

音響振動連成場の高精度数値解析と膜鳴楽器への応用

荒木, 陽三

<https://doi.org/10.15017/1807039>

出版情報：九州大学, 2016, 博士（芸術工学）, 課程博士
バージョン：
権利関係：全文ファイル公表済

氏 名 : 荒木陽三

論 文 名 : 音響振動連成場の高精度数値解析と膜鳴楽器への応用

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

本論文はドラムやティンパニのような膜をたたいて音を鳴らす膜鳴楽器の音響振動場の予測・解析手法, およびそれに基づいた設計について提案するものである。楽器という音響振動システムは, 試作と試奏を何度も行い, 試行錯誤的に設計されてきた歴史が長く, いまだ理論的に説明されていないメカニズムも多い。楽器の数理的なモデルを構築し, 形状や材質といった設計変数を変化させたときの音色を予測することができれば, 設計の効率化やよりよい楽器の設計, さらに進化計算などの計算知能と組み合わせた新たな楽器の創生につながる可能性がある。また近年, 電子音楽などにおいても楽器の物理的なモデルに基づいて合成された音色が用いられてきており, 今後音響合成方式の主流となることも期待される。

本研究で対象とする膜鳴楽器についても音響学的側面と音響合成に関する様々な研究が行われている。古典的な研究では近似を重ねた単純なモデルや手法を用いてその物理的なふるまいを表していたが, 計算機資源の発達に伴い, 高精度な数値解析手法が用いられるようになってきた。数値解析手法は空間を離散化することで複雑な形状や境界条件でも解析できる反面, 計算負荷が大きいという欠点がある。多くの研究で定式化と実装が容易な三次元の汎用的な解析手法を用いられており, 必然的に問題の自由度が大きくなってしまい, 計算の効率性を損なっている。反復計算を要する進化計算と組み合わせた設計やリアルタイムでの音響合成を想定すると, 効率的な解析手法が必要になってくる。また, 膜鳴楽器の数値計算に関する研究はされていても, それを実際に応用して設計を試みたという研究は見られない。これらを踏まえて, 本論文は膜鳴楽器の厳密かつ高精度, 高効率な解析手法の提案, そして提案手法による膜鳴楽器の設計を目的とする。

まず, 比較的計算負荷の小さい既往の手法を組み合わせた解析手法として, 膜振動場の理論解析解と音場の法線方向微分型境界要素法による音響振動連成解析手法を提案する。提案手法により計算した周波数応答関数と実測したティンパニの周波数応答関数を比較したところ, よい一致が見られた。さらに提案手法を用いた膜鳴楽器の設計例として, ティンパニの放射音がピッチ感を有する, つまり固有周波数比が整数比に近くなるヘッドの面密度, 張力, ケトルの形状, 容積について調べた。その結果, それらのパラメータはそれぞれ独立に最適値があるのではなく, 相互依存性があると考えられることなど, 新たないくつかの知見, 設計指針を得ることができ, 音響振動連成解析に基づく楽器設計の可能性を示していると言える。

上記の解析手法の欠点として, 膜鳴楽器に実際に張られているヘッドが有している曲げ剛性やヘッドが張られているシェル振動場を考慮できないことがあげられる。膜振動場やシェル振動場をより厳密に考慮するためには, これらについても数値解析手法を適用する必要がある。しかし, それに伴って計算負荷も大きくなってしまう。そこで次のような方針でさらなる計算負荷の軽減を試みる。

ほとんどの膜鳴楽器は軸対称な形状を有しているため、振動変位や音圧は円周方向に周期的となる。そこで円周方向の解析にフーリエ級数展開を用いる。この方法は円周方向の空間離散化を行う必要がなく、計算負荷を大きく軽減することが可能である。次に、回転断面の解析には高精度、高効率な数値解析手法であるスペクトル法を用いる。有限要素法や差分法が区分的に滑らかな内挿関数で解を近似するのに対して、スペクトル法では解析領域全体に広がる滑らかな内挿関数を用いることで高精度な数値解を得ることができる。複雑な形状への適用は難しいが、比較的単純な形状をしている膜鳴楽器に対して有効な手法である。

これらの方針に基づき、膜鳴楽器を構成する膜(薄板)振動場、シェル振動場、楽器の内部、外部音場それぞれの解析手法を提案する。スペクトル法は解を構成する内挿関数の性質上、そのままでは適用できる境界条件や形状に制約がある。そこで、それぞれの解析手法をより汎用的にするための方法として、Hermite 補間型微分マトリクスや一般曲線座標系、Dirichlet-to-Neumann 写像を導入する。そして、音響振動場解析の代表的な手法である有限要素法や境界要素法と比較しながら、それぞれの提案手法の有効性を示す。最後にそれぞれの手法を連成した膜鳴楽器の解析手法を提案し、先に提案した膜振動場の理論解析解と音場の法線方向微分型境界要素法による連成解析手法よりも少ない計算時間、メモリ容量でより厳密、高精度な解析が可能であることを示す。