

秋田県の梵鐘の特徴に関する基礎的考察

大島 静夫

Basic Consideration on Characteristics of Japanese Temple Bell in Akita prefecture

Shizuo OHSHIMA

(1997年11月28日受理)

This paper deals with the analytic results of 84 temple bells of Akita prefecture. A short range FFT analysis was adopted for comparison with the previous papers. In addition, in order to reproduce the sound of temple bells digitally, an analysis of partial tone in frequency domain was made. Several parameters which were calculated here are the parameters to make a partial tone approximate to an exponential and a sinusoidal function. The results obtained are as follows:

(1) The partial tone can be expressed by the product of the sum of 2 sinusoidal waves and an exponential function. Then, an energetic error between an original tone and a calculated tone is distributed in 0.055~1.897%, and the average value is 0.318%.

(2) Attenuation coefficient of an exponential function is distributed in 0.015~1.385, and the average value is 0.530.

(3) Beat frequency of a sinusoidal function is distributed in 0.06~8.8 (Hz), and the average frequency is 1.81 (Hz).

1 はじめに

1995年に「秋田の梵鐘～梵鐘レクイエム」というCD (YKCD-1001) がOZ CORPORATIONから発売された。これは秋田県内の84ヶ所におよぶ寺院の梵鐘を収録したものであり、録音された熊谷恭孝氏の長年にわたるご努力の集大成である。

梵鐘に関して、既に多くの研究がなされているが[1]～[5],ここでは梵鐘の音を過去の研究に従い、簡単なスペクトル解析をし、その性質を把握した上で、梵鐘をデジタル的に再現するためのパラメータを求めるという立場で、梵鐘の特徴を抽出する方法についての検討を行った。

2 基本解析

2.1 データの収録

録音の詳細な方法は、明記されていないが、聴感上不自然な点は特に感じられないので、定性的な解析には使用可能と判断した。

梵鐘の解析に関する文献[2]によると、鳴り始めから約1秒間の鐘音は、打音部といわれ、多数の部分音と雑音成分から成る複雑な音であり、鳴り始めから0.8秒後の鐘音を解析対象としていることから、ここでも同様の条件でデータを解析することにした。

CDからのデータ取り出しは、アプリケーションソフト (Wave Studio) を用い、視察により梵鐘の立ち上がり部分に近いゼロクロス点を仮のスタート点とし、それから0.8秒間のデータを削除し、更にその点から約5秒間 (55296ポイント) 相当のデータを切り出し、解析データとした。サンプリング量子化量は16[bit], サンプリング周波数は、主に低周波数に解析が限定されることから11025[Hz]とした。以降、梵鐘の番号はCDの録音順にBON01～BON84とする。

2.2 単区間FFT分析

まず予備的な解析として、84個の梵鐘の単区間FFT (SFFT) 分析を行ない、そのスペクトル分布

秋田県の梵鐘の特徴に関する基礎的考察

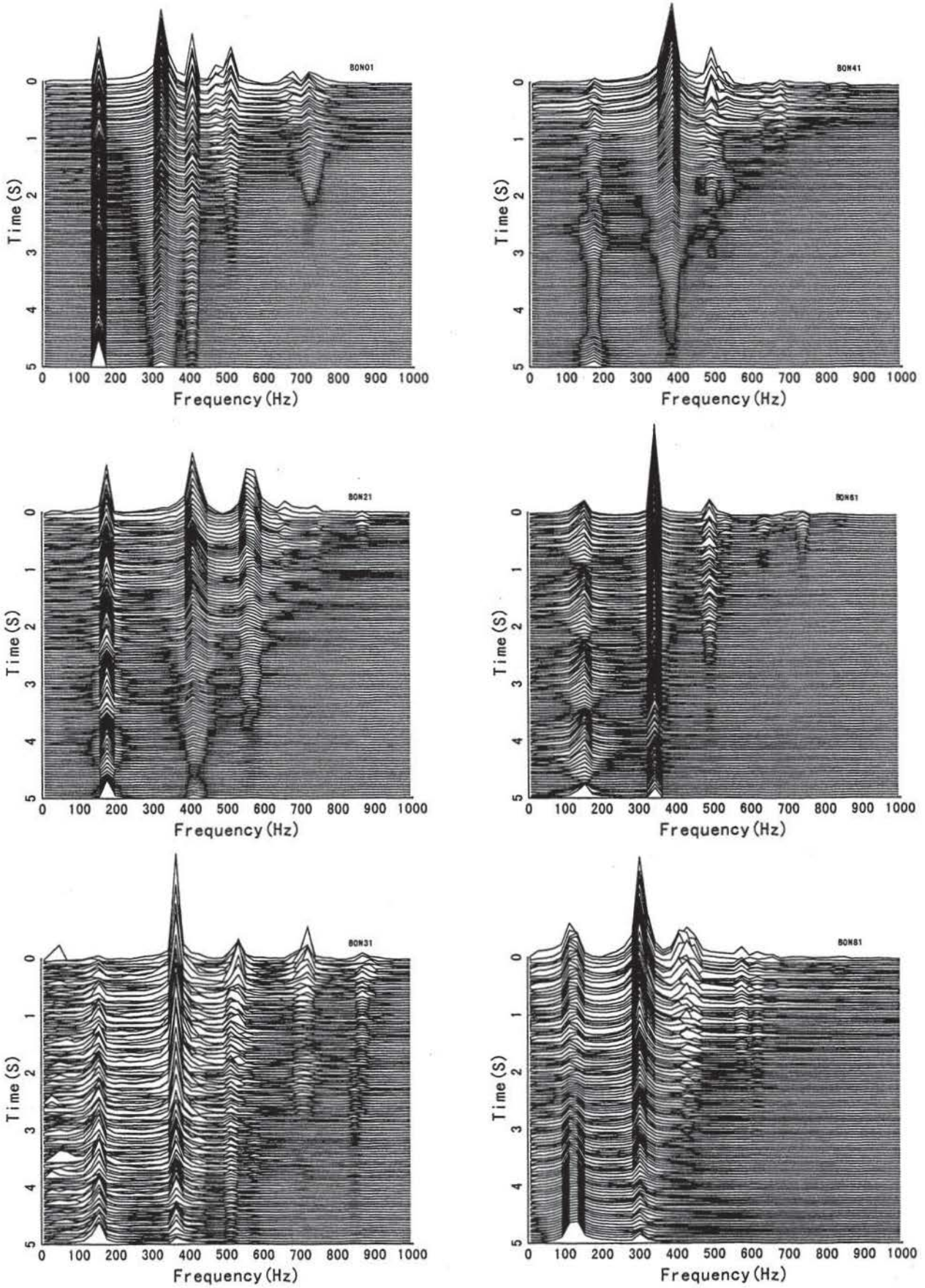


図1 代表的な梵鐘のスペクトル分布図

を調べた。サンプリングポイント数は512点としたので、SFFT解析の基本周波数は、 $f_0 = 11025/512 = 21.53[Hz]$ 、約5秒間(55296ポイント)の解析フレーム数は108となる。またデータの切り出しには、ここでは矩形窓を用いている。

一般にスペクトル図において振幅は、その詳細を見定めるためにパワースペクトルを取るが、ここでは概略の振幅分布を見定めることが目的なので、データの最大値で規格化した線形軸のほうが、その特徴が明確になると考え、線形な軸を採用した。図1に代表的な梵鐘のスペクトル図を示す。図1より、打音部以降のスペクトルは、単純な構造であり、基音から比較的低次の部分音の合成で再現できる可能性があることがわかる。以降、基本音および第4部分音まで解析し、その波形を再現するためのパラメータを求めていく。

まず始めに、図1の解析結果より、基本音および部分音の中心周波数を算出することにした。SFFTより得られる0~127次のデータのうち、エネルギーが集中している0~59次成分の2乗和を求め、相前後する3周波数の和が0~59次の総和の2.5~3[%]以上のピーク点を低次成分から原則として順次に取り出し、仮の $f_1 \sim f_5$ (基本音~第4部分音)とした。条件を満たすピークがない場合は、その次数で部分音は無しとした。この操作により、基本音および部分音の中心周波数が定まる。さらに各々の基本音・部分音の中心周波数を正確に定めるために、各周波数のデジタル量の2乗値がエネルギー相当量となることより、そのエネルギー総量を求め、更に加重平均を用いることによりその中心周波数 f_0 を定めた。ここで算出式は、 $f_0 = \sum f_i D_i / \sum D_i$ (D_i は、 f_i のデジタル量 $i = n-1 \sim n+1$) である。 $f_1 \sim f_5$ の値は、付表1に掲載している。

2.3 解析データの比較検討

ここで、梵鐘の特徴を分類するための方法として、文献[2]に従い、音色に大きな影響を与えられられる f_1 と f_2 の比に注目し、その値を求めた。梵鐘の部分音の周波数分布に関しては過去に多くの研究があり

- 山下・青木 $2^2 : 3^2 : 4^2 : 5^2 : \dots$
- 青木 $2 : 5 : 7 : 9 : 11 : \dots$
- 小橋 $1.00 : 2.41 : 3.26 : 4.25 : 5.36 : \dots$

などが上げられているが、ここで取り上げた84梵

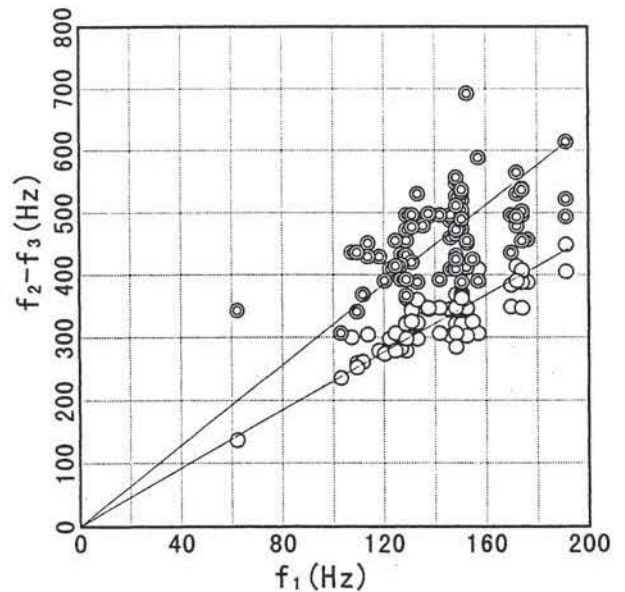


図2 $f_1 - f_2, f_3$ 特性

鐘の部分音の比の平均値は、全体としてどの程度のエネルギーレベルを超えたときに部分音とみなすかによっても異なるが、本研究では

- 2%のとき $1.00 : 2.33 : 3.22 : 4.07 : 4.74 : \dots$
- 3%のとき $1.00 : 2.32 : 3.21 : 4.05 : 4.71 : \dots$
- 5%のとき $1.00 : 2.31 : 3.13 : 3.99 : 4.41 : \dots$

となっており、小橋の「半鐘に関する比」に一番近い結果が得られている。図2に、 $f_1 - f_2, f_3$ のグラフおよび回帰直線を示す。

3 再現性を意図したデータ解析

3.1 データ解析法

ここでは、梵鐘のSFFT解析で得られたデータを、簡単な数式で表現することを目的に、最大エネルギーを持つ部分音の波形を解析することを試みた。解析例として、BON01の部分音の時間波形図3(a)に示す。

図3(a)から、波形は指数関数的な減衰項および正弦波的なうねりから構成されていることがわかる。この波形を考察すると、梵鐘の波形は、単純には受動素子よりなる等価回路へのインパルス応答の一種と考えらる。このインパルス応答で生ずる指数減衰項、正弦波項のパラメータを算出するために、まずMoving Average法により、等価的なLow Pass Filter処理し、うねりを打ち消す。その波形を最小二乗近似法を用い、 ae^{bt+c} という関数で近似させた。近似波形を図3(a)の実線で示す。

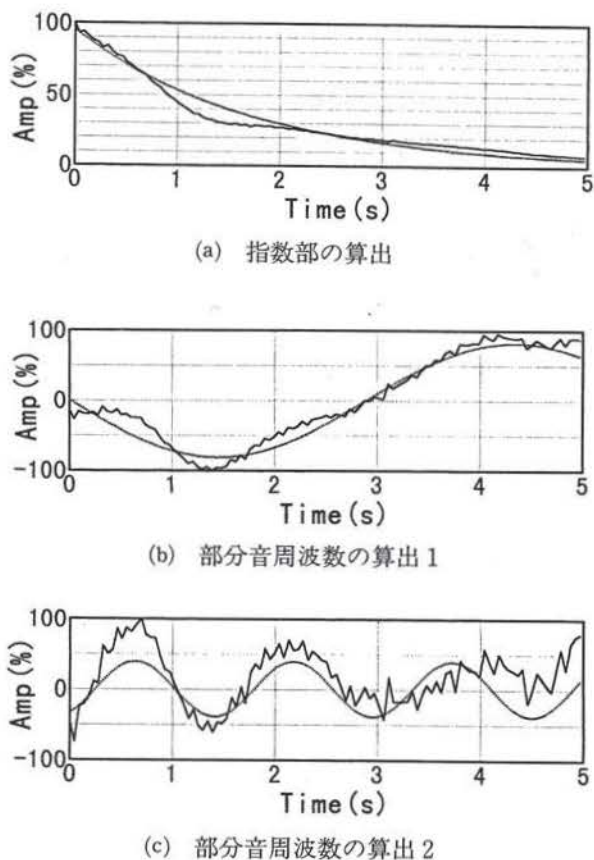


図3 部分音のパラメータの抽出法

原波形をこの近似関数で割った残差が、図3(b)の実線の波形である。この波形を同様に最小二乗法で $d\sin(et+f)$ に近似すると、図3(b)の点線の波形となる。更にこの原波形から近似式を差し引き、その残差をグラフにしたのが図3(c)の実線である。最終的にこの波形も正弦波 $g\sin(ht+i)$ で、点線のように最小二乗近似する。図3は、全ての残差を±100%に正規化しているため、一見残差が大きいのに見えるが、実際にはその残差は小さいものである。付表1にこのような形で算出したパラメータとして減衰定数 b 、第一および第二近似正弦波周波数 e 、 h および $error = \sum(\text{真値}-\text{近似値})^2 / \text{データ個数} \times 100(\%)$ で求めた誤差を示す。

3.2 得られたパラメータの解析

図3(a)の近似式より得られた減衰定数 b の分布を図4に示す。

図より、減衰定数は0.015~1.385に分布し、中心が0.530であり、0.1および0.8付近にピークがあることがわかった。この減衰定数が梵鐘の音色に対し、どのような印象を与えるのか、興味深い点である。

図3(b)(c)の近似式から得られたうねり周波数と考

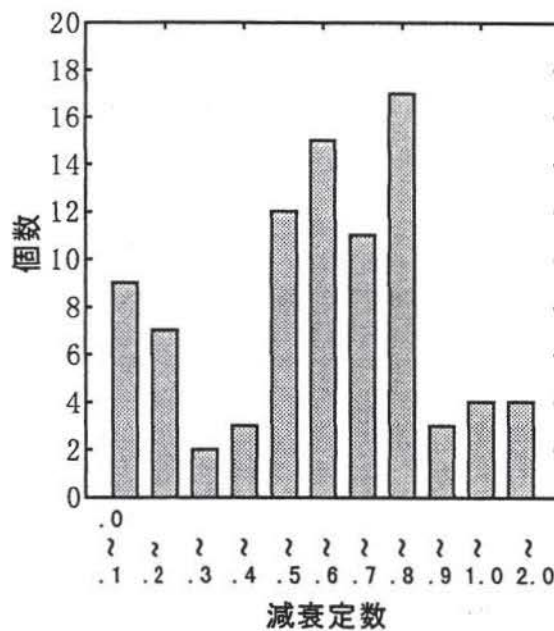


図4 減衰定数の分布

えられる部分音の周波数の低次の項の分布を図5に示す。

この図および付表1より、うねり周波数は0.06~8.8(Hz)に分布し、1(Hz)および3(Hz)付近にその分布のピークがあり、その平均値は1.81(Hz)であった。さらに高次の部分音の解析を進めたとき、このうねり周波数(ここでは、大きな音のゆらぎ)および、うなり周波数(近接した周波数の干渉音)との振幅比、周波数比もまた、梵鐘の音色に大きな影響を与えていると思われる。

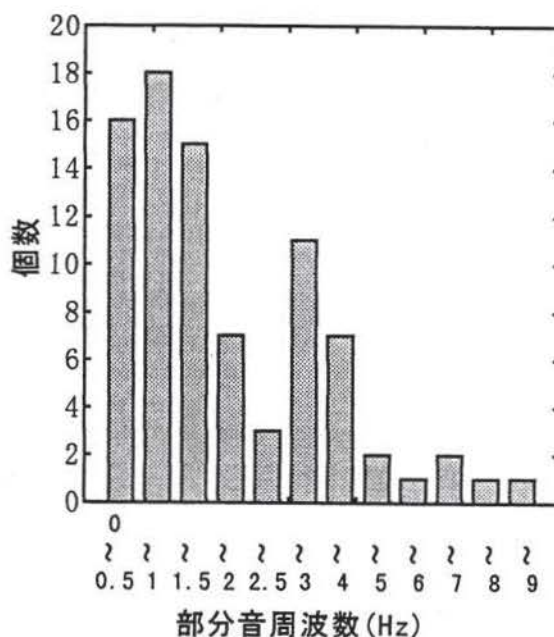


図5 部分音周波数の分布

また近似関数の原波形に関する誤差は、付表1より0.055~1.897(%)の範囲であり、その平均値は0.318(%)となっており、時間をt(s)とするとき、最大エネルギーを持つ、基本音および部分音は、ほぼ

$$a \exp(-bt) (d \sin(et+f) + g \sin(ht+i) + j)$$

で近似できることがわかった。

4 結 論

パラメータを指定するだけで、梵鐘の音色を再現することを目的に、第一段階として、最大のエネルギーをもつ部分音の解析を試みた。その結果

- 部分音は指数関数と正弦波2項の和との積で誤差2%以内で表現できること

付随する事項として、ここで解析した84の梵鐘の最大エネルギーを持つ部分音に関し

- 減衰定数は0.015~1.385に分布し、中心が0.530であること
- うなり周波数は、0.06~8.8(Hz)に分布し、中心周波数が1.81(Hz)であること

ということを解析的に示すことができた。更にその他の部分音も解析し、今回調べた最大エネルギーの部分音との減衰時間と部分音を構成する周波数の比較などを検討し、少ないパラメータで梵鐘の音色を再現する方法、および実際の音色との比較などを検討したい。

参考文献

- [1] 大熊恒靖：“梵鐘の音の減衰時間に関する時代的変遷”，日本音響学会誌53巻3号，pp. 208~214, 1997
- [2] 栗原正次：“梵鐘における部分音の振動数分布の時代的変遷”，日本音響学会誌37巻12号，pp. 599~605, 1981
- [3] 栗原正次：“梵鐘における部分音の強度分布の時代的変遷”，日本音響学会誌37巻12号，pp. 606~612, 1981
- [4] 小松沢昶，伊勢雅昌：“撞木の代わりに用いた材質の塊が和鐘の音色に及ぼす影響（和鐘の音色の研究 その1）”，日本音響学会誌32巻7号，pp. 413~419, 1976
- [5] 小松沢昶，伊勢雅昌：“実際の撞木が和鐘の音色に及ぼす影響（和鐘の音色の研究 その2）”，日本音響学会誌32巻8号，pp. 465~469, 1976

付表1 梵鐘の各種パラメータ表

No	紀年	重さ kg	製造所	f1 Hz	f2 Hz	f3 Hz	f4 Hz	f5 Hz	exp	f1' Hz	a1'	f2' Hz	a2'	誤差 %
1	1978	150	鈴木鑄造所	151	325	407	515	734	-0.583	1.1	81.5	4.1	38.9	0.14
2	1951	350	高橋鐘鑿堂	123	297	409	553		-0.411	2.9	64.3	6.7	18.5	1.90
3	1964	200	老子製作所	127	301	433			-0.580	8.8	40.2	5.7	20.3	0.15
4	1987	300	老子製作所	151	306	407	603	771	-0.513	2.6	31.9	10.3	18.9	0.37
5	1968	200	岩沢梵鐘店	129	323	431	472	639	-0.342	5.6	39.7	3.4	37.5	0.20
6	1975	65	老子製作所	151	370	519	728		-0.497	6.6	14.0	2.8	14.1	0.11
7	1983	250	老子製作所	146	301	409	538		-0.132	7.4	76.2	14.9	42.4	0.44
8	1979	300	老子製作所	149	321	431	493	624	-0.779	5.0	24.3	2.8	37.2	0.25
9	1975	250	老子製作所	151	321	388			-0.052	4.6	77.2	5.3	29.1	0.17
10	1973	140	老子製作所	151	360	495	689		-0.735	2.8	18.0	15.0	16.5	0.11
11	1986	300	老子製作所	133	297	388	448	558	-0.516	3.8	44.5	0.6	49.2	0.29
12	1987	400	老子製作所	129	278	366	493		-0.560	4.6	33.2	9.9	16.5	0.22
13	1719	140	歌代六左エ門	192	405	521			-0.993	3.3	12.1	21.4	17.1	0.42
14	1976	200	老子製作所	151	342	416	448	497	-0.772	1.0	31.5	28.0	39.2	0.25
15	1969	600	岩沢鑄造所	103	235	306	344	478	-0.463	4.2	53.4	2.3	40.4	0.10

秋田県の梵鐘の特徴に関する基礎的考察

No	紀年	重さ kg	製造所	f1 Hz	f2 Hz	f3 Hz	f4 Hz	f5 Hz	exp	f1' Hz	a1'	f2' Hz	a2'	誤差 %
16	1949	50	老子製作所	192	448	614			-0.073	7.8	46.3	4.1	64.0	0.09
17	1989	250	老子製作所	157	306	390	474	685	-0.547	2.8	69.6	1.1	61.3	0.17
18	1975	250	岩沢鋳造所	118	278	428	568	730	-0.813	8.5	42.4	14.2	24.2	0.36
19	1974	100	若林仏具製作所	131	321	420	493	650	-0.067	7.0	20.8	1.9	41.8	0.43
20	1952	270	高橋鐘堂	129	321	454	620	738	-0.671	1.6	63.2	2.7	24.9	0.24
21	1971	65	若林仏具製作所	172	413	564			-0.558	4.8	33.8	3.3	44.8	0.34
22	1968	180	高岡鋳芸社	149	347	493			-0.537	10.4	74.4	20.7	33.0	0.17
23	1949	50	林金属工作所	153	416	691			-0.897	1.3	28.4	13.9	18.0	0.31
24	1981	200	老子製作所	151	366	493	629	754	-0.760	1.2	86.2	4.2	24.4	0.23
25	1990	140	老子製作所	151	362	474	618	700	-0.678	2.8	37.9	11.9	22.8	0.51
26	1978	160	榎金寿堂	146	342	459	676	779	-0.764	0.8	30.8	3.9	26.2	0.46
27	1949	200	高橋鋳工場	149	342	491			-0.065	11.5	86.3	23.0	28.2	0.23
28	1977	200	若林仏具店	133	323	487			-0.082	2.0	80.9	2.9	29.3	1.63
29	1972	205	三和梵鐘	108	299	435	583	758	-0.351	4.3	60.3	8.9	17.6	0.63
30	1682	150	藤原豊勝	153	301	411	525	644	-0.186	4.4	48.6	2.8	33.7	0.20
31	1950	100	岩沢鋳造所	149	368	525	719		-0.295	15.7	32.0	13.5	42.3	0.99
32	1957	160	高岡銅器	155	325	424	478	631	-0.569	2.7	27.2	7.6	17.9	0.29
33	1978	250	岩沢梵鐘	127	299	416	571		-0.409	5.0	53.8	1.0	48.7	0.09
34	1957	100	三和梵鐘製作所	138	344	493	687		-0.446	3.0	36.7	11.8	40.4	0.06
35	1961	250	三和梵鐘製作所	149	368	547	745		-0.618	9.2	71.4	18.5	46.1	0.20
36	1949	200	若林仏具製作所	114	304	450	601	749	-0.515	3.3	35.5	1.4	60.5	0.26
37	1961	150	岩沢鋳造所	149	368	555			-0.758	6.1	27.2	1.0	37.4	0.12
38	1960	300	老子製作所	127	282	392	553	704	-0.513	3.4	46.4	4.8	23.1	0.13
39	1973	120	老子製作所	177	388	456			-0.936	3.0	47.1	10.3	37.3	0.15
40	1971	100	老子製作所	172	388	478	562		-0.117	2.9	75.7	24.4	19.3	0.08
41	1960	140	高橋鋳造所	170	383	495	672		-0.793	-2.7	32.7	5.2	26.7	0.32
42	1974	200	榎金寿堂	146	342	487	620	678	-0.067	0.8	28.6	12.4	13.0	0.14
43	1984	400	老子製作所	129	362	495	603		-0.700	6.8	46.1	41.1	16.6	0.91
44	1986	160	三和梵鐘	136	349	478			-0.600	4.2	33.5	12.8	17.3	0.15
45	1949	130	三和梵鐘製作所	131	344	495	715		-0.513	13.7	50.8	14.5	26.1	0.60
46	1973	100	三和梵鐘	151	370	532			-0.763	11.7	33.6	3.3	17.8	0.19
47	1984	290	金井鋳造所	149	306	409	601	732	-0.497	-1.2	31.3	2.1	19.4	0.12
48	1970	160	榎高橋鋳工場	149	349	510	629	667	-0.911	7.1	9.7	5.8	8.2	0.60
49	1981	380	若林仏具店	110	258	340	519	586	-0.410	1.5	45.4	2.9	18.8	0.15
50	1981	120	老子製作所	174	388	495	609	713	-0.633	3.3	27.9	0.7	39.1	0.22
51	1979	100	高橋鋳造所	172	390	530	661	747	-0.717	3.0	43.0	1.5	57.7	0.36
52	1968	140	老子製作所	149	349	465	586	639	-1.385	20.1	12.7	0.9	22.5	0.35
53	1973	135	高橋鋳造所	62	136	342	491		-0.686	3.2	54.4	6.0	32.1	0.31
54	1950	150	三和梵鐘	131	342	495			-0.062	6.4	74.1	8.0	20.7	0.18
55	1989	150	高橋鋳工場	129	321	472	588		-0.613	10.5	37.4	0.9	48.6	0.64
56	1956	102	鈴木鋳造所	133	360	530	698		-0.333	2.9	66.0	9.9	41.9	0.11
57	1974	150	鈴木鋳造所	151	366	536	775		-0.743	0.5	73.6	13.6	48.7	0.05
58	1975	260	高橋鋳造所	151	351	504	693		-0.691	1.7	43.3	8.6	32.4	0.95
59	1973	80	岩沢梵鐘	157	409	588			-0.633	11.9	25.4	19.6	40.7	0.22
60	1988	200	老子製作所	170	349	435	631	728	-0.806	2.7	18.3	6.6	6.3	0.35
61	1972	160	高橋鋳工場	146	344	495			-0.429	4.7	59.8	1.5	42.8	0.31
62	1965	200	岩沢梵鐘	142	306	392	646		-0.458	1.1	52.2	2.6	35.7	0.32
63	1950	130	吉本政房	174	407	538			-0.124	2.1	60.3	3.2	35.6	0.44
64	1991	270	岩沢梵鐘店	121	273	390	543	575	-0.785	1.0	47.3	6.6	13.5	0.09
65	1967	200	高橋鋳工場	131	325	476	566	665	-0.797	1.1	27.2	47.1	37.2	0.29
66	1971	100	老子製作所	174	405	502			-0.073	5.1	60.8	37.3	21.3	0.19
67	1961	116	榎金寿堂	149	306	472	683	822	-0.540	1.0	35.9	8.7	53.3	0.35
68	1965	160	三和梵鐘	142	347	495	667	874	-0.763	0.1	42.7	2.7	40.5	0.25
69	1987	200	老子製作所	153	344	450	599	771	-0.455	2.9	43.2	1.3	40.0	0.34
70	1992	350	岩澤鋳造所	125	278	413	579	771	-0.267	5.5	77.5	0.9	33.2	0.13
71	1981	200	老子製作所	153	347	454			-0.739	1.2	41.6	1.9	27.4	0.13
72	1982	270	龍鳴堂	112	261	368	454	551	-0.414	6.0	57.6	0.6	67.5	0.16
73	1990	160	高橋鋳工場	125	306	454	618	801	-0.728	1.1	42.0	3.2	37.3	0.34
74	1670	200	佐藤佐治兵衛	174	347	454	560	708	-0.907	16.4	70.7	1.8	17.9	0.15
75	1972	300	翠雲堂	129	297	392	583		-0.015	2.6	38.2	5.7	7.6	0.22
76	1967	140	老子製作所	138	347	497	674		-0.678	0.6	50.3	3.8	26.4	0.06
77	1951	135	高橋鐘堂	174	407	536			-0.153	3.7	80.7	7.2	21.6	0.15
78	1994	250	老子製作所	149	347	510			-0.542	3.6	38.6	13.5	27.6	0.16
79	1987	85	老子製作所	172	390	493	564	599	-0.762	3.1	62.9	6.7	18.3	0.24
80	1972	100	老子製作所	192	405	493	568		-0.133	4.6	31.7	20.5	13.0	0.54
81	1981	300	鈴木鋳造所	114	304	428	564	599	-0.490	8.4	43.0	2.6	28.4	0.22
82	1948	650	林金属工作所	110	252	435			-0.674	-2.8	23.1	25.0	20.5	0.33
83	1952	170	鈴木鋳造所	149	284	424	497	633	-0.143	3.3	30.6	37.0	33.1	0.18
84	1995	170	老子製作所	151	362	489			-0.713	5.0	46.2	2.6	40.1	0.77