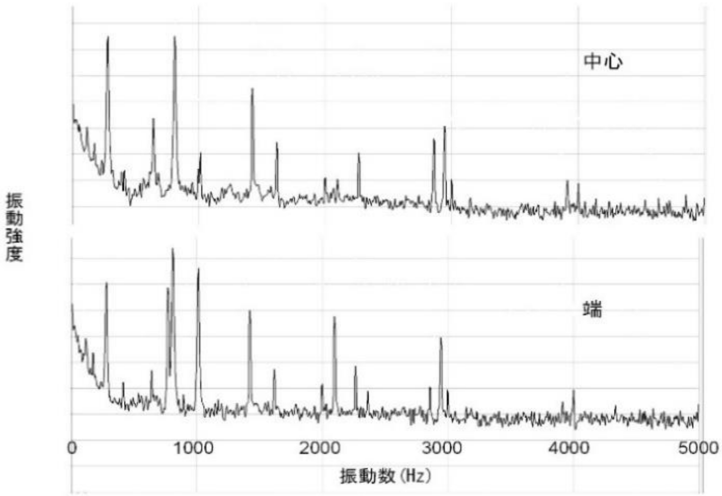


図6-4　長方形（黄金比）のスペクトル
厚さ2ミリ、長辺162ミリ、短辺100ミリのリン青銅の中心と端をたたいた。

このスペクトルを元に倍音列比を計算し、不協和度計算から音階を作ると表6−4になりました。

この音階では、3 倍音に当たる 2.882 の音程が音階番号 5 として採用されています。2 倍音である 2.28 のところには音階ができませんでした。

また音階番号 1 と 2 の間(1.00 と 1.75)が開きすぎていることが問題です。

長方形では、均等な音階ができませんでした。黄金比の意味については次で述べます。

表6-4　黄金比長方形の倍音列と音階

倍音列比	音階番号	音階比
1.00	1	1.00
2.28	2	1.75
2.88	3	2.01
3.61	4	2.06
5.05	5	2.88
5.74	6	3.51
8.01	7	3.61
10.12		
10.41		
13.82		

3　ペンタゴノーラ（正五角形楽器）

図 6−5 に正五角形の楽器を鳴らした時のスペクトルを載せました。

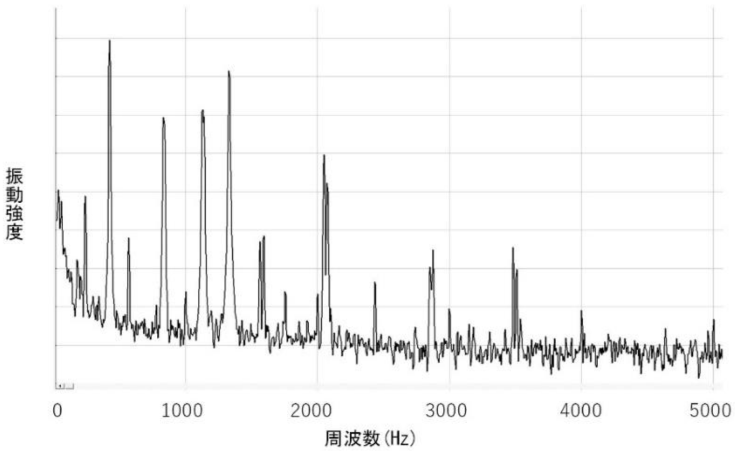


図6-5　正五角形ポリゴノーラのスペクトル
高さ180ﾐﾘ、厚さ2ﾐﾘの正五角形楽器の中心をたたいた

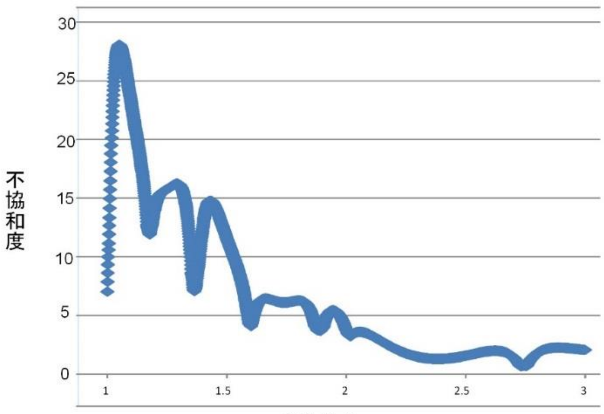


図6-6　正五角形が発生する倍音から計算した不協和度曲線

正五角形は四角形や長方形ほど、たくさんのピークが並ばず、単純な構成です。しかし、1.5ｋ（1500)、2.0ｋ（2000）3.5ｋ（3500）Hz あたりに隣接する 2 本のピークが見えます。ただ正方形よりもまばらにピークが並んでいることは、良い音階ができる可能性があります。基音から 4 倍の振動数までのピークを取って不協和度を計算して音階を作ってみました。

使った共鳴ピークは 8 本で、その比は、1.000（基音)、2.006、2.018、2.730、2.755、3.215、3.772、3.820 です。不協和度グラフを図 6−6 に示しました。この不協和度の低い谷が協和のいい音なので音階を与えます。

できた音階は、表 6−5 の左の列にしめしました。6 番目の 2.02 は倍音で使った第 2 番目のピーク（2.018）と同じです。つまりこれが 1 オクターブ上の音となります。1 オクターブの中に 5 音入っているので、5 音階です。前にも述べましたが、もと

表6-5　正五角形の音階とガムランの音階

音階番号	音程比率	スレンドロ	ペロッグ
1	1.00	1.00	1.00
2	1.17	1.14	1.29
3	1.37	1.32	1.39
4	1.60	1.53	1.49
5	1.89	1.74	1.89
6	2.02	2.00	2.00

もとオクターブというオクトという言葉には 8 という意味がありますので、正五角形でできた 5 音階にオクターブというのはおかしいですが、便宜上使います。

第 3 章でも述べたように、人の耳では純音（倍音がない音）を聞かせたら正確に 2.0 倍ではなく、2.1 倍の音をオクターブと判断することが知られています。正五角形でできた新しいオクターブ、2.02 倍の音をオクターブと人の耳は許容して聞いてくれるのでしょうか。

また、この 5 音階は 2.02 倍を 5 分割していることになります。尺八の穴が 5 穴であることと通じるところがあるのかもしれません。表 6－5 には、比較のためにインドネシアガムランで使われる 2 つの音階、「スレンドロ」と「ペロッグ」の一部の音程比率を並べました。正五角形でできた音階は、ガムランの 2 つの音階の両方に近いように見えます。

ドビッシーは、1889 年のパリ万博でガムランを聞き、彼特有の全音階を着想したのではないかと思います。この全音階は、昔のアトムの TV 漫画の主題歌の最初に流れています。

実は正五角形には他にいろいろな意味があります。前節でも出ました黄金比です。黄金比は 1.618 で知られ、ギリシャ彫刻にこの比が多く使われていることでも有名です。正五角形の中にはたくさんこの比が埋もれています（図 6－7）。

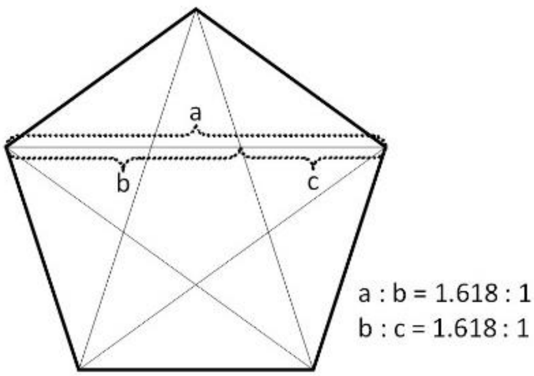


図6-7 正五角形内部に含まれる黄金比率

正五角形の内部に線を引くと、それぞれの線の長さは、黄金比になっています。この比は次のようにも説明できます。次の数字の並びを見てください。

0　1　1　2　3　5　8　13　21　34　55　89　144　233　377　610　987
1597　2584　4181　6765　10946 ……

この数字の並びは簡単な法則があり、足し算さえ知っていれば永遠に続けられます。あるひとつの数字は前の 2 つの数字の和で得られます。これをフィボナッチ数列といいます。イタリアの数学者、レオナルド・フィボナッチ（1170？～1250？）が記載しました。最後の二つの隣り合う数字、6765 と 10946 の比（10946／6765）を取るとその値は 1.618 になりほとんど黄金比（1.618）と同じです。しかし最初は 1（1／1）だったり 2（2／1）だったり 1.5（3／2）だったりするのですが、だんだん数が多くなると隣り合う数字の比は黄金比の 1.618 に近づきます。

さてこのフィボナッチ数列は、花びらの数、マツカサやヒマワリの種子の並び方、植物の葉のつき方に関連していることが古くから知られています。これに何か意味があるのでは、と考えた人も多いのですが、結局偶然ではないかということで、一時はフィボナッチ数列と生物の形を関連付ける研究は廃れました。

しかし現代の新しい生物学を用いると、その意味がわかってきました。生物が細胞分裂をするとき、1 つの細胞が分裂して、2 つの細胞になります。たとえば植物の茎の先端では 1 つの細胞がずっと分裂を続け、背後に分裂した細胞を残しながら自分自身は上に上昇していきます。つまり、自分から生まれた細胞の影響を受けながら、新しい細胞を生み出していきます。この様子は数理的、植物生理学的、分子生物学的に黄金比で説明できるといわれています（近藤、2013)。細胞分裂の様子は黄金比に対応していて、葉のつき方、種子のつき方、巻貝の大きさにも関係するといわれています。そして近年、世界遺産に登録されたル・コルビジェの設計による東京上野の国立西洋美術館も、黄金比を採用しています。短辺と長辺の比が、黄金比の 1.618 になっている長方形は、その長辺を新しい正方形として積み重ねていくと、巻貝の形やコル

ビジェの設計した国立西洋美術館の形になります。

私たちの体は「五体」といいます。両手･両足･頭の数を数えたものです。指の数、桜の花びら、ヒトデの足が 5 を基本としていることは、偶然ではないのかもしれません。黄金比を中に含む正五角形から出てくる音は、私たち人類にどう響くのでしょうか。

4　ヘキサゴノーラ（六角形楽器）

正六角形は正三角形を 6 つ重ねるとできます。したがって、その振動の様式は三角形を基本としていると考えられます。図 6－8 は正六角形のポリゴノーラの中心をたたいたときのスペクトルです。ピークの間隔は詰まりすぎず、適度に離れていますので、よい音階ができます。

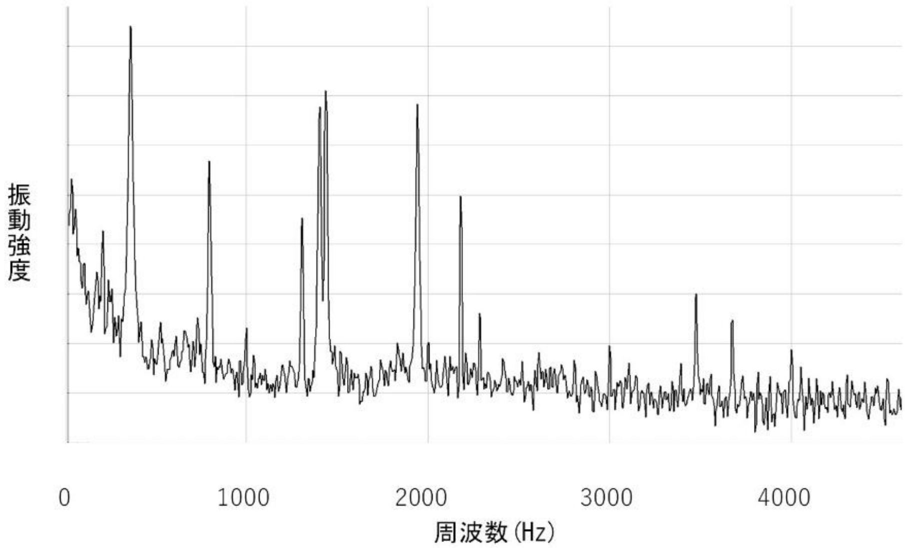


図6-8　六角形楽器のスペクトル
高さ180ﾐﾘ、厚さ2ﾐﾘの六角形楽器の中心をたたいた

表6-6　各種ポリゴノーラの音階						
音階番号	正三角形	正方形	五角形	六角形	円盤	平均律
1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
2	1.114	1.274	1.177	1.136	1.163	1.059
3	1.243	1.360	1.365	1.216	1.229	1.122
4	1.315	1.422	1.601	1.381	1.270	1.189
5	1.384	1.527	1.892	1.573	1.308	1.260
6	1.465	1.620	2.018	1.770	1.384	1.335
7	1.619	1.671		1.912	1.492	1.414
8	1.827	1.731		2.053	1.696	1.498
9	1.916	1.873		2.223	1.811	1.587
10	2.130	2.001			1.931	1.682
11	2.274	2.207			2.066	1.782
12	2.464	2.516			2.254	1.888
13						2.000

表 6−6 にこれまでのポリゴノーラの音階をまとめて示しました。

これを見ると、六角形の循環点の値 2.22 は、円盤とよく似た値になっています。表 6−6 にまとめたそれぞれの音階が、どれくらい互いに協和するかを示す協和度を比べると、2 循環音階で表 6−7 のようになります。

三角形、五角形、円盤の協和度がほかと比べて若干高いようですが、音階の良し悪しは、不協和度曲線の谷の深さも関係していますので、一概に優劣はつけられません。四角形のポリゴノーラは、ひとつの振動様式が、90 度ずれたものが 2 種類混じり、隣り合う二つのピーク、つまり非常に近い音が 2 つ同時に出やすいので、唸りが生じ、音色的にはあまり音程間のある音が出せないという欠点があります。

表6-7　各種ポリゴノーラ2循環音階の協和度					
三角形	正方形	五角形	六角形	円盤	平均律
76.2%	70.7%	74.0%	69.7%	88.0%	96.0%

５　ルーロの多角形

正三角形のある頂点から、となりの2番目の頂点にコンパスを広げ3番目の頂点に向けて円を描きます。3つの頂点にコンパスの針を刺してそれぞれ円弧を3つ書くと図6−9のようになります。星印で示した頂点同志を円弧で結んだ図形がルーロの三角形です。とがった頂点がなくなります。

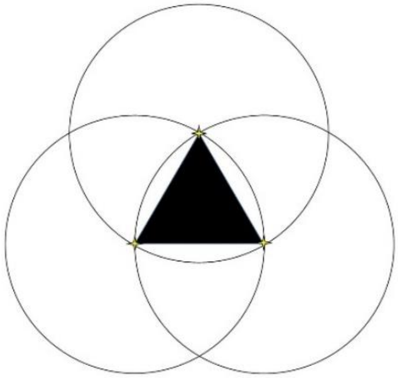


図6-9　ルーロの三角形
ルーロの多角形はドイツの学者Franz Reuleaux（1829～1905）によって考案されました。ルーロの多角形は、頂点が奇数のときのみに存在できます。

お掃除ロボットにこの名がついているものがあります。これは多角形と無限多角形（円）の融合のような形です。この形でポリゴノーラを作ると元の正三角形よりもソフトな音色がします。正三角形以外に正五角形、正七角形のように奇数辺を持つ多角形でルーロができます。

参考文献

近藤　慈　（2013）波紋と螺旋とフィボナッチ、秀潤社

Leissa, A. （1993）　Vibration of Plates, Acoustic Society of America.

コラム　6　日本人の音感覚（2）　～食感と言葉～

～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～

昔のコマーシャルに、「お茶漬けサ～ラサラ、たくあんポ～リポリ」、という歌がありました。スイカはシャリシャリ、レタスはパリパリ、リンゴはサクサクなど、日本語には食感を表す言葉（擬音、オノマトペ）が多数あります。中国語や、韓国語にも多いのですが、ヨーロッパ、やアメリカにはほとんどありません。アメリカで食感を表す言葉として多用されているのは、クリスピー（Crispy）とクランチ（Crunch）です。アメリカの TV の食品コマーシャルでは毎日、この 2 語が多用されています。しかし、日本語には食感を表す言葉が大変多様で多数あります。

食品を噛んで出る音は、歯が食品を破壊するときに出ます。この時の音は、ドレミではありません。非常に複雑な音です。非整数倍音の塊といってよいでしょう。しかしこの音を表現するために、日本人は多数の言葉を作りました。この音を聞き分けて、表現し、食感の違いについて話すことを楽しんだからでしょう。日本人の耳は、これらの音を聞き分けているのかもしれません。

これら食感を表す言葉、シャリシャリ、パリパリ、サクサク、ポリポリは不思議なことに、一つの言葉を二つ重ねて作っています。音の出ない食感を表す言葉、モチモチ、フワフワ、トロトロも重ねています。

また、ゴロゴロする、ビクビクするなどは、擬態語の範疇に入りますが、やはり、2 回重ねています。日本語はこのような擬音語や擬態語の多いことが特徴です。マンガにも擬態語、擬音語があふれています。これにより微妙なニュアンスを的確に相手に伝え会話を楽しむことができるのでしょう。

第７章　整数倍音、楽器の音、自然の音

１　自然界と非整数倍音

これまで、球体（スイカ）や平面（ポリゴノーラ）から出る非整数倍音を元に新しい音階と、新しい楽器を作ってきました。これらの音階や楽器から未来の音楽が生まれるのでしょうか？それを考える前に、自然界の音を分析しました。

自然界の音で整数倍音を発している音はほとんどなく、非整数倍音に満ち溢れています。自然の音と人間の作った音楽を聴くとき、人はそれを同じ音として脳で処理しているのでしょうか。

人は言語を左脳で聞き処理しているようですが、私たち日本人は自然の音である虫の声、鳥のさえずりや、川のせせらぎも左脳で聞いているといわれています（角田、1981)。左脳は言語以外に自意識、論理的思考をつかさどるといわれています。それに対して右脳は空間感覚やイメージを認識するといわれています。脳科学者であるジル・B・テイラー （J. B. Taylor, 2012） は自分自身が脳卒中で倒れたとき、自分の左脳の機能が出血によって失われていくと同時に、数字や文字が判読できなくなり、それと同時に右脳で幸福感と宇宙との一体感を感じたと、脳科学者ならではの表現でTED（Technology, Entertainment & Design）で証言しています。

右脳と左脳は全く同じ働きをしておらず、役割がある程度分担されているようです。日本人が虫の声を左脳で聞くという行為は、自然を意味のある言葉として聴いていると解釈できるかもしれません。それでは、西洋人は虫の声をどのように聞いているのでしょう。ただの雑音として処理されているかもしれません。少なくとも、西洋人には日本人のように虫の声を愛でるという習慣はないようです。

最近の研究によると音楽を聴く場合、脳はたくさんの部分を同時に使っているようで、脳と音楽の関係は単純ではないようです（ボール、2010；レヴィティン、2010)。例えば、音そのものは耳から振動数という情報で左脳に伝えられますが、そこではま

ず音高と音量が受容されます。それから音楽として認識するには右脳が使われるらしいです（Salimpoor ら、2011)。

自然界で聞こえる音で、整数倍音を発しているものは大変少ないのです。だからこそ弦の音がこの世のものではない音として認識され、西洋で音楽の基礎として追求されたのではないでしょうか。ほとんどの自然界の音は 2 次元（平面)、あるいは 3 次元（立体）から発生しています。例えば木の葉のそよぐ音は平らな 2 枚の葉が互いにこすれあって出る音です。また、虫の音も羽（平面、2 次元）をこすり合わせて作る音です。風や水も、もともと形が決まっているわけではありませんが、少なくとも弦ではありません。川のせせらぎ、潮騒は水の出す音です。隙間風の音は風の出す音です。これらは弦が出す音とは根本から違っています。そこで、この章では、まず私たちを取り巻く自然界の音がどのような音かを見てみます。

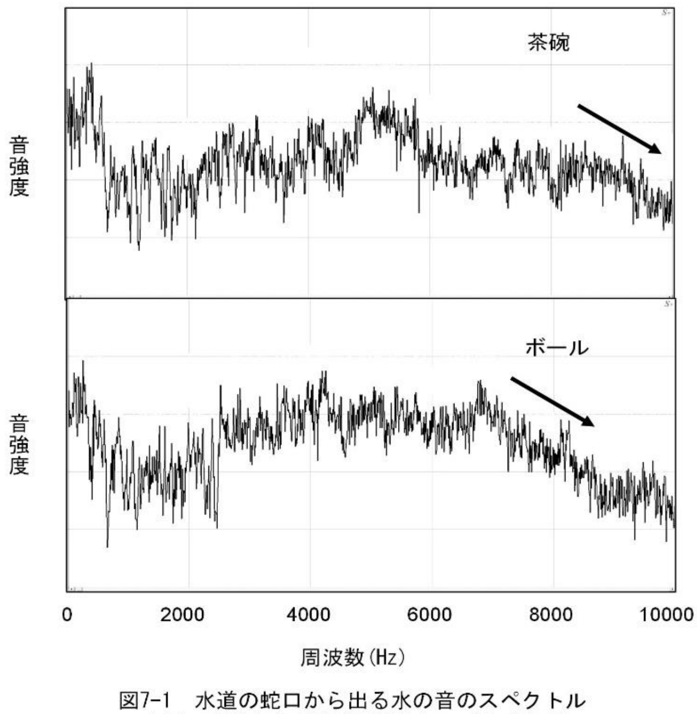


図7-1　水道の蛇口から出る水の音のスペクトル
上図　水道水を茶碗(直径10センチ)に受けた。
下図　水道水をボール(直径20センチ)に受けた。

最初に水の音を分析してみます。図 7－1 では、上下に二つの図があります。両方とも台所の水道の蛇口をシャワーに切り替えて水の音をとりました。上の図は水を受ける器に陶器の小さい茶碗（直径 10 ㎝）を置いた場合、下の図はステンレス製の大きなボール（直径 20cm）を置いた場合です。両方とも細かいピークがたくさん出ています。ピアノやギターのスペクトルとはまったく違います。特定の強い振動数がなく、多数の振動数の音が同程度出ています。それをノイズ（雑音）といいます。なんとなく 4000～6000 Hz に山がありますがはっきりしません。

茶碗では、9000 Hz を超えると矢印で示したように右肩下がりに音が小さくなります。下図に示したボールの場合は 7000 Hz からは矢印で示すように音が右肩下がりに弱くなります。両者を比べると、全体的に茶碗のほうは高音成分が多く、ボールのほうは高音成分が少ないと考えられます。これは実際に台所で試してみればわかります。容積の小さなもので水を受けると全体的に高い音がし、容積の大きなもので受けると低い音がします。同じ水でも、受ける容器の大きさで出る音が変わります。それでは水を受ける容積が大きな滝壺のような例はどうでしょう。滝壺の音を分析したのが図 7－2 です。

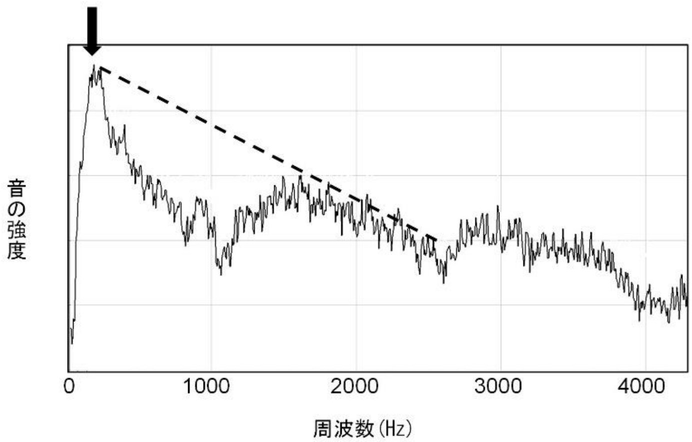


図7-2　滝の音のスペクトル
　明瞭なピークは見られないが、最大のピークは190Hz付近にします(矢印)。音が高くなるに従い段々と小野と強度が下がります。図中の破線は音の高さが2倍になれば、音の強さが1/2になるという線を表します。この線に従うノイズをピンクノイズと言います。

この図を台所の水音と比べると、2 つの違いに気づきます。一つめは最大のピークは 190 Hz くらいにあること、二つめはそのあとグラフが右下がりに下がることです。

図 7－1 のような水道の蛇口から出る水音では、高音成分が多く、スペクトルがどちらかといえば茶碗の場合は 8000 Hz まで、ボールの場合でも 7000 Hz まで**水平状態**を保っています。このように振動数が高くなっても音の強さが一定という特徴を持つノイズを**“ホワイトノイズ”**といいます。ラジオでダイヤルが放送局の電波と合わないときに「シャー」という音が聞こえます。これが、ホワイトノイズです。

一方、滝の音では振動数が高くなるに従い音の強度が下がっていきます。その下がり方の平均を取ると、図中に引いた黒い直線のようになります。この直線の傾きは、振動数が 2 倍になると音の強度が 1 ／2 になるという傾きを表しています。このように、音の高さ（振動数）が 2 倍になると、音の強さが 1／2 になる雑音を**“ピンクノイズ”**といいます。

人の身体は 60％以上が水でできており、水は生命を維持するのに非常に重要です。だから日本人は自然界の水の音を聴いていると安心して落ち着くのかもしれません。砂漠の多い国に住む人々は水の音を安心する音とは感じないといわれています。しかし、日本人でも台所の水の音を聞いて癒されるという人は少ないはずです。滝のピンクノイズが心地よいのでしょうか。

次に自然界の音の例として鳥のさえずりを分析しました（図 7－3）。

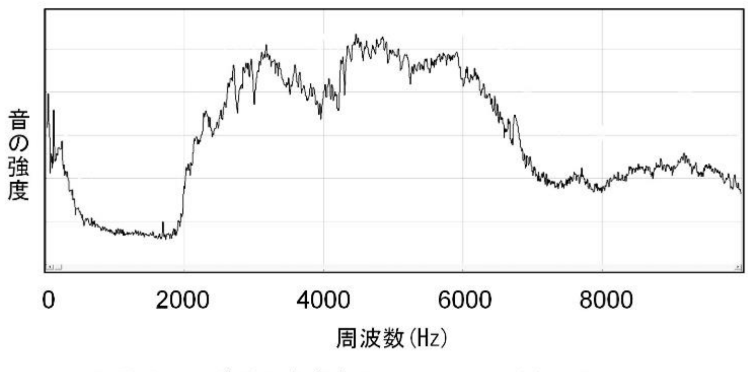


図7-3　ひばりの鳴き声のフーリエスペクトル

ヒバリは、春先自分の縄張りを示すために空高く舞い上がりさえずります。その鳴き声を分析してみるとピークが何本も出ていて、全体として山形をしており、その振動数は、2000～6000 Hz にまとまっています。ピアノのような整然としたピークの並び（整数倍）にはなっていません。

つぎに、カエルの鳴き声の分析例を示します(図 7－4)。
大きく分けて、2 つの山があります。1000～2000 Hz に 1 つ、2000～3000 Hz にもう 1 つの山があります。その山の中に、鋭いピークが所々に出ています。それらの間には、整数倍の関係にあるものは一つもありません。図 7-3 に比べて、ピークが左側にあります。つまり、カエルの鳴き声はヒバリに比べて低いです。

最後に虫の声の例を図 7－5 に挙げます。上段の図はエンマコオロギ、下段はスズムシです。エンマコオロギは細かなピークが寄り集まり、なだらかな連峰のようなスペクトルです。主な振動数は 3000～6000 Hz にあります。スズムシはエンマコオロギとは異なり、明瞭なピークが 4 本見えます。図中の数字で示しました。4522、5103、5696、6282 Hz です。またエンマコオロギよりも全体的に高い音です。スズムシの鳴き声が江戸の人々に気に入られ、虫屋という商売が成立し、コオロギよりもスズムシが珍重されました。しかしスズムシでも整数倍の音は 1 つも出ていません。

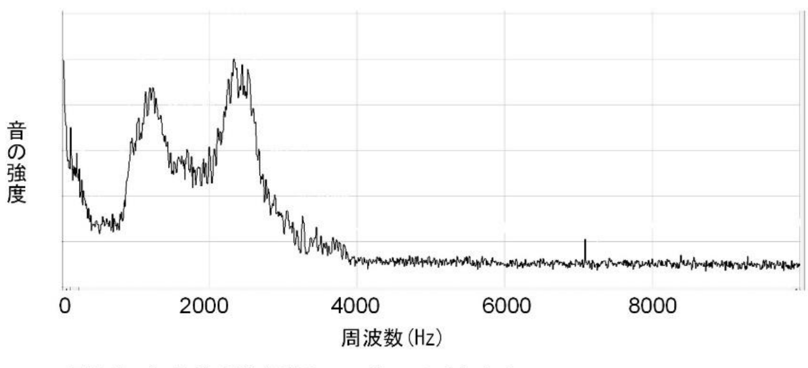


図7-4　かえるの鳴き声のフーリエスペクトル

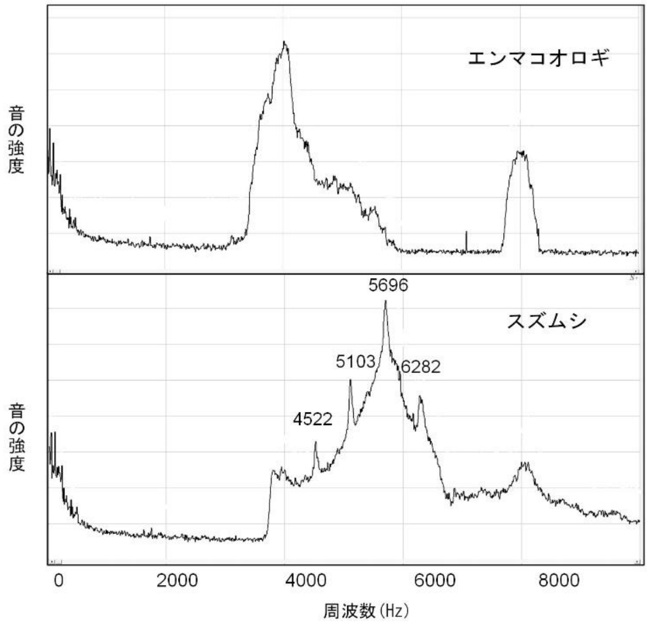


図7-5 虫の鳴き声のフーリエスペクトル
上図　エンマコオロギ
下図　スズムシ

このように、水の音、鳥のさえずり、カエルの鳴き声、虫の鳴き声には整数倍音は出ません。この原因は音を発生する本体が 1 次元の弦ではないからです。たとえばスズムシは羽根（2 次元の平面）をこすり合わせて音を出しています。鳥の鳴き声も肺と嘴の間の三角形の鳴管が知られていて、人間とは異なる発声をするので、整数倍音は出ません。整数倍音しか発生できない弦の音で虫や鳥の声などをまねることには限界があります。逆に言うと、人の声、特にオペラ歌手などの歌声にはきれいな整数倍音が含まれます。進化と訓練にもよるのかもしれませんが、ヒトはほかの動物とは発声ではかなり異なっています。

２　日本の楽器（尺八と琵琶）と非整数倍音

日本に古くから伝わる尺八と琵琶は、整数倍音より非整数倍音がよく出ます。武満徹の『ノヴェンバー・ステップス』に参加したことでも知られる琵琶奏者・鶴田錦史が作曲、演奏した『義経』の冒頭部の琵琶の音のスペクトルを図 7－6 に載せました。

この冒頭部で琵琶奏者は特殊な弾き方をしています。弦を撥で弾くのではなく、こするようにして音を出しています。この音をスペクトルで分析すると、本当に明確な周波数を示すピークは 1 つも出ません。しかし、弦をこする位置を変えることで音程感を変える演奏をしています。弦の中央をこすれば、基音が多く含まれる音が出ますし、弦の駒（胴体側）のほうをこすれば、倍音が多く含まれ高く感じる音が出ます。

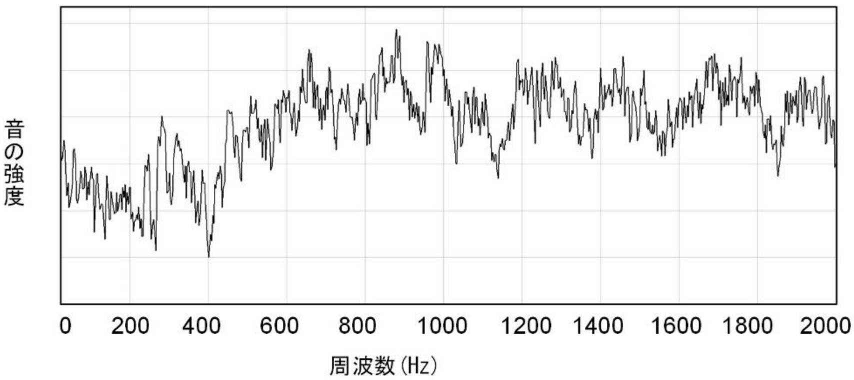


図7-6 琵琶の音のフーリエスペクトル（「義経」の冒頭より、鶴田錦史の世界）
弦を撥でこすりながら音を出しているので、明瞭なピークが出ない。

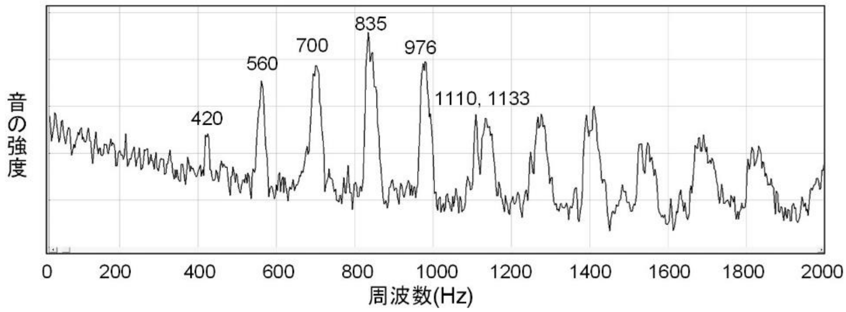


図7-7　琵琶の音（「壇ノ浦」の冒頭、鶴田錦史の世界より）

図 7－7 は同じ奏者の琵琶の別の曲で『壇ノ浦』の冒頭の音です。今度は図 7－6 とは違い、撥で弦を弾いて音を出しています。そのため前の図よりは明瞭なピークがたくさん見えていま。しかし奇妙なことに気付きます。

まず、第 1 章　図 1－5 のピアノのスペクトルと比べると、琵琶のスペクトルは大変複雑です。ピアノのスペクトルではドの音（周波数 261.6 Hz）を基音として明瞭な整数倍音のピークが順次高次側に出ています。また、基音の音量が最も強く、高い倍音になるにしたがってその音量は減少しています。

ところが、琵琶のスペクトルを見ると、どこに基音があるのかわかりません。ここでは基音は 140 Hz と思われます。理由は 420、560、700、835、976、1110 Hz のピークが等間隔に、明瞭に見えることです。これらのピークの間隔は平均すると 140 Hz ですから、420 Hz の下に基音として 140 Hz が存在するはずです。ところが、140 Hz のあたりにはほとんど目に見えるピークがありません。一番大きなピークは、6 倍音の 835 Hz です。しかしこれらが重なって同時に出ると基音の 140 Hz の音が聞こえることが知られています。高次の倍音を頼りに、われわれの耳には、ほとんどスペクトルとしては出ていない基音（140 Hz）が聞こえます。あるいは、3 倍音の 420 Hz の音が基音として聞こえる人もいるかもしれません。

同じことがピアノでも見られます。ピアノの非常に低いド$^{\#}$（C2#）の鍵盤を弾いても基音（69.3 Hz）はほとんど出ていません。2 倍音～7 倍音の倍音は出ています。そ

れでも私たちの耳には一番低い基音である C2#の音（69.3 Hz）が聞こえます。これはこれまで“差音”と説明されてきました。

ところが、シンセサイザーで基音（69.3 Hz）を入れずに、2 倍音～7 倍音の音だけを合成してスピーカーで聞いても、ちゃんと基音の音（69.3 Hz）が聞こえます。この事実から、人の耳は失われた最低音を“差音”で補って聴く力を持っている、と説明されています。この説明はおそらく間違っています。実際に 2 倍音～7 倍音の波形をコンピュータで足してグラフにすると、基音の波形（69.3 Hz）が現れることが証明されています（Koenig, 2011)。

ピアノの弦では 69.3 Hz のような低い音を出すことはできない（あるいは基音を 2 倍音より大きく出すことが難しい）のですが、2 倍音以上の整数倍音がちゃんと出ていれば、人の耳には狙った音（69.3 Hz）が聞こえます。ちなみにピアノの高音の音では、基音ばかりが目立ち、高次の倍音がだんだん出なくなります。高い C7 では 2093 Hz の基音だけしか出ていません。一番右端の C8（4186 Hz）では、基音が主であることには変わりありませんが、かなり雑音が混じります。これがピアノという楽器の限界なのでしょう。また、これ以上高い音では人の音程感覚があいまいになるともいわれています。

話を元に戻しますが、琵琶とピアノが異なる点は、そのピークの明瞭さです。ピアノのピークに比べて琵琶では特に 6 倍音以上では、ピークのすそが大変乱れています。特に、8 倍音に当たる 1110 Hz 以上では、倍音となるべきところに明瞭なピークがありません。これはピーク以外の音がたくさん出ているということを示しています。この理由は、琵琶独特の構造「さわり」によるものと考えられます。

ギターやピアノでは、弦はなるべく点（ピアノではピン）あるいは線（ギターではフレット）で支持しています。弦の振動を妨げない工夫です。そのほうが雑音の少ない純粋な音（整数倍音）が出るからです。

ところが、琵琶や三味線では、わざとビリつかせて雑音をだします。琵琶では 4 本あるうちの 3 本の弦が駒と接するところ、また三味線では 3 本のうち一番低い 1 の弦と駒が接するところが点や線ではなく面になっています（薦田、2003)。つまり弾く

とビリつくのです。もともと琵琶の、特に2弦は音をビリつかせるように出来ています。日本の楽器には整数倍音から外れる音（非整数倍音）を楽器が出すように工夫をしています。自然界の音に近づけているのかもしれません。

わざと音をビリつかせ非整数倍音を出す楽器がほかにもあります。インドには、伴奏楽器として使われるタンプラーという弦楽器があり、駒が平面で弦がビリつく構造になっています。スペインのフラメンコで歌や踊りの伴奏をするギター（フラメンコギター）は弦の高さを低くしてわざと音をビリつかせます。

次に日本独特の尺八のスペクトルを図7－8と図7－9に示します。図7－8は、『木枯らし』という曲からとったものです。ムラ息という特殊な奏法で出された音のスペクトルです。明瞭なピークがみられず、細かなピークが密集しています。

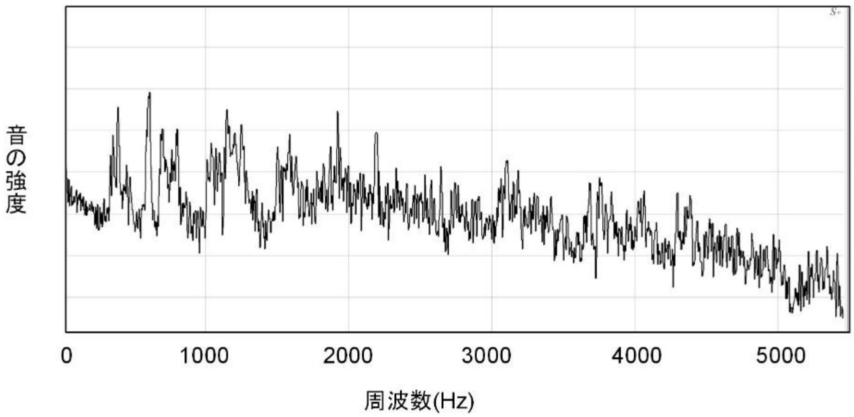


図7-8　尺八のスペクトル（「木枯らし」、演奏　都山流　森　佳久山）
　このスペクトルは。“ムラ息”という奏法で発生されたものである。ピークが明瞭でなく、倍音関係がはっきりしない。

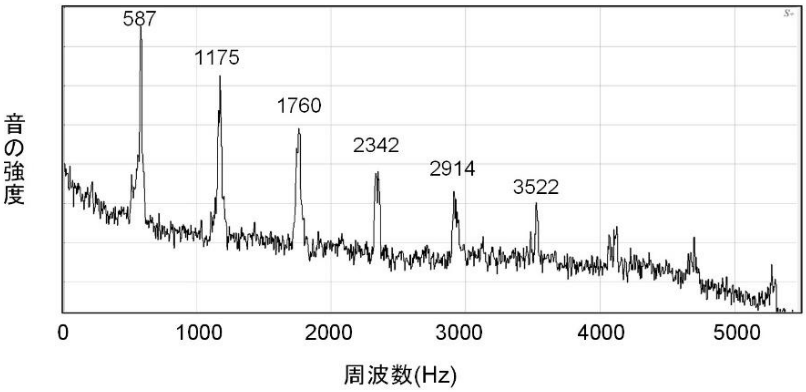


図7-9　尺八のスペクトル（「木枯らし」、演奏　都山流　森　佳久山）
図7-8と同じ曲絵あるが、澄んだ音を出している場面。基音が587Hzにあり、そのあと2〜6倍音まで明瞭に出ている。

一方、同じ曲の中でも明瞭な音を出すときは図 7−9 のスペクトルが取れます。このスペクトルでは、基音が 587 Hz とすると 2、3、4、5、6 倍の整数倍音が明瞭に等間隔で出ています。

図 7−8 のようにムラ息で演奏すると、尺八からは非整数倍音が多数発生します。しかし、奏法を変えれば、図 7−9 に示したように整数倍音だけからなる音も作り出せます。このように、整数倍音と非整数倍音を同じ楽器から自由に操れるのが尺八の特徴です（中村、2010)。フルートでも、少し息を強く吹き込む奏法をとれば、整数倍音以外の音も少し出ますが、基本的には極めてきれいな整数倍音の音しか出ません。非整数倍音が豊富に出る西洋の楽器はサキソフォンです。

3　ピアノとギター　〜 整数倍音楽器 〜

ピアノは基音から始まる整数倍音だけが出やすい楽器です。第 1 章に載せたピアノのスペクトル（図 1 −5）を見ると、13 倍音くらいまできれいに出ています。倍音の間にはほとんど他のピークが出現していません。また基音のピークが最も強く、高次の倍音ほど音の強さは減少していきます。この基音のピークがはっきり出ることが音

程感のある音を出すピアノの強みでしょう。それでは他にそのような楽器があるでしょうか？　ギターもピアノに劣らず整数倍音が出やすい楽器です。しかし、それは弾く場所によります。

図 7－10 にギターの最も高い弦（1 弦ミ、基音 330 Hz）のフーリエスペクトルを載せました。上段は駒の近く、つまり、弦が止められている駒の近くを弾いたものです。この場合ピアノと同様に 10 倍音くらいまで出ています。ギターは弦を弾く場所（右手の位置）を任意に変えられます。

下段は普段はあまり弾くことのない、弦の中央部を弾いた時のスペクトルです。基音がずば抜けて大きく、ほかの倍音がほとんど出ません。特に偶数の倍音列、2、4、6、8、10 倍音がほとんど出ていません。奇数倍音は若干出ています。偶数倍音は常に弦の半分のところが節にならねばなりません。下の図では弦の中央を弾くのでそこに節ができず、結局偶数倍音が出ません。奇数倍音は中心に腹があるので、少し出ます。

ギターでは駒の近くで弦をはじくと、いろいろな倍音が同時に発生します。ちょう

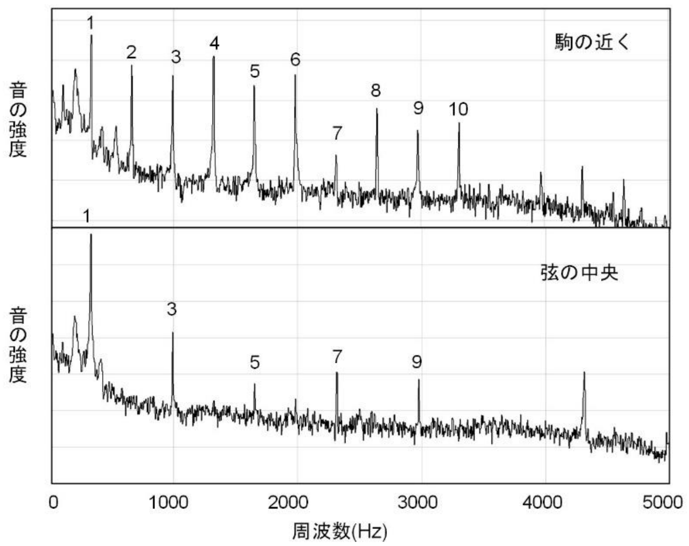


図7-10　クラシックギターの1弦のミのスペクトル(使用楽器　ハウザーII　No. 962)
基音は330Hz(ミ)である。基音に番号1を付けた。
上図　駒の近くをはじいた。
下図　弦の中央付近をはじいた。

ど真ん中をはじくと、そこが腹（振動が最大になる場所）になる倍音（基音）のみがでます。このように弦を弾く場所により発生する倍音列の強さバランスが異なります。これを利用してクラシックギターでは、演奏中に弦を弾く右手の位置を変えて音色を大きく変え、曲にいろいろな表情をつけることができます。これはピアノではできません。

ピアノの音は、ハンマーが弦をたたいて音を出します。このハンマーは鍵盤から同じ距離にあり、距離を変えれません。弦を止めている手前の（鍵盤に近いところ）のピンから弦長の 1／8 か 1／9 離れた場所をたたいています（安藤、1996)。異なる弦の長さに対してもピンから同じ距離の場所をたたくので、弦によりピンから異なる比の場所をたたいていることになります。したがって、ピアノの音に含まれる倍音列の音のバランスは、各音によって微妙に異なります。

以上のように、整数倍音を出す西洋楽器としてピアノとギターを取り上げましたが、西洋楽器の発生する音はきれいな整数倍音を含むように工夫されています。これが日本の楽器、琵琶や尺八と大きく異なる点です。

弦楽器だけでなく西洋楽器の管楽器も整数倍音が出るようになっています。それらは、フルート、クラリネット、オーボエ、トランペットなどです。すべてオーケストラでよく使われる楽器です。

これらに比べ、サキソフォンは同じ金管楽器ですが、あまりオーケストラでは使われません。その理由はその音に含まれる倍音列の乱れにあると思います。

図 7－11 を見てください。このサキソフォンの演奏にはピアノの伴奏がついています。サキソフォンが出している基音は 626 Hz ということがわかり、その倍音列は第 7 倍音（4365 Hz）まで出ています。伴奏のピアノのシャープなピークが低音側にあります。サキソフォンのピークはピアノのようにシャープではなく、何となくその場所に多くのピークが密集しています。このようなスペクトルは今までにもありました。琵琶です。これから、サキソフォンという楽器はきれいな整数倍音を出さないようにできる楽器であり、そのため整数倍音を出す楽器の集まるオーケストラでは敬遠されるのかもしれません。もちろん、サキソフォンでもリードをくわえる位置や力を加減

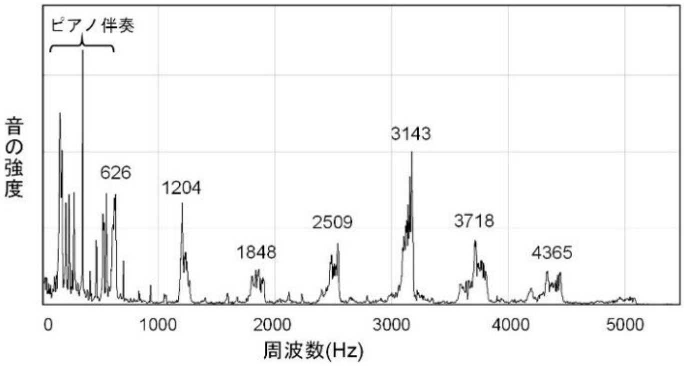


図7-11　サキソフォンのフーリエスペクトル（「ひまわり」　演奏　坂田明）
　サキソフォンの基音は626Hz（ミ♭）で、その上に第7倍音（4365Hz）まで出ている。低い音は、伴奏のピアノのスペクトル。サキソフォンのピークのすそが広いのと、ピアノのすそが狭いことに注意。

すると、整数倍音の多い音を出すことは可能ですが、加える力を緩めると非整数倍音がたくさん出ます。たくさんの非整数倍音はサキソフォンの魅力である多様な音色をうみだします。ジャズのボーカルとよく合います。ジャズの歌声は、オペラとは違い、非整数倍音が含まれ感情が深くこもっています。他にジャズでつかわれる楽器に、ドラム、シンバルがあります。これら打楽器も非整数倍音しか出しません。そのためジャズで使われるようなパーカッションはオーケストラでは使われる機会が少ないです。ジャズでもピアノが良く使われますが、その演奏は整数倍音からわざと外れるような、不協和音を多用します。

ジャズは 19 世紀の末から 20 世紀にかけてアメリカ南部で生まれたとされています（悠、1998）。ちょうど、クラシックの発展が滞ってきたころです。ジャズは非整数倍音以外にクラシックにない特徴を持っていました。例えばリズムです。ジャズはそれまでの音楽と異なるリズムを使いました。これは奴隷としてアフリカからアメリカ大陸につれてこられたアフリカの人々の音楽からとってきたものと思われます。また、打楽器を多用します。アフリカの音楽では多くのパーカッションが使われます。彼らの楽器には弦を使ったものでさえいわゆる雑音とみなされる多くの音が含まれています。雑音とは、非整数倍音そのものです。西洋音楽の主体である整数倍音側から見れば雑音かもしれませんが、アフリカの人々はそれを自然あるいは人の感情とつなが

る非整数倍音をつくり出す、すばらしい楽器と感じているのではないでしょうか。

オペラの歌とジャズのボーカルでは、その声色に大きな違いがあります。オペラで用いられるいわゆるベルカント奏法は人の発生する声にできるだけ多くの整数倍音を含ませる奏法であるといえます。逆に、ジャズで活躍したサッチモ［ルイ・アームストロング（1901～1971）の愛称］のボーカルは、音程感がギリギリ感じられる非整数倍音が多く含まれている声です（第 8 章参照）。サッチモの歌う旋律は、完璧にドレミにあっていますが、オペラの歌い方とは全く違います。

4　エレキギターとドラムの非整数倍音

いわゆるエレキギターは、アコースティックギター、クラシックギターと異なる音を出します。どのようにしてあの独特の音が生まれたのでしょうか？　ギターの音を大音量で流すには、プリアンプが要ります。プリアンプは、ギターの弦から発生する振動を電気信号に変えてそれを増幅するものです。この増幅した電気信号をさらにメインアンプを通してスピーカーに送り込むと、もともとは小さなエレキギターの生の音が、大音量になるのです（図 7－12）。

ところがプレアンプの信号をあまりに大きくしてメインアンプに送り込むと、メイ

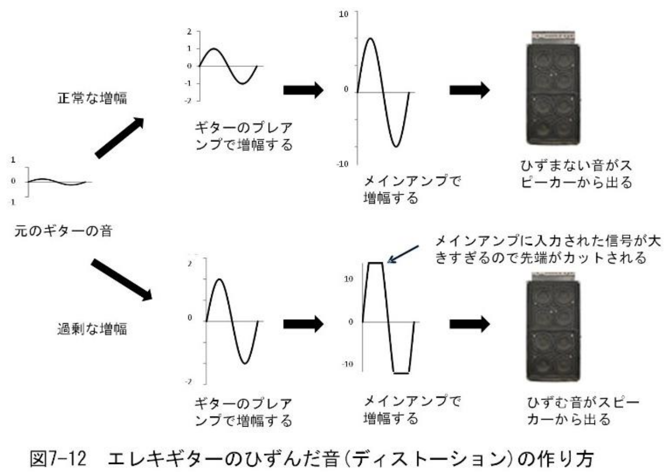


図7-12　エレキギターのひずんだ音（ディストーション）の作り方

ンアンプの受け付ける限界を超えてしまいます。つまり限界があるのに、それを超えると、波形の頭が削りとられてしまいます（図 7－12 下図）。この波の形がそのままスピーカーに送り込まれると、歪み（ディストーション）が生じます。美しい純音はサインカーブを描きます。しかし図 7－12 の下図の頭が取れた波形は純音からは程遠い、音程感のない雑音がたくさん入った音になります。これをディストーションといいます。あまりにディストーションが激しいと、音高がわからなくなります。しかし、ロックでは音が歪んでいても、なおかつ音程感が残るぎりぎりの範囲でディストーションをかけます。ディストーションのかかった音は、著しい非整数倍音を生み出します。

なぜ、こんな変わった音が若者に受け入れられたのでしょう。若者たちは整数倍音に飽きて、非整数倍音の音が持つ新しい響きに魅せられたのかもしれません。

ロック勃興期、ジミ・ヘンドリックスはこのディストーションのかかったギターの音で、有名な『Purple Haze』という曲を作りました（図 7－13）。

ディストーションのかかった音が鳴っているフレーズを分析しました。同じギター（クラシックギター）の音のスペクトルが図 7－10 にありますが、とても同じギターとは思えません。図 7－10 ではきれいな等間隔の倍音列がいくつも出ています。とこ

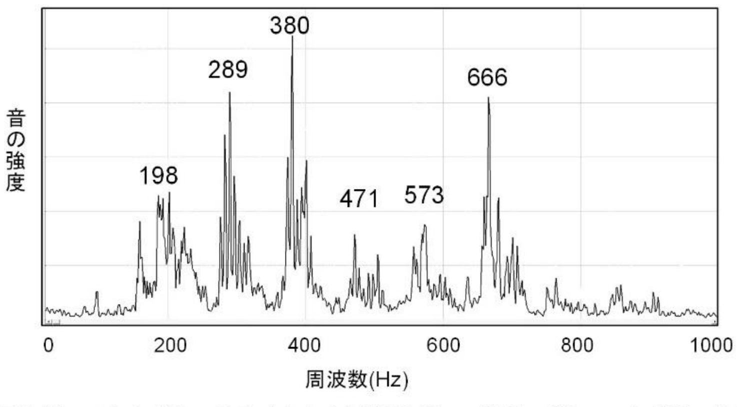


図7-13　エレキギターのスペクトル（「紫の煙」　演奏　ジミ・ヘンドリックス）
　音をひずませているので、1本の鋭いピークが現われず、整数倍音のピークのそばに多数のピークが同時に出ている。

ろが、図 7－13 ではどれが倍音の基音かさえ分かりません。各ピークのすそには、たくさんの小さなピークが密集しています。このスペクトルは、ピアノではなく琵琶や尺八と似ています。もちろん琵琶や尺八とエレキギターは同じ音色ではありませんが、これらのスペクトルには鋭い整数の倍音列のピークがないという共通の特徴があります。本来あるはずの鋭い整数倍音ピークの周りにある細かいピークが、整数倍音の音色を消しているのでしょう。人工的に非整数倍音を作ったといえるかもしれません。

この音色に若者たちはしびれたのではないでしょうか？　それまで聞いたことのない新しさがそこにはあります。ドラムはさらに非整数倍音を増長します。なぜなら、ドラムの膜は非整数倍音しか出さないからです。

このように、20 世紀初頭はクラシックは新しい曲を作りにくくなり、現代音楽になり、調性を捨て、不協和音を多用しました。同時に、ジャズが世界に広まり、1960 年代からロックが盛んになりました。

20 世紀の音楽は整数倍音から遠ざかろうともがいていたように見えます。現代音楽で有名なジョン・ケージは『4 分 33 秒』という有名な曲を 1952 年に発表しました。演奏者がピアノの前に座り、あるいはオーケストラでは演奏者全員が楽譜を開いて 4 分 33 秒の間、音を出さないのです。しかし、楽譜には「コンサートホールの扉を開けよ」という指示が出ています。これはどういうことでしょうか？　私には、ケージが「自然界、或いはわたくしたちの身の回りに聞こえる音（整数倍音ではない非整数倍音）に耳をすませなさい」と言っているように思えます。

参考文献

安藤由典（1996）楽器の音響学、音楽之友社

上田秀雄、ネイチャーサウンド、UEDA Nature Sound,
　http://uns.music.coocan.jp/3soundN.html

薦田治子（2003）平家の音楽（第一書房）

角田忠信（1981）右脳と左脳 その機能と文化の異質性　小学館創造選書　　（小学館）

鶴田錦史（1995）　琵琶劇唱～鶴田錦史の世界、キングレコード

中村明一　（2010）　倍音　（春秋社）

鳴滝―滝の音、http://www.youtube.com/watch?v=UBigWrEOutE

鳴き声図鑑、http://www.bird-research.jp/1_shiryo/nakigoe.html （NPO 法人　バードリサーチ）

悠雅彦　（1998）　ジャズ　（音楽の友社）

A. Abbott　（2002）Music, maestro, please!　Nature, 416: 12-14.

Ball, P. （2010）　音楽の科学－音楽の何に魅せられるのか？－（夏目大訳）河出書房

Koenig, D. （ 2011 ） The Missing Fundamental, Second Attempt, http://www.youtube.com/watch?v=p3iWLkXAePM.

Levitin, D.（2010）音楽好きな脳（西田見美緒子訳）、白楊社

Salimpoor, V. N. , M. Benovoy, K. Larcher, A Dagher and R. J. Zatorre （2011） Anatomically distinct dopamine release during anticipation and experience of peak emotion to music. Nature Neuroscience 14: 257-262.

Sethares, W. A. （2005） Tuning, Timbre, Spectrum, Scale, Springer.

Taylor, J. B. （2012）　Jill Bolte Taylor's stroke of insight, TED, ジル・ボルト・テイラー: ジル・ボルト・テイラーのパワフルな洞察の発作 | TED Talk

参考資料

藤枝守（2007）　［増補］響きの考古学、平凡社

小泉文夫（1994）音楽の根源にあるもの、平凡社

小泉文夫（1994）日本の音、平凡社

コラム７　日本人の音感覚（3）～ 筝とジャズとフラメンコ ～

～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～

コラム１「日本人の音感覚（１)」では、日本にもとからあった音階はドレミ（7 音階）でなかったかもしれないという話をしました。それでは、その音階はどんなものだったのでしょうか？ここでは筝（こと）の音階を例にして説明します。

筝は通常弦が 13 本ある楽器です。その弦の音程のあわせ方（調律）は何種類もあります。筝の調律法は、中国から伝わった「律」と「呂」の音階をもとに、八橋検校（1614～1685）が江戸時代に再構築したものが伝わっています。

下の表に筝の音階の例として、「平調子」と「雲井」を、また中国から伝わった音階「律」と「呂」を示しました。平調子でも雲井でも１弦と５弦は同音（レ）で、２弦から７弦までが１オクターブです。表Ａでは、これを矢印で示しました。７弦から 12 弦までは２弦から７弦までのちょうど１オクターブ上の音が積み重なっています。つまり、筝の音階は 13 本あるうちの２弦目から７弦目までと７弦目から 12 弦目までの２オクターブの２階建てになっている、といえます。１オクターブ間にある音は２弦（ソ）から始めて、７弦（ソ）までなので、音階としては５音で構成されています。

表A　筝の調律と中国から伝わった律と呂の音階の比較

調律名	琴の弦番号												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
平調子	レ	ソ	ラ	シ♭	レ	ミ♭	ソ	ラ	シ♭	レ	ミ♭	ソ	ラ
雲井	レ	ソ	ラ♭	ド	レ	ミ♭	ソ	ラ♭	ド	レ	ミ♭	ソ	ラ
律		ソ	ラ	ド	レ	ファ	ソ						
呂		ソ	ラ	シ	レ	ミ	ソ						

(筝は相対音高で調律されるので、2弦をソとして音名に変えました)

西洋から入ったドレミの音階はドからドまで 8 音あり、7 音階（ド・レ・ミ・ファ・ソ・ラ・シ）とよばれています。箏の音階は、上の表のように、1 オクターブに 6 音ありますので、5 音階とよばれます。コラム 1 に登場したエリスはこれをもって日本の音階は 5 音階としました。

上の表では音名がたくさんあり、しかも、♭なども ついているので大変複雑です。また、音名だけではそれぞれの音階の特徴が簡単に見えません。そこで、隣接する音の間隔（音程）を、半音を 1 として数字で表す方法を考えました。これを「音程表記法」とここではよぶことにします。この方法では、1 オクターブは 12（半音）と表せます。音程表記法を用いると表 A は次のような表 B になります。

このように各音程を数字で表すと、先ほどの表 A で音名を使っていたよりも、はるかに各音階の特徴が浮かびあがります。平調子の 1 オクターブの中には、2・1・4・1・4 の音程があり、雲井では 1・4・2・1・4 です。平調子の 2・1・4・1・4 の後ろの 2 つ 1・4 を前に持ってくると雲井（1・4・2・1・4）になります。

表 B を見ると、箏の音階は 5 音階であること以外に、次の 2 つの特徴が見て取れます。

（1） 上の箏の音階には音程が 2・1・4 と、1・4・2 があります。平調子の始まりは 2・1・4、雲井は 1・4・2 です。

（2） 中国から伝わった音階（律と呂）には、1 と 4 がありません。1 と 4 の音間隔（感覚）を使って箏の音階を再構築したのが、八橋検校であったと思われます。

表B　音階の半音間隔による表示

調律名	弦番号												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	半音間隔												
平調子	5	2	1	4	1	4	2	1	4	1	4	2	
雲井	5	1	4	2	1	4	1	4	2	1	4	2	
律	2	3	2	3	2								
呂	2	2	3	2	3								

(表Aで示した音階の音程を半音間隔を1として書き直した)

さて、平調子の音階に見られた 2・1・4 の音程を、ド、レ、ミを最初の音として 3 つ書きだしました。

半音間隔

2　1　4

①	ド	レ	ミ♭	ソ
②	レ	ミ	ファ	ラ
③	ミ	ファ＃	ソ	シ

下線はジャズでよく知られた、ブルーノート（3 番目の音を半音下げる）の音階です。アメリカでドレミを習った黒人が好んで使う音階がジャズに使われ、ブルーノートとよばれるようになりました。この音階はもの悲しい感情を表せます。

スペインの作曲家エンリケ・グラナドスが作曲したスペイン舞曲第 2 番と 5 番でも、冒頭にこの音階（ド・レ・ミ♭・ソ、あるいはミ・ファ＃・ソ・シ）が使われています。スペイン舞曲には、ロマ（昔はジプシーと呼ばれていた）の人々の影響が色濃く出ています。

ドレミを使っていても、日本人がジャズやスペインのフラメンコにはまるのは、その音程が箏の音程間隔（感覚）と似ているからかもしれません。

第８章　聖歌、モーツアルト、ノイズミュージック、尺八、そしてポリゴノーラ

１　初期の聖歌音楽の構造

現在使われているドレミの音階は弦の振動を基にしています。ピタゴラスは弦の振動から数学的に音階を作り、その後、分数から純正律ができ、さらに $2^{(1/12)}$ ＝1.05946という数から平均律が生まれました。これを基本にしてはじめて協和する音階、ドレミができ、和音ができたと思われます。

こうして生まれた音楽は自然を超越した（自然界にはない）音として宗教的な感動と結びついたのではないでしょうか。たとえばキリスト教（カトリック）でミサなどで歌われる聖歌がそうです。実際、聖アウグスティヌス（354～430）は「人々は神の言葉ではなく、音楽に心を奪われているのかもしれない」と疑ったことが伝えられています。

現代はグレゴリオ聖歌が生まれて約1000年、平均律が生まれて約400年です。聖歌ではひとつのメロディー（１声）だけを歌うものもありますが、歴史を経るに従い単純な旋律から多様化し2声、3声と異なる音程を同時に出す聖歌に発展してきました。2声の聖歌を最新の分析技術で分析すると図8－1が得られます。

このグラフは横軸が時間で縦軸が音の高さです。これまでの図とは異なります。これまでは横軸が振動数で、ある音の一瞬の時間像を描いたものです。図8－1では音楽を分析しますので、時間を横軸にとりました。音がでるとその音は左から右へと伸びる横線として表されます。横線は濃いと音は強く、薄いと音が弱いことを示しています。音が出ている間は横線は消えることなく描かれますが、音が小さくなり、聞こえなくなると、横線も消えます。縦軸は音の高さを振動数で示したものです。下は低い音60 Hzから上は高い音10000 Hzまでをとっています

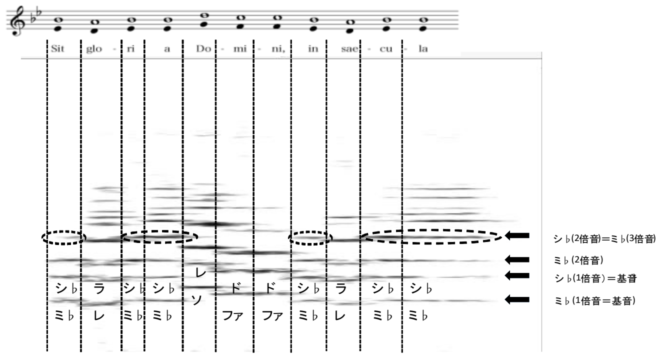


図8-1　2声の成果の分析例
　縦軸は音高、横軸は時間を表します。グラフは上の楽譜と対応しています。左の青矢印で示した黒い横線は、下から。ミ♭、シ♭、それぞれのオクターブ上のミ♭、シ♭を表す。楕円の破線で囲んだ部分は、ミ♭の3倍音とシ♭の2倍音が重なるところ。つまり協和しているところです。上の楽譜にあるように、全ての旋律は5度(振動数で1.5倍)離れているので、2声(2音)がどこでも協和しています。

縦軸の取り方は少し変わっています。100～200 の間隔と、200～400 の間隔が同じ間隔に、また 200～400 の間隔も 400～800 の間隔と同じです。これを対数軸といいます。この目盛りを採用する理由は、倍音の並びが等間隔に現れて見やすいからです。1 オクターブ離れた音は倍々と増えていきますので最初を 1 とすると次は 2 ですが、その次は 4、その次は 8 となりだんだん間隔があいていきます。このまま 1、2、4、8 と描くと低い音が窮屈で高い音は間延びした横線として表されます。そこで、対数軸であらわすと、低い音は拡大され、高い音は縮小されて、等間隔に表示されます。倍音が並んでいれば、等間隔の横線として表されます。これが対数軸を使う理由です。

さて、このようにして聖歌を分析してみたのが、図 8－1 です。この聖歌では 5 度（ドとソの関係（この聖歌の出だしの場合、ミ♭とシ♭が 5 度）離れた 2 音を同時に歌い、旋律に従い音高は変化するのですが、どこまでも平行に 5 度はなれて 2 音が進んでいく旋律です。ここで注意すべきは、2 声なのに、グラフでは同時に 4 本線が出ていることです。人の声でも倍音が出ています。この曲の楽譜とグラフを照らし合わせると、楽譜上では 2 つの音しか記されていません（図 8－1 の上の挿入楽譜)。最初はミ♭とシ♭です。この 2 つの音の間隔は 5 度（ドとソの間隔）です。一番左には 4 つの横線があります。ミ♭（約 156 Hz）の横線が一番下です。次の 2 番目の横線はシ♭（233 Hz）です。次の 3 番目はミ♭の 2 倍音（312 Hz）です。さて次の 4 番目は、

ミ♭の3倍音は468 Hzとシ♭の2倍音（466 Hz）がほとんど同じなので、横線が重なります。ミ♭とシ♭の重なった線は、破線で囲みました。

この図を良く見ると、歌詞により倍音がたくさん出るときと、出ないときがあります。例えば上に示した歌詞でSit-gloのSitは倍音が少なくgloは多いです。これは母音の違いによります。楽譜の下にラテン語の歌詞をつけておきました。イ（i）、エ（e）は少ししか倍音が出ず、ア（a）とオ（o）は多く倍音が出ます。ウ（u）は中間です。これが母音の音響学的な違いです。このように楽譜上は2声であって、実際に出ている音はミ♭も、シ♭もそれらの2、3倍音、及びその重なりが出ています。

ほかの場所（例えばファとド）でも、下の音の3倍音と上の音の2倍音が重なる濃い線が見られます。この聖歌の歌声のグラフとこれから先の楽器によるグラフの大きな違いは、音を表す横線と横線の間にすきまがあることです。2声から倍音が4つずつ出ていたとしても、合計で8本の線だけです。線と線の間は、空白です。この空白があるから、純粋な響きが生まれるのです。後世の人々はこの空白を埋めたくなったようです。

２　オーケストラの音色　～ モーツアルトとブリテン ～

古代ギリシャでは楽器は歌の伴奏だけに使われていたようですが、弦楽器や管楽器の性能が発展してくると、楽器だけでもっと複雑な音楽を奏でる合奏曲、オーケストラなどが出てきました。実際、ヴァイオリンの早いパッセージを声でまねしようとしてもできません。つまり、速い曲を人の声で演奏することはできないのに、楽器なら簡単にできる。そこで新しいジャンル、楽器だけによる演奏（合奏曲、オーケストラ）が生まれたようです。

楽器演奏の発展に大きく貢献した作曲家の一人にモーツアルトがいます。彼は、ラモーが確立した和声学に則りすばらしい曲をたくさん書いています。モーツアルトが作曲した交響曲第40番の第1楽章の冒頭を分析すると図8－2のようになります。先ほどの聖歌の2声のグラフに比べてはるかに複雑な線がたくさん出ています。縦軸の取り方は先ほどの図8－1と同じで、音高は60 Hzから10000 Hzです。

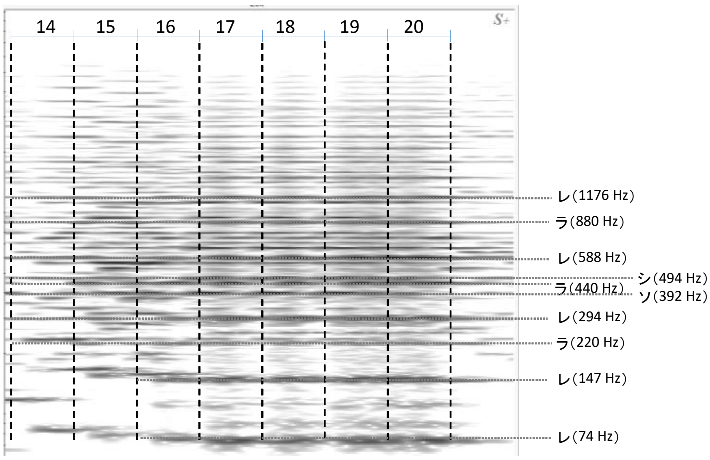


図8-2　モーツアルトの交響曲第40番の分析例
図上の数字(14～20)は第1楽章の小節数です。

この図でも横軸は時間です。時間軸は左が過去で右端が現在です。1 楽章のどの小節かは上に番号で記しました。14、15 小節はクラリネット、フルート、オーボエ、ファゴットが上昇と下降の音を演奏しているところです。14～15 小節に掛けて階段のように見えるところがそうです。17～20 小節は多くの楽器が一斉に鳴っているところです。しかし、これらの楽器は整数倍音を出していますので、聖歌ほどきれいではありませんが、横の線が明瞭で、間に空白が目立ちます。特にレとラ（5 度の関係）の倍音がたくさん現れています。協和する音（和音）からこの部分が構成されていることを示しています。これらがオーケストラの音色を決めます。

一方、ブリテン（1913～1976）はイギリスの現代作曲家です。図 8－3 は彼の作曲した『青少年のための管弦学入門』の変奏曲 D の冒頭からとったものです。同じように横線が多数並び縞のような模様が見えますが、よく見るとブリテンのグラフには横線の間に明瞭な隙間、つまり空白部分がほとんどありません。ブリテンの場合は線と線の間にたくさんの細かい横線が入っておりモーツアルトの図 8－2 ほど明瞭な隙間がありません。これはブリテンが、不協和音を多く使っていることと関係しています。実際この数小節では、シ、レ、ミ、ファという不協和音が同時に鳴っています。また、

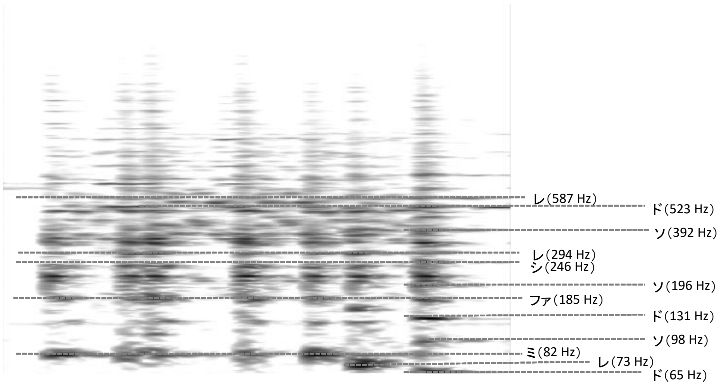


図8-3　ベンジャミン・ブリテンの「青少年のための管弦楽入門」より、第1楽章変奏Dの冒頭の分析例
この部分は弦楽器の不協和音の塊（し、レ、ミ、ファ）が見られる。

打楽器も多用すると、さらに倍音を示す横線の間に細かい横線がたくさん含まれます。実際、この小節では小太鼓が使われています。西洋の音楽は、簡単な協和する和音を多用した音楽から複雑な不協和な和音を使い、調性そのものを否定しながら現代音楽に到達しました（Ross, 2010)。

現代では、ノイズミュージックが存在します。いわゆるノイズを楽曲に取り入れたものです。ノイズにはホワイトノイズや、歪んだ音が使われます。これらには非整数倍音がランダムに含まれます。ノイズミュージックには協和音の概念がほとんどありません。ノイズミュージックも整数倍音から離れる方向性を持っています。

３　日本の音楽の音色

さて、図 8－4 を見てください。尺八の音の分析です。

よく見るとブリテンの楽曲の分析例（図 8－3）とよく似ています。横線が多数並んだ縦の縞がいくつかあります。尺八を 4 回吹いた音の分析です。低音あたりには明瞭な太い横線が一本見えますが、高音領域では横の線が明瞭ではありません。この模様は音色を表します。ブリテンのオーケストラが出す音の模様（音色）と驚くほどよく似ています。一本の尺八から多人数のオーケストラと同じように豊かな倍音が出ているのです。これはいったいどういうことでしょうか。

尺八には 1 音成仏という言葉があります。この意味については確定しているわけではありません。しかし尺八の音色には 1 音の中に多くの音が含まれていて、それらの関係性は、整数倍ではない、というのが尺八の特徴といえるでしょう。ひとつの音にたくさんの音が混じっている、つまり音色が複雑である、という意味です。図 8－4 では、整数倍音としてラ♭の線が多数見えますが、その間に多くの細かい線が見えます。その一部を破線の楕円で示しました。この部分が非整数倍音です。

図8-4　尺八による演奏(演奏者　志村哲)
　いわゆる音程感のないムラ息で4回尺八を吹いた時の分析図です。基音は215Hz(ラ♭くらい)にあります。ラ♭の整数倍音の位置は右の矢印で示しました。破線の楕円で囲んだところが、整数倍音の間に存在する、非整数倍音です。

聖歌、モーツアルト、ブリテンと見てくると、西洋音楽の方向性のようなものが見えてきます。つまり、最初は弦から生まれた整数倍音をもとに純粋で単純な響きを重視したのですが、だんだんリズムと音色が複雑、多様化し、現代音楽につながります。日本で発達した尺八はそれを先取りしていたのかもしれません。

次に日本特有のだみ声を使った歌声を分析しました。図の 8−5 では同じ人が『なみだの操』（千家和也作詞、彩木雅夫作曲）を西洋風に歌った例と、だみ声で歌った例を比較して示しました。声色の違いです。

西洋風に歌うとは、声帯を伸ばし、整数倍音が出やすくする声色です。西洋風の歌い方をした分析例を見ますと、横線の間に明白な空白があり、整数倍音がきれいに出ています。しかし、聴いていて演歌らしくありません。だみ声のほうは演歌らしい歌に聞こえますが、そのグラフでは、ほとんど整数倍音が出ず、整数倍音の間にたくさんの横線が見て取れます。これらはすべて非整数倍音です。だみ声を出すためには、喉をつめる必要があります。声道をまっすぐな円筒ではなく、ヒョウタンの様に中間を狭めると、だみ声が出ます

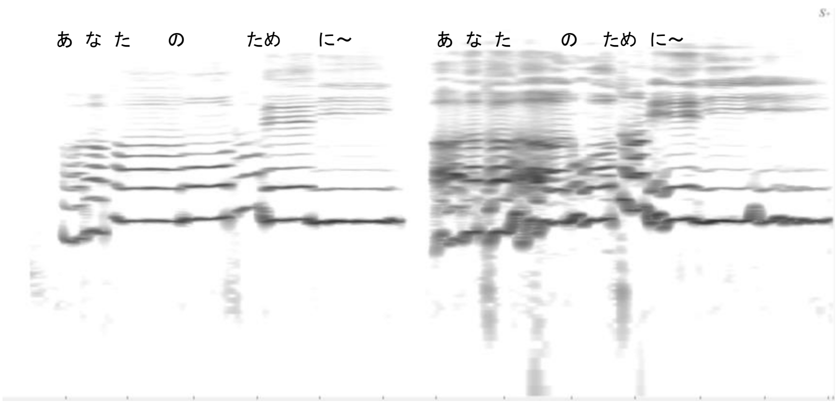


図8-5　同一人による「なみだの操（千家和也作詞、彩木雅夫作曲）】の歌声分析
　左半分は声帯を伸ばした西洋風の歌い方、右半分はのどを詰めただみ声を用いた演歌調の歌い方の分析例です。歌詞はグラフの上に示しました。左半分では線と線の間に空白があり、横線が明瞭に見て取れ、整数倍音で歌声が構成されていることがわかります。右の演歌調の歌声では、同じメロディーの場所ですが横線の間に複雑な線がたくさん挟み込まれており、非整数倍音が多く含まれていることが、わかります。

浄瑠璃で謡われる義太夫の謡い方も、独特です。一人の太夫が老若男女の声色で歌います。特に感情がこもるとき、その声には非整数倍音が多く含まれます。その声色で私たちは感情を揺さぶられるのではないでしょうか。

感情が高ぶったとき、驚いたとき、悲しいときに、人はきれいな整数倍音の含まれる声をあげるでしょうか。そうではなく、搾り出すような、あるいは、なんと言っているかわからないような声を出すのではないでしょうか。「あ゛～」のように記されることもあります。この声にこそ感情がこめられているといえます。逆に、きれいな澄んだ声は人間の感情を超えた、天上の音のようではないでしょうか。そのため西洋音楽はもともと、人の感情を越えた音として発達してきたものかもしれません。西洋音楽に人間臭さを添加しようとする場合に、無意識のうちに非整数倍音を混ぜているのかもしれません。演歌がジャズと並び人の感情をよく表現する音楽のジャンルであるとすれば、その原因はその歌声から出てくる非整数倍音にあるのではないでしょうか。日本人は古くから非整数倍音を含む声を発する音楽、文化を発展させてきたといえます。

４　非整数倍音の出る音楽と音色

欧米でも非整数倍音の歌声はたくさんあります。前章で紹介したルイ・アームストロング（1901～1971）の歌声は、決して澄んだきれいな声ではありません。いわゆる悪声です。しかし音程感はあり、味わいのあるものでした。CM にもよく使われる『What a Wonderful World』 を分析すると図８－６のようになります。

彼の歌声は非整数倍音を豊かに含む声色です。彼がジャズ出身であることに関連していると感じます。ジャズ音楽は西洋音楽とアフリカ音楽の融合であるという見方もできます。アフリカで演奏される音楽は、整数倍音だけの音楽ではありません。体が動き、リズムを刻む彼らの音楽は、非整数倍音を豊かに含んでいます。

図8-6　ルイ・アームストロングの「What a wonderful world」の冒頭部分の分析例
　歌詞は、グラフの上に示しました。横に細く薄く長く見える線は、歌の伴奏の音です。アームストロングの歌声は、太くて濃く示されています。彼の声が、非常に非整数倍音の豊かな歌声であることがわかります。

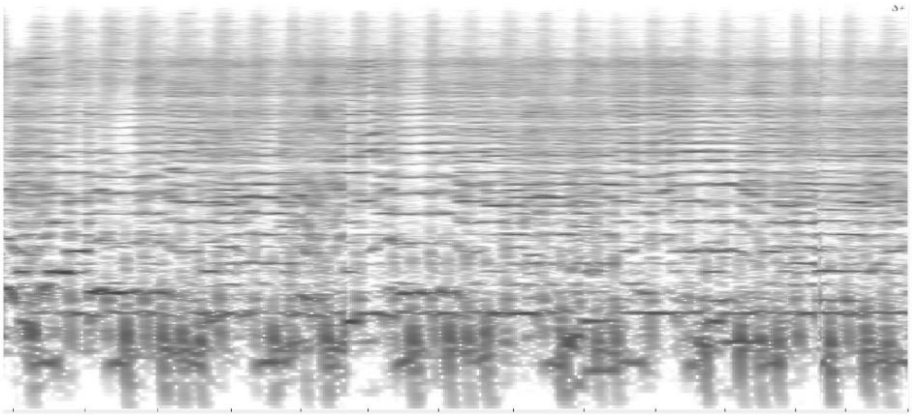


図8-7　ジミ・ヘンドリックスの「Purple Haze」の冒頭部分の分析例
ディストーション（歪）のかかった音をエレキギターで出しているので、整数倍音よりも多くの非整数倍音が出ていることを示している。横線と横線の間にほとんど空白がありません。

エレキギターは1950年代後半から世の中に出回り始め、その演奏技術が爛熟したころ、ジミ・ヘンドリックスが現れたことは前章で紹介しました。彼は大音量で生まれる歪んだ音を演奏に多用しています。その代表例ともいえるのが、『Purple Haze』(邦題「紫のけむり」) です。図8―7では、この曲の冒頭部分を横軸に時間をとって分析したものを示しました。

わずかにメロディーラインが上下する横線で見えますが、ほとんどは多数の横線で埋め尽くされています。歪ませた音には多数の非整数倍音が含まれますので、このようなグラフになります。また、ブリテンのときと同じようにバックのドラムの音もそれを増幅させます。若者はこの音にしびれました。今まで耳になじんでいた整数倍音を多く含む音とはまったく異なる音をその耳は聞いていたのでしょう。

大晦日に鳴るお寺の鐘は、日本らしさを感じる音です。このお寺の鐘で、もっとも音が良い鐘のひとつとされるのが、三井寺（滋賀県大津市円城寺）の鐘といわれています（第5章参照)。梵鐘はポリゴノーラのような平面の円盤を曲げて筒状にしたと考えることもできます。

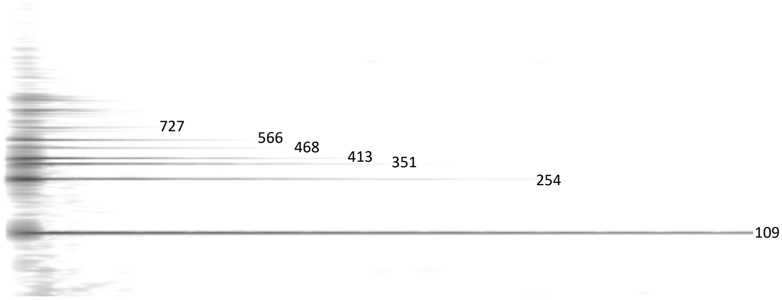


図8-8　三井寺（円城寺、滋賀県大津市）の梵鐘の分析麗（「梵鐘」（ふじたあさや）より）
　109Hzの音は長い余韻として残っています。グラフの端から端まではおよそ12秒です。そのほかの音で、109Hzの音と整数倍の関係のものはありません。それ以外の音は、非整数倍音です。

三井寺の梵鐘を撞いて出る音を同じように分析すると、図 8－8 になります。たくさんの線が出ています。基音は 109 Hz の音で、ほとんどラに近い音です。この上に、254、320、351、413、468、566、727 Hz の音が出ています。いずれの音も、基音（109 Hz）とは整数の関係ではありません。鐘の音には豊かな非整数倍音が含まれていることがわかります。

最後にポリゴノーラを見ます（図 8－9）。円盤型ポリゴノーラの中心から 1／4 のところを 4 回たたいたグラフです。たくさんのピークが出ていて線の並びも複雑で、グレゴリオ聖歌や、モーツアルトよりも、ブリテンや尺八、梵鐘と似ているといえるかもしれません。基音は 240　Hz に出ていますが、その上には整数倍ではなく、非整数倍の倍音が出ています。実際に出ている非整数倍音はグラフの右に数字で書きまし

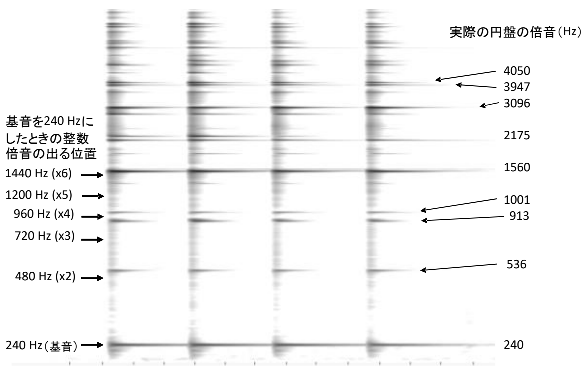


図8-9　円盤型ポリゴノーラの分析例
　基音は240Hzです。4回たたきました。横線は音高を表しますが、基音に対してい整数倍のものは一つもありません。左に基音を240Hzにした時の2～6倍音までの振動数を矢印で示しましたが、実際に出てくる振動数は非整数倍音なので、これらとは一致しません。

た。左には、もし 240　Hz が基音の場合、整数倍音が出るとしたらどこにでるかを示しました。実際の線とは一致しません。

梵鐘とポリゴノーラは両者とも非整数倍音を出します。その倍音と倍音の間には音はありません。つまり線がはっきり見えます。しかしその線同士の関係は聖歌のような整数倍音（等間隔）の関係ではありません。モーツアルトでは、どの線も整数倍音の関係が主です。しかし、ブリテンではその関係が、整数倍音から外れてきました。尺八やサックスは吹き方により外れます。人の歌声でも、オペラで歌われる歌では独唱でも多くの整数倍音だけが出ますが、演歌や義太夫では、非整数倍音が混ざります。

ポリゴノーラはこれまでの弦や管を使った楽器が出す整数倍音ではなく、非整数倍音を出す楽器です。非整数倍音は自然界に満ち溢れています。自然界の音を出すには尺八やポリゴノーラが適しているのではないでしょうか。

第 1 章で紹介しましたが、スイカ名人の技は若い人になかなか伝わりません。この原因は、老人は昔から邦楽に親しんでおり、非整数倍音になじんでいるので、もしかしたらスイカの音が分かるのかもしれません。逆に若い人は生まれたときから周りに整数倍音の音楽しかないので、スイカの出す「非整数倍音」が分からないのかもしれません。邦楽に現在も親しんでいる人は、スイカの音がわかるのかもしれません。

ポリゴノーラの響きは、豊かでユニークな倍音を含んでいます。スイカの響きは、澄んだ弦の響きというよりも、自然に豊かに含まれる非整数倍音を多く含んだ音でした。ポリゴノーラの残響は、梵鐘の余韻のようでもあります。それは、日本人が古くから楽器に求めていた音に通じる響きだと感じます。新たに作ろうとしたポリゴノーラは、いにしえの人々にはもともと心地よい響きだったのかもしれません。

参考文献

梵鐘（1984）CBS SONY（構成･写真　藤田あさや、ディレクター　亀谷太一、エンジニア　半田健一、高本秀一、デザイン　土屋好博）

Ball, P. （2010）　音楽の科学－音楽の何に魅せられるのか？－（夏目大訳）河出書房

Ross, A. （2010）　20 世紀を語る音楽、（柿沼敏江訳、みすず書房）

コラム８　人の声　～なぜ声から人がわかるのか～

～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～～

非整数倍音に興味を持ったので、人の声を調べました。昔の浪曲でよく聞かれたダミ声、ルイ・アームストロングの声、そして一部の落語家や講談師の声は特徴的で、非常に多くの非整数倍音が含まれていることがわかりました。

そこで録音した人の声をソフトにかけて、何%が非整数倍音かを測定するプログラムを作りました。これを使って声に特徴のある落語家 S 師匠の声を分析しました。その結果、66%が非整数倍音で、整数倍音（33%）よりも 2 倍多いことがわかりました。次に普通の声のきれいな人の声を分析しました。すると、非整数倍音は 0%にはならず 33%でした。声がきれいな人には非整数倍音はほとんど含まれないと最初は考えていたので、この結果にはすぐに納得できませんでした。

声に特徴のある落語家 S 師匠にお話をお聞きすると、子供のころ家にかかってきた電話に応対すると、先方から「お父さんの声とそっくりやな」といわれたそうです。声質は、遺伝するようです。これとよく似たことは、皆さんも経験したことがあるかもしれません。電話にでたお母さんの声が、彼女とそっくりで間違えて、失敗したとか。

人はなぜ、その声で個人を特定できるのでしょうか？　普通の人が出す非整数倍音が 33%あることに原因があるのではと思いました。すべてとは言わないまでも、この 33%の非整数倍音の中に、個人の声の特徴が含まれているのではないかと思いました。人の耳は、非常に鋭敏にできています。ごく短時間しか発生しない複雑な子音を聞き分けます。それで話し声に含まれる非整数倍音の個性を区別できるのでしょう。この能力を使って、声の持ち主が特定できるのではないでしょうか。

対談「ポリゴノーラの魅力と未来」

灰野敬二　／　櫻井直樹

2022 年 10 月 25 日

於　灰野敬二宅

ポリゴノーラは、僕の“新しい武器”です

櫻井　今日はお忙しいところ、お時間をいただきありがとうございます。早速ですが、灰野さんにポリゴノーラを演奏していただくようになって、ずいぶんたって今更お聞きするのもなんですが、なぜポリゴノーラを演奏していただいているのでしょうか？

灰野　わかりやすいですよ。端的に言います。僕の新しい武器だからです。

櫻井　よくわかりますね。

灰野　でしょ。いつも武器を探していますから。僕はいつもシンプルですよ。

櫻井　ポリゴノーラを演奏されていて、真ん中とか端とか、たたく場所によりいろいろな音色が出ると思いますが、その音色についてはどうお考えですか？

灰野　僕がポリゴノーラをやりたい、と思った時に、はっきり言えるのは、これは他とは違う。ピッチの並びがどういうものかという以前に、音を出してみて、ミュージシャンですから、これは他とは比較できないよな、というのが一番で、だから、合間をたたくのが好きなんですよ。

櫻井　合間？

灰野　いわゆる、櫻井さんが言われる、“ピザ”と“ドーナツ”（※1）のどっちでもないその合間を出したいのですよ。

櫻井　なるほどわかりました。その音色がいいんですね。

灰野　いいというより、「武器」です。

櫻井　ポリゴノーラの演奏を始めるとき、今日はどのように演奏しようとか、事前に決めておられるのですか？

灰野　ないです。まさに、どのような言葉を選べばよいかわかりませんが、まさに、その時ですね。その場で……、言い方を変えるとすれば、会場によって音は違うし、お客

さんが入っちゃった、うれしい悲鳴、でも響かなくなっちゃった。だから始めないとわからない。そして、始めて最初の5分くらいは、どういう響きを今はしているかをある程度調整しながら、「あ！リハーサルの時は、音階1のポリゴノーラが会場にすごく蔓延していたのに、ちょっと低い音が吸収されちゃう」、そうだったら音階5のポリゴノーラにしよう。

櫻井　お客さんが入ると音が吸収されるのですね。

灰野　そうですね。特に洋服ですね。冬になると、特にコートが吸収します。

櫻井　特に低い音が吸収されるのですか？

灰野　そうとも一概には言えません。場所によります。反対に、天井が20メートルくらいあって、リハーサルの時は響きすぎて、ボアーンとなって音の輪郭がなくなってしまうのが、お客さんが少し入ってくれることにより、響きが抑えられます。本番で音を出してみて、大概はこれじゃないよな、って思うんです。本当にお客さんが入らないとわからないんです。

櫻井　へえー。

灰野　望むなら、変なことを言いますが、これだけAIが発達しているのなら、怖いほうに行くのではなく、文化に役立ってほしいと思います。

櫻井　怖いほう、とはどういうことですか？

灰野　人を操ることになるでしょう。

櫻井　人工知能が人を操るということですね。

灰野　私は、絶対抵抗します。

櫻井　私も抵抗します（笑)。人間はそんなものじゃないと思いますよ。

灰野　僕もそう思います。ちゃんとしてれば。

櫻井　ちゃんとしてれば、ですね。

灰野　そう。ちゃんとしてなければ、居心地がいいのでそこに洗脳されてしまいます。

櫻井　たとえばボーカロイドなどはどう思いますか？

灰野　全く興味ないです。

櫻井　私もですが、あれでいいんですかね。

灰野　やっているやつも面白くないし、知り合いの知り合いくらいですが。いやー、僕には全く影響がない。どうなんだろう、ああいうものもある。反対が出てくれば、さらにその反対も出てくる。やっぱり、いまCDが廃れ始め、僅かですが、僕たちに馴染みのあるレコードが若者たちに流行りはじめている。

櫻井　レコードの音は、CD とは全然違いますね。

灰野　全然違う。若い子たちは CD を親から聞かされて育ち、知らなかったわけで。やっぱり今では簡単に検索できるから、自分で考えたのではないけれど、これは怖いことになるんだけれど、新しい一つの情報として「アナログって何だ」って追いますから。単純に空気に触れていないものを音楽って言っていいのか、ってなるんですよ、ありがたいことに。だから、ボーカロイドが出てこようと、政府が、大袈裟ですが、管理しきってデジタルしか認めない、音楽もこういう音楽でなければいけないとか、そうなってきたら別ですけど、全員

″阿呆“じゃないでしょう（笑）。

櫻井　わかります。昨日、芹沢銈介っていう染色家の弟子になっていた人と話をしていたのですが、昔は手で小刀を使って型紙を切って染色していたのですが、今はそんなこと誰もしない。全部コンピュータで型紙を作るんですって。

灰野　あっちゃ。面白くないでしょう。

櫻井　そうなんです。非常に残念なんです。でも、きっとわかると思うのです。その線、つまり、アナログとデジタルの線の違いがきっと皆にいつかわかると思うのです。

櫻井　そうですよ。わからないと滅びますよ（笑）。

戦時中にピアノを弾きまくっていた叔父さんが、僕の親分みたいなものです

櫻井　さて、灰野さんの演奏について伺います。いつも即興演奏されるのですが、こういう聞き方もなんですが、どうやって即興が出てくるのですか？

灰野　あのね、今日は絶対その話になるな、と思ってシンプルな言葉を用意してあります。櫻井さんを、先生たちと呼ばせてもらいますが、僕は先生たちとは全く違う、でも全く違うから楽しめる、仲良くできる、と思っています。おそらく先生は、知性を勉強したんですよ。僕は精神を勉強しました。で、即興ができるのです。

櫻井　なるほど、私にはできない（笑）。

灰野　考えていないです。

櫻井　そうですねきっと。

灰野　それこそ、昔から音楽家によく言われる、降りてきますよ。非科学的ですが、そ

うとしか言えないです。

櫻井　きっとその能力が人間にはあるのですね。他に即興される方もそういう風に言っておられます？

灰野　口では言います（笑）。皆、リハーサルでできていたものをやりたがります。僕はやりません。

櫻井　灰野さんは全然違いますものね。

灰野　僕はリハでやったものはやりません。バンドをやっていて、リハでやっていたものを時々忘れることがあります。メンバーは、あれ、もう 1 曲あったのに、終わっちゃった、なんて（笑）。

櫻井　そうですか。

灰野　即興って、その概念は僕には千通りくらい説明できるかもしれない。いろんな角度から。ただ、できるようになったのです。知らないところでの訓練をしているのです。

櫻井　即興ができるようになったのは、何歳くらいからとかありますか？

灰野　いやー、知らないうちに（笑）。それこそ大袈裟ですが、音楽に身をささげているから、それこそ音楽の女神が微笑んでくれて与えてくれたと思っています。

櫻井　プレゼントですね。

灰野　先生から見てわけわかんないと思いますが、17 歳のころ自分でギターを弾かないと、面白い音楽、曲を作れないと思いたったのだけれど、とにかく今までにあったことはしたくない。それは、自分の頭に組み込まれていることなんだけれど、そばに兄貴のギターがあったので、とにかくギターを 30 分睨んでいたのです。

櫻井　睨んでいたのですか。こいつはどういう奴かって。

灰野　毎日見てました。ペグ（糸巻）というものが 6 つある。弦が 6 本ある。フレットがある、ボディーがある。これをどうやって組み替えようかなって。

櫻井　え？　ギターを組み替える？　それは見ないとだめですね。

灰野　ジーと見て、でも実際にはできないでしょ、具体的に。形態を壊す気はない。ただ、概念として、弾くとか、指を動かすとか、そうじゃない要素を取り入れようという意識が芽生えました。

櫻井　つまり、他の人がやっていないやり方でギターを演奏しようと。

灰野　もちろんです。そこを変えたかったのです。

櫻井　前から、私と似たところがあると気になっていたのですが、他の人がやっていることは面白くないのです。

灰野　生のギター、一回聞きたい。

櫻井　いやー、私のギターは普通ですよ（笑）。

灰野　でもそういう思いがあってクラシックのギターを弾いていたわけですよね。他の人とはなんか違うものになりたい。

櫻井　灰野さんほどすごくないんです。でも、他の人と違うことをやりたいという考え方、価値観はどこから来たのでしょうか？

灰野　これは、話し出すと大変ですよ。

櫻井　やってください（笑）。私が見るに、なんとなく灰野さんはアウトロー的なところがあるでしょ。それが私と非常によく似ている。

灰野　初めに櫻井さんとお会いして、ポリゴノーラをボンと出して、ポンとたたいた時、接点ができちゃったんですよ（笑）。

櫻井　いや、私もあの時、前から知っている人かなあ、同じ仲間かなあという気がして。

灰野　いやいや、僕もそうですよ。僕はもっとシンプルで、僕のために楽器を作ってくれたって（笑）。

櫻井　ああ、そうでしたか。

灰野　僕は、何度もみんなに言っています。櫻井さんという気違いがいるって（笑）。

櫻井　その気違い同士が合うんですね。

灰野　そうだと思いますよ。だって、妹さん（桜井真樹子）も気違いじゃないですか？

櫻井　そうですね。

灰野　失礼ですが、（櫻井）元希君も気違いじゃないですか？

櫻井　櫻井家はどうなっているのかなあと思うんですが。

灰野　櫻井家全体を尊敬します。真面目に。

櫻井　私も、それがどこから出てくるのかなあ、と最近考えるのですが、同じ意味で、灰野さんもお父さん、お母さん、叔父さん、叔母さん、おじいちゃん、おばあちゃん、何かあるのですかね？

灰野　叔父さん、変でした。

櫻井　叔父さんが？

灰野　叔父さんは生きていれば 110 歳くらいですが、戦時中、真っ赤なシャツを着て髪の毛伸ばして音大に行っていたのです。ピアノを弾きまくって、非国民といわれて、徴兵されなかったそうです。その叔父さんが、僕の親分みたいなものです。

櫻井　その遺伝子がありますかね？

灰野　あります。調べたら面白いと思いますよ。

櫻井　それこそ、NHK の「ファミリーヒストリー」で調べてもらうと、いろいろ面白いことがわかるかもしれませんね（笑）。

灰野　みんな、やっぱり何かあると思いますよ。

櫻井　最初普通の人がこうなるわけがない（笑）。何か遺伝子があると思います。

灰野　あると思います。それこそ解明できないですよ。ここに写真があるのですが（長押（なげし）にかかっている写真を指しながら）、うちの場合は、母方が神社で、全部家系があります。母方は秩父で三峰山の家系です。父方は新潟で、おばあちゃんは、いわゆるお寺のお姫様です。

櫻井　端正な美人ですね。

灰野　僕もそう思います。新潟のおじいちゃんは、当時 140 年前、新潟で英語の先生をしていて、しかもギターを弾いている。

櫻井　そんなころにギターがあったんかいな。

灰野　ありえないでしょ。

櫻井　ありえないですね。

灰野　で、これからが問題で、灰野家はその先がわからないのです。

櫻井　おじいちゃんの、その先ということですか？

灰野　はい。おばあちゃんのほうは、お寺なので家系があるかと思いますが、どうもおじいちゃんのほうは大陸からやってきたんじゃないかなあと思います。

櫻井　なるほど。大陸ですか。

灰野　それも、ロシアのほうから。

櫻井　エーッ。

灰野　なんとなく。

櫻井　でもそう思うと、顔が。

灰野　父親は特にそうです。僕は母親似だから、そうでもないのだけれど、やっぱりありますよ、血は。

櫻井　ありますね。私も櫻井家でよく思うんです。

灰野　櫻井家は、何かの残党のような気がするなあ。落武者の。

櫻井　私もよく思うのですが、江戸時代って、反乱した人が殺されているでしょ。だから、日本人は全体としておとなしくなっちゃってるんじゃないかな、って思うんです

よ。その人たちが生きていれば、日本ももっと反骨精神に富んだ人が多かったのではないかと。だから、私はその人たちの子孫かもしれない。

灰野　先生、失礼ですが、小学校、中学校、高校、大学と何か反抗して生きてきた人なんですか？

櫻井　そうですね、それこそ、中学校で東京の自由学園に 1 年半だけいたのですが、1 年半くらいして、東京の人とは合わないなあと思って、やめたのです。実は昨日、その時の友達と食事をしていたのですが。

灰野　それって失礼ですが、ご自宅が裕福だったのでは？

櫻井　ある程度はそうだったと思います。両親は大阪にいたので、私は寮にいました。

灰野　そこの中学校に行きなさいと、ご両親が言ったのですか？

櫻井　母親です。

灰野　でもあれですよね、今ふっと思い出して失礼ですが、トマトの研究をしていて、「なんというしょうもないことをしてきたのか」、と言ったお母さんですよね。

櫻井　その母親です。

灰野　そうか。

櫻井　母に、「世界中で毎日トマトを切っているお母さんが知っていることを研究するなんて、税金の無駄だ」、と言われたのです。それで、くそっと思って、なんとか鼻を明かしてやりたいと思って、研究して今ここにいるのです。

灰野　でも、十分鼻を明かしていますよ。兵器を作ったのだから（笑）。

櫻井　だからあの一言がなかったら、今日ここには来ていないと思いますよ。

灰野　すごいですね。じゃ、妹さんは普通だったのですか？

櫻井　妹は、大学に行ってから自分のしたいことを見つけたようです。

灰野　それまでは従順だったのですか？

櫻井　それまでは、普通にピアノをしていたのですが、大学に行ってから、現代音楽や踊りや衣装、つまり総合芸術に興味を持ったようです。私より変わっていると思いますね。

灰野　どっちもどっちだと思いますね (笑)。でもおそらく、最近になって、そうだね、ってなったんですか？

櫻井　だいぶ歳が離れているので、彼女が大学に入ってから普通に話せるようになりましたね。私が 30 歳になってからです。二人とも音楽には興味がありましたから。

何か一個をやり尽くそうと思ったら、体の一部が壊れるんです

櫻井　さて、次にポリゴノーラの形についてお聞きします。大きなポリゴノーラや、いろいろな形のポリゴノーラがありますが、灰野さんにとって好きな大きさとか、形とか、音とか、ありますか？

灰野　ないです。みんな好き（笑）。シンプルです。みんな好きイコール、さらに、今まで聞いたことがない音を聞きたい、出したいのです。3 日後にジャズのコンサートをやるのですが、それも今まであったジャズとは違うものをしたいのです。でも、1 回やっちゃうと普通の人より飽きるのが早いのです。3 回やると、自分でもうわかった。表面的かもしれないが、これでとりあえず今欲しいここの情報は手に入れた。次はここをしようかな、となります。そうやって、いろいろやって全部をレベルアップできていると思います。ふつう一つで完結すると、ああジャズはリズムは面白いが、和声があまり面白くないなとか、ロックは単純で面白くないなあ、とか、それで終わってしまう。でも私は全部好きなんです。だから、いま頭の中は、ごちゃごちゃです（笑）。でも、ひとつポリゴノーラに苦情があって。

櫻井　是非聞きたいです。

灰野　ポリゴノーラをやって、耳を壊しました。

櫻井　それはわかります。この間、「菖蒲冠（あやめこうふり、2022 年 6 月 4 日、於生田緑地菖蒲園）」で演奏したとき、外だったでしょう。室内とは全然違う響きがしたのですが。

櫻井　でもね、その会場とか大きさじゃなくて、真上でたたくと、僕に一番来るんですよ。いわゆる、何の楽器よりも高い倍音が出るでしょ。それが全部僕に聞こえるのです。多分、今までも大きな音を出して、人から「灰野さん大丈夫ですか、そんな爆音出して」と言われてきたのですが、大丈夫だったんです。ところが、ポリゴノーラは別です。ですから、今ちょっと聴覚が悪いです。

櫻井　それはいけませんね。

灰野　ただ、僕の中で、ここが重要なのですが、何か一個やり尽くそうと思ったら、体の一部分が壊れるのです。

櫻井　それこそ命を削っているのですね。

灰野　今までは、手が痛い、足痛い、首痛いとか、今回は耳が痛いです。まだ聞こえる

し、しゃべれるし、空気吸えるし、絶対あきらめない。

櫻井　高い倍音が聞こえるという一つの要因は、多分、一心（いっしん）を使っておられるからだと思います。いわゆる木製の仏具ですね。なぜ一心を使うようになったのですか？

灰野　どうなんだろうなあ。当たり方が、いわゆるたたいて終わらず、その弾み方とか。ある時には、2 つのポリゴノーラを同時に叩ける、つまり T 字型をしているので、打楽器奏者がマレットを 2 つ持ってたたくように叩ける。

櫻井　一心からずっと離れないので、何か理由があるのかと思っていました。

灰野　僕もいろんなものを試したのですが、なんていうのかなあ、すぐれたものは、本来時代関係ないでしょう。ただし、組み合わせは重要です。ポリゴノーラは、西洋のマレットでたたけるものではないな、というのもあります。作曲家が作ったポリゴノーラの音は、ポンポンという音でしょう。それは僕の思っているものとは違うので。

これからポリゴノーラをどうしたいのですか？

櫻井　最近、MIDI-PAD（※2）というものがあって、ポリゴノーラの音階をパッドに張り付けてみました。いろんな音がパッドに割り付けられるようになっているので、灰野さんの好きな場所を、西洋のマレットと、一心でたたいた音を別々に割り付けました。

灰野　サンプリングしてあるってことですか？

櫻井　そうですね。でも、ひとつのポリゴノーラだけを使って、その音をサンプリングして音高を調節すると、音高が高くなりすぎるとポリゴノーラの音ではなくなります。そこで、近い音高のポリゴノーラをいくつか選んで、あとは音高を微調整しました。

灰野　いつか聞かせてもらいましたよね。

櫻井　それは最初の試みのやつです。

灰野　もともと 1 個の音盤だから、それを閉じ込めようとすると、無理があるのではないですか？（音が）薄くなりますよ。

櫻井　その通りですね。でも、本物のポリゴノーラは値段が高いので、これを何とかしたいと思ったわけです。MIDI-PAD にすれば、安価に済むので。

灰野　それで、櫻井さん、今後ポリゴノーラをどうしたいのですか？

櫻井　今でも在庫が、100 枚くらいあって、膨大なお金をかけているのに売れていま

せん。

灰野　そこで櫻井さんにお聞きしたいのですが、ポリゴノーラを広めたいのか、それとも僕は嫌いですが、講演など話で知らしめたいのか？お母さんに「トマトのそんなしょうもないことをして」、と言われて、「ひっくり返すぞ、音楽世界を」、という気持ちで世の中に打って出ようとするのかで、リスクの取り方が違ってくると思います。僕が提案できるのは、まず美術館回りをするのがいいです。先生が講演して、僕が実演やらせてもらえればいいです。今は世の中があまりよくないから、むつかしいかもしれない。僕はすぐ学芸員と喧嘩するし。「お前バカか」なんて言ってしまうのです（笑）。1か所どこか美術館でできれば、1回そういうのをやると、紹介してくれますよ。

櫻井　そうですか。

灰野　おそらく、先生が喧嘩しなければ（笑）。

櫻井　僕はケンカしないですよ（笑）。広島市にはいくつか美術館があり、結構面白いところなんですよ。

灰野　じゃあ、行けばいいですよ。

櫻井　私が質問されるとは思わなかったのですが、先ほどの質問で、ポリゴノーラをどうしたいかということですが、ポリゴノーラの音が、もしも人の耳や心に届くなら、音楽が変わると思います。

灰野　全くその通りです。だってそれこそ、いまデジタルで、またAIなどで音楽を作ろうとしている。人工知能なんて僕なんか寒気しますよ。

櫻井　要するに、アナログの楽器を触らずに作曲なんかしているでしょう。

灰野　アナログでも、サンプリングがありますから、彼らがどこまでアナログといっているかも問題です。これは先生には失礼な言い方かもしれませんが、数字ですべてが解明できると思っていることと違う要素がなければ、AIに負けます。だって、AIは僕なんかには理解できない、ものすごい計算をするわけでしょ。

櫻井　でも、出てくるものが問題だと思うのです。アウトプットがしょうもなかったら、しょうもないです。だから、アナログの音が気持ちいいなと感じてくれる人がいることを信じたいと思います。

灰野　そうじゃなきゃやってられないですよ（笑）。

櫻井　よくみんなこんな音楽で満足しているな、と思うのです。例えばシンセサイザーだけで作ったような音楽など。

灰野　そこは、櫻井家一族で反対していますね。

櫻井　なんとかならんのかなあと思うんですが。

灰野　それは、発信し続けないとだめでしょう。

櫻井　私が唯一光明を見つけているのが、現在ではあまりにも素人が作曲しすぎていて、本来の作曲家が飯食っていけないのではと思うわけです。これはポリゴノーラにとってプラスではないかと思うのです。つまりポリゴノーラによって全く新しい音楽ができることを、そのような作曲家が認めてくれればの話ですが。

灰野　それは、今までのプロの作曲家にはできない作曲の仕方、という意味ですか？

櫻井　“今までのやり方ではない”やり方、という意味です。今までのやり方では AI が音楽を作っちゃうんですよ。だから、作曲家の皆さんが悩んでいるのではと思うのですが、新しい道具ポリゴノーラと、新しい音階を使って新しい音楽が作れるのではと思います。

灰野　それは、これまでの作曲家がそうなればですか？それとも、新しい世代の人々、今 AI などを使って曲を作っている若い人に、このような道具を与えるという意味ですか？

櫻井　灰野さん、どう思いますか？　確かに 2 通りあります。いわゆるプロの作曲家たちは、これまで何百年もの蓄積があって、それをもとに曲を作っているわけです。しかし、それでは行き詰まるのではと思います。このままではいかんと思っているのではないでしょうか？

灰野　そう思いますよ。AI で作られてしまいますよ。

櫻井　それに新しい材料を提供するのはどうか、と思うんです。

灰野　それは素晴らしいと思いますよ。ただ、与えられようとしている彼らが、ポリゴノーラの意味が分からなければ、つまり、こういうものですよ、って説明をしなければならないと思うのです。

櫻井　それもあって、この本を書いているわけです。すぐ身につく人もいれば、それを理解できない人、応用できない人もいるわけです。逆に、全く今まで作曲をしていない人でもできるかもしれない。それはわからない。全くこれまで作曲の経験や知識がない若い人でも、この新しいポリゴノーラや新しい音階で音楽ができる人もいると思います。どうでしょう。

灰野　自分は全くその中間です。音楽に対する愛情は人より百倍あると思っています。でも、今まで伝えられてきた作曲の方法は、ほぼ無視してきました。僕の場合は、常に。50 年ですけれど、ほかの、その時代にまだなかったものを自分が見つけて。若いころ

は、ここですよね、「人に伝わらなくても構わない、自分がそこで充実できていれば、そして喜べていれば、人にこれを伝えなくてもいい。自分で聞いて、自分の栄養になればいい」。でもやっぱり、50（歳）を超えてから、自分の中にある気持ち、つまり継承させなければならない、という気持ちが起きてきました。

櫻井　私もこの 5 年くらいそうなってきました。継承なんですよね。せっかくこれをやってきたから、それが残ればいいなあ、という気持ちですね。

灰野　先生の場合は、データ、数字で解明されて伝えられるから、あえて言わせてもらえれば、ある程度は継承できる。ただ、櫻井さん、いっぱいいる櫻井さんじゃなくて、この櫻井さんをデータとして伝えることはできないでしょうね。それは僕自身も全く同じです。でも、櫻井さん全体でも、この部分は伝えなくてもいい、という部分を作っていったほうが良いと思います。そしたら、櫻井さんの 100 あった部分の、この 10 はいい、付属の 10 はいい。でも 90 のほうを伝えたい。だから、人に伝えるときも、1 時間しかなければ全部話せないわけだから、10 は話さずに 90 を話す。

櫻井　先ほど触れましたが、MIDI-PAD というのがあり、最近ポリゴノーラをサンプリングして割り付けたんです。若い人にはポリゴノーラは高くて買えないです。灰野さんはすぐに買われましたよね。

灰野　僕はその時、ライブをする予定があったので、その収入をあてに買えたんですがね。僕はあのころ海外があったので、ギャラが正直言って違うので、1 回で払えるようなギャラがもらえるんですよ。くそコロナのおかげで、海外が全部なくなってしまいましたがね。3 年行っていません。

櫻井　若い子にもポリゴノーラの音や音階に触れてもらいたいので、MIDI-PAD に割り付けたんです。どうでしょうか？

灰野　まず反対の意見を言わせてもらうと、大量にポリゴノーラを作ったら、安くなるんですか？

櫻井　数量によりますね。今は、1 枚 5 万円ほどします。

灰野　テリー・ライリー（※3）という人がいて、この人が、ポリゴノーラは新しい音楽を作ると認知してくれたら、それだけで大きな発展になると思います。

櫻井　テリー・ライリーは今日本にいるんですよね。

灰野　そうだと思います。

櫻井　妹が、今コロナで会いに行けないけれど、テリー・ライリーさんに会いに行こうかと言っています。

灰野　ポリゴノーラを彼が面白がってくれて、それこそ、作曲もすると思います。ただ、彼のファンも限られていて、一部のファンに向けてのお祭りのなかでの発表会のようなものになると思います。ポリゴノーラはちゃんとした正式の発表会で、新しい楽器ですと認知してもらわなければならない。でも、1 枚 5 万円は高いね。

櫻井　そうですね。

灰野　なんとか安くならないんですか？材料が高いんですか？形ですか？

櫻井　自分でもお金がなくて新しく作れなくなっています（笑）。

灰野　いい意味でも、この言葉は違うかもしれないけれど「貴族の楽器」ですよ。

櫻井　お金の意味ですか？

灰野　それくらいお金をかけないとできないというのは、特殊なんですよ。

櫻井　なるほど。どれだけ安くできるか、やってみます。ちなみに材料を鉄にしたらどうですか？リン青銅より鉄のほうが安いのですが。

灰野　いつか送ってくれた奴ですね。あれは、全然違います。

櫻井　やっぱりそうですよね。

灰野　どこまで響かせるか、先生がどこで諦めるかということになると思います。

櫻井　これは灰野さんに聞かなければと思います。

灰野　今のだったら、あそこまで響かなくてもいいと思います。例えば、今のはプロ仕様で、初心者のためのポリゴノーラを作ってもいいのではないかと思うんです。ギターでも 1 万円のものもあれば、数百万円のもあるでしょう。

櫻井　なるほど、そうすればいいのか。つまり、廉価版を作るということですね。

灰野　もう一つ問題があって、ポリゴノーラという楽器の特殊性が人に伝わっていない部分があって、これ非常に重要なところなんですが、たたき方、たたく場所によって違う音がする。ただ、倍音構成が違うのではない、という説明をしたほうが良い。普通のシンバルとは違いますよ、というところを強調したほうが良い。

櫻井　確かにシンバルは真ん中が固定されているし、材料も違うし、いろいろな点でポリゴノーラとは違います。

灰野　ただ、それに気づけている人はほとんどいない。僕は最初に叩いた時、直感的に、何だこりゃ！と思ったんですけど、普通の人は、シンバル程度にしか思っていない。名前をちゃんと付けたのは良かったと思います。“変形シンバル”ではだめです。ポリゴノーラがほかの楽器とはどこがどう違うかということを、先生がちゃんと数字で説明したほうが良い。

櫻井　私は自分の原稿を読んでいても、数字が出てくると頭が痛くなります（笑）。
灰野　先生の資料を見ても、数字が出てくるとだめだ（笑）。

倍音を意識して鳴らす楽器は、ポリゴノーラ以外ありません

櫻井　灰野さんはポリゴノーラをいろいろな楽器と合奏されていますが、灰野さんから見て、これは合うけれど、これは合わないなあという楽器がありますか？
灰野　単純に電気ものとは合わないですね。
櫻井　電気ものとは？
灰野　アンプを使ったりするものです。先生も一時ポリゴノーラにマイクを付けたり、いろいろしていたでしょ？
櫻井　やってましたね。
灰野　具体的に、空気を動かす楽器、ほとんどの人はポリゴノーラをポンとたたいて終わりますけど、僕はそうではなく、空気を動かす。空気を動かしたいから、いろいろなたたき方をするのです。空気の、悪い意味ではなく、歪みとか、モアレとかを作りたいのです。アコースティック楽器は、それに絡んだり、バイオリンでも空気に音が直接出ていくので、ポリゴノーラと絡むんです。ところがエレクトロニクスとは、ちょっと合わない。
櫻井　それはスピーカーを通すからですか？
灰野　いやー、やっぱり質が違うって言い方。まあ、電気楽器と普通のアコースティックな楽器があるとすれば、ポリゴノーラは超アコースティックです。
櫻井　だいぶ電気と離れていますね。
灰野　そう、だから、ポリゴノーラとアコースティック楽器は何とか合います。電気は違うものです。バランスとか、電気を操作する人がポリゴノーラを認識して、それに合うスピーカーを作ればなんとかなるのではないでしょうか？大きなスピーカーで音がドーンと出ると、簡単に言うとポリゴノーラがその音圧で打ち消されてしまいます。
櫻井　さっき、空気のひずみとかモアレという表現をされたでしょ。私も、ポリゴノーラをたたいた時に出る音の波が見たいのです。音の波を目で見たいと、ずっと思っています。

灰野　僕は見えてるなあ。

櫻井　私はさっき聞いていて、そうではないかと思いました。

灰野　だから操れるんです。

櫻井　その波が見えたら、皆よくわかると思うのです。いかにポリゴノーラが普通の楽器と違うかということが。でも世界でまだ音波を目で見えるようにした人はいません。

灰野　見つけりゃいいじゃないですか。

櫻井　簡単に言いますが、むつかしいですよ。

灰野　私は簡単に言いますが。

櫻井　私には、アイディアが浮かびません。

灰野　光とかスモークではだめですか？

櫻井　やりました。ダメです。

灰野　ポリゴノーラの出す音波は、もっと繊細な物質、もう物質といいますが、空気に同化した波紋のようなものではないでしょうか？

櫻井　ポリゴノーラを作った時から、この波紋を見たいと思っているのですが、まだ駄目です。例えば、ポリゴノーラの表面に水を張って、光を当てながら叩いて反射した光を見れば何か見えるかもしれません。でもたたくと水が飛び散りますね（笑）。でも結構、音を波紋としてとらえる試みは、現代美術館でもやってますね。

灰野　YouTube などで見たのですが、大きなシンバルでこの部分だけ鳴らします、とか、この円の部分だけ鳴らしますとかやってますが、倍音を意識して鳴らしている楽器はポリゴノーラ以外にはありません。ポリゴノーラをたたく時、同時にちょっとだけ強さを変えると波紋が出てくるのです。ポーン、ポーンではなく、なっている間にポンとやると、波紋が出てくるのですよ。

櫻井　なんだかわかるような気はしますが、よくわからない。同じ場所をたたかれるのですか？

灰野　同じ時もあるし、違う時もあります。でも、みんなの耳がそこまでよくないというのが問題です。

櫻井　違いがわかってくれればいいですね。もともと「たたく場所で音が違う」ということをわかってくれればいいのですが。私には灰野さんが演奏されているときに、たたく場所の音色の違いがよくわかるのですが。

灰野　問題はあるけれど、面白いと思いますよ。勝手に言ってますが、大学院が作曲家で、大学院をもっと超えたらポリゴノーラがある、って、そういっちゃえばいいんです

よ。プロといっているなら、そこまで聞き取れ、って。挑発的になっていいと思う。

櫻井　それで喧嘩になるわけですね。

灰野　言葉は柔らかく（笑）。巻き込むには、生意気ですが、説得じゃだめだと思いますよ。納得してもらわなければ駄目です。

櫻井　納得ですか……。

灰野　納得です。

櫻井　腑に落ちる。

灰野　はあ、ではなく、はあ〜〜、です（笑）。

櫻井　へえ〜〜、とか、ほお〜〜ですね。最近、ある意味、なんでも説明しようとせずに、いったいこれは何だろう、と思わせたほうがいいのではと思うのです。

灰野　考えますからね。

櫻井　そのあとで、相手の発する言葉に反応するほうが、説得ではなく納得してもらえるのではと思います。

灰野　先生の学術的なものを、ドカーンと見せられると、今まで自分が知らなかった辞書を見せられるようなものです。

“普通の”パーカッションの人がたたいたら、ポリゴノーラの波紋は起こらなかったんです

櫻井　最後の質問に入ってもいいですか。

灰野　はいどうぞ。

櫻井　灰野さんの CD とか YouTube を見ると、声を出すときに普通の発声法ではないですね。あれはどうしてですか？

灰野　声ですか？

櫻井　はい、声です。いわゆる、オペラ歌手とかの発声と全く違うでしょ。あれは、ご自分で開発されたのですか？

灰野　開発と言ってもらうとうれしいのですが、いつも言っているように、他と違うもの、他と違うことを 50 年思い続けて、声を出し続けていますから、そうなってきていると思います。そうとしか言いようがないのです。

ちょっと話を変えてもいいですか？

櫻井　どうぞ。

灰野　僕、息子さん（櫻井）元希君と話がしたい。

櫻井　それはまたどうしてですか？

灰野　いろんなことがやりたくて。お父さんから見て息子さんがどのように見えているかはわかりませんが、妹さんもそうですが、彼もちょっと違うんですが、和声とかを極めようと思っているのではないか。僕はほんの少ししか、見ていませんが、と言いながら、彼のブログなどをちゃんと見ています。クラシックでもクラシックといまだに呼ばれていないような、ヨーロッパの 12 世紀から 14 世紀、中世からルネッサンスの頭のもので、彼が去年くらいにやったコンサート、ギヨーム・デュファイの曲ですが、これを紐解いて、おそらくあそこまで深くデュファイを研究している人なんていないんじゃないかと思います。実は僕、和声とかやっていないのですが、興味はすごくあるんですよ。

櫻井　へえー。

灰野　他に出さない一音をずーっと考えていて、当然音は一音では終わらないわけだから、繋がっていく音があって、次に絡む音が出てきます。両手のように。だんだん音が増えていきますよね。そしてやっぱり一番複合的な始まりは、和声だと思います。そういうことを研究している人間と話したくて。そういえば櫻井さんの息子さんじゃない、ってなって。たまたま僕がウィリアム君（徳久ウィリアム）と一緒にやったのを元希君が見に来てくれて、こんな風に僕の声を分析してくれているんだ、と思って、いつか話したいと思っています。是非一緒にやりたい。

櫻井　整数倍音の研究をしていたら、ふと気が付くと、オペラの特にソプラノなんですが、誰が歌っているか、個性がないのです。

灰野　あっ、簡単ですよ。それは、人に聞かせるために、機械になっちゃってるからです。もう、音の高さ、大きさだけを求めるから、個性が出なくなっているのです。

櫻井　で、その対極にあるのが灰野さんです。

灰野　僕は、大きい声も高い声も訓練して出しますが、オペラにはなりたくない。あと、ちょっと語弊があるかもしれないが、黒人音楽のゴスペルがあります。もちろん尊敬していますが、あれにもなりたくない。

櫻井　あれはすごいですね。

灰野　ただゴスペルにもなりたくない。

櫻井　ゴスペルや、オペラの透き通った声の対極に、灰野さんの声があると思うのです。

灰野　そうです。全部そうです。

櫻井　私が灰野さんの声を聴いた時に、これは非整数倍音の塊だと思ったんです。非整数倍音の声を出しているので、ポリゴノーラの音を聞いた時に、すぐわかったんではないかと思います。

灰野　僕は、何度も言いますが、ポリゴノーラは僕の楽器だ。で、櫻井さんはそう言ったのですが、「そう叩いてほしかった」と言ってもらったんで、共犯者です（笑）。

櫻井　残念なことではあるのですが、灰野さんのようにたたいてくれる人はいないのです。

灰野　そうでしょう。僕しかいないんです。

櫻井　あのたたき方は、どこから出てくるんだろう。

灰野　初めに、（桜井）真樹子さんが普通のパーカッションの人に「たたいてくれ」と言っていたら、何も波紋は起こらなかったんです。かえって、そのほうがポピュラーになったかもしれない（笑）。僕なんかが、間に入っちゃったから。

櫻井　それで、ちょっと思い出したのですが、私が新しい音階を作って、有頂天になっていたのですが、もう一つのポリゴノーラを広める方法として、ポリゴノーラで、普通のドレミが出るように作ってはどうでしょうか？

灰野　それは、そういうピッチに調整した“楽器ポリゴノーラ”を作るということですか？

櫻井　はいそうです。

灰野　それはいいと思う。

櫻井　今のままでは、世の中と離れすぎているように思います。

灰野　それはそう思います。ポリゴノーラは、いきなり大学院、つまりわからない世界のものですから。

櫻井　そうしないと、作ってもう 5 年以上たつのですが、これ以上広がらないような気がします。本当にポリゴノーラが好きな人は嫌だと言うのです。

灰野　そう思います。

櫻井　でも、そうしないとこれ以上広まらないような気がします。

聴いてもらいたいのは
100人なのか、1万人なのか、世界中なのか

灰野　先生がどうしたいかにかかっています。それを明確にすることです。

櫻井　最初はポリゴノーラを作って、全員とは言いませんが、少しずつ分かってくれる人が出てきて、広めてくれると思ったのですが、結局わかってくれたのは灰野さんを含めて少数の人だけでした。このままで、私が死んだら無くなってしまう。先ほども言いましたが、継承が大事だと思うようになって、継承するためにはどうしようかと思ってMIDI-PAD などに音を割り付けました。また、鉄はどうですか、などと先ほど聞いてみたわけです。

灰野　鉄はやめましょう。

櫻井　ポリゴノーラの表面の模様はやめましょうか。

灰野　そこにお金がかかるなら、それはプロ仕様にしましょう。先ほどの、ドレミのポリゴノーラを作るという話ですが、ポリゴノーラから出る倍音の出方が変わるのですか？

櫻井　それは変わりません。

灰野　それではやめましょう。

櫻井　ドレミの整数倍音が突然出るわけではないのです。

灰野　それは、丸いマリンバです。

櫻井　そうですね。

灰野　なんか特徴がなかったらダメです。

櫻井　MIDI-PAD に割付けた音を、ドレミにしましょうか？

灰野　その相談は受けられません。

櫻井　すごく迷っているのです。新しい音階は、異常なんです。それで、音楽を作ることは今の人には考えられない。で、ピッチも変だと。

灰野　間違っていると聞こえちゃうわけですね。

櫻井　何か気持ちが悪い、というだけで終わってしまうのではないかと危惧しています。それで、皆さんが良く親しんでいるドレミにしたほうがいいのかなあ、と思うようになりました。

灰野　それでは、ポリゴノーラの意味と価値がないんじゃないですか？

櫻井　その通りですね。そこを灰野さんにご相談しようとしてきました。やっぱりそう

ですよね。

灰野　どうしたいかです。僕が50年音楽をやらせてもらっていて、いつも意識していることは、10人に聴いてもらえばいいのか、100人に聴いてもらえばいいのか、1万人に聴いてもらいたいのか、それで自分の位置が決まります。

櫻井　そうですね。その通りですね。

灰野　僕は初めから1万人に聴いてもらおうとは思わなかった。10人は寂しいけれど、100人の人が来てくれれば、変に誤解されない。自分がそう思わないのに、1万人の人に聴いてもらいたいと思ったら、専制君主みたいでしょ。

櫻井　私も、たくさんの人に聴いてもらいたいと思ったら、自分をどこかで殺しているような気がします。

灰野　そりゃ、そうですよ。僕は、言葉でいうと、「いかにリスクを背負うか」です。大袈裟な言い方ではなく。

櫻井　一番輝いているのは、自分がしたいことをしているときではないでしょうか？

灰野　それだけは自信があります。僕は、自分がやりたくないことをやった覚えはないので（笑）。

櫻井　そうそう、その時が一番輝いていると思うのです。

灰野　やりたいことをするんです。

櫻井　私もそうです（笑）。

灰野　僕はやっと50過ぎてから、なんとか生活が音楽でできるようになってきて、あとは、さっき言った100人にしたいのか、1万人にしたいのかで。1万人が欲しければ、どうしてもピッチを普通（ドレミ）にしてしまうんですよ。

櫻井　そこなんですね、灰野さんが、「櫻井さんどうしたいんですか」、って問いかけている、100人なのか1万人なのか、世界中なのかは。

灰野　現音（現代音楽）の、すごい有名なパーカッショニストに櫻井さんの論文を読ませたら多分納得するから、ポリゴノーラがどういう楽器か。演奏の仕方の指示は一切せずに。多分、僕の幻影が出てきちゃうから。

櫻井　それで、このポリゴノーラの本を作ったのです。むつかしいことは後ろに全部まとめて、終わりに灰野さんとのこの対談を入れようとしています。

灰野　あ、そうか。これを作れば、その本を献上できるんですね。

櫻井　本当にわかってくれる人を一人でも増やさないとだめなんです。それで、この本を書き始めました。

灰野　イメージですけど、海外にはクセナキス（※4）の大学とか、シュトックハウゼン（※5）なんとかかんとかとかあるんじゃないですか？そういうところに献上すればいいですよ。

櫻井　でも、それをするためにはこれを英語にしなければなりませんよ。

灰野　櫻井さんは英語に堪能でしょ？

櫻井　でもこれを英訳するのは大変です。これを書くのに 5 年かかっています。これを書き始めて、一応できました。でもあとで自分で読み直すと、頭が痛くなってきたのです（笑）。こりゃあかんわ。そこで、むつかしいのは、全部後ろにまわして、全部書き直しました。

灰野　前にいただいたいろいろな論文とか資料、数字がいっぱい書いてある奴、あれも全部入っているのですか？

櫻井　そういうものは全部付録に入っています。それが必要な人がいるかもしれないので。

灰野　僕は、全く正直言って、わからないのですが、そういうのが好きな人もいるから、置いとけばいいんじゃないですか。

櫻井　置いときます（笑）。それから、コラムのように、読みやすいものもちりばめて、なんとか最後まで読んでもらおうとしています。本の中には、QR コードで、灰野さんも含めたいろいろな人の演奏が聴けるようになっています。また一ノ瀬トニカさんが MIDI-PAD で作曲したものも含めることにしています。普通のポリゴノーラなら、2 音以上弾くのはなかなかむつかしいのですが、MIDI-PAD なら、10 個でも同時に押さえることができるので、また違った曲ができると思います。一ノ瀬さんは以前は一音一音を使ったけれど、今度は特に和音を中心にして作曲したい、といっておられました。

灰野　聞いてみたいなあ。これはとどのつまりですが、問題はやる人ですから。

櫻井　演奏する人ですか？

灰野　そう、その人が普段何を考えているかです。人間誰でも褒められたい。でも、「誰に」かが問題です。仲間なのか、まだ知らない新しいファンなのか、アカデミックな人に褒められたいのか。これはしょうがない。

櫻井　整数倍音、ドレミの音階ができてから、2500 年くらいたっています。これに抗うのは大変ですよ。一人で（笑）。でも、みんなが段々ドレミの音楽に飽きてきたらいいのになあと思っているのです。そういう兆候が少しあるから、もう一度本を書き直してみようかと思いました。

灰野　食品の添加物が問題になっているでしょう。でも僕に言わせると、音楽なんて添加物だらけですよ。J-POP なんか添加物だらけですよ。

櫻井　まあ、ある意味仕方ないことですよね。明治の初め、日本が植民地にならないように欧米に追い付こうとしたときに、ドレミを輸入したのですから。

灰野　わかってます。さらに僕が実感としては、ドイツ式教育だったのですよね。あとからクラシックも好きだから、いろんなピアノを聞いたけど、好きなのはみんなロシア側ですよ。ドイツは固いんです。

櫻井　民族性もあるのでしょうね。ドイツ語自体もかちっとしてるし。

灰野　いやいや、命令ですよ、私たちに響いてくる言葉としては。

櫻井　ドイツ式の弊害は、どこにあるんでしょうか？

灰野　ジャスト（Just）です。譜面通りに弾かないといけないのです。

櫻井　そうか、リズムを動かしてはいけないのですね。

灰野　そう、メトロノームにぴったり合わせてね。よく言う、時間を厳守する、という。譜面にジャストに弾かなければならないのです。結局これに音楽が支配されているんですね。そうなると、政権もどうなればいいのかなあとか。

櫻井　国の政治で、音楽が変わるとは思いませんが、国が豊かにならなければ音楽や文化は発展しませんね。

灰野　ええ、ええ。余裕がなければだめですよ。

櫻井　本当にコロナや、この 10 年間、20 年間、日本はそういう意味で、文化が発展しませんでしたね。

ポリゴノーラの音のうねりを捕まえるには、テクニックが必要です

灰野　櫻井さんの下に僕がいて、櫻井さんの上にもいろんな世代がありますね。長くつながっている中で、おそらく 50（歳）くらいから気づくことがあると思うんです。あるとき、悔しいけれど、日本人の血が流れていることに気づくのです。それは、右翼とか左翼とかの問題ではなく、つまり、食べてるものがお米とかで、その民族が、「なんでドレミでなければならないのか」って、やっぱり気づきだすのですよ。僕は最初から気づいていました。

櫻井　そういう人がもっと増えてくれたらいいのになあ。そうなんです。一番典型的なのは、琵琶なんです。琵琶はほんとにドレミではないのです。あれがずっと続いていることに日本人として誇りを感じます。

灰野　いいなあ。

櫻井　そういう意味では、三味線もお箏もそうなんです。でも今は、調弦をチューナーでやってしまっているんですね。本当に日本人が持っている音階、音の感覚を呼び覚ましてもらいたいなあ。

灰野　440 Hz（※6）　でなくていいです。

櫻井　だから、この本こそ日本から発信すべきものではないかと思います。

灰野　それこそ（三味線の）“さわり”というのはリズムの揺れで、ポリゴノーラは音をうねらせることを証明する楽器です。“さわり”は“うねり”とは違う。

櫻井　ポリゴノーラのうねりというのは、なんとなくわかるんですが、もう少し説明してもらえませんか？

灰野　音が同じところでとどまっていない。バーンとギターでも複数の弦を弾いても、それぞれの弦は響きあっても、うねらないと思うんです。でもポリゴノーラは（1 枚で）ピッチの違う倍音を、たたく場所、たたき方で出せるわけだから。たたくと、グワーンと鳴るんです。それこそ、私には目に見えるんです。

櫻井　見えてるんですね。

灰野　それこそ、こうなんですよ（空中に両手を広げる）。だからこれを手でつかんでるんですよ（笑）。つかんだのをこっちにやるとか。だから変なアクションが生まれるんです。

櫻井　目で見えるんですね。

灰野　ポーンとたたいてこう来るのを、普通の作曲家なら指示しないんで、たたいて終わりだけど、僕はたたいたあとに、すごく長く鳴っているから。大袈裟に言うと、フッと吹いてもいるんですよ。

櫻井　確かに、灰野さんはポリゴノーラをたたいた後、その上に手をかざして動かしたりして、音をうねらせていますね。

灰野　ええ、動かして、手に吸い付けてヒュッとやる。面白い話をしますよ。先生がポリゴノーラをたたいているのを見て、元希君が「だめだ。灰野さんのようにやれ」と言ったのを聞きましたが、まさにそれで、たたいた時に、そのミュートをものすごく早くしないとできないんです。これが鳴りきっているうちに捕まえないと別のところに行

ってしまいますから。それは、あえて言うとテクニックです。このようなテクニックをパーカッショニストに要求する楽器は、ほかにはないです。

櫻井　私が、灰野さんに最初にお会いしたときに言われて覚えている言葉は、「この楽器には私が今まで培ったテクニックの全部が注ぎ込めます。」です。言われて、すごくうれしかったです。

灰野　こうやってたたいても、人が見て、なんでこう手をかざしているんだろうって思っているかもしれないですが、ポリゴノーラは鳴っててくれるから。半分指で 1 か所を抑えたり、またヒュッと離すと、かわいい混ざり方をするんです。

櫻井　それを頭で理解しなくとも体で表現して、いろんな弾き方をしているのを拝見すると、あっ、今このモードの音を残しているとか、よくわかります。

灰野　今まで僕は全くやる気はなかったのですが、いわゆる先生が始まるときに講演をやって、僕が演奏をして、それを解説する人がいてもいいかもしれない。僕が演奏しながらやってもいいです。はじめは普通に演奏して。

櫻井　それ、すごく面白いですね。ここを押さえる、とこうなるんですよ、って。そうするとわかってくれるかもしれません。耳の良し悪しには個人差があるから、わかりにくい人にはわかりにくいけれど、説明されるとわかるかもしれない。

灰野　確かにいつも思うんですけれど、ぶら下がっているやつ（ポリゴノーラ）は、よく鳴るんです。ミュートしないから。ただ、動いちゃうんですよね（笑）。

櫻井　その通りです。ポリゴノーラが動いたり回転したりして、連打できないですね。

灰野　あれが、パーンと何かで張って固定されるといいのかもしれない。でも固定すればするほど、響きが悪くなる。変な子供作っちゃったんですよ。

櫻井　あれは、なかなかのきかん坊です（笑）。ちょっとでも触ると音が変わります。

灰野　機嫌がね。

櫻井　灰野さん、「明和電機」（※7）ってご存じです？

灰野　なんとなくわかります。

櫻井　1993 年に土佐兄弟が始めた会社で、おもちゃのような楽器を作っているのですが、その一つに電磁石（ソレノイド）でスイッチを入れるとポンとたたくような仕組みで楽器を作っているんです。ひょっとしたら、そのような機構を使って、ポリゴノーラの鍵盤楽器のようなものが作れないかと思っています。灰野さんのように、たたける人がいないから、MIDI-PAD と同じように誰でも簡単に弾けるようにするのはどうでしょう。

灰野　いいじゃないですか。何でもやっていいと思う。あとで失敗はしょうがないですよ。

櫻井　お金がかかるんだけれど（笑）。

ポリゴノーラを聴くと今までとは違う気分になれる、それくらいがいいんじゃないかな

櫻井　（部屋にあるリュートを指さして）いい、リュートがありますね。

灰野　あります。

櫻井　リュートは、どうしてあんなに小さな音しか出ないんでしょうね？

灰野　大きくする必要がなかったからですね。

櫻井　そうでしょうね。

灰野　あと響いたからです、多分。楽器って、何かでかいものが出てくると、でかくなりますね。

櫻井　会場とかですかね。

灰野　なんだ、俺の音聞こえない、となって、ボディーを大きくしたり、弦を増やしたり。

櫻井　同じ人間が演奏しているのに、リュートのように小さな音しか出せない楽器もあれば、ピアノのようにどでかい音が出る楽器もありますね。何でですかね？

灰野　不公平だね。でもおそらく、聞く人数が増えていったからかなあ。オペラも本来は小さな声でも聞こえていたんだけど、ものすごくでかいところで人がいて、いくら高い所から歌っても、吸収されちゃうんで、とにかくでかい声を出せ、っていう声量を訓練して、皆同じ声になっちゃったんじゃないかなあ。僕はいろいろなクラシックを聴くけれど、オペラだけは聴けないんですよ。恥ずかしくて。

櫻井　私もそうです。

灰野　キンキンして。

櫻井　ほんとに。

灰野　でも意外かもしれないけれど、シャリアピン（※8）は好きです。

櫻井　低い声はいいのですか？

灰野　はい。先生はどう思うか知んないけれど、あれはロックですよ、僕のなかで。

櫻井　シャリアピンって確かロシア人じゃなかったですか？

灰野　ええ、あの迫力っていうか、俺は好きにやるぞ、みたいな。

櫻井　そこに本当の音楽があったのかなあ。

灰野　クラシックのオペラだけは許してほしい。

櫻井　よく似てますね。

灰野　ところで、元希君はどうして声楽にいっちゃったんですか？やっぱり小さいときから歌好きだったんですか？先生がギターを弾いているのは聞いているわけですよね。

櫻井　ええ、もちろん聞いていました。私はよくバッハを弾いてました。

灰野　バッハですか。

櫻井　音楽は好きだったのかもしれませんが、母親が広島のエリザベート音楽大学で少年合唱団をつくるのを聞いて、そこに入団したのが始まりです。

灰野　ちっちゃいときから声楽ですか。

櫻井　そうです。そして、広島大学の教育学部で声楽をしたのですが、物足らなかったんでしょうね。卒業した後芸大に行くって言って。エーッ。今から芸大、金かかるわ、と思ったのですが、やりたいことはやらせなあかんわ、と思って。

灰野　すごい親子だよ、うらやましいな。

櫻井　彼も、サルディーニャ島の合唱なんか聴いて、声の出し方はいろいろやっていると思います。でも、やっぱり和声で、ぴったり合った時のなんていうか気持ちよさに、はまっていますね。あれはすごいって。

灰野　あー、恍惚ということですか？

櫻井　そうですね。

灰野　一体化するということですか？

櫻井　何かが、もこもこと上がっていくんですって。彼は彼で、学術的なことも興味があるらしく、バッハの今までの機械的な演奏よりも、ダイナミックなすごい迫力のあるバッハを演奏します。

灰野　それすごい興味がある。

櫻井　この間、生田緑地の菖蒲園でやった、灰野さんのポリゴノーラの演奏会が良かったです。中央に能の舞台があって、すり鉢状に回りが木に囲まれている場所です。素晴らしかった。

灰野　自分でもうっとりしてました（笑）。

櫻井　あそこは、音が広がっていくんだけれど、抜けていかない。木々の葉っぱで。

灰野　漂うんです。

櫻井　そう、そう。

灰野　ものじゃなく、ある種の霊的なものになっていると思います。

櫻井　やっぱり、ポリゴノーラはガムランと一緒だなあ、と思いました。外でやるといい。あれをもっとやりたいなあ。

灰野　やりましょう。

櫻井　ただ、平地だとまた違うのかもしれない。

灰野　聞こえないです。ポリゴノーラの高さが、これくらいなので、平地だったら音が上に逃げていきます。やっぱり、あそこはお能をやる舞台ということで、考えていると思います。周りの環境とか。

櫻井　そうか。

灰野　あの場所は、ほんとにいいとこを選んだんですね。リハーサルを部屋でやるのと全然違います。

櫻井　ひょっとしたらポリゴノーラに光明が見える、と先ほど言ったのは、若い人が今の音楽に飽きてくるのではと思うのですが、同じことがロックにもおこったのではないですか？

灰野　1960 年代後半にいわゆるロックンロールが定型しかなくなって、そこでいろんな要素を（取り）入れはじめました。しかし、いろんな要素を入れたけど、新しいものは一つもなかった。結局、ガタイがあって、それ自体を否定じゃないけれど、違うものを全く別に作り上げようとした人はいませんでした。僕しかいません。ロックというものに乗っかって、民族音楽を入れたり、エレクトロニクスを入れたりしましたが、土台は、ツッツ・タッタ・ツッツ・タッタなんです。一番極端な例は、ジミヘン（ジミ・ヘンドリックス）です。ジミヘンはギターをグアーンとやったんだけれど、後ろでは依然としてツッツ・タッタ・ツッツ・タッタでした。同じビートを刻んでました。僕がジミヘンと比較されたとき、「俺はドラムをたたくぞ」、って言ったんです。そうすれば、違うリズムを刻み、音楽が違うものに変わるでしょ。ジミヘンはドラマーに指示をしていないから、ドラマーはいわゆる当時のフリージャズに近いことをやれば事が済んでしまった。

櫻井　そうですか。そういう見方ですか。

灰野　それは、自分がロックサイドにいるからです。結局フリージャズも生まれたけれ

ど、リズムじゃなくて、体のノリがジャズなんです。音の響きは新しいけれど、一番肝心なビートをたたいているドラムがジャズなんです。よーく聞くと、スイングのジャズだし、反対にスイングしていないと、いいうねりが出てこない。古いと新しいをどうバランスとるかにみんな気を付けているけど、僕はそれとはまったく違うところから始めたいので。

櫻井　やっぱり、ポリゴノーラですね。

灰野　うまいですね。

櫻井　やっぱり、これを若い人に知ってもらいたいですね。

灰野　美術館がいいです。

櫻井　確かに、美術館に行く人は、いろいろ考えているし、新しいものはないかと思っているし。

灰野　やっぱり問題意識が高い。普通のロックのコンサートに行って、ワーと騒いでいて、新陳代謝はいいけれど、頭は先にはいかない。

櫻井　そうですね。結構、美術館で最近音のことをやっているところもありますね。

灰野　たまにです。ポリゴノーラという新しい楽器があって、それが認知され、僕が先生についていって、というのがいいです。企画書を出してください。

櫻井　私の書く文章では駄目なので、誰かに助けてもらいます。

灰野　それこそこれを人々が聴き、穏やかになり、穏やかになりながら、価値観が変わる、というのは言い過ぎで、今までとは違う気分になれますよとか、それくらいがいいんじゃないですか？

櫻井　私の理解は、整数倍音から生まれたドレミは、天上の音楽で……。

灰野　それは言わないほうがいい。それで敷居が高くなっちゃうんで。

櫻井　いや、天上の音は、地上では鳴っていない。

灰野　うん、先生、それは我々の認識（笑）。

櫻井　人には通じない。

灰野　どれくらい先生が人に伝えたいかです。僕は大学生に、ものを伝えたくない。小学生に伝えたいのです。ひらがなで話すし、“ひらがなのような”ものの伝え方をします。それは馬鹿にしているのではなく、やっぱり、知らないうちに我々は特別の環境にいて、特別なものを作っているでしょ。そうすると、我々にとって普通だと思っていることが、彼らにとっては大学院なんですよ、僕たちが言うことは。だから、みんなが仲良くするにはどうしたらいいのかな。ちょっとだけ違うものも学ぼうよ、っていうのが

いい。

櫻井　最近この本を書いていて大変よくわかります。人に読ませると、「先生の書いたものはむつかしすぎます。2、3 行読んだら頭が痛くなります」

灰野　先生、悪いけど、昔の資料でも 2 ページ見てわからなくなりました。

櫻井　昔はもっとひどかった（笑）。

灰野　それくらい言わないと納得しない人種もいる。先生はそういう人が専門ですよ。

櫻井　これを若い人に伝えようとしたら、その真ん中くらいのスタンスで行くしかない。

灰野　先生がいて、中間の人がいたほうが良い。真樹子さんがいいんじゃないかなあ。

櫻井　すごくむつかしいです。

灰野　長く何かをやっていると、知らないうちにオーラがあるのです。

櫻井　多分そうかもしれない。

灰野　相手が、何か反応する部分を見つけて、それをつついてあげる。

櫻井　それは少人数でないとできないですね。東京でコンサートをしたときに、最初に私が講演したのですが、前に座っている人が、うんうんと頷いてくれているので、わかってくれているのかと思って、それをあとで人に言うと、「それは、頷かないと失礼に当たる、と思っている人ですよ」といわれてがっかりしました。

灰野　そうそう、社交的な。

櫻井　誰もわからなかったでしょう、と言われました。

灰野　高橋悠治さん（※9）が、噛みついたじゃないですか。

櫻井　その時に、高橋さんに「新しい音階を不協和度の計算式を使って作るのは不自然だ」、と言われたことがずっと引っかかっていました。最近やっと、その式を使わなくても簡単に同じ音階ができるやり方を考えだしたので、それも本に書きました。同じ音階ができるのです。要するに、音が調和するということはどういうことかを基礎に作ると、同じ音階が得られました。わけのわからないものからできた音階は、わけのわからないものだけど、わけのわかるものからできた音階なら、いいかなあと思います。

灰野　ふーん。

櫻井　それが 5 年くらいかかって、やっとクリアーできました。

灰野　じゃ、いいアドバイスだったんですね。

櫻井　そうですね。やはり、ちゃんと物を見ておられるなあと。

灰野　やはり音楽家ですから、プロフェッショナルですよ、誰もが認める。でもわたく

しがその時、高橋さんに噛みつきましたね。

櫻井　はいはい、そうでした。

灰野　櫻井さんを擁護しようと思って。

櫻井　はい、擁護されているのはよくわかりました。えらいことが始まった（笑）。中に入らないでおこう、と思いました。擁護されているのだから、私は口を挟まないでおこうと（笑）。いろんなことがありましたね。今日は長い間、対談していただきありがとうございました。

（※1）“ピザ”と“ドーナツ”

ポリゴノーラを叩いたときの２種類の振動モード、“ピザモード”と“ドーナツモード”のこと。ピザモードは、ピザを切るときのように円の中心を通る直線で、振動する部分としない部分が分けられる。ドーナツモードは、振動のありなしが同心円状になっている。“ピザ”と“ドーナツ” ２種類のモードが同時に起こる“ミックスモード”も存在する。

（※2）MIDI-PAD

LAUNCHPAD MIDI コントローラー（Novation 社製）のこと。

（※3）テリー・ライリー　（1935～　）アメリカ合衆国出身。

ミニマル・ミュージックの代表的作曲家。

（※4）クセナキス

ヤニス・クセナキス（1922～2001）ルーマニア出身。ギリシャ系フランス人の現代音楽作曲家、建築家。

（※5）シュトックハウゼン

カールハインツ・シュトックハウゼン（1928-2007）ドイツ出身の現代音楽家。

（※6）440 Hz

一般的な調律のピッチの標準。1939 年ロンドン、万国規格統一協会（ISA）で採択された。

（※7）明和電機

1993 年 5 月に、弟の土佐信道と兄の土佐正道で結成された芸術ユニット。2001 年に兄の正道は「定年退職」で脱退。2023 年にデビュー30 周年を迎える。

（※8）シャリアピン

フョードル・シャリアピン（1873～1938）ロシア帝国カザン出身のオペラ歌手（声域:バス）。

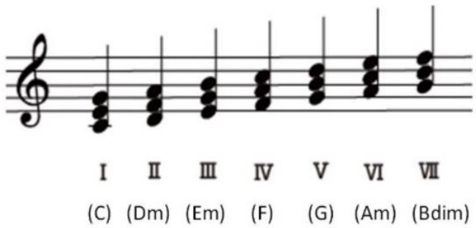
（※9）高橋悠治さん　（1938～　）

東京生まれ。柴田南雄、小倉朗、ヤニス・クセナキスに作曲を学ぶ。
作曲家、ピアニストとして活躍中。

付録 1

和音

和音とは複数の音を同時に鳴らし協和する組み合わせのことです。旋律は 1 つの音だけで構成されていますが、旋律の伴奏は和音ですることが多いです。和音を理論的に研究したのはラモー（J-P. Rameau, 1683～1764）がはじめてといわれています。彼は、機能和声学という概念を作曲に持ち込み、旋律と和声の関係を理論化しました。しかし、その理論が余りにも難しかったため、フランスの物理学者、ダランベール （J. L. R. d’Alembert, 1717～1783）が、ラモーの和声理論を分かりやすく解説した本を 1752 年、その改訂版を 1762 年に出しました（ダランベール、2013)。この本は、ドイツ語や英語に訳され、ドイツやイギリスの音楽界に大きな影響を与えました（Christensen 1993; 片山ら 2009)。



付録1 図1 三和音の基礎

1 3 和音の協和

付録 1 図 1 に 3 つの音の和音の作り方を書きました。これは、ピアノの白い鍵盤をひとつ飛ばしに弾いて作ったものです。

ド・ミ・ソが和音として成立するのは 1 章で述べた通りです。弦を使っている限り、ドの音を鳴らすとその倍音にソ（3 倍音）とミ（5 倍音）が出てくることを利用しています。つまり五線譜で書くと、音階をひとつ飛ばしに重ねるとよい響きがする、あるいは協和することを経験的に人々は知っていました。そこでこの原理を順にそれより高い音階に応用してみました。この“してみました”というところが、和声学の理

論が完全でないところです。そこには理屈があったわけでなく、ピアノでひとつ飛ばしに音を重ねると何となくよい和音がその中にできた、という経験に基づいて和声学ができたのではないでしょうか。

さて付録 1 図 1 を見てください。ひとつ飛ばしの原理を当てはめ、ドを最低音とするとドミソの和音ができます。レを最低音にすると「レ・ファ・ラ」、ミを最低音にすると「ミ・ソ・シ」という具合に順に 3 和音ができていきます。

ドとレ、あるいはレとミのように隣の鍵盤を重ねる和音がないのは、ドとレを一緒に鳴らしても協和しているようには聞こえないからです。また、ミとファを同時に鳴らしても協和しているように聞こえません。これを不協和といいます。だからひとつ飛ばしに音を重ねることにしたのだと思います。図 1 に戻りますが、ド・ミ・ソの和音にローマ数字 I を当てます。これを I の和音と呼び、その上に順にローマ数字を振ると VII まで番号が付きます。VIII は I の和音の 1 オクターブ上になりますので元に戻って I とします。

これらの和音が本当によく協和しているかを表を使って説明します（付録 1 表 1)。2 つ表があり、上の表は平均律の音階を使った場合の 3 和音の協和、下の表は純正律を使った場合です。

上は平均律の音階を使った 3 和音の表です。一番左の列は、音階名（ド、レ、ミ…）を、そのすぐ右隣の列にそれらの平均律での音階比をドを 1.00 としたときの比で記しています。I の和音のドに対するミ、ソの比は、平均律では 1.26、1.50 です。下の表の純正律ではこの比は 1.25、1.50 となります。そこで、純正律ではドの 6 倍音（6.000）とミの 4 倍音（1.250×4＝6.000)、ドの 3 倍音（3.000）とソの 2 倍音（1.5×2＝3.000) がぴったりと合います。平均律ではこのド・ミ・ソの 3 つの音は“大体”合います。

平均律で調律したピアノでは、ミは 1.26 ですのでこの 4 倍音は 5.04 となり、ぴったりドの 5 倍音の 5.00 にはなりません。また、ソに関しても本当はドの 1.498 倍なので、2 倍してもちょうど 3.000 にはなりません。これが、平均律よりも純正律が和音がよく協和するといわれている理由です。

平均律(ハ長調)		和音の番号						
音階名	比率	I	II	III	IV	V	VI	VII
ド	1.00	1.00						
レ	1.12		1.00					
ミ	1.26	1.26		1.00				
ファ	1.34		1.19		1.00			
ソ	1.50	1.50		1.19		1.00		
ラ	1.68		1.50		1.26		1.00	
シ	1.89			1.50		1.26		1.00
ド	2.00				1.50		1.19	
レ	2.25					1.50		1.19
ミ	2.52						1.50	
ファ	2.67							1.41

純正律(ハ長調)		和音の番号						
音階名	比率	I	II	III	IV	V	VI	VII
ド	1.00	1.00						
レ	1.13		1.00					
ミ	1.25	1.25		1.00				
ファ	1.33		1.19		1.00			
ソ	1.50	1.50		1.20		1.00		
ラ	1.67		1.48		1.25		1.00	
シ	1.88			1.50		1.25		1.00
ド	2.00				1.50		1.20	
レ	2.25					1.50		1.20
ミ	2.50						1.50	
ファ	2.67							1.42

付録1　表1　ハ長調の3和音の比率（上段平均律、下段純正律）
昔の和音の作り方は、ピアノの白い鍵盤を一つ飛ばしに3つ押さえて作りました。例えば、ド・ミ・ソです。平均律でも、純正律でも、3つの音の間隔が同じなのは、和音番号I、IV、Vです。1970年代のフォークソングは、ほとんどこの3つの和音（ギターのコードで書くと、C、F、G）で伴奏された。

和音を構成する 3 つの音が I と全く同じ比の 3 和音は、他に IV と V しか見られません（黄色）。これら I、IV、V の 3 つの 3 和音はギターのコードでいうと、C、F、G です。I の和音と同じ間隔で 3 つの音が IV と V でも並んでいます。これら I、IV、V の和音を和声学では長 3 和音といいます。長調は明るい響きがするのですが、なぜ人が明るく感じるのかはまだわかっていません。

一方、II の和音はレを 1.00 としてファ、ラの比を示しています（緑色）。それらは、平均律でいうと 1.19、1.50 となります。II、III、VI はその比が I、IV、V とは異なり、平均律では、すべて 1.19、1.50 です。これらは暗い、悲しい響きがするので短 3 和音と呼ばれています。純正律では和音の音の組み合わせが II では 1.19、1.48 なのに、III と VI では 1.20 と 1.50 です。全音間隔を 2 種類持つ純正律の弱点のひとつです。

一方、平均律で見ると、I から VI までの和音では、3 和音の 1 番目と 3 番目の音の

長3和音				短3和音					減3和音	
音階比率	I	IV	V	音階比率	II	III	VI		音階比率	VII
1.000	ド	ファ	ソ	1.000	レ	ミ	ラ	（ド）	1.000	シ
1.260	ミ	ラ	シ	1.189	ファ	ソ	ド	（ミ♭）	1.189	レ
1.498	ソ	ド	レ	1.498	ラ	シ	ミ	（ソ）	1.414	ファ

付録1表2　7つの３和音の音階比率のまとめ（平均律の場合）
Ⅰ，Ⅳ，Ⅴの和音は長調の和音で、Ⅱ，Ⅲ，Ⅵの和音は短調で使われるます。Ⅶだけそれらとは異なる和音ができます。和声学ではⅠ，Ⅳ，Ⅴは『長3和音』、Ⅱ，Ⅲ，Ⅵの和音は『短3和音』といいます。Ⅶは『減3和音』と別の名前で呼ばれます。長調の和音と短調の和音の違いは2番目の音の高さだけです。長3和音では、1番目の音に対して2番目の音の比率は1.260倍ですが、単3和音では1.189倍です。

比は、すべて 1.50 です。II、III、VI の和音はイ短調の和音です。ギターのコードでいうと、Dm、Em、Am となります。小文字の m は短調（minor）を意味します。長和音でも、短和音でも 1 番目と 3 番目の音の間隔は 1.50 と同じですが、長 3 和音と短 3 和音の違いは、真ん中にある 2 番目の音の位置です。長調では 1.26 倍ですが、短調では、1.19 倍です。1.19 倍の音はもし最低音をドとすれば、ミ♭に当たります。つまり、短 3 和音では第 2 番目の音が長調より約半音下がっていることになります（付録 1 表 2)。

ミ♭は平均律ではドの 1.189 倍の音ですが、純正律では 1.200（=6／5）の音です。そこで 3 番目の音の高さを純正律に基づいて 1.500 として、その 3 和音の倍音関係を計算すると、付録 1 表 3 のようになります。一致する倍音の値に影をつけました。これを見ると、同じ 3 和音でも、短 3 和音と長 3 和音では一致する倍音の場所や組み合わせが大きく違っています。短 3 和音ではドの 12 倍音までで、36 個の組み合わせのうち 10 個の一致が見られます（表 3)。一方、長 3 和音では 36 個のうち 16 個も一致しています。しかし、短 3 和音では 3 つの音全部が一致するところがあります。すなわちドの 6 倍音（6.000）はミ♭の 5 倍音（6.000)、およびソの 4 倍音（6.000）と一致します。この関係はドの 12 倍音（12.000）でもう一度出現します（ドの 12 倍音、ミ♭の 10 倍音、ソの 8 倍音)。一方、長 3 和音のほうでは一致数は 36 個の組み合わせのうち 16 個と短 3 和音より割合は多いのですが、3 者全部が倍音で同時に一致するところはありません。すべて 2 音のみです。

	倍音列											
短3和音	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ド	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	9.000	10.000	11.000	12.000
ミ♭	1.200	2.400	3.600	4.800	6.000	7.200	8.400	9.600	10.800	12.000	13.200	14.400
ソ	1.500	3.000	4.500	6.000	7.500	9.000	10.500	12.000	13.500	15.000	16.500	18.000

	倍音列											
長3和音	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ド	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	9.000	10.000	11.000	12.000
ミ	1.250	2.500	3.750	5.000	6.250	7.500	8.750	10.000	11.250	12.500	13.750	15.000
ソ	1.500	3.000	4.500	6.000	7.500	9.000	10.500	12.000	13.500	15.000	16.500	18.000

付録1表3　短3和音と長3和音の倍音同士の一致を示した図
　音程の比率は純正律に基づいて計算した。短3和音では基音（ド）の12倍音までで10個の一致がみられる。また、ドの6倍音と12倍音は3つの音に共通して現れる。一方、長3和音では基音（ド）の12倍音までに、全部で16個の一致がみられるが、3つの音に共通する倍音は一つもない。全部2つに限られる。この長3和音と短3和音の違いが、脳に喜びと悲しみを生じさせるのであろうか？

また短3和音では、最低音の倍音がそのほかの倍音と一致するのは3の倍数の倍音のみがほかの倍音と協和します（ドの3、6、9、12倍音)。しかし、長3和音では、3の倍数（3、6、12）だけではなく、5の倍数（5、10）でも倍音の一致が見られます。これらの違いが人に短調の和音が悲しく、長調の和音が明るく感じられる、ということと関係があるのかもしれませんが、まだよくわかりません（Ball、2011;Weinberger、2005)。いずれ脳科学が明らかにするでしょう　(Abbott, 2002)。

ところで平均律ではドとソの比は1.498倍ですが、上でも述べたように純正律では正確に1.500倍となります。そこで、純正律を使った時の和音の比の関係をもう一度付録表1の下の表(純正律)で見てみましょう。

Iの和音では、その比は1.00、1.25、1.50と非常にきれいな比になっています。つまりドとミの音階の比は1対1.25、ドとソの比は1対1.5です。純正律だからです。つまり、ドの3倍音でソを、5倍音でミを定めたことに対応しています。この関係はIVの和音でも、Vの和音でも守られています。さて、II、III、VIの和音の場合を見てみましょう。IIIとVIは、同じ比、1.00、1.20、1.50です。ところがIIでは少し異なり、1.000、1.19、1.48です。このような齟齬が純正律の弱点です。

付録1表1の上下の表では、VIIの和音が、他の和音と少し異なることがわかります。平均律では1.000、1.19、1.41という比で、純正律でも、1.000、1.20、1.42です。IからVIの和音までは1番目と3番目の音程の比は例外なく1.5に近い音でしたが、VIIの和音だけ1番目と3番目の音の比が1.5から大きく外れ、平均律では

1.41、純正律でも、1.42 と 1.500 の音に比べて約半音低く外れています。

和声学では I、IV、V は長 3 和音（長調の和音だから長がつきます）といい、II、III、VI は短 3 和音（短調の和音だから短がつきます）といいますが VII だけは減 3 和音といいます。VII の和音だけ、シとファの間に半音が 2 つ入っています。そのほかの 3 和音中には半音は 1 つだけです。長 3 和音は 2 番目と 3 番目の間に、短 3 和音では 1 番目と 2 番目の間に半音がひとつ入ります。いずれにしても 3 和音を作るときに協和を考えずに、五線譜の位置、あるいはピアノなどの鍵盤の位置に従い機械的に 3 つの音を重ねたために和声学が複雑になったのかもしれません。

２　倍音から和音を作る

それでは、倍音が協和の原因なら、弦の倍音振動を元に和音が自動的に作れるでしょうか?　付録 1 表 4（ア～キ）を見てください。

（ア）ではドの音階比を 1.000 にして、それぞれの音階の倍音列と 8 倍音まで書き出しています。通常は音楽では音の間隔を示すのにセントという単位を使い、1 オクターブを 1200 セントとして表示し、半音の間は 100 セントとします。この方法では、和音の協和を数字で比較することができません。そこで本書ではこれまでどおり、ドを基準（1.000）にし、それ以外の音を比で表します。整数倍音ですから、ドの 2 倍音は 2.000、3 倍音は 3.000 になります。このドの倍音列は、いろいろな別の音階の倍音と協和します。表 4 では整数倍音を 8 倍音まで計算しました。

付録 1 表 4 の（ア）を見て下さい。これまで何度も出てきましたが、ドの 3 倍音はソの 2 倍音と、またドの 5 倍音はミの 4 倍音と協和します。ドの 3 倍音はちょうど 3.000 ですが、ソの 2 倍音は平均律では 2.997 となり、正確に 3.000 ではありません。しかしその差を％で表すと 0.1％です。この差は半音の 1／4 を聞き分けられるというモーツアルトでもおそらく分かりません。そこで半音の 1／4 以内（1.49％以内）の 2 つの音は協和していると本書では判定します。

付録 1 表 4（ア）の最初のドの行をさらに右に見ていくと、ドの 5 倍音はミの 4 倍

音だけでなく、ラの 3 倍音とも協和します。ラの 3 倍音は正確に 5.000 ではなく、5.045 です。その差は 0.9%なので、上に述べた判定基準内なので、協和しているとみなします。ドの 4 倍音はファの 3 倍音（4.005 差 0.125%）と協和します。ドの 6 倍音はもう一度、ソの 4 倍音と協和します。ドの 7 倍音に協和するものは何処にもありません。ドの 8 倍音はファの 6 倍音と協和します。このようにドがどの音階の倍音と協和するかを右の最後の列にまとめました。ドの倍音は、ミ、ファ、ソ、ラの倍音とどこかで協和します。

同じことをレでも考えて見ましょう。それが付録 1 表 4（イ）の表です。レの 3 倍音はラの 2 倍音と、レの 4 倍音はソの 3 倍音と、5 倍音はシの 3 倍音と、8 倍音はソの 6 倍音と協和します。右の列にまとめると、レの倍音はファ、ソ、ラ、シ、と協和します。このような表をミ［表 4 (ウ)］、ファ［同 (エ)］、ソ［同 (オ)］、ラ［同 (カ)］、シ［同（キ)］まで作りました。

（ア）

ハ長調(平均律)		整数倍音							ドと協和
音階名	音階比率	2	3	4	5	6	7	8	する音階
ド	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	ド
レ	1.122	2.245	3.367	4.490	5.612	6.735	7.857	8.980	
ミ	1.260	2.520	3.780	5.040	6.300	7.560	8.819	10.079	*ミ
ファ	1.335	2.670	4.005	5.339	6.674	8.009	9.344	10.679	*ファ
ソ	1.498	2.997	4.495	5.993	7.492	8.990	10.488	11.986	*ソ
ラ	1.682	3.364	5.045	6.727	8.409	10.091	11.773	13.454	*ラ
シ	1.888	3.775	5.663	7.551	9.439	11.326	13.214	15.102	
ド	2.000	4.000	6.000	8.000	10.000	12.000	14.000	16.000	

（イ）

ハ長調(平均律)		整数倍音							レと協和
音階名	音階比率	2	3	4	5	6	7	8	する音階
レ	1.122	2.245	3.367	4.490	5.612	6.735	7.857	8.980	レ
ミ	1.260	2.520	3.780	5.040	6.300	7.560	8.819	10.079	
ファ	1.335	2.670	4.005	5.339	6.674	8.009	9.344	10.679	*ファ
ソ	1.498	2.997	4.495	5.993	7.492	8.990	10.488	11.986	*ソ
ラ	1.682	3.364	5.045	6.727	8.409	10.091	11.773	13.454	*ラ
シ	1.888	3.775	5.663	7.551	9.439	11.326	13.214	15.102	*シ
ド	2.000	4.000	6.000	8.000	10.000	12.000	14.000	16.000	
レ	2.245	4.490	6.735	8.980	11.225	13.470	15.714	17.959	

（ウ）

ハ長調(平均律)		整数倍音							ミと協和
音階名	音階比率	2	3	4	5	6	7	8	する音階
ミ	1.260	2.520	3.780	5.040	6.300	7.560	8.819	10.079	ミ
ファ	1.335	2.670	4.005	5.339	6.674	8.009	9.344	10.679	
ソ	1.498	2.997	4.495	5.993	7.492	8.990	10.488	11.986	*ソ
ラ	1.682	3.364	5.045	6.727	8.409	10.091	11.773	13.454	*ラ
シ	1.888	3.775	5.663	7.551	9.439	11.326	13.214	15.102	*シ
ド	2.000	4.000	6.000	8.000	10.000	12.000	14.000	16.000	*ド
レ	2.245	4.490	6.735	8.980	11.225	13.470	15.714	17.959	
ミ	2.520	5.040	7.560	10.079	12.599	15.119	17.639	20.159	

（エ）

ハ長調(平均律)		整数倍音							ファと協和
音階名	音階比率	2	3	4	5	6	7	8	する音階
ファ	1.335	2.670	4.005	5.339	6.674	8.009	9.344	10.679	ファ
ソ	1.498	2.997	4.495	5.993	7.492	8.990	10.488	11.986	
ラ	1.682	3.364	5.045	6.727	8.409	10.091	11.773	13.454	*ラ
シ	1.888	3.775	5.663	7.551	9.439	11.326	13.214	15.102	*シ
ド	2.000	4.000	6.000	8.000	10.000	12.000	14.000	16.000	*ド
レ	2.245	4.490	6.735	8.980	11.225	13.470	15.714	17.959	*レ
ミ	2.520	5.040	7.560	10.079	12.599	15.119	17.639	20.159	
ファ	2.670	5.339	8.009	10.679	13.348	16.018	18.688	21.357	

（オ）

ハ長調(平均律)		整数倍音							ソと協和
音階名	音階比率	2	3	4	5	6	7	8	する音階
ソ	1.498	2.997	4.495	5.993	7.492	8.990	10.488	11.986	ソ
ラ	1.682	3.364	5.045	6.727	8.409	10.091	11.773	13.454	
シ	1.888	3.775	5.663	7.551	9.439	11.326	13.214	15.102	*シ
ド	2.000	4.000	6.000	8.000	10.000	12.000	14.000	16.000	*ド
レ	2.245	4.490	6.735	8.980	11.225	13.470	15.714	17.959	*レ
ミ	2.520	5.040	7.560	10.079	12.599	15.119	17.639	20.159	*ミ
ファ	2.670	5.339	8.009	10.679	13.348	16.018	18.688	21.357	
ソ	2.997	5.993	8.990	11.986	14.983	17.980	20.976	23.973	

（カ）

ハ長調(平均律)		整数倍音							ラと協和
音階名	音階比率	2	3	4	5	6	7	8	する音階
ラ	1.682	3.364	5.045	6.727	8.409	10.091	11.773	13.454	ラ
シ	1.888	3.775	5.663	7.551	9.439	11.326	13.214	15.102	
ド	2.000	4.000	6.000	8.000	10.000	12.000	14.000	16.000	*ド
レ	2.245	4.490	6.735	8.980	11.225	13.470	15.714	17.959	*レ
ミ	2.520	5.040	7.560	10.079	12.599	15.119	17.639	20.159	*ミ
ファ	2.670	5.339	8.009	10.679	13.348	16.018	18.688	21.357	*ファ
ソ	2.997	5.993	8.990	11.986	14.983	17.980	20.976	23.973	
ラ	3.364	6.727	10.091	13.454	16.818	20.182	23.545	26.909	

（キ）

ハ長調(平均律)		整数倍音							シと協和
音階名	音階比率	2	3	4	5	6	7	8	する音階
シ	1.888	3.775	5.663	7.551	9.439	11.326	13.214	15.102	シ
ド	2.000	4.000	6.000	8.000	10.000	12.000	14.000	16.000	
レ	2.245	4.490	6.735	8.980	11.225	13.470	15.714	17.959	*レ
ミ	2.520	5.040	7.560	10.079	12.599	15.119	17.639	20.159	*ミ
ファ	2.670	5.339	8.009	10.679	13.348	16.018	18.688	21.357	*ファ
ソ	2.997	5.993	8.990	11.986	14.983	17.980	20.976	23.973	*ソ
ラ	3.364	6.727	10.091	13.454	16.818	20.182	23.545	26.909	
シ	3.775	7.551	11.326	15.102	18.877	22.653	26.428	30.204	

付録1表4　各音階の倍音の関係
ド、レ、ミなど各音階を基準に表を作った。基準となる音階名の倍音と協和する倍音を持つ音階名を右の列にまとめた。両者が少し異なる数字も一致すると判定している場合は、両者の間の違いは1.4865%以下であることを判定基準としている。各音階はすぐ下と上の音階以外と協和することがわかる。

音階名	倍音が協和する音階名	協和しない音階名	作れる和音	和音番号
ド	ミ、ファ、ソ、ラ	レ、シ	ドミソ、ドミラ、ドファラ	Ⅰ、Ⅵ、Ⅳ
レ	ファ、ソ、ラ、シ	ミ、ド	レファラ、レファシ、レソシ	Ⅱ、Ⅶ、Ⅴ
ミ	ソ、ラ、シ、ド	ファ、レ	ミソシ、ミソド、ミラド	Ⅲ、Ⅰ、Ⅵ
ファ	ラ、シ、ド、レ	ソ、ミ	ファラド、ファラレ、ファシレ	Ⅳ、Ⅱ、Ⅶ
ソ	シ、ド、レ、ミ	ラ、ファ	ソシレ、ソシミ、ソドミ	Ⅴ、Ⅲ、Ⅰ
ラ	ド、レ、ミ、ファ	シ、ソ	ラドミ、ラドファ、ラレファ	Ⅵ、Ⅳ、Ⅱ
シ	レ、ミ、ファ、ソ	ド、ラ	シレファ、シレソ、シミソ	Ⅶ、Ⅴ、Ⅲ

付録1表5　倍音の協和から導いた和音の種類
　音階名ドの場合その倍音が協和する音階名はミ、ファ、ソ、ラの4つで、レとシは協和しない。そこでこの組み合わせで3和音を作ることを考えると、ドミファとかドファソも考えられるが、ミはファと協和しないまたファはソと協和しないので、結局作れる3和音は、ドミソ、ドミラ.ドファラの3種類に限定される。ドミラはラドミと同じ、同様にドファラもファラドとおなじ組み合わせである。この組み合わせで和音番号を考えるとすべての和音番号が3回ずつ出てくる。

それぞれの表の右の列にまとめた協和する音階をさらに抜き出してまとめたのが付録 1 表 5 です。

　ドは内包するどれかの倍音が、ミ、ファ、ソ、ラのどれかの倍音とあいます。ドは、すぐ隣のレとシには協和しません。そこでこの組み合わせで無理に 3 和音を作ろうとすると、ドミファ、ドファソ、ドソラなどができます。ところが、ミはすぐ隣のファとは協和しません。ファはすぐ隣のミ、ソとは協和しませんので、結局ドと 3 和音が作れるのは、ドミソ、ドミラ、ドファラの 3 種類の 3 和音しかできません。これらを「作れる和音」の列に掲げました。最後にその「和音番号」を書き出しました。

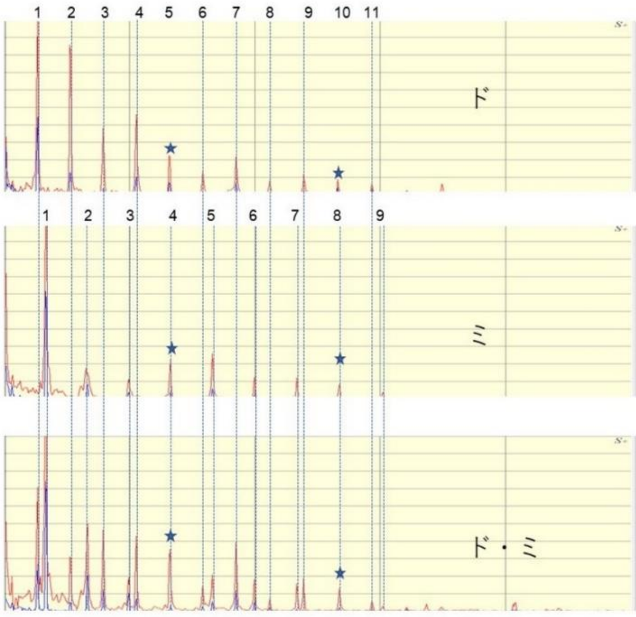
　この最後の「和音番号」を見ると、付録 1 図 1 で示した和音がすべて出てくることがわかります。つまり、和声学の基本の 3 和音はすべて弦の整数倍音の協和という考え方で説明できます。

3　目で見る和音

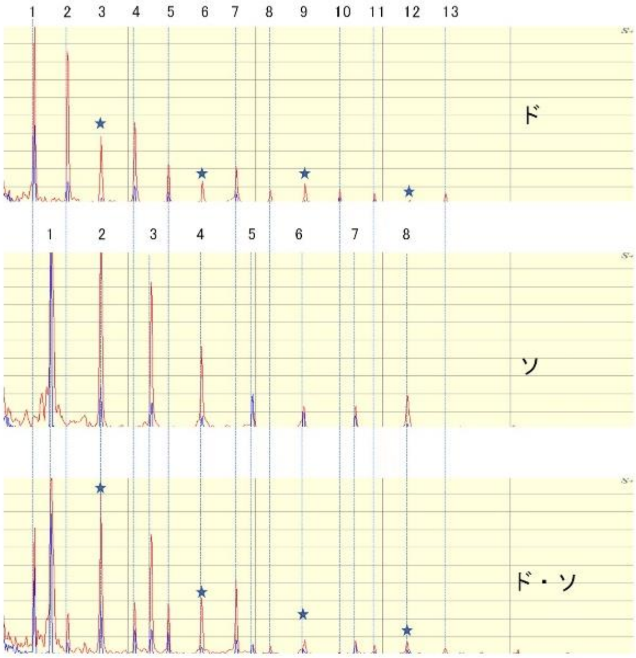
　第 1 章の図 1－5 では、ピアノの一音のフーリエスペクトルをお見せしました。それでは、2 音を同時にピアノで弾くとどうなるのでしょうか? 付録 1 図 2 を見てください。ド（図 2 上）とミ（中図）別々に弾いたときと、同時に弾いたとき（下図）のスペクトルを３つ示しました。ドの基音の振動数は 261.6 Hz、ミの基音の振動数は 329.6 Hz です。それぞれに 10 以上の倍音のピークが出ていることが分かります。ド

とミを同時に弾くとそれらのピークが重なっています（付録図 2 下図）。ドとミのピークにそれぞれ破線をつけて下の図の 2 音を同時に弾いたときのピークとの対応を示しました。これを見ると、星印を付けたどの 5 倍音と 10 倍音はミの 4 と 8 倍音に重なっています。

ドとソを弾くと付録 1 図 3 のようになります。今度は、ドの 3、6、9、12 倍音がソの 2、4、6、8 倍音と一致しています。一致するピークに星印をつけました。ミのときより、ソの音を同時に弾いたほうが倍音の一致の数が多くなっています。これも五線譜に書くと付録 1 図 4 のようになります。ソは、6 倍音まで書くとソ・ソ・レ・ソ・シ・レとなります。　そこで、ドとソを同時に弾くと唯一不協和になりそうなところは、ドの 4 倍音（C5）とソの 3 倍音のレと近いところの 1 か所だけです。ド、ミの場合は 2 か所です。ところが、ドとレでは 4 か所です。



付録1図2　ドとミを別々に弾いたときと同時に弾いたときのスペクトル。
縦軸は音の強度。数字はピークの番号でもありまた倍音列の番号も示す。
ドのピークにつけた星印は、ミのピークと一致するもの



付録1図3　ドとソを別々に弾いたときと、同時に弾いたときのスペクトル
縦軸は音の強度。数字はピークの番号でもありまた倍音列の番号も示す。
ドのピークにつけた星印は、ソのピークと一致するもの

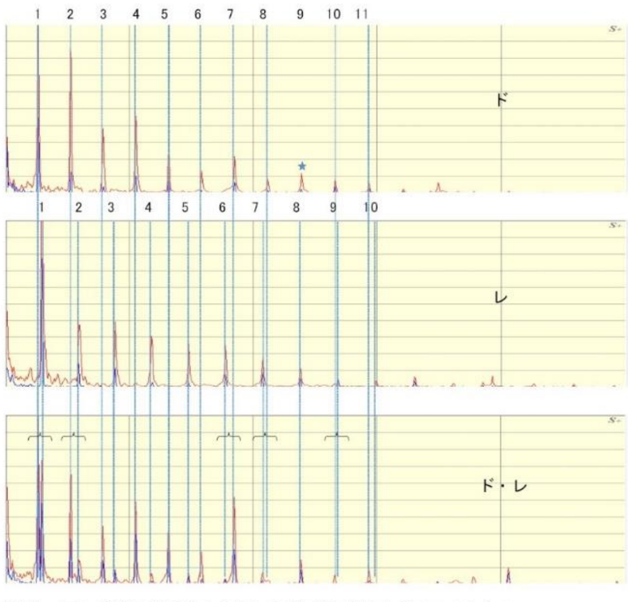
付録1図４　五線譜上で表したド、レ、ミ、ソの倍音を含めた協和の例
ドとミあるいはドとソではその倍音を重ねても倍音列同士は余り重ならないが、ドとレでは多くが重なる。

最後に、私たちには不協和に聞こえるドとレを弾いたときの様子を、スペクトルでなく、五線譜の上で説明しましょう。付録 1 図 4 を見て下さい。まずドを C3 から始めます。基音は全音符で書きました。倍音列は四分音符で書いています。6 倍音まで書きました。ドとミは 6 倍音までに 2 か所半もしくは全音の関係があります。ドとソは 1 か所です。ところがドとレは半音が 4 か

所もあります。

ドとレの関係のスペクトルを付録 1 図 5 に示しました。ドとレの間隔は狭いことが分かります。倍音の一致を見ても一致するのはドの 9 倍音がレの 8 倍音に一致する 1 か所のみです。不協和は、2 音が近づいているときに大きくなります。半音あるいは、全音あいている 2 音がそれに当たります。最初の基音同士であるドとレも不協和を与えますし、その 2 倍音のドとレも不協和です。さらに 3 倍音のソとラ、4 倍音のドとレ、また 5 倍音のミとファ#、6 倍音のソとラも不協和です。つまり、どの 6 倍までの倍音列をとっても不協和ばかりとなります。

この付録 1 図 2～5 は、ドがミやソと協和し、レと協和しないことの原因を示していると考えられます。また、特に付録 1 図 3 をみると、ソの倍音はどれもドの倍音列のちょうど真ん中に位置するか、一致するかになっており、ドの倍音のピークのそばには近づいていません。しかし、レの場合はレの基音、2 倍音および 7、9 倍音はドの



付録1　図5　隣り合うドとレを別々及び同時に弾いた時のスペクトル
縦軸は音の強度、横軸は音の高さ。数字はピークの番号。ドの9倍音がレの8倍音と唯一合うので星印を付けた。 で示したところはドの倍音とレの倍音が近いところ。

倍音列に非常に近いけれど一致していません。この倍音列の位置関係も、協和の度合いに大きな影響を与えているようです。このことを数字で表せることに気づいたのがヘルムホルツです。彼は不快さを不協和度という概念で数値化しました。

しかし、もともとドレミの音階は互いに協和する音階として決定されたはずです。ドとレが合わないと簡単に言っていいのでしょうか？　隣同士では近すぎて合いませんが、ドと 1 オクターブ上のレとは合います。シも隣のドとは合いませんが、1 オクターブ上のシは下のドと合います。

参考文献

ジャン・ル・ロル・ダランベール（2013)「ラモー氏の原理に基づく音楽理論と実践の基礎」、（片山千佳子・安川智子・関本菜穂子訳、春秋社）

片山千佳子・関本菜穂子・安川智子（2009）ダランベール著『ラモー氏による理論的・実践的音楽の基礎原理』に関する考察、東京藝術大学音楽部　紀要　34：17-38.

Abbott, A. （2002）　Neurobiology; Music, maestro, please!, Nature 46:12-14.

Ball, P. （2010）　音楽の科学－音楽の何に魅せられるのか？－（夏目大訳）河出書房

Chrtistensen, T. （1993）　Rameau and Musical Thought in the Enlightenment, Cambridge Studies in Music Theory and Analysis.

Weinberger, N. M.（2005）脳を揺さぶる音楽、日経サイエンス 2005 年 3 月号.

付録 2

円盤ポリゴノーラの振動様式

下の表１に周辺自由振動の円盤の振動様式と出る音の高さの理論値を比で示しました。

これは円盤のすべての振動の様子をもとに、完全に理論からでる数字です。この表は（0　1）の振動様式から出る音の高さ（振動数）を 1.000 としたときの、ほかの振動様式から出てくる音（振動数）を比で示しています。

１次元の弦の振動は簡単に目で確認することもできますが、2 次元の面の振動を目で見るには少し工夫が必要です。しかし、弦と同じように、2 次元の物体もたたくと、その平面から、いろいろな音が同時に出ていることは同じです。しかも、その比は非整数です。

	ドーナツ節線										
ピザ節線	m = 0	m = 1	m = 2	m = 3	m = 4	m = 5	m = 6	m = 7	m = 8	m = 9	m = 10
n = 0	―	1.000	4.231	9.642	17.222	26.969	38.883	52.963	69.210	87.623	108.203
n = 1	―	2.216	6.545	13.043	21.708	32.540	45.537	60.702	78.032	97.529	119.193
n = 2	0.779	3.726	9.159	16.750	26.503	38.421	52.505	68.754	87.169	107.751	130.498
n = 3	1.499	5.514	12.069	20.760	31.606	44.613	59.784	77.120	96.621	118.287	142.119
n = 4	2.437	7.574	15.270	25.069	37.013	51.113	67.374	85.797	106.385	129.137	154.055
n = 5	3.594	9.899	18.757	29.675	42.722	57.918	75.272	94.785	116.461	140.301	166.305
n = 6	4.969	12.487	22.525	34.572	48.730	65.027	83.475	104.081	126.847	151.776	178.867
n = 7	6.564	15.334	26.572	39.759	55.033	72.435	91.983	113.683	137.542	163.560	191.741
n = 8	8.377	18.437	30.894	45.231	61.629	80.142	100.792	123.590	148.543	175.654	204.925
n = 9	10.410	21.795	35.488	50.987	68.516	88.144	109.901	133.800	159.849	188.054	218.417

付録2　表1　周辺が固定されていない円盤の共鳴振動数の理論比率
　ｎはピザモードの接戦の数、ｍはドーナツモードの輪線の数を表す。ｎ＝0、ｍ＝1の値を1.000とした場合のそのほかの振動比率を示している。

本書の図 3－4 で、出てくるピークを例に説明します。円盤の中心をたたくと一番低い音は 248　Hz の音です。これを基音とします。その上にある非整数倍音の主要なピークは 1035、1609、2270、2348　Hz です。これらのピークの振動数と基音の振動数の比を計算し、理論値と比べると表 2 のようになります。

付録2　表2　円盤振動数の実測値と計算値

実測値 (Hz)	実測値 (比)	計算値 (比)	様式 (n　m)
248	1.000	1.000	(0　1)
1035	4.173	4.231	(0　2)
1609	6.488	6.545	(1　2)
2270	9.153	9.159	(2　2)
2348	9.468	9.642	(0　3)
3174	12.798	12.069	(3　2)
3784	15.258	15.270	(4　2)
4176	16.839	17.222	(0　4)

1035 Hz の音は基音 248 Hz の 4.173 倍で、表 3－2 に示した（0　2）様式の理論値の 4.231 と近く、1035 Hz の振動は（0　2）の様式で振動していることが推定されます。実際、円盤に 1035 Hz の振動を与えクラドニの図形を描かせると（0　2）様式の模様（円の節が 2 つ）が現れます。上で推定された様式はすべて観察された振動数を円盤に与えてクラドニ図形を描かせると、予想どおりになりました。理論値と観測値が近いことから、円盤の振動様式が科学的に完全に理解できている証拠となります。

ポリゴノーラの中心をたたいた時の様式を表にまとめました[付録 2　表 3（左)]。

付録2　表3 円盤のポリゴノーラの中心と橋をたたいた時に出る振動様式の違い

中心をたたいた時

··	0	1	2	3	4
0		0 1	0 2	0 3	0 4
1			1 2		
2			2 2		
3			3 2		
4			4 2		
5					
6					
7					
8					

端をたたいた時

··	0	1	2	3
0		0 1	0 2	0 3
1		1 1	1 2	1 3
2	2 0	2 1	2 2	2 3
3	3 0	3 1	3 2	
4	4 0	4 1	4 2	
5	5 0	5 1	5 2	
6	6 0	6 1	6 2	
7	7 0	7 1		
8	8 0	8 1		

つまり、248、1035、2348、4176 Hz の音は、様式で言うと（0　1)、(0　2)、(0　3)、(0　4）です。円の節が、「1、2、3、4 本」とでる様式で、ピザ線がほとんど現れません。ドーナツ様式の振動が多く見られる音がします。これは円盤の中心をたたいたからです。

しかし、中心から 3／4 のところをたたくと、また違った音が出ます（付録 2　表 3、右)。ドーナツが 0 個の振動（n　0）がたくさんでています。左の表と比べると、縦の列が長くなっていることでわかります。これは、ピザの線がたくさん出ていることにほかなりません。中心をたたくとドーナツ主流の音色が、中心から 3／4 のところをたたくとピザ主流の音が出ます。

もう一度、中心をたたいたときにこの円盤が出す音を表 2 で見てみます。248 Hz を基音として、4176 Hz まで出ています。248 Hz とは平均律で言うとシに当たります。1035 Hz は 2 オクターブ上のド、1609 Hz はソ、2270 Hz と 2348 Hz は両方ともレに相当します。もしこの音をピアノで弾くと非常に不協和な音がします。ところが円盤で聞くと、各倍音は互いに全く不協和ではありません。整数倍音を出すピアノでは不協和な音の組み合わせが、円盤なら協和する音になります。

付録 3

不協和度曲線

1　ヘルムホルツの発明と洞察

付録 1 で説明しましたように、2 つ以上の音が協和するかどうかは、ある音が発生する倍音列が別の音の発生する倍音列と、どれだけ一致するかで決まりそうです。これに最初に気づいたのは、ヘルマン・L・F・ヘルムホルツ（H. L. F. Helmholtz，1821～1894）であると思われます。彼が調べた倍音列は、整数倍です。1 次元の弦の整数倍音を基礎にしました。

ヘルムホルツは「On the Sensations of Tone（1885)」という本の最初にまず、ド（彼は最初のドの基音を 66 Hz にとっています）の基音から 16 倍音までを五線譜に書いています。第 1 章の図 1−6 を再掲しました（付録 3　図 1)。

最初から書き出すと、8 倍音までは

1　2　3　4　5　6　7　8

ド、ド、ソ、ド、ミ、ソ、シ♭、ド

ところが 9 倍音からは

9　10　11　12　13　14　15　16

レ、ミ、ファ―ファ#、ソ、　ソ#―ラ、シ♭、シ、ド

となり、あいまいな音程（7，11，13，14 倍音）も含まれます。

付録3　図１　ヘルムホルツの著者に載っている倍音列の五線譜への記載
66Hzのドから4オクターブ上のドまで記載されている。下の音階名についている星印は平均律と少しずれていることを示す。音符の左についている斜めの棒で、右下がりは音符より少し低い場合、右上がりは音符より少し高いことを示す。

オーストリアの作曲家リヒャルト・シュトラウス(1864～1949)は、1894 年に『ツァラトゥストラはかく語りき』という曲を作りました。この曲の冒頭は上に挙げた「ド・ド・ソ・ド・ミ」の音階から始まります。『ツァラトゥストラはかく語りき』はニーチェの著作であり、「神は死んだ」という思想を語ったものです。私には、リヒャルト・シュトラウスが、「ドレミは死んだ」と言っているように聞こえます。つまり、ドレミを使ってもう曲が書けない、と。

さて、付録 1 で示したように、ドをミやソと同時に弾くとその各倍音のどこかで互いに一致し、倍音列同士があまり近づかないので協和しています。一方、ドとレを同時に弾くと一致する倍音列が 1 か所しかなく、また互いの倍音列がかなり近接するところが何か所も出てきます。ドとド＃ではもっと不快です。

2 つの音が少しだけ離れると唸りが生じて不快度がまし、2 つの音が徐々に離れるにしたがってさらに不快度が上昇するが、ある程度離れると不快度は減少します。

“唸り”とは異なる音の周波数の差で生じるものです。440 Hz と 441 Hz の音を同時に鳴らすと、1 秒間に 1 回の唸りが聞こえます。唸りとは、音が大きくなったり小さくなったりすることです。1 秒間に 1 回これが起こるくらいならまだよいのですが、440 Hz と 445 Hz を同時に鳴らすと、1 秒間に 5 回唸りが聞こえ、頭がおかしくなるほど耳障りに聞こえます。実際にヴァイオリンのような弦楽器で 2 つの音を同時に鳴らすと、いろいろな倍音が発生しています。例えば 440 Hz の基音に対して 880, 1320 Hz などの倍音が同時に発生しています。この音と 445 Hz の音を同時にヴァイオリンで鳴らすと、440 Hz に対する 445 Hz では、毎秒 5 回の唸りが、2 倍音の 880 Hz に対する 890 Hz では毎秒 10 回の、そして 3 倍音の 1320 Hz に対する 1335 Hz では毎秒 15 回の唸りが発生します。つまり、毎秒 5 回、10 回、15 回の唸りが混ざって聞こえ、大変耳障りになります。440 Hz と 460 Hz を同時に鳴らすとまるでサッカーのレフェリーが笛を吹いているようなびりびりした感じがします。ところが、片方が 500 Hz 位まで離れると、少しましになってきます。基音は 440 Hz で、比べる音が 500 Hz なら 1 秒間に実は 60 回の唸りが聞こえているはずなのですが、それがあまり耳障りでなくなってきます。440 Hz と 500 Hz の 2 倍音同士では 880 Hz と 1000 Hz なので、

その差 120 Hz の唸りが聞こえるはずです。3 倍音同士では 1320 Hz と 1500 Hz なので、その差はさらに広がり 180 Hz となります。つまり 440Hz と 500Hz を同時に聞くとまず唸りは、毎秒 60 回の唸りが、それ以上の倍音同士ではその 2 倍（120 回)、3 倍（180 回）の唸りが聞こえているはずですが、もうあまり耳障りではなくなっています。つまり 2 つの音の間隔と人の感じる不快度にはある関係があるらしいのです。

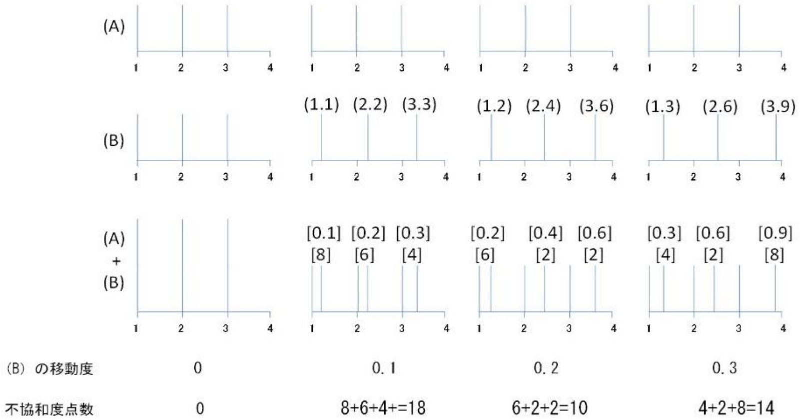
この問題にちゃんと答えたのは、Promp と Levert（1965） です。彼らは多くの研究者が発表した結果を使って 2 つの音で生じる不快度をある関係式にまとめました。不快度を式で表すことに特別の意味があったわけではないのですが、一度この不快度を式で表すことに成功すると、不協和度を数字で評価することができます。この計算は多くの足し算を使うので、人の手で計算するのは大変ですが、現在ではコンピュータにやらせると簡単に済みます。

ヘルムホルツの本では彼は「不協和度を計算してみた」と書いていますが、本当に全部やってみたかどうかはわかりません。しかし、全部計算しなくとも、彼は素晴らしい直観と洞察力でこの計算を行うとどんな結果になるかを見抜いたのでしょう。

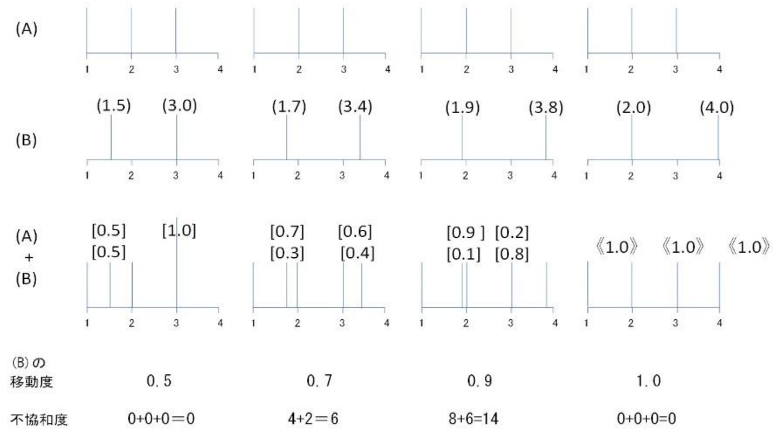
次に不協和度の計算の考え方を説明しましょう。

２　不協和度計算

付録 3 図 2（ア）を見てください。まず 1 つの音（A）を考えます。この音は基音と 2 倍音と 3 倍音だけを倍音列として持っているとします。次に（B）という音を考え、（A）と（B）を同時に鳴らすことを考えます。(A) はずっと固定したままですが、(B) の音は少しずつ上げていくことにします。最初は、2 つの音が全く同じ音程からスタートし、その時の不協和度は 0 とします（図 2)。2 つの音は全く同じ音ですので、1 つの音として聞こえます。



付録3 図2(ア) 2っの音(A)、(B)を同時に鳴らした時の不協和度の計算



付録3 図 2(イ) 2っの音を同時に鳴らした時の不協和度の計算
(ア)では(A)の音を固定したまま、(B)の音を0.1、0.2、0.3つまり10%、20%、30%高く動かしながらその不協和度を計算した。(イ)では(B)の音を(A)よりも50%、70%、90%、そして100%すなわち(A)の1オクターブ上まで動かした。

さて(B)の音を1オクターブあげた場合を考えましょう。この場合は図2(イ)のもっとも右端のグラフに示しました。

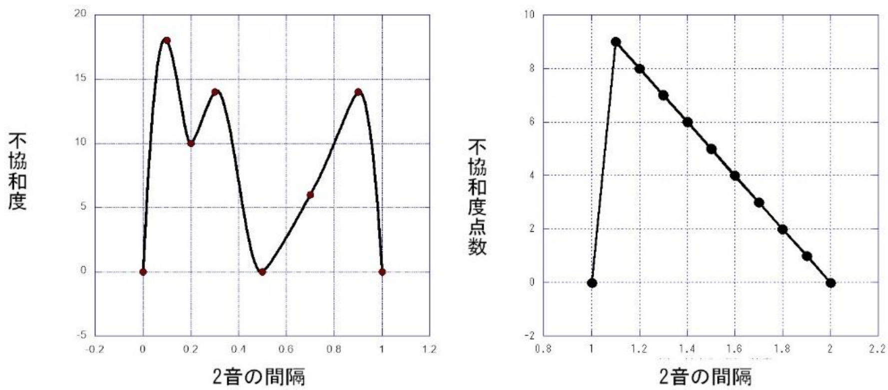
この場合、(A)の2倍音と(B)の基音が完全に一致するので唸りが生じません。つまり(A)と(B)の音が同じ整数倍の倍音を持っている場合は(A)と(B)が1オクターブ離れると、不協和度は0になるのです。しかしその間では不協和度は不思議な動きをします。まず(B)の音が10%高くなったとします。つまりBの倍音はすべ

て1.1倍になります（図2（ア））。基音が1.1、2倍音は2.2、3倍音は3.3になります。これを同時に鳴らした場合を一番下の列に重ねて並べました。すると、(A)の音の倍音列と、新しい(B)の倍音列が並びます。その間隔は左から0.1、0.2、0.3となります。

ここで次のように仮定します。

二つの音が0.1で並んでいる場合は大変2音が近いので、不協和度を8点とし、0.2なら6点，0.3なら4点、0.4なら2点とだんだんと下げ、0.5以上離れると耳障りではなくなるとして0点とします。また、1.0つまり1オクターブ離れると不協和度は0点です。A音とB音の2本の倍音列の間隔に応じて点数が出ますのでそれを全部足します。(B)を(A)に対して1.1倍上げた場合、この点数の合計は18点になりました。(B)が1.2倍になると不協和度は10点に、1.3倍になると14点になりました。これを続けていくと図3左が得られます。

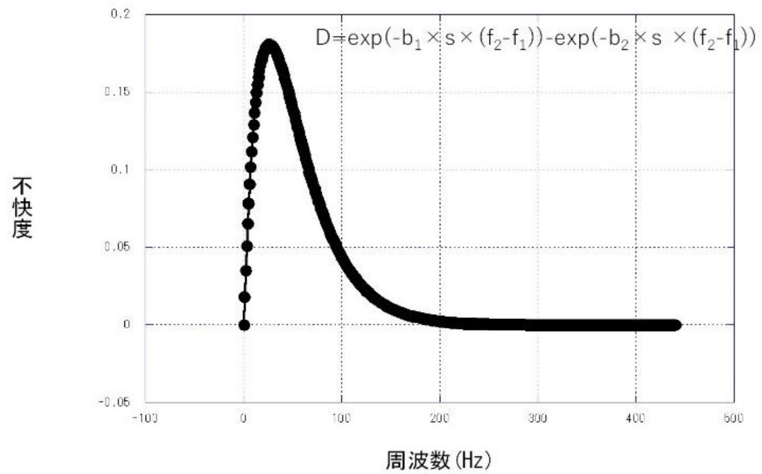
このグラフを書くために仮定した不快度の点数のグラフを下の図3右に掲げました。音が1.1倍すなわち10%離れたときに8点、1.2倍すなわち20%離れたときに6点という任意に作った不快度のグラフです。



付録3　図3　不協和度曲線の例
左図は整数倍音1.2.3を持つ二つの音を同時に鳴らしたときの不協和度曲線。横軸は（B）の音の（A)に対する比率、縦軸は不協和度の強さを表す。
右図は左図の不協和度を計算するために使った不協和の点数を示す仮想的なグラフ。

以上のようにして作った 2 音の間隔と不協和度の関係をグラフにすると図 3 の左が得られます。これを見ると、2 つの音が 0.1 離れると大変不協和度が高くなっています。しかし、(B) の音が (A) の 1.5 倍になった時、不協和度は 0 になります。不協和度が低い、という事は協和度が高いということです。ソ（ドの 1.5 倍の音）の不協和度が低いことがここでも出ています。つまりこの簡単なグラフからでも、ドとソが協和することがわかります。同じ理屈で、2.0 の時にも 0 になっていますが、これは A の 1 オクターブ高いドと B の基音が協和するからです。

付録 3　図 3 では 2 つの音を同時に鳴らした時の不快度を適当に頭で考えて作りましたが、実際に人の耳で聞いた時の不快度を曲線にし、それを数式で表したのが最初に述べた Promp と Levert (1965) です。彼らが作った数式とその曲線を付録 3 図 4 に載せました。



付録3　図4　2つの音を同時に鳴らした時の人の耳に対する不快度を表すグラフと式
D；不快度；b_1, b_2；定数(b_1 =3.5, b_2=5.75)；s=((0.24/(0.021×f_1+19))；f、用いる2つの音の周波数。f_1には440Hzを用いた。グラフはf_1の1オクターブ上の音（880Hz）まで2つ目の音を少しずつ離しながら計算をして描いた。

不協和度は、人間の耳が判断するので、その基本は人の感じ方を数式にすることが基本となります。Prompt と Levelt（1965）は多くの研究者が得た結果をまとめて次のような式を提案しました。

$$d(x) = e^{\{-b_1 \times s \times (f_2 - f_1)\}} - e^{\{-b_2 \times s \times (f_2 - f_1)\}}$$

d（x）は不協和度の度合いを示す値です。この式の中にある多くの係数は次のように定義されています。

$b_1 = 3.5$

$b_2 = 5.75$

f_1＝1 番目の音の振動数

f_2＝2 番目の音の振動数（不協和度を調べたい音）

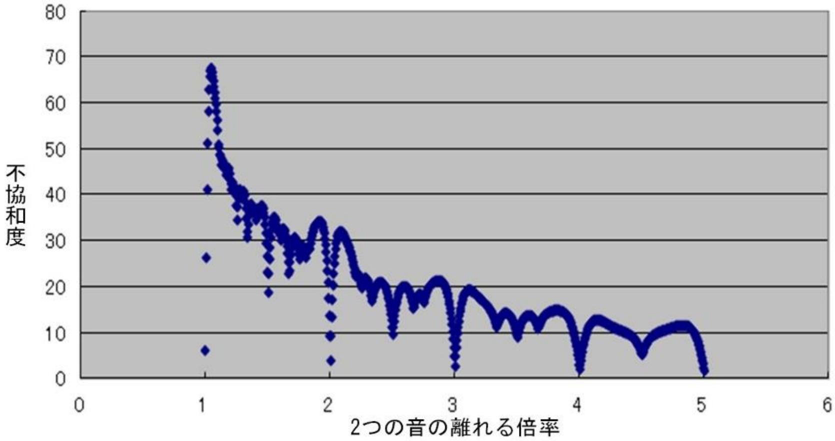
$$s = \frac{x^*}{s_1 \times f_1 + s_2}$$

ここで、$x^* = 0.24$、$s_1 = 0.0207$、$s_2 = 18.96$

これら係数に代入されている数字は、人の感覚を心理学的実験を元に決めた数字です。f_1を固定して、f_2をだんだん離していくと d（x）の値がどのように変化するかをグラフにすると、不協和度曲線ができます。ただしこの場合、f_1とf_2は両者ともある単一の振動数だけの正弦波で、倍音を一つも持たないことが前提です。

付録 3 図 4 で例示した時に用いた不快度のグラフに比べると式はずいぶん複雑ではありますが、曲線は滑らかになっています。このグラフの作られた原理は図 4 のグラフと一緒で、同時に弾く 2 つの音が少し離れたときが最も不快度が高く、離れるにしたがって不快度は減少し、1 オクターブ離れたところでは、不協和度は 0 に達します。

もし、ひとつの音にたくさんの倍音が同時に含まれているなら、それらも不協和度として足しこまねばなりません。このように、2 つの音がそれぞれ、任意の倍音



付録3　図5　整数倍音を持つ2つの音を同時に鳴らした時の不協和度曲線。横軸の2と4はそれぞれ１オクターブ、2オクターブ上の音を示す。

を持っていても、それを入力すれば、不協和度を自動的に計算してくれるプログラムが提供されています（Sethares、 2005)。

そこで、人の感性に基づいた不快度曲線を用いて、整数倍音を 11 まで持っている 2 つの音を同時に鳴らした時の不協和度をコンピュータで計算してグラフに描いたのが付録 3 図 5 です。細かいところは見えにくいかもしれませんが、横軸が 1 から始まっており、2 つの音の片方の音［前の例では（A）の音］に対する比をあらわしています。このグラフでは（B）を（A）の 5 倍上まで移動したときの計算結果を示しています。2 つ目の音［(B）の音］を少しずつ上げて（A）から離していくと、すぐに不協和度は上がります。しかしその後所々で、鋭く落ち込む谷が見えます。谷というのは上でも述べたように不協和度が低い、つまり協和しているということです。たとえば、1.5 のところと 2.0 のところに鋭い谷が見えますが、1.5 はソを表し、2.0 は 1 オクターブ高いドの音を示しています。ヘルムホルツの本では 1.5 倍のソと 1 オクターブ上のドで、不協和度が共に 0 になる図が書いていありますが、Promp と Levert（1965）の作った式で計算すると、1.5 倍のソの不協和度は完全には 0 にはなりません。このグラフをみると、その他にも小さな谷が見えます。これらをまとめたものを次の付録 3 表 1 に示しました。

３　音階と不協和度曲線の関係

付録 3 表 1 では、谷を示すところの比が 26 個あげられています。その右に各比に最も近い純正律と平均律の比を載せました。最後の列には音階名を載せました。これを見るとド#以外のすべての音階が不協和度曲線の谷の比を抜き出すだけで出てくることがわかります。つまり、ある音についてそれに伴う整数倍音列を考慮に入れて不協和度曲線を作ると、不協和度の低い谷の比を抜き出すだけで、ほぼドレミの音階のすべてが自動的に求まるということです。

付録３　表１　付録３図５の不協和度曲線の谷の比率に対応する平均律と純正律の比率と音階

番号	谷比率	純正律	平均律	音階
1	1.000	1.000	1.000	ド
2	1.125	1.125	1.122	レ
3	1.200	1.200	1.189	レ#
4	1.250	1.250	1.260	ミ
5	1.333	1.333	1.335	ファ
6	1.400	1.406	1.414	ファ#
7	1.500	1.500	1.498	ソ
8	1.600	1.600	1.587	ソ#
9	1.667	1.667	1.682	ラ
10	1.750	1.800	1.782	ラ#
11	1.800	1.800	1.782	ラ#
12	1.834	1.875	1.888	シ
13	2.000	2.000	2.000	ド
14	2.202	2.250	2.245	レ
15	2.251	2.250	2.245	レ
16	2.333	2.400	2.378	レ#
17	2.500	2.500	2.520	ミ
18	2.667	2.667	2.670	ファ
19	2.750	2.812	2.828	ファ#
20	3.000	3.000	2.997	ソ
21	3.334	3.334	3.364	ラ
22	3.500	3.600	3.564	ラ#
23	3.667	3.750	3.776	シ
24	4.000	4.000	4.000	ド
25	4.500	4.500	4.490	レ
26	5.000	5.000	5.040	ミ

逆に言うと、人類が長い間かかって作った音階は、各音階が基音（この場合ド）と、協和するところに定められている、と言えます。付録 3 表 1 をよく見ると、不協和度曲線の谷間の比は、平均律の比より、純正律の比と一致するものが多いことに気付きます。しかし、和音や転調では純正律に不具合が出てきます。

1 次元の弦の振動にはもともと整数倍音が含まれているので、2 つの音を同時に鳴らすと、各倍音列が互いに干渉しあいます。この 2 つの音を少しずつ離していくと、倍音列がうまく重なって耳障りでないところが出てくる。その耳障りでないところを音階にして音楽を作るので、心地よい音楽が作れるのではないかと思います。つまりこのようにしてできた音階の音を組み合わせて旋律や和音を作って音楽を作ると、人の心に美しく響くのではないでしょうか。ドレミの音階は長い年月をかけてできまし

た。ドレミの音階は整数の倍音列を基に、人の感覚で淘汰され無意識的にできたのかもしれません。これを最も再現しているのが純正律だと思われますが、結局転調の問題が出てきて、平均律が西洋音楽では採用されて普及し、日本にも明治以降に持ち込まれ広まりました。

参考文献

小方厚　（2007）　音律と音階の科学　（ブルーバックス）

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

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

Sethares, W. A. （1999） Tuning, Timbre, Spectrum, Scale, Springer.

付録 4

協和度表の作り方

この本では、音階の倍音が互いに協和する程度を示すため、協和度表という表を作り説明に使っています。これを詳しく説明します。

付録 4 表 1 を見てください。

まずドとソだけの協和を見る方法を表（ア）にしました。

ドの音高を基準値として 1.000 とすると、純正律ではソの振動数はその 1.5 倍なので、1.500 となります。オクターブ上のドは振動数でちょうど 2 倍ですので 2.000 です。

最初のドの音の整数倍音を右に並べています。2、3 倍と整数倍なので、第 3 倍音までは 2.000、3.000 という数字になります。さて、ソはドのもともと 1.5 倍の高さの音なので、その音を 1.500 と表します。ソの２倍音は 1.500 の 2 倍なので 3.000、3 倍音は 4.500 です。その数字が（ア）の 2 段目に並んでいます。3 列目はオクターブ上のドなので、第 1 倍音（基音）は 2.000 で２倍音は、4.000、３倍音は 6.000 となります。この表は、倍音と音階の音高を比で入れた表計算ソフトで簡単に作れます。

（ア）

音階	第1倍音	第2倍音	第3倍音
ド	1.000	2.000	3.000
ソ	1.500	3.000	4.500
ド	2.000	4.000	6.000

（イ）

音階	第1倍音	第2倍音	第3倍音	第4倍音	第5倍音	第6倍音
ド	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000
ミ	1.250	2.500	3.750	5.000	6.250	7.500
ソ	1.500	3.000	4.500	6.000	7.500	9.000
ド	2.000	4.000	6.000	8.000	10.000	12.000

（ウ）

音階	第1倍音	第2倍音	第3倍音	第4倍音	第5倍音	第6倍音	第7倍音	第8倍音	第9倍音
ド	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	9.000
レ	1.125	2.250	3.375	4.500	5.625	6.750	7.875	9.000	10.125
ミ	1.250	2.500	3.750	5.000	6.250	7.500	8.750	10.000	11.250
ファ	1.333	2.667	4.000	5.333	6.667	8.000	9.333	10.667	12.000
ソ	1.500	3.000	4.500	6.000	7.500	9.000	10.500	12.000	13.500
ラ	1.667	3.333	5.000	6.667	8.333	10.000	11.667	13.333	15.000
シ	1.875	3.750	5.625	7.500	9.375	11.250	13.125	15.000	16.875
ド	2.000	4.000	6.000	8.000	10.000	12.000	14.000	16.000	18.000

付録４　表1　純正律での協和表の考え方
（ア）、ド、ソ、ドでの協和表；（イ）、ド、ミ、ソ、ドの協和表；（ウ）、ドレミの音階での協和表。
（ア）と（イ）では同じ音階の間では同じ色調を使った。（ウ）では、少し純正律の比率から外れる数字を白抜きにした。

さてこの表全体を見ると、同じ数字があることに気づきます。たとえば、最初のドの2倍音と1オクターブ上のドの基音（1倍音）です。それだけではなく、最初のドの3倍音はソの2倍音と同じ数字（3.000）です。そこでドとソは協和するといえます。

表1の（イ）を見てください。この表では、（ア）の表にミを加えました。ミの音は純正律でいうとドの 1.250 倍です。ミを入れると、その 4 倍音は 5.000 となります。これは、最初のドの第5倍音（5.000）と同じ数字です。つまりドの5倍音とミの 4 倍音は協和します。それだけではなく、ミの 6 倍音（7.500）はソの第 5 倍音（7.500）と同じ数字となり、これらも互いに協和します。

表1の（ウ）ではドレミファソラシドの音階すべてについて表を作ってみました。この表でグレーの色についているものは、ほかのどこかに同じ数字があることを示しています。ここで、黒の背景で白抜きの数字に注目してください。ファの第7倍音とシの第5倍音です。この数字は 9.333 と 9.375 です。両者はわずかですが違います。その差は比でいうと 0.45％です。平均律で言う半音は、元の音との差が 5.95％でした。ですから 0.45％の音の違いは、半音の 10 分の 1 以下です。それで、この違いは許せる範囲として協和すると判断しました。この本ではその許容範囲は半音の 4 分の 1 以内、すなわち 1.487%以下としています。

閾値を 1.487％（半音の 1／4）にしたひとつの理由は、モーツアルトの逸話によっています（ルシェバリエ　2011)。モーツアルトは 1／4 半音を絶対音階で聞き分けられたといわれています。つまり、1／4 半音は人の耳に識別できる最小の単位と考えてもよいと思われます。

音階	第1倍音	第2倍音	第3倍音	第4倍音	第5倍音	第6倍音	第7倍音	第8倍音	第9倍音	一致数（第2倍音～第9倍音）
ド	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	9.000	7
レ	1.125	2.250	3.375	4.500	5.625	6.750	7.875	9.000	10.125	3
ミ	1.250	2.500	3.750	5.000	6.250	7.500	8.750	10.000	11.250	5
ファ	1.333	2.667	4.000	5.333	6.667	8.000	9.333	10.667	12.000	5
ソ	1.500	3.000	4.500	6.000	7.500	9.000	10.500	12.000	13.500	6
ラ	1.667	3.333	5.000	6.667	8.333	10.000	11.667	13.333	15.000	4
シ	1.875	3.750	5.625	7.500	9.375	11.250	13.125	15.000	16.875	6
ド	2.000	4.000	6.000	8.000	10.000	12.000	14.000	16.000	18.000	5
									合計	41
									割合（%）	64.1

付録４　表2　ドレミの音階（純正律）の協和度の計算

付録4 表1（ウ）の第2倍音から第9倍音までの協和度表を再掲している。右の列に一致数をまとめた。ドの倍音は7倍音を除き、2～9までどれかの音階のどれかの倍音と一致している。そこでこの位置数を7とした。この一致数をその他の音階についても合計すると41個になる。音階はドからドまで8個あり倍音2から9までは8個あるので、この表で第1倍音を除けば枠が64個のある。そのうち41個がどれかと協和しているので、協和する割合は（40／64）×100%=64.1%となる。これを協和度と定めた。

付録４表２は表１（ウ）からの協和度の求め方を示すために再掲しました。使った音階は純正律です。灰色あるいは黒色の枠がそれぞれの音階について、第２倍音から第９倍音まで41枠あります。もともとその中には64個（8音階×8倍音）の枠があり、そのうち41個の枠がどれかと協和して色がつけられているので、協和する割合が計算できます。それは、(41／64）×100（%）＝64.1%です。平均律の協和度（86%）に比べると、だいぶ下がります。

協和度は、どれだけ倍音を使うかによってまた、どこまで音階を使うかによって変わりますので、比較する場合は倍音と音階の数をそろえておく必要があります。

付録１の和音でも述べましたが、和声学がラモーによって提唱され、それをダランベールが科学的に説明しようとした試みがありました。しかし、ピアノの鍵盤にとらわれて、音程を長３度、５度、長７度など表記したことにより、音高を表す振動数から離れて議論したことが混乱を招いたような気がします。ラモーやダランベールが現在の表計算を使っていたら、もっとすっきりしたかもしれません。

参考文献

ルシェバリエ、B.　(2011)　モーツアルトの脳、(藤野邦夫、生駒忍訳）作品社

ジャン・ロン・ダランベール（1752）ラモー氏の原理の基づく音楽理論と実践の基礎（日本語訳、片山千佳子・安川智子・関本菜穂子）春秋社

付録 5

2 オクターブのドレミと 2 循環音階の協和度比較

2 オクターブ分の平均律とポリゴノーラ（混合様式）の 2 循環音階の協和度を下に 2 つの表で比較しました。両方とも同じ色の音は協和することを示しています。最初に示した平均律の協和度表では 7 倍音の列の後半が白いですが、これは平均律の特徴です。次ページに示したポリゴノーラの協和度表にはそのような傾向はみられません。

付録５　表１　平均律　２オクターブの協和度

音階番号	倍音									一致数
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	9.000	8
2	1.059	2.119	3.178	4.238	5.297	6.357	7.416	8.476	9.535	8
3	1.122	2.245	3.367	4.490	5.612	6.735	7.857	8.980	10.102	8
4	1.189	2.378	3.568	4.757	5.946	7.135	8.324	9.514	10.703	8
5	1.260	2.520	3.780	5.040	6.300	7.560	8.819	10.079	11.339	8
6	1.335	2.670	4.005	5.339	6.674	8.009	9.344	10.679	12.014	8
7	1.414	2.828	4.243	5.657	7.071	8.485	9.899	11.314	12.728	8
8	1.498	2.997	4.495	5.993	7.492	8.990	10.488	11.986	13.485	8
9	1.587	3.175	4.762	6.350	7.937	9.524	11.112	12.699	14.287	8
10	1.682	3.364	5.045	6.727	8.409	10.091	11.773	13.454	15.136	8
11	1.782	3.564	5.345	7.127	8.909	10.691	12.473	14.254	16.036	8
12	1.888	3.775	5.663	7.551	9.439	11.326	13.214	15.102	16.990	8
13	2.000	4.000	6.000	8.000	10.000	12.000	14.000	16.000	18.000	8
14	2.119	4.238	6.357	8.476	10.595	12.714	14.832	16.951	19.070	8
15	2.245	4.490	6.735	8.980	11.225	13.470	15.714	17.959	20.204	8
16	2.378	4.757	7.135	9.514	11.892	14.270	16.649	19.027	21.406	8
17	2.520	5.040	7.560	10.079	12.599	15.119	17.639	20.159	22.679	8
18	2.670	5.339	8.009	10.679	13.348	16.018	18.688	21.357	24.027	8
19	2.828	5.657	8.485	11.314	14.142	16.971	19.799	22.627	25.456	8
20	2.997	5.993	8.990	11.986	14.983	17.980	20.976	23.973	26.970	7
21	3.175	6.350	9.524	12.699	15.874	19.049	22.224	25.398	28.573	7
22	3.364	6.727	10.091	13.454	16.818	20.182	23.545	26.909	30.272	7
23	3.564	7.127	10.691	14.254	17.818	21.382	24.945	28.509	32.072	7
24	3.775	7.551	11.326	15.102	18.877	22.653	26.428	30.204	33.979	6
25	4.000	8.000	12.000	16.000	20.000	24.000	28.000	32.000	36.000	6
								協和度比率		96.00

付録５　表２　ポリゴノーラ（ピザ・ドーナツ混合様式）　２循環音階の協和度

音階番号	倍音									一致数
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	1.000	2.216	3.726	5.514	7.574	9.899	12.487	15.334	18.437	8
2	1.182	2.619	4.404	6.518	8.952	11.701	14.760	18.125	21.793	5
3	1.202	2.664	4.479	6.628	9.104	11.899	15.009	18.431	22.161	8
4	1.228	2.721	4.576	6.771	9.301	12.156	15.334	18.830	22.641	7
5	1.261	2.794	4.698	6.953	9.551	12.483	15.746	19.336	23.249	6
6	1.307	2.896	4.870	7.207	9.899	12.938	16.321	20.042	24.097	7
7	1.373	3.043	5.116	7.571	10.399	13.591	17.145	21.054	25.314	6
8	1.479	3.277	5.511	8.155	11.202	14.641	18.468	22.679	27.268	8
9	1.549	3.433	5.772	8.541	11.732	15.334	19.342	23.752	28.559	7
10	1.681	3.725	6.263	9.269	12.732	16.640	20.991	25.776	30.993	8
11	1.795	3.978	6.688	9.898	13.595	17.769	22.414	27.525	33.094	7
12	1.861	4.124	6.934	10.262	14.095	18.422	23.238	28.537	34.311	7
13	2.031	4.501	7.568	11.199	15.383	20.105	25.361	31.143	37.446	8
14	2.216	4.911	8.257	12.219	16.784	21.936	27.671	33.980	40.856	8
15	2.619	5.804	9.760	14.443	19.839	25.929	32.707	40.165	48.292	7
16	2.664	5.903	9.925	14.687	20.174	26.367	33.261	40.844	49.109	7
17	2.721	6.030	10.139	15.005	20.611	26.938	33.980	41.728	50.172	6
18	2.794	6.192	10.412	15.408	21.165	27.662	34.893	42.849	51.520	7
19	2.896	6.418	10.792	15.970	21.937	28.671	36.166	44.412	53.399	6
20	3.043	6.742	11.337	16.777	23.044	30.118	37.993	46.655	56.096	8
21	3.277	7.263	12.212	18.072	24.824	32.444	40.926	50.257	60.427	8
22	3.433	7.607	12.790	18.927	25.998	33.979	42.863	52.635	63.287	8
23	3.725	8.255	13.880	20.540	28.214	36.875	46.515	57.121	68.680	6
24	3.978	8.815	14.821	21.933	30.127	39.375	49.670	60.994	73.337	5
25	4.124	9.139	15.366	22.740	31.235	40.823	51.496	63.237	76.034	8
26	4.501	9.974	16.770	24.817	34.088	44.552	56.200	69.014	82.979	7
27	4.911	10.882	18.297	27.077	37.193	48.611	61.319	75.300	90.538	7
							協和度比率			87.96

協和度を平均律の 2 オクターブ分で計算すると 96.00％でした。円盤ポリゴノーラの混合様式で作った 2 循環音階分の協和度は、87.96％で、ほとんど遜色がありませんでした。

このことから、協和度という点だけを見れば、平均律の音階も、ポリゴノーラの音階もよく協和する音階であるといえます。

付録 6

ポリゴノーラの設計（円盤）

青銅の円盤では、262 Hz の基音（0　1）を出すには、厚さが 2mm の場合、直径が約 22cm 位と計算されます。実際に計算に基づいて作った円盤をたたいて音を分析し、目標とした振動数と比較しました（付録 6　表 1）。音階番号 1 の場合、目標振動数の値は 262 Hz でしたが、実際にたたいて出た音を分析すると 283 Hz でした。このように製作した円盤の振動数は目標値よりも全体的に少し高くなりました。そのずれの平均値は＋6.9％です。しかし、円盤と円盤の音の高さの比すなわち音階比では、目標値と平均で 1.1％しかずれていません。例えば、音階番号 1 と 2 の比は 1.16 ですが、実測した値から計算した比は 1.15 です。

実測した振動数が目標とした音階比よりも高めにずれたのは、上の計算式で用いたλやσの値が真の値と少しずれていたためと考えられます。相対的な音高の比は大体 1％の精度で制作できています。この値は、12 平均律の半音 5.96％の 1／4 以下なので、モーツアルトでも気が付かないかもしれません。

なお、この表 1 で音階番号 1〜7 までは円盤の厚さは 2.0mm、音階番号 8〜14 では 1.5mm、音階番号 15〜22 までは 1.0mm です。これで低い音の円盤と高い音の円盤の厚さと直径の比が大きく異ならないようにしています。厚さの異なる円盤を設計しても、本文中の式を使う限りは目標値に良く近づいた円盤ができるといえます。

音階 番号	目標 周波数	実測 周波数	周波数の ずれ(%)	目標 音階比率	実測 音階比率	音階比率の ずれ（%）	直径（mm）
1	262	283	8.0	1.00	1.00	0.0	218.3
2	304	325	6.9	1.16	1.15	1.0	202.6
3	343	389	13.3	1.31	1.37	−4.7	190.7
4	362	401	10.9	1.38	1.42	−2.6	185.8
5	390	410	5.0	1.49	1.45	2.8	178.8
6	445	474	6.4	1.70	1.67	1.5	167.4
7	474	517	9.0	1.81	1.83	−0.9	162.2
8	506	538	6.4	1.93	1.90	1.5	136.1
9	542	581	7.1	2.07	2.05	0.8	131.4
10	590	623	5.7	2.25	2.20	2.2	126.0
11	684	730	6.8	2.61	2.58	1.2	117.0
12	772	815	5.5	2.95	2.88	2.3	110.1
13	814	879	8.1	3.11	3.11	0.0	107.3
14	878	943	7.4	3.35	3.33	0.6	103.2
15	1002	1092	9.0	3.83	3.86	−0.9	78.9
16	1067	1114	4.4	4.07	3.94	3.5	76.5
17	1138	1199	5.4	4.34	4.24	2.5	74.1
18	1220	1284	5.2	4.66	4.54	2.7	71.5
19	1326	1391	4.9	5.06	4.92	3.0	68.6
20	1538	1625	5.7	5.87	5.74	2.2	63.7
21	1737	1817	4.6	6.63	6.42	3.2	59.9
22	1829	1924	5.2	6.98	6.80	2.7	58.4
		平均	6.9		平均	1.1	

付録6 表1　目標周波数を決めて円盤を設計したときの実測値とのずれ
番号1～7までは、厚さ2.0ミリ。8～14は1.5ミリ、15～22は1.0ミリです。

付録 7

不協和度曲線に頼らず協和する音階を作る方法

付録 2 にヘルムホルツの不協和度の説明をしましたが、大変複雑な式を使わねばなりません。ところが、結果的に同じ音階を簡単に作ることが表計算ソフトでできます。音源物体（音を発する物体、弦とか、円板とか）の共鳴周波数（倍音とか部分音とよばれる）の並び方を使う方法です。この並び方を使うだけで、音階ができます。この場合、音階とは互いに共鳴周波数（高次部分音）がどこかで符合（協和）する音高の組み合わせのできる音高の集団、と定義します。

例えば、弦を例にとり説明します。弦の部分音は、整数倍音です。すなわち、基音（1 倍音）に対して 2 倍音、3 倍音、4 倍音と続きます。ピアノを弾くと大体 13 倍音まで出ています。5 倍音までを表にすると、次のようになります。

	（基音）	高次倍音			
	1 倍音	2 倍音	３倍音	４倍音	5 倍音
音高比	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000

ところでよく知られているように、基音をドとするとピタゴラスはソを作るのに、基音の音高の 3／2 倍の音を採用しました。弦を 2 つの駒に張り、その長さを 1／3 にするために新たに駒を差し込みます。すると、左右に、元の長さの 1／3 と 2／3 の長さの新しい弦の長さができます。そこで 1／3 の弦をはじくと、駒を入れない時の 3 倍高い音がしました。また 2／3 長さになった弦を弾くと 1.5 倍高い音がしました。これは 3／2 倍高い音です。このようにしながら、順に 1.5 倍高い音を作りその音を 2 で割りながら 1 オクターブ（2.000）の中に入れて音階を作りました。このようにしてピタゴラス音階が作られたのですが、1 オクターブ上のドが、元のドの丁度 2.000 倍にならない欠点がありました。1 オクターブ上の音、つまり元の 1／2 の弦長の音が新しいドになるように作られたのが純正調（純正律）と呼ばれる音階です。この音

付録7　表1　弦の長さと音の高さ								
音名	ド	レ	ミ	ファ	ソ	ラ	シ	ド
弦の長さ	1	8/9	4/5	3/4	2/3	3/5	8/15	1/2
音の高さ	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2/1

階を音高比で表すと、分数で表せます（付録 7 表 1)。

ドが元の長さの弦をはじいた時の音高で、弦の長さを 8／9 にするとレができて、弦の長さを 4／5 にするとミができます。ドレミの音高を、すべて分数で表します。この分数の上下、すなわち分母も分子も整数（小数点がつかない数字）です。これは、弦が整数倍音しか出さないことに由来しています。この関係を表計算ソフトで作ると表 2 のようになります。

上の表は、分子と分母を 9 まで取り、その数字を表にしたものです。すると、表の左下半分には太字で示した、3／2（ソ)、4／3（ファ)、5／3（ラ)、5／4（ミ)、9／8（レ）が現れ、右上半分にはそれらの音高を与える弦長（斜体字）が現れます（斜体字)。シの音高を表す、15／8 はこの表には現れませんが、分子分母を 15 まで広げれば出てくる数字です。

		分母								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
分子	1	1/1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8	1/9
	2	2/1	2/2	*2/3*	2/4	2/5	2/6	2/7	2/8	2/9
	3	3/1	**3/2**	3/3	*3/4*	*3/5*	3/6	3/7	3/8	3/9
	4	4/1	4/2	**4/3**	4/4	*4/5*	4/6	4/7	4/8	4/9
	5	5/1	5/2	**5/3**	**5/4**	5/5	5/6	5/7	5/8	5/9
	6	6/1	6/2	6/3	6/4	6/5	6/6	6/7	6/8	6/9
	7	7/1	7/2	7/3	7/4	7/5	7/6	7/7	7/8	7/9
	8	8/1	8/2	8/3	8/4	8/5	8/6	8/7	8/8	*8/9*
	9	9/1	9/2	9/3	9/4	9/5	9/6	9/7	**9/8**	9/9

	分母	
分子	音高	弦長

付録7　表2　分数で自動的に生じる純正律の音高と弦長
下の小さの表は、音高と弦長の分数の配置場所を示している。

		分母				
		1	1.3	1.6	1.9	2.2
分子	1	1.000	0.769	0.625	0.526	0.455
	1.3	1.300	1.000	0.813	0.684	0.591
	1.6	1.600	1.231	1.000	0.842	0.727
	1.9	1.900	1.462	1.188	1.000	0.864
	2.2	2.200	1.692	1.375	1.158	1.000

付録7　表3　倍音が1.3,1.6,1.9,2.2倍の場合の表

さて、2 次元物体のポリゴノーラの部分音は、整数で表せません。小数点の付いた数字で表せます。例えば簡単のために、基音（1.000）に対して 1.300、1.600、1.900、2.200 倍の倍音がでる場合を考えてみましょう。これらの数字を分子や分母にして表を作ると表 3 のようになります。

表 3 の左下半分が音高を表すので、これを小さい順に並べると次の表 4 の左の欄のようになります。数字の並びが、音階を示す音高の並びです。

右の欄は、同じ倍音列を用いて付録 2 で説明したヘルムホルツの理論式に従って計算した音階です。この 2 つの音高の並びは、ほとんど一致します。

これから言えることは、非整数倍の部分音を出す物体から出る音から音階をつくる場合は、弦の純正律音階を作るときの理論（分数）と同じ方法で良いということです。つまり、むつかしい式を使わなくても、物体の出す非整数倍音がわかれば、互いに協和する音階が、表計算ソフトで出せるという事です。表 3 は表計算そのものです。また、表 4 は表計算ソフトの昇順機能を使うと瞬時にできます。

分数計算	不協和度計算
1.000	1.000
1.158	1.158
1.188	1.187
1.231	1.230
1.300	1.300
1.375	1.375
1.462	1.461
1.600	1.600
1.692	1.692
1.900	1.900
2.200	2.200

付録7表4　分数と不協和度計算で求めた音階の比較

あとがき

私は、植物の形や硬さを担う細胞壁の研究をしていました。細胞壁の物理、化学、分子生物学的研究が専門です。私事で恐縮ですが、1992 年、トマトの硬さを正確に測る研究をアメリカで 1 年間しました。トマトジュースや、トマトピュレなどを工場で製造するとき、未熟なトマトと熟したトマトでは、加える水の量が異なるそうです。そこで、工場に搬入されてくるトマトの熟度を科学的に評価する必要がありました。

私はトマトを縦に半分に切って針を刺し、その抵抗力を測定してトマトの硬さ（熟度）を正確に測定する方法（応力緩和法）を考案しました。この研究は有名な雑誌に 2 つ論文として掲載され、意気揚々と日本に帰国しました。

帰国してすぐ、母に尋ねられました。

「アメリカに行って何を研究してきたの？」

難しいことをいってもわからないと思い、

「トマトを切って、針を刺してトマトの硬さを調べてきた」

というと、

「なんというしょうもないことをしてきたのか。そんなことは毎日トマトを切っている世界中のお母さんが知っている。そんな研究は税金の無駄だ」

といわれました。

“この測定には応力緩和法というすばらしい方法を使っている”、とか“税金といってもアメリカの税金なのに”、と言いたい言葉をぐっとこらえて、“よし、トマトの硬さを切らず測る方法を生みだしてやる”と固く心に誓いました。

しかし、切らずにトマトの硬さを計るよい方法がすぐにわからず、“音をトマトに与えてその反応をみればなんとかなるのでは”と思い、スピーカーをトマトにあてて、マイクでその音を拾い研究を重ねました。トマトを通る音速が、熟してくるとなんとなく遅くなることが分かりましたが、精度が上がりません。2 年研究してもうまくいかず、「もうやめよう」と思い、京都で開かれた国際学会（1994 年）で最後の発表をしました。その会場である企業の方が「櫻井さんがほしい情報は音ではなく、振動で

はないのですか？」といわれました。その方が紹介してくれた振動を正確に測る方法で、トマトの硬さを切らずに測ることができるようになりました。このようにして果実の熟度を非破壊で評価するために共振を使う方法が確立しました。

共振法でいろいろな果実を測る研究が進みました。果実の硬さは熟度をあらわします。なぜなら未熟な果実は硬く、過熟な果実は軟らかく腐ります。これは一方通行で腐った果実が硬くなることはありません。硬さを測れば熟度が分かる理由です。硬度を測れば、切らずに熟度が分かるので、後どれくらい待てば食べごろになるかをあてることもできるようになりました。

本文でも述べましたように、スイカ名人にも会うことができました。そのとき名人は、たたいて出てくるスイカの音をどのように判断しているのだろうと思い、スイカの音に興味を持つようになりました。音が出るということはスイカが振動をしているということです。

その音から、3 次元（球体)、2 次元（平面）の音階ができたことは本文で述べました。これらの音階は私たちに馴染みのある音階ではありません。

名人がスイカの音を聞き分け、若い人にはそれがどうしても分かりません。それは、若い人の耳が「整数倍音」の音楽に慣らされている宿命かもしれません。「非整数倍音」を愛でる邦楽に親しんでいた高齢の人がスイカの出す音が聞き分けられるのでしょうか。

私は小さいころからヴァイオリンを、高校からはクラシックギターをしていました。ギターでは弦を弾く位置を変えると音色が変わることに以前から気づいていました。それが倍音の出方による、ということを知り倍音に興味を持ちました。もし私がピアノをしていたら、ポリゴノーラは生まれなかったかもしれません。

現在は膨大なデータを学習した AI で作曲できるようになりました。しかし、AI に 2 次元の音階が作れるでしょうか？　将来は作れるようになるかもしれません。でも、その時はまた AI にできないことに人は挑戦するでしょう。

最後にお世話になった多くの方々にお礼の言葉を捧げたいと思います。本の原稿を終始ていねいに読んでいただいた渡辺譲様、山本良一様、黒田華織様、作図の補助で

は麻尾佐三江様、原図では麻尾悠太様、構成については櫻井元希様、楽曲分析では吉海久美子様、3 次元から 2 次元の音階への示唆には小方厚様、2 次元の振動計算では秋元秀美様、特許申請では寺﨑章二様、スチールパンでは製作者・園部良様、ゴングでは柳沢英輔様、ポリゴノーラ楽器の製作では熊代誠一様、ポリゴノーラの紹介では小沼純一様、またコンサートでお世話になった、作曲家・一ノ瀬トニカ様、マリンバ奏者・神田佳子様、稲野珠緒様、琵琶奏者・塩高和之様、現代音楽家・鈴木昭男様、尺八奏者・田中黎山様、志村哲様、ポリゴノーラ演奏では音楽家・灰野敬二様、シンポジウムでお世話になった横谷香織様、新井真由美様の皆様にお礼申し上げます。また最初に果実の熟度を見るには「重要なのは音ではなく振動である」と教えていただいた和田直樹様に感謝いたします。最後に、新しい音階と楽器から新しい音楽が生まれるのではと、いろいろな角度から終始励ましていただいた声明家・桜井真樹子様にこの場を借りて深く感謝いたします。

2023 年 6 月 3 日　櫻井直樹

≪著者略歴≫

櫻井直樹

1950 年　大阪府河内市(現東大阪市)生

1973 年　大阪市立大学理学部卒業

1978 年　大阪市立大学大学院理学研究科博士課程修了(理学博士)

1978 年　日本学術振興会特別研究員

1980 年　アメリカアイオワ州立大学研究員

1980 年　広島大学総合科学部助手

1988 年　同上助教授

1990 年　日本植物学会奨励賞受賞

1991 年　カリフォルニア大学デービス分校研究員(～1992 年)

1993 年　広島大学総合科学部教授

2008 年　チェコ農科大学名誉教授

2011 年　園芸学会賞受賞

2016 年　広島大学統合生命科学研究科特任教授

［表紙デザイン　吉田健嗣］