

211 時間領域差分法による円筒試験片の放射音解析

Sound Analysis of Cylindrical by FDTD method

○学 室 矢 啓助 (室蘭工大院) 正 松本 大樹 (室蘭工大) 正 齊當 建一 (室蘭工大)

Keisuke MUROYA, Muroran Institute of Technology, 27-1, Mizumoto, Muroran, Hokkaido
Hiroki MATSUMOTO, Muroran Institute of Technology
Ken-ichi SAITOH, Muroran Institute of Technology

Keywords: Cylindrical, Experimental Modal Analysis, Mode of Vibration, FDTD method, Pressure, Particle Velocity

1. 緒言及び目的

最近のコンパクトデジタルカメラは動画撮影機能を始め、顔認識機能やタッチパネル式などの高機能化が進むと同時に、小型・軽量化も進んでいる。

小型化されたコンパクトデジタルカメラでは、動画撮影のための録音用マイクロホンにズーム動作のためのモータやギアで構成される駆動部からは遠ざけることができない。したがって、動画撮影時にズーム動作を行うとズーム音がノイズとして録音されてしまい製品の性能を低下させてしまう。ズーム音は、駆動部がズーム動作時に、モータやギアの振動により加振されることによって発生する。このことから、動画撮影機能付きのコンパクトデジタルカメラでは、録音されるノイズを抑制するために駆動部の静音化やマイクロホン位置の最適化が求められている。

マイクロホン位置の最適化では、駆動部から放射される放射音の音圧レベルが低い位置にマイクロホンを設置することで、録音されるノイズを抑制することができる。さらに駆動部からの放射音を予測できれば、マイクロホンの最適位置の把握やマイクロホン位置で音圧レベルが低くなる駆動部の設計を行えるようになる。

そこで本研究では、駆動部が複雑な円筒形状をしていることから、モデルとして単純な円筒を試験片に用いて実験モード解析を行い、そこから得られる振動速度を用いて試験片の放射音を時間領域差分法 (FDTD 法) により解析することを目的とする。解析の精度は試験片を打撃した場合の放射音の結果と比較し求める。

2. 実験モード解析

実験モード解析は、試験片に設定した打撃点 (円周 12 点, 軸 5 点, 合計 60 点) を 3 回ずつ打撃し、FFT アナライザにより伝達関数を求め、モード解析ソフトウェアにより試験片の固有振動数、振動モード、モビリティ (速度/力) を確認する。

Fig.1 にモビリティでの相対的な振動モードを示す。振動モードから分かるように、モビリティは軸に節が無いモード (1st, 3rd, 5th) で大きくなり、その値は低次の固有振動数になるほど大きくなる。

3. 打撃による放射音測定実験

放射音測定は、試験片を打撃力 8.0 ± 0.1 [N] で打撃した時の放射音を測定する。測定範囲は試験片の中心を原点として、鉛直方向、水平方向、軸方向それぞれ 30 [mm] 間隔で測定を行う。測定したデータは PC でグラフにし音場の可視化を行う。

Fig.1 に試験片のオーバーオール音圧レベル (OA 値) と試験片の 1 次と 3 次の音場を合わせた音場を示す。これま

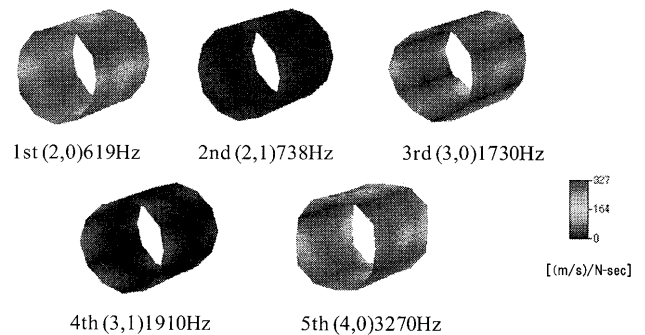


Fig.1 Mode of vibration (relative scale)

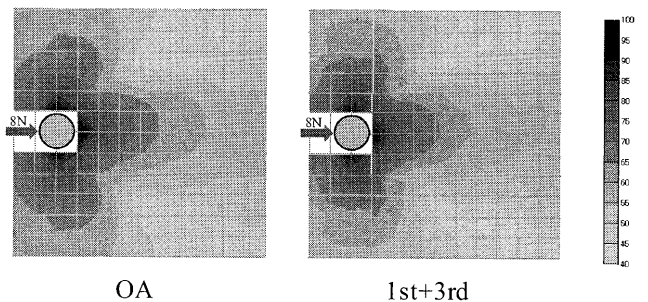


Fig.2 Sound field

での研究より¹⁾、軸に節のあるモード (2nd, 4th) の音場は支配的ではないことが明らかになっている。また、モビリティが大きい 1 次と 3 次のモードを合わせた音場は OA 値の音場と対応しており、1 次と 3 次と 5 次を合わせた結果とほぼ一致する。このことから円筒試験片の音場は、軸に節が無く、少なくとも 2 つ以上の低次のモードの重ね合わせで表現できると言える。以上のことから円筒試験片の放射音解析では実験モード解析の 1 次と 3 次の固有振動数とモビリティの値を用いる。

4. 放射音解析²⁾³⁾

放射音解析は FDTD 法を用いて行う。FDTD 法は 1 階微分方程式を差分式に近似し、2 種類の変数を交互に計算する方法である。本研究では以下に示す差分式を用いて、円柱座標における音圧 P と粒子速度 U を計算する。

$$P^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) = P^{n-\frac{1}{2}}(i, j, k) - \kappa \frac{\Delta t}{\Delta r} \left\{ U_r^n \left(i + \frac{1}{2}, j, k \right) - U_r^n \left(i - \frac{1}{2}, j, k \right) \right\} \\ - \kappa \frac{\Delta t}{r \Delta \theta} \left\{ U_\theta^n \left(i, j + \frac{1}{2}, k \right) - U_\theta^n \left(i, j - \frac{1}{2}, k \right) \right\} \\ - \kappa \frac{\Delta t}{\Delta z} \left\{ U_z^n \left(i, j, k + \frac{1}{2} \right) - U_z^n \left(i, j, k - \frac{1}{2} \right) \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} U_r^{n+1}\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) &= U_r^n\left(i+\frac{1}{2}, j, k\right) - \frac{1}{\rho} \frac{\Delta t}{\Delta r} \left\{ P^{n+\frac{1}{2}}(i+1, j, k) - P^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) \right\} \\ U_\theta^{n+1}\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right) &= U_\theta^n\left(i, j+\frac{1}{2}, k\right) - \frac{1}{\rho} \frac{\Delta t}{r \Delta \theta} \left\{ P^{n+\frac{1}{2}}(i, j+1, k) - P^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) \right\} \\ U_z^{n+1}\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right) &= U_z^n\left(i, j, k+\frac{1}{2}\right) - \frac{1}{\rho} \frac{\Delta t}{\Delta z} \left\{ P^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k+1) - P^{n+\frac{1}{2}}(i, j, k) \right\} \end{aligned} \right\} (2)$$

ここで n は時間ステップを表し i, j, k はそれぞれ r, θ, z 方向の空間離散点の番号である。また Δt は時間離散間隔, $\Delta r, r \Delta \theta, \Delta z$ は各方向の空間離散間隔である。Fig.3 に音圧と粒子速度の時間配置を示す。音圧と粒子速度は時間ステップが半ステップずれており、計算の際には音圧(3)式と粒子速度(4)式を交互に計算していく。Fig.4 に音圧と粒子速度の $r-\theta$ 平面での空間配置を示す。これに示すように 2 つの変数は、同じ点に存在せず交互に存在する。

計算時間は音波が境界に達してから 1 周期分の時間とする。計算した音圧から(3)式により実効音圧 P_e を計算し、(4)式から音圧レベル SPL を計算する。

$$P_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (3)$$

$$SPL = 20 \log_{10} \frac{P_e}{P_0} \quad (4)$$

ここで T は $p(t)$ の周期, p_0 は基準音圧である。

安定条件

計算途中で解が発散、または安定しないなどの不安定現象を防ぐために以下に示す(5)(6)式の安定条件から空間離散間隔と時間離散間隔の適当な値を求める。

$$\Delta r, r_{\max} \Delta \theta, \Delta z \leq \frac{\lambda}{10} \quad (5)$$

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\left(\frac{1}{\Delta r}\right)^2 + \left(\frac{1}{r_0 \Delta \theta}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2}} \quad (6)$$

ここで λ は音の波長, c は音速, r_{\max} は半径方向の最大値, r_0 は円筒の半径である。

境界条件⁴⁾

無限空間として解析を行うために境界条件を設定する必要がある。本研究では PML 吸収境界条件を用いて無限空間を模擬する。PML 吸収境界条件は仮想境界の領域内で、十分に音圧と粒子速度が減衰するような係数を差分式に追加することで反射が無い状況を作り出し、無限空間として計算する手法である。差分式に追加する吸収係数 σ の式を(7)(8)式に示す。

$$\sigma = \sigma_m \left(\frac{d}{D}\right)^2 \quad (7)$$

$$\sigma_1 = \frac{2 - \sigma \Delta t}{2 + \sigma \Delta t}, \quad \sigma_2 = \frac{2}{2 + \sigma \Delta t} \quad (8)$$

Fig.5 に PML 領域を示す。ここで d は PML 領域内における計算点の通常領域からの距離, D は PML 領域の幅, σ_m は σ の最大値で試験片の固有角振動数である。 σ_1, σ_2 はそれぞれ差分式の右辺第一項, 第二項に掛けあわせることで PML 吸収領域を考慮した差分式とすることができる。

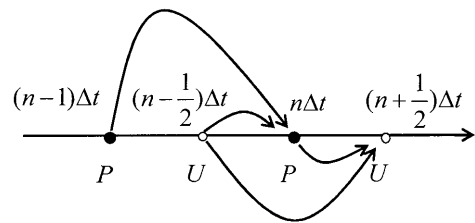


Fig.3 Time distribution of pressure and particle velocity

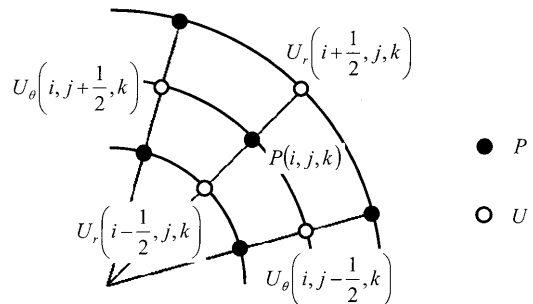


Fig.4 Space distribution of pressure and particle velocity

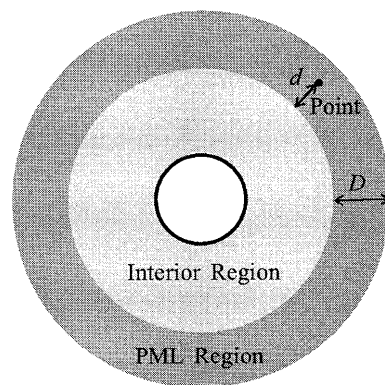


Fig.5 PML region

5. まとめ

本研究で行う放射音解析の方法を以下にまとめる。

- 実験モード解析により円筒試験片の固有振動数, モビリティ, 振動モードを確認する。
- 固有振動数, 安定条件から解析の計算時間, 時間離散間隔, 空間離散間隔を設定する。
- 音場を支配する振動モードのモビリティを初期条件として FDTD 法により放射音を計算する。

今後は円筒試験片の放射音解析を行い実験結果との比較検討を行っていく。

参考文献

- 1) 石井位直, 室矢啓助, 松本大樹, 齊當建一 “実験モード解析を利用したカメラ鏡筒モデルの放射音の予測に関する研究” 日本機械学第 48 回講演概要集[2009.11.28 札幌]pp29-30
- 2) 森田正興, 吉村卓也, 村松英行 “時間領域差分法による音振動現象の過渡応答解析” 日本機械学会[2007.9.25-28]
- 3) 佐藤雅弘 “FDTD 法による弾性振動・波動の解析入門” 森北出版株式会社
- 4) Qui-Huo Liu, Jianping Tao “The perfectly matched layer for acoustic waves in absorptive media” 1997 Acoustic Society of America