

スチールパンの音響特性に関する検討*

日大生産工(院) ○田中洸平 日大生産工 加川幸雄(研究員)
日大生産工 山崎 憲

1 はじめに

スチールパンはトリニダード・トバゴで誕生した 20 世紀の楽器である。この楽器はメロディを奏することのできる打楽器の一つである。打撃音である点はビブラフォンと変わりはないが、ビブラフォンが一つの音片で、一つの音階しか出せないのに対して、この楽器はドラム缶の底面を凹型に変形加工し、さらにその中に音階の数だけ大きさの違う浅い球殻状の音階部を作ることによって一つの振動板で 1 オクターブを超える音階を表すことができる。

現代のスチールパンは 5 オクターブもあり、今日のスチール楽団でカリプソやジャズ、ポピュラー、クラシック音楽を演奏するために広く使用されている。また、テナーやリード、ダブルセカンド、ダブルテナー、ギター、チェロ、クアドラフォニック、ベースといった大きさの異なる様々な種類があり、テナーパンは 26 から 32 もの音階がある一方、ベースパンは 4 つ程度の音階しかない¹⁾。

スチールパンに関して、Rossing 他^{2,3)}はこの楽器の小史を示すと共に、音の放射特性について研究し、Achong 他⁴⁾はこの楽器の振動の機械的な非線形性について研究している。

スチールパンはトリニダード・トバゴの主要な楽器であるだけでなく、ヨーロッパやアメリカでも人気が出ており、この楽器のメーカーや調律師の数は急速に増えている半面、三次元構造をしているので、その物理科学的研究はまだ、充分に行われているとはいえない。本研究ではスチールパンの音響解析を目的とし、過渡特性、周波数特性の測定・検討を行う。

2 原理

2.1 円板の振動

振動体が全ての点で正弦波的に振動し、さらに全ての点と同じ周波数で振動するという性質を持つ運動様式をモードという。

スチールパンの音階部は周辺が固定された浅い球殻状の振動板と見なすことができる。浅い球殻の振動は、同じ境界条件の円板の振動を考えると類似ではあるが、同一ではない。それは、円板の場合は、広く知られているように純粋な板の曲げ振動が可能であるのに対し、球殻の場合、曲げは殻の伸びを伴わずに変形することができず、曲げと伸びが結合した振動となるからである。周辺が固定された円板の軸対称モード周波数 f_0 は、

$$f_0 = \left(\frac{n}{2\pi} \right) c \frac{t}{a^2} \quad (1)$$

で表される。ここで、 a は円板の半径、 t は厚さ、伝搬速度 c は、

$$c = \left[\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

で表される。 E はヤング率、 ρ は密度、 σ はポアソン比である。また、最低次モード周波数では $n=2.98$ となる。

一次元振動においても、曲げ振動の場合は、モード周波数は整数倍にはならないが、二次元振動板のモード数 n も基本的に整数倍にはならない。

2.2 浅い球殻の振動

Fig.1 の中で示された浅い球殻の軸対称モードの最低固有周波数 f_R は、Reissner⁵⁾によって解析された。端が「固定された」境界条件に対して、 f_R は、

$$f_R \approx \left(\frac{2.98}{2\pi} \right) c \left(\frac{t}{a^2} \right) \left[1 + (0.7 + 0.5\sigma - 2\sigma^2) \left(\frac{h^2}{t^2} \right) \right]^{1/2} \quad (3)$$

で近似される。ここで、 h は湾曲の深さである。また、曲率半径 R は、

$$R = \frac{a^2}{2h} \quad (4)$$

で表される。端が「自由な」境界条件に対しては、

$$f_R \approx \left(\frac{2.6}{2\pi} \right) c \left(\frac{t}{a^2} \right) \left[1 + 0.6(1-\sigma^2) \left(\frac{h^2}{t^2} \right) \right]^{1/2} \quad (5)$$

*Study on the Acoustical Characteristics of a Steelpan
Kouhei TANAKA, Yukio KAGAWA and Ken YAMAZAKI.

となる。端が「単純支持」境界条件に対しては、

$$f_R \approx \left(\frac{1.46}{2\pi} \right) c \left(\frac{t}{a^2} \right) \left[1 + (0.7 + 0.5\sigma - 2\sigma^2) \left(\frac{h^2}{t^2} \right) \right]^{1/2} \quad (6)$$

となる⁶⁾。これら方程式は $h/a \ll 1$ のときに当てはまる。方程式(3)(5)(6)の[]括弧内の最初の項は、水平な円板の曲げ振動に対応するものである。第2の項は、湾曲の影響に依存する。すなわち、方程式は、 $h \rightarrow 0$ に対して円板の式に漸近する。湾曲の深さがシェル厚さよりはるかに大きければ、湾曲の深さが非常に小さい場合さえ、第2の項が支配することがわかる。 $h/t > 10$ については、固有周波数は境界条件にかかわらず、

$$f_R \approx \left(\frac{m}{\pi} \right) c \left(\frac{h}{a^2} \right) \quad (7)$$

に漸近する。すなわち、伸び振動が支配的になる。

スチールパンは、Fig.2 に示すようなもので、全体としては Fig.1 に示す浅い球殻な形状であるが、各音階部は Fig.2 に示すような部分が対応し、その部分はそれぞれ自身が独自の曲率半径を持つ浅い球殻を形成している。従って、R をわずかに変化させることによって、倍音や音階のチューニングが可能である。

3 実験方法

3.1 測定装置

Fig.2 に実験で使用したスチールパンを示す。これはスチールパン製作アトリエ SONOBE 製(試作品テナーパン)であり、直径 35 cm、高さ 8 cm で 14 個の音階部(C(522 Hz)~c#(1118 Hz))で構成されるものを使用した。また、演奏用のスティック(マレット)は先端ゴムでできている 10 cm 程度の円筒形の木材のものを使用した。

Fig.3 に実験環境を示す。自由支持として実験を行うために、スチールパンの縁にひもを取り付け、床から 100 cm の所に吊るし、中心から 30 cm の所にマイクロホン(Brüel & Kjør 社製 Free-field 1/4 Microphone Type 4939)を設置した。測定は無響室内で行った。

3.2 測定方法

スチールパンの各音階部をマレットで叩き、マイクロホンにて音圧を測定する。測定した音圧信号は PC にて FFT 解析を行った。

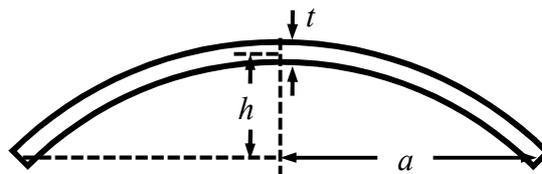


Fig.1 Spherical shell segment

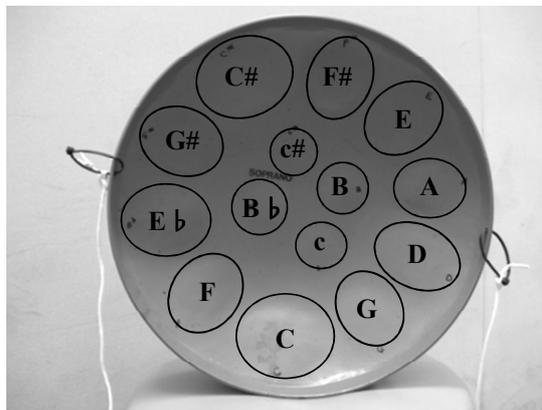


Fig.2 Steelpan used in the experiments

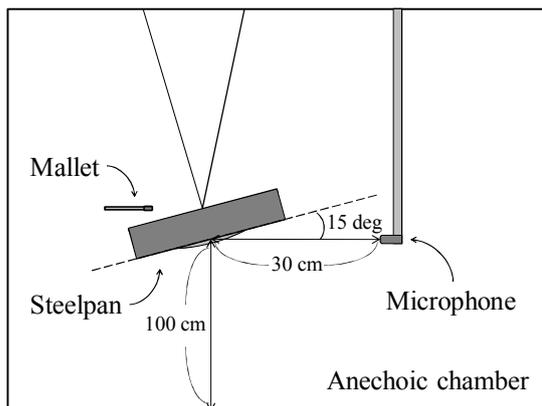
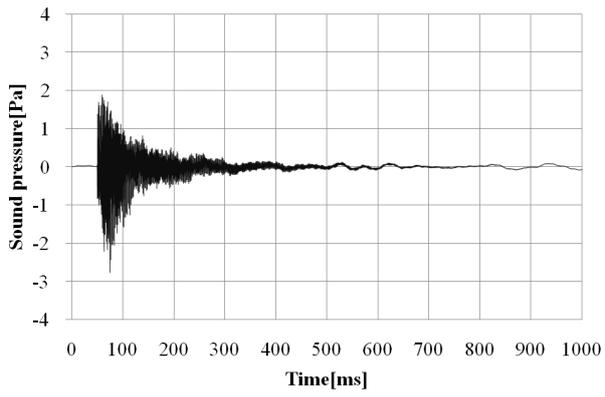


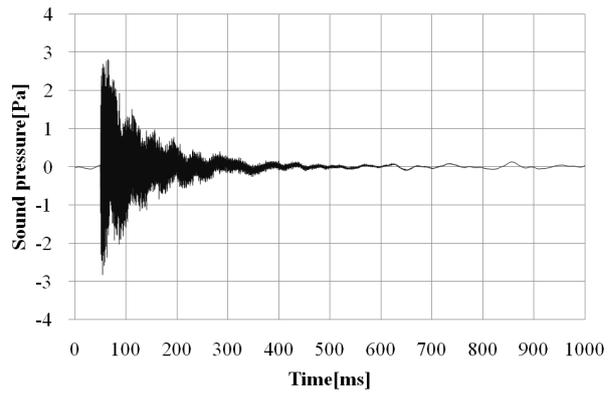
Fig.3 Experiment environment

Table.1 Harmonics frequency for D note and B note

Harmonics	D note		B note	
	Frequency [Hz]	Frequency ratio	Frequency [Hz]	Frequency ratio
1	590	1.00	986	1.00
2	1154	1.96	1948	1.98
3	1738	2.95	2952	2.99
4	2326	3.94	3896	3.95
5	2916	4.94	4882	4.95
6	3480	5.90	5862	5.95
7	4070	6.90	6946	7.04
8	4658	7.89	8146	8.26
9	5222	8.85	9058	9.19
10	5806	9.84		
11	6422	10.88		
12	6976	11.82		
13	7568	12.83		

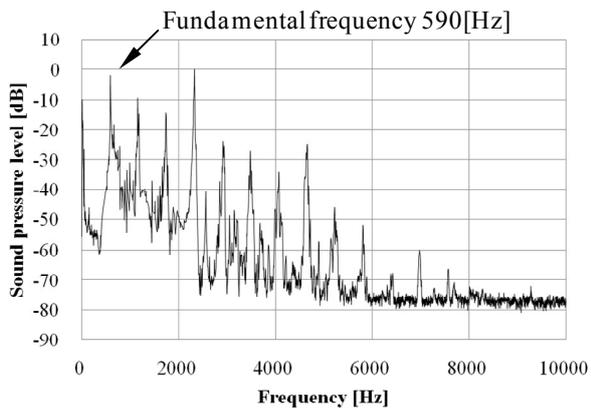


(a) D note

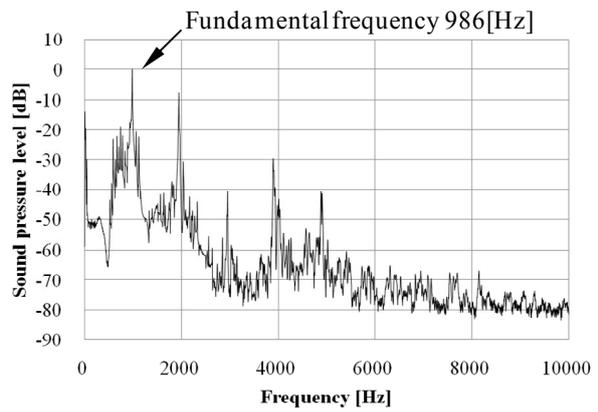


(b) B note

Fig.4 Transition characteristic

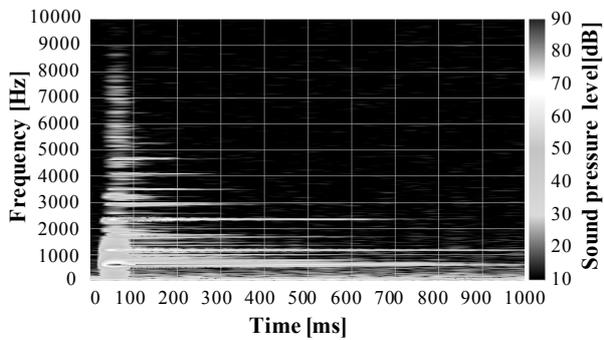


(a) D note

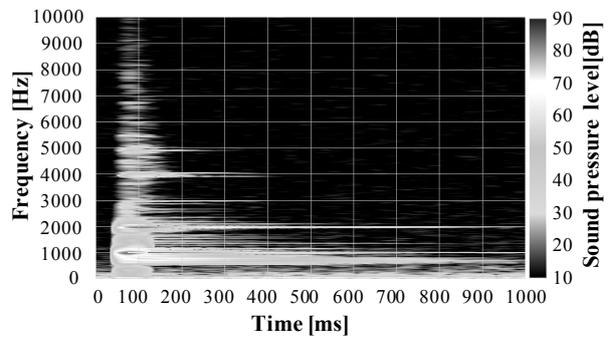


(b) B note

Fig.5 Frequency characteristic



(a) D note



(b) B note

Fig.6 Spectrogram

4 結果と考察

Table.1 に音階部 D と音階部 B を叩いたときの音の基本周波数に対する各倍音周波数の相対値を示す。高次倍音になるにつれて倍音周波数が整数倍からずれていくことがわかる。これは、伸び振動では m が整数倍になるが、曲げ振動と結合している振動体では、基本的に倍音周波数が基本周波数の整数倍にはならないからであると考えられる。また、B の音の第 11 倍音以降は暗騒音に含まれてしまうため確認できなかった。

Fig.4 にスチールパンから放射された音の過渡特性を示す。(a)と(b)はそれぞれ音階部 D と音階部 B を叩いたときの特性を表している。D の音は約 25 ms で立ち上がり、残響時間は約 899 ms であった。それに対し、B の音は約 3 ms で立ち上がり、残響時間は約 989 ms であった。これらより、音階部の面積が小さいほど音の立ち上がり時間は短くなり、残響時間は長くなることがわかる。しかし、各音階の立ち上がり時間は、駆動力により多少変化するため、さらに検討する必要がある。

Fig.5 にスチールパンから放射された音の周波数特性を示す。(a)と(b)はそれぞれ音階部 D と音階部 B を叩いたときの特性を表している。どちらの音も、周波数の最初の山を基本周波数とする調和成分となる音が大きく出力されていることがわかる。D の音は第 4 倍音が最大音圧になっており、およそ 13 個の倍音が確認された。B の音ではおよそ 9 個の倍音が確認された。また B の音で、基本周波数やその倍音の周りに複数の音が確認できる。これは、B 以外の音階部から励起される音との干渉によるものだと考えられる。このような音は D の音でも確認できるが、B の場合が顕著である。スチールパンは音階部に独自の曲率を構成することにより音階部の振動を局所化していると考えられるが、音階部 B は深さが浅いため、振動が局所化されなくなっていることが考えられる。それにより、音階部 B を叩いた衝撃が他の音階部に伝わってしまい、B 以外の音階部の音も励起されたということが考えられる。このような複雑な結合振動が、ビブラフォンと異なるスチールパン独自の魅力ある音色を形づくるものと考えられる。

Fig.6 にスチールパンから放射された音の各

周波数成分の時間変化を示す。(a)と(b)はそれぞれ音階部 D と音階部 B を叩いたときの音を表しており、時間幅は 185 ms で切り出している。D の音、B の音共に、ほぼ同時に全ての音が立ち上がり、高い周波数から消音していくことがわかる。また、基音とその第 2 倍音の減衰時間は他の音と比べて長い。

5 おわりに

本研究ではスチールパンの音響解析を目的とし、周波数特性、過渡特性の測定・検討を行った。その結果、スチールパンの一つの音階部を叩くと、その周辺の音階部も同時に励振し、それらの音階部から励起した複合音として出力されることがわかった。そのためスチールパンにおいて音階を作るためには、基本的には音階部の凹凸をうまく調節して振動を局所化するだけでなく、倍音やその他の部分音との結合を考慮することが大事であることがわかる。音の立ち上がりは、駆動力により多少変化し、非線形性が見られた。

今後の課題として、スチールパンに対してモーダル解析を行い、各音階部を叩いたときの振動の振る舞いについて検討する。

参考文献

- 1) N. H. Fletcher *et al.* [著], 岸他[訳], 「楽器の物理学」, シュプリングー・ジャパン株式会社, pp.666~674, pp.92-93, (2008).
- 2) T. D. Rossing *et al.*, Music from Oil Drums: The Acoustics of the Steel Pan, (1996).
- 3) T.D. Rossing *et al.*, Sound radiation from Caribbean Steelpan, J. Acoust. Soc. Am., vol.117, No.1, (2005).
- 4) A. Achong *et al.*, The Steelpan as a System of Non-linear Mode-localized Oscillators, 1: Theory, Simulations, Experiments and Bifurcations, Journal of Sound and Vibration, vol.197, pp.471~487, (1996).
- 5) E. Reissner, On Axi-Symmetrical Vibrations of Shallow Spherical Shells, Quarterly of Applied Mathematics 13, pp.279-290, (1955).
- 6) Yukio Kagawa, Vibrator sensors for atmospheric pressure, temperature, and humidity measurements, J. Acoust. Soc. Am., vol.56, No.5, (1974)