

ゴルフクラブの音響・振動シミュレーション

服部 孝弘 松村 信宏 岩原 光男 長松 昭男
法政大学工学部機械工学科

現在ゴルフクラブの性能は、NPO(国際パークゴルフ協会)による規格が「基準クラブとの比較における飛距離の差は±3%以内であること」と定められているため、飛距離の面では差別化が図れない。従って近年、ゴルフを気持ちよく楽しむために、ゴルフクラブのスイング音、ボールとの衝突音が製品化に問われ始めている。本研究では後者を取り上げた。

1. 緒論

身の回りにある製品というものは、振動現象を利用して商品化されているものがある。

そこで、ゴルフヘッドの衝撃時に生じる現象を、有限要素法を利用した計算モード解析と実験モード解析で同定を行った。実験と計算の結果が一致していれば、計算による固有値データを用いることで、設計段階で音を予測し時間やコストを削減できる。音の計算には、昨年度に FORTRAN で作成した音響プログラムを使用した。

2. 計算理論

2.1 表面振動速度

構造体の固有値解析には、市販の有限要素法⁽¹⁾を用いている。放射音を計算するためには、表面の接点ほとんどの振動速度を算出する必要があるが、プログラム上の問題もあり、ハードディスク容量が膨大になり、実際的ではない。そこで、固有値解析から算出されるモード特性を出力し、モード解析理論⁽²⁾より表面の振動速度を算出する。

まず、N 自由度系における強制振動の運動方程式を一般的に表現すると

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\} \quad (1)$$

この式の減衰[C]を0として、不減衰系の自由振動とすると、

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (2)$$

N 自由度不減衰系が r 次の固有モード Ω_r で自由振動しているときの変位と加速度は

$$\{x\} = \{\phi_r\} e^{j\Omega_r t}, \quad \{\ddot{x}\} = -\Omega_r^2 \{\phi_r\} e^{j\Omega_r t} \quad (3)$$

これらを式(2)に代入して両辺を $e^{j\Omega_r t}$ で割ると

$$(-\Omega_r^2 [M] + [K])\{\phi_r\} = \{0\} \quad (4)$$

[M], [K]が与えられれば、この方程式を解くことができ、この方程式の解 $\{\phi_r\}$ が r 次の固有モードとなる。ここで、空間座標で表現する N 自由度系の任意の変位{x}を、N次元モード座標を用いて表現すると

$$\{x\} = \xi_1 \{\phi_1\} + \xi_2 \{\phi_2\} + \dots + \xi_r \{\phi_r\} + \dots + \xi_N \{\phi_N\}$$

$$= \sum_{r=1}^N \xi_r \{\phi_r\} \quad (5)$$

$$= \left[\begin{array}{c} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_r \\ \vdots \\ \xi_N \end{array} \right] = [\phi] \{\xi\}$$

これを用いて、式(1)を空間座標からモード座標に変換すると速度と加速度は、

$$\{\dot{x}\} = \sum_{l=1}^N \dot{\xi}_l \{\phi_l\}, \quad \{\ddot{x}\} = \sum_{l=1}^N \ddot{\xi}_l \{\phi_l\} \quad (6)$$

式(5)の添字 r を 1 にした式と式(6)を式(1)に代入し、前から r 次の固有モード $\{\phi_r\}$ の転置を乗じれば、

$$\sum_{l=1}^N \{\phi_r\}^T [M] \{\phi_l\} \ddot{\xi}_l + \sum_{l=1}^N \{\phi_r\}^T [C] \{\phi_l\} \dot{\xi}_l + \sum_{l=1}^N \{\phi_r\}^T [K] \{\phi_l\} \xi_l = \{\phi_r\}^T \{f\} \quad (7)$$

上式の $r \neq l$ の全項は、固有モードの一般直交性により零になり、 $l = r$ の項だけ残り、その値は m_r, c_r, k_r になる。したがって、式(7)は

$$m_r \ddot{\xi}_r + c_r \dot{\xi}_r + k_r \xi_r = \{\phi_r\}^T \{f\} = f_r \quad (8)$$

これより、比例粘性減衰の仮定下で点 i に角振動数 ω 、振幅 F_i の調和加振力が作用し、他の点には外力が作用しない場合、外力ベクトル $\{f\}$ は i 行目が $F_i e^{j\omega t}$ で他の項が零になる。したがって固有モード $\{\phi_r\}^T$ も ϕ_{ri} のみになる。ここで、 j は虚数、 t は時間変数である。よって、この場合の運動方程式は

$$m_r \ddot{\xi}_r + c_r \dot{\xi}_r + k_r \xi_r = \phi_{ri} F_i e^{j\omega t} \quad (9)$$

ここで、調和加振力が作用する場合の変位を調和波形で表現できるとすれば、 $\dot{\xi}_r = j\omega \xi_r$ 、 $\ddot{\xi}_r = -\omega^2 \xi_r$ である。これらを式(9)に代入して変形すると

$$\xi_r = \frac{\phi_{ri} F_i}{-m_r \omega^2 + j c_r \omega + k_r} e^{j\omega t} \quad (10)$$

式(10)により、角振動数 ω の調和加振力に対する変位がモード座標上で求められた。次に、空間座標上での変位を求めるために式(5)に式(10)を代入すると

$$\{x\} = \sum_{r=1}^N \frac{\phi_{ri} F_i}{-m_r \omega^2 + j c_r \omega + k_r} \{\phi_r\} e^{j\omega t} \quad (11)$$

したがって、調和加振力が作用するときの空間座標上での全点(自由度)の変位が式(11)であることより、表面速度は以下のとおりになる。

$$\{\dot{x}\} = \sum_{r=1}^N \frac{\phi_{ri} F_i}{-m_r \omega^2 + j c_r \omega + k_r} \{\phi_r\} j \omega e^{j\omega t} \quad (12)$$

$\{\phi_r\}$ 、 ϕ_{ri} : r 次固有モードベクトル, その i 行目成分
 m_r, c_r, k_r : r 次のモード質量, モード減衰係数, モード剛性

2.2 速度ポテンシャル

速度ポテンシャルの重ね合わせによる放射音予測については、文献(3),(4)に述べられているので、簡明に示す。

振動板上の微小面積 dS の部分が、式(12)により振動速度 $\dot{\xi}_0 e^{j\omega t}$ で振動しているとき、 dS 部分を点音源と考えると面積 S の振動板によって P 点に生じる速度ポテンシャル ϕ は、

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \iint_S \frac{\dot{\xi}_0}{r} e^{j(\omega t - kr)} dS \quad (13)$$

r : dS と点 P 間の距離
 k : 波数, $2\pi/\lambda$ 波長
 となり、音圧 p は、

$$p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad \rho \text{ は媒質の密度} \quad (14)$$

3. 実験モード解析および音圧計測

打撃試験はインパルス・ハンマで加振し 5 回平均で行い、応答点に加速度ピックアップを固定し、FFT 装置を用いて測定した。Fig.1 に測定風景を示す。

Fig.2 は MATLAB を用い接点数 27 にメッシュ分割し、実験モード解析に用いた mp37 のモデルである。また音圧は、1/2 インチマイクロフォンと FFT 装置を使い測定した。始めに基準音としてピストンホーンのデータを計測した上で、ある点を打撃した時発生する音圧について測定した。マイクはヘッドの上部 1m35cm に設置した。

計算には MSC/NASTRAN を使用した。NASTRAN の結果ファイルを開いてモードの形状について各モード形状の特徴を調べた。計算に用いた有限要素モデルを Fig.3 に示す。

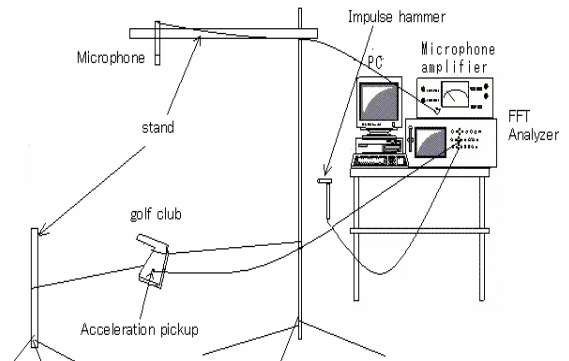


Fig.1 Experiment Equipment

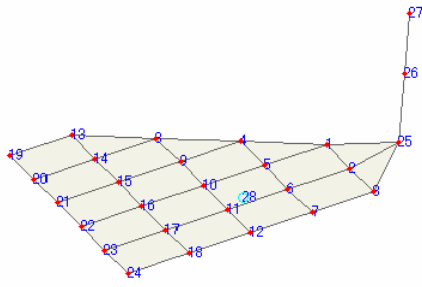


Fig2. model of mp37 for experimental modal analysis

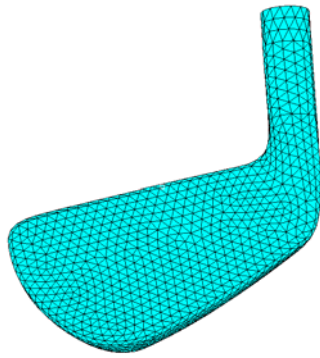


Fig3. FEM model of mp37 for calculation

4. 実験と計算の比較と考察

Table.1,2 に、実験結果と計算結果の第 1 次から第 9 次の固有振動数を示す。

mp27 の第 4 次モードと mp37 の第 1 次モードが 7% になった以外は全て 5% 以内の誤差範囲に収まった。実験で求めたモードと計算で求めたモードを比較すると形状がよく似ているのがわかる。Fig.4,6 はヘッド上のスイートスポットの実験と計算での表面速度を求めたものを比較したグラフである。10000Hz 付近まではピークの位置とその大きさが一致したが 10000Hz 以降ではピークの位置がずれた。しかし、10000Hz 以降は人間の耳にはあまり聞こえないので実際聞こえる音に関しては大して影響しなかった。また、ピークの位置がずれているモードについてモードの相違を調べてみても大した差が見られなかった。

Fig5,7 は、実験結果と計算結果による音圧の比較である。12000Hz 付近まではピークの位置がある程度一致しているが音圧の値が 10dB 前後ずれている。また各周波数におけるピークの山の形についても多少のずれが生じている。これが、実験音と計算音に微かなずれをもたらす原因であると考えられる。

Fig.8~15 に mp27 の計算モード形状、Fig.16~23 に mp37 のモード形状を示す

Table1. The comparison of mp27 eigenvalue by experiment and calculation

mp27-5			
modeno	natural frequency		tolerance
	calucation[Hz]	experiment[Hz]	calucation/experiment
1	4120.9	4106.1	0.0036
2	5188.6	5059.2	0.0256
3	7581.5	7475.1	0.0142
4	9449.6	8824.9	0.0708
5	11017.5	10662.0	0.0333
6	13384.7	13085.2	0.0229
7	15015.3	15281.4	0.0174
8	15704.8	16190.6	0.0300
9	17284.3	17394.6	0.0063
mass			
	calucation[g]	experiment[g]	calucation/experiment
	250.9	251.6	0.9972

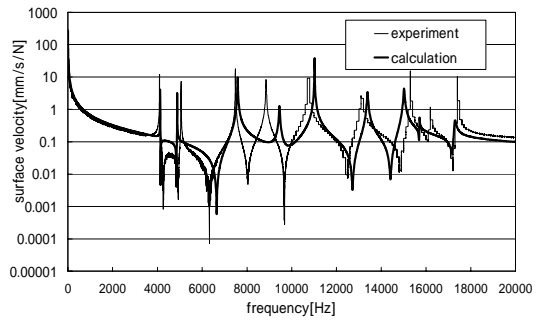


Fig4. The comparison of mp27 surface velocity by experiment and calculation

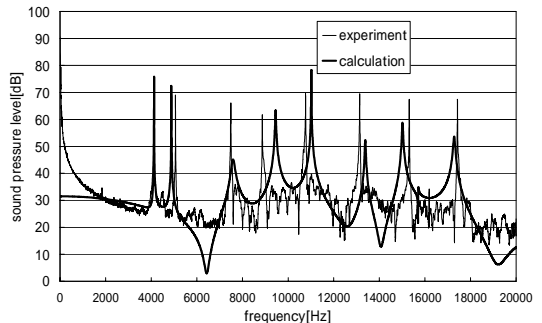


Fig5. The comparison of mp27 sound pressure level by experiment and calculation.

Table2. The comparison of mp37 eigenvalue by experiment and calculation

mp37-5			
mode no	natural frequency		tolerance
	calucation[Hz]	experiment[Hz]	calucation/experiment
1	3807.5	3545.2	0.0740
2	5188.8	4928.6	0.0528
3	7548.9	7649.2	0.0131
4	10390.3	10672.5	0.0264
5	12729.3	12670.4	0.0047
6	14783.0	15144.8	0.0239
7	16808.5	16162.2	0.0400
8	17803.2	18044.4	0.0134
9	18280.9	18612.8	0.0178
mass			
	calucation[g]	experiment[g]	calucation/experiment
	253.7	250.9	0.0112

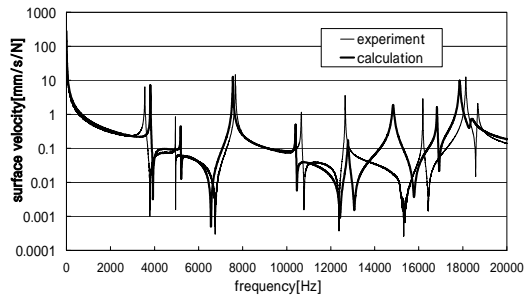


Fig6. The comparison of mp37 surface velocity by experiment and calculation

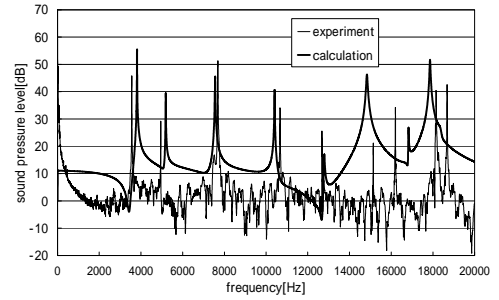


Fig7. The comparison of mp37 sound pressure level by experiment and calculation.

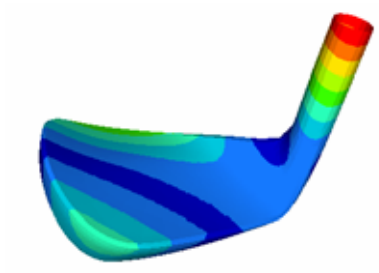


Fig8 mp27 first mode in the calculation (first torsion).

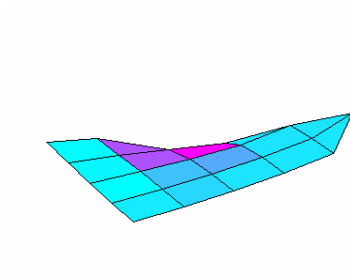


Fig9 mp27 first mode in the experiment (first torsion).

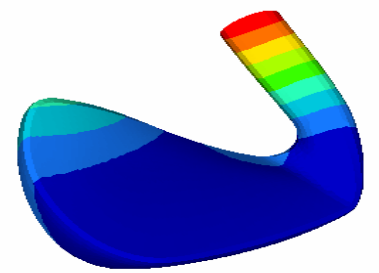


Fig10. mp27 second mode in the calculation (first bending)

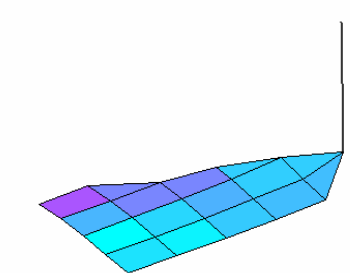


Fig11 mp27 second mode in the experiment (first bending)

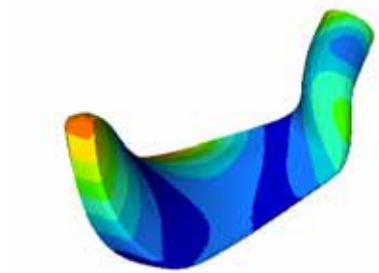


Fig12. mp27 third mode in the calculation (second bending)

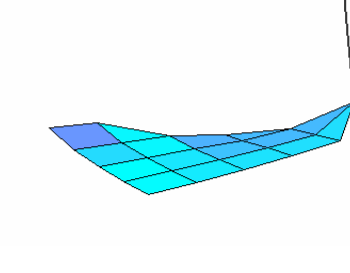


Fig13 mp27 third mode in the experiment (second bending)

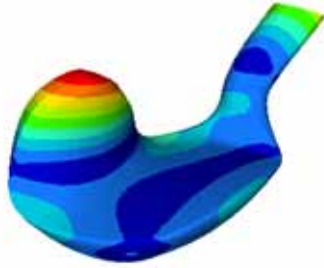


Fig14. mp27 fourth mode in the calculation (second torsion)

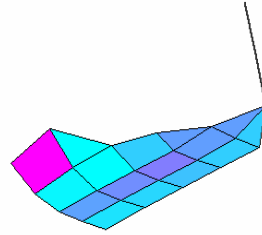


Fig15. mp27 fourth mode in the experiment (second torsion)

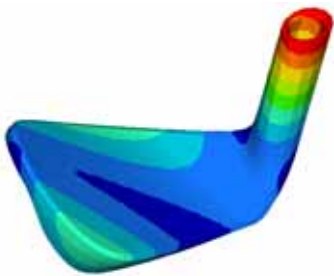


Fig16. mp37 first mode in the calculation (first torsion)

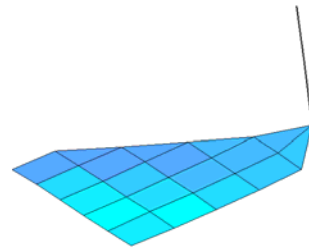


Fig17. mp37 first mode in the experiment (first torsion)

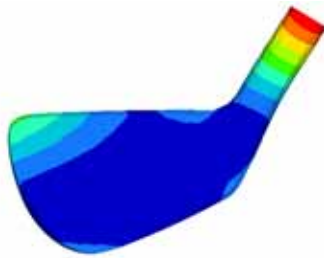


Fig18. mp37 second mode in the calculation (first bending)

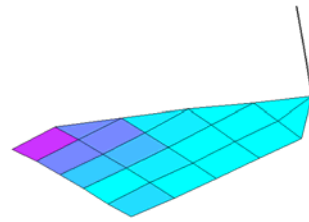


Fig19. mp37 second mode in the experiment (first bending)

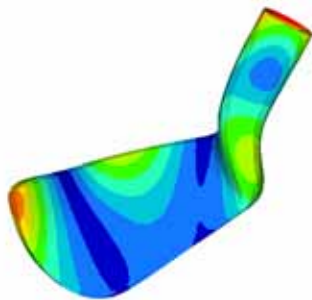


Fig20. mp37 third mode in the calculation (second bending)

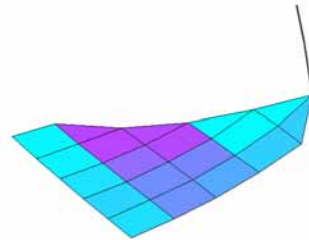


Fig21. mp37 third mode in the experiment (second bending)

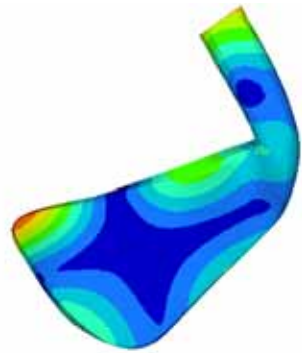


Fig22. mp37 fourth mode in the calculation (second torsion)

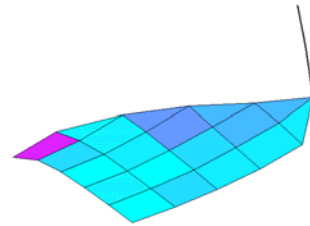


Fig23. mp37 fourth mode in the experiment (second torsion)

5. 結論

1. 実験と計算によって求めた表面振動やモード形状を大体一致させることができ、図面段階で音の領域まで表面振動が予測できることを示した。
2. 方謝音に関しては計算と実験でずれている部分があり、実験精度・計算精度の向上が必要である。
3. 今後は、音の計算プログラムの見直しや計算における減衰比の扱い方が課題である。

6. 参考文献

- 1) MSC Nastran 2001 日本語オンラインマニュアル, MSC Software, 2001
- 2) 長松昭男, モード解析入門, (1993), 10, コロナ社
- 3) 鈴木浩平ほか, 機械工学のための振動・音響学, (2002), サイエンス社

キーワード

音響、振動、シミュレーション、実験モード解析、有限要素法、表面速度、音圧

Summary.

Sound and vibration simulation of the golf club

Takahiro hattori Nobuhiro Matsumura

Department of mechanical engineering

Mitsuo Iwahara Akio Nagamatsu

Department of mechanical engineering

The discrimination can not be attempted concerning the flight-distance, since the standard by NPO (the international park golf association) has determined the performance of the golf club as "that the difference of the flight-distance in the comparison with the standard club is within $\pm 3\%$ " at present.

Therefore, in order to enjoy the golf for the good feeling recently, it begins to be asking swing sound of golf club and collision noise with the ball for the merchandizing. In this study, the latter be taken up.

Keywords

Sound, Vibration, Simulation, Experimental mode analysis, Finite element method, Surface velocity, Sound pressure.