

論文 高靱性セメント系薄肉材料による弦楽器製作と音響性能

南館 傳^{*1}・谷貝 有紀^{*2}・木之下 光男^{*3}・岡本 享久^{*4}

要旨: 近年、大幅な技術的進歩をした超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC）を活用し、流動性試験、部材の強度試験、製品安定性試験および音響解析の結果から、UFC 製薄肉弦楽器（本論文では UFC 製ウクレレ）を製作し楽器としての可能性の評価を行った。セメントの種類や繊維の種類、選定および流動性の改善を行うことにより、所要の強度を有した曲面状で板厚 3mm 以下の薄肉の共鳴胴を製作できた。UFC 製と木製のウクレレの音響解析の結果から、木製に比べ UFC 製は、低音域のピークの現れ方、高音域の音圧レベルおよび減衰特性の点で木製とは異なる音色を呈することが分かった。

キーワード: 超高強度繊維補強コンクリート、シート状繊維補強、セメント系薄肉材料、音響解析、弦楽器

1. はじめに

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。立命館大学理工学部環境マテリアル研究室では、「UFC 技術の応用から楽器を製作し、楽器としての性能を評価する」研究に7年間取り組み、その成果を一般社会に発信してきた¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。これまでの研究では、UFC 製は木製の楽器と比べ、高周波域で特徴的音色を有することを指摘した。工業製品として世の中に売り出されている楽器の中で、最も売り上げ台数が多いのはギターである⁵⁾が、ギターをはじめとする弦楽器が過去に研究対象として取り上げられた例は少なく、さらなる研究が必要とされる。弦楽器のひとつであるウクレレは構造が比較的単純であり、ギターに比べて容易に製作が可能であると思われる。将来的にギターを製作し、同様の音響解析を行うことを念頭に置いて、本論文ではウクレレを対象として研究を行った。

ウクレレの共鳴胴部分には薄肉かつ曲面的な形状を持つ部材が多く適用されており、既往の研究に用いられていた型枠成形の手法では、このような複雑な構造体を製作することは困難であった。また、フェロセメントによる手塗り成形は、人の手で塗り重ねていくため、楽器表面が不均一となり、楽器の要素として重要な見た目の美しさが損なわれてしまうことが問題であった。本研究では、型枠を用いて美観を損なわずに UFC 製薄肉弦楽器を容易に製作する手法の検討を行った。また、流動性試験、部材の強度試験、製品安定性試験および音響解析の結果から、楽器としての可能性の評価を行った。

2. UFC 製ウクレレ製作の前提条件

一般的なウクレレの構造を図-1に示す。ウクレレは、ひょうたん型の共鳴胴にネックが取り付けられており、共鳴胴は表板と側板、裏板に分けられている。また、表板や裏板、側板には力木で補強がなされており、これら補強材の配置などでも音響特性へ影響を及ぼす。ウクレレにはこういった補強材が少なく、共鳴箱の材料の違いによる音響特性の変化が比較的评价し易いと考え、音響評価の対象楽器として選定した。

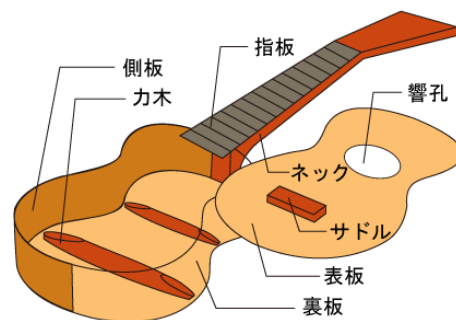


図-1 ウクレレの構造

ウクレレは増幅器を用いず、共鳴胴部分で音を増幅させて音を奏でる楽器である。その振動は連成振動と考えられ、弾かれた弦の振動は、サドルや表板を伝わり、内部、側板、裏板にエネルギーを伝える。弦から空気中に直接放射される音は微小だが、板が受けた振動は、共鳴胴内部の空気および共鳴胴周辺の空気を大きく振動させ、空気中に大きな音となって放射される。

共鳴胴の形状や材質を変更すると、共鳴胴内部の空気および周辺の空気の振動が変化し、弦楽器の特徴である基本周波数の整数倍の周波数成分の大きさや減衰特性に

*1 立命館大学 理工学部 環境システム工学科 (学生会員)

*2 立命館大学 理工学研究科 環境都市専攻 (学生会員)

*3 竹本油脂(株) 第三事業部 参与 工博 (正会員)

*4 立命館大学 理工学部 環境システム工学科教授 工博 (正会員)

影響を与え、音質に大きな違いが生まれる。共鳴胴部分の部材厚や使用材料がウクレレ独特の箱鳴りや音色を左右する重要な要素であるため、この共鳴胴部分に焦点を当て、ウクレレの音響評価を行った。以下、本論文で製作したウクレレのことを UFC 製ウクレレと呼ぶ。

3. ウクレレ共鳴胴の製作

3.1 使用材料と配合

結合材 (C) には、シリカフェウムセメント (密度: 3.01 g/cm³, 比表面積: 6550 cm²/g, シリカフェウム混合率 15%) を使用した。繊維には、ポリビニルアルコール繊維メッシュシートを使用した。混和剤には、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤 (SP1), 収縮低減剤 (AD1), 消泡剤 (AD2) を使用した。UFC 製ウクレレ共鳴胴部分の配合表および繊維の物性表を、それぞれ表-1 および表-2 に示す。

表-1 配合表

水-結合材比 (%)	単位量 (kg/m ³)				
	W	C	SP	AD1	AD2
16.2	水	シリカフェウムセメント	高性能AE減水剤	収縮低減剤	消泡剤
	299.7	1850	37	37	7.4

表-2 繊維物性表

材質	ポリビニルアルコール繊維メッシュシート	
目付 (g/m ²)	91	
目合 (mm)	10	
厚さ (mm)	0.37	
樹脂付着率 (%)	14	
引張強度 (N/5cm)	(縦方向)1290	(横方向)1410
引張伸度 (%)	(縦方向)5.4	(横方向)6.5

3.2 共鳴胴製作における課題と解決策

(1) 薄さと強度

共鳴胴部分に使用される板材の厚さは、一般的に 3mm 以下とされる。部材厚が薄いほど振動が伝わった時に部材自体が振動しやすくなり、大きい音が放射される。また、より高い音を表現できる。音響への影響を考えると部材厚が薄い方が良いが、強度低下が免れないため、結合材として強度発現性が最も優れた前記のセメントを使用した。また、セメント系硬化体の弱点である、曲げ引張強度および靱性の向上のために、表-2 の繊維による補強を行った。薄肉状態での強度の評価が必要だったが、コンクリートの強度試験方法には薄肉状態での規格が存在しなかったため、オリジナルの型枠を用いて薄肉の試験片を製作し、プラスチックの JIS 規格 (JIS K 7171 お

よび JIS K 7111) を準用し 3 点曲げ試験とシャルピー衝撃試験を行った。衝撃試験および曲げ試験のどちらの試験片も、脱型後 20°C で 12 時間の水中養生を行ったのち、恒温機内の 85°C の熱湯の入った水槽に移動させ、48 時間の熱湯養生を行った。3 点曲げ試験およびシャルピー衝撃試験の概要を表-3 に示す。

表-3 3 点曲げ試験およびシャルピー衝撃試験の概要

3 点曲げ試験		シャルピー衝撃試験	
試験規格	JIS K 7171	試験規格	JIS K 7111
試験片寸法	60*25*3mm	試験片寸法	75*10*3mm
支点間距離	48mm	支持間距離	62mm
載荷速度	1mm/1min	※ノッチなし方式で測定	

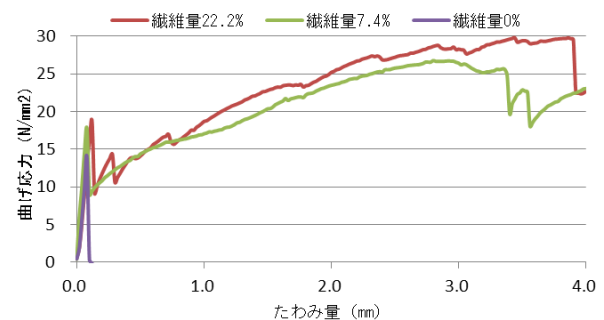


図-2 曲げ応力とたわみ量の関係

曲げ強度試験結果を図-2 に示す。ペースト供試体を 1 種類、シート状繊維混入率を 7.4[%/vol] と 22.2[%/vol] にした UFC 供試体を 2 種、合計 3 種類の試験片を用意した。繊維を入れてないものは僅かのたわみ量で脆性破壊したが、繊維を混入したものは弾性の範囲内において曲げ引張強度が向上し、初期ひび割れ発生以降の挙動では、荷重の増加とともに微小なひび割れを多数発生させながら延性的な性状を示し、繊維混入により高い靱性を有した。

表-4 コンクリートの衝撃試験結果と比較

素材	衝撃強さ (kJ/m ²)
ペースト (繊維量: 0.0%)	1.7
UFC (繊維量: 7.4%)	16.8
ガラス繊維強化 (50%) 樹脂 (FRP)	17.0
炭素繊維強化樹脂 (CFRP)	20.0

衝撃試験結果の比較を表-4 に示す。比較のため、FRP (ガラス繊維) と CFRP (炭素繊維) の衝撃強度も併せて記載する。試験片は、ペースト供試体とシート状繊維を導入した UFC 供試体の 2 種類を用意した。ペーストに比べて UFC は、10 倍もの衝撃強さを有しており、FRP や CFRP と同程度の強度であった。繊維による補強は、脆性的だったセメントペーストの衝撃吸収性能を向上させ、

高い靱性を付与させたことが分かった。強度と靱性の向上により、薄肉部材であっても、所要の強度をもったウクレレの製作が可能になった。

(2)補強繊維と型枠成形

UFC 製トランペット⁶⁾は、銅メッシュに鋼繊維入の UFC を塗りつけて作製されたため、薄肉かつ曲面的な構造も自由に製作できた。しかし、表面が不均一な仕上がりになり、楽器に重要な美観が損なわれてしまった。本研究で製作する UFC 製ウクレレは楽器表面を美しく仕上げるため、型枠を用いた成形方法を採用した。

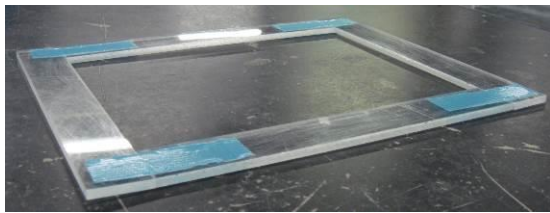


写真-1 ダルシマー用型枠

UFC 製ダルシマー⁴⁾は、直線的な形状の部材だけで形成されており、写真-1のような開口の広い型枠(寸法: 200mm×150mm×3mm)に短繊維入り UFC を流し込んで 3mm 厚の部材を製作し、後から各パーツを接着するという方法で製作された。

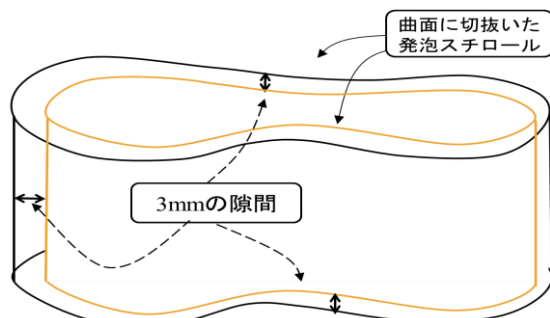


図-3 ウクレレ共鳴胴用型枠の概略イメージ

図-3のような曲面状で板厚 3mm 用の開口(隙間)を持つ一体成型用型枠を製作し、型枠の上面からダルシマーと同様の配合の UFC を流し込んだ。しかし、短繊維混入の UFC は、高粘度かつ低フロー値で流動性が悪く、繊維が型枠に引っかかってしまい、うまく充填出来なかった。そこで、短繊維をセメントにプレミックスする手法ではなく、表-2 のポリビニルアルコール繊維メッシュシートを型枠内に予め挿入したところにセメントペーストを流し込み、ペーストをメッシュシートで補強した。すなわち、3mm の狭い隙間に注入するためには、フローが大きく、かつ粘性の低い、高流動性が必要とされたため、モルタルではなくペーストで実施した。特に高流動性と

高強度の両立を図るために最適な高性能 AE 減水剤 (SP) を選択使用して、水セメント比が 16.2% のセメントペーストを練り混ぜた。表-1 の配合を使用し、SP の添加率を変えて、そのフロー値および粘度を、それぞれフローコーンおよび回転粘度計を用いて測定し評価した。フローの測定の概要と、フロー値および粘度の測定結果をそれぞれ表-5 および図-4 に示す。

表-5 フロー試験概要

フロー試験			粘性試験	
試験規格	JIS R 5201		使用器具	単一円筒形回転粘度計
コーン寸法	上部内径	70mm		
	下部内径	100mm		
	高さ	60mm		
※0打で測定			※測定開始10分後に読み取り	

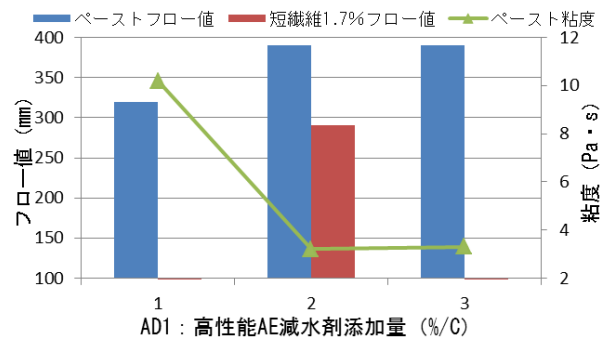


図-4 流動性と減水剤添加量の関係

W/C=16.2%という低水セメント比において、SP 混和剤を添加しない場合では、流動性が全くなかった。しかし、セメント質量に対して SP を 1%程度添加することにより十分な流動性を確保でき、材料分離は全く起こらなかった。適正な添加率はフロー値と粘度の試験結果から SP 添加率が 2%であることが分かった。短繊維を 1.7[%/vol]混入した場合、メッシュシート使用時に比べ、ペーストでもフロー値が低下した。補強繊維に、短繊維ではなくメッシュシートを使用し、SP を併用することによって、十分な流動性を確保し曲面的かつ開口の狭い型枠による製作も可能となった。

(3)製品安定性

一般に、UFC は低水セメント比のモルタルを用いるため、骨材の存在により乾燥収縮はそれほど大きくはない。しかし、本研究ではペーストが主体であり、ペーストの容積が全体の大部分を占めるため、乾燥収縮が大きくなることが予想された。楽器のような繊細な構造体は乾燥収縮や自己収縮による変形が大きすぎると、反り返りやひび割れ等により音響へ悪影響を及ぼすことが予想され、収縮低減剤(ADI)を使用し、その効果を評価した。

W/C=16.2%のペーストに、ADI を添加しないものと、

セメント質量に対して 2% 添加したものを、シート状繊維を入れたものと入れていないものの組み合わせで、計 4 種類の供試体を製作した。供試体は 100mm×1000mm×3mm の長方形薄肉板で、脱型後は板の下面を養生テープで覆って共鳴胴内部と外部での乾燥速度の違いを再現し、恒温低湿室（20℃・30%）にて 7 日間の封緘養生を行った。測定結果を表-6 に示す。

表-6 そり返り量測定結果

AD1	繊維	反り返り量 (mm)		
		左側	右側	合計
あり	あり	0.20	1.95	2.15
あり	なし	1.70	2.85	4.55
なし	あり	5.25	4.80	10.05
なし	なし	9.30	9.35	18.65



写真-2 AD1 あり・繊維ありの供試体（左）と AD1 なし・繊維無しの供試体（右）

表-6 のそり返り量は、写真-2 に示すように、供試体の端の水平面から板までの高さのことである。AD1 を添加していない供試体は、目視でも十分確認できるぐらいに板の左右がそり返っており、変形していた。AD1 を添加したものは添加していないものに比べ、収縮量が 4 分の 1 以下に、繊維ありの供試体は繊維なしの供試体に比べて収縮量が半分程度に抑えられていた。繊維の導入は強度や靱性の向上以外にも、収縮を抑制する効果も持ち合わせていることが分かった。SP を添加し、シート状繊維を導入することで収縮をほぼ完全に抑制でき、製品の安定性を確保することができた。

3.3 ウクレレ共鳴胴の打設

ウクレレの共鳴胴部分の製作には様々な課題があったが、独自に考案した製造方法を用いて可能であることが判明した。その製造方法を図-5 に示す。市販されている木製のウクレレを参考にして、発泡スチロール板を共鳴胴部分の形にくり抜いて型枠とし、図-5 に示す手順で製作することで、中空の UFC 製ウクレレ共鳴胴を製作した。脱型後 20℃ で 12 時間の水中養生を行ったのち、恒温機内の 85℃ の熱湯の入った水槽に移動させ、48 時間の熱湯養生を行った。その後、材齢 60 日になるまでの間は封緘養生（室温 20℃、湿度 60%）を行った。完成したウクレレの共鳴胴を写真-3 に示す。音響試験は材齢 60 日で行った。



写真-3 UFC 製ウクレレの共鳴胴

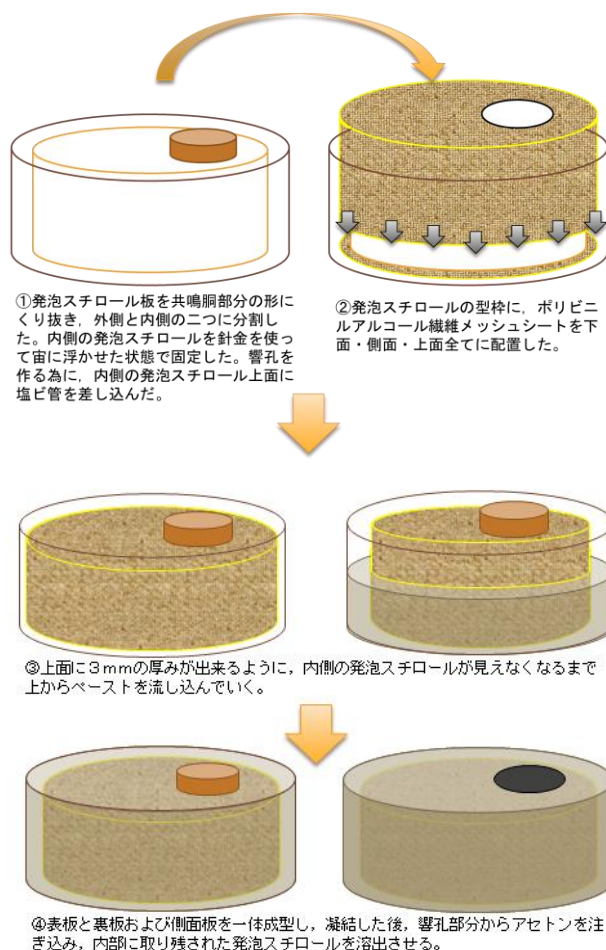


図-5 ウクレレ共鳴胴製作手順

4. 音響試験

4.1 打音の集音の概要

ウクレレの音響特性評価には共鳴胴部分の振動特性が大きく関係している。そこで、弦楽器の基本的な音響特性の評価を行う時に、図-6 のように共鳴胴の中心部分をタッピングし、得られた打音の解析を行う手法が一般的であり、本研究でも同様の方法で試験を行った。ウクレレの共鳴胴をハンマー（質量 60g、直径 45mm）でタッピング（高さ 150mm から自由落下）し、響孔の直上 100mm でマイクを用いて録音した。録音した音源を周波数解析し、木製と UFC 製の音圧、周波数および時間的減衰の比較を行った。周波数解析に用いた音源は、10 回のタッピングを行い、その平均値を採用した。

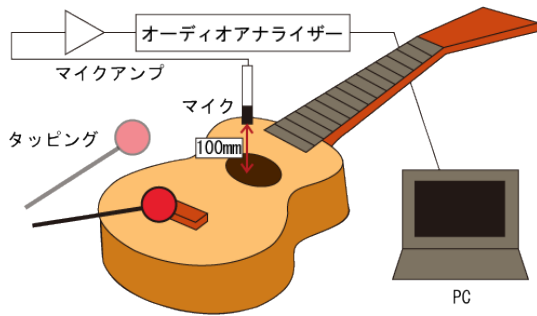


図-6 音響試験方法

4.2 打音の解析結果

UFC製ウクレレ(以下UU)と木製ウクレレ(以下WU)の共鳴胴の打音の解析結果を図-7, 図-8, 図-9 および図-10に示す。

(1)音圧と周波数

UU共鳴胴(赤)とWU共鳴胴(青)の音圧と周波数の関係を図-7に示す。1~5kHzにおける周波数スペクトルを比較すると、WUは隣り合うピーク同士の間隔が狭く、突出したピークが少ないのに対して、UUは間隔が広く、顕著なピークが多く存在している。また、6~10kHzでは、UUの音圧レベルの平均値はWUのそれより約2.8dBしか差がないが、14~18kHzの高音域においては、UUがWUを約4.4dB上回っている。以上の結果から、UUはWUに比べて、1~5kHzの低音域では顕著なピークが多く存在しており、10kHz以上の高音域においては音が強く放射されていると考えられる。

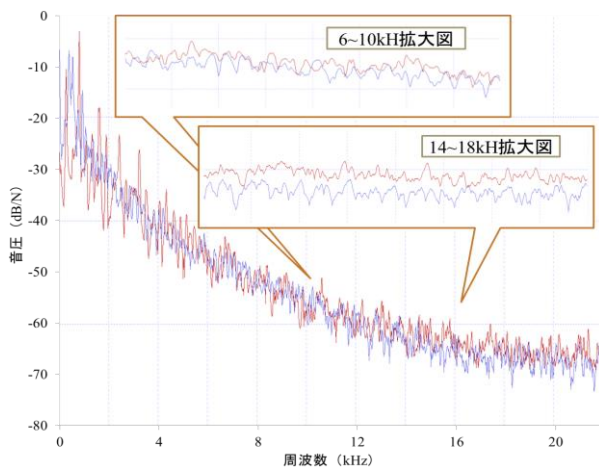


図-7 UU共鳴胴(赤)とWU共鳴胴(青)の音圧(dB/N)と周波数の関係

(2)振幅と周波数

UU共鳴胴(赤)とWU共鳴胴(青)の振幅と周波数の関係を図-8に示す。低音域における周波数スペクトルを比較すると、WUは小さいものを含めると狭い範囲内に高次モード音が数多く存在しているのに対して、UU

は少数の高次モード音が離散的で広範囲にわたって存在している。WUは1.0kHzまでの範囲においては振幅も大きく、多くの共振がみられるが、1.0kHz以上から振幅は小さくなるとともに共振の数も減少し、2.0kHz以上ではほとんど共振がみられない。一方で、UUは全域でWUほど多くの共振数はないものの、一つひとつの振幅は大きく表れている。また、1.0kHz以上においては複数の共振が存在しており、3.5kHz付近まで目立ったピークが表れている。以上の結果から、低音域においても、UUはWUに比べて、特定の周波数に顕著なピークが現れており、音が明瞭に放射されていると考えられるので、人の耳へどのように聞こえるかを検証するため、官能試験を行うことなどが今後の課題となる。

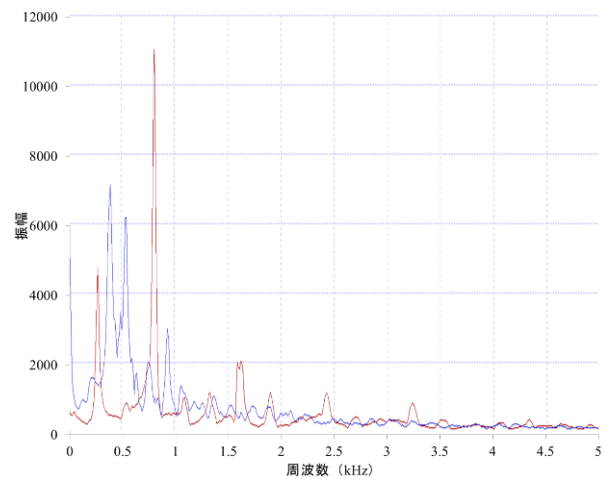


図-8 UU共鳴胴(赤)とWU共鳴胴(青)の振幅と周波数の関係

(3)各周波数の音圧の時間的減衰

UUおよびWUの音圧レベルの時間的減衰をそれぞれ図-9および図-10に示す。X軸とY軸、Z軸にそれぞれ周波数[Hz]、音圧[dB]および時間[s]をとって、打音の音圧がピークとなった点からの時間的減衰を三次元図で表している。

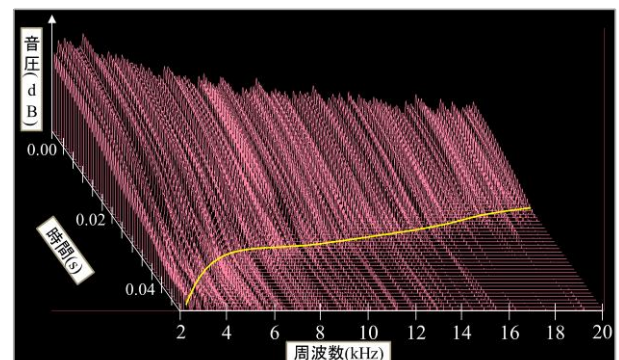


図-9 UU共鳴箱のピークからの時間的減衰

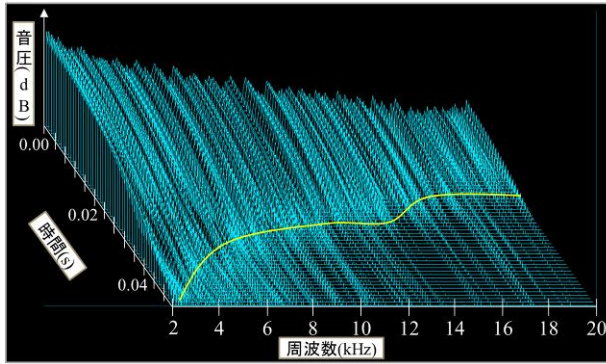


図-10 WU 共鳴箱のピークからの時間的減衰

全周波数帯において、UU は WU に比べて音の時間的減衰はゆるやかである。特に 10kHz 以上では、黄色の線で示すように、UU と WU の音圧レベルの時間的減衰に顕著な差が現れていることがわかる。UU は WU に比べて、0.004 秒長く放射しており、音の減衰時間が長く、余韻のある音であると考えられる。

5. 材料の機械的性能と音響特性の関係

弦楽器の音響には、比ヤング率(弾性係数を密度で除した値)や E/G 値、異方性などの要素が大きな影響を及ぼす。各種要素は、密度や縦弾性係数、せん断弾性係数、繊維の配向性を調べることで求められる。UFC 製楽器と木製楽器の音響的要素を数値として表し、両者を比較することで、音響解析から得られた音響特性の違いの客観的な裏付けを行う。3mm 薄肉状態での曲げ試験から、静的縦弾性係数と比ヤング率を求めた。

強度試験から得られたデータから、材料選定で重要なパラメーターである比ヤング率を求めたものを表-7 に示す。また、弦楽器材料として理想的なスプルー(楽器用木材、マツ科トウヒ属)の弾性係数および密度を合わせて載せている。比ヤング率が高い方が、共振周波数が高くなるとされる。図-8 の結果から、UU の一次の共振周波数は WU に比べて低い値を示していることがわかる。材料の比ヤング率が高い方が、共振周波数が高くなるという特性がこの結果からもわかる。

表-7 繊維量毎の比ヤング率と密度

種類	繊維量	曲げ強度 (N/mm ²)	静的縦弾 性係数 (kN/mm ²)	密度 (g/cm ³)	比ヤング 率	圧縮強度 (N/mm ²)
UFC	0%	13.9	24.8	2.22	11.18	140.9
	7.4%	26.8	25.4	2.15	11.84	
	14.8%	34.3	25.3	2.08	12.19	
	22.2%	29.8	25.0	2.00	12.45	
スプルー		70.0	10.8	0.41	26.34	37.0

一般に、共鳴胴用部材は比ヤング率が大いいと、楽器

材料として優れているとされる⁹⁾。強度試験に用いた供試体は養生日数が 2 日間と短いため、比ヤング率が小さいが、十分に養生を行い、強度が上昇すれば、比ヤング率もスプルーの値に近づき、理想的な楽器部材になり得ると考えられる。

6. まとめ

本研究により得られた成果は以下の通りである。

- (1) 楽器製法に際し、「発泡スチロール、繊維、溶解、高流動、型枠」に独自の工夫をして強度と美観にも配慮した UFC 製薄肉弦楽器の製造方法を見出した。
- (2) すなわち、UFC 製薄肉楽器の製造に際し、メッシュシート繊維、発泡スチロールとその溶解、高流動ペーストの利用から、厚さ 3mm 以下の薄肉を持ち、しかも打継ぎ目や接着部などが無い一体構造の共鳴胴を実現できた。
- (3) 音響解析からは、UFC 製ウクレレは木製のものに比べて、低音域におけるピークの表れ方、高音域における音圧レベルおよび減衰特性に差異が存在することが分かったが、人の耳へどのように聞こえるかを検証するため、官能試験を行うことなどが今後の課題となる。

謝辞

本論文作成にあたり、ヤマハ株式会社・鈴木克典様には多大なるご指導ならびにご協力を頂き、立命館大学客員研究員：中川隆一様および明知石樹様には実験器具の製作や研究に関するご助言を頂きましたことをここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 武田字浦, 岡本享久, 竹内正喜: PC 鋼線と超高強度繊維補強コンクリートの協働作用による楽器の開発, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, Vol.63, pp.837-838, V-419, 2008.9
- 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
- 3) 大島義信, 水田真紀, 岡本享久: コンクリート楽器マリンバの展示と演奏, コンクリート工学, Vol.49, No.10, pp.80-82, 2011.4
- 4) 岡本享久ほか: 超高強度繊維補強コンクリート製楽器の製作と楽音性能に関する研究, 第 40 回セメント・コンクリート研究討論会・論文報告集, 2013.11
- 5) 平成 26 年経済産業省生産動態統計「繊維工業、その他の工業」, 調査票番号 5020
- 6) 小野晃明: 楽器用木材の音響と物性の秘密の関係, 数理解析研究所講究録, 1209 巻, pp.89-98, 2001