

## 空間を利用した高性能複合材インシュレータの開発(第1報)

○小林 満<sup>1)</sup> 金井 隆雄<sup>2)</sup>

Development of High Performance Composite Material Insulator Using Inner Void.

Mitsuru Kobayashi Takao Kanai

オーディオアンプやCDプレーヤーなどの音響機器のインシュレータ材料は、主にプラスチックや金属類が使用されている。特に、オーディオ製品の足となるインシュレータは、その振動制御特性によってオーディオ内部の振動に影響を与え、スピーカーから発する音質を大きく変化させることで知られている。本研究では、木材が持つ微細な空間構造と様々な有機・無機材料が持つ振動特性を複合し、オーディオ製品から自然な音質を奏でることを補助する画期的なインシュレータを開発したので、その特異特性について報告する。

KEY WORDS: insulator, audio, composite material, Void, phenol resin, wood, phenol resin

### 1. 諸 言

オーディオ機器の内部はトランスをはじめとした様々な部品から振動が発生しており、音質劣化の原因となっている。このため、30年ほど前までは、振動を止めるという目的で振動減衰性の高いゴムがインシュレータに使用されていた。最近では生産性が高く、ゴムよりも音質効果が高いプラスチック製の射出成型品が主に用いられている。一方、クラシック音楽などを高音質で聞くためのHi-End機器においては、生産性は劣るものの、逆に音の伝達速度が速いことと、形状を工夫して高周波数に固有振動を設けて共振させることで高音域を強調することができる金属類が使用されるようになった。また、市販されているインシュレータには、金属やプラスチックなどの異種材料を張り合わせたものや、金属の先端を鋭利に加工し、振動減衰性を高めた製品など様々な工夫がされている。しかし、クラシック・ジャズ・ロックなどのジャンルによらず、機器の設計どおりにまたはCD音源どおりに低音から高音まで忠実に再現させるためには、更なる画期的な工夫が必要と考えられた。<sup>[1][2][3][4][5][6][7]</sup>

本研究では、様々な楽器や音声を正確な音質でかつ独立的に分離して伝達させるための最適なインシュレータ材料と構造と形状を研究したことで、CDからライブ音源の様な自然で立体感のある音質を引き出すことを成し得たので報告する。

### 2. 実 験

#### 2.1. 材料、製法、評価方法

各種有機材料(アラミド、セルロース、NBRゴム、SBRゴム、PAN、等)と、各種無機材料(炭酸カルシウム、硫酸バリウム、マイカ、ウォラストナイト、アルミナ、ゼオライト、グラファイト、活性炭、ポーラスシリカ、ポーラスアルミナ、銅、黄銅、ステンレス、アルミ、等)の中から数種類を選択し、添加量を体積%で変えながらフェノール樹脂を適量加え、混合機にて均一に攪拌した。次に熱圧縮成型機にて、50mmφの円筒形状で温度140~160℃、圧力30~40MPaにて成型後、表面を研磨し、中心部に穴あけを行い、厚みが5~20mmの複合材インシュレーターを試作した。なお、成型温度と圧力を変えることによって成型品内部の空間構造(気孔率と気孔径)を変化させ、また材料の選択を変えることで、成型品の比重を変化させた。

音質評価機器には、ACCUPHASE製クリーン電源、プリメインアンプ、CDプレーヤー、ESOTERIC製パワーアンプ、プリアンプ、CDプレーヤー、TEAC製CDプレーヤー、D&M製CDプレーヤー、ONKYO製ミニコンボ、B&W製大型スピーカー、FOSTEX製ブックシェルフスピーカーを用いた。評価は、スピーカー以外の機器に純正装着されているインシュレータをネジごとはずし、評価用インシュレータをそれぞれ同じ位置に入れて行った。音源はジャンル別に①クラシック(管弦楽、ピアノ)、②ジャズ、③ロック、④ポップス、⑤その他(三味線、尺八)のCDを数枚ずつ用いた。音質評価は、訓練された

1)・2) (株)金井製作所  
(340-0203 埼玉県久喜市桜田 5-8-3)

数名の技術員にて、①高音の伸び、②低音の伸び、③楽器音色の正確性、④余韻の正確性、⑤分離性(立体感、臨場感)について5段階評価を行った。

## 2.2. 検討組成、基本物性、音質評価結果

種々検討した材料組成の中から、音質への影響が優れ、特性の異なる下記の材料構成を紹介する。

Fig.1 Insulator shape

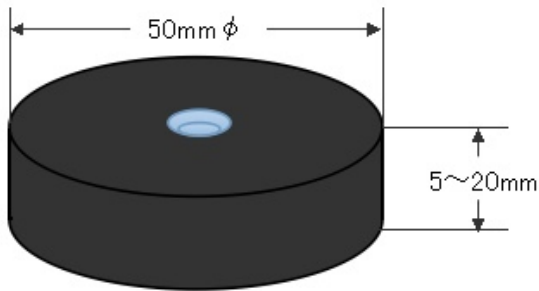


Table.1 Main test composition & property

| Law Material           | M1   | M2   | M3   | M4   | M5   | カバ   |
|------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Phenol A               | ○    | ○    |      |      |      |      |
| Phenol B               |      |      | ○    | ○    | ○    |      |
| Metal A                |      | ○    |      |      |      |      |
| Metal B                |      | ○    |      |      |      |      |
| Metal C                |      |      | ○    | ○    | ○    |      |
| Metal D                |      |      |      | ○    |      |      |
| Metal E                |      |      |      |      | ○    |      |
| Organic A              | ○    | ○    | ○    | ○    | ○    |      |
| Inorganic A            | ○    | ○    | ○    | ○    | ○    |      |
| Inorganic B            | ○    | ○    | ○    | ○    | ○    |      |
| Inorganic C            |      |      | ○    | ○    | ○    |      |
| Inorganic D            | ○    | ○    | ○    |      | ○    |      |
| <b>Property Result</b> |      |      |      |      |      |      |
| Density                | 1.75 | 2.79 | 1.68 | 2.70 | 2.03 | 0.76 |
| Porosity (%)           | 9    | 5    | 12   | 13   | 12   | 44   |
| Pore size (μm)         | 0.2  | 0.3  | 0.3  | 0.5  | 0.2  | 0.9  |
| Best thickness (mm)    | 5.0  | 12.0 | 5.0  | 8.0  | 13.0 |      |

Fig.1 は試作した形状の模式図である。Table.1 は検討した複合材料の主な組成と基本物性を表す。比重は空中重量と水中重量から求め、気孔率および気孔径(平均)は水銀ポシメータにて測定し、比較木材(カバ)も測定した。なお、最適厚みとは5~20mmの間でいくつか試作した中から最も音質効果の優れたときの厚みを表す。ここからわかるように、材料の種類と組み合わせにより、音質に最適となる空間構造と厚みは一意的に決まらないことがわかった。

Table.2 Evaluation result of sound quality

| 評価項目         | M1 | M2 | M3 | M4 | M5 | 鑄鉄 | PP | カバ |
|--------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 高音の伸び        | 3  | 5  | 4  | 4  | 5  | 5  | 1  | 2  |
| 低音の伸び        | 5  | 3  | 5  | 4  | 5  | 2  | 4  | 2  |
| 楽器音色の正確性     | 4  | 3  | 4  | 4  | 5  | 2  | 3  | 3  |
| 余韻の正確性       | 4  | 4  | 5  | 5  | 5  | 2  | 3  | 4  |
| 分離性(立体感、臨場感) | 4  | 4  | 5  | 5  | 5  | 2  | 1  | 4  |

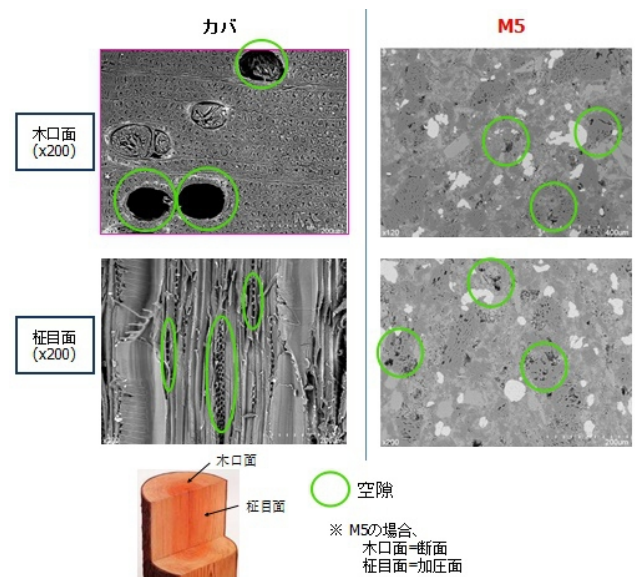
注) 良い5 <-----> 1 悪い

Table.2 は技術員たちにより、前述した全ジャンルの音質を評価した総合結果である。使用した機器差による音色差は感じられず、インシュレータ材による違いが大きく見られた。Table.1 と 2 から、材料の選択を変えると音質評価結果が大きく変化することがわかる。また、特に鑄鉄、PP、カバの単一材料では、どれも楽器音色の再現性が不十分であることがわかった。なお、比較に用いた鑄鉄と PP は純正採用されているものを使い、カバは市販木材を切断加工して使用した。

## 2.3. 空間構造

カバと M5 について、空間構造を SEM を用いて観察した。木口面と正目面、つまり縦横面をそれぞれ切断し、観察面を鏡面研磨後、SEM で 200 倍率にて観察を行い、組成像にて表示した。写真を Fig.2 に示す。丸で囲った黒抜き部分が空間を表しており、カバは水を通すための大きな穴が木口面に、小さな無数の穴が正目面に観察される。一方、複合材 M5 は木口面、正目面で差のない小さな無数の穴が観察される。

Fig.2 Void structure by SEM



### 3. 音響物性

#### 3.1. 伝搬速度

有限要素法(FEM)の四面体二次要素を用い、試作した複合材インシュレータおよび市販されている材料について、その比重と形状(50 mm φ, 13 mm 厚み)からヤング率と共振周波数(固有振動数)を求めた。なお、複合材インシュレータの共振周波数は複合された全体系での振動モードである。そのときの音の伝搬速度は一般に以下の様に表すことができる。

$$\text{伝搬速度} = \{(10^8 \times \text{重量}) / (2 \times 10^6 / \text{共振周波数})^2 / \text{比重}\}^{0.5} / 100$$

Fig. 3にFEM解析結果一例を、Table. 3に音質の良化に最も効果的であったM5と、一般材料の解析結果を示す。

Fig.3 Example of FEM analysis result

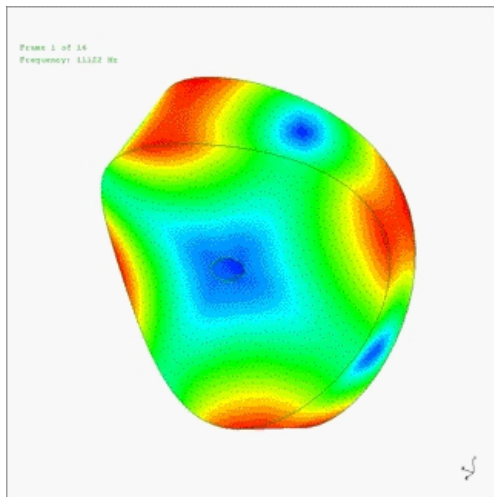


Table.3 Propagation speed, etc

| 評価項目       | M5     | 鑄鉄      | PP    | カバ    |
|------------|--------|---------|-------|-------|
| ヤング率       | 14,640 | 152,300 | 2,000 | 1,207 |
| 共振周波数(Hz)  | 11,122 | 19,141  | 6,174 | 5,219 |
| 伝搬速度(km/s) | 2.8    | 4.8     | 1.6   | 1.3   |

注) 形状は50mm φ × 13mmとして解析した。

#### 3.2. 内部損失(tan δ)

複合材インシュレータおよび比較材から試験片を切り出し、DMS測定装置により温度別のtan δを測定後、マスターカーブを作成して周波数別のtan δへ変換した。複合材インシュレータおよびPPは、周波数が高くなるに従いtan δはわずかに高くなる傾向であった。Table.4に1,500 Hz時の値を示す。

Table.4 Internal loss (tan δ)

| 評価項目        | M5    | 鑄鉄    | PP    | カバ    |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| 内部損失(tan δ) | 0.041 | 0.003 | 0.080 | 0.022 |

#### 3.3. 振動減衰性

音の余韻に与える影響として、振動減衰性を調べた。測定サンプルは100×55×5~12 mmの長方形テストピースを作成し、FFTアナライザを用いて加振後の振動減衰性を測定した。振動減衰性を比較しやすくするため、20 振幅時の減衰時間を調べた。測定結果 Table.5 より、鑄鉄は振動減衰時間が非常に長く(振動が減衰しにくい)、カバは非常に短い(振動が減衰しやすい)ことがわかった。また、M5は余韻の正確性の評価結果から、カバとPPの概ね中間の振動減衰時間となるよう設計した。

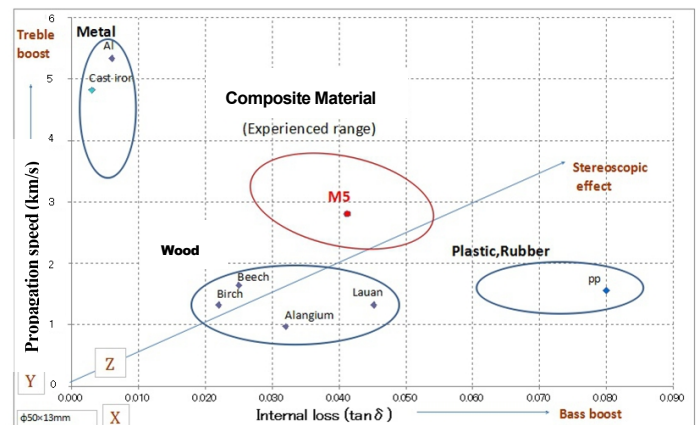
Table.5 Vibration damping time

| 評価項目       | M5 | 鑄鉄 | PP | カバ |
|------------|----|----|----|----|
| 振動減衰時間(ms) | 8  | 60 | 15 | 5  |

### 4. 音響物性、空間構造と音質

Table.6は、横軸(X軸)に内部損失、縦軸(Y軸)に伝搬速度、斜軸(Z軸)に空間構造(Porosity/Pore Size)を表した図である。金属類は伝搬速度が速いが、内部損失が極端に低い。逆にプラスチック、ゴム類は粘弾性、ゴム弾性により内部損失が高いが、伝搬速度が遅い。木類は両方共低い。一方、複合材は材料の組み合わせによって金属やプラスチックなどの性質を共有し、また木類の様な空間構造を持たせることで、伝搬速度と内部損失共に木類を超える特性を持っていることがわかる。

Table.6 Sound quality & Sound property



## 5. 結論

今までの結果から、インシュレータの性質として以下のことが関連づけられる。

(1) 使用する材料の種類や空間構造の違いにより、最適厚みが異なって存在することがわかった。

(2) 金属類は高音の伸びが良いが低音の伸びが弱く、余韻が大きい。原因は、伝搬速度が速く内部損失が低く、振動減衰性が遅いことが関係していると考えられる。

(3) プラスチック、ゴム類は低音の伸びが良いが高音の伸びが弱い。原因は、内部損失が高いが伝搬速度が遅いことが関係していると考えられる。

(4) 木類が音の分離性が良い原因は、空間構造を有することが関係していると考えられる。

(5) 振動減衰性調査結果および余韻の評価結果から、余韻が正確となるためには、8 ms 程度が適切であると考えられる。

(6) 有機材料と無機材料を適切に選択することで音質に最適な伝達速度と内部損失が得られ、また内部に木材の様な空間構造を設け、金属より大幅に低い、プラスチックと木類の間の振動減衰性に調整することにより、オーディオ機器の音質性能を引き出すインシュレータを設計することができた。(特許登録済)

今後の課題として、特に音響特性に優れるインシュレータ M5 は、使用している原料の種類と配合%によって楽器音色の正確性を導き出していると考えられるが、単一材料との違いを論理的に説明できる解析を試みる。

## 謝辞

インシュレータの開発のため、音質評価並びにアドバイスを下さった新日本無線(株) IC 設計本部の技術員の方々に大変感謝致します。

## 参考文献

- [1] 清水信行、山崎秀夫 “新素材シリコーンゲルを用いたインシュレータの開発” 日本機械学会 1993
- [2] 関根智、清水信行、他 “複合タイプインシュレータの開発” 日本機械学会 1994
- [3] 西美緒 “オーディオと高分子” 高分子 2001
- [4] 西村公伸、伊奈龍慶 “高分子材料を用いたオーディオ用インシュレータの開発” 電子情報通信学会 2009
- [5] 川口州道、石光俊介 “空隙率の違う音響イン

シュレータの検討” 日本機械学会 2010

- [6] 吉田浩樹、西村公伸 “インシュレータによるオーディオ機器の振動低減と雑音低減効果” 電気学会 2012
- [7] 喜多雅英、西村公伸 “高分子水溶液を用いたオーディオ機器の雑音低減と音質改善” 電子情報通信学会 2013