

音律とピアノ調律

— ヤング6分の1音律ピアノ —

(音楽研究室) 岸 啓 子

The Pianoforte in Young Temperament

Keiko KISHI

(平成19年6月8日受理)

1 音律の選定——ヤング6分の1音律

これまでの一連のプロセスを経て、筆者はピアノに導入する音律にヤング6分の1音律を選んだ。ヴァロッティ＝ヤング音律とも呼ばれる中のヤングが提唱した方で、音律サークル上のC-Fis対角線を境に、左側6つを純正5度、右側6つを平均律より2セント狭い調整5度に割り振る。ウェルテンペラメントとはいえヤングの調整5度はシントニック・コンマとスキスマ(約24セント)を6つの5度に分割し、残りの5度を純正にするもので、古典音律と12等分平均律の間に位置すると言える。ヴァロッティや平島氏のヴァージョンは、この5度分岐線が時計進行方向から30度戻ったものである。選定の理由は以下のとおりである。

1. 698セント以下の狭い5度を含まない。

平均律700セントの5度に慣れた現代の耳には、3度がいくら純正であっても狭すぎる5度は不快である。これについてはアンケート結果と筆者自身の感覚が一致した。平均律5度は純正5度より2セント狭いが、調整された5度の中では広い。ヤングの5度はそれより2セント狭い。

ピアノは一般に倍音が豊かで、特に中低音域では第3倍音(5度)は強く響き、独立的に聴こえる。低音域では倍音が基音より強い場合もある。倍音に含まれる5度は当然狭くない純正の5度であるので、実音の5度が狭い場合、唸りが生じて美的でない。

更に倍音の5度(第3倍音)はピアノ弦のインハーモニシティによりピッチが理論値より若干高まる。従っ

て、低い5度とは実際のずれはさらに広がり、唸りはそれだけ問題となる。2音に共通する低次倍音間の唸りで調整してゆく調律では、5度を狭くしすぎることは技術的には可能であっても、ピアノの響き方に調和的でない。

2. 5度が均質であること。

ヤングでは純正5度と狭い5度が6個ずつある。しかもこれらは5度圏に連続しているので、調律時の流れが自然であり、転調時の和音の変化にも連続性がある。

ピアノの強い倍音は古典音律のクリアさを打ち消すようにも働くため、ある程度均質な5度を並べるほうが良好な結果を得られると判断される。

3. 平島氏のヴァージョンもよいが、F-Cに唸りの無い完全5度をいれる方が、F,C,G durそれぞれの調性感、和音の色彩感がより明らかになるように感じられる。C durのサブドミナントとしてのFACの3和音の美しさはたえようも無い。

4. 2種類の5度に限られているので、平均律に慣れ、古典音律に無縁のピアノ調律師が調律しやすい。平島氏も指摘するように、平均律の5度をもとに、6つの5度を2セント狭め、6つの5度を広げて純正完全5度とすることで、平均律の基盤からこの調律にスライド可能となる。

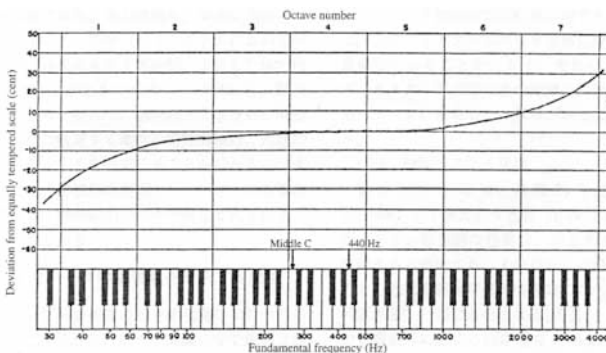
2 ピアノ調律と音律

鍵盤楽器を調律する際に用いる基本的なピッチ関係を

決める物差しが音律であるが、実際に楽器を調律するにあたって、音律がそのまま調律後の楽器の全音域にわたるピッチとほぼ一致する場合と、音律を楽器固有の特性と調和させるプロセスが求められる場合がある。チェンバロは前者で、オクターブは振動数を2倍または2分の1とし、特殊な調整はされない。一方同じ鍵盤楽器でもピアノでは、調律にあたりオクターブ伸張の調整が一般的に見られる。

ピアノ調律のオクターブ伸張とは、中央の2オクターブ程度の音域では音律どおりであり、オクターブも1対2の整数倍であるのに対して、低音域や高音域に進むほどにオクターブが広がり、オクターブ振動数比が1:2以上に伸張しているものである。オクターブ伸張の程度はピアノそれぞれで若干変わるものの、ピアノ調律には必須で、調律師がマスターすべき課題となっている。従って、仮にチェンバロとピアノを、同じ1点A=440Hzの基準ピッチで「正しく、音楽的に」調律した場合でも、両者の最高音域や最低音域の同名音にはピッチのずれがある。いずれの場合もピアノの高音域の音は理論値より高く、低音域の音は理論値より低く、最高・最低音にむかうほどその理論値からのずれが大になる。このオクターブ伸張は調律曲線と呼ばれている。

グラフ1 Railsback stretch in piano tuning 注1



調律曲線は一般に中央C音付近では2オクターブ程度音律どおりの数値であり、それ以後両側に向かって次第に伸張の程度を増してゆく。大きく把握するとそれは調律曲線とよばれるなだらかな曲線となるが、1音単位でそのピッチを比較すると凹凸が認められ、また、それも楽器個別に異なるばらつきがあり、一律に増減して行くものではない。逆に計算値により機械的に一律のオク

ターブ伸張を作り出した音律は、音律として評価が低い(「不自然である」という報告がある。溝部国光は、A3で±0セント、A2で-1セント、A1で-6セント、最低音のA0では-19セントとしている(注2)。これに対し古典音律推進者であり、松蔭音楽大学チャペルのオルガン音律検討者平島氏は、低音オクターブをゼロ・ビートにしても何らかの唸りはあるものの、溝部氏の値は(従って当然Railsbackも)大きすぎるように思われるとしている(注3)。このように調律師や聞き手の個性によっても異なる心理学的な領域と関連する問題でもある。

3 ピアノ調律法

調律曲線はピアノ弦の響き方の特性と関連し、そこから生じるもので、倍音を聴いてあわせてゆく調律プロセスと深く結びついている。一般的な調律法は以下のとおりである。ここでは調律師藤田尚志氏の談をまとめたが、一般的な調律法(注4)と特に変わる点はない。

① 基準音源にピアノA音をあわせる。

音叉(440Hz、これ以外に441や442も使用されることがあるがここでは440とする)を鳴らし、音叉の音にピアノのAをあわせる。ピアノのどの音にあわせるかには2種あり、A3(=220Hz)の2倍音と音叉をあわせるものと、A4(=440Hz)をそのまま音叉と合わせるものである。藤田氏はA3の2倍音を聴いてA3を調律する手法を採り、多くの調律師がこの方法によっている。A4を合わせた場合は、A4をもとにA3を取る。A3の倍音とA4音間のうなりを聴き、うなりが消えるようにする。

② 基礎オクターブを作る

4度、5度を反復してオクターブ内の12音をあわせる。ピアノは平均律であるので、その場合完全な5度・4度と比べて、やや狭い5度(2セント)、広めの4度(2セント)とする。必ず2音間の一番低いうなりに注目し、1秒間に現れるうなりの数で音程を調整してゆく。左側はピッチ調律済みの音、矢印は基準音に対して調律されるべき音の上下関係。右は調律してゆく音。音名は英語記載とする。A0がピアノ最低音。

藤田氏による

1. A 3 ↑ D 4
 2. D 4 ↓ G 3
 3. G 3 ↑ C 4
 4. C 4 ↓ F 3
- 検査 F 3 — A 4 F 3(5)とA 3(4)で確認(注4)
5. F 3 ↑ B ♭ 3
 6. B ♭ 3 ↓ E ♭ 3
 7. E ♭ 3 ↑ A ♭ 3
 8. A ♭ 3 ↑ D ♭ 4
 9. D ♭ 4 ↓ F # 3
 10. F # 3 ↑ B 3
 11. B 3 ↓ E 3
 12. E 3 ↑ A 3

A音を起点に4度と5度を反復して基準となるオクターブを作り、8度でそれを全音域に展開してゆく。割り振りの基準になるのはうなり(ビート)である。うなりは振動数の差によって生じ、1秒間に15回以上になると聞き分けが不可能になる。直接鳴らす5度や4度の2音の基音振動数差は、A 3-E 4では220Hz対330Hzとなり、その差(理論値)は110Hzで、毎秒110回の振動数の差がある。しかしこれはうなりとして感知されない。平均律のこの2音間でうなりとして聞かれるのは、共通する倍音間のうなりであり、A 3(第3倍音)-E 4(第2倍音)の間即ちE 5(理論値660Hz)で毎秒0.7回、2秒に3度のうなりである。純正律かつ調和弦の仮想ピアノの場合は理論値どおりで、うなりはない。(しかし純正5度ばかりで調律すると、最後の音でピタゴラス・コンマによる大変なうなりが生じ、使用不能となる)。平均律によるうなりは前章で見たように倍音間にピッチのズレがあるために生じる。比較される2音の倍音間に、上例のように理論上同一ピッチ

の音があったとしても、振動数・セント値は厳密には一致しないため、そのうなりを聴き、最小・最適に調整してゆくことが調律のポイントとなる。対象は毎秒15回以内の、強く聞こえてくる低次の倍音間のうなりである。

- ③ 基準オクターブをもとにピアノの高音域、低音域をオクターブであわせる。
- 基本的にはオクターブの倍音で合わせてゆく。この際、ピアノの弦のインハーモニシティにより、オクターブ倍音は整数倍より広く、高次倍音に進むほど理論値とのずれは大きくなる。従って低音域ピッチを決定する場合、特にこのインハーモニシティへの配慮が求められ、高次倍音とピアノ音ピッチの調和が重要となる。

ピッチに関する手順だけを抽出すると上の①～③となる。実際の調律では、最低音域の倍音の現れ方や、低次倍音だけではすまない美的な音感や統一感のための調整、3本のユニゾン弦の合わせすぎない合わせ方など更に複雑な要素が含まれる。

②で用いる2音間で、どのようにうなりが現れ、どのようにそれが処理されるのだろうか。平均律は既に何度も記したように1対2のオクターブの振動数を基に、12半音を等分割したもので、半音の振動数比は2をルート12で開いた値1.059463094である。A 4(1点a)=440.00のピアノ音の平均律振動数(理論値)は表1となる。これは既に他の音律との比較のなかで3和音の形態を前章に記述したが、ピアノの音域(88鍵A-C 8)にわたって音階で網羅したものをここに載せておく。調律に際して聞く倍音間のうなりを算定する基音の振動数となるので、2音の一致する倍音の振動数の差から倍音間のうなりの数をもとめることができる(理論値)。これは理論値であるが、2音間のうなり回数を計算する目安として重要である。

表1 A4(1点a音=440.0)の場合のピアノ88音振動数

音	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B
C										27.5	29.1	30.9
C1	32.7	34.6	36.7	38.9	41.2	43.7	46.2	49.0	51.9	55.0	58.3	61.7
C2	65.4	69.3	73.4	77.8	82.4	87.3	92.5	98.0	103.8	110.0	116.5	123.5
C3	130.8	138.6	146.8	155.6	164.8	174.6	185.0	196.0	207.7	220.0	233.1	246.9
C4	261.6	277.2	293.7	311.1	330.6	349.2	379.0	392.0	415.3	440.0	466.2	493.9
C5	523.3	554.4	587.3	622.3	659.3	698.5	740.0	784.0	830.6	880.0	932.3	987.8
C6	1046.5	1108.7	1174.7	1244.5	1318.5	1397.0	1480.0	1568.0	1661.2	1760.0	1864.7	1975.5
C7	2093.0	2217.5	2349.3	2489.0	2637.0	2793.8	2960.0	3136.0	3322.4	3520.0	3729.3	3951.1
C8	4186.0											

表2 平均律1オクターブ12音それぞれの倍音振動数(第8倍音まで)

	完1	短2	長2	短3	長3	完4	増4	完5	短6	長6	短7	長7	完8
半	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
基	1.000	1.059	1.122	1.189	1.260	1.335	1.414	1.498	1.587	1.682	1.782	1.888	2.000
2	2.000	2.119	2.245	2.378	2.520	2.670	2.828	2.997	3.175	3.364	3.564	3.775	4.000
3	3.000	3.178	3.367	3.568	3.780	4.005	4.243	4.495	4.762	5.045	5.345	5.663	6.000
4	4.000	4.238	4.490	4.757	5.040	5.339	5.657	5.993	6.350	6.727	7.127	7.551	8.000
5	5.000	5.297	5.612	5.946	6.300	6.674	7.071	7.492	7.937	8.409	8.909	9.439	10.000
6	6.000	6.357	6.735	7.135	7.560	8.009	8.485	8.990	9.524	10.091	10.691	11.326	12.000
7	7.000	7.416	7.857	8.324	8.819	9.344	9.899	10.488	11.112	11.773	12.473	13.214	14.000
8	8.000	8.476	8.980	9.514	10.079	10.679	11.314	11.986	12.699	13.454	14.254	15.102	16.000

平均律の1オクターブ12音各音上の倍音(第2~第8倍音)の振動数を1オクターブ起点の音の振動数を1としてあらわしたものの。

4 ピアノ弦のインハーモニシティ

ピアノ調律がフラットではなく、調律曲線を持つ理由は、ピアノ固有の弦の響き方にある。倍音(上部音)は一般に基音の整数倍だが、ピアノの場合は弦の剛性と張力により厳密には整数倍から若干の狂いが生じる。例えば管楽器では倍音が空気柱の振動によって生まれるのでその抵抗は問題となるものではなく、ヴァイオリンやチェンバロでもその妨害要素は無視できる程度に小さく、いずれの場合も理論どおりの振れが弦上に展開し、その結果倍音も整数倍である。ところがピアノでは弦が強い力で両側に引っ張られているので、ハンマーの打弦で振動

を始めた弦に、この張力が弦の振動を止めて逆方向に向かわせ、倍音を生む振動の速度が速められる。

インハーモニシティの第2の原因は、ピアノ弦自体が具える剛性である。この剛性も同じく弦上に現れる細かな倍音振動に影響を及ぼす。弦長の2分の1、3分の1、4分の1、5分の1等の分割点を節に振動している倍音振動は、弦が自らの固さのために節に揺れない部分を生じさせ、よってピッチが上がるのである。西口・森氏はピアノの弦のインハーモニシティについてA3、A4、A5部分音の振動数を表3、4、5のように報告している(注5)。

表3 A3の部分音振動数

次数	基音	2次音	3次音	4次音	5次音	6次音	7次音	8次音
音名	A3	A4		A5				A6
P 1	220.0	440.2	660.6	881.5	1103.1	1325.4	1548.6	1772.9
P 2	220.0	440.0	660.0	880.0	1100.0	1320.0	1540.0	1760.0
差	0.0	0.2	0.6	1.5	3.1	5.4	8.6	12.9

P1は実際のピアノ、P2は基音の整数倍倍音を出す弦を持つ実在しないピアノ

表4 A4の部分音振動数

次数	基音	2次音	3次音	4次音	5次音	6次音	7次音	8次音
音名	A4	A5		A6				A7
P 1	440.0	881.1	1324.2	1770.5	2220.9	2676.6	3138.3	3607.3
P 2	440.0	880.0	1320.0	1760.0	2200.0	2640.0	3080.0	3520.0
差	0.0	1.1	4.2	10.5	20.9	36.6	58.3	87.3

P1は実際のピアノ、P2は基音の整数倍倍音を出す弦を持つ実在しないピアノ

表5 A5の部分音振動数

次数	基音	2次音	3次音	4次音	5次音	6次音	7次音	8次音
音名	A5	A6		A7				A8
P 1	880.0	1765.6	2662.4	3575.7	4510.9	5473.0	6466.8	7496.8
P 2	880.0	1760.0	2640.0	3520.0	4400.0	5280.0	6160.0	7040.0
差	0.0	5.6	22.4	55.7	110.9	193.0	306.8	456.8

P1は実際のピアノ、P2は基音の整数倍倍音を出す弦を持つ実在しないピアノ

同じ音名の音であってもそれぞれの倍音(部分音)の高さが若干異なっているのがわかる。

表 6

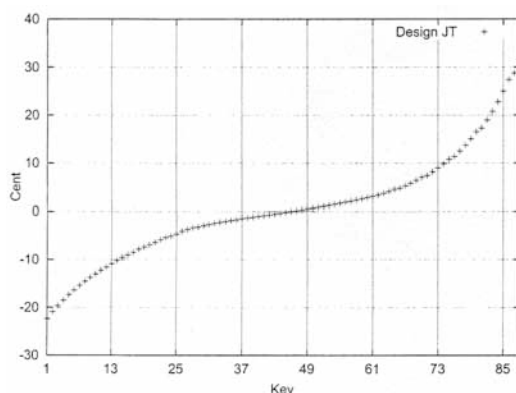
P1	基音A3	基音A4	基音A5	P2	基音A3,4,5
A6部分音	1772.9	1770.5	1765.6	A6部分音	1760.0

うなりの数は1秒間に2.4回、4.9回、7.3回である。このようにインハーモニシティにより同名・同高の音であっても基音の異なる部分音間で、厳密にはピッチが一致せずうなりが生じることになるのである。理想的調和弦を持つ仮想ピアノP2では勿論部分音の音高は一致し、うなりは生じない。

弦のインハーモニシティは式によって求められる(注6)。

$$f_n = n f_0 (1 + B n^2)^{1/2}$$

実際のピアノに弦が張られた状態での倍音の現れかたはまた異なってくる。



土橋氏によるインハーモニシティ値のシミュレーション(注7)

5 ヴァロッチェ＝ヤング 6分の1音律ピアノ

ヴァロッチェ＝ヤング 6分の1音律ピアノ音の測定値である。A4 = 441Hz、音響分析ソフトはSPEANAによる。当初440Hzで調律していたが、冬を越した際に1Hz上ったため、戻すより弦が馴染んだ441Hzで維持することにした。測定には誤差がありしかもまだヤング音律の調律についても改良を探っている段階であることを併せて記載しておく。ピアノはヤマハグランド・ピアノG3で20年前のものである。筆者が計算したヤング音律の理論値は表7から表10に記した。表11は実際の調律に使用するうなりの数の計算である。

表11は調律のためのうなりの数計算値である。参考のために平均律のビート数を載せておいた。純正5度はゼロビートである反面、調整5度のうなりはやや多い。調律の音の割り振りに際しては検査音程でビートを確かめながら進めるが、右の検査音程のうなりはヤングによる。

表7 ヤング音律の計算値

音名	基準音440Hz	セント	平均律との差	基準音441Hz
C4	262.51	5.865	0+5.9	263.11
C#4	276.55	100.000	100±0	277.18
D4	293.99	201.955	200+2.0	294.66
D#4	311.12	303.910	300+3.9	311.83
E4	329.26	398.045	400-2.0	330.01
F4	350.00	503.910	500+3.9	350.81
F#4	368.75	594.135	600-5.9	369.59
G4	392.87	703.910	700+3.9	393.76
G#4	414.82	801.955	800±2.0	415.77
A4	440.00	900.000	900±0	441.00
Bb4	466.68	1005.865	1000+5.9	467.74
B4	492.78	1096.090	1100-3.9	493.89
C5	525.03	1205.865	1200+5.9	526.22

ヤング完全5度(調整5度 698.045セント):C-G-D-A-E-H-Fis

表 8 ヤング音律理論値 440Hz

音	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B
C										27.5	29.2	30.8
C1	32.8	34.6	36.7	38.9	41.2	43.8	46.1	49.1	51.9	55.0	58.3	61.6
C2	65.6	69.1	73.5	77.8	82.3	87.5	92.2	98.2	103.7	110.0	116.7	123.2
C3	131.3	138.3	147.0	155.6	164.6	175	184.4	196.4	207.4	220.0	233.3	246.4
C4	262.5	276.6	294.0	311.1	329.3	350.0	368.8	392.9	414.8	440.0	466.7	492.8
C5	525.0	553.1	588.0	622.2	658.5	700.0	737.5	785.7	829.6	880.0	933.4	985.6
C6	1050	1106.2	1176.0	1244.5	1317.0	1400.0	1475.0	1571.5	1659.3	1760.0	1866.7	1971.1
C7	2100	2212.4	2351.9	2489.0	2634.1	2800.0	2950.0	3143.0	3318.6	3520.0	3733.4	3942.2
C8	4200											

表 9 ヤング音律理論値 441Hz

音	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B
C										27.6	29.2	30.9
C1	32.9	34.6	36.8	39.0	41.3	43.9	46.2	49.2	52.0	55.1	58.5	61.7
C2	65.8	69.3	73.7	78.0	82.5	87.7	92.4	98.4	103.9	110.3	116.9	123.5
C3	131.6	138.6	147.3	155.9	165.0	175.4	184.8	196.9	207.9	220.5	233.9	246.9
C4	263.1	277.2	294.7	311.8	330.0	350.8	369.6	393.8	415.8	441.0	467.7	493.9
C5	526.2	554.4	589.3	623.7	660.0	701.6	739.2	787.5	831.5	882.0	915.6	987.8
C6	1052.4	1108.7	1178.6	1247.3	1320.0	1403.2	1478.4	1575.0	1663.1	1764.0	1831.0	1975.6
C7	2104.9	2217.4	2357.3	2494.6	2640.1	2806.5	2956.7	3150.0	3326.2	3528.0	3661.9	3951.1
C8	4209.8											

表 10 ヤング音律 半音の振動数比

	C	C#	D	D#	E	F	F#	G	G#	A	A#	B	C
半	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
基	1.000	1.054	1.063	1.058	1.058	1.063	1.054	1.065	1.056	1.061	1.061	1.056	1.065

表 11 調律時の低次共通倍音のうなりの数(／秒) 表右は検査音程のうなりの数(／秒)

順	ヤング音律調律 440Hz						平均律	順	ヤング音律 調律時検査 440Hz					
	音	基音	倍音	Hz	うなり	うなり			音	基音	倍音	Hz	うなり	
1	A3	220	4	880			4/5	F3	175.0	5	875.0			
1	D4	294.0	3	882.0	2	1.0		A3	220.0	4	880.0	5		
2	D4	294.0	2	588			4/5	F3	175.0	5	875.0			
2	G3	196.4	3	589.2	1.2	0.7		D4	294.0	3	882.0	7		
3	G3	196.4	4	785.6			5/6	B \flat 3	233.3	5	1166.5			
3	C4	262.5	3	787.5	1.9	0.9		D4	294.0	4	1176	10.5		
4	C4	262.5	2	525.0			7/8	A \flat 3	207.4	5	1037			
4	F3	175.0	3	525.0	0純正	0.6		C4	262.5	4	1050	13		
5	F3	175.0	4	700			8/9	A3	220	5	1100			
5	B \flat 3	233.3	3	699.9	0純正	0.8		C#4	276.5	4	1106	6		
6	B \flat 3	233.3	4	933.2			9/10	F#3	184.3	5	921.5			
6	E \flat 4	311.1	3	933.3	0純正	1.1		B \flat 3	233.3	4	933.2	11.7		
7	E \flat 4	311.1	2	622.2				F#3	184.3	5	921.5			
7	A \flat 3	207.4	3	622.2	0純正	0.7		E \flat 4	311.1	3	933.3	11.8		
8	A \flat 3	207.4	4	829.6			10/11	G3	196.4	5	982			
8	D \flat 4	276.5	3	829.5	0純正	0.9		B3	246.4	4	985.6	3.6		
9	D \flat 4	276.5	2	553.0				B3	246.4	5	1232			
9	F#3	184.3	3	552.9	0純正	0.6		E \flat 4	311.1	4	1244.4	12.4		
10	F#3	184.3	4	737.2			11/12	A3	220	3	660			
10	B3	246.4	3	739.2	2.0	0.8		E4	329.3	2	658.6	1.4		
11	B3	246.4	4	985.6				C4	262.5	5	1312.5			
11	E4	329.3	3	987.9	2.3	1.1		E4	329.3	4	1317.2	4.7		
12	E4	329.3	2	658.6				G3	196.4	5	982			
12	A3	220.0	3	660.0	1.4	0.7		E4	329.3	3	987.9	5.9		

表 12 ヤング音律 倍音振動数比

	完1	短2	長2	短3	長3	完4	増4	完5	短6	長6	短7	長7	完8
半	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
基	1.000	1.054	1.120	1.185	1.254	1.333	1.405	1.497	1.580	1.676	1.778	1.877	2.000
2	2.000	2.108	2.240	2.370	2.508	2.666	2.810	2.994	3.160	3.352	3.556	3.754	4.000
3	3.000	3.162	3.360	3.555	3.762	3.999	4.215	4.491	4.740	5.028	5.334	5.631	6.000
4	4.000	4.216	4.480	4.740	5.016	5.332	5.620	5.988	6.320	6.704	7.112	7.508	8.000
5	5.000	5.270	5.600	5.925	6.270	6.665	7.025	7.485	7.900	8.380	8.890	9.385	10.000
6	6.000	6.324	6.720	7.110	7.524	7.998	8.430	8.982	9.480	10.065	10.668	11.262	12.000
7	7.000	7.378	7.840	8.295	8.778	9.331	9.835	10.479	11.060	11.732	12.446	13.139	14.000
8	8.000	8.432	8.960	9.480	10.032	10.664	11.240	11.976	12.640	13.408	14.224	15.016	16.000

以下筆者研究室のピアノの測定値を報告しておく。表13は基音と1, 2, 3, 5倍音の振動数、表14はA0からA7までの計測できた倍音振動数である。インハーモニシティはあるが、普通に用いられている調律曲線はあ

まりに伸張が大きすぎると判断される。しかし、アップライトなど、弦長と太さの関係にもよるので、まだ決定的なことは言えない。本稿資料は表14の音の周波数分析グラフである。

表 13 倍音振動数 (Hz)

音名	基音	第2倍音	第3倍音	第5倍音	D4	295	591	888	1480
C3	131	264	395	659	Dis4	313	627	937	1571
Cis3	139	278	415	696		~314			
D3	146	295	443	739	E4	330	662	990	1659
Dis3	156	311	468	780	F4	351	703	1056	1761
E3	165	330	496	828	Fis4	369	739	1110	1860
F3	175	351	527	879	G4	393	792	1184	1984
Fis3	185	369	557	928	Gis4	415	832	1256	2095
G3	196	393	591	985	A4	441	883	1327	2224
Gis3	207	415	624	1040		~443			
A3	221	443	662	1104	Ais4	468	937	1408	2361
Ais3	235	468	703	1172	H4	494	990	1488	2493
H3	247	494	742	1238		~496			
C4	263	527	792	1320	C5	524	1051	1579	2659
Cis4	278	557	832	1395		~527	~1056	~1587	

表 14は倍音の計測値である。

A0	不明	55	82	110	137	165
	194	222	250	279	308	339
	367	397	428	459	492	524
		~399				
	557	588	624	656	692	728
		~591		~659		
	765	800	840	874	914	951
					~956	
	990	1035	不明	1115	1161	1208
	~995				~1166	
	1250	1294	1340	1388	不明	...
A1	55	110	166	221	276	330
	387	443	499	557	612	669
		~445			~615	
	721	784	841	不明	...	...
			~845			

A2	110	221	330	443	551 ~554	662
	772 ~776	883 ~888	995 ~1000	1110	1220	1334
	1451	1563	1676 ~1684	1796	1907 ~1916	2034 ~214
	2269	不明	2505	不明	...	...
A3	221	443	662 ~665	883 ~888	1104	1327
	1556	1779	2004	2235	2456	2686
	2922	3148	3392	3618 ~3636	3859 ~3878	4116
	4347	4591	4849	5096	5356	5600 ~562
	5915	6309	不明	...	...	...
A4	441 ~443	883	1327	1770	2224	2672
	3133	3600	不明	...	...	...
A5	883	1770	2659 ~2672	3582	4501	不明
A6	1770	3547	5409 ~5436	不明	...	...
A7	3547	7250	11505	不明	...	...

しくみ 音楽之友社 2005 頁114

注と参考文献

注1 大串 健吾 音の高さに関する整理・心理学と楽器のチューニング 小特集 音楽への科学的アプローチ 日本音響学会誌 VOL.59 NO.3 2003 頁153-158 154ページより転載

ピアノのオクターブ伸張について、計算による均等増加するものと調律師が行ったもの(数値的には均等増ではない)では調律師が行ったものの方が自然に聴こえるといわれている。また調律師の藤田尚志氏によると、オクターブの音が「合っている」という感覚は、第1倍音の調和だけではなく、その他高次倍音の調和にも影響され、しかも弦によって高次倍音の強度が異なるため音色的調和もふくめたものである(談)。

注2 溝部 国光 正しい音階(音楽音響学)・改訂版 日本楽譜出版社 1975 頁174

注3 平島 達司 ゼロ・ビートの再発見 技法篇 東京音楽社 1983 38頁

注4 西口 磯春・森 太郎:もっと知りたいピアノのしくみ 音楽之友社 2005 頁145-154

注5 西口 磯春・森 太郎:もっと知りたいピアノの

注6 フレッチャーによる。安藤 由典 新版 楽器の音響学 音楽之友社 1996 頁158

注7 土橋光義:インハーモニシティから調律曲線を求める 頁100

参考文献

西口 磯春・森 太郎:もっと知りたいピアノのしくみ 音楽之友社 2005

平島 達司 ゼロ・ビートの再発見 東京音楽社 昭和58年

平島 達司 ゼロ・ビートの再発見 技法篇 東京音楽社 1983

大串 健吾・山田真司・永井啓之亮・吉川 茂・小坂直敏 第一部 分野別の流れ 音楽音響分野 音響学における20世紀の成果と21世紀の課題 日本音響学会誌 VOL.57 NO.1 2001 頁21-26

西口 磯春 ピアノの音響に関する最近の研究 小特集—音楽音響における最近の話題—

土橋 光義 インハーモニシティから調律曲線を求める 日本調律師協会会報 2004

溝部 国光 正しい音階(音楽音響学)・改訂版 日本

楽譜出版社 1975

大串 健吾 音の高さに関する整理・心理学と楽器の
チューニング 小特集 音楽への科学的アプローチ
日本音響学会誌 VOL.59 NO.3 2003 頁153-
158

西口 磯春 ピアノ音響に関する最近の研究 ピア
ノ音響に関する最近の話題 日本音響学会誌 60巻
11号 2004 頁669-674

安藤 由典 新版 楽器の音響学 音楽之友者 1996
音響分析ソフト SPEANA, Sound Technology

