

平成 25 年度 TSUBAME 産業利用トライアルユース 成果報告書

利用課題名 減衰を考慮した高周波数領域までの音響構造連成シミュレーション
大規模化技術の検討

英文: Study of large scale simulation technology of acoustic-structural coupling
with dumping at a high frequency range

利用課題責任者 笹島 学
Manabu Sasajima

所属 フォスター電機株式会社
Foster Electric Co., Ltd.
URL <http://www.foster.co.jp>

邦文抄録

小型の音響機器は、狭い音響伝達経路や、減衰材での減衰効果の音響特性に与える影響が相対的に大きくなる。しかし、一般的な音響解析手法は空気の粘性による影響が少ないものとして、この影響を無視したり単純化して行われることが多い。また、解析対象とする周波数を人の可聴周波数帯域とした場合、特に高い周波数で振動を表現するには、波長に依存した非常に小さなサイズの要素分割が必要となる。しかし、それらの結果、要素数が膨大となり、計算規模が大幅に増加してしまう問題が生じるため実用的な解析は困難であった。本件は空気粘性を考慮した可聴高周波数帯域までの音響構造連成シミュレーション実用化のための大規模解析手法を検討する。

英文抄録

In the case of small audio equipment, effect of damping of the attenuation material and the shape of the acoustic transmission path effect are larger than the case of general audio equipment. However, acoustic analysis is performed without regard to this effect in general. Further, assuming that the audible frequency band of human frequency to be analyzed, the element size must be very small size that depends on the wavelength. However, analysis became difficult by large number of elements. This study is to examine the large-scale analysis for structural acoustic coupled simulation that considers the air viscosity.

Keywords: 音響機器、有限要素法、音響構造連成解析、空気粘性、大規模解析

背景と目的

補聴器やカナル型イヤホンなどの小型の音響機器では、狭い音響伝達経路の断面形状の影響や、発泡多孔質材などのいわゆる減衰材での空気粘性による減衰効果の、音響特性に与える影響が他の音響問題と比べて相対的に大きい。しかし、一般的によく行われている音響解析手法は空気の粘性による影響が少ないものとして、この影響を無視したり単純化して行われることが多い。よって、一般的な音響解析手法を小型の音響機器に適用すると実験とは大きく異なったシミュレーション結果となってしまう。

また、特に狭い空間では音源となる振動板の振動が周囲の空気の圧力変動による影響を受けることもわかっているが、一般的な音響解析手法は空気の圧力である音圧を未知数として定式化されるため、音源となる振動板の振動を、圧力を未知数として解析する音響解析

と連成させて解析することは簡単ではなかった。一方、解析対象とする周波数の範囲を、人の可聴周波数帯域とされている 20Hz~20kHz とした場合には、特に高い周波数で振動現象を表現するためには、波長に依存した要素サイズが必要となることから、要素の最大サイズは 2~3mm 以下にする必要がある。

さらに、空気モデルの節点変位を未知数として定式化した場合は、スムーズに粒子が移動するためには、形状によってさらに領域の要素分割数を増やして、要素サイズを小さくしていく必要がある。よって、可聴帯域全般での高精度の音響機器の音響解析を可能にするために、空気の粘性を考慮したうえで、構造振動と連成させるために節点変位を未知数として定式化し、かつ要素サイズをかなり小さく設定することでこれらの問題は解析可能となる。しかし、それらの結果、解析モデルの要素数が膨大となり、計算規模が大幅に増加してし

まう問題が生じ、一般的なワークステーションでは実用的な解析は困難であった。

本件はスーパーコンピュータ-TSUBAME を用いた空気の粘性を考慮した可聴域の高周波数帯域までの音響構造連成大規模解析のシミュレーション実用化のための手法を検討するものである。大規模化の数値目標としては従来解析が可能であった、要素数の上限である6~7万要素を、「100万要素以上」に設定する。

概要

(1) 音響構造連成有限要素法の定式化

図1のような直交デカルト座標系と、四面体定ひずみ要素を考える。要素内の任意の点での x 方向変位を u_x 、 y 方向変位を u_y 、 z 方向変位を u_z とすると、ひずみエネルギー \tilde{U} は以下のように表せる。

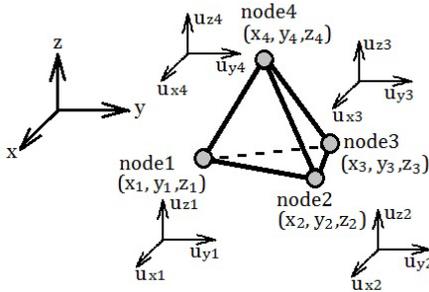


図1 座標系と四面体要素、節点と節点変位

$$\tilde{U} = \frac{1}{2} E \iiint_e \left(\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \right)^2 dx dy dz \quad \dots(1)$$

ここで、 E は体積弾性率である。変位の時間微分を \dot{u} と表現すると、運動エネルギー \tilde{T} は以下のように表せる。

$$\tilde{T} = \frac{1}{2} \iiint_e \rho \{\dot{u}\}^T \{\dot{u}\} dx dy dz \quad \dots(2)$$

ここで、 ρ は要素密度であり、 T は転置行列を表す。また、粘性圧縮性流体の粘性エネルギー \tilde{D} は以下のように表せる。

$$\tilde{D} = \iiint_e \frac{1}{2} \{T^T\} \Gamma dx dy dz \quad \dots(3)$$

$\{T\}$ は粘性による応力ベクトルである。 Γ はひずみベクトルである。さらに、ポテンシャルエネルギー \tilde{V} は以下のように表せる。

$$\tilde{V} = \int_{\Gamma} \{u\}^T \{P\} d\Gamma + \iiint_e \{u\}^T \{F\} dx dy dz \quad \dots(4)$$

ここで $\{P\}$ は表面力ベクトル、 $\{F\}$ は物体力ベクトル、

$\int_{\Gamma} d\Gamma$ は要素境界での積分を表す。次に、粘性減衰を

考慮した音響解析モデルとして要素運動方程式の定式化を考える。全エネルギー \tilde{E} は次式となり、

$$\tilde{E} = \tilde{U} + \tilde{D} - \tilde{T} - \tilde{V} \quad \dots(5)$$

以下のラグランジュの方程式を用いると、要素離散化方程式が求められる。

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial \dot{u}_{ei}} - \frac{\partial \tilde{T}}{\partial u_{ei}} + \frac{\partial \tilde{U}}{\partial u_{ei}} - \frac{\partial \tilde{V}}{\partial u_{ei}} + \frac{\partial \tilde{D}}{\partial u_{ei}} = 0 \quad \dots(6)$$

ここで、 $\{u_e\}$ 、 $\{\dot{u}_e\}$ は節点変位ベクトル、節点速度ベクトルである。式(1)~式(4)を用いて式(6)を整理すると、次の要素離散化方程式を得る。ただし、角周波数 ω の周期応答とし、 $\{\dot{u}_e\} = j\omega\{u_e\}$ を用いている。

$$-\omega^2 [M_e] \{u_e\} + [K_e] \{u_e\} + j\omega [C_e] \{u_e\} = \{f_e\} \quad \dots(7)$$

$[M_e]$ 、 $[K_e]$ 、 $[C_e]$ はそれぞれ要素質量行列、要素剛性行列、要素減衰行列である。また、 $\{f_e\}$ は節点力ベクトルである。この方程式を変位について解けば、全ての節点変位が求められ、節点変位から、各要素のひずみと圧力を算出することができる。

(2) プログラムについて

従来のプログラムについて概説する。開発言語は FORTRAN である。コンパイラは Intel Fortran コンパイラ Windows 版を用いている。入力ファイル形式は Nastran 形式、結果ファイル形式は UNV 形式である。使用した要素は図1に示したような四面体要素を用いた。解析可能な種類は、構造解析、周波数応答解析、音響

構造連成解析である。複素行列の連立方程式を解くソルバはスカイライン法を用いている。

コンパイラが Windows 版であることで静的メモリサイズの上限が 2GB である。大規模解析の場合には動的にメモリ領域を確保する必要があるが、既存プログラムの作り方の制約により動的メモリ領域を確保することが難しく解析の大規模化が難しい問題を有していた。

そこで、静的メモリサイズの上限の制約がない Linux 版の Intel Fortran コンパイラのコンパイルオプションである [mcmode] を活用するとともに、TSUBAME の大メモリを活用できるようにパラメータの設定を行い、どこまで解析規模を大きくできるかテストした。

結果および考察

従来プログラムでは6~7万要素程度の解析モデルしか解析できなかったが、TSUBAME を用いることを前提としたプログラムソースの改良を行うことにより、105万要素の解析モデルが計算できたことが確認できた。

図1に解析が可能であったモデルの要素数と従来まで解析が可能であった上限要素数を示す。

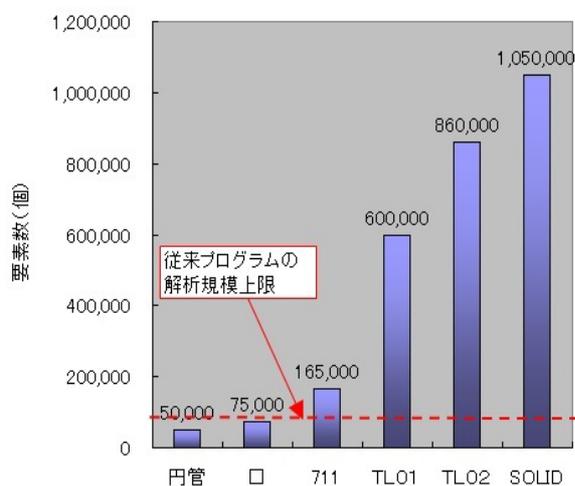


図1 解析が可能であった解析モデルの要素数

グラフ中の棒グラフ上に表示している数字は要素数である。従来使用してきたプログラムは Windows 版の Intel Fortran コンパイラだったため、メモリサイズの制約から6~7万要素(18万自由度程度)が解析モデルの要素数上限であった。図では赤破線でこの上限を示している。今回 Linux 版の Intel Fortran コンパイラのみ

にあるオプションでコード生成およびデータ格納に制限のないメモリーモデルを指示する[-mcmode=large]を活用し、かつ、TSUBAME の大メモリ環境に対応するためプログラム中のいくつかの行列の配列サイズ修正を施すことにより、従来プログラムで扱うことができた解析モデルの要素数を大幅に上回るモデルの解析が可能であることが確認できた。約5万要素の解析モデルからテストを行い、期中に解析できた最大要素のモデルサイズが約105万要素である。改良したプログラムの要素サイズの上限はまだ未確認である。この一年間で解析可能な解析モデルの要素数の規模としては10倍以上となり、100万要素を越えた解析が可能となった。100万要素解析できるということで1年目の成果としては十分達成したと考えている。

次に、図2に各モデルの要素数とともに解析時間を示す。解析可能な解析モデルの要素数の規模が10倍以上となることで、解析時間が級数的に増大した。具体的には約5万要素の解析モデルで1周波数あたり15分程度の計算時間が必要であったが、105万要素の解析モデルでは約80時間の計算時間が必要であることがわかった。可聴領域全域の周波数特性を周波数領域で把握するためには少なくとも数十回の解析が必要になることを考えると、実用上、100万要素レベルのモデルにおいては計算時間が大きな問題となってくると思われる。



図2 各モデルの計算時間と要素数

また、TSUBAME のバッジジョブの時間制限の上限96時間(1日~4日)を考えると、これ以上解析規模を増大させるためには、計算時間の短縮を図る必要がある。図2中のピンク破線がTSUBAMEの解析時間の上限である96時間である。よって、行列ソルバの改良により解析時間の短縮を図りたい。目標は従来プログラムを用いた場合の解析時間の十分の一以下としたい。

まとめ、今後の課題

スーパーコンピューターTSUBAME を用いた空気の粘性を考慮した可聴域の高周波数帯域までの音響構造連成大規模解析のシミュレーション実用化のための手法を検討した。大規模化の数値目標としては従来解析が可能であった、要素数の上限である6~7万要素を、「100万要素以上」にすることであったが、105万要素の解析モデルを解析できることが確認され、解析できる解析モデルの要素数の規模が10倍以上となった。これにより今まで解析が困難であった可聴帯域の全域での、高精度の減衰材や空気粘性による減衰の影響を考慮可能な、音響解析シミュレーション技術が実現すると思われる。小空間を含む高精度の構造音響連成解析に広く応用可能である。

しかし、解析可能な解析モデルの要素数が100万を越えた場合、TSUBAME の大メモリを使い切る前に、解析時間の上限が近くなってきたことがわかった。よって更なる大規模化のため、計算時間の大半を占める複素連立方程式を解くために使用している行列ソルバの高速化を計りたい。具体的には、従来プログラムで複素行列の連立方程式を解くモジュールとして使用している自作のスカイライン法を用いた行列ソルバを、Intel Fortran に付属している MKL ライブラリの反復法を用いたツールを利用できるよう改良を加えていく予定である。