

ゴルフクラブにおける打球音の予測と改良

小澤, 聡太 / OZAWA, Sota

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)

55

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2014-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00010304>

ゴルフクラブにおける打球音の予測と改良

PREDICTION AND IMPROVEMENT OF BATTING SOUND WITH GOLF CLUB

小澤 聡太

Sota OZAWA

指導教員 御法川学

法政大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程

The purpose of this research is development of CAE tool to design the agreeable sound golf club. Therefore, the radiation sound forecast program was made. Program was created using modal analysis theory and superposition theory of velocity potential. In a past research, the batting sound of the golf club was forecasted. As for past research results, the difference was seen between "Sound measured by experiment" and "Sound calculated by the radiation sound forecast program" of the golf club. Therefore, In this paper, the difference was identified by measurement of the exact impact sound using the accurate method. On the other hand, the calculation of structure optimization was performed. As a result, one of the guideline of design changes was decided.

Key Words: *Sound and Acoustics, Vibration, Simulation, Structure Optimization*

1. はじめに

さまざまな工業製品・構造物の設計開発において、その振動特性や、稼動時の振動・騒音が大きな問題になっている。一方で、楽器のように発生音そのものが製品の性能や付加価値を大きく左右する場合がある。本研究の対象であるゴルフクラブも振動や音によって付加価値が決定する製品である。ゴルフにおいては、打球感と言われるボールを打った際の感覚によってそのクラブの良し悪しが決まることがある。この打球感が振動や音によって大きく左右される部分である。またその際の感性に大きく影響を及ぼす要因として打球音があり、ゴルフ経験者の中には、音だけでどのようなショットを行ったかある程度分かるという人もおり、芯で捉えた良いショットと打球音特性との間に相関が見られている[1][2]。特に上級プレイヤーにおいてこの相関関係が強いと言われており、プロの打球音は心地よく聞こえるという経験者も多い。一方、近年の技術発展によりゴルフクラブの飛距離性能やコントロール性能も格段に向上している。しかし、性能が上がったことにより、飛距離が出すぎてしまうなど、ゴルフの競技性が失われるといった懸念も出てきている。そこで、主要なゴルフツアーを主催する各国のゴルフ協会はゴルフクラブの性能を制限するルールを設け始めている。その代表的なルールとして、ゴルフクラブ打球面の反発係数を 0.83 以下に制限する等を規定した S L E ルールが挙げられる。他にも

ドライバーのコントロール性能を制限するためにドライバーヘッドの体積や慣性モーメントに上限を設け、スイートエリアの大きさを制限している。このような規制が設けられたことでゴルフクラブの飛距離性能やコントロール性能での製品の差別化が困難になりつつある。そのため打球音の良さで製品の差別化を図ろうとする動きもあり、今まで以上に打球音という付加価値が重要視されている。

近年、工業製品などの設計開発において市場ニーズの多様化により、開発期間の短縮やコストの削減に対する要求が強まっている。またその要求に加えて製品の品質向上も要求されている。これら相反関係にある「開発期間の短縮・コストの削減」と「製品の品質向上」の両立が長年求められてきた。そんな中で近年のコンピュータ技術の発展により開発されたのが CAE ツールである。CAE ツールはコンピュータを使用して有限要素法などの数値解析を行う支援ツールであり、今まで難しかった製品の詳細な事前検討を可能にした。そのため、従来の方法である試作の繰り返しから、CAE ツールを使用することで「開発期間の短縮・コストの削減」「製品の品質向上」の両立が高いレベルで可能になってきた。

従って本研究の目的は、図面段階で心地良い音のするゴルフクラブを設計するための CAE ツールの開発である。本研究では、2003 年度に理論モード解析[3]、速度ポテンシャルの重ね合わせ理論[4]を用いた放射音予測プログラ

ムが作成された。2008年度までにアイアンヘッド、ドライバーヘッドと同じ材質を用いた中空管円筒、そしてドライバーヘッドにて、このプログラムの実用性を検討した。また、実現象で発生する回折音・反射音を考慮したプログラムを2010年度までに開発した。このような改善を行ってきたが、実際の音とプログラムにより計算した音に違いがみられる。本年度は実際の打球音の正確な把握から、打球音との計算音の違いを探り、精度向上のための検討をした。また、実際に設計変更を行うにあたり、その指針を求めるために、FEMモデルを使用した構造最適化計算を行った。以下にその検討結果を述べる。

2. 放射音予測プログラム

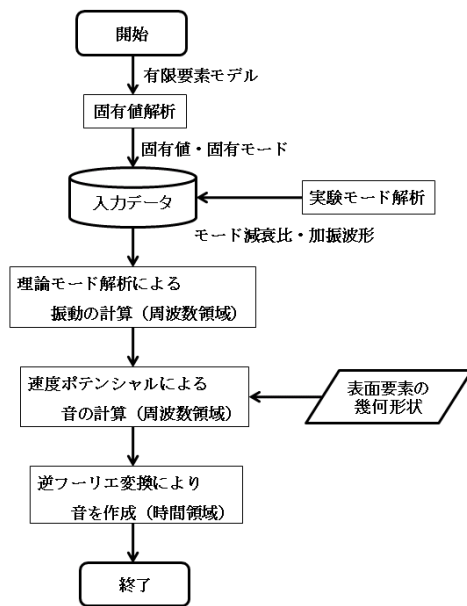


図1 放射音予測プログラムのフローチャート

放射音予測プログラムによる音の計算手順を簡単に説明する。まず計算対象となる物体の有限要素モデルを3次元CADデータなどから作成する。本研究室では有限要素モデルの作成にAltair EngineeringのHyper Meshを使用している。作成したモデルをRADIOSS, NASTRAN等のソフトを使用して固有値解析を行い固有値、固有モードを求める。モード減衰比については、計算により理論的な値を求めることができない。そのため非線形最適化法[5]を使用した実験モード解析によりモード減衰比を同定する。そして放射音予測プログラムに固有値、固有モード、モード減衰比、さらに対象に加える加振波形を入力する。そのデータを基に理論モード解析により、有限要素モデル表面の全節点の振動速度を算出する。次にその表面全節点の振動速度とモデルの幾何形状から、速度ポテンシャルを利用して音を算出する。今まで述べてきた計算は全て周波数領域で行われている。そのため算出した音を逆フーリエ変換して時間領域の音を作成する。

この理論モード解析から逆フーリエ変換により音を作成するまでの一連の過程を、当研究室でFORTRANによ

り作成した放射音予測プログラムが行っている。フローチャートを図1に示す。

3. 実打球実験に関する検討

昨年度まではハンマリング試験とシミュレーションによる計算の比較を重点的に行なっていたが、ゴルフクラブの打球音が最終的な比較対象であり、ターゲットとしての実打音に関してその特性を知り、検討することで、シミュレーションプログラムの改善を助けることになる。本研究では、新たに無響室での実打音収録が可能となったので、測定環境による変化を最初に検討する。さらに、打球位置による変化、スイングスピードによる変化を検討する。また、ハンマリング試験やシミュレーションによる計算音とも比較し、違いを探る。

(1) 測定環境による比較

以前より実打音測定を試みてきたが、良い測定環境を確保できなかったため、上質なデータを得ることができなかった。本年度、無響室での測定環境を整えることに成功したので、測定環境による違いについて比較を行う。以下に3種類の測定環境とその結果を示す。



図2 実打実験 (緑町グラウンド)



図3 実打実験 (ゴルフ練習場)



図4 実打実験 (無響室)

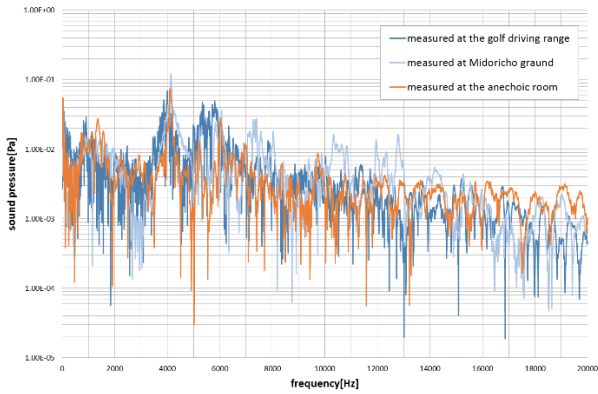


図5 実験環境比較結果

加振力を完全に同じにすることはできないので、音圧の大きさを比較することは難しい。いずれの結果についても、4000Hzと6000Hz付近に大きい共振峰が見られるが、これはヘッド部分の固有振動により発生した音で、この結果から見ても、ヘッド部分の振動特性が打球音に大きく影響するといえる。屋外での結果と無響室での結果を比較する。一例として4000Hzの共振峰に注目すると、無響室のデータは、他のデータに比べて急激な山となってピークをとっていることがわかる。加振実験において、その振動特性を表す理想的な結果は、固有振動数で急激なピークが立っていることであるので、無響室のデータがより理想的なデータに近いことがわかる。

今回の実験環境から、この原因は主に周囲の雑音にあると推察できる。屋外ではいずれも人間の耳にも十分聞こえる程度に雑音が発生していたため、いずれのデータも打球音の測定には成功しているものの、打球音単体の特性を十分に表すことができなかった。

(2) 打球位置と打球スピードの検討

打点位置とスイングスピードという二項目を主に検討した。従来行ってきた加振実験や、実打実験の経験から、打点位置とスイングのスピードを変えることによって、打球音に変化が望めると期待したためである。ショットマーカーをフェース部に貼り付けて打球位置を判明できるようにし、ヘッドスピードの計測機器を使用することで打撃時のスピードを明確にして実験を行った。打点位置については、以下の図のように上下左右で打った時の音を比較し、スイングのスピードについては、打球位置をフェース中央に固定し、ヘッドスピードを40m/s、30m/s、20m/sの3種類で比較検討した。以下にその結果を示す。



図6 打点位置

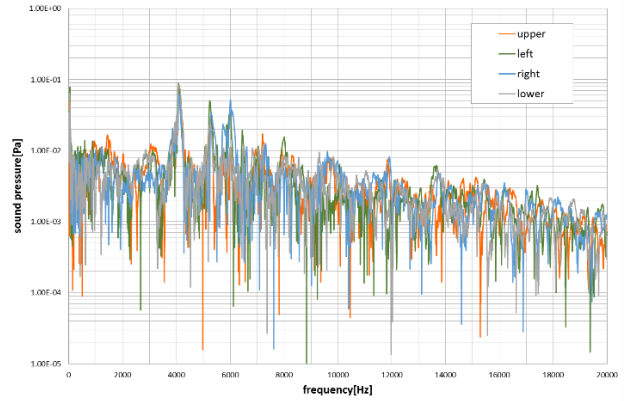


図7 打点位置の比較結果

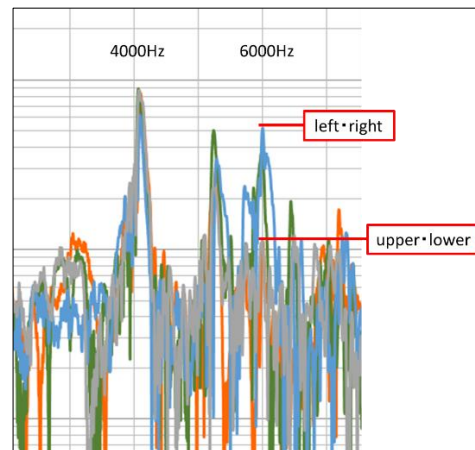


図8 図7拡大図

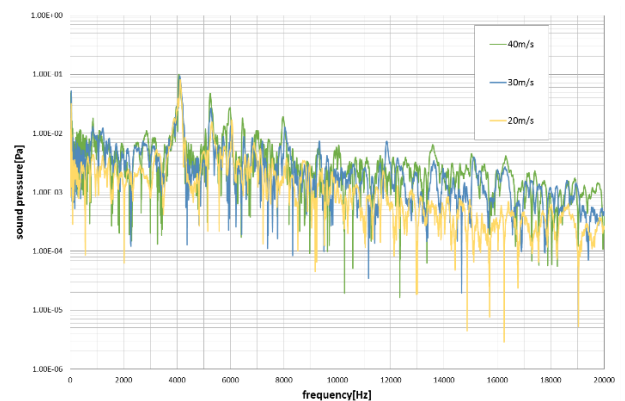


図9 ヘッドスピードの比較結果

打点位置の比較について、共振峰に注目すると4000Hz付近、5200Hz付近、6000Hz付近の3つのピークがあることがわかる。その中でドライバークラブのヘッドにお

ける最も基本的なモードである 4000Hz 付近の共振峰がいずれの打球位置でも最も大きくなった。さらに、どの位置で打球してもその大きさは殆ど変わらないことがわかる。一方 6000Hz 付近の共振峰では打点による傾向が見られる。上・下で打球した時より、左・右で打球した時の方が音圧は大きくなっている。これは 6000Hz のモード形状に関する。このモードはフェースの左右に 1 つずつ腹ができる形のため、その腹近くを加振されたので共振峰が大きくなった。

一方、ヘッドスピード毎の比較では、いずれの周波数帯においてもヘッドスピードが大きいほど音圧も大きくなる傾向が見られた。ヘッドスピードの増大とともに加振力が大きくなったため、その影響がそのまま出た形となる。ただし、4000Hz 付近の共振峰においては、ヘッドスピードを変えたにもかかわらず、その大きさがほぼ変わっていない。

(3) 風切り音の検討

打球する際にドライバークラブ以外から発生する音として、スイング時の風切り音があり、今回の実験でも発生した。この音は従来のハンマリング等では発生しない音なので、これが実打音に与える影響について述べる。以下に、打球音のスペクトログラムと素振り時のスペクトログラムを示す。

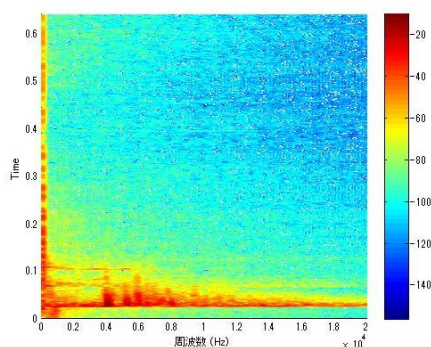


図 10 打球音のスペクトログラム

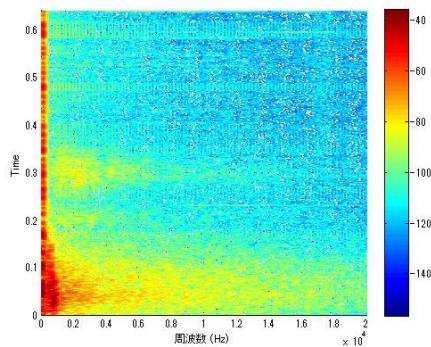


図 11 素振り時のスペクトログラム

打球音のスペクトログラムを見ると、0.03 秒付近に全周波数の音が発生しており、これが打球時である。そこから次第に減衰していく様子がわかる。打球時以降にも、広い周

波数帯に渡る瞬間的な音があるが、これは打球したボールが防球ネットに当たる音である。一方素振り時のスペクトログラムを見ると、0.2 秒あたりまで、特に 1000Hz 以下の音が発生していることがわかる。これがスイング時の風切り音である。この影響を確かめるために周波数領域のグラフに打球時と素振り時のものをプロットしたものを以下に示す。

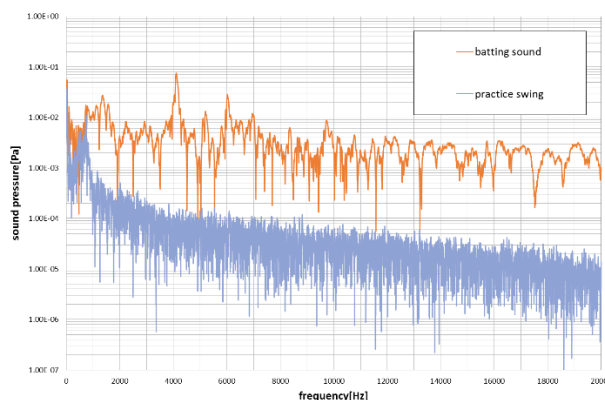


図 12 打球時と素振り時の比較

青い線が素振り時の値である。1000Hz 付近でやや大きいですが、それ以降の大部分では打球音より十分に小さい。打球音を構成する主な周波数は 4000Hz や 6000Hz なので、風切り音が打球音に与える影響は非常に限定的であると言える。

(4) ハンマリング試験との比較

本実験で得た打球音とハンマリング試験で発生した音、及びシミュレーションプログラムにより計算した音を比較する。以下に周波数領域における比較結果を示す。

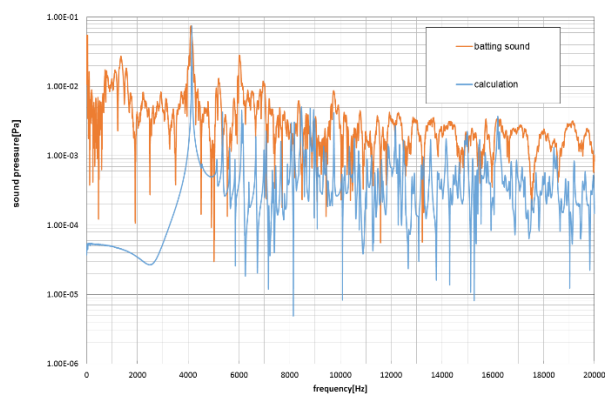


図 13 打球音と計算音の比較

加振力がことなるため、単純に音圧の大きさを比べることは適切ではないが、8000Hz 付近までの低周波帯に比べ、それ以降の高周波帯は音圧の差が相対的に小さいと言える。このことから、ハンマリングと実打の違いは結果としては低周波帯に大きく現れ、この差を解明することにより、ハンマリングと実打の現象としての違いにつ

なると考えられる。

4. 加振力に関する検討

ハンマリングを元にしたシミュレーションと実打球音には大きな差があることがわかった。そこで、従来のハンマリングの条件を実打の条件に近づけることによって、その差を明らかにすることができると考えた。ハンマリングと実打を比較した時に、大きな違いとして加振力がある。実際の打球ではハンマリングより圧倒的に加振力が大きいので、特に加振力に注目して検討を行う。

(1) ハンマリング実験

従来使用していた小型のインパルスハンマと新たに大型のインパルスハンマを使い、それぞれで加振した時に発生する音を比較する。

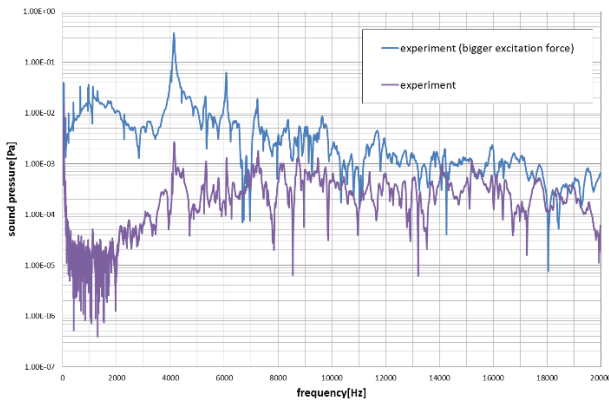


図 14 周波数領域比較

主な共振峰の位置は一致している。しかし、3000Hz 以下の低周波帯において、顕著な差が見られる。従来の値は、4000Hz 付近の共振峰から、周波数が低くなるにつれて音圧が小さくなっているのに対して、今回の値では、3000Hz 付近に一度谷を作ってからまた多くなるような波形が見られる。また、全体を見ても、6000Hz 付近以降の高周波帯は音圧の差が小さいのに対して、低周波帯はその差が大きくなっていることがわかる。この原因として、加振波形の違いが挙げられる。以下に加振器側の入力の波形を周波数解析した結果を示す。

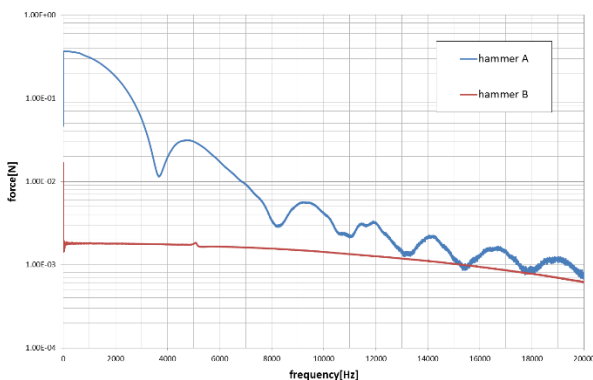


図 15 加振波形比較

加振器を hammerB から大型の hammerA に変更したことで、周波数帯毎に加振力の差がでていくことがわかる。低周波が比較的大きい hammerA で加振したことで、発生した音も低周波の要素が大きくなったと考えられる。

(2) 実打音との比較

改めて2つの加振条件の音を実打音と比較する。

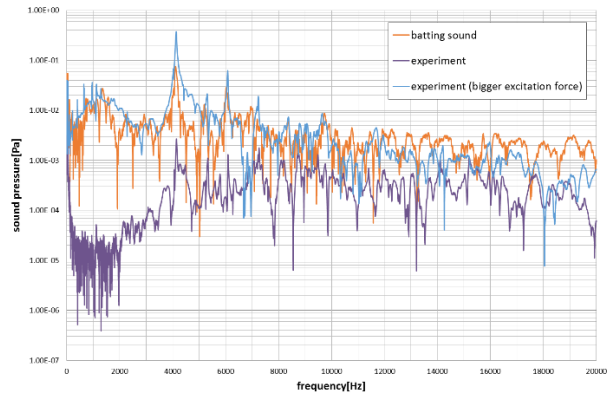


図 16 実打音との比較

特に低周波帯域で音圧の大きさが近くなっていることがわかる。つまり、実際の打球における加振波形は、大きいハンマを用いた新しい加振波形により近いと言える。これは実際の打球でもフェースとボールが変形するため、新たなハンマリング試験時と似た条件になったためと考えられる。

この実打により近い加振波形を利用して、放射音予測プログラムによる計算を試みた。以下にその結果を示す。

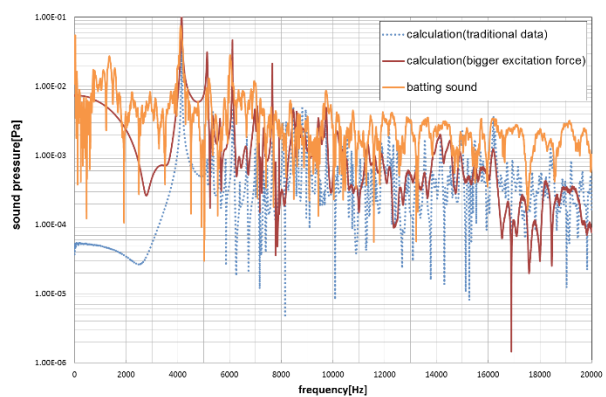


図 17 加振波形の異なる計算結果

収録された音と同様に、加振波形を変更したことによって、計算音の波形が実打音の波形に近づいていることが明らかである。特に低周波帯域の傾向が、実打音に近づいていることもわかる。

今回は一種類のハンマで実験を行ったが、加振力や先端形状、材質などを変更し、実打音により近い音が発生する

ハンマを使用して、その加振波形をシミュレーションプログラムに入力すれば、より精度の高い打球音の予測が現状のプログラムでも可能であると言える。

5. 構造最適化計算に関する検討

より打球音の付加価値が優れたゴルフクラブが求められた際に、そのようなゴルフクラブを一から作成するには膨大な作業量が必要となってくる。そこで、今あるゴルフクラブに対して設計変更を行うという方法が出てくる。本研究では使用ツールとして Altair Engineering の OptiStruct により FE ベースの構造最適化計算を行い、より適切な設計変更の傾向を検討していく。計算のターゲットとして打球音を構成する要素の中でも重要なものの一つである、音の周波数を変化させることを主に扱う。対象物のモードの中で、特に大きな音を発生しているモードの固有振動数を出来る限り小さい設計変更で変化させ、発生する音の音質を変えることを目指す。

本実験においては、指定のモードに対してその固有振動数を上げることを目的と設定した。振動数を上げることで、発生する音の音色を変化させることができる。計算時の設定の問題から、振動数を上げることをメインに扱う。ただし下げた場合でも似た傾向が確認できている。

振動数の値を指定して目的関数にすることはできない。振動数を上げようとする場合、ほぼ間違いなく質量が増加するため、それを利用し、目的関数を質量の最小化として、制約条件として振動数の値を指定することで、最適な形状変化を計算する。また、設計変数は、今回形状を変化させるので、設計領域を指定し、その範囲内の接点位置を変数とした。対象は第4章で使用した円筒モデルとドライバーヘッドのモデルだが、ドライバーという製品の性質上、外側に変形が生じるのは好ましくないため、設計領域は基本的に内側のみとしている。

(1) 円筒モデル

はじめに、構造最適化計算を円筒モデルに使用する。まずは単純なパラメータのモデルを用いた方が、計算失敗の可能性も減り、形状変化の傾向や性質を素早く知ることができるからである。また、この円筒モデルはゴルフクラブとモード形状が似ており、ゴルフクラブでの適用時の参考にすることもできる。以下に使用するモデルを示す。モデルの初期の質量は 448.2g である。

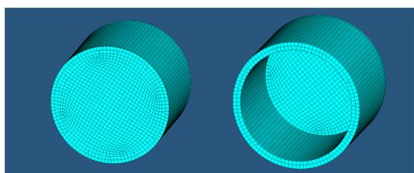


図 18 円筒モデル

1 次モードは 4110Hz で以下の図に示すようなモード形状である。このモードの固有振動数を上昇させる。

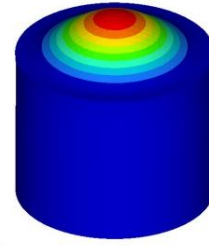


図 19 モード形状 4110Hz

目標値を 5000Hz として最適化計算を実行した際のモデルの変化量を示す。

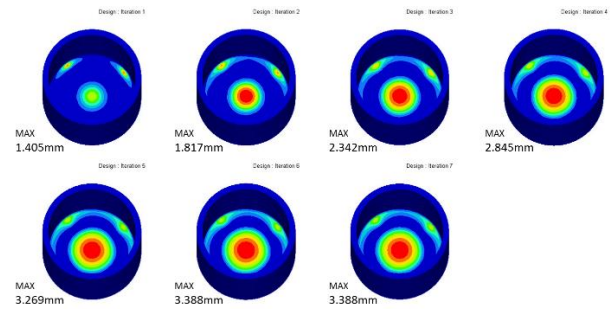


図 20 計算結果 1

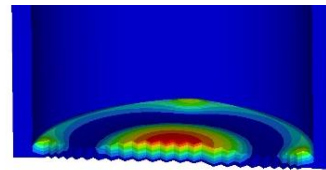


図 21 最終形状の断面図 1

図 19 は左上から各繰り返し計算時の結果を順に表している。7回の繰り返し計算が行われ、右下が最終形状である。図 20 が最終形上の断面図である。底面の中央部と円周の一部が規則的に変化していることがわかる。質量は 16g 増加し 464.2g に、振動数は 5001Hz になった。

次に 7918Hz のモードで同様の計算を行う。このモードは以下の図に示すように底部の左右が交互に動くモード形状である。

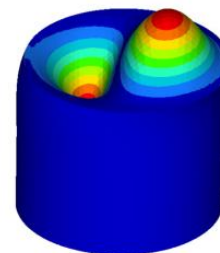


図 22 モード形状 7918Hz

円筒内側の全面を設計領域として、目標値を 9000Hz に設定した。以下に計算結果を示す。

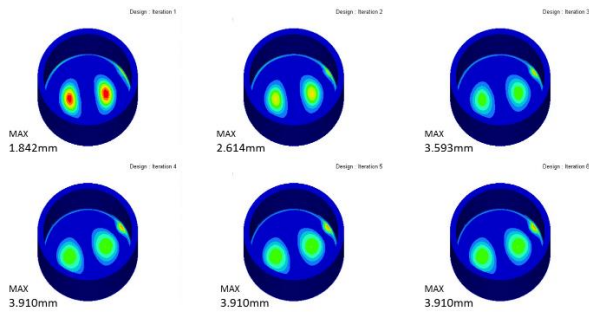


図 23 計算結果 2

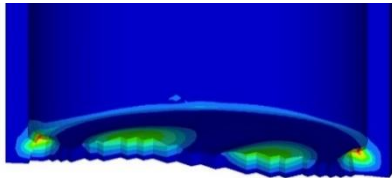


図 24 最終形状の断面図 2

1 次モードの時と同様に、モードの腹と、円周の一部で変形が大きくなった。質量は 20.2g 増加し 468.4g に、振動数は 9089Hz になった。

次は 14515Hz で、以下の図に示すように底部の中央と同心円上にもう一つ腹があるモード形状である。

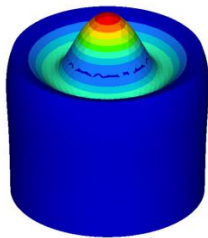


図 25 モード形状 14515Hz

目標値を 15000Hz に設定した。以下に計算結果を示す。

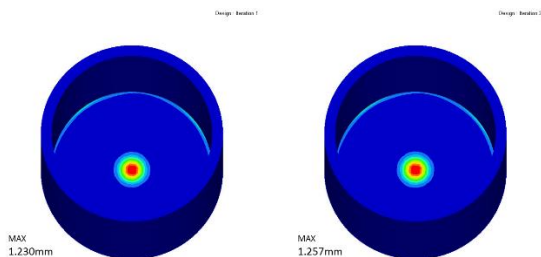


図 26 計算結果 3

他の結果と比べて円周部の変形が少なく、モードの腹のうち中央部分のみが変形した。今までの計算の傾向から、モードの腹と節の付近が変化することが多かった。今回のモードでは腹と節の間隔が近いいため、変形したのは中央のみとなったと考えられる。質量は 11g 増加し 449.3g に、振動数は 15000Hz になった。

(2) ドライバークラブ

次に、ドライバーのヘッドに最適化計算を行う。基本的な条件や方法は円筒モデルの時と同じである。初期の質量は 191.3g ある。

1 次モードは 4142Hz で、以下の図に示すように円筒の 1 次モードと似た、フェースが中央に腹があるモード形状である。設計領域について様々なパターンを検討したが、内側の全面等の広い範囲を指定した場合、計算エラーが頻発した。そこで、最低限の範囲として、内側のフェース部分とそれに付随する溶接部を指定した。目標値は 4500Hz とした。

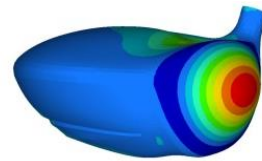


図 27 モード形状 4142Hz

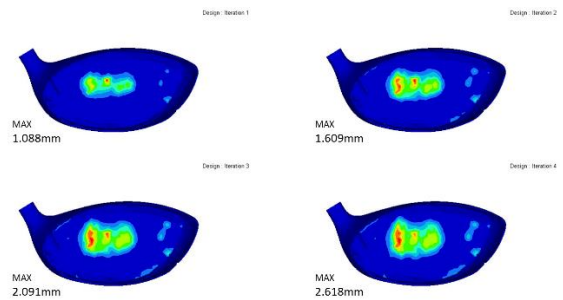


図 28 計算結果 4.1

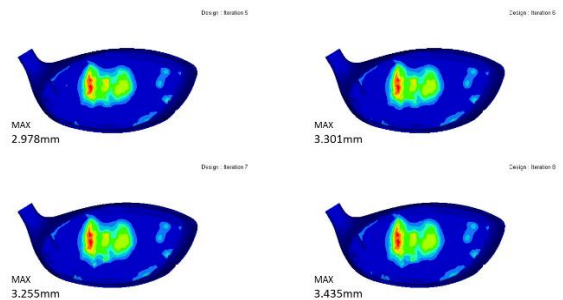


図 29 計算結果 4.2

繰り返し計算 8 回で収束した。円筒の結果と同じように、中央部のモードの腹付近が大きく変化していることがわかる。その中でも、円筒のように一箇所を頂点に変形するのではなく、山が 3 箇所に分かれて変形している。この原因は、フェースがきれいな円形ではないことと、初期形状の段階で、フェース中央が盛り上がっていることにあると考えられる。質量は 12.8g 増加し 204.1g に、振動数は 4490Hz になった。

次に 6108Hz のモードについて計算を行う。モード形状は以下の図のように、フェースの左右が交互に動くモードで、円筒で計算したものに似ている。目標値は 6500Hz に設定した。

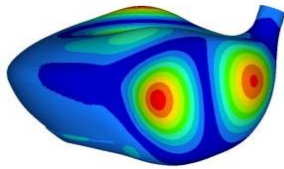


図 30 モード形状 6108Hz

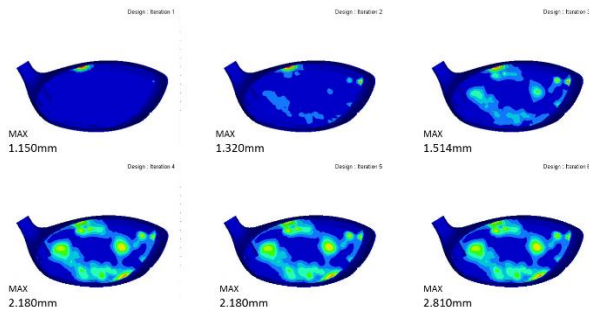


図 31 計算結果 5

今までの結果と比べると、変化した位置がまばらではあるが、やはりモードの腹付近では変化量がやや大きくなっていることがわかる。ただし、フェースの上端と下端付近でもやや大きく変化している。質量は 10g 増加し 201.3g に、振動数は 6525Hz になった。

6. 結論

1. 実打球音測定では、新たに無響室での実験環境の確保に成功し、以前よりも品質の良い打球音の測定が可能となった。打球時の打点位置を変えた結果、主なピークの大小関係に影響が出た。フェースの左右で打った時に、6000Hz のモードの腹付近が加振された事により、音圧が大きくなる傾向があった。この傾向は以前のハンマリング試験でインパルスハンマを用いて実験した時にも見られ、この傾向が打球時にも反映されることがわかった。打球時のスピードを変えた結果、スピードが増すごとに音圧が大きくなった。打球音と点加振による計算音を比較したところ、4000Hz 以下の低い周波数帯域において、音圧の差が大きいことがわかり、ここに実打と点加振の違いがあることがわかった。
2. 実打と点加振の相違点の中で、加振力と加振器について注目した。加振力を実打に近づけるため、大型のものに変更して加振実験を行ったところ、実打音に傾向が近づいた。その理由として、加振波形が変わったことが挙げられ、この加振波形が音の特性に大きく影響することがわかった。また、シミュレーションによる計算では加振力を入力するため、同様に実打音に近づくことが確認された。このことから、実際の打球に近い加振波形のハンマを使って加振実験を行い、その加振波形をプログラ

ムに入力することで、今より精度の高い打球音の予測ができるという可能性が高い。

3. ドライバーヘッドと円筒のモデルを対象に最適化計算を行った。いずれの対象においても、指定のモードの周波数を上げるときに、そのモードの腹の位置と節の一部の位置が集中的に厚さを増すことがわかった。最適化計算では制約条件が厳しくなればそれだけ変化量も大きくなり、エラーが発生する可能性も高くなるため、大規模な形状変更が一気にできるわけではない。設計変更の際の指針を決定するという目的のために使用するのが良いと考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、担当教授である御法川学教授、終始懇切丁寧に御指導を頂きました岩原光男助手に心より感謝致します。お忙しい中での岩原光男助手の御教授なしでは本研究の遂行は不可能でした。また、様々な製品を提供して頂いたミズノ(株)の寺西様、長尾様及び皆様に深く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) ROBERTS, J. r. , et. Al: Evaluation of impact sound on the 'feel' of a golf shot, Journal of Sound and Vibration, Vol. 287, No. 4-5, pp.651-666, 2005.
- 2) ROBERTS, J. r. , et. Al: Influence of sound and vibration from sports impacts on players' perceptions of equipment quality, Proc Inst Mech Eng, Vol. 220, No. 4, pp.215-227, 2006.
- 3) 長松昭男：モード解析入門，コロナ社，pp.113-121，1993
- 4) 鈴木浩平，他：機械工学のための振動・音響学，サイエンス社，pp.152-178，2002
- 5) 岩原光男：モード特性同定の性能向上に関する研究，東京工業大学博士論文，1996
- 6) 左貝潤一：光学の基礎，コロナ社，pp.128-197，1997
- 7) 岩原光男，他：ゴルフクラブ放射音の基礎的検討，日本機械学会機械力学・計測制御部門講演会論文集(CD-ROM)，Vol. 2004，No. 442，2004
- 8) 齊藤幸宏：ゴルフクラブにおける打球音シミュレーション，法政大学大学院工学研究科修士論文，2011
- 9) 榎本真宜：Hitting Sound Simulation of the Golf Club，法政大学計算科学研究センター，2007
- 10) 谷口大樹：ゴルフクラブにおける打球音シミュレーション，法政大学大学院工学研究科修士論文，2008
- 11) 久保田孝佑：ゴルフクラブ打球音のシミュレーション，法政大学大学院工学研究科修士論文，2012
- 12) 岩原光男，他：ゴルフクラブの打球音予測，スポーツ産業学研究，2011
- 13) MSC Software, MSC NASTRAN 2001 日本語オンラインマニュアル，2001
- 14) ALTAIR ENGINEERING, HYPERWORKS トレーニング 構造最適化，2013