

## 基準ピッチ変更に伴うピアノ音の変化

徳山鎮 田口友康

甲南大学大学院・自然科学研究科

〒658 神戸市東灘区岡本 8-9-1

078-435-2535/taguti@math.konan-u.ac.jp

あらまし 楽器の基準ピッチを上げることで音色が「明るくなる」、「張りが出る」などと言われている。1台のピアノについて、基準ピッチを  $A_4=436, 442, 445\text{Hz}$  にしたときの物理的变化を調べ、聴取実験を行った。単弦では、基準ピッチが高くなるほどエネルギーの減衰が速くなり、インハーモニシティは小さくなる傾向があった。しかし、聴取実験では上記の物理変化が聴感上に影響を与える点については肯定的な結果が得られなかった。

キーワード ピアノ音、基準ピッチ、エネルギー減衰、インハーモニシティ、聴取実験

## Change in piano tones under different concert pitches

Osamu TOKUYAMA Tomoyasu TAGUTI

Graduate school of Science, Konan University

8-9-1 Okamoto, Higashinada, Kobe 658

078-435-2535/taguti@math.konan-u.ac.jp

Abstract Raising the concert pitch of musical instruments is said to make the tones brighter, tenser, etc. This paper reports acoustical measurements and listening experiments on the tones of a particular piano where  $A_4$  is tuned to 436Hz, 442Hz, and 445Hz. Physically, the total acoustic energy decays faster and the inharmonicity decreases in the case of single strings, as the pitch is raised. But, subjectively, no consistent relationships were observed between the concert pitches in Hz and the evaluations on the impression of resulting piano tones.

key words Piano tone, concert pitch, energy decay, inharmonicity, and listening experiment.

## 1 はじめに

歴史的に見て、楽器の基準ピッチには上昇傾向が見られる [1]。1939年に国際基準として  $A_4=440\text{Hz}$  という基準ピッチが定められている。しかし、近年ではオーケストラでもピアノでも  $442\text{Hz}$  から  $445\text{Hz}$  を基準ピッチとして採用する場合も少なくない。本稿では、1台のピアノの基準ピッチを3種類に変更したときのピアノ音について分析した。ただし、純粋なピアノ弦の変化の様子を分析するため、理論上うなりの起こらない単弦(複数の弦で構成されるピアノのそれぞれの鍵に対し、フェルトで単弦のみが振動できる状態にしたもの)のピアノ音を使用した。この報告は、1996年9月に箱根で行われた音楽音響研究会で報告した [2] ものを、単弦の場合のエネルギー減衰とインハーモニシティについてより詳しく分析したものである。あわせて、物理的な変化が聴感上に与える影響について聴取実験を行った。その結果についても報告する。

## 2 音資料

- ピアノ……ヤマハC7B (1989年購入)
- 場所……甲南大学11号館206号室  
(実験期間中、室内湿度を52~54%に維持した)
- 録音室の室内形状……  
 $4\text{m} \times 5.8\text{m} \times 2.5\text{m}(61\text{m}^3)$
- 暗騒音……25dB(A)以下
- 残響時間……300ms (中心周波数500Hz,  
1/3オクターブバンド)
- 収録時点……調律を行った直後

長年調律を依頼している調律師の方に、今回の実験の主旨を説明し、3通りのピッチで調律をしてもらった。自動演奏により均一の強さでDATに録音した。その際ピアノ音は普通の複弦のものと、フェルトを使って単弦だけが振動できる状態にしたものの2通りの打弦音を用いた。録音したピアノ音の周波数分析には、以下の全ての場合にハニング窓をかけたFFTを使って、得られた結果に高澤の方法 [3] で補正して精密な

値を得るという方法を使った。3通りでの調律後の  $A_4$  の正確なピッチは

436.5Hz (Low)  
442.0Hz (Middle)  
445.1Hz (High)

であった(1024点FFTによる)。以下、これらの基準ピッチを Low, Middle, High と呼ぶことにする。

## 3 エネルギー減衰

5msec ごとの短時間自乗平均を使って全エネルギーの余韻部の減衰挙動を調べた。表1は、 $C_1 \sim C_4$ ,  $F_1 \sim F_4$ ,  $A_1 \sim A_4$ の単弦ピアノ音の全エネルギーの減衰率、図1は各基準ピッチでの  $C_2$  のエネルギー変化のグラフである。 $C_4$  の様に減衰率の差が大きいもの、 $F_2$  の様に差の小さなものがあるが、全体としては基準ピッチが高くなるほど、減衰率が大きくなっていることがわかる。 $C_5$  以上ではエネルギーの減衰挙動に起伏があつて、減衰率 (db/sec) の値の算定が困難であつたため、今回は検討の対象から除外した。

表1:  $C_1 \sim C_4$ ,  $F_1 \sim F_4$ ,  $A_1 \sim A_4$  のエネルギー減衰率

	Low	Middle	High
$C_1$	2.50	2.53	2.59
$C_2$	2.50	2.98	3.52
$C_3$	3.88	4.00	4.43
$C_4$	5.21	7.35	9.43
$F_1$	3.77	3.89	4.04
$F_2$	5.21	5.38	5.46
$F_3$	5.35	5.63	6.17
$F_4$	6.50	6.53	6.80
$A_1$	3.82	4.35	4.51
$A_2$	5.42	5.78	5.93
$A_3$	5.85	5.90	6.13
$A_4$	8.93	8.93	9.09
	単位 dB/sec		

436Hz



442Hz



445Hz



図 1:  $C_2$  の各基準ピッチでの全エネルギー減衰

#### 4 インハーモニシティ

ピアノ弦の振動にはインハーモニシティと呼ばれる特性がある [4][5]。これは上音の周波数  $f_2, f_3, \dots$  が基音の周波数  $f_1$  の整数倍より高い方にずれる性質である。Fletcher [4] は倍音系列の周波数を近似する式

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

$$\text{ただし } \begin{cases} f_0 = \sqrt{\frac{T}{\sigma}} \frac{1}{2l} \\ B = (\pi^2 Q S K^2 / T l^2) \end{cases} \quad (2)$$

$T$ : 張力、 $\sigma$ : 線密度、 $Q$ : ヤング率、 $S$ : 断面積、 $K$ : ジャイレーション半径、 $l$ : 長さ

を導いた。

この理論式より、弦の張力の変化、即ち基準ピッチの変更が  $f_1$  だけでなく倍音系列のインハーモニシティをも変化させることがわかる。

図 2 は  $C_1$  の実測値のインハーモニシティのグラフである。このグラフは理論式から予想されるインハーモニシティの変化を定性的に示している。

ここで、任意の番号の組  $(l, m)$ 、(ただし  $l \neq m$ )、をとる。(1) 式で  $n = l$  と  $n = m$  の場合を考えれば、それは  $f_0, B$  についての連立方程式とみることができる。 $f_l$  と  $f_m$  に実測値を与えれば  $f_0$  と  $B$  の値を次式で決めることができる。

$$\begin{cases} B = \frac{l^2 f_m^2 - m^2 f_l^2}{m^4 f_l^2 - l^4 f_m^2} \\ f_0 = \frac{f_m}{m \sqrt{(1 + B m^2)}} \end{cases} \quad (3)$$

実測値が含む誤差の影響を少なくするために、 $l$  を 40 に固定し、 $m$  を 1, 2, ..., 5, 10, 15, 20, 30 と動かして得られた値を平均して  $f_0$  と  $B$  の推定値を得た。表 2 は、 $C_1 \sim C_4$  についての結果である。

これらの値を (1) 式に代入し、それぞれの倍音系列を計算した結果、実測値と 2 セント以内の誤差で一致する事が確かめられた。

さて、張力を  $T$  から  $T'$  に変えたときの倍音系列を  $f'_1, f'_2, \dots$  とすると、(2) から

$$\begin{cases} f'_0 = \sqrt{\frac{T'}{\sigma}} \frac{1}{2l} = f_0 \left(\frac{T'}{T}\right)^{-1/2} \\ B' = (\pi^2 Q S K^2 / T' l^2) = B \left(\frac{T'}{T}\right)^{1/2} \end{cases} \quad (4)$$

として  $f'_0, B'$  が決まり、

$$f'_n = n f_0 \left(\frac{T'}{T}\right)^{-1/2} \left(1 + B \left(\frac{T'}{T}\right) n^2\right)^{1/2} \quad (5)$$

が得られる。ここで、 $n = 1$  とおけば、ある基準ピッチでの  $f_0, B$  がわかっているとき、別の基準ピッチでの基音周波数  $f'_1$  を与えれば、 $T/T'$  を次式のように決めることができる。

$$\frac{T}{T'} = \frac{f_0^2}{f'_1 - B f_0^2} \quad (6)$$

特に、張力が  $T'$  のときの  $f'_0$  がわかっているれば、 $T/T'$  は (4) 式より

$$\frac{T}{T'} = \left(\frac{f_0}{f'_0}\right)^2 \quad (7)$$

で決まる。この値を (5) 式に代入すれば、全ての  $n$  に対する  $f'_n$  を求めることができる。

表 3 に Middle の張力を  $T$  としたときの High, Low との張力比  $T/T'$  を示す。これらの張力比を (5) 式に代入して倍音系列を計算した結果、実測値とよく合うことが確認できた。表 4 は左から  $C_1$  弦の High の倍音系列の実測セント値と その実測値から求めた  $f_0, B$  で計算した倍音系列、Middle から High へ変換したときの倍音系列のセント値を示した。

以上により、特定の基準ピッチでの  $f_0, B$  を測定すれば、その弦の物性定数がわからなくとも任意の基準ピッチ (例えば  $A_4 = 415 \text{ Hz}$ ) に調律したときのインハーモニシティを推定できることがわかる。ただし、この外挿がどの程度離れた基準ピッチ対してまで可能かについては、別に検討が必要である。

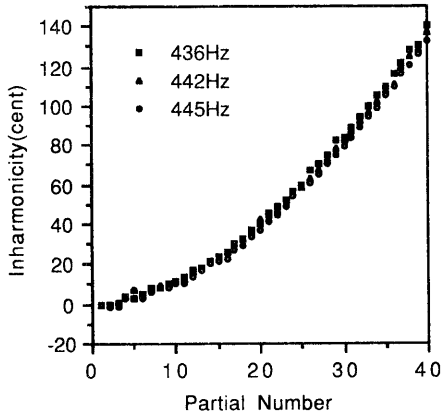


図 2: 各基準ピッチでの  $C_1$  弦のインハーモニシティ

表 2: 実測値より推定した  $C_1 \sim C_4$  弦の  $f_0$  と  $B$

	Low	Middle	High
$C_1: f_0$	32.28	32.68	33.97
$C_1: B$	0.000107	0.000104	0.000103
$C_2: f_0$	64.61	65.55	66.07
$C_2: B$	0.0000651	0.0000628	0.0000621
$C_3: f_0$	129.4	130.8	132.4
$C_3: B$	0.000111	0.000110	0.000104
$C_4: f_0$	258.9	262.4	264.7
$C_4: B$	0.000327	0.000300	0.000297

表 3:  $C_1 \sim C_4$  弦の Middle を  $T$  としたときの Low, High との張力比 ( $T/T'$ )

$T/T'$	Middle/Low	Middle/High
$C_1:$	1.025	0.983
$C_2:$	1.028	0.984
$C_3:$	1.023	0.958
$C_4:$	1.022	0.980

表 4:  $C_1$  (High) の倍音系列のセント値。(ただし、基準ピッチを  $A_4=440\text{Hz}$  としたときの  $C_1$  の基音周波数  $32.70\text{Hz}$  を 0 セントにとる。)

$n$	High <sup>1)</sup>	High <sup>2)</sup>	M $\rightarrow$ H <sup>3)</sup>
1	13	14	13
2	1212	1214	1214
3	1914	1916	1916
4	2416	2415	2415
5	2806	2802	2802
6	3118	3119	3118
7	3387	3387	3387
8	3621	3619	3619
9	3825	3825	3824
10	4009	4009	4009
11	4175	4176	4175
12	4329	4328	4328
13	4470	4469	4469
14	4601	4600	4600
15	4722	4722	4722
16	4836	4836	4836
17	4945	4944	4944
18	5046	5046	5046
19	5143	5143	5143
20	5236	5235	5235
21	5324	5323	5323
22	5408	5407	5407
23	5490	5488	5488
24	5569	5565	5566
25	5670	5640	5640
26	5714	5712	5713
27	5786	5782	5782
28	5851	5849	5850
29	5917	5915	5915
30	5980	5978	5979
31	6042	6040	6041
32	6102	6100	6101
33	6160	6159	6159
34	6217	6216	6217
35	6273	6271	6272
36	6327	6326	6327
37	6380	6379	6380
38	6431	6431	6432
39	6481	6482	6483
40	6532	6531	6533

- 1) High の実測値
- 2) High の実測値から推定した  $f_0, B$  による計算値
- 3) 推定した張力比を使って、Middle の推定値から求めた High の計算値

## 5 聴取実験

基準ピッチを変えたときのピアノ音の印象を評価する2種類の聴取実験を行った。(A) 自動演奏したピアノ曲を使って、3種類の基準ピッチで演奏されたものの全体的な印象の評価と、(B) 3種類の基準ピッチで調律された同一音名の単音について、それらの基音周波数が同一になるようにピッチ変換したものの一対比較による評価である。被験者は特に音楽経験を持たない学生である。

**実験(A)**、西村由起江のピアノ曲2曲を、3つの基準ピッチで演奏に差がでないように自動演奏したもの(これは通常のピアノ弦の状態で演奏した)計6曲を使用した。音素材をDATに録音し、スピーカを通して提示した。提示音圧は、ピアノ演奏をその付近で聴くときの音圧に近くなるよう設定した。これらを24人の被験者が表5に示す42個の形容詞について選択記述法で印象評価をした。数量化III類を用いて計算した結果、第2、第3固有値が0.11, 0.06という低い値しか得られなかったので、特定の形容詞と結びつけることができなかった。

**実験(B)**、 $C_1, C_3, A_4$ の3つの単音(単弦)を用いた。使用音は図3のように打弦後の2秒間の平均エネルギーを等しくし、その後50msecかけて50dB減衰するようにし、末尾に20msecの無音部を挿入した。この音素材を3回繰り返すことで1つの音素材を6秒強とした。そしてLow及びHighの音素材の基音周波数をMiddleの基音周波数に等しくなるようにピッチ変換した。以下、変換後の音素材をLow\*, High\*と呼ぶことにする。音素材は全てデジタルファイル形式でコンピュータに保存した。実験では、15人の被験者に音素材を $C_1$ のHigh\*とMiddleというように組み合わせ、コンピュータで再生したものをイヤースピーカ(STAX SR-A)を通して音圧70dB SPLで提示し、表6の13個の形容詞について一対比較で評価させた。集計したデータをSchefféの方法により平均的嗜好度を計算した(表7)。その結果、音名別には「明るい」、「柔らかい」、「響く」、「金属的な」、「鋭い」、「高音部が目立つ」、「低音部が目立つ」などで、基準ピッチに関して有意な嗜好順位のつくものが見られた。しかし、 $C_1, C_3, A_4$ の3つの音名に共通に、嗜好順位の系列が等しくなるような形容詞はなかった。言い換えれば、基準ピッチの変更によるピッチの高低以外の物理的変

化(少なくとも3,4章に報告した減衰率及びインハーモニシティの変化)が聴感上影響を与えるということに関して、一貫した肯定的な結果は得られなかった。



図3: 実験(B)で用いた打弦音( $C_1$ )

表5: 聴取実験(A)で使用した形容詞

金属的な	こもった	快い
重苦しい	すっきり晴れた	きたない
厚みのある	やせた	表情に乏しい
柔らかい	好ましくない	頼りない
つやつやした	ソフトな	しゃれた
かたい	薄っぺらな	美しい
輝かしい	まるい	さわやかな
明るい	暗い	表情が豊か
べたついた	とがった	野暮な
熟達した	あらあらしい	響く
軽やかな	かわいい	かん高い
ハードな	鈍い	物足りない
迫力のある	未熟な	豊かな
かさかさした	しっかりした	好ましい

表6: 聴取実験(B)で使用した形容詞

明るい	柔らかい	響く
金属的な	厚みのある	はっきりした
鋭い	伸びのある	よく通る
暖かい	高音部が目立つ	低音部が目立つ
豊かな		

## 6 おわりに

基準ピッチの変更が、エネルギーの減衰率とインハーモニシティへ及ぼす影響を分析した。また、ある基準ピッチの測定値を使って、任意の基準ピッチの倍音系列を計算する式を示した。聴取実験では、エネルギーの減衰率とインハーモニシティの変化が聴感上影響を与える事に関して、一貫した肯定的な結果は得られなかった。今後は、ピアニストや音楽経験の多い人を対象に聴取実験を行いたい。

## 参考文献

- [1] 高澤嘉光, 西川留美子, “基準ピッチ A4=440Hz をめぐって,” 日本音響学会誌 52 巻, 368-374(1996).
- [2] 徳山鎮, 田口友康, “ピアノの基準ピッチ変更に伴う音響的性質の変化,” 音楽音響研究会資料 MA96-16(1996).
- [3] 高澤嘉光, “離散フーリエ変換における補間公式,” 音楽音響研究会資料 MA89-26(1989).
- [4] H.Fletcher, “Normal vibration frequencies of a stiff piano string,” J. Acoust. Soc. Am, **36**, 203-209 (1964).
- [5] I.Nakamura and D.Naganuma, “Characteristics of piano sound spectra,” Proc. SMAC93 (A.Friberg et al., Eds.), Royal Swedish Academy of Music No.79, 325-330 (1994).

表 7: 聴取実験 (B) の結果 (“>” は両者の嗜好順位を、“~” は両者に差がないことを、空白は有意な嗜好順位がつかなかったこと表示)。

	C <sub>1</sub>	C <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
明るい	Middle > Low* ~ High*		Low* ~ High* > Middle
柔らかい	Low* > High* ~ Middle		Middle > High* > Low*
響く	Middle ~ High* > Low*	Middle > Low* ~ High*	Low* ~ High* > Middle
金属的な	Middle > High* ~ Low*		Low* > High* ~ Middle
厚みのある		Middle > Low* ~ High*	
はっきりした			Low* ~ High* > Middle
鋭い	Middle > High* > Low*		Low* ~ High* > Middle
伸びのある		Middle > Low* > High*	
よく通る		Low* ~ Middle > High*	Low* ~ High* > Middle
暖かい		Middle > Low* ~ High*	
高音部が目立つ		Low* ~ High* > Middle	Low* ~ High* > Middle
低音部が目立つ		Middle > High* ~ Low*	Middle > High* ~ Low*
豊かな		Middle > Low* ~ High*	