

# 論文 コンクリート製マリンバ音板の音響特性に関する基礎的研究

大島 義信<sup>\*1</sup>・水田 真紀<sup>\*2</sup>・岡本 享久<sup>\*3</sup>

**要旨:** 本研究では、コンクリートの新たな用途開発のために、打楽器の一つであるマリンバの音板をセメント系材料で制作し、その基本的な音響特性を把握するため、実験的および解析的に検討を行った。マリンバの音板は、両端が自由端の一次元的な振動系の低次卓越周波数が、各音階の周波数と一致するよう調律されている。よって研究では、コンクリート製音板の最適な形状、マレット硬度、および基本的な音響特性について把握した。その結果、コンクリート音板には軟質系のマレットが適していること、比較的高音域が生じやすいこと、また引張強度の高い材料を用いるべきであることなどが明らかとなった。

**キーワード:** マリンバ, 音響特性, 高強度コンクリート, 楽器

## 1. はじめに

日本におけるセメントの生産量は、公共事業への投資縮小に連動して年々減少しており、2009年には年間6千万トン弱と、1996年時の約半分程度まで低下している<sup>1)</sup>。今後、公共事業への大幅な投資拡大が期待できないため、セメント材料に対する新たな需要創出の期待が高まっている。

従来、セメントはコンクリートとして構造物の部材などに利用することがほとんどであり、他の可能性に対する検討はあまり行われてこなかった。岡本らは、管楽器および弦楽器にコンクリートを適用する試みを行っている。管楽器<sup>2)</sup>では、パイプオルガンの音源である「フルー管」および「アルプホルン」を製作している。コンクリート製のフルー管は、木製のフルー管と比べ高周波域でコンクリートの特徴が現れ、「煌びやかさ」が強調されることを指摘した。また、弦楽器<sup>3)</sup>では、音源部分にピアノ線を、共鳴箱にコンクリートを適用した「ダルシマ」を製作し、管楽器と同様に高周波域で木製とは異なる楽音特性が現れることを示した。ただし、これらの先駆的な研究は、「フルー管」を除き楽器の音源部分はセメント材料ではなく、他の材料（ピアノ線、金属等）を利用しているため、打楽器のようにコンクリートそのものから音を発する楽器に関する検討は行われていない。

打撃により音楽を発生させる楽器は体鳴楽器と呼ばれ、明確なピッチを有する調律した体鳴楽器と、調律しない体鳴楽器とがある<sup>3)</sup>。木琴やマリンバは調律した一次元的な体鳴楽器である。マリンバの音響特性についてはBorkらの研究が詳しい<sup>4)</sup>。またO.Bustamanteらにより<sup>5)</sup>、調和のとれた紫檀による音板の形状が示されている。しかし、木材とは特性が異なるコンクリートを対象とした音板の設計は皆無であり、また音響の特性も明確でない。

本研究では、コンクリートが音源となる打楽器の製作を試みる。ここでは、マリンバに用いられる音板をセメント系材料により製作し、音板としての音響特性や調和のとれた形状などについて検討を行った。

## 2. コンクリートマリンバの設計

### 2.1 マリンバの特徴

マリンバとは、図-1に示すように、共鳴管を有する音板を打撃することで音を発生させる装置である。マリンバの起源はアフリカの民族楽器にある<sup>3)</sup>とされているが、その後改良が加えられ現在のような形状となっている。通常のマリンバは、45~65mm幅の紫檀の音板を用いて、A2 (110Hz) ~C7 (2093Hz) までの音域を発生することができる。

マリンバをはじめとする打楽器では、音板を打撃し生じた自由振動により振動音が発生する。すなわち、音板の固有周波数は、ある音階に一致するよう作成されている。例えば、A3 (ド) の音は440Hzであり、ドの音板を作るには、音板の固有周波数が440Hzとなる形状にする必要がある。しかし、「調和のとれた」音板となるためには、1次の固有周波数だけでなく、2次、3次の固有周波数もある音階と一致する必要がある。マリンバの音板は、



図-1 一般的なマリンバ (紫檀使用)

\*1 京都大学 工学研究科准教授 工博 (正会員)

\*2 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 研究員 工博 (正会員)

\*3 立命館大学 理工学部教授 工博 (正会員)

下側をアーチ状に削ることで、1次の固有周波数（基音）に対して各次数の固有周波数が整数倍（倍音）となるよう調整している。コンクリートマリンバにおいても、音板下面をアーチ状に加工し、各固有周波数が整数倍となるよう最適設計を行った。

## 2.2 設計の方針

マリンバの設計では、音板の厚さ、幅、弾性係数、密度、アーチの形状がパラメータとなる。ここでは、音板を一次元梁として仮定し、アーチ部形状を以下に示す2次曲線で表現する。

$$h(x) = \begin{cases} h_0 & (X_c < x < L/2) \\ t_c + \left(\frac{x}{X_c}\right)^2 (h_0 - t_c) & (0 < x < X_c) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 $x$ は音版の中心を原点とする軸、 $h(x)$ は音版の厚さ、 $h_0$ は端部厚さ、 $t_c$ は中心での板厚、 $X_c$ は2次曲線の $x$ 切片である。また仮定した音版の形状を図-2に示す。幅 $B$ は45mmで固定した。まず、正しい音階を有する音版とするには、基音となる1次固有周波数が表-1に示す周波数と一致する必要がある。次に、調和のある音版となるためには、1次から3次までの固有周波数の比率が1:4:9（場合によっては1:4:8）となる必要がある。マリンバの音板を設計するためには、この二つの制約条件を同時に満たしながら、パラメータを決定する必要がある。

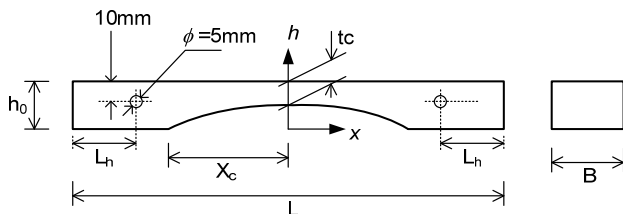


図-2 仮定した音板形状

## 2.3 最適化計算

前述の通り、音板の1次の固有周波数がある音階の周波数に一致し、かつ2次および3次の固有周波数と1:4:9の関係を持つよう最適化計算する必要がある。ただし、音板音の音を形成する基音の周波数は必ず一致する必要があるが、倍音（2次および3次の固有周波数）については、調和に関する部分であるため、多少の誤差は許容される。よって本研究では、以下のような目的関数 $J$ を考え、それを最小化する最適計算を行った。

$$J = \sum_{i=1}^3 w_i (f_i(\mathbf{s}) - F_i)^2 \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{s} = (s_1, s_2, s_3, s_4)$ であり、 $s_1$ は音板の長さ $L$ 、 $s_2$ は端部厚さ $h_0$ 、 $s_3$ は中心での板厚 $t_c$ 、 $s_4$ は2次曲線の $x$ 切片 $X_c$ である。また、 $f_i(\mathbf{s})$ はパラメータが $\mathbf{s}$ の場合の $i$ 次固有周

波数、 $F_i$ は目標とする $i$ 番目の音階に対応する周波数（ $F_2 = 4F_1, F_3 = 9F_1$ ）、 $w_i$ は $i$ に対応する重みである。最適化における制約条件は、 $0 \leq s_4 < s_1$ 、 $0 \leq s_3 < s_2$ である。また、固有周波数 $f_i(\mathbf{s})$ は、一次元梁の有限要素法により算定した。ただし、ここでの固有周波数は、梁の両端をともに自由端とし、要素の高さ $h(x)$ 、長さ5mm、幅45mmの梁要素として求めた。また、重み係数を $w_1 = 0.6, w_2 = 0.25, w_3 = 0.15$ として、2次および3次の固有周波数に対する制約条件を緩めた。

式(2)に示す関数 $f_i(\mathbf{s})$ は多峰性の関数であり、局所解が得られやすい。また、得られた解が必ずしも楽器として適切であるとは限らない。特に、楽器の美観として、音階に応じて音板の長さやアーチ部が線形的に増加する必要がある。そのため、

$$\begin{aligned} L^1 > L^2 > \dots > L^{n-1} > L^n \\ X_c^1 > X_c^2 > \dots > X_c^{n-1} > X_c^n \end{aligned} \quad (3)$$

という条件を付加し、音階 $k$ （ $k=1$ のときA3に対応）における音板の長さ $L^k$ 、およびアーチ部の長さ $X_c^k$ を求めた。表-1に各音階を示す。なお、最適化計算は非線形最小二乗法により実施し、制約条件式(3)に適合するよう解を選定した。

表-1 音階と周波数

番号	音名	階名 (イ長調)	周波数 Hz (平均律)
1	A3	ド	440.00
2	B3	レ	493.88
3	C3	ミ	523.25
4	D3	ファ	587.33
5	E3	ソ	659.26
6	F3	ラ	698.46
7	G3	シ	783.99
8	A4	ド	880.00
9	B4	ド	987.77
10	C4	レ	1046.50
11	D4	ミ	1174.66
12	E4	ファ	1318.51
13	F4	ソ	1396.91
14	G4	ラ	1567.98
15	A5	シ	1760.00

## 2.3 最適化結果

設計の試算に用いた材料は表-2に示す3種類のモルタルとした。材料AおよびBは鋼繊維混入モルタルであり、材料Cはポリプロピレン繊維混入モルタルである。また、一般的な紫檀の弾性係数 $E$ および密度 $\rho$ を合わせて示す。重要なパラメータである密度・弾性係数比は、紫檀において17.6程度となっている。モルタルの密度を2.3とした

場合、紫檀と同程度の密度・弾性係数比となるためには、弾性係数(表中の理想値)は40kN/mm<sup>2</sup>程度となる必要がある。材料A～Cにおいては、材料Cが最も近い値を示しているほか、モルタルでも実現可能な比率であることがわかる。ただし、音響特性の一つである減衰については、紫檀とモルタルで異なる。また、弾性係数の違いにより、集中荷重により単純梁を打撃した場合の弾性エネルギーは、紫檀と比べてモルタル材料では1/3程度となる。そのため、同じ力で打撃した場合には、紫檀と比べて音圧が0.58倍程度となり、必然的に音が小さくなる。表-3に、これら3種類の材料を用いて最適設計を行った結果を示す。ただし、音階の代表値としてA3, A4, A5の結果のみを示す。また、実際に作成したコンクリート音板を図-2に示す。

表-2 使用材料

材料	E kN/mm <sup>2</sup>	ρ g/cm <sup>3</sup>	E/ρ km <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>
A	55.0	2.55	21.57	223.5
B	46.0	2.45	18.78	180.0
C	38.3	2.37	16.16	137.0
紫檀(W)	15.0	0.85	17.65	-
理想値	40.6	2.30	17.65	-

### 3. 打音の検証

#### 3.1 収録の概要

打撃音の収録は、図-3に示す収録装置により行った。ここでは、通常のマリンバ用マレット4種類を用いて音板を打撃し、その打撃音を騒音計により収録した。音板の固定は、両端自由の支持条件とするため、音板を貫通する固定用孔を片手で押さえ、音板を吊り下げた状態で行った。この孔の位置は音板によって異なるが、一次および二次固有モードの節付近に設定しているため、ほぼ自由端とみなせる状態となる。収録音およびひずみは、サンプリングレート50kHzにおいてロガー (NR-600) により

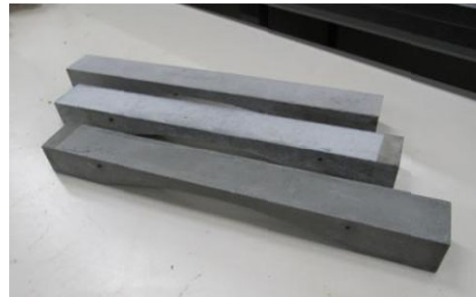


図-2 作成したコンクリート音板



図-3 収録装置

り記録した。

一方、使用したマレットを図-4に、音響特性を図-5に示す。マレット音響特性は、インパルスハンマのヘッドを直接マレットで打撃し、その打撃力をFFTすることにより得た。使用したマレットは、H (硬質), M (弱硬質), S1 (軟質1), S2 (軟質2) であり、種類によりマレットの硬さが異なる。図より、より硬質であるほど高い周波数が含まれるが低周波のパワーが小さくなること、および軟質の場合にはその逆となることがわかる。これは、ヘッドの硬度によって入力帯域が変化する一般的なインパルス応答の傾向に合致する。またいずれのマレットにおいても30~40Hzにピークが存在する。これは、マレットの柄の振動成分が含まれているためと考えられる。今回想定する帯域 (440~1700Hz) を考慮すれば、硬質H

表-3 最適化設計の結果

材料	音階	H* (mm)	L* (mm)	X* (mm)	Tc* (mm)	f <sub>1</sub> ** (Hz)	f <sub>2</sub> /f <sub>1</sub> **	f <sub>3</sub> /f <sub>1</sub> **
A	A3	36	395	120	15	440.4	4.0	9.3
	A4	36	280	90	16	880.2	3.9	8.9
	A5	30	225	40	18	1759.7	3.7	7.3
B	A3	38	375	130	15	440.0	3.9	9.1
	A4	40	265	85	15	880.1	4.1	9.8
	A5	40	215	70	20	1759.8	3.7	8.2
C	A3	36	365	115	15	440.9	4.0	9.2
	A4	34	280	50	16	879.7	4.2	8.9
	A5	32	205	35	17	1760.4	4.0	8.0

\* : FEM の要素長に制約があるため 5mm 単位で実施。

\*\* : f<sub>i</sub>はそれぞれ設計上の i 次固有周波数を示す。

および中間Mの利用が有利であると思われる。しかし、後述するが、これら硬質系のマレットを使った場合、打撃に伴う高い波動成分が卓越してしまい、梁としての低い振動成分が相対的に小さくなる傾向にある。そのため、音板の特性や音階に応じてマレットを使い分ける必要がある。

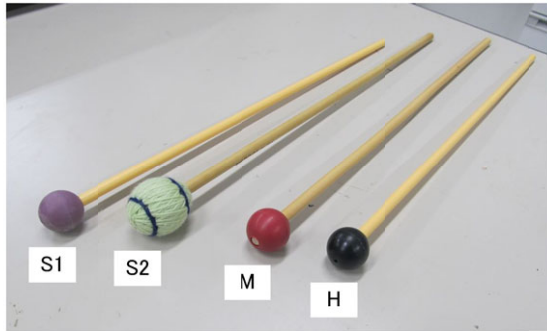


図-4 マレット

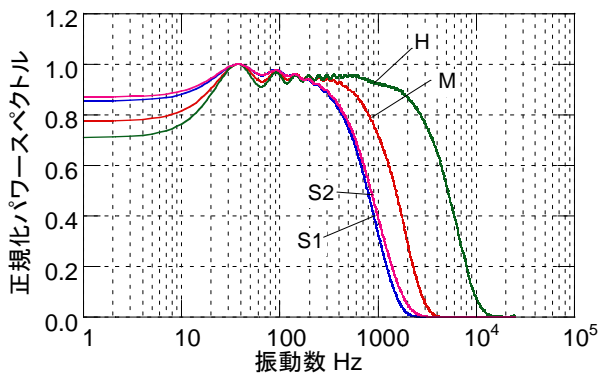


図-5 打撃力特性 (3回平均)

表-4 卓越周波数と減衰定数

材料		1次		2次		3次	
		周波数 Hz	減衰	周波数 Hz	減衰	周波数 Hz	減衰
A	M	389.7	0.0064	1572.0	0.0449	3510.7	0.0086
	S1	387.0	0.0092	1567.5	0.0048	3507.2	0.0030
B	M	408.7	0.0165	1572.6	0.0027	3486.4	0.0033
	S1	406.9	0.0032	1568.3	0.0030	3485.1	0.0030
C	M	405.7	0.0052	1572.6	0.0245	3470.9	0.0052
	S1	406.6	0.0048	1568.2	0.0048	3447.0	0.0333
紫檀(W)		472.5	0.0025	1485.0	0.0321	3791.6	0.0049

### 3.2 打音特性

図-6に打撃音の時系列波形の一例を示す。ここでは、材料A～C (音階A3: 目標値440Hz) および紫檀 (A3#: 466.6Hz) の音板の中央を、マレットMおよびS1で打撃した場合を示す。ただし、紫檀はS1のみを使用した。また、これらの波形のパワースペクトルを図-7に示す。ただし、

これらの値は振幅の最大値および最小値を±1に正規化した場合のパワーであり、無次元である。また、図中の周波数はS1打撃によるピークを示す。さらに、AR法<sup>6)</sup>により算定した各次数の卓越周波数と減衰定数を表-4に示す。まず、紫檀(W)については、1次と2次のピークがほぼ同レベルとなっており、楽器としての完成度の高さを示している。また3次の卓越周波数については、パワーそのものは小さいものの、1次(472.5Hz)の約8倍(3800Hz)となっており、コンクリート音板の比率とは異なるが、1:4:8の比率で正しく設計されていることがわかる。

次にコンクリート音板であるが、いずれの音板においても、1次の卓越周波数が目標値よりも40Hz程度小さくなっている。これらの音板は、調律のための切削を前提として作成したものであり、音板全長をやや長く設計していたため、目標値よりも低い卓越周波数を有する結果となった。最終的な調律は、音板中央部を切削するか、音板端部を切削することで、主に1次の周波数を変化させて行った。端部切削により音板長を変化させた場合、1次～3次の卓越振動数の比率はほぼ均等にシフトし、1:4:9の比率を保持することをFEM解析により確認している。ただし、微調整が必要な場合はそれぞれモードの腹に位置する部分を切削することで行った。

まず、材料Aについては、いずれのマレットにおいても一次の卓越周波数は387.5Hzとなっているが、マレットM打撃時には二次のモード(1570Hz)が励起されていないことがわかる。ただし、3次の卓越周波数はいずれのマレットでもほぼ設計通り1次周波数の9倍となっている。また、1085Hzにピークが存在するが、このピークは材料Bとも共通するため、鋼繊維混入高強度モルタル表面とマレットS1との接触音と思われる。減衰に着目した場合、2次モードに対応する減衰がマレットS1使用時に大きく低下している。そのため、材料AについてはマレットS1使用が有利と考えられる。

次に材料Bについては、マレットM打撃時に1次モードのパワーが大きく減るほか、いずれのマレットでも比較的高いパワーで2次の卓越周波数が得られている。また、3次の卓越周波数もほぼ設計通り1次の9倍となっている。減衰については、マレットS1使用時に1次モードに対応する減衰が大きく低下している。

最後に、材料Cについては、マレットMによる打撃時に生じる二次卓越周波数のパワーが高く、マレットS1打撃時の一次卓越周波数のパワーをも超えている。しかし、減衰に着目すると、2次モードに対応する減衰がマレットS1の利用により大幅に減少している。音板の設計として1次モードが主要な音源となるべきであり、2次モードが卓越する状況は望ましいとはいえないため、この場合もマレットS1の利用が適しているといえる。



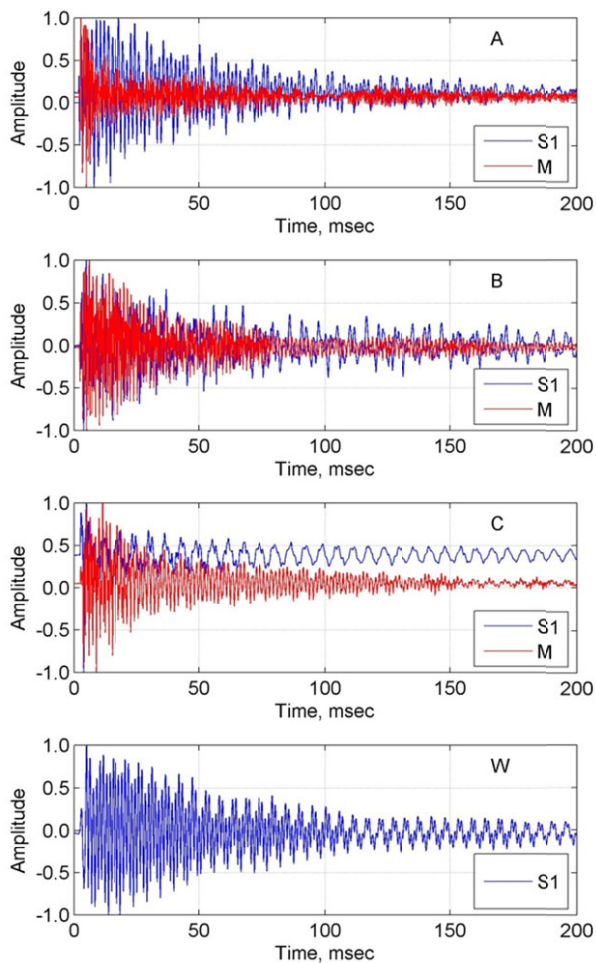


図-6 時系列波形 (Wは紫檀、振幅は±1に正規化)

一方、いずれの音板についても硬質マレットHを使用した場合、マレットMと近い特性を有し、低い周波数のパワーが小さく、3000Hz以上の卓越周波数のパワーが最も高くなった。また、マレットS2を使用した場合は、ほぼS1と同等の特性を有していた。

次に、音板形状の違いについて考察する。ここでは、材料Bを用いた場合の、A4 (880Hz)とA5 (1760Hz)を目標とした音板の特性について示す。これらの目標値を持つ音板をマレットS1およびMで打撃した場合のパワースペクトルを図-8に示す。ただし、この場合も正規化後のパワーであり無次元である。前述のとおり、コンクリート音板は調律のための切削を前提としており、1次卓越周波数が目標値よりも60~200Hz程度小さくなっている。A3音板と比較して、目標値と実測との開きが大きいのは、音板が短くなるほど単位長さあたりの音板長に対する卓越周波数の変化が大きくなるためである。

まず、A4音板については、マレットの違いにより1次周波数のパワーに差が生じており、マレットS1を使用した場合にパワーが大きくなる。しかし、2次および3次のモードに関しては、マレットMによるパワーが大きくなっている。また、2次および3次の卓越周波数は、1次のほ

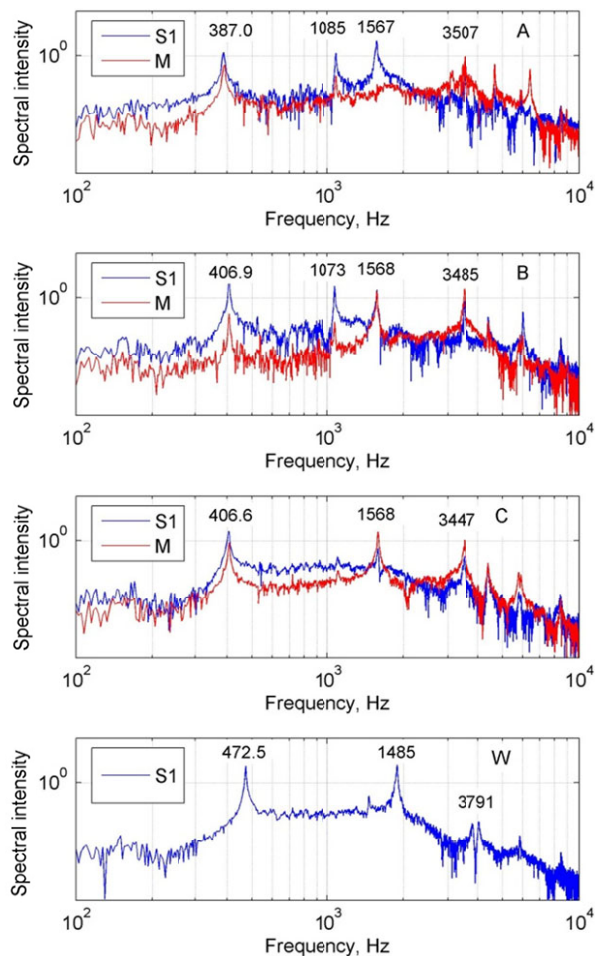


図-7 A3音板のスペクトル (図中数字の単位はHz)

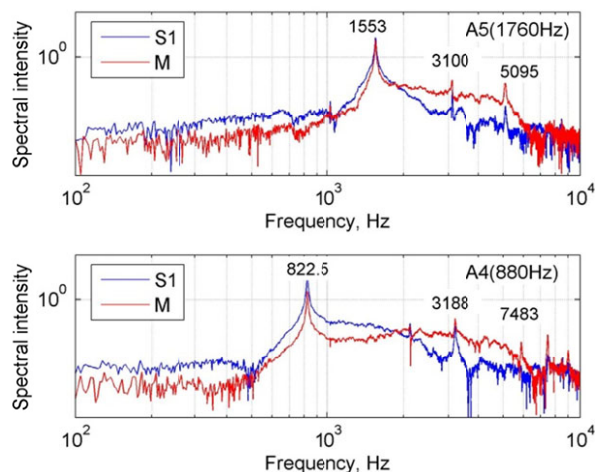


図-8 A4・A5音板のスペクトル (図中数字の単位はHz)

ほ4倍および9倍となっている。一方、A5音板に関しては、2次および3次の卓越周波数が1次の2倍および3倍程度となっており、設計とは異なる比率で発生している。A5音板の場合、設計段階でも周波数の比率を整数倍に定めることが難しく、そもそも周波数比率が崩れていることや、音板長が短い場合、形状に対するモード変化の感度が高くなるため、製作誤差等により目標値に到達しなかった

ものと考えられる。マレットの差については、A4同様高周波数においてマレットMのパワーが大きくなっているほか、マレットS1およびMによる1次モードのパワーが同程度となっている。これよりマレットS1によっても1500Hz程度までの音域がカバーできることがわかった。また、高音域については、振幅そのものが小さくなるため、大きな音を出すためには強く打撃する必要があり、引張強度の小さいセメント系材料では限界がある。

以上より、400~1500Hz程度の音階に対しては、いずれのコンクリート音板においても軟質系マレットの利用が望ましいといえる。また、低音域の音板についてはほぼ倍音設計ができるものの、高音A4以降の音板については倍音設計が困難であることがわかった。

#### 4. マリンバへの実装

音響特性を検討した結果、材料Aおよび材料Bを用いて音階A3~A5までの音板を半音も含めて製作し、マリンバとして実装した。実装後の状況を図-9に示す。実装後演奏を行った結果、いくつかの高音域の音板でひび割れが発生する問題が生じた。打撃によりマトリクスにひび割れが発生すると音響特性が大幅に変化し、音板としての性能を満足しなくなった。材料Aおよび材料Bは鋼繊維を混入したモルタルであるが、鋼繊維の存在によりひび割れ発生後に高いじん性を発揮する。これらの材料を用いた場合でも、母材のマトリクスにひび割れが発生すると音板としての性能を失うことになる。そのため、コンクリート音板としては鋼繊維を混入する必要はなく、母材のみを利用すればよいと考えられる。また、鋼繊維を混入した場合、研磨や切削により鋼繊維が表面から突出し、素手に突き刺さる危険性もあるため、鋼繊維は混入しないほうが望ましいといえる。また、ひび割れを発生させないという目的からは、PC構造による音板の作成も大きな可能性がある。

#### 5. おわりに

本研究では、マリンバに用いられる音板をセメント系材料により製作し、音板としての音響特性や調和のとれた形状などについて検討を行った。その結果、低音域(400~1500Hz程度)の音板については、軟質系マレットにより打撃することで、比較的減衰の低い打音が発生することがわかった。また、高音域の音板については、倍音設計が難しく、また大きな音を発生するためには強く打撃する必要があり、引張強度に達してひび割れが発生しやすくなる。今後は、鋼繊維を入れない高強度モルタルにより音板を作成することが望ましく、またPC構造などに

よりひび割れが発生しない音板を作成することができれば、楽器としてのコンクリート音板の可能性が大いに広がるものと考えられる。



図-9 コンクリートマリンバの実装

#### 謝辞

本研究はJCI年次大会2011(大阪大会)における、事業部会の企画として実施された。本企画を積極的に推進していただいた事業部会各位、ならびに演奏にご協力いただいた佐藤梨栄氏、広沢園子氏に謝意を表す。また、音板製作については鹿島建設(株)、清水建設(株)、住友大阪セメント(株)、太平洋セメント(株)、電気化学工業(株)、そしてイベント開催については西日本旅客鉄道(株)にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 社団法人セメント協会 : <http://www.jcassoc.or.jp/> 2010. 3.
- 2) 加藤勇人, 竹内正喜, 小倉直幸, 北原有希子, 岡本享久 : 繊維補強コンクリートの楽音への適用性に関する基礎的研究, 土木学会論文集 E2, Vol. 67, No.1, pp.48-56, 2011.
- 3) N.H.フレッチャー, T.D.ロッシング : 楽器の物理学, 丸善書店, 2002.
- 4) Bork, I.: Practical tuning of xylophone bars and resonators, Applied Acoustics, No.46, pp.103-127, 1995.
- 5) Orduna-Bustamante, F.: Nonuniform beams with harmonically related overtones for use in percussion instruments, Journal of Acoustic Society of America, No.90, pp.2935-2941, 1991.
- 6) 丸山収, 相沢旬, 星谷勝 : ARMA モデルによる既設構造物の動特性同定, 土木学会論文集, No.416/I-13, pp.439-447, 1990.