741 ゴルフクラブの音質設計及び評価法に関する研究

(打撃力の推定値を用いた打音の音質予測)

A Study on Sound Quality Design and Evaluation Method for Golf Club
(Forecasting the Sound Quality of Impact Sound Using Estimated Values of Impact Force)

○学 房野 亮介 (工学院大院) 正 大石 久己 (工学院大) 白鳥 雄司(工学院大)
三枝 宏 (横浜ゴム) 小野 一則 (横浜ゴム)

Ryousuke FUSANO, Kogakuin University, Nishi-shinjuku 1-24-2, Shinjuku-ku, Tokyo 163-8677
Hisami OISHI, Kogakuin University
Yuji SIRATORI, Kogakuin University
Hiroshi SAEGUSA, Yokohama Rubber Co., Ltd
Kazunori ONO, Yokohama Rubber Co., Ltd

Sound quality of impact sound becomes important in design of golf club. In this paper, two simple experiment models produced to examine the vibrational characteristic of the golf clubs. First, the results of the numerical analysis of the models and the results of the experiment are compared, and the effectiveness of the numerical model is shown. Then, confirmed the effectiveness of the proposed method for estimating impact force. Finally, it is examined the influence that a structural change in the golf clubs give to the sound quality of the impact sound is predictable by use three sound quality parameters.

Key Words: Sound, Sound Quality, Golf Club, Numerical Analysis

A 1. はじめに

ゴルフクラブの設計において打音の音質向上が重要な設計課題となってきた。著者らは以前より、CAD データからゴルフクラブの打音を予測して音質設計を行うことを目的として、ゴルフクラブの打音の物理評価パラメータと、打音の音質に対する官能評価との関係について基礎的研究を行ってきた。その結果、打音データから得られる物理評価量としての音質パラメータと打音の官能評価アンケートとの対応を示し、打音の好みに対して、打音の大きさ、高低、残響が音質パラメータとして有効であることを確認している²⁾。本研究では、ゴルフクラブの構造特性が、これらの音質パラメータに与える影響を明らかにし、音質設計につなげるための検討を行っている。まずはじめに、ゴルフクラブの数値解析の妥当性を検討するためにモード解析と固有値解析の比較を示し、数値解析の妥当性を確認する。次にインパルスハンマでの加振実験から求めた伝達関数を使用して打撃力を推定する方法を提案する。これをゴルフクラブの耐久試験機を利用した実打撃に近い条件でのボール打撃実験に適用し、実打撃時の打撃力を推定してその有効性を確認する。最後に音響解析ソフトによって打音を推定した結果と実測値を比較し、音質パラメータを評価値として利用して、ゴルフクラブの構造変更が打音の音質に与える影響を予測できる可能性を検討する。

A 2. 簡易構造変更クラブの打音予測と音質評価

本研究では、Fig.A1 に示すソール部の剛性を変化させた構造変更の影響を検討するためゴルフクラブの簡易モデル³⁾を使用し、その振動特性と打音の関係を数値解析結果と実験結果の両方から検討する。今回この二つのモデルに対して無

Fig.A1 Shapes of golf club

響室での打撃実験と耐久試験機を利用した実打撃に近いボール打撃実験を行った。構造変更が打音の音質に与える影響は、音質パラメータとして有効な三つの物理評価パラメータの音の大きさ(音圧パラメータ)、音の響き(残響パラメータ)、音の高低(高低パラメータ)を用いて行う。Fig.A2 に音圧パラメータの比較結果を示す。実験と解析にレベルの違いがあるものの測定位置とクラブの違いに対する傾向はよく一致した結果となっている。

A 3. おわりに

構造変更が打音の音質に与える影響を数値解析と実験結果に対して音圧パラメータ、残響パラメータ、高低パラメータを用いて検討した結果以下の結論を得た。

- (1) 構造変更ゴルフクラブについて、無響室、耐久試験機それぞれの実験結果と数値解析結果を比較し、実験と数値解析でよく一致した結果を得た。
- (2) インパルスハンマによる加振実験で求めた伝達関数を用いて、加速度と音圧から打撃力を推定する方法を提案し、その有効性を確認した。また、実打撃に近い条件でのボール打撃の打撃力も推定した。
- (3) 音響解析により、周波数領域と時間領域の打音を求め、三つの物理評価パラメータを用いて実験結果と比較しよく一致する結果を得た。

Fig.A2 Sound pressure parameters

1. はじめに

ゴルフクラブの設計において打音の音質向上が重要な設計課題となってきた。著者らは以前より、CAD データからゴルフクラブの打音を予測して音質設計を行うことを目的として、ゴルフクラブの打音の物理評価パラメータと、打音の音質に対する官能評価との関係について基礎的研究を行ってきた。その結果、打音データから得られる物理評価量としての音質パラメータと打音の官能評価アンケートとの対応を示し、打音の好みに対して、打音の大きさ、高低、残響が音質パラメータとして有効であることを確認している²⁾。本研究では、ゴルフクラブの構造特性が、これらの音質パラメータに与える影響を明らかにし、音質設計につなげるための検討を行っている。まずはじめに、ゴルフクラブの数値解析の妥当性を検討するためにモード解析と固有値解析の比較を示し、数値解析の妥当性を確認する。次にインパルスハンマでの加振実験から求めた伝達関数を使用して打撃力を推定する方法を提案する。これをゴルフクラブの耐久試験機を利用した実打撃に近い条件でのボール打撃実験に適用をし、実打撃時の打撃力を推定してその有効性を確認する。最後に音響解析ソフトによって打音を推定した結果と実測値を比較し、音響パラメータを評価値として利用して、ゴルフクラブの構造変更が打音の音質に与える影響を予測できる可能性を検討する。

2. 簡易構造変更クラブと数値モデル

本研究では Fig.1(a)と(b)に示す基本モデル(Club A)と構造変更モデル(Club C)を使用して、その振動特性と打音の関係を数値解析結果と実験結果の両方から検討した。クラブの構造変更としてはソール部の剛性を変更することが有効である³⁾。そのためモデル C はモデル A に対して幅 3.0mm、高さ 5.5mm の 2 本のリブをソールの端から端まで配した構造とした。これらを用いて、ソール面の構造変更と音質との関係、および打撃点と音質との関係、打撃力を検証した。

Table 1 にモード解析で求めた固有振動数と数値解析で求めた固有振数の比較を Club A と C について示す。なお、数値モデルは MSC/Nastran で構築している。

3. 実験及び加振力の推定

3.1 打撃実験 構造解析と音響解析により求めた周波数応答の整合性を確認するため、はじめに、Fig.2 に示す実験装置を構成し無響室で打撃実験を行った。打撃はインパルスハンマで行い、加振応答は、フェース面またはソール面に定めた 3 カ所の加速度応答を計測した。打音は、Fig.2 のようにフェース面またはソール面の中心から 100mm、300mm、700mm の位置をそれぞれ計測点 P1、P2、P3 として音圧を計測した。次に、Fig.3 に示す実験装置を構成し、インパルスハンマを用いた打撃実験と耐久試験機を用いて実打撃に近い速度でのボール打撃実験を行った。フェース面とソール面に定めた 3 カ所に加速度ピックアップを取付け、加速度応答を計測した。

Fig.1 Shapes of golf club

Table.1 Comparison of natural frequency by modal analysis and numerical analysis

Mode No.	Club A		
	Measured [Hz]	Estimated [Hz]	error [%]
1	1959	1888	4.0
2	3428	3284	4.4
3	4118	4017	2.5
4	6044	5779	4.6
5	6393	6464	-1.0
6	6670	6612	0.9
7	8235	8067	2.0
8	8789	8585	2.4
9	9161	8951	2.3
10	9322	9217	1.1

Mode No.	Club C		
	Measured [Hz]	Estimated [Hz]	error [%]
1	2076	1967	5.5
2	4059	3855	5.3
3	5288	5074	4.2
4	6239	5995	4.1
5	7218	7204	0.2
6	—	8284	—
7	8756	8826	-0.8
8	9302	9062	3.1
9	9476	9340	1.5

Fig.2 Impact experimental equipment in anechoic chamber

Fig.3 Impact experimental equipment by endurance testing machine

Fig.4 Comparison of frequency response functions

3.2 伝達関数の推定 Fig.4 にインパルスハンマを用いた打撃実験の加速度に対する伝達関数の測定値と、数値解析による推定値の比較を示す。これはフェース中央を打撃した時のフェース面の打撃力に対する加速度応答の伝達関数である。太い実線が実験結果で、細い実線が数値解析による推定値である。Fig.4 に示すように共振点の位置や大きさに差があるところがあるが、全体によく推定できているといえる。さらに推定精度の向上が必要である。

3.3 打撃力の推定 ゴルフクラブに力 $\{F_I(\omega)\}$ が作用したときの応答を $\{X_I(\omega)\}$ とすると、伝達関数 $[G(\omega)]$ を用いて

$$\{X_I(\omega)\} = [G(\omega)] \cdot \{F_I(\omega)\} \quad (1)$$

と表すことができる。3.2 節に示した伝達関数に加え、打撃力を知ることができれば、そのときのゴルフクラブの応答を推定することができる。

また、ボール打撃による力は広がりを持った面で作用するが、いくつかの等価な集中力 $\{F_B(\omega)\}$ で近似できるとすると、ボール打撃による応答 $\{X_B(\omega)\}$ は、式(1)と同じ伝達関数 $[G(\omega)]$ を用いて

$$\{X_B(\omega)\} = [G(\omega)] \cdot \{F_B(\omega)\} \quad (2)$$

と表すことができる。ここで、仮定する打撃点に対してそれぞれインパルスハンマによる打撃実験を行った場合にも式(1)の関係が成り立つので、伝達関数 $[G(\omega)]$ を測定することができる。また、3.2 節で比較したように数値解析で推定することも可能である。

次に、実打撃に近い速度でのボール打撃においても同じ伝達関数を利用できると考えると、式(2)に基づき加速度や打音などの応答の計測値からそのときの打撃力を推定することができる。ここで、推定する打撃力 $\{\tilde{F}_B\}$ の数に対して応答 $\{X_B\}$ の数が多い場合には、推定誤差の自乗和を最小にすることでより精度のよい推定値が期待できる。推定誤差の自乗和は、

$$\varepsilon^2 = (\{X_B\} - [G]\{\tilde{F}_B\})^* (\{X_B\} - [G]\{\tilde{F}_B\}) \quad (3)$$

与えられ、推定誤差を最小とする打撃力は、

$$\{\tilde{F}_B\} = ([G]^* [G])^{-1} [G]^* \{X_B\} \quad (4)$$

与えられる。

Fig.5 Comparison of impact force by estimated accelerations

Fig.6 Comparison of impact force by estimated impact sounds

Fig.7 Impact force estimated by accelerations

はじめに、打撃力の推定法の妥当性を確認するため、打撃力が既知であるインパルスハンマを用いた打撃実験の結果を用いて、加速度応答および打音から打撃力を推定する。Fig.5 と Fig.6 に打撃力の測定値と式(4)に従って加速度応答と伝達関数から打撃力を推定した結果の比較を示す。Fig.5 が加速度応答から推定した打撃力、Fig.6 が打音（音圧）から推定した打撃力である。これらはフェース中央を打撃した時の打撃力である。上図は周波数領域で、下図は周波数領域の推定結果を逆フーリエ変換した打撃力の時系列波形である。太い実線が測定値で、細い実線が推定値である。Fig.5 と Fig.6 とにより一致しており提案した打撃力の推定法は有効であるといえる。

次に、打撃力の推定法の有効性を踏まえ、Fig.7 にボール打撃実験における打撃力の推定結果を示す。フェース中央を打撃した時の打撃力でボール速度 40m/s である。一般に 40m/s での打撃力は 15kN 程度といわれており、近い結果となった。これよりボールによる実打撃においても加振力推定が有効と考えられる。上図は周波数応答で、下図は時系列波形である。

4. 音響解析

4.1 騒音計の応答と音響解析の比較 ゴルフクラブの打音予測の有効性を確認するため、音響解析ソフトを用いて音場解析を行う。Fig.8 に解析画面を示す。ゴルフクラブの打撃点に加振力を設定し、解析位置の音場の応答を推定した。これにより、得られた打音の音響解析結果と無響室で測定した打音を比較し、数値解析の有効性を検証する。

また Fig.9 に音響解析と実験の比較の例を示す。Club A の中央を加振したときの応答である。スペクトルはある程度一致しておりさらに精度の向上は必要であるが解析結果は有効であると考えられる。

4.2 予測音の作成 音響解析により得られた解析結果及び実験から得たスペクトルを基に打音の周波数応答関数を逆 FFT 変換し時系列データを作成した。

Fig.10 に音響解析により得られた打音と実験による打音の測定値の比較を示す。これは Club A のフェース中央を加振したときの時系列波形である。ある程度時系列データを推定できたと言える。

4.3 音質評価パラメータの定義と評価 推定した音圧に対して音の大小（音圧パラメータ）、音の響き（残響パラメータ）、音の高低（高低パラメータ）の物理評価値を計算し、その評価値で打音の推定の有効性を検討する。

(1) 音圧パラメータ フィルタ処理を行なったデータに対して打音を定常音と見なして周波数マスキングのないラウドネスレベルとし、左右チャンネルの平均を音圧パラメータとする。

(2) 残響パラメータ フィルタ処理を行なったデータに対して 50 データのエネルギー合計を 1 データずつずらして 16,000 のエネルギー合計(2 乗和に対して $10 \cdot \log$ する)を求め、最大ブロック番号から 30[dB]減らした時間[msec]の左チャンネルと右チャンネルの平均を残響パラメータとする。

(3) 高低パラメータ フィルタ処理を行なったデータに対して先頭部分の 1,500 データを除いた 8,192 データの用いて FFT 解析を行ない下限周波数 1 [kHz]、上限周波数を 20 [kHz]の帯域に対して式(5)に従ってエネルギー中心周波数

Fig.8 Analysis screen of acoustic numerical analysis

Fig.9 Comparison of frequency response functions for impact sound

Fig.10 Comparison of measured and estimated impact sounds

f_0 [Hz]を求めたものを音の高低パラメータとする。

$$f_0 = \frac{\sum f_i \cdot 10^{L_i}}{\sum 10^{L_i}} \quad (5)$$

L_i : 各周波数成分の dB 値

f_i : 各周波数

4.4 評価 Fig.11, Fig.12, Fig.13 に音圧パラメータ, 残響パラメータ, 高低パラメータについて, モデル別の比較を示す.

Fig.11 より音圧パラメータでは, Club A より Club C の値が大きく, 数値解析と実験結果で同様の傾向を示している. これより, モデル違いによる構造変更の影響の定性的な傾向予測は出来ているといえる. ただし, 実験結果と数値解析結果の値には違いがあり, 減衰の考慮など音の大きさに影響を与える要因の検討が必要である.

Fig.12 より残響パラメータについては, 全ての条件において Club A の値の方が Club C よりも大きくなっており, モデル違いによる構造変更の影響の定性的な傾向予測は出来ているといえる. なお, P1, P2, P3 の距離の増加に対する影響はほとんどないものの, 変化の傾向については異なっており, さらに検討が必要である.

Fig.13 より高低パラメータについても, 全ての条件において Club A の値の方が Club C よりも小さ値となっており, モデル違いによる構造変更の影響の傾向予測は出来ているといえる. また, P1 から P3 の距離の増加についても, 実験の P2 を除き, 同様の結果を得ている.

5. おわりに

ゴルフクラブの音質設計に対する数値解析手法の妥当性を検証するため, 2 本の構造変更ゴルフクラブに対して, 無響室での打撃実験と耐久試験機を用いた打撃実験を行った結果以下の結論を得た.

- (1) 構造変更ゴルフクラブについて, 無響室, 耐久試験機それぞれのインパルスハンマでの加振実験の結果と数値解析結果を比較した結果, モデルによって中, 高周波数領域ではやや異なる点はあるが, 全体的に実験結果と数値解析結果でよく一致した結果を得た.
- (2) インパルスハンマによる加振実験で求めた伝達関数を用いて, 加速度と音圧から打撃力を推定する方法を提案し, その有効性を確認した. また, 実測が難しい, ボール打撃の推定値も妥当な結果を得られた.
- (3) 音響解析において, 周波数領域応答を逆 FFT 変換した時系列波形を推定し, 三つの音質パラメータを用いて実験結果との解析結果を比較し, 一致した傾向を得た. しかし実験結果と解析結果の間にレベルの違いがあり, 今後さらに精度向上が必要である.

参考文献

- (1) 大石他 3 名, 日本機械学会 D&D2006 アブストラクト集 No.06-7, p.340(2006-8)
- (2) 大石他 3 名, 日本機械学会 D&D2007 アブストラクト集 No.06-8, p.320(2007-8)
- (3) 大石他 4 名, 日本機械学会 D&D2009 アブストラクト集 No.09-23, p.167(2009-8)

Fig.11 Sound pressure parameters

Fig.12 Reverberation parameters

Fig.13 Pitch parameters