

研究概要報告書

(/)

研究題目	サヌカイト楽器 (石の楽器)に関する研究	報告書作成者	岸 憲史
研究従事者	岸 憲史、狩野謙二 (院生)、白岩洋子 (院生)、村田圭三 (学生)、中村聡史 (学生)、新田裕也 (学生)		
研究目的	<p>石の楽器は古代中国で磬 (けい) として、またイギリスやアイスランドなどでもlithophone と呼ばれて存在したらしいが、現在は宗教的な儀式用として一部で使われている程度で、調律した本格的な楽器としては使われていない。サヌカイト楽器は現代の加工技術を利用することにより多様な形態を持つ楽器として溶岩 (サヌカイト) という素材を蘇らせたものである。その優しい響きに魅せられた多くの人々 (天皇皇后両陛下を始め、世界的に著名な作曲家や打楽器奏者) がおり、一部は既に自動演奏できるまでになっている。</p> <p>しかるに、サヌカイト楽器の中でも石宗 (そう) と呼ばれる調律された楽器は形状の複雑さ故に未知の部分が多い。これらの楽器の振動メカニズムを解明することは、限りあるサヌカイト資源の有効利用と無駄な工数の削減につながり、学術的な価値も高いと考える。本研究はこの石宗 という楽器を主体にサヌカイト楽器全般の振動解析を行い、ピッチや音色の調整法を明らかにすることを目的としている。</p> <p>本研究は、数値解析手法である有限要素法と実験的手法であるモーダル解析法によって石宗 の1種である「円響」(従来は「輪鐘」と呼んでいたが、音響学会音楽音響研究会での議論に基づき呼称を変更) と呼ばれる楽器の振動解析を主として、より広い音域に対応する種々のサヌカイト楽器の可能性を探ろうとするものである。サヌカイト楽器のオーナーである前田氏は、現在2オクターブ半ほどの音域をさらにその上と下の両方の音域までカバーし、ピアノのほとんどの鍵盤に対応するピッチを有する楽器を作ろうとしており、これを音響学の視点から支援していきたい。</p> <p>一方、弦楽器や管楽器と違って、打楽器は基本的に高次部分音が基本音の整数倍にならないためにピッチ感覚がぼやけたり、綺麗に聴こえなかったりする。したがって、その振動のメカニズムを解明せずにトライ・アンド・エラーで行っていたのでは資源と人手の無駄になる。本研究は、前田氏の協力を得て、基本としての中音域で優れており、楽器としての実用に供されている「円響」、低音域に適すると思われる渦形 (コイル形) 板状振動子、高音域に適する棒状振動子の3つのすべてにわたって有効な有限要素解析とモーダル解析を駆使して振動のメカニズムを解明し、それに基づいて計算機実験を行い、ピッチや音色の制御に有効な形状を調査するものである。また、有限要素解析の際に必要なとなるサヌカイトの振動と密接な関係を持つ材料定数 (特にヤング率) の測定方法にも検討を加える。</p>		

研究概要報告書

(/)

<p>研究内容</p>	<p>本研究の中核をなし、最も成果の得られた円響 (出願時には「編鐘」と呼んでいた) の振動解析結果について述べ (添付資料)、解析の際に必要なサヌカイトの材料定数特に異方性の有無について若干触れる。</p> <p>前田氏より提供して頂いた数個の円響のうち2本、試料A (全長 196cm, 基本モードF₁ の周波数 $f_{F_1}=1,047$ Hz, 音名 C₆) および試料B (全長 160cm, $f_{F_1}=1,308$ Hz, 音名 E₆) について、有限要素法による解析を行い、音の分析とモーダル解析によるモード周波数との比較を行った。その結果、試料A に関しては先行研究の方響の場合 (添付資料)と同程度のずれ (f_{F_1} で7%程度、つまり周波数で90%、高次モードで4%)であったが、試料B の場合は f_{F_1} で2%以下、つまり周波数で4.3%、高次モードで4-15%)で f_{F_1} となり周波数の精度が大きく向上した。モード形状については、試料A では方響と基本的に同じと思ひ込み、f_{F_1} と方響の重要な高次モードであった中心円柱の第1ねじりモードと第1たてモードの周波数 f_{T_1}, f_{L_1} が寸法 (全体の長さや内部円柱の太さ) によってどう変化するかを調べた。しかし、音のスペクトルの中にこの2つの部分音よりもレベルの大きな未知のモードがあることがわかり、詳しく調べたところ西洋のベル (和鐘も含む) の典型的な基本モードである(2,0)モードに相当することがわかった。さらに、試料Bの音のスペクトルを調べたところ、基本音 f_{F_1} のレベルが最も大きく、次にレベルの大きなモードが2つ存在 (説明書の図1)するが、いずれも基本音のレベルに対して -50 dB 以下であった。</p> <p>次に、これら3つのモード周波数 f_{F_1}, f_{20}, f_{21} が主としてどの寸法で変えられるかを詳しく調べた (有限要素法による数値実験で添付資料 にまとめてある)。全体の長さを変化させて行った場合と、長さは一定にしたまま、外部円筒枠の壁を内側から削って薄くしていった場合の結果をそれぞれ説明書の図2, 3示す。これらの図から、以下のことがわかる。</p> <p>(1)全長が短くなると、f_{F_1} (概略一次元理論に従って $1/L^2$ に比例)と f_{21} は高くなるが、それに比較して f_{20} の変化はかなり小さい。</p> <p>(2)外部円筒枠が薄くなるにつれて、f_{20} と f_{21} は急激に低下するが f_{F_1} の変化は小さい。</p> <p>これらをまとめると、f_{F_1} は円響の全長によって、f_{20} は外枠の厚さによってそれぞれほぼ独立に変えることができ、f_{21} はそのどちらにも影響を受けて変化することがわかった。なお、ここで省略したがつまり周波数は円響の形状をわずかに非対称にすることによって生ずることもわかっており、これも上記の3つの周波数とはほぼ独立に制御できることがわかった。(2,0)および(2,1)モードは、外枠を薄くした場合、機械インピーダンスが小さくなり、それらのモード周波数も低くなって基本モード周波数に近づくので、音色に影響を与える可能性がある。</p> <p>有限要素解析で、円響の分割要素数を120 から960 にした場合はすべてのモード周波数の精度は改善される (説明書の表1)が、根本的には異方性の問題を解決する必要がある。従来、サヌカイトの採取場所と切り出し方向が特定できないために異方性の有無は明確でなく、等方性材料として扱わざるを得なかったが、本研究で初めて板状振動子に面内等方性のものと面内異方性のものがあることが確認できた (説明書の写真参照)。このことから、サヌカイトは全体として一軸異方性材料と考えられ、今後これを考慮した解析が望まれる。</p>
-------------	---

研究概要報告書

(/)

<p>研究のポイント</p>	<p>(1)「円響」の振動のメカニズムは、既に解析済みの「方響」と類似していると考えられるが、本当にそうか。類似点と相違点を明確にして、「円響」独自の設計法を示すこと。例えば、「方響」では第1ねじりモードが音色にかかわる高次モードの1つであったが、軸対称構造の「円響」ではそれを励起することも困難であるし、仮に励起できたとしても音波として放射することは出来ない。</p> <p>(2)低音用として期待される渦形板状振動子は両端自由の長い板を巻いてコンパクトにすることを目指したものであるが、その長さが有効に働いているかどうかを調べること。</p> <p>(3)サヌカイトの音片(細長い)試料の打音から求めた弾性定数(ヤング率)は試料によって値が異なるものが存在するが、その違いは採取場所によるバラツキによるものは、切り出し方向(目視では特定できない)によるものか(すなわちサヌカイトに異方性があるかどうかを明らかにすること。</p>
<p>研究結果</p>	<p>(1)寸法と形の異なる2本の「円響」について有限要素解析と実験(音の分析とモーダル解析)を行った結果、以下のことがわかった。</p> <ul style="list-style-type: none"> ○「方響」と同様に、基本モードは内部円柱の第1曲げモードで最もレベルが高いのでその周波数がピッチ周波数になり、サヌカイトの全長を変えることによりピッチ周波数を調整することができる。 ○「方響」では部分音が主として内部円柱の第1ねじりモードと第1たてモードによって生じていたが、「円響」では、主に円筒状外枠のみが振動する西洋ベルと類似の(2,0)と(2,1)モードにより生じ、特に(2,0)モードの周波数はピッチ周波数とはほぼ独立に外枠の厚さだけで変えることができるので、ピッチ周波数と調和関係になるように調律することが可能である。 <p>(2)渦形板状振動子は、これに対応する第1曲げモードを消失するために、予想通りの低周波化は期待できない。</p> <p>(3)サヌカイト板には、面内等方性のものと面内異方性のものがあり、サヌカイトは一軸異方性の材料と考えられる。</p>
<p>今後の課題</p>	<p>先行研究の「方響」とほぼ同じ全長の「円響」では基本モード周波数の誤差が7%(ほぼ半音1つ分)、つまり周波数は解析値のほうが実験値の約1.9から4.6倍という値であったのが、もう1本の小さな「円響」では誤差がそれぞれ、1.8%と4.3%になり大幅に改善された。これは、主として解析に使ったヤング率と実際のヤング率が個々の試料間で違っていることによると考えられるので、ヤング率が本当に採取場所によってこの程度の差があるのか異方性を考慮して解析すれば誤差の問題は解決するのかを調べる必要がある。</p> <p>この材料定数の問題を解決すると同時に形状寸法と各振動モード周波数の関係を調べ直し、さらに聴覚上好ましいと思われるピッチ周波数と部分音の周波数の関係を見出すことにより、両者の関係を考慮した「円響」を製作して本研究の設計の有効性を確認する必要がある。</p>

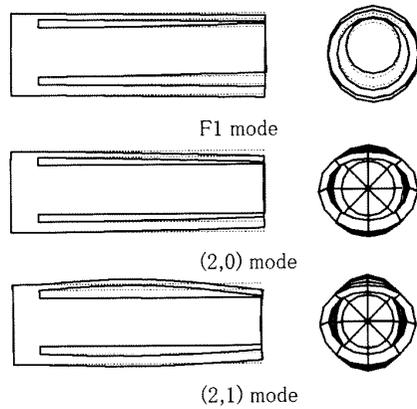


FIGURE 1. Modes shapes of the three important modes of an enkyo.

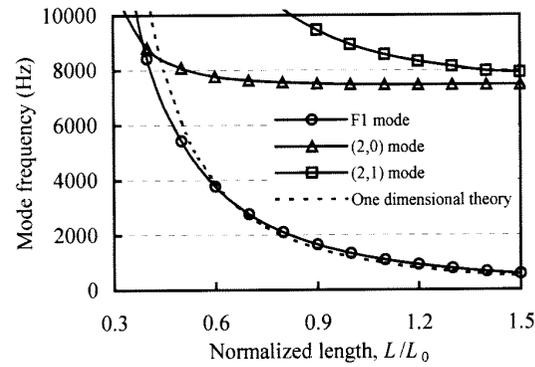


FIGURE 2. Dependence of the frequency on the total length of an enkyo.

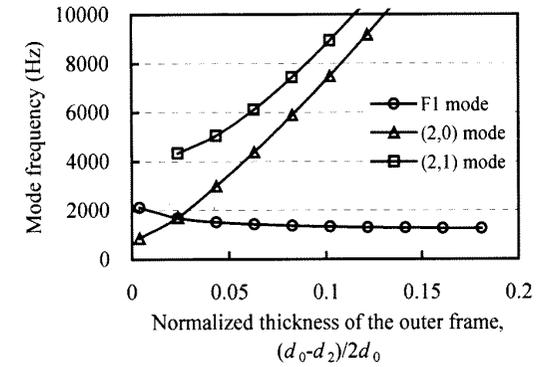


FIGURE 3. Dependence of (2,0)- and (2,1)-mode frequency on the total length of an enkyo.

Table 1. Mode frequencies of the three mode pairs.

Mode	FEM [Deviation (%)]	Modal Analysis
F1	1318.7 Hz [0.8]	1308 Hz
F1'	1325.4 Hz [0.8]	1315 Hz
(2,0)	7158.6 Hz [10.1]	6501Hz
(2,0)'	7160.4 Hz [10.1]	6501Hz
(2,1)	8772.4 Hz [5.8]	8293 Hz
(2,1)'	8827.4 Hz [3.4]	8583 Hz

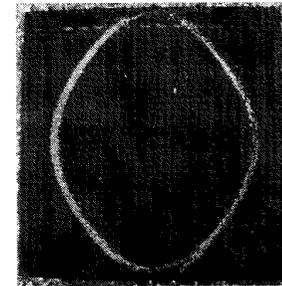
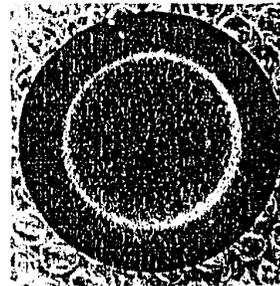


FIGURE 4. Chladni patterns of Sanukite circular plate (left) and square plate (right). They indicate isotropic and anisotropic properties in their planes