

演奏家におけるビブラートの 本質と効果に関する考察

— 音響学からのアプローチと鍵盤楽器におけるビブラート再考 —

沼田 宏行

序. 音響学から演奏時における「音」そのものを検討する意味

音に関する技術的な問題を解決するのが音響学であるが、本論文では音楽を演奏する演奏家にとって、音の性質や現在の技術を理解し、それらを利用してより良い音楽芸術を創出することを目指す。特にビブラートは弦楽器の演奏者では疑いもなく利用されているが、その効果を理論的に知ることが必要であると同時に、鍵盤楽器にみられるプリセットされた音高を利用する楽器においても、その考え方は演奏効果に非常に重要な影響を及ぼすことが判ってきた。それらを音楽家は経験として知っているが、音響学からのアプローチにより、原理を明らかにしようと試みるのが本論文である。

現在、音響学会では多くの研究が発表されているが、それらは音楽だけでなく、騒音の中で音声により良く聞こえる技術を模索したり、車両の近接を音から検出したり、大きな会場のスピーチにより良く聞こえたり、より少ない情報量でも明瞭で音楽の本質を伝える技術を開発したりする、などの音に関する多くの技術が発表されている。

既にこの分野では、世界の主要なホールの音響を電氣的に再現する方法や、CDより圧倒的に小さい情報量で音楽を楽しめる MPEG 規格を十数年前に開発し、今でも研究が進められている。また、微妙な音を再現して保存する技術も進んでおり、それらの技術を用い、耳を経て知覚されるまでのメカニズムも多く発表されている。外耳を経ず、直接内耳に刺激を与えて情報を伝達する方法を含め、多くの実用化が見られる。

また同時に楽器学も音響学と密接に考えなくてはならない。これも、多くの書籍や資料が見られるが、例えばピアノを取り上げた場合、スタインウェイ社のピアノには、100を超える特許が確認できる。一方ヴァイオリンではその300年近い歴史の中でも、特別な作者、特にアマティ、ストラディバリウス、ガエルネリ・デル・ジェスに見られるような特許など、記録としては明確に確認できないが、明確に技術差がある制作者がいることも事実である。またストラディバリウスを始めとしたネックや指板の延長によって現在最高の楽器として君臨できるのは、製作後の変更によるものであり、当初は計画されていなかった改造も加え、より良い楽器状況を得るために、多くの人々が工夫を加えている。

このように音響学、楽器学ともに関係のある事柄をすべて含むと、とても広い範囲になるが、今回はクラシック楽器の演奏家が演奏するために会場で考慮が必要なことや、演奏家が活動上必要な録音や録画の際に大切なことを主として、演奏現場での調整や録音現場でのやり取りを少しでもスムーズに、かつより望んだものになるようにするための学問として捉えて、研究していきたい。

1. 音が聞こえる仕組み（耳の構造とその他）⁽¹⁾

音を感じているのは主に耳である。音が感知される構造は次のようになっている。

- ①耳介の反射にて集められた空気の振動が外耳道を通り、鼓膜を震わせる。
- ②鼓膜に接触するツチ骨、連結されたキヌタ骨、更に音を電気信号に変えるカタツムリ様の蝸牛に接触するアブミ骨と伝わり、最終的に蝸牛の外リンパ液に振動が伝えられる。その際、3つの骨のテコと、鼓膜とアブミ骨の面積の差により約20~30倍の圧力に増幅される。小さい音と大きな音ではエネルギーが数百倍も異なるため、小さい音に反応できる神経を大きな音から守るために、蝸牛に接するアブミ骨にはアブミ骨筋が付いており、大きな音を感知するとこの筋肉が収縮して動きを抑制する。よく大きな音がしたときに耳のあたりが緊張するのはこのためである。逆に小さい音を聞くために、ツチ骨柄に鼓膜張筋がついており、この筋肉によりテコを利用して鼓膜の張力を上げることもできる。小さな音を聞くときの聞き耳を立てる状況である。
- ③上記のように空気の振動が、蝸牛の外リンパ液に伝えられると、らせん状になっている蝸牛内の基底膜を振動させる。渦巻に沿った基底膜には数多くの4列の有毛細胞があり、特にらせん内側にある1列の内毛細胞が音の受容を担っている。蝸牛頂近くの内毛細胞は、蝸牛の幅が狭く固いため高い周波数（約2万Hzまで）にて反応し、蝸牛底に向かうにつれて幅が広くまた柔らかくなるため、低い周波数（約100Hz以下まで）にて反応するようになっている。つまり音の振動数に応じた蝸牛の特定部分にある内毛細胞が反応するため、音の周波数の違いが感知できる構造になっている。

さて、音楽家として考えなければならないのは、A.~E.のような生物的特徴からどのような注意点があるのかを類推していく必要があるということである。

- A. 音高を聞き取る能力は蝸牛の発生学的異常がない限り、興奮する特定の神経をそれぞれ意識できれば、慣れや訓練で判別できる可能性が強い。逆に、体調や怪我など何らかの理由で詳細に意識できない場合は音高が違って認識される可能性がある。
- B. 固有の振動数により興奮する神経は同一である。音をより印象深く、または強い刺激として伝えようとした場合、特定の周波数に集中するのではなく、周辺の周波数も併用することにより、より多くの神経を刺激して、感覚的に強い音として感知することができる。
- C. アブミ骨筋や鼓膜張筋などに見られる構造的に振動の強度を平滑化する仕組みを持つ。ゆえに人間が知覚する上で、絶対音量を蝸牛上の神経刺激からの情報のみで判断することは困難である。
- D. 基本的に神経はカリウムチャンネルを用い、神経伝達を行っている。電位を保つ仕組みやカリウムチャンネルの各種の詳細構造はここでは控えるが、同じ刺激を長時間受け続けるとカリウムチャンネルの構造から電位を保つことが難しくなる。蝸牛内の神経が、強い音の刺激を受け続けることにより、それを最初より刺激の少ないものとして受容する傾向が起こる。

E. 音の知覚の諸条件については、更に細かく検討する必要がある。

- ①耳介に反射された振動を鼓膜で受け取っているため、耳介の形状や性質、および指向性に左右される。
- ②振動は複数の周波数の波が合成されたものであるため、単純に蝸牛内の特定位置にある細胞からの信号だけでなく、複数の細胞が複合的に反応し、なおかつ時系列変化も知覚される。
- ③空気の振動は耳の構造だけでなく、皮膚刺激からも総合的に感知される。これは、腹部や背部に振動子を置き、耳からの刺激を補完する機構が開発されている。耳以外の感知構造も考慮する必要がある。

このように、物理的、生理的理論は、音楽を発信、受信する際に様々な特性を十分考慮する必要がある。更に音楽としての知覚に関しては心理的要因も加味する必要があり、それぞれに検討する必要がある。

2. 音圧とは

音響学にて音圧というと、音としての空気の圧力の変化を指し、単位は圧力を示す Pa (パスカル) を用いる。通常は瞬時の最大圧力をピーク音圧とし、ある時間区分の平均値を実効値音圧 RMS で表す。健康な人間の最小可聴音圧の実効値である $20\ \mu\text{Pa}$ (1 KHz) を基準音圧として音圧を対数表示を用いて db SPL (デシベル) 表示し、音圧レベルとする。また音の強さは音の周波数によって聞こえ方が違うことから、その特性を加味して音の強さを JIS 規格 A 特性で調整して表した phon (ホン) というものもある。これが現在の騒音計の基準となっている。つまり、エネルギーとしての音は機械で測ることができ、具体的に比較することが可能である。

2-1 大きい音と大きく聞こえる音

一方、phon で計測する時に行ったように、人間に知覚される音量は周波数により影響されることが判っている。また音楽では特定の周波数だけの振動ではなく、広範囲の周波数が使用されており、なおかつ、それらが同時に複合的に用いられているため、単純に強い音、弱い音が、知覚として大きい音、小さい音と同一ではないことに注目する。聴感特性表から、最も知覚しやすい 2000 Hz の音と 50 Hz の音では約 40db 異なるため、高音の約 100 倍も強い低音を、同じ音量として知覚するということが判る。つまり同じ音量に聞こえていても大きい音と大きく聞こえる音では異なるものであることが判る。

また、大きい音、小さい音にはまだ問題がある。生理的機能として、音振動を増感させて知覚させるためのツチ骨柄にある鼓膜張筋、逆に音振動を減感させるアブミ骨筋があるため、身体的な緊張やいわゆる心理的に次に強い音が来るぞ、というような「構え」の状態に入った場合に、現実的に知覚が変化する。これを音楽的環境で考えると、音楽がストーリーに従って進行する中で、大きくなったり、また逆に小さくなったりする場合、同じ音量でも別の部分で演奏された音量と受ける印象が異なる場合があることを示唆する。演奏家としてもう一步踏み込んだ考察をすると、同じ音量でも前後の音楽の運びで、音量は異なって知覚される。

コンクールや試験での評価において、音量は大切な項目の 1 つであることは間違いないが、大きく聞かせる技術は、単に楽器を強く鳴らしエネルギーを多く放出するばかりでなく、周波数特

性を十分に利用した音色づくりや、演奏する作品の効果的な設定により工夫できる余地があるということが判ってくる。

2-2 音の方向認知と音色変化

近年、音の位置に対する研究はかなり進んできている。十数年前からサラウンドシステムとしてスピーカーを水平方向に多数配置し、音量や遅延を調整して音像の移動が滑らかに行われるようなものが業務および民生利用されている。更により少ない数のスピーカーでも、3次元方向の表現を2次元の水平方向の展開のみのスピーカーで表現する研究もされている。

人間には耳が二つしかないのにもかかわらず、音源の移動方向をかなり精密に感知できる。これら音源の位置を正確に捉えられるのは耳介による反射音の変化を判断して知覚しているためである。人間も他の動物同様、進化の中で危険を察知するための器官を備えており、迫ってきた危険な敵がどちらの方向から来るのかを判別し、命を守るために発達したのだと考えられる。現在までの研究によると、方向性は耳介による音の反射により、音の周波数特性が変化することや、音の位相により方向性が得られることが判ってきている。前述した上下方向の変化も、この耳介の反射による周波数特性の変化により得られるかもしれない、という研究がある。

2-3 オカルトと実証

人間の感覚を科学的に表現するのはとても難しい。音の強さのようにエネルギーの基準があるものでも、知覚される強さは常に基準と同一の反応を得られないことがわかる。更に音色や音の立ち上がり、周波数分布の時系列的変化なども記録はできるが、それが必ずしも人間の感覚を客観的に表現するものとはならない。音の強さを計測する、または観測するための表示計の単位も、単にピークのエネルギーを表すものだけでなく、平均値や周波数特性を加味したものなど主に放送局や制作会社スタジオにて用いられている計測器の種類だけでも3種類以上⁽²⁾ある。

音が良い、悪いは評価者の耳の生理的特性だけでなく、その評価者の対象とする音楽やサンプル、そして好みの違いにより大きく偏りが出てくる。つまり、「良い」＝「音響特性が良い」とは限らないのである。その一例として現在では、エキサイターと呼ばれる疑似高調波を加味する機械やソフトウェアが多く利用されている。サチュレーションにより原音に対しそれぞれの方法により特徴のある高次倍音を付加することにより、音が「温かく」なると表現して高評価する。音量をサチュレーションが起こらないぎりぎりの音量まで増加することにより、音が「パワーを持った」と表現することも常態化している。しかし、それらは物理的に見れば純粋に元の波形を保ったまま増幅したのではなく、別の波形を変化させたものである。

また人間の感覚は単に鋭敏なだけでなく、非常に多くの要素を総合した形で音を判断するため、見た目や操作性、たとえば太い電線や大きなターンテーブル、大きなスピーカーや大きな増幅機材に対して、電気信号が物理的な変化を与えなかったとしても、影響を感じてしまうことがある。更に微妙な変化量であれば、その他の要因により大きく変化したと捉え、受容結果も左右されてくる。このように他項目の状況を完全に同一にできない場合、「こちらが良い」というのは物理的に証明できない場合が多いため、結果が正確かどうかの判断は、その差異が大きい場合を除き、比較は非常に難しいものだ。

そのような場合に、それまでの経験から来る勘で判断するしかない状況となる。その時に起こる不正確さを含む情報をオカルトと呼び、解明すべき問題として共有している。音に対する評価は、音に対する要素がまだ認知されていないものが多く存在し、科学的に完全に証明されている

状況ではないのが現状である。

3. 演奏時の音響

音響学では、耳の特性、音の伝播性、マイクやスピーカーなどの特性など様々な項目に分かれて、更に詳細に研究され続けているが、本論文では、特に演奏時や録音時に考慮が必要な音響学のうち、音高（周波数）とそのビブラート（変調）について、歴史的事実とその考え方が音楽にどのような影響を与えるのかを更に深く検討する。

3-1 なぜビブラートをかけるのか（発音に変調をかける方法について）

弦楽器や多くの管楽器において音高の問題は、楽曲演奏の上で非常に大切な問題となる。まず音階として認識できる範囲での周波数を得ることは初学者が最初に立ち向かう問題ではあるが、熟達者における精度においてもその議論は尽きない。各音階の組み合わせの問題については後に検討するが、まずここでは単音で他の音と干渉のない場合において必要なビブラートについて検討する。

ビブラートは楽曲の表現を補う様々な音の変調を指す。音の変調は主に3種類のものが想定される。

- ①周波数変調 基準周波数が変わるもので、基準に対し0.2 Hz～2 Hz位の周波数の変化するもの。
- ②音量変調 音量が時間により変化するもの。
- ③音色変調 音のフォルマント（含有周波数分布）を時系列で変化させるもの。例を挙げればシンセサイザーで周波数フィルターのレゾナンス周波数を変化させるものである。フォルマント自体をモーフィングなどの技術を用いて時系列で変化させるなど方法は多岐にわたる。また①の周波数変動により位相にも変化を来して受動的な要因により音色が変化することもある。

いずれの場合も、聴覚上認識される範囲の変化なので、0.2 Hz～5 Hz位の周期で変調するものを想定する。もし、変調が約50 Hzを超えると、変調自体が「音」として聞こえる状態になる。シンセサイザーではリングモジュレーションという2基の可聴域周波数の発振器による音を創り出すが、それは変調というより音色としての認知の領域となっている。

3-2 ヴァイオリンなどの弦楽器の場合

ヴァイオリンの演奏を想定した場合、奏者はすべての変調方法を用いて楽器による表現力を最大限にしようと工夫している。左手で指板をおさえて発音する基準周波数を決め、右手の弓で弦をこすって発音する。その時に左手では変調周期を楽曲に相応しい周波数に設定して弦長方向に指を震わせて発音周波数を変化させる。これは①周波数変調となる。

ヴァイオリンを含む弦楽器では、弓を早く動かしたり、また弓を強くこすりつけたりすることにより音量が変化するため、②の音量変調を確認できる。この周期は比較的長く、弓の往復数に準じた変調が主になり、一弓当たり0.2 Hz～0.4 Hzになる。楽曲では弓の一往復が一呼吸と同じになることを想定しているので、その周期が呼吸数になるということである。音量変調は楽曲に

おけるフレーズ（節）を表現するのに最適で、一弓（片方向の進行）に2回以上の強弱変化を行うのは技術的にも音楽的にも特別な効果を望んだものと考えられる。

ヴァイオリンでは、③の音色変化の方法は数多くある。弓および弦の発音機構を考えてみると、弦の端を弓でこすると高次倍音が多く出するため、弦の端からの距離によって音のフォルマントは大きく変化する。それを利用して一弓の中でも強力な音色の変化を付けることができる。また、弓に装備された弦をこすための馬の毛は、毛箱部分で水平方向に約十数ミリ幅でしこむように張られている。その弓を倒して馬の毛の一部でこすのか、全部水平にして弦との接触幅を大きくとるのかでも倍音構成は全く違うものになる。

3-3 管楽器の場合

木管楽器においても、ヴァイオリン同様に、周波数変調、音量変調、音色変調の3つが考えられる。フルートにおいては息の入れ方により、音の周波数、音量、音色のすべてが変化させられる。フルートにも見られるが、オーボエやクラリネット、更にはファゴットなどの木管楽器では、指遣いにより同じ音高でも音色が変わるため、ビブラートとは異なるものの、音色の変更が可能だ。またクラリネットではその息を吹き込む速度や量と共に下顎のくわえ込みの操作により、いわゆるビブラートの周期よりもっと低い周期での周波数変調、音量変調を行うことが可能である。

金管楽器においても、発音体となる唇の形の変化や緊張の度合いの変化にて、すべての変調を起こすことが可能となる。トロンボーンのようにマウスピースのカップが深い場合は特に自由度が増し、音高はもとより音色も変化をさせやすくなる。このアンブシュアと言われる表情筋を含む唇まわりの筋肉および息の使い方は、正確な音高を求めるクラシック音楽において必要不可欠な技術となる。またトランペットを始めとする金管楽器では気柱の高い倍音を用いるため、楽曲で求められている音高を発音するためには常に発音周波数の調整が必要となる。これは音階が必ずしも純粋な倍音で構成されていないため、音によって調整が必要となるからである。

3-4 ビブラートの必要性とは

このようにみえてくると、ビブラートや音の変調は、多くの要因により起こるので、受動的に起こってしまったものを指すと勘違いされがちだが、職業音楽家は必ずビブラートに見られる音の変調を能動的に利用している。ビブラートを使うことにより表現力が増すことは、経験を通じ様々な場面で既知の事実であるが、そのメカニズムについてはあまり検証されておらず、音楽表現の一環として新たに検討する必要がある。

ビブラートの効果は次の5項目が想定される。

- ①強い音量を得たように感じる。
- ②単音により多くの情報を込められる。
- ③音高移動によるクリックを避けられる。
- ④音高幅を有効に利用できる。
- ⑤音色変化を操作できる。

次項で各項目を検討する。

3-4-1 効果①強い音量を得たように感じる

①が最も重要な効果だと思われる。ヴァイオリンを例にとりて考えてみると、楽器は単音で鳴らしていた場合、楽器自体が発音体の振動を受けて、構造体の一部を共鳴させる構造を持つ。楽器内では直前の振動が急に止まったとしても、楽器自体の振動があるため、音が瞬時に停止することはエネルギー保存の法則から不可能となる。常に楽器は何らかの振動の影響を受けており、前の音の響きの上に、新しい振動が加わっていく状態に至る。そして演奏している状態では、常に新しい振動が積算され、結果的には振動の加算状態を得ることになる。この時の振動の重なり具合により、発音体だけでなく、楽器としての固有の音色を生じることになる。共振周波数分布や振動の遅延状態、残響状態が最適なものが、良い楽器として評価され、高額なものとなるのは言うまでもない。

共振や共鳴の詳細部分は非常に課題が多く、ここでは述べきれない要素が多くあるが、まず①では波の合成を取り上げる。新しく発音された振動と楽器自体が既に起こしている振動が完全に一致した場合は、共振を起こす。これは非常に稀な状況で、共振を起こすためには、周波数の一致、位相の一致が必要とされる。もし、位相が180度ずれたら、相反したものを加算することになり、音が出なくなることを意味する。

図1では200 Hzのサイン波を発振器で発音している。図2では、同じ200 Hzで同じ音量のサイン波であるが、位相を180°進めたものを用意する。図3で図1の音と、図2の音を加算合成する。お互いの波が全く消えてしまった様子が図3から読み取れる。図3では2つの発振器からは出力されているが、音が出てくることはない。この現象を応用したものが、ノイズ・キャンセリング・イヤホンである。

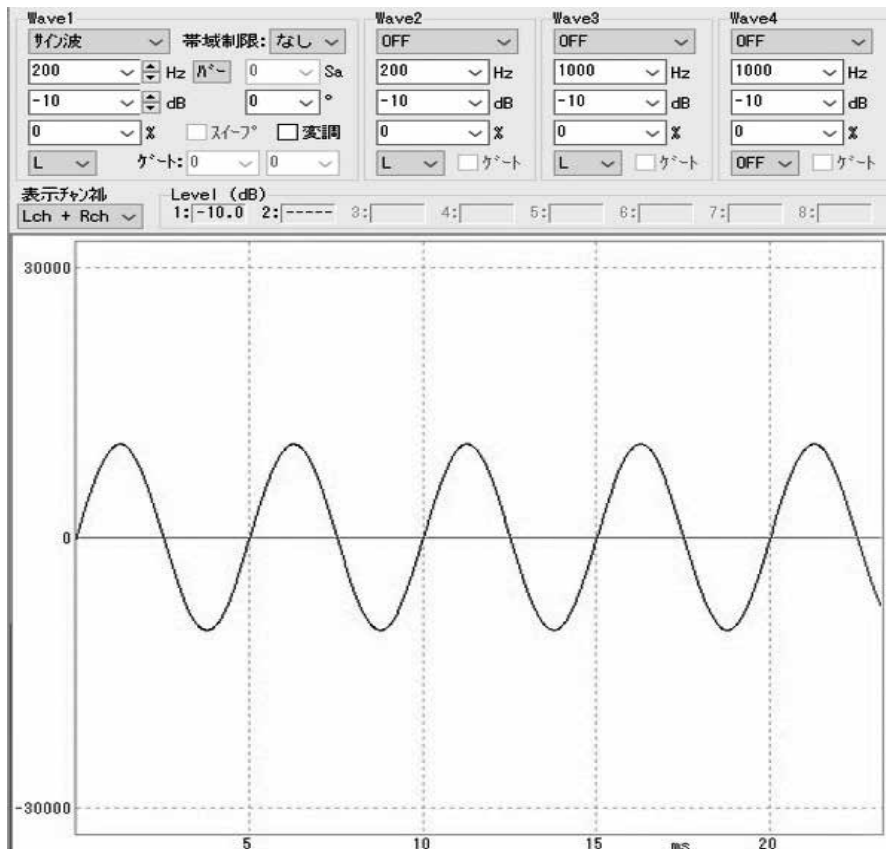


図1 元の波形 (Wave Gene V1.50 使用)

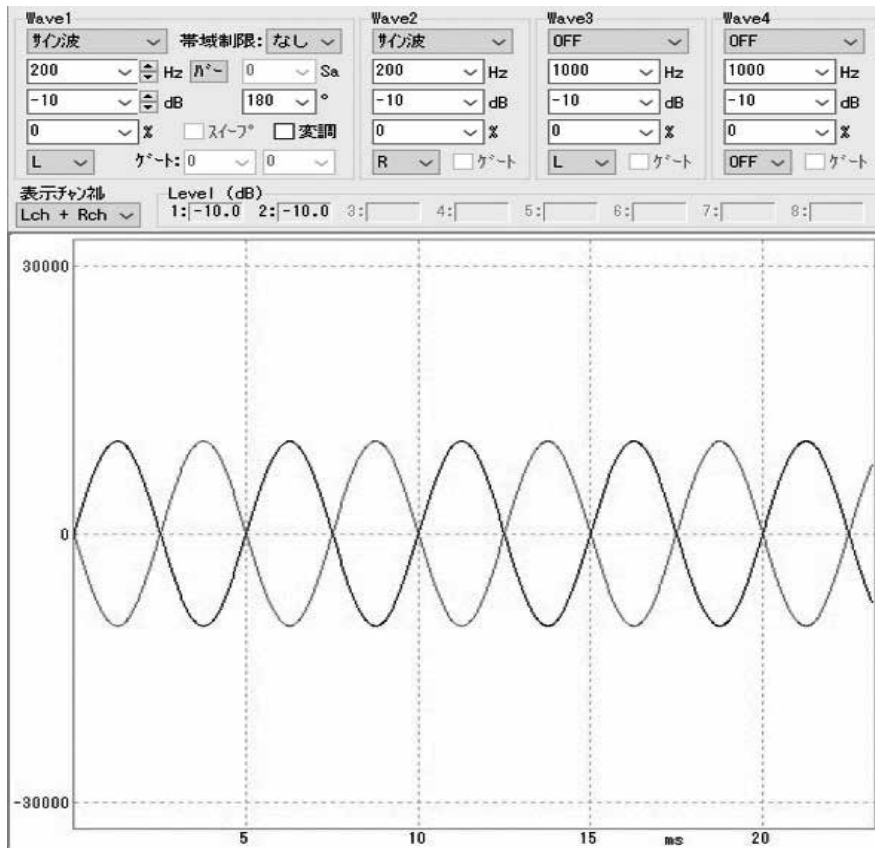


図2 逆位相の波を並置 (Wave Gene V1.5.0 使用)

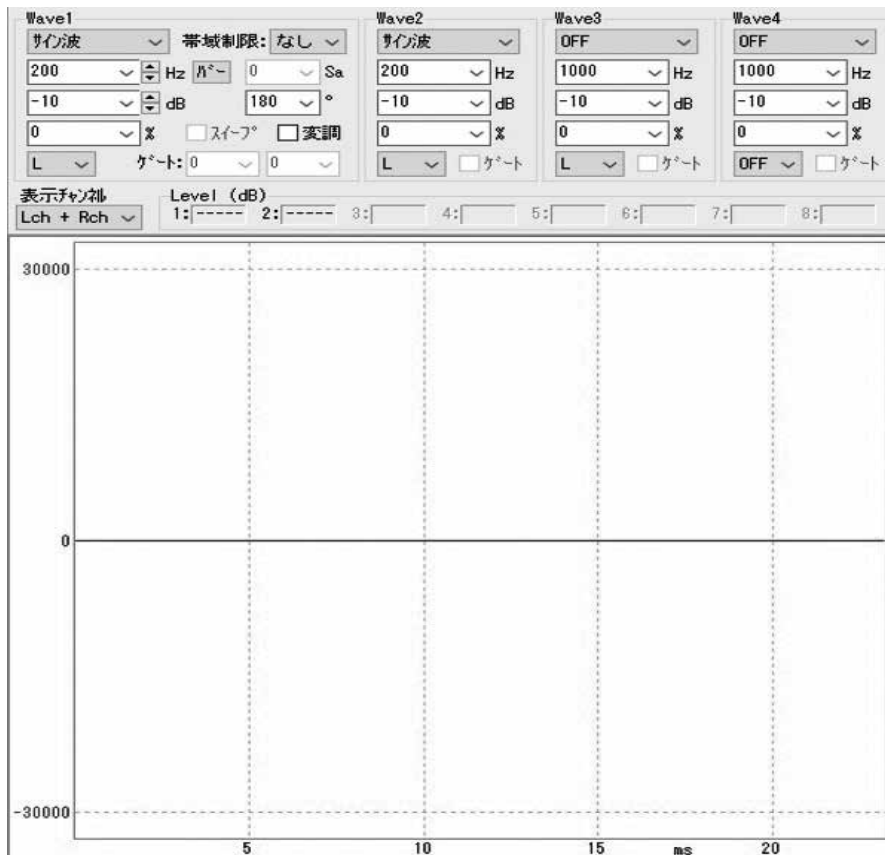


図3 逆位相同周波数加算後 (Wave Gene V1.5.0 使用)

このような現象は録音現場では非常によく起こり、特定の音が急に弱く聞こえる、思ったより音の鮮やかさが消えてしまう、音の立ち上がりが鈍い感じがする、などを解消するために収音マイクの位置を調整することはよく見られる。多くの録音を手掛けるスタジオでは、数多くの経験から演奏する微妙な位置を指定されたりする。これらは音を有効に録音するために必須の作業となる。

このように厳密な条件で観察を続けると、ビブラートは周波数変調を行うことにより音量変調も同時に行えることが判る。つまり周波数が1 Hz 違うビブラートを行えば、共振による音量増減、理論的に言えば1 回 /1 秒音量の変化が行われ、振動数の差 / 毎秒ごとに 0% から 200% の増減が行われるということになる。0 から 2 倍までの変化を高速に行うのは弓の圧力変化など他の技術で行い続けるのは不可能である。更に、ビブラートの周波数を上げるには周波数の変調を速く（周波数間の差を多く）すればよいだけなので、表現を即時に行うには最適と考えられる。

音量の増減に関係する音の波の合成について、位相の問題は非常に厳密に考える必要がある。2 つの同じ波形のものを加算して 2 倍の値を得るには、位相が完全に同一になる必要がある。先に述べたように位相が 180 度ずれたものを加算すれば常に 0 となる。音楽ではよく基準音にラの音 (440 Hz) の音が用いられるが、ラの音なら位相を揃えるためには 440 分の 1 秒の精度で同時に弾き始めなければならないということである。これは合奏にて一回は合うことがあるかもしれないが、楽曲の中で何回も合わせることは人間の反射神経速度や、楽器機材の振動立上り精度の限界を超えている。これに対し、周波数変調によるビブラートを使用した場合は、例えば 1 Hz 異なる周波数の 2 音が鳴れば、必ず 1 秒に 1 回は 2 倍となる値が得られることが判る。現在は発音人数が 1 名と仮定しているが、何人もの奏者で演奏するオーケストラでは、異なる音高が多くなるほど、単純加算された強音が起こる確率が高くなるということである。オーケストラでは正確な音高の発音だけでは、音量豊かに鳴らないといわれるのは科学的に証明されている。

図 4 は、うねりの状況が判るように 50 Hz と 55 Hz のサイン波の加算合成を説明するものである。50 Hz および 55 Hz の波を重ね合わせて描画すると図 4 の中の（重ね合わせ）のようになる。ここで二つの波が重なっている部分はより大きな値、つまり完全に重なった山の頂点は、加算されると 2 倍のエネルギーを持つことになる。しかし、位相が逆になった場合にはプラスとマイナスでエネルギーのベクトルが逆方向になって相殺されている。このようにして加算された音量の波が同じく図 4 の中の（加算）の部分に現れる。この音量の増減を表す外側の大きな波がうねりとなる。うねりはこの例の場合、二つの波の周波数差が 5 Hz あるので、1 秒間に 5 回、上図では 0.2 秒に 1 回発現することが確かめられる。

またこの加算方法を用いて、3 音以上のうねり具合も具体的に見ることも可能となる。後ほど細かく論述するが、3 音以上の楽音によるうねりは周波数の選択方法が多岐にわたり、それらの選択要素により大きく変化するので、はっきりしたうねりの出やすい 5 Hz を最大公約数として持つ、50 Hz、55 Hz そして 60 Hz の 3 つのサイン波合成を検討する。

図 5 では 3 音の加算を行っている。うねりとして認識される変調周波数は同じ 1 秒間に 5 回、0.2 秒で 1 回の周期を得ているが、うねりは単純に増減せず、小さい山、大きな山が 1 回ずつ現れるのが確認できる。つまり整数比で割り切れる理想的な周波数の波でもこれだけ複雑なうねりが出てくるので、これが数学的に割り切れない周波数や、多くの演奏者の選択による周波数、そして位相も複雑な状況にて発音された波が、干渉しあいながら響く室内楽やオーケストラでは、うねりも非常に複雑になるのが予想できる。またそれらが良い響きを得られる環境になるのは演奏者の熟達や経験により、次々と変容していくことも予想される。

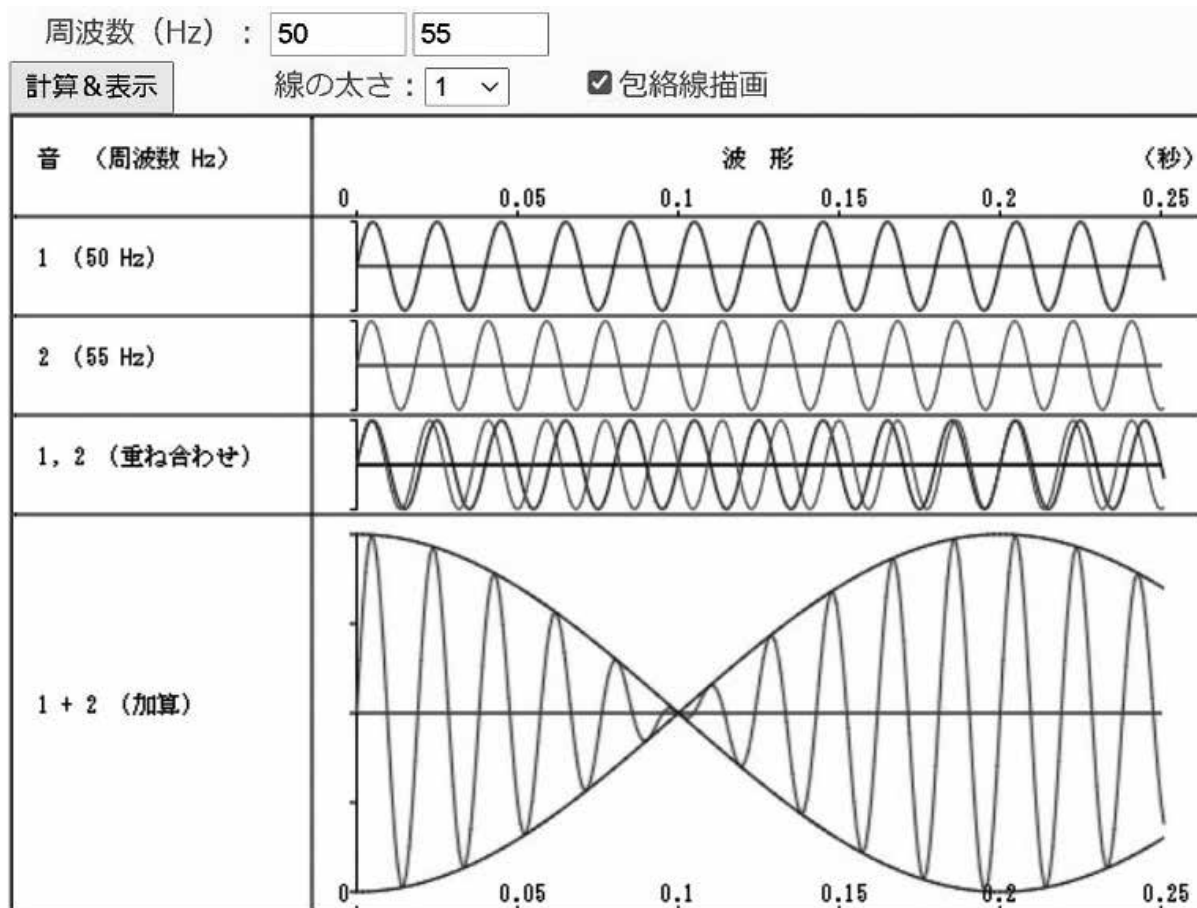


図4 同位相で異なる周波数のサイン波合成

(<http://k-ichikawa.blog.enjoy.jp/> 音律と音階の科学 (10) : 2つの音の重ね合わせとうねりにて計算実施)

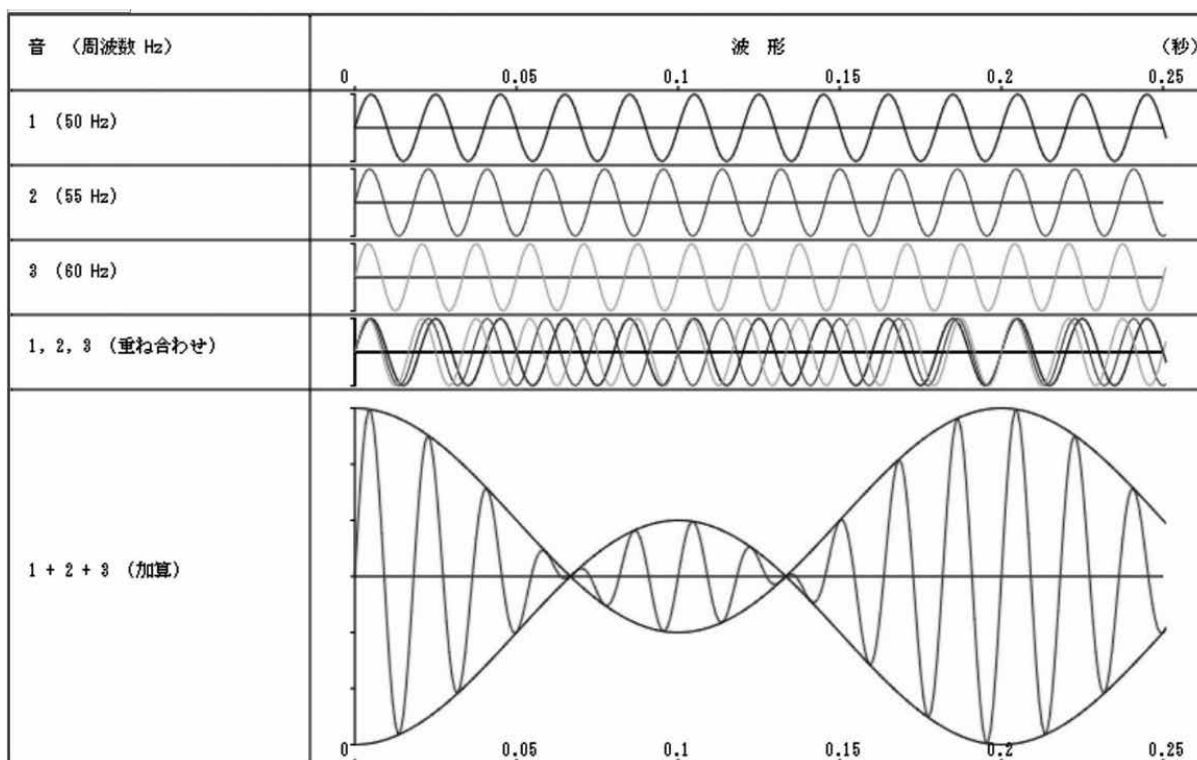


図5 3つの波による加算合成

(<http://k-ichikawa.blog.enjoy.jp/> 音律と音階の科学 (11) : 3つの音の重ね合わせと missing fundamental にて計算実施)

楽器の構造や特徴にもよるが、楽器が固有の共振周波数を持つことは、特定の周波数の音だけを大きな音で伝える構造となるため、楽器として表現可能な範囲内の音を平滑化して表現することが難しくなる場合もある。弦を発音体に用いる楽器では特定の周波数の音が、強く共振して響く周波数の音をヴォルフトーンと言う。1つの弦で広い音域の音を出す楽器の場合は、ヴォルフトーンが強く出る設計や調整方法は、使いやすい楽器、または良好に調整された楽器としては評価されないことが多いようだ。様々な周波数の音がバランスよく出るように、ヴァイオリンの基本設計はfの文字に似たクロソイド曲線が多用されて制作されている。クロソイド曲線では、固有の半径を持つ曲線ではなく、半径が滑らかに変化する曲線となっているため、振動する場合、特定の周波数によるヴォルフトーンが発生しにくい状況となると同時に、多くの波長を物理的に用意して「鳴る」楽器とすることができる。

ビブラートの効用は、周波数変調、音量変調だけでなく、前述した生物的な音の受容器官である蝸牛の内毛細胞に与える影響も大きいと考えられる。蝸牛内では特定周波数を受容する細胞は常に同じなので、ビブラートにより周辺周波数に対応する内毛細胞まで興奮させることになる。また神経の興奮を伝える電気刺激はCaチャンネルの構造上、連続して長い時間興奮を続けることは不可能である。つまり同一周波数のサイン波を聞く場合、同一の周波数を担当する内毛細胞に興奮を与え続けることになり、連続する同じ周波数の音は、だんだん弱い興奮として感じられてしまうということである。一方、ビブラートを用いて固有周波数の周辺周波数まで聞かせていく場合、各周波数を受け持つ内毛細胞は周期的に興奮と弛緩を繰り返すためCaチャンネルの回復を望むことができ、音を正しく認識することができるため、結果的に強音をより正確に受容できるということとなる。音楽家では「強くないのに到達する音」という表現があるが、神経の科学的受容の効果のひとつと考えられる。

3-4-2 効果②単音により多くの情報を込めることができる

周辺周波数に対応する内毛細胞を多く刺激する周波数変調やその波形の変化の度合いから、音に含まれるリズム感や緊張感を感じ取ることができる。周波数の変化の仕方が急峻に起こるのか、または緩慢に起こるのかといった、単音でありながらビブラートにより更なる情報を含有し伝達することができる。音響学的には搬送波と変調波の二つの情報の認識となる。

簡単な例を1つ挙げれば、ヴァイオリンやフルートの基準音程の変化がない長音の中に、基準となる拍の速さをビブラートの整数倍にて明示することができる。これを能動的に用いると、基準音程の変化がないのにビブラートの速さの変化により、より緊張してくる音楽を表現したり、逆に弛緩したりする表現をできる。これは搬送波である音高にビブラート（変調）をかけ、新たな情報を伝達し、音の情報量を増やして伝えるということである。

3-4-3 効果③音高移動によるクリックを避けることができる

ピアノのようなそれぞれの周波数において別の発音体が鳴る構造の楽器ではなく、ヴァイオリンの同一弦による発音や管楽器のように1つの発音体が急に発音周波数を変化させると「カチッ」や「キチ」というようなクリック音を感じる。急に制止される周波数と急に開始する周波数の差が、強い刺激として感じられるものと思われる。

それらのノイズを楽音として利用する場合もあるが、通常はビブラートや軽いグリッサンドを使用し、音高幅がある旋律を滑らかに演奏する。楽器の演奏では、基準周波数を中心とした楽音に重点が置かれるが、それぞれの発音機構のノイズも、重要な楽音の1つと捉えられている。最

近のシンセサイザーにおけるピアノ音では、発音時の打楽器的な機構ノイズだけでなく、音を止めるダンパーのノイズや、発音が終わったあと初期位置に戻るハンマーの衝撃音までを基本周波数音と一緒にセットにして楽音としている。弦の軋みや管楽器のクリック音に至るまで制御できるのがビブラートを始めとする各種の演奏技術とされている。

3-4-4 効果④音高幅を有効に利用できる

ビブラートの効果は、楽器が単体で鳴っている場合だけでなく、複数の楽器が鳴っているときにも起こる。これは複数の楽器が演奏する室内楽やオーケストラなどの合奏場面で確認できる。楽器単体より音量を多く得られ、なおかつ各奏者の周波数が異なることにより音量が変化して結果的に印象深い音を得られることは前述した通りである。

合奏ではもう1つ見逃せない問題がある。それは、楽曲が要求する各楽器の基準音高が1つではなく、複数にわたり、それぞれの周波数の関係性が全体の響きに大きく影響することである。次項の鍵盤楽器におけるビブラートでも検討するが、それぞれの楽器が奏でる各音により和音が構成され、その和音の最適な音程が含まれることにより、単音同様に各音の共通倍音が共鳴する状態が起こる。平均律と定義された音階の周波数比では共鳴が起こらず常に濁りのある和音であるのに対し、オーケストラ等の複数の音高による楽器音の複雑な共鳴や干渉を伴った響きは、物理的な音量も異なっている。また純正律と定義された音階では、転調の多い楽曲では非常に細かい操作が必要となり、オーケストラ楽団員には高度な技術が要求される。しかし、これらはビブラートを用いることにより音高幅が広くなり、その中から音が共鳴する周波数が大きく聞こえるように響き、自然と奏者もその音高に寄っていく傾向が起こり、結果的に各組み合わせに最適な音高が選択されるようになる。

3-4-5 効果⑤音色変化を操作できる

各楽器において、音色を変化させるのは発音機構を操作することによる。各楽器は固有の発音周波数フォルマントを持ち、これを基本構造から変化させることは電子楽器のような発音構造を持たない限り難しい状況である。どの楽器においても、ビブラートを行うと楽器胴体の残響とビブラートにより変調された音が加算された場合、位相の遅れにより生じる音の波形の変化が起こる。位相の遅れ具合により、増強されたり、減算されたりする周波数帯が異なることにより、ひとつひとつの音色とは変わって聞こえるようになる。電子楽器では位相を変更するためにフェイザーというフィルターを使用するが、ビブラートにおいても全く同様の効果が得られる。ヴァイオリンではビブラートと共に、弓を擦る位置や圧力の変化、弦に当てる弓の毛の量の変化、更には楽器の向きや位置を演奏者の姿勢により変更することにより、更に大きな音色変化を行う。

3-5 鍵盤楽器におけるビブラートとは

このように考えてくると、音楽におけるビブラートは様々な場面で有効な演奏技術であり、経験に基づいた音響技術だということが判る。このように音楽そのものの表現力や音響学的な強い伝達力を持つ有効な演奏技術は、音高があらかじめ設定された鍵盤楽器では無効なのだろうか。ビブラートは本来意識された音の変調なので、予め調律などによりプリセットされた楽器では無関係のように思われるが、微妙な音高の揺らぎが、楽曲にどう関わるかということを考えた時、鍵盤楽器における音高の問題まで広げて検討すると、鍵盤楽器では同時に鳴っている音同士の関係がうねりを持つという意味では、ビブラートのように「ゆらぎ」を扱う重要な要素を担ってい

ることに気付く。

鍵盤楽器においては現代ピアノにおける調律と、J. S. バッハの時代では調律法が異なるという話に象徴される調律法がとても重要な鍵を握っていると思う。J. S. バッハが「平均律クラヴィーア曲集」という作品を作曲した際、良く調律した“Wohltemperierte”のピアノで、と表題に書いているが、日本では長らく「平均律」に良く調律されていると思われていたことに由来する。

現在の研究によれば、バッハが目論んでいたのは現在の12平均律（対数により数学的に同一の周波数比を持つ音階）ではなく、ヴェルクマイスターやキルンベルガーなどの古典調律を指していることがはっきりしている。実際、1つの音に単音、つまり1つの弦しか鳴らないスピネットチェンバロを現代の数学的同一周波数比による平均律で調律すると、和音や旋律が美しく鳴らず、常に同じような音の濁りを感じる。この感覚を言語で表現する方法は人によって様々だと思うが、幾つか別の調律法と具体的な2音で対比するとはっきりする。平均律に対し、純正調という調律法では、転調が無ければという前提ではあるが、一説にはとても綺麗に響くと言われている。しかし、現実には特定の調に限定した純正調に調律したもので演奏すると、うねり、つまり倍音構成上に起こるビブラートが全く無くなるものになり、響き自体は簡素で力強さなどが感じられない状況となる。

純正調にて調律された楽器では、2音を演奏した時、多くの音高で全くうねりが生じなくなる。純正調で調律するという事は、基準周波数の単純な整数比倍の周波数である2音となるように調整するという事である。うねりというのは、例えば440 Hzの音と441 Hzの音が同時に鳴る音の加算合成が起こると、前項で検討したビブラートのように1秒間に1回の強弱の波が出てくる。もし同時に同じ周波数の音が出た場合は位相関係が変化することはないので、音の最初から最後まで初期状態と同じ音量が続く、または単純に減衰することとなる。響きとしては立ち上がり急峻で持続音にうねりがなく平板に聞こえ、持続時の音の広がりがないような感じがする。

これに対し古典調律とされる各調律法では、毎秒0~3回のうねりが出るように調律していく。これは音律の分け方により約3 Hz程度の差が起こる状況となるが、それは音律の分割に起こる矛盾をどのように吸収するかという選択により変わってくる。単純なヴァイオリンのビブラートとしては大きな変調幅のように感じるが、現実的には楽曲に使用される12音あるうちの幾つかの音程にて、どうしてもうねりが生じることになる。基本的には使用頻度の比較的低い音程に、この大きな周波数差の部分を割り当てることが多くなる。楽曲の中で使用される音高により、うねりがほとんどない音程関係からかなり緊張した音程関係まで様々に選択して作曲に用いることができる。

この使用頻度の低い音というのは必ずしも使用しない音ではないことに注意が必要である。つまり楽曲内において通常の緊張感の音程関係には使用しないが、ここはという緊張させて演奏したい部分に、この最もうねりのある音程関係が発音されるように設定することが可能となる。楽曲において緊張した音程関係、つまり弦楽器等であればビブラートをより早く演奏し強い効果で演奏を行いたい場合に、3 Hzにも至る変調周波数の速いうねりを用いることができるということになる。具体的には減7の和音と言われ、ベートーヴェンなどのロマン派の作品には、緊張する部分に活用されることになる。

ここでは、古典調律の1つでJ. S. バッハも使っていたとされるヴェルクマイスター第3技法を取り上げる。この第3技法という番号だが、第1技法は純正律、第2技法はピタゴラス調律、そして3番目の調律法としてヴェルクマイスター調律という意味で第3と名づけられている。

西洋クラシック音楽の発祥はグレゴリオ聖歌に見られるようにとても古いものだが、最初は斉

唱だった音楽が、音の倍音をたどって音楽の要素を拡張し始めたのがこの17世紀終わりから18世紀にかけての時代である。最初は男女差によるオクターヴ差、つまり第1倍音の周波数差で歌うことを意識することから始まった。次に第2倍音である完全5度、その後長3度と徐々に複雑な音程関係（周波数比）を経て、作曲の技法自体を進化させた。

ヴェルクマイスター（Andreas Werckmeister 1645～1706）は音楽的調律〔Werckmeister, *Musicalische Temperatur*, 1776〕により音律の周波数を数学的に著したため、音楽家というより楽器の技術者のように思われがちだが、それは音楽家の仕事や専門性を保つ守備範囲が21世紀の現代風に分化されている時代とは異なるので、より広い分野からそれぞれの事象を研究することが常識であった状況と捉える必要がある。ヴェルクマイスターの著作では《和声的音楽》〔Werckmeister, *Harmonologia Musica*, 1702〕においてモノコルド⁽³⁾にて各音の周波数比を詳細に調べ、どの組合せがよく響くのかを検証している。また《通奏低音における最も必要な注意事項とルール》〔Werckmeister, *Die nothwendigsten Anmerckungen und Regeln wie der Bassus continuus oder General-Baß wol könne tractiret werden*, 1698〕では、同時に発音される音がどのような倍音比率の関係であれば良い響きが得られるのかという、物理的性質による通奏低音の検討から始まり、それぞれの音程の組み合わせによる響きを時系列方向の関係より強く検討した6声のCanonの試作も見受けられる。いずれも中世の音楽についての記述であり、現在音楽学校で習う和声法のように音の組み合わせによる機能の付与といったものとは異なる。厳正な2音間の周波数比を倍音関係から割出し「音楽は数理的科学である⁽⁴⁾」と述べている。ヴェルクマイスターの著作を見る限り、音楽家は音楽を楽しむために扱うのではなく、自然の摂理を解き明かす学問の1つを扱う特殊な専門家としての存在であったことが窺われる。これは古代ローマにおける音楽の自然科学上の分類と同じように思われる。その後出版された、世界で初めての和声の教科書と認識されている《調和的倍音または音楽の理論と実習論》〔Rameau, 1737〕のように、自然な音階、音の係留やカデンツ、そして限定進行音のような考え方はまだ見られない。

紀元前6世紀頃、楽器が原始的なものであった時、南イタリアのピタゴラスの活動にみられるように、学問は天文学、数学、音楽について研究された。特にピタゴラスはすべての事象は数の法則に従い、数学によって解明できるという思想を持っていたため、音楽に関しても同様の調和を求めた。つまり、うねりのない調和した音程関係が重要であり、それらの成果がピタゴラス音律となる。この影響は非常に強く、このピタゴラス音律に対し新しい理論や音楽を提唱したヴェルクマイスターを始めとする音楽家（作曲家や演奏家）が出現するまで約2000年かかっていることになる。これはまさに地動説の提唱から承認までと同じ時期となる。大航海時代に対応した正確な天体学の必要により、コペルニクスによる16世紀に出された地動説や、ガリレオの望遠鏡利用による膨大な天体観測による証明が、それでもキリスト教から安易に認めてもらうわけにはいかなかったのは既知の事実である。ガリレオの「それでも地球は動いている」という言葉に見られるように、キリスト教の影響は絶対であった。科学で証明できた問題についてもこのような状況だったので、音楽にも同様に大きく影響している。音楽も同様に、それまで用いられていたピタゴラス音律が実はピタゴラスコンマが生じる矛盾があったことに目をつぶっていたのに対し、ヴェルクマイスターやラモーによる科学的な方法を用いて各音程を測定し、数学的な思考による協和音程を探し、それらを再現するために数多い推論をたて、古典調律をつくりあげた。これをきっかけに音楽は単音から複音へ、音程関係も単純な倍音関係から複雑な音の構造へと発展していく。

これは音楽にとって大きな改革になった。それ以後、音楽は様々な可能性を見出し、機能和声

が充実し、多くの作曲家の独特な音の使い方であるスタイルの考案や、それを拡張して楽器を超えた音素材の利用にまで至る成長のきっかけとなる。表現内容も多くの分野と同じように、技術の発達から宗教を始めとする様々な束縛から逃れ、より人間の本質を追求する大事なきっかけとなっている。

さて、技術の発達により、楽器の性能も向上した。特にピアノでは音域が広くなり音量が出るだけでなく、音も持続するようになった。鍵盤楽器においては、クラヴィコードや原始的なチェンバロなどは音高が正確に保てなかったところ、鋼線も良いものが開発され、技術の発達によりその音高の正確さや調律の入念さも目立つようになってきた。時期的には、ヴァイオリンでは現在銘器とされるアマティやストラディバリウスなどイタリア・クレモナで盛んに制作された時代である。

産業と共に音楽も発展し、他の楽器との合奏も含め、正確にそして汎用性が高い音律が求められるようになってきた。純正律のオルガンは音の響きが美しくなるが、そのために黒鍵を2段以上に装備し、制作技術も演奏技術も煩雑で広まることはなかった。楽器を演奏するのは古くは特別な役職であったものが、時代と共に身近になり、楽器にも触れる人々が多くなった時、簡単に演奏でき、簡単にメンテナンスができ、そしてそれを複雑に使っていくことができる可能性を持ったものが生き残ってきた。

現代では鍵盤楽器の多くに調律は全音程に平等なものとして平均律が用いられる。これは良くも悪くも音組成を簡素化し、多様化した音楽の発展を手助けしたことは言うまでもない。現在では様々な電子楽器がこの平均律に基づいて設計されているし、現代のピアノはこの平均律により調整されることがほとんどとなった。

しかし、平均律では、同じ音程では常に同じうねりを生じるだけで、特定の音を強く意識する発音を選択することができない。作曲家はあらかじめ自分の選択した調律法に基づき、強調される音程を経験の中より探し出し、その音程を効果的に利用して作曲してきたと想定される。そのような状況を考えたとき、どうしても平均律と「作品に適切な調」との適合性を再検討する必要があると気づいた。その顕著な例が、J.S. バッハにより論理的に全調を用いて作曲された「平均律クラヴィーア曲集」である。音楽家がまだ作曲家と演奏家に分離しなかった時代なので、自分が数々の演奏と作曲をしてきた経験による音程選びは、より具体的で顕著なものであったと推測される。

古典調律では調律の手法や要求により、各音の周波数設定がかなり異なる。ヴァイオリンの音程も小さな半音、大きな半音という呼び方があるように、各人によって音程の選択は非常に多岐にわたる。ピアノの調律においても古典派と言われるモーツァルトなどの遠隔転調の少ない作曲家の作品には十分効果が認められる。またベートーヴェンがよく用いた減7の和音と言われる音程の組み合わせは、平均律で調律されたピアノより、より強い緊張感とうねりを生み出す。

ピアノは演奏会の途中でも、演奏家の強い打鍵により調律が狂ってくるため、完全なうねりの管理が練習段階では計画できない。しかしオルガンでは基本的には調律が狂うことはないため、楽曲の中にて不協和音、協和音を感じさせるうねりや、変調周波数が高く更に複数個所で起こる濁りとして認知される部分が常に発現するため、それら副次的音響を計画的に演奏することが可能である。

3-6 オルガンにおける音律

オルガンの調律では現在幾つかの代表的な古典調律法を用いて調律を行っている。オルガンで

は調律を変更する際その発音パイプの数や調整箇所が多いことから、一度の調律に数日から一週間かかり、簡単に変更することができない。更に時代様式や作曲された国や宗教圏により全く異なる要求がなされるので、とても悩ましいところである。また演奏会中に音程調整ができないことは、ピアノよりも更に厳しい状況である。たとえば東京芸術劇場のオルガンでは、筐体反転や発音パイプの送風口を複数作るなどの特殊な構造を経て、3つの主要な調律により9000本のパイプが調整されている。調律法及びピッチは以下のようにになっている。

- | | |
|----------------------|------------|
| ①ミーントーン調律法 (4/1 中全音) | A = 467 Hz |
| ②バロック調律法 (詳細なし) | A = 415 Hz |
| ③モダン調律法 (平均律) | A = 442 Hz |

絶対音感があり、様々な調律法の変化に慣れない場合、同じAの音とは認知できないほどの基本周波数の違いもある。バロック調律法 A = 415 Hz はモダン調律法 $G_{is} = 416$ Hz とほとんど変わらない周波数となる。②バロック調律法から①ミーントーン調律法までは全音以上の隔りがあり、全く違う音名として認知される。東京芸術劇場の②バロック調律法から③モダン調律法の設定変更時、同じ鍵盤の音がバロック調律より半音高い周波数がモダン調律法 (平均律) となるので、コンピューター制御により半音異なる別の発音パイプを鳴らすようにしている。これは最近の新しく作成された楽器ではしばしば行われることで、古典調律で調律されるチェンバロでも行われる。鍵盤を半音分ずらし、発音できるように機構し、バロック調律ピッチのヴァイオリンなどの他の楽器との合奏が行えるように工夫した機構である。

調律法と同様に、各音の周波数比を保ったまま音階セット全体の音高を変化させるピッチの問題についても、楽曲の表現について変化があるとされている。古くは修辞学において、それぞれのピッチについても述べられているが、ピッチについては主に教会オルガンで用いられていた非常に高いミーントーン調律法 A=467 Hz と他の弦楽器等と合奏していたバロック調律法 A=415 Hz では既に半音以上異なるので、修辞学における各記述も演奏する立場によってどちらの調律法やピッチを用いたのかははっきりせず、論述内容から有効な情報が得にくい状況である。

更に一部弦楽器では、パガニーニが行ったといわれた高いピッチでの調弦を行い、弦や弓に張力を与えて輝きのある音色を得たとされているため、音色や調性の修辞学は時と共に変化するし、特色ある調律法の選択でも変化する。修辞学としては参考の域を超えるものが見当たらない状況となる。修辞学上の記載としてはマデゾンが書いた《新しいオーケストラの響き》[Mattheson, 1713] がよく参照される。

調律法による変化は、個々の音程の周波数比、全体のピッチ以外にも音域による周波数調整がある。ドビュッシーの作品に見られるように、非常に広い周波数差による同音の周波数は同じ音でも整数倍ではなく、調律により違いが出てくる。《沈める寺》にみられるように完全5度とオクターヴがほとんど最高音域と最低音域で同時に鳴る場合、高い音はより高く調整する必要があり、低い音はより低く調整しないと聴感上同じ音名に聞こえないという特徴がある。これは人間の聴感上の特徴であるため、物理的特徴とは矛盾が生じる。またこの例のように異なる周波数帯による聴感上の錯覚は、うねりと周波数比についての検討と同じく、具体的に耳で聞き、楽器で演奏して検証する必要がある。具体的な計算例ではドの音が約 500 Hz として計算しやすく、なおかつ音声の基本周波数に近いためモデルとして取り上げたが、これが同じドの音でもオクターヴ高ければ、同時に鳴る他の音と同じ周波数比でも、うねりは倍になることが判る。つまり、ど

のオクターヴ域を採用するかによってもうねりに関して異なる事象が起こるということとなる。

進んで考えると、白鍵の音を中心に構成されたハ長調の楽曲を演奏すると仮定した場合、近親転調であるト長調に完全5度上昇、つまり周波数が1.5倍に上昇した属調に転調や移調するだけでうねりも1.5倍の周波数になり、体感としての緊張度は上昇してしまうことになる。これは、対数比と絶対値の差の関係を検討する必要がある。

3-7 機能และ声における響きの特性

多くの音楽作品はメロディーをもち、複数の音の関係から作品全体を構成している。音楽のフレーズ（節）を考えると、機能和声は非常に重要である。ヨーロッパ発祥の音楽は、邦楽と異なりすべての音のステータスが異なっている。そのため、作曲や演奏時には作品の分析（アナリーゼ）が必須となるが、その際に各まとまりを示す調の分析が鍵となる。通常、調はドミナントと言われる属和音ソ・シ・レの和音により誘導されたトニック主和音ド・ミ・ソの判別によりなされる。更にもう1つ加えるなら、機能和声の大きな音組織グループのサブドミナント下屬和音ファ・ラ・ドも大きな要素となる。

この内の二種の和音は、すべて長3度の上に短3度を積み重ねたものであるため、平均律では2つの和音は全く機能差が無い。しかし、ドを主音にした純正律では下記のように差が生じる。

この3つの和音は、機能和声で最も性格の異なるもので、図6の和音（サブドミナント）、図7の和音（ドミナント）、図8の和音（トニック）と繋がることにより、曲として認められる最も小さな形であるカデンツを構成する。ここで観察するポイントは、3つの音を加算した時にできる波形が、サブドミナントからトニックに向かって、うねりに相当する波形の変調周波数が下

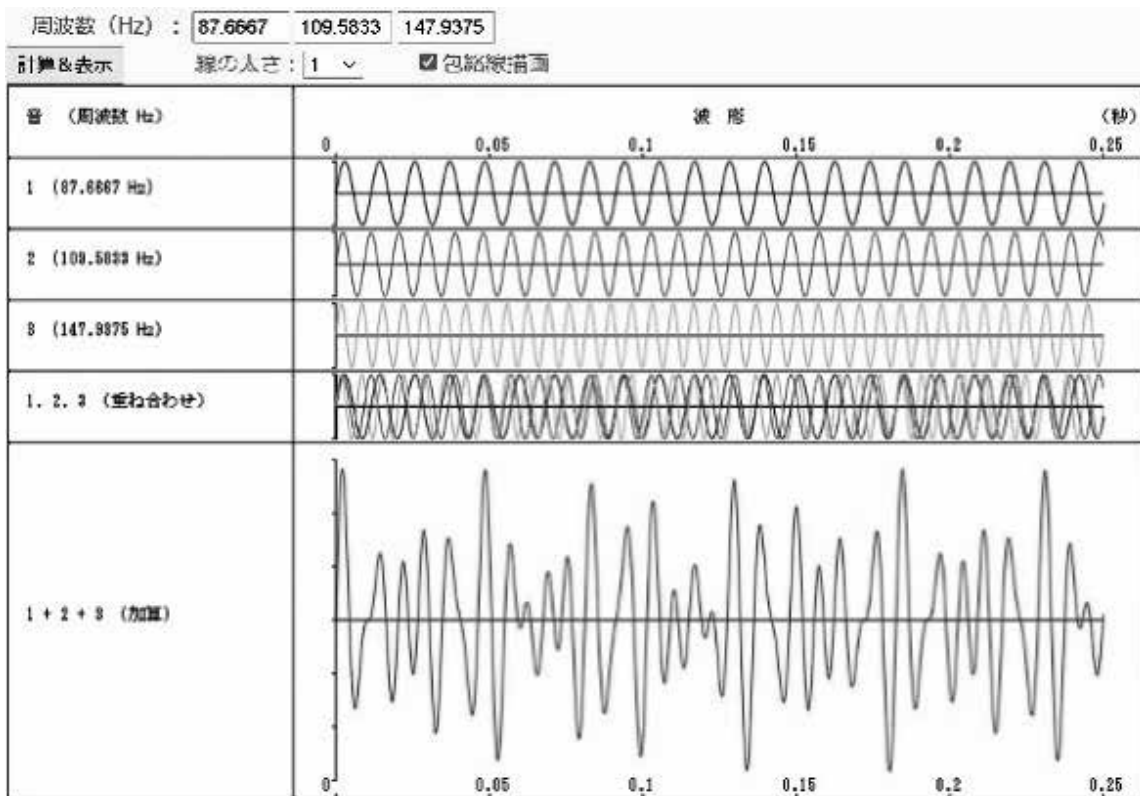


図6 ファ・ラ・レの和音

(以下、図6~11は <http://k-ichikawa.blog.enjoy.jp/>にて計算実施)

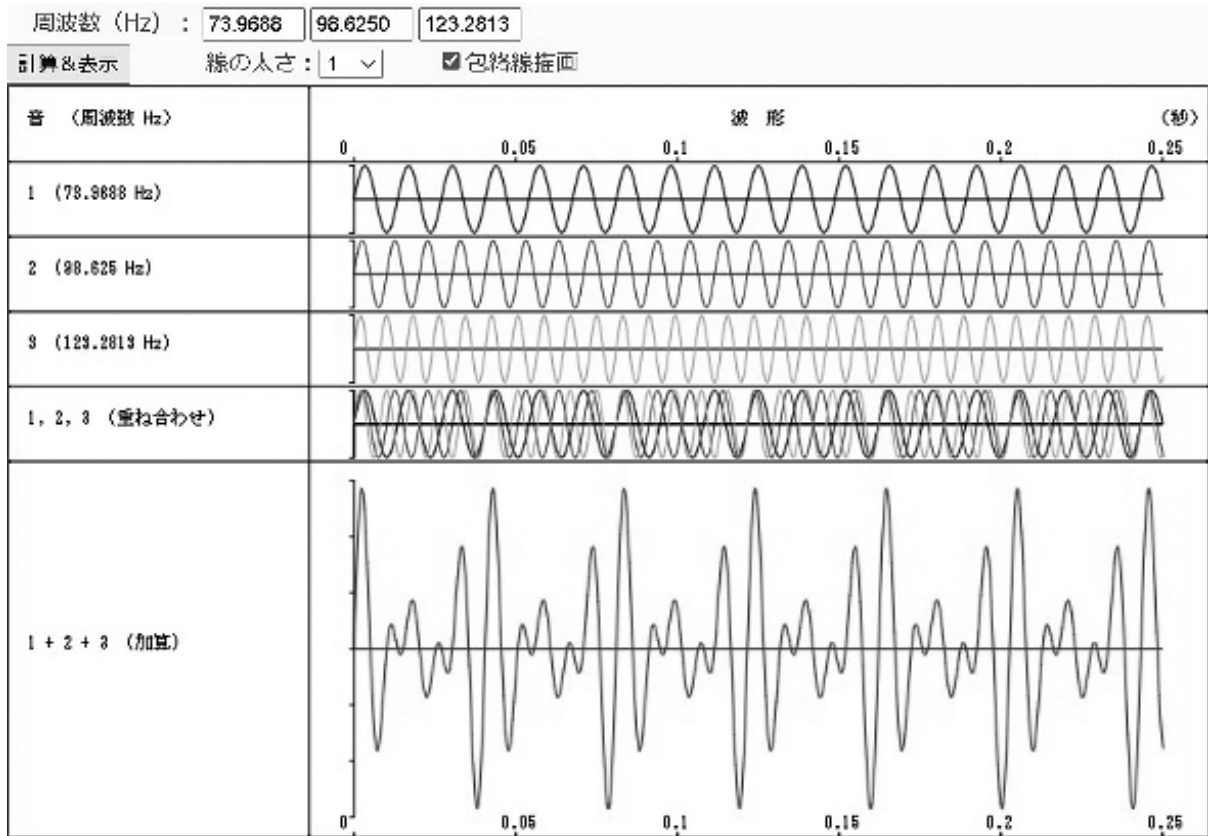


図7 レ・ソ・シの和音

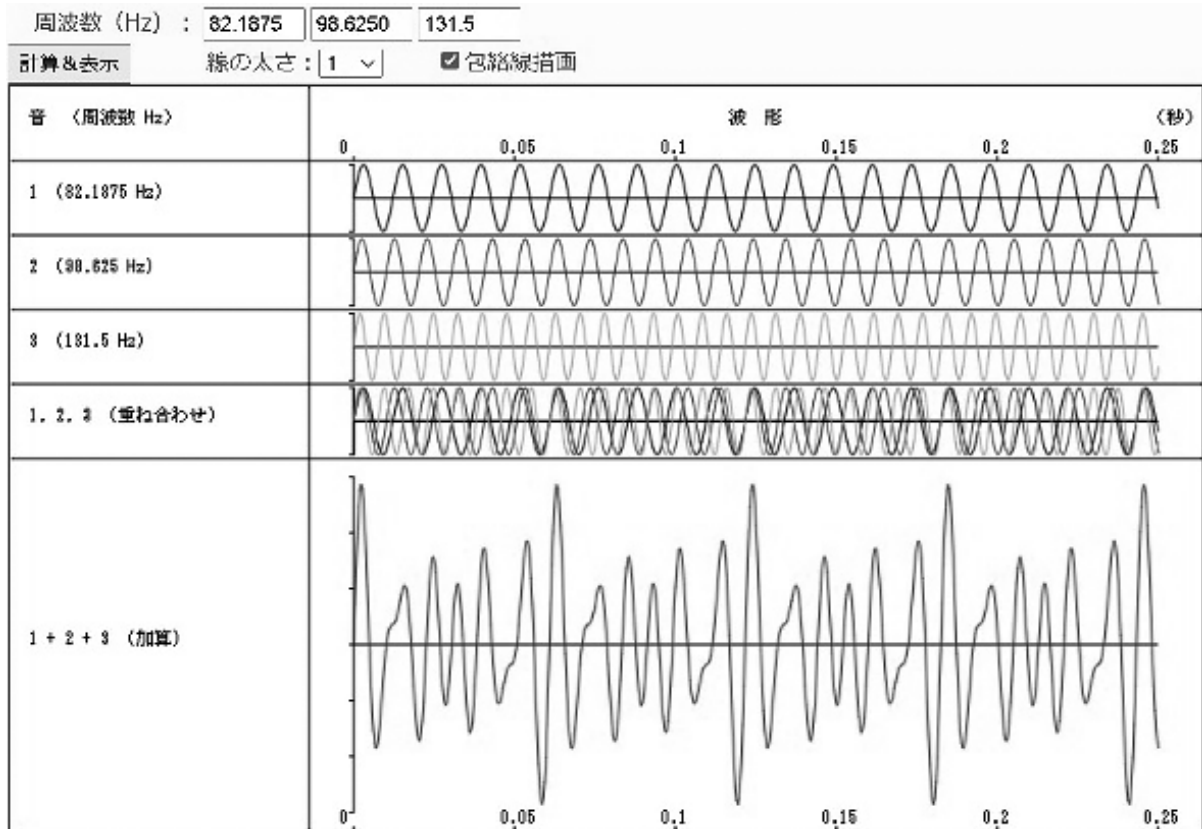


図8 ミ・ソ・ドの和音

がっているのが判る。図6では不定期にピークが約7回/0.2秒、図7ではかなり規則的に5回/0.2秒、図8では約3.5回/0.2秒となっている。

波形の出現では、図6ではピークの間隔が不定期になっているため、安定した音の速度感よりも不安や柔らかさを感じさせる響きであることが推測される。また図7から図8は両方とも波形の安定したうねりが見られ、図8への繋がりほうねりの減少が見られる。この和音の接続は完全終止と呼ばれる形だが、心理学のゲシュタルト理論における物事の単純化によるカタルシスという状態が、3音加算波形の状態の変化よりみてとれる。

また、図6のファ・ラ・レの音の配置は、機能声学では特にこの和音の最適配置と言われ、ファ・ラ・レの音の並びとしては最も美しいものだと和声学では主張されている。これも図9～図11のように音高の配置による変化を比較してみる。

図9から図11までは同じ和音の構成音だが、最初に記載された音が最低音となり、それから1つずつ周波数の高い音に移行する形で、レ・ファ・ラの3つの音を並べ替えている。最も定常的にピークが出ているのは最適配置とされる図10のファ・ラ・レの配置であることが判断できると思われる。

もちろん最適配置のうねりは10 Hzを超えるものなので、ビブラートというよりむしろ音に近いものかもしれない。人間は約20 Hzの振動から音を感じるので、この定常波の第1倍音であれば、ブーンといった音として認識する人もいるかもしれないし、また空気の不気味な振動として聞こえない響きとして感知する場合もある。これを特にその周波数の音が鳴っていないにもかかわらず認知される missing fundamental として表す場合もある。

このように音は単に発音されている周波数だけでなく、複数の音における干渉波として新たに

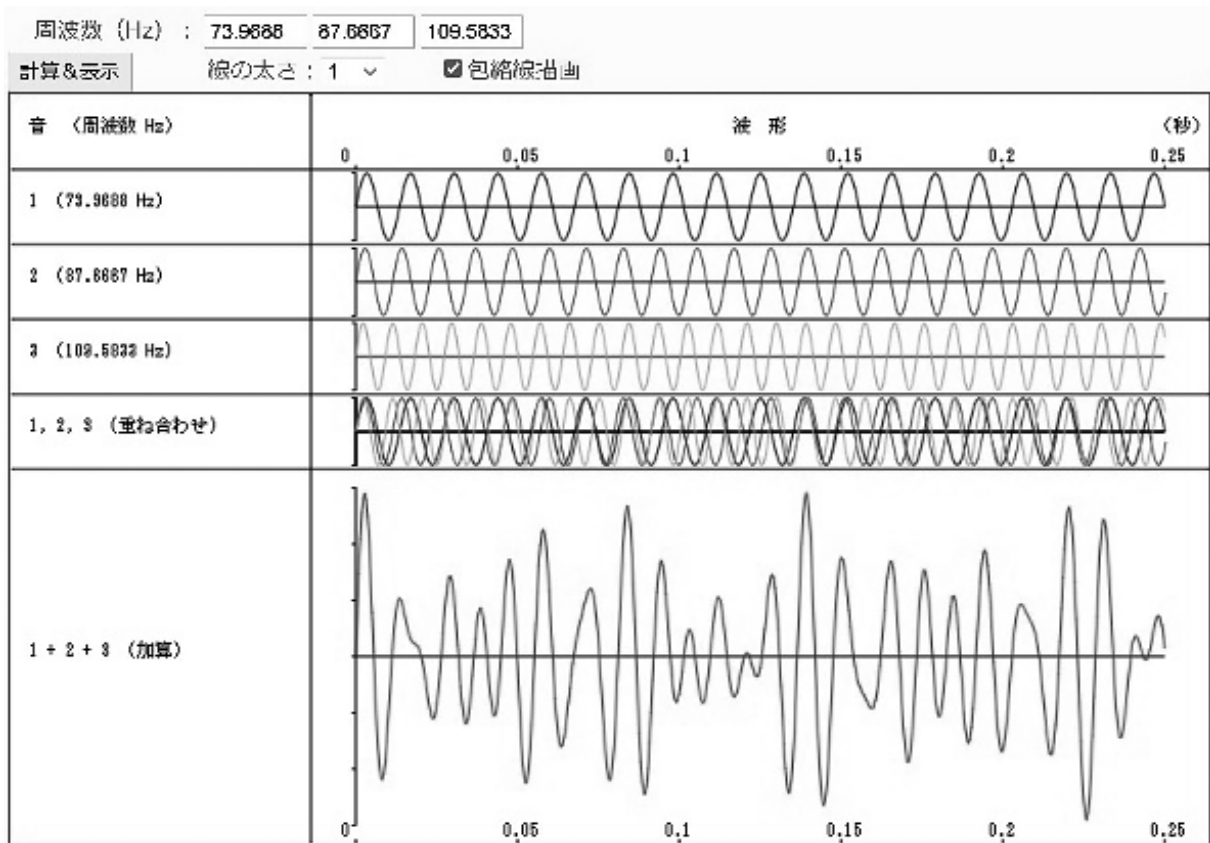


図9 レ・ファ・ラの和音

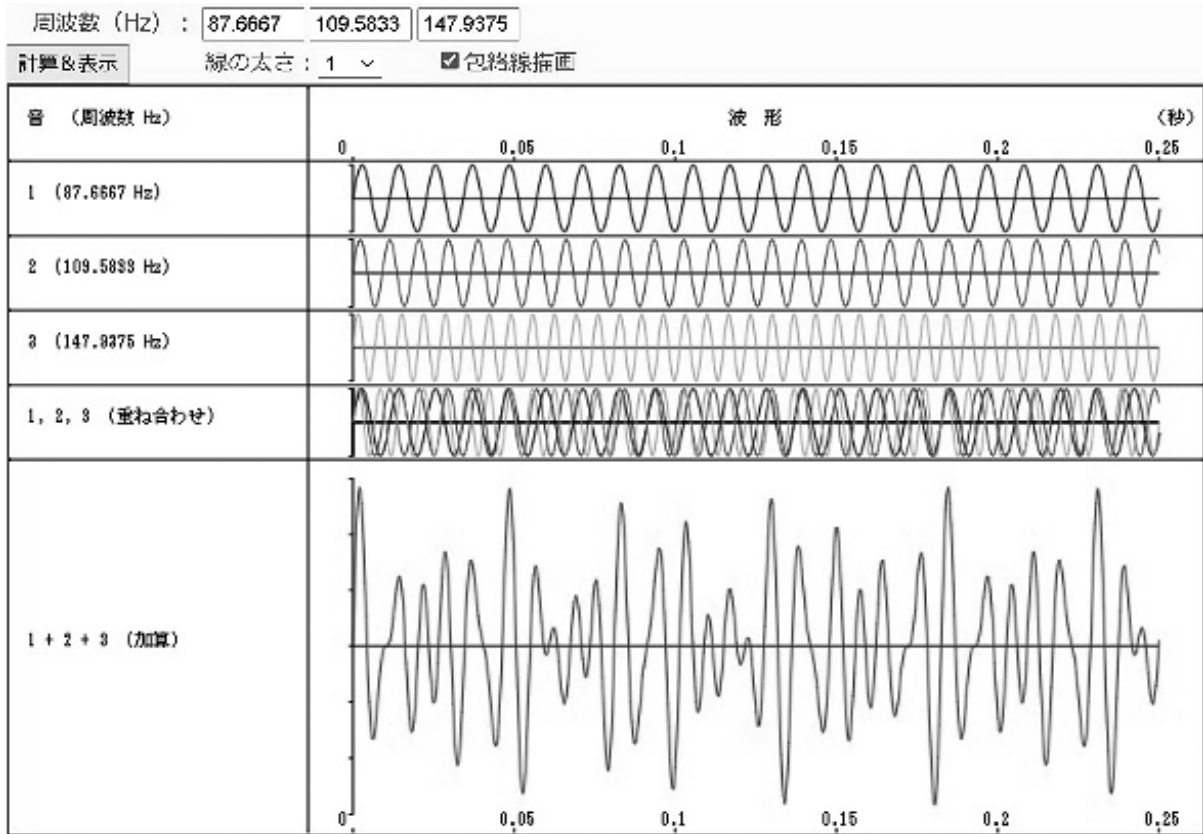


図10 ファ・ラ・レ (最適配置) の和音

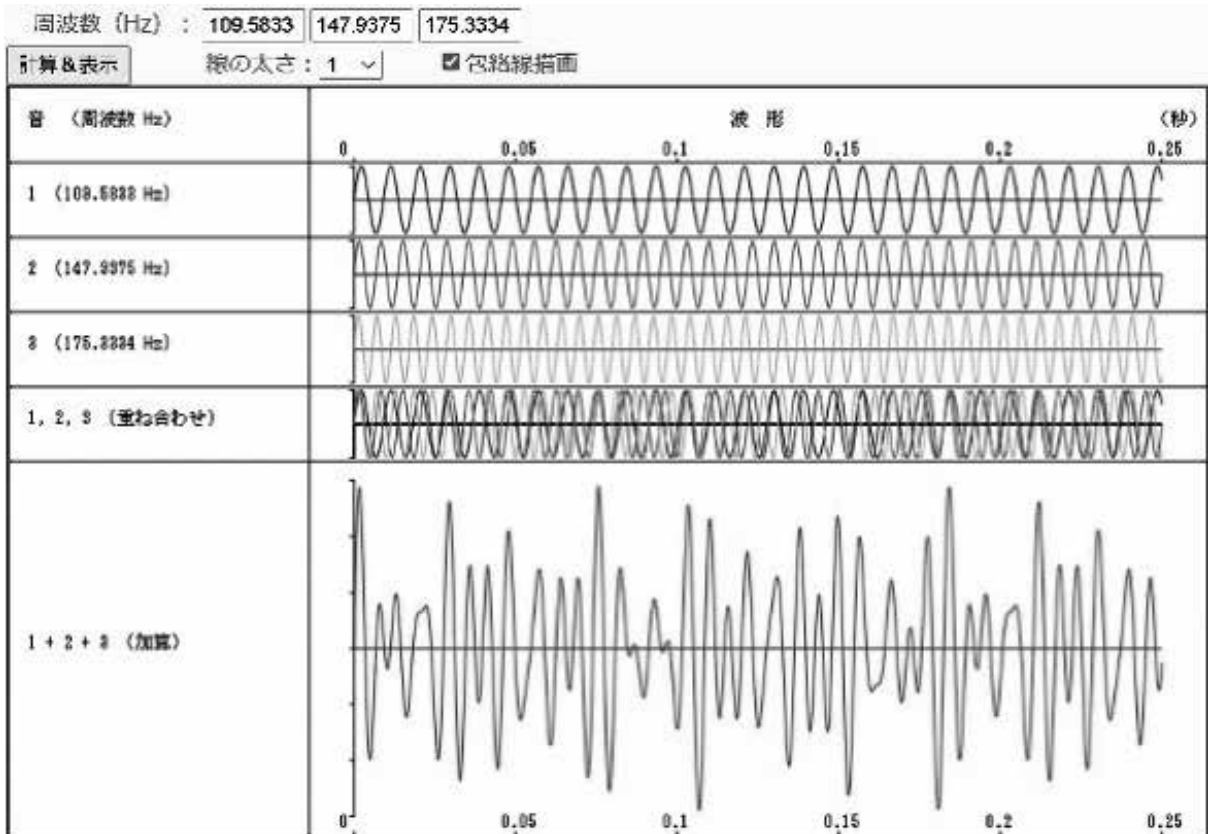


図11 ラ・レ・ファの和音

表 1 各種調律の周波数計算および平均律との周波数差

基準周波数 C=66.5 Hz

	平均律	平均律 (比)	周波数	ピタゴラス	ピタゴラス (周波数比)	周波数	周波数差	純正律	純正律 (周波数比)	周波数	周波数差	ウェルク マイスター (周波数比)	ウェルク マイスター 周波数	周波数差
C	$=2^{\wedge}((1-1)/12)$	1.0000	65.7500	=1	1.0000	65.7500	0.0000	=1	1.0000	65.7500	0.0000	1.0000	65.7500	0.0000
Cs	$=2^{\wedge}((2-1)/12)$	1.0595	69.6597									1.0535	69.2675	-0.3922
D	$=2^{\wedge}((3-1)/12)$	1.1225	73.8019	$=(3/2)^{\wedge}2*1/2$	1.1250	73.9688	0.1669	=9/8	1.1250	73.9688	0.1669	1.1174	73.4693	-0.3326
Es	$=2^{\wedge}((4-1)/12)$	1.1892	78.1904									1.1852	77.9259	-0.2644
E	$=2^{\wedge}((5-1)/12)$	1.2599	82.8398	$=(3/2)^{\wedge}4*(1/2)^{\wedge}2$	1.2656	83.2148	0.3750	=5/4	1.2500	82.1875	-0.6523	1.2528	82.3734	-0.4664
F	$=2^{\wedge}((6-1)/12)$	1.3348	87.7657	=1/3*2*2	1.3333	87.6667	-0.0991	=4/3	1.3333	87.6667	-0.0991	1.3333	87.6667	-0.0991
Fis	$=2^{\wedge}((7-1)/12)$	1.4142	92.9845									1.4047	92.3567	-0.6279
G	$=2^{\wedge}((8-1)/12)$	1.4983	98.5137	=3/2	1.5000	98.6250	0.1113	=3/2	1.5000	98.6250	0.1113	1.4949	98.2914	-0.2222
Gis	$=2^{\wedge}((9-1)/12)$	1.5874	104.3716									1.5802	103.9012	-0.4704
A	$=2^{\wedge}((10-1)/12)$	1.6818	110.5779	$=(3/2)^{\wedge}3*1/2$	1.6875	110.9531	0.3752	=5/3	1.6667	109.5833	-0.9945	1.6704	109.8312	-0.7467
B	$=2^{\wedge}((11-1)/12)$	1.7818	117.1532									1.7778	116.8889	-0.2643
H	$=2^{\wedge}((12-1)/12)$	1.8877	124.1195	$=(3/2)^{\wedge}5*(1/2)^{\wedge}2$	1.8984	124.8223	0.7028	=15/8	1.8750	123.2813	-0.8382	1.8792	123.5601	-0.5594
C	$=2^{\wedge}((13-1)/12)$	2.0000	131.5000	=2	2.0000	131.5000	0.0000	=2	2.0000	131.5000	0.0000	2.0000	131.5000	0.0000
Cs	$=2^{\wedge}((14-1)/12)$	2.1189	139.3194									2.1070	138.5350	-0.7844
D	$=2^{\wedge}((15-1)/12)$	2.2449	147.6038	$=2*(3/2)^{\wedge}2*1/2$	2.2500	147.9375	0.3337	=9/4	2.2500	147.9375	0.3337	2.2348	146.9385	-0.6652

知覚される音や、うねりなどの状況を生むことが多くあり、その原因と効果はまだ調査する必要があるし、音楽家としては、それらを含めて音の成果として観察し、また意図的に操作する必要があるように思われる。最後に音律計算表（表1）を載せて、明らかな数値の違いを確認したいと思う。

まとめ

このように考えてくると、私たちが現在知っている西洋音楽は決して単純な規則の上に成り立っているのではなく、音階として認識しているドレミファソラシドそれぞれの周波数は様々であり、場合によっては違う音名として認識できるほど違っていることが判った。

基準となっている約2倍の周波数内を12に区切る方法も数多く存在し、また周波数の差異が1Hzに満たないものでも楽曲の表現に変化を起こしていた。主な古典調律法と数学的に平均化された平均律では、約3Hzの違い（常用女性又は小児音声域）があり、音高を調整できる弦楽器や管楽器のみならず、プリセットされたピアノやオルガンのような鍵盤楽器においても積極的に利用されている現状を確認した。

音律はまだ不明瞭な点が多く、その音楽的利用法は試みられている最中であることを改めて認識した。現在教育現場では、絶対音感の教育や、厳しい速度での聴音が実施されているが、それらはまだまだ基本構造から変革の余地があり、注意を持って扱うべき事柄であると結論づけるものである。

音階が12音であることも、ヨーロッパ音楽ばかりを専門に数十年教育を受けると、まるでそれ以外の世界が無いように感じていたが、それすらも安定せず、世の中には16音平均律、17音平均律を始め、様々な比率の音律が存在し、それらも音楽的作品として認められていることが

判ってきた。

音律についての考察と実験は、物理的、数学的模索だけでなく、音楽的な価値観から再考することにより、更に音楽において有効な利用方法が見つかる可能性を感じ、次の研究では更に複数音での音律の効果が判るような表現方法を模索していきたいと考えている。

《注》

- (1) 坂井建雄、河原克雅他『人体の正常構造と機能』東京、日本医事新報社、2017年。
- (2) 計測規格として ANSI C 165-1942、British Standard BS 6840、IEC 60268-17 や 1993年に廃止された JIS C 1504-1976 などがある。また各国の放送基準 DIN、EBU、British Nordic などに加え、アメリカの Bob Katz が提案した K-System による表示方法がある。
- (3) モノコルド (Monocordo) は、1弦または数弦を長方形の胴に水平に張り、長さ、張力、弦の太さを調整して、音律の調査を行った楽器または計測器具。
- (4) Werckmeister, Andreas. (1686). *Musicae Mathematicae*. Hodegus Curiosus., p. 9.

文献一覧

洋書

- Mattheson, Johann. (1713). *Das neu-eröffnete Orchestre*. Hamburg: B. Schiller.
- Rameau, Jean-Philippe. (1737). *Génération harmonique, ou Traité de musique théorique et pratique*. Paris-France: Prault fils.
- Werckmeister, Andreas. (1686). *Musicae Mathematicae*. Hodegus Curiosus.
- Werckmeister, Andreas. (1686). *Musicalische Temperatur*. Franckfurt und Leipzig: Theodor Philipp Calvisius.
- Werckmeister, Andreas. (1698). *Die nothwendigsten Anmerckungen und Regeln wie der Bassus continuus oder General-Baß wol könne tractiret werden*. Aschersleben: Gottlob Ernst Struntz.
- Werckmeister, Andreas. (1702). *Harmonologia Musica*. Frankfurt & Leipzig: Theodor Philipp Calvisius.
- Werckmeister, Andreas. (1707). *Musicalische Paradoxal-Discourse*. Quedlinburg: Theodor Philipp Calvisius.

和書

- 小方厚『音律と音階の科学』東京：講談社、2018年。
- 坂井建雄、河原克雅他『人体の正常構造と機能』東京、日本医事新報社、2017年。

計算グラフ利用許諾

許諾 (掲載許諾) 2021/10/11 10:45

<http://k-ichikawa.blog.enjoy.jp/blog/2013/05/post-fd40.html>

2音の重ね合わせ

音律と音階の科学 (10) : 2つの音の重ね合わせとうねり

<http://k-ichikawa.blog.enjoy.jp/etc/HP/js/Beat/bea0.html> 2021/10/11 計算実施

3音の重ね合わせ

音律と音階の科学 (11) : 3つの音の重ね合わせと missing fundamental

<http://k-ichikawa.blog.enjoy.jp/etc/HP/js/Beat/beal.html> 2021/10/11 計算実施