

ゴルフクラブの打球音シミュレーション

Hitting Sound Simulation of the Golf Club

榎本 真宜¹⁾ 谷口 大樹²⁾ 岩原 光男³⁾ 長松 昭男³⁾
Masaki Enomoto, Daiki Taniguchi, Mitsuo Iwahara, Akio Nagamatsu

¹⁾ 法政大学工学部機械工学科長松研究室

²⁾ 法政大学大学院工学研究科機械工学専攻長松研究室

³⁾ 法政大学工学部機械工学科

Good sound quality became one of value-added of a golf club. In this study, we made hitting sound prediction program for the purpose of predicting the hitting sound by design stage for attempting cost reduction in product development. In this paper, we describe the result of the utility of the hitting sound prediction program.

Keyword : Sound, Modal Analysis, Finite Element, Sound Simulation, Velocity Potential

1. はじめに

現在、ゴルフクラブの打球音の気持ち良さが商品の付加価値を決める要因として注目され始めている。過去の研究では、打球音を設計段階で予測するプログラムを作成し、実用性を検討してきた。

本研究では、打球音が商品の付加価値に大きく関わるドライバーに着目した。まず実験モード解析と計算モード解析を行い、結果を比較した。次にモード減衰比の同定を行い、同定したモード減衰比をプログラムに入力し計算音の作成を行い、実験で収録した音との比較を行った。

打球音は有限要素法により求めたモード特性を使用し、モード解析理論より表面の速度応答を求め、各要素からの速度ポテンシャルを重ね合わせて周波数領域で計算し、逆フーリエ変換により時間領域信号に変換することで求めた。

2. 計算理論

比例粘性減衰の仮定下で点*i*に角振動数 ω_r 、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を考えると、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。従って*r*次固有モード $\{\phi_r\}$ もその*i*行目成分 ϕ_{ri} のみが意味を持つ。ここで、*j*は虚数、*t*は時間変数である。よって、この場合の*r*次固有モードに関する運動方程式は

$$m_r \ddot{x}_r + c_r \dot{x}_r + k_r x_r = \phi_{ri} F_i e^{j\omega t} \quad (1)$$

ω_r : 角振動数 の調和加振力に対するモード座標における変位

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

ここで、調和加振力が作用する場合のモード座標における変位を調和波形で表現できるとすれば $\dot{x}_r = j \omega x_r, \ddot{x}_r = -\omega^2 x_r$ である。これらを式(1)に代入して変形すると

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

表面速度は式(2)を採用モードで重ね合わせる事により得られる。ここで、振動板上の微小面積 dS の部分が、振動速度 $\dot{x}_r = j \omega \xi_r e^{j\omega t}$ で振動しているとき、 dS 部分を点音源と考えると、この点音源の強さ A_0 は $A_0 = \dot{x}_r dS$ と表される。従って、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

原稿受付 2008年2月29日

発行 2008年3月31日

法政大学情報メディア教育研究センター

ル, 音圧 p は,

$$= \frac{1}{2} \iint_s \frac{0}{r} e^{j(\omega t - kr)} ds \quad (3)$$

r : dS と点 P 間の距離, k : 波数, $2\pi/\lambda$ 波長

$$p = \frac{\partial}{\partial t} \quad (4)$$

FORTRAN により作成した放射音予測プログラムにより音圧を求めた. プログラムフローチャートを図1に示す. MSC Nastran によって計算した固有値データを用い, 各要素の表面速度, 速度ポテンシャルを計算し, 音圧を求めるものである. このプログラムは上記の計算理論を基に作成された.

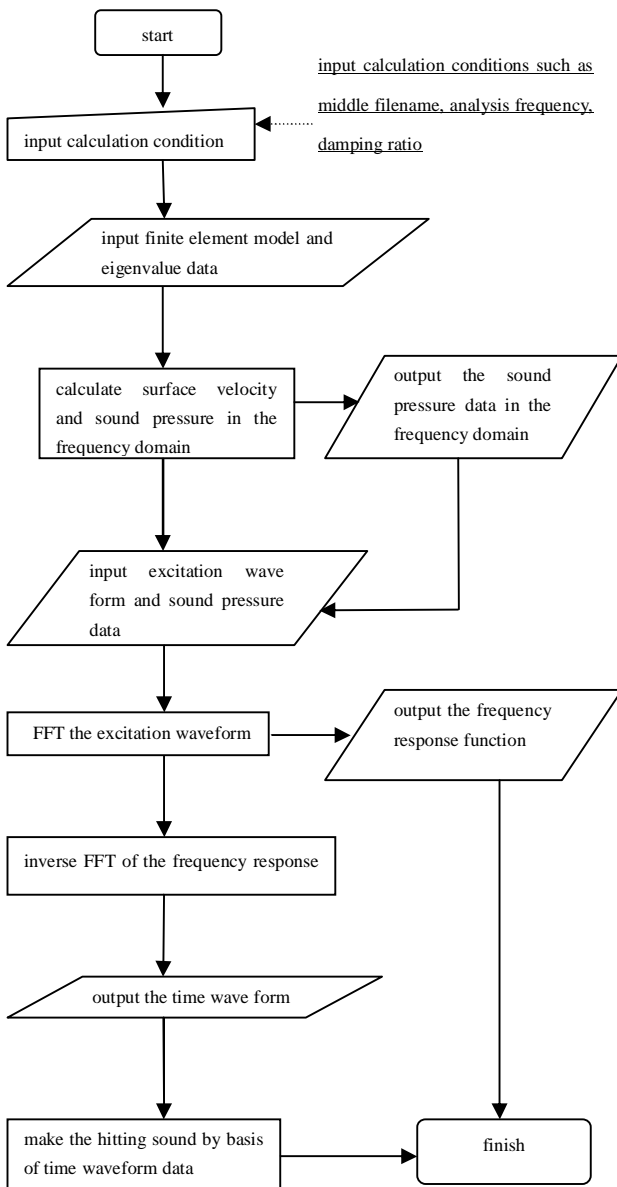


Fig.1 program flowchart

3. モード減衰比の同定

本プログラムにはモード減衰比の同定結果を入力する必要がある. 打撃加振実験を行いドライバーヘッドのモード減衰比を同定した. 加振はインパルスハンマで行い, ドライバーヘッドはスポンジの上に置き自由支持状態とした. 応答の測定にはレーザードップラー振動計を使用した.

モード減衰比の同定結果はばらつきが大きい. そのためモード減衰比を検討する必要がある. 実験は応答点を固定し, 加振点を移動させる方法で行い, 各加振点につき5回平均で行った. 実験を数回施行し, 各実験におけるデータのばらつきを調べた. 図2に各実験結果を示す.

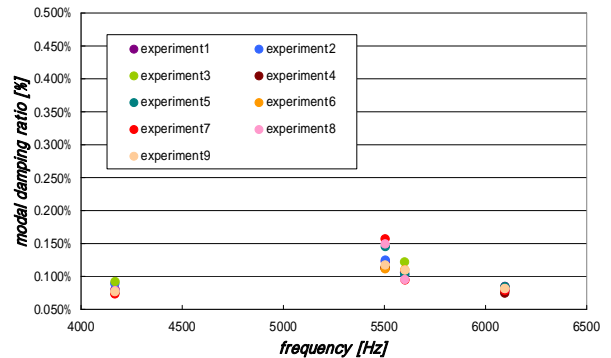


Fig.2 natural frequency and modal damping ratio

グラフより, 各実験におけるモード減衰比がまとまった値を示している. 最もばらついている箇所でも差が 0.045% に収まっている. 本研究では各実験で同定したモード減衰比を平均し, その値をプログラムに入力し計算音の作成を行った.

4. 実験結果と計算結果の音圧比較と考察

4.1 仮想ボールによる加振実験

ドライバーヘッドのスイートスポットを仮想ボールで打撃加振した際の音をマイクロフォンにて収録を行い, 計算音との比較を行った. 仮想ボールとは当研究室で作成した打撃加振に使用する器具であり, ゴルフボールにプラスチックの柄を取り付けたものである.

マイクロフォンは音源から 0.2m 離れた地点に設置した. 図3に実験で収録した音とプログラムを用い作成した計算音との比較を示す. 尚, 計算の作成には JPX E310 の形状データ, 同定したモード減衰比を入力した. さらに音源からの測定位置を実験と同じ位置に設定し, 打球音の再現を試みた計算音である.

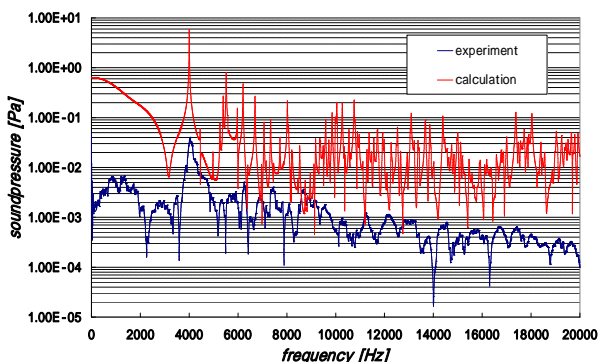


Fig.3 comparison of sound pressure

グラフより、実験と計算の双方において4000Hz付近で1次の大きなピークが現れ、グラフの波形もある程度一致していると考えられる。しかし実験値よりも計算値の方が大きくなっている。これに関して、プログラムで音の計算を行う際に入力した加振力が原因であると考えられる。実験に使用した仮想ボールは手によって打撃加振を行い、その際の加振力を測定することが不可能である。その代わりとして、計算音を作成する際にドライバーのヘッドスピード40m/secでの加振力を入力した。そのことで加振力が実験と比べて大きく異なり、双方の音圧値において著しく差が生じてしまったと考えられる。

4.2 実打実験

ドライバーの実際の打球音を測定し、計算音との比較を行った。打球音の収録には2種類の硬さの異なるボールを使用した。マイクロフォンは、音源から打者と反対側に0.5m離し、高さ1.6mの地点に設置した。これは実際に打球音を聞き取る打者の耳の位置を考慮した実験環境である。使用したボールはミズノ社製のCROSS EIGHT S301とCROSS EIGHT T301である。使用球を以下に示す。



Fig.4 CROSS EIGHT S301



Fig.5 CROSS EIGHT T301

2種類のボールには硬さという点に違いがあり、CROSS EIGHT T301の方が硬いボールである。図6に打球音と計算音との比較を示す。尚、計算の作成にはJPX E310の形状データ、同定したモード減衰比を入力した。さらに音源からの測定位置を実験と同じ位置に設定し、打球音の再現を試みた計算音である。

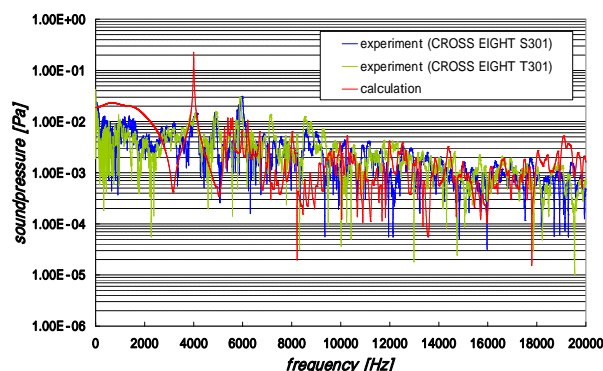


Fig.6 comparison of pressure

屋外にて実験を行ったため、実験データに雑音が入っている。またグラフより計算音は4000Hz付近に現れるピークが最大を示しているのに対し、2種類のボールの打球音の最大のピークは6000Hz付近に現れている。このことよりドライバーヘッドを用いて実験モード解析を行い、6000Hz付近のモード形状を確認した。確認したモード形状を図7に示す。

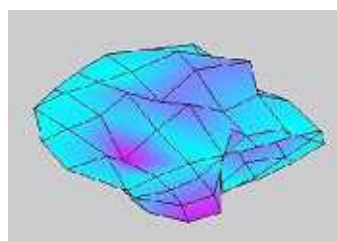


Fig.7 mode shape

また計算モード解析を行い実験モード解析で求めたモード形状との比較を行った。計算モード解析により求めたモード形状を図8に示す。

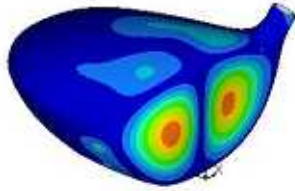


Fig.8 mode shape

モード形状より 6000Hz 付近の振動は打球面に 2 つの腹ができてることがわかる。これは打球面の中心部から少し左右に外れた位置を加振した際によく現れるモード形状である。そのため打球音を録音した際に、打球面の中心から左右に外れた位置でボールを捉えていたと考えられる。一方、音響シミュレーションプログラムで計算音を作成する際には打球面の中心を加振した際に発生する音を再現している。そのことが原因でこのように打球音と計算音のグラフの波形に違いが現れたと考えられる。

そこで、実打実験を再施行し打球面の中心部でボールを捉えた際の打球音を録音することを試みた。実験ではボールにチョークで色を塗り、ボールを打った後に打球面に残るチョークの跡から打球面の中心でボールを捕らえていたかを確認した。実際に打球面に残されたチョークの跡を以下に示す。



Fig.8 trace of the chalk

録音した打球音の中で図のようにチョークの跡が打球面の中心に残った際の打球音を採用し、計算音と比較を行った。図 9 に打球音と計算音と比較したグラフを示す。

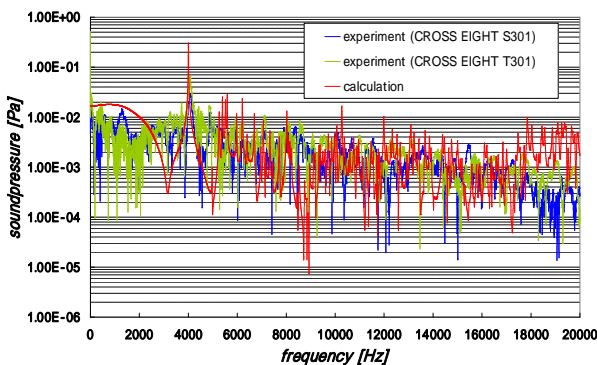


Fig.9 comparison of pressure

打球面の中心でボールを捉えたことで打球音のグラフは 4000Hz 付近に最大のピークが現れ、計算音と一致した。実際に音を聞き比べてみると音の高さという点でよく似ている。しかし響きという点で差があった。これは計算に入力しているドライバーの形状データがヘッド部分のみであることに対して、実験で使用したドライバーにはシャフトが付いていることから計算音ではシャフト部分の影響を考慮していないことが原因として考えられる。2 種類の打球音については 4000Hz 付近でのピーク値に差が現れ、硬いボールである CROSS EIGHT T301 の打球音のピーク値の方が計算音のピーク値に近くなっている。これは音響シミュレーションプログラムに入力する加振点が微小な面積であることに対して、軟らかいボールに比べて硬いボールの方が打球面との衝突面積が狭くなるために計算音作成の条件に近くなる。そのためボールの硬さによってピーク値に差が現れ、さらに硬いボールの打球音の方が計算音のピーク値に近づいたと考えられる。

以上より、音響シミュレーションプログラムを用いてドライバーの打球音を精度良く予測できたと考えられる。

5. 結論

実験と計算の比較を行ったところ、双方で固有振動数とピークの形状は一致した。しかしピーク値においては加振力や雑音の影響があり、一致を確認することができなかった。これに関しては無響音室で実験を施行する等、実験環境を整えることが必要となる。またそれ以外にも一致に至らなかったことに関して、仮想ボールや実打の実験での加振力の測定を可能にすることや衝突時の面積を考慮した上で加振力を入力するなど、様々な方面から原因の究明を行う必要がある。

参考文献

- [1]松村信宏ほか, Sound and vibration simulation of the golf club, 2006, 法政大学計算科学研究センター
- [2]MSC NASTRAN 2001 日本語オンラインマニュアル, MSC Software, 2001
- [3]長松昭男, モード解析入門, コロナ社, 1993.
- [4]鈴木浩平, 機械工学のための振動・音響学, 1989, サイエンス社