

法政大学学術機関リポジトリ

HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2024-10-06

ゴルフクラブ打球音のシミュレーション

谷口, 大樹 / TANIGUCHI, Daiki

(発行年 / Year)

2009-03-24

(学位授与年月日 / Date of Granted)

2009-03-24

(学位名 / Degree Name)

修士(工学)

(学位授与機関 / Degree Grantor)

法政大学 (Hosei University)

2008年度 修士論文

ゴルフクラブにおける打球音シミュレーション

指導教員 長松 昭男 教授

岩原 光男 助手

法政大学大学院

工学研究科 機械工学専攻

07R1116 タニグチ 谷口 ダイキ 大樹

目次

第 1 章	緒論	3
1.1	研究背景	4
1.2	目的	4
1.3	本論文の構成	5
第 2 章	音響シミュレーションプログラム	6
2.1	計算理論	
2.1.1	表面速度	7
2.1.2	速度ポテンシャル	10
2.1.3	離散逆フーリエ変換	11
2.1.4	音響シミュレーションプログラム	13
2.2	音響シミュレーションプログラムによる計算手順	
2.2.1	計算方法	14
2.2.2	Calcmid での計算手順	14
2.2.3	Calcrep での計算手順	14
第 3 章	ドライバークラブの打球音の測定	15
3.1	緒論	16
3.2	屋内での仮想ボールを使用した打球音の測定	
3.2.1	実験方法	16
3.2.2	実験結果	18
3.3	屋外での実際の打球音の測定	
3.3.1	大学構内での測定	20
3.3.2	芝生グラウンドでの測定①	22
3.3.3	芝生グラウンドでの測定②	26
3.4	結論	31
第 4 章	音の響きを再現するためのモード減衰比の同定	32
4.1	緒論	33
4.2	シャフト付きドライバーのモード減衰比の同定	
4.2.1	支持条件	33

4.2.2	同定方法	34
4.2.3	実験結果	37
4.3	シャフト付きドライバーのモード形状の同定	
4.3.1	実験方法	38
4.3.2	実験結果	38
4.4	計算音と打球音の比較	41
4.5	結論	43
第5章	衝突実験装置を用いた加振波形の同定実験	45
5.1	緒論	46
5.2	実験装置の概要	
5.2.1	衝突実験装置	46
5.2.2	ピエゾフィルム	48
5.3	加振波形の同定方法	
5.3.1	マスターカーブの作成	49
5.3.2	衝突実験	50
5.4	同定結果	51
5.5	結論	54
第6章	音響シミュレーションプログラムの精度向上	55
6.1	緒論	56
6.2	平板を用いた音響シミュレーションプログラムの計算精度の確認	
6.2.1	平板の作成	56
6.2.2	表面速度による比較	58
6.2.3	音圧による比較	59
6.3	回折現象による回り込み音の影響	
6.3.1	回り込み音	61
6.3.2	実験結果	62
6.4	結論	63
第7章	結論	65
参考文献		67
謝辞		68

第 1 章 緒論

第1章 緒論

1.1 研究背景

現在、工業製品や構造物の設計開発の現場においては、市場ニーズの多様化による開発期間の短縮やコスト削減に対する要求が強くなっている。そのため、従来の試作の繰り返しによる手法から、有限要素法をはじめとする数値解析に基づく方法が広く用いられるようになってきた。数値解析をうまく利用し設計段階での仕様の決定が可能となれば、「時間短縮・コスト削減」の両方を成し遂げることが出来ることから、数値解析などのCAEツールを利用することが主流となっている。

解析対象としては、流体や応力、熱などが挙げられるが、その主要なものの一つとして振動・音響解析がある。振動や音響の解析は設計段階での製品の疲労破壊や騒音問題の対策など、非常に重要な役割を果たしている。また、近年は振動や音質に対し付加価値を求めることもあり、その重要性はますます強くなると考えられる。しかし、それらの解析には多大な時間や、計算処理能力の高いコンピュータが必要であり、本来の数値解析を行う目的の「時間短縮・コスト削減」とは相反することが起こってしまう。そのため、数値解析を利用するだけでなく、真に「時間短縮・コスト削減」を成し遂げられるCAEツールの開発が求められている。

近年のスポーツ用具開発においては、その技術力が勝敗を左右することもあり、非常に重要な要素となっている。また、それらを抑制するためにある規定を設けている種目もあり、そのうちの 하나가ゴルフクラブである。そのような種目においては、新たな付加価値が注目され、それによって他の製品との差別化を図らなければならなくなっている。付加価値としては、音や人体への影響の軽減などがあるが、特に音に付加価値を求めて製品開発を行う場合、製品から発生する音の音質が非常に重要になってくる。音質とは聞き手の感性によって決まる量であるため、音質評価と呼ばれる官能検査が行われている。最近の機械設計においては、CAE技術と官能検査を統合した音質向上を行うことで、構造設計と感性が融合することが求められている。

1.2 目的

ゴルフクラブの開発現場において特にドライバークラブにおいては、製品を開発する上での一番の目的として「より遠くへより正確に飛ばす」事に技術を注力して行われてきた。現在、目覚ましい技術の進化により、格段に飛距離性能が伸びた。これは、ドライバーヘッドの打球面がトランポリンのように弾んでボールを飛ばす、スプリング効果等に起因する。しかし、このようにドライバークラブの飛距離性能の向上が進むことにより、それと比例しゴルフの競技性が失われるという懸念も出てきている。そこでこれにより、全米オープン等を主催するUSGA（全米ゴルフ協会）では、1998年よりこのスプリング効果を制限する為、ドライバーヘッドの打球面の反発係数を0.83以下にするという数値制限を設けた。これをSLEルールと呼ぶ。このルールは、

ヨーロッパのプロツアーを主催するR&Aや国内でのツアーを主催するJGAにおいても2008年から適用され、ドライバークラブにおける飛距離性能による製品の差別化が困難になりつつある。

そこで、近年新たなドライバークラブの付加価値として、打球音の心地良さが注目されつつある。製品開発において、時間やコストを抑えつつ音質の良さを追及するには、設計段階で音を予測する方法が有効である。従って、本研究の目的は設計段階で心地良い音のするゴルフクラブを設計することである。

そこで本研究ではまず、2003年度、理論・実験モード解析手法、速度ポテンシャルの重ね合わせ理論を用いて放射音を予測する音響シミュレーションプログラムが作成された。そして2006年度までに、アイアンヘッドやドライバーヘッドと同じ材質を用いた中空管円筒にて、このプログラムの実用性を検証してきた。また、音が商品の付加価値を決めるドライバーヘッドにおいても、このプログラムの実用性を検証してきた。

本年度は、このプログラムのさらなる性能向上を目指し、シャフト部分のついたドライバークラブの実用性の検証やプログラムの精度の確認など、あらゆる角度から検証を行ってきた。その結果を以下に示す。

1.3 本論文の構成

本研究では、音響シミュレーションプログラムの実用性を実現するために、多角的に検証を行い、その結果をまとめたものが本論文である。

検討事項としては、

1. 音響シミュレーションプログラムで作成した音と比較するための、ドライバークラブの打球音に関する研究
2. 音の響き具合を再現するための、シャフト部分の付いたドライバークラブにおけるモード減衰比の研究
3. 音響シミュレーションプログラムの実用性を高めるための、衝突実験装置を用いた加振波形に関する研究
4. これまでに作成した音響シミュレーションプログラムのさらなる精度向上を目指した、プログラムの計算精度の確認及び音の回り込みに関する研究

の4項目にわたる。

本論文は、以上の4項目の研究及び本研究に用いた音響シミュレーションプログラムの説明、さらに結論の7章により構成される。それぞれの研究における、目的及び行った検証事項、結論はそれぞれの章においてまとめてある。

第2章 音響シミュレーションプログラム

第2章 音響シミュレーションプログラム

2.1 計算理論

2.1.1 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、一般的には表面の接点ほとんどの振動速度を算出し境界要素法で放射音を予測する方法が主流であるが、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必要になり、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

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

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

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

Ω_r , [M], [K]は固有値および固有ベクトルであるため、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次の式になる。

$$\begin{aligned}
 \{x\} &= \xi_1 \{\phi_1\} + \xi_2 \{\phi_2\} + \cdots + \xi_r \{\phi_r\} + \cdots + \xi_N \{\phi_N\} \\
 &= \sum_{r=1}^N \xi_r \{\phi_r\} \\
 &= [\{\phi_1\} \{\phi_1\} \cdots \{\phi_1\} \cdots \{\phi_1\}] \begin{Bmatrix} \xi_1 \\ \vdots \\ \xi_r \\ \vdots \\ \xi_N \end{Bmatrix} = [\phi] \{\xi\}
 \end{aligned} \tag{5}$$

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、

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

式(5)の添字 r を l 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、

$$\begin{aligned}
 \sum_{l=1}^N \{\phi_r\}^T [M] \{\phi_l\} \ddot{\xi}_l + \sum_{l=1}^N \{\phi_r\}^T [C] \{\phi_l\} \dot{\xi}_l + \sum_{l=1}^N \{\phi_r\}^T [K] \{\phi_l\} \xi_l \\
 = \{\phi_r\}^T \{f\}
 \end{aligned} \tag{7}$$

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

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

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。従って、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

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

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。

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

$\{\phi_r\}, \phi_{ri}$: 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

式(12)は点iに調和加振力が作用するときの全点(自由度)の応答を示す。このうち点1の応答だけを取り出して

$$x_j = X_i e^{j\omega t} \quad (13)$$

とおけば

$$X_i(\omega) = \left(\sum_{r=1}^N \frac{\Phi_{ri} \Phi_{ri}}{-m_r \omega^2 + j c_r \omega + k_r} \right) F_i \quad (14)$$

となる。この応答を速度に直すので、

$$\zeta_j = j\omega \times X_i e^{j\omega t} \quad (15)$$

より、次のような式になる。

$$\zeta_i(\omega) = j\omega \times \left(\sum_{r=1}^N \frac{\Phi_{ri} \Phi_{rl}}{-m_r \omega^2 + j c_r \omega + k_r} \right) F_i \quad (16)$$

ここまでの計算を Fortran でプログラム化し、一般的なコンピュータでも計算可能にした。また、ゴルフクラブの打球音可聴領域である 20kHz までの成分を含む実際の音を計算するのに十分しか要さないため、計算時間の短縮にも成功した。

2.1.2 速度ポテンシャル

図 2.1 のように、振動板上の微小面積 ds の部分が、振動速度

$$\dot{\zeta} = \dot{\zeta}_0 e^{j\omega t} \quad (17)$$

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、

$$A_0 = \dot{\zeta}_0 ds \quad (18)$$

と表される。したがってこの微小面積の振動による P 点での速度ポテンシャルは

$$d\Phi = \frac{\dot{\zeta}_0 ds}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (19)$$

となるから、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、

$$\Phi = \frac{1}{2\pi} \iint_S \frac{\dot{\zeta}_0}{r} e^{j(\omega t - kr)} ds \quad (20)$$

r : ds と点 P 間の距離

k : 波数, $2\pi/\text{波長}$

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \iint_S \frac{\dot{\zeta}_0}{r} e^{j(\omega t - kr)} dS \quad (21)$$

音圧 p は

$$p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (22)$$

ρ : 表面振動が伝わる空間の媒質の密度

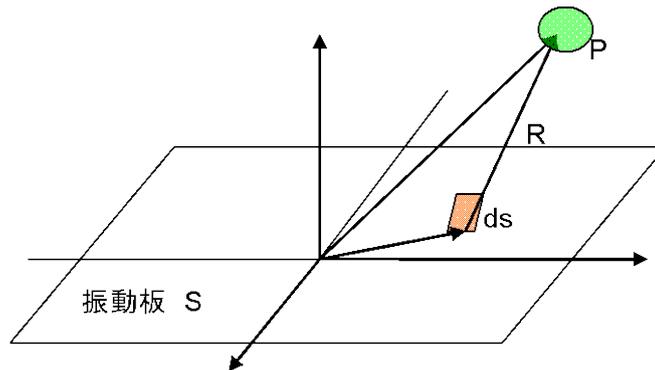


図 2.1 振動板の微小面積要素からの音の放射

上記に示した音圧の計算を、本稿のプログラムでは周波数領域にて行っている。プログラム上では式(10)～式(21)の $e^{j\omega t}$ を省略し、各振動数 ω を変数として計算を行っている。次に、実際に耳で聞く音を発生させるために、離散逆フーリエ変換を使用して周波数領域の信号を時間領域信号に変換する。離散逆フーリエ変換の式を次に示す。

2.1.3 離散逆フーリエ変換

連続時間歴波形 $x(t)$ を基本周期が標本化時間 T に一致する繰り返し波形と仮定し、標本化間隔 τ 毎に標本化された N 個の離散値によって表現されているとすると、この波は

$$x(t) = \sum_{i=0}^{N-1} X_i e^{j\omega t} \quad (23)$$

と表現され、ここで

$$\omega = 2\pi / T = 2\pi / (N\tau) \quad (24)$$

式(23)は離散データに適用する有限フーリエ級数であるから、 $t=0, \tau, 2\tau, \dots, k\tau, \dots, (N-1)\tau$ の N 個の飛び飛びの時刻にだけ成立する。そこで、 $x(k\tau) = x_k$ と書く。また、式(18)より

$$e^{-j\omega\tau} = e^{-j2\pi/N} = p \quad (25)$$

とおく. さらに, $\mathbf{x}(t)$ と $e^{j\omega t}$ のこれらの時刻 $t=k\tau$ ($k=0\sim N-1$) における値を縦に並べた列ベクトルを次のように定義する.

$$\{x\} = \begin{Bmatrix} x_0 \\ \vdots \\ x_k \\ \vdots \\ x_{N-1} \end{Bmatrix}, \{e_0\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{Bmatrix}, \dots, \{e_i\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ p^{-i} \\ \vdots \\ p^{-ki} \\ \vdots \\ p^{-(N-1)i} \end{Bmatrix}, \dots, \{e_{N-1}\} = \begin{Bmatrix} 1 \\ p^{-(N-1)} \\ \vdots \\ p^{-k(N-1)} \\ \vdots \\ p^{-(N-1)^2} \end{Bmatrix} \quad (26)$$

式(26)を用いて, 時刻 $t=k\tau$ ($k=0\sim N-1$) における式(17)を表現すると

$$\{x\} = \sum_{i=0}^{N-1} X_i \{e_i\} \quad (27)$$

式(27)の各項は, 式(24), (25)より

$$x_k = \sum_{i=0}^{N-1} X_i p^{-ki} = \sum_{i=0}^{N-1} X_i e^{j(2\pi/N)ki} \quad (k=0\sim N-1) \quad (28)$$

この式が, 周波数スペクトル離散値 X_i ($i=0\sim N-1$) がデータとして与えられたときに, 時間歴離散値 x_k ($k=0\sim N-1$) を求める式である.

上記で紹介した計算理論を基に, FORTRAN で作成された音響シミュレーションプログラムのフローチャートを次に示す. これは, 市販の有限要素法プログラム⁽¹⁾によって計算した固有値データをを用い, 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.

2.1.4 音響シミュレーションプログラム

下記に音響シミュレーションプログラムのフローチャートを示す。

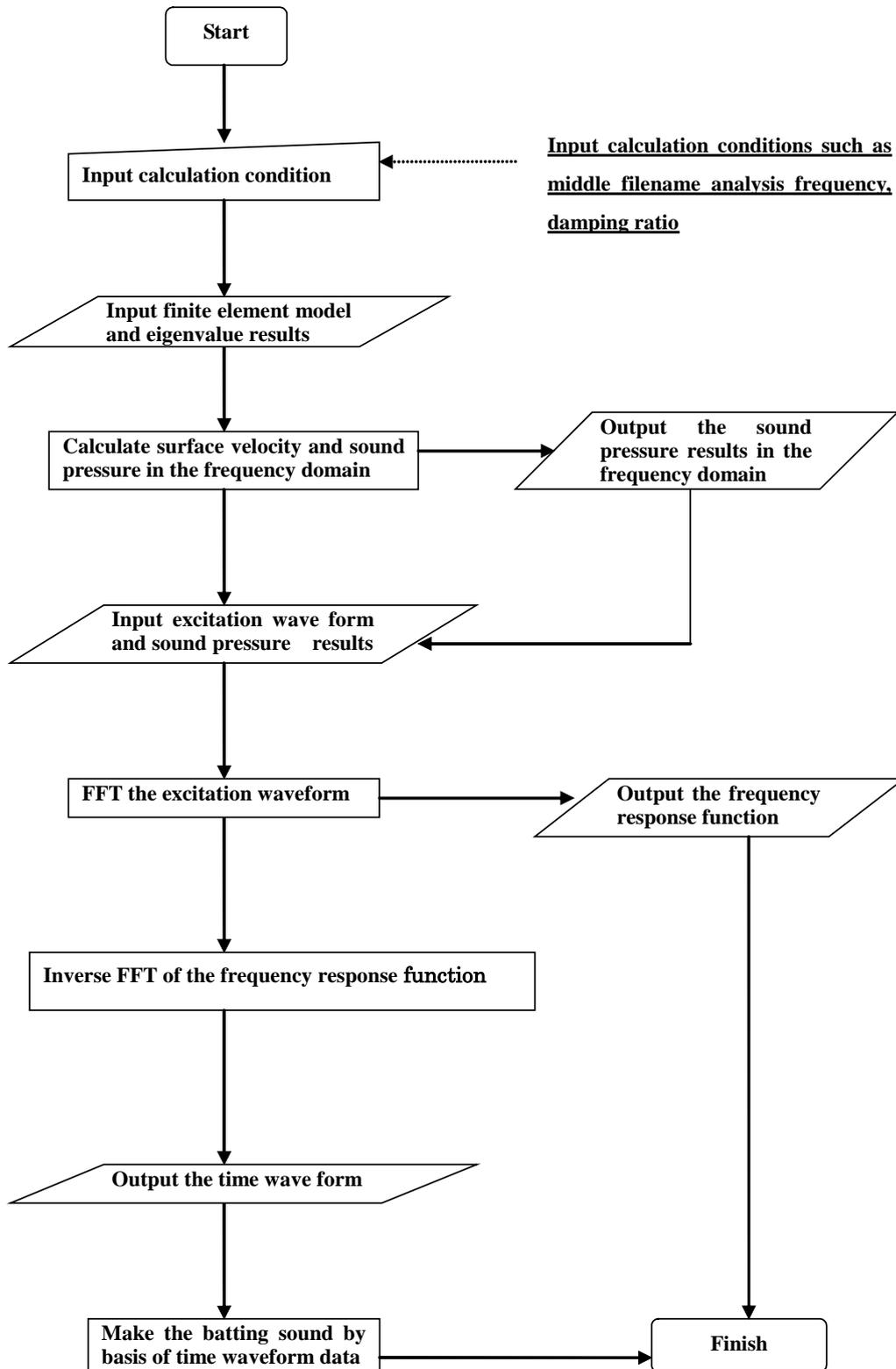


図 2.2 音響シミュレーションプログラムのフローチャート

2.2 音響シミュレーションプログラムによる計算手順

2.2.1 計算方法

音響シミュレーションプログラムは、calcmid と calcrep という二つのプログラムで構成しており、calcmid では加振波形を加えていない状態の周波数応答関数を計算おり、上記のフローチャートの calculate surface velocity and sound pressure in frequency domain までである。

calcrep ではその結果に加振波形を加えた周波数応答関数を計算、出力している。その後、得られた周波数応答関数を逆 FFT した時間波形の計算、出力を行なう。計算ではサンプリング周波数を 40000Hz、サンプリング点数を 16384 と設定している。下記に各々のプログラムにおける計算の手順を示す。

2.2.2 Calcmid での計算手順

1. まず計算条件を入力する。計算条件として、減衰比、加振点、聞く位置の座標、気温、解析周波数、形状 file 名、固有値 file 名、中間 file などを入力する。
2. 1 で指定した形状 file (.nas file) を読み込む。ここでは要素番号、接点番号、座標を読み込みプログラム上のメモリーに記憶させる。
3. 形状 file を読み込んだら、各要素の面積、聞く位置までの距離、方向余弦を計算する。
4. 次に固有値 file (.f06 file) を読み込む。
5. 各要素の表面速度、速度ポテンシャルを計算し、微分し音圧を計算する。
6. そして周波数応答関数として出力する。しかしここでは加振波形を加えていないので加えた力は、すべて 1 (Kgf) となっている。すなわち周波数 [Hz]、音圧 [Pa/Kgf] である。

2.2.3 Calcrep での計算手順

1. 計算条件として中間 file 名、加振波形 file を指定する。
2. Calcmid で出力された中間 file を読み込む。
3. 加振波形を読み込む。
4. 加振波形 FFT し中間 file とともに周波数応答関数を計算し、出力を行なう。
5. 計算した周波数応答関数を逆 FFT し時間波形を求め出力を行なう。

以上が音響シミュレーションプログラムの流れである。このように放射音を予測するにあたって、モード解析理論による表面速度のみの計算プログラムを作成したことや、表面振動から放射音を計算する際に速度ポテンシャル法を使うことにより、大幅な計算時間の短縮を可能にした。またそれに伴い計算量を減らすことが出来るため、計算処理能力が高くない一般的なコンピュータでも計算することが出来るため、大きなコストもかけずに放射音予測を可能にした。実際にゴルフクラブの打球音を予測するにあたって、有限要素モデルから打球音作成までに要する時間は、当研究室にある一般的なコンピュータで 1 時間程度である。

第3章 ドライバークラブの打球音の測定

第3章 ドライバークラブの打球音の測定

3.1 緒論

本章では、ドライバークラブの打球音を実際に測定し、音響シミュレーションプログラムで作成した打球音の精度を高めることを目的として行った。これまでは、音響シミュレーションプログラムで予測しやすいように、インパルスハンマで打撃した音で比較検討を行ってきた。その結果 金属で打撃した甲高い音についての音響シミュレーションプログラムの実用性を確認することが出来た。しかし、実際のゴルフクラブの打球音は、ボールを打撃した音である。そこで、まずは屋内において、図 3.2 に示す仮想ボールで打撃した際の打球音の再現を目指した。次に、周りに反射の影響が少ない広い芝生のグラウンドにてドライバークラブでボールを打撃し、実際にボールを打撃した打球音を測定した。

3.2 屋内での仮想ボールを使用した打球音の測定

3.2.1 実験方法

計算方法において、有限要素モデルはドライバーのヘッド部分のみのものを用いる。その有限要素モデルに対し固有値解析を行い、固有振動数及び固有モード形状を算出する。固有値解析には MSC NASTRAN を使用した。モード減衰比に関しては計算による算出が不可能なため、ドライバーヘッドのモード減衰比を実験より同定する。理論的に算出した固有振動数、固有モード形状そして実験より同定したモード減衰比を音響シミュレーションプログラムへと入力し、計算音の作成を行う。

実験においては、実際の打球音を再現するためドライバーのヘッド部ではなくシャフト付きのドライバーを使用する。ドライバーはミズノ社製の JPX E310 を使用した。実験に使用したドライバーを以下の図 3.1 に示す。



図 3.1 JPX E310

ドライバーを手持ち支持状態としドライバーの打球面を打撃加振する。打撃加振には、棒の先にゴルフボールが付いた物を使用する。これを、以下仮想ボールと呼ぶ。そして打撃した際に発生する音圧をマイクロフォンにて測定する。以上の実験器具を図3.2に示す。



図 3.2 実験器具

この実験条件に合わせて、音響シミュレーションプログラムの計算によりドライバーの打球面から発生する音を予測する。そして実験で収録した音と比較を行う。比較するまでの流れを図3.3に示す。音の比較については実際に耳で聞いて双方を比較する。そしてそれぞれの音をグラフ化し、グラフでの比較も行う。以上の手法より音響シミュレーションプログラムの放射音予測精度を確認しドライバーの打球音予測について検討を行う。

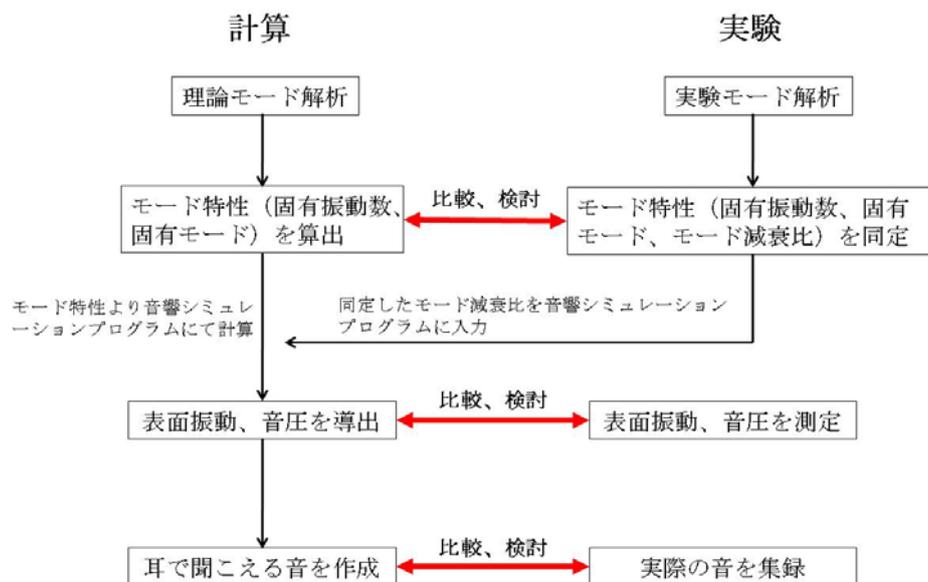


図 3.3 検討手法の流れ

実験は大学構内の静かな場所にて行った。実験風景を図 3.4 に示す。



図 3.4 屋内実験の風景

図 3.4 のようにドライバーのグリップ部を握り、実際に手で持った状態で打球面を仮想ボールにて打撃加振する。これは実際の打球音と同じ条件を想定し音圧測定を行うことを目的としたため、自由支持状態ではなく手持ち支持状態として実験を行った。またマイクロフォンは打球面から法線方向に 0.2 [m] 離れた位置に設置し測定した。

3.2.2 実験結果

実験で録音した音と音響シミュレーションプログラムによる計算音を比較したグラフを図 3.5 に示す。

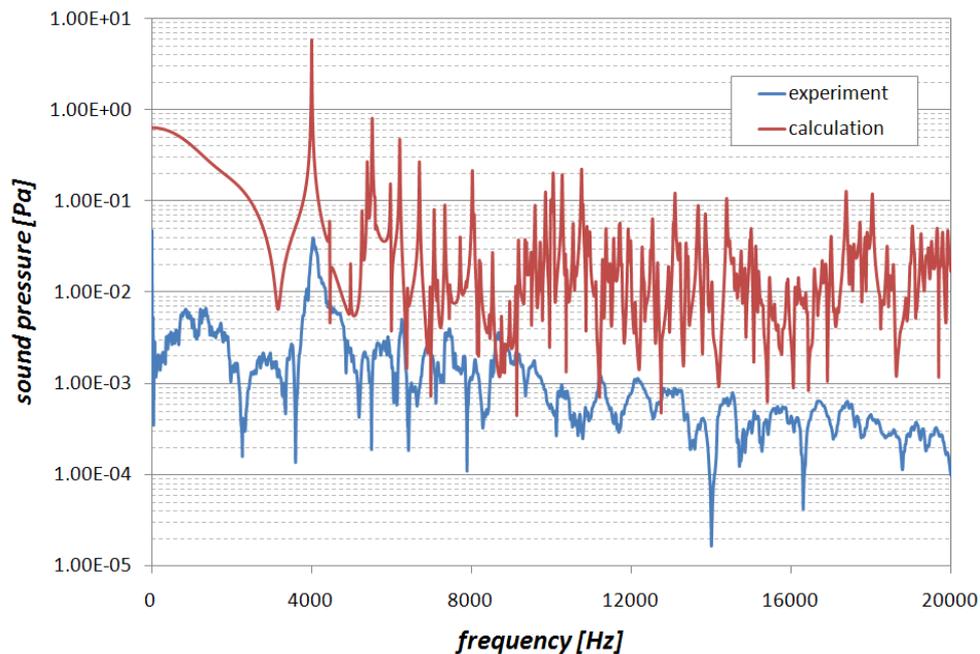


図 3.5 屋内実験の音圧比較

グラフは横軸が周波数 [Hz]，縦軸が音圧 [Pa] を示している。紺色が実験で録音した音のグラフ，そして赤色が計算音のグラフである。尚，計算音の作成には，JPX E310 のヘッド部の形状データに実験で同定したモード減衰比を入力した。また，音源からの測定位置を実験と同様に 0.2 [m] 離れた地点と設定し，実験で録音した音を再現するように試みた計算音である。しかしグラフより実験値と計算値を比較すると，計算音の音圧が実験値よりも大きな値となっている。この原因としては，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入力した加振波形に原因があると考えられる。音響シミュレーションプログラムで作成される計算音は，実験で打撃加振した際の加振波形を入力することで，実験で発生した音を再現している。しかし，実験で使用した仮想ボールでは打撃加振した際の加振波形を測定することができない。そのため代わりとして，ドライバーをヘッドスピード 45 [m/s] でスイングした際の理想的な加振波形を音響シミュレーションプログラムに入力して計算音の作成を行った。入力した加振波形を図 3.6 に示す。

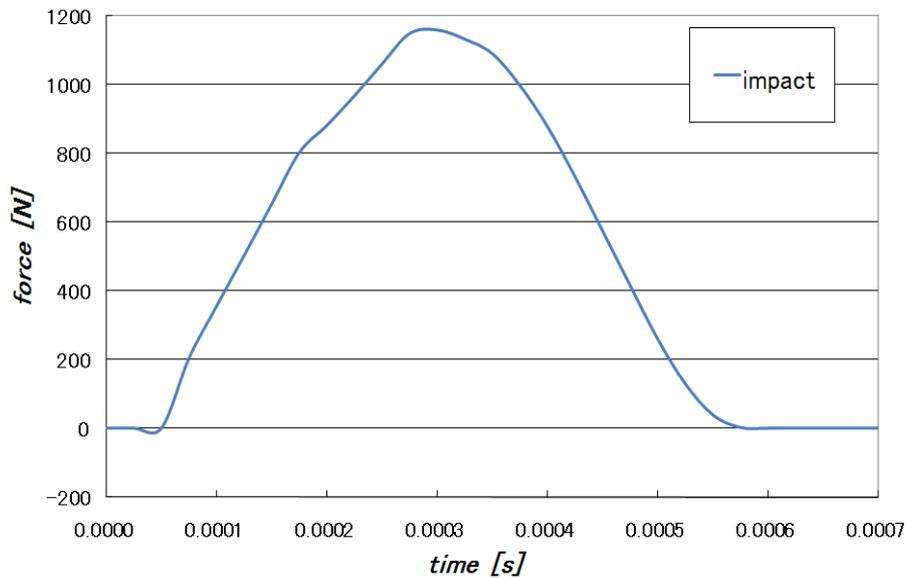


図 3.6 加振力波形

この加振波形が実験での加振波形と大きく異なっているため、計算値が実験値より著しく大きな値となったと考えられる。しかし、実験値と計算値を比較すると、共通して 4000Hz 付近に 1 次の固有振動数が見られる。その点で比較的精度良く、音響シミュレーションプログラムの計算音は仮想ボールで打撃加振した際の音を再現できていると考えられる。

実際に実験で録音した音と計算音を聞き比べてみると、響きという点で実験の音は計算音に至らなかった。これは音響シミュレーションプログラムに入力しているのがドライバーのヘッド部分のみのデータであることに対し、実験で使用したドライバーにシャフトが付いていることが原因であると考えられる。行った実験に対して計算の入力条件が異なることが、実験値と比べて計算値に差を与えた要因として考えられる。

3.3 屋外での実際の打球音の測定

3.3.1 大学構内での測定

3.2 で示した加振波形の違いをなくすために、実際にドライバーでゴルフボールを打った際の打球音をマイクロフォンで録音し、音響シミュレーションプログラムで作成した計算音との比較を行った。この実験により実際の打球音を測定することで、音響シミュレーションプログラムで作成する打球音の最終目標となる音の測定に試みる。

実験には硬さの異なる 2 種類のゴルフボールを使用した。使用したゴルフボールを図 3.7 に示す。



図 3.7 CROSS EIGHT T301

実験にはミズノ社製の CROSS EIGHT S301 と CROSS EIGHT T301 を使用した。CROSS EIGHT T301 の方が CROSS EIGHT S301 に比べて硬いボールである。

実験は屋内ではゴルフクラブを振り上げられる広い場所がないため、大学内の比較的広い場所にゲージとネットを設置し行った。打球音の測定にはマイクロフォンを使用し、音源から 0.2 [m] 離れた地点に設置した。プレーヤーはゴルフ経験者をお願いした。実験風景を図 3.8 に示す。



図 3.8 実験風景

実験で録音した打球音と音響シミュレーションプログラムにより求めた計算音の比較を図 3.9 に示す。

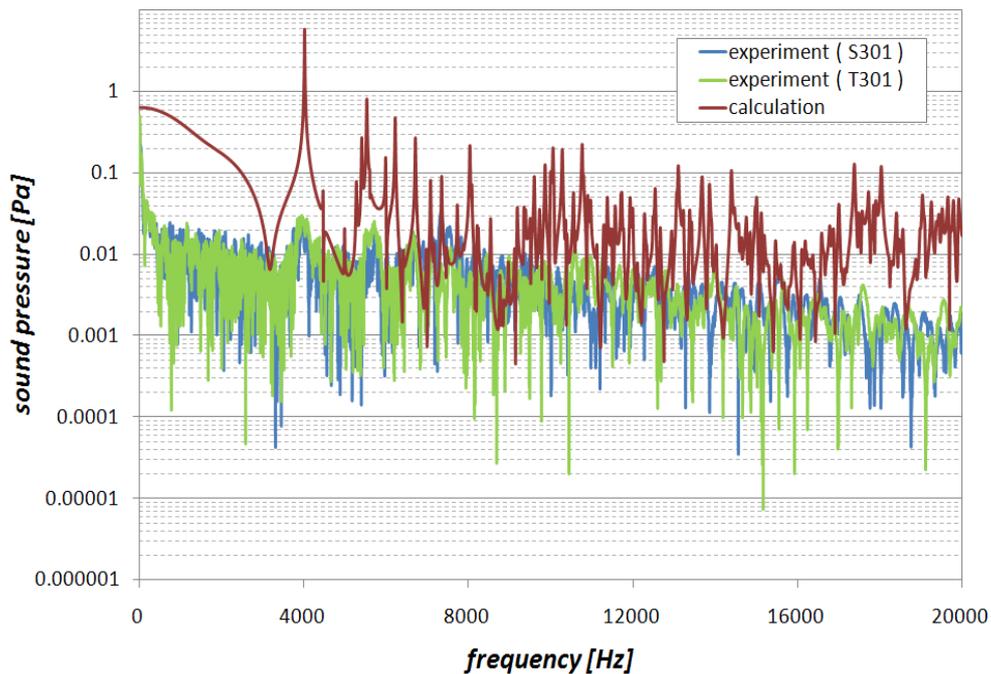


図 3.9 打球音と計算音の比較

グラフは横軸が周波数 [Hz]、縦軸が音圧 [Pa] を示している。青色が CROSS EIGHT S301 の打球音、緑色が CROSS EIGHT T301 の打球音のグラフ、そして赤色が計算音のグラフを示している。計算音の作成には JPX E310 のヘッド部の形状データ、同定したモード減衰比を入力した。また、音源からの測定位置を実験と同様に 0.2 [m] 離れた地点と設定し実験で録音した打球音を再現するように試みた計算音である。しかし、打球音と計算音のグラフを比較すると、音圧、減衰ともに大きく異なっている。また、実際に音を聞き比べてみても双方の違いは明確であった。計算音はドライバーヘッドを打撃加振したような音が聞こえた。しかし打球音に関しては実際によく聞くドライバーの打球音とは異なり、反響音や空気の割れるような音が大きく聞こえた。この原因としては、実験環境に問題があると考えられる。今回実験を行った場所について、まず地面がコンクリートであること、そして周囲に構造物があることにより、打球音と同時にその反響音が強く混入してしまったと考えられる。また録音した打球音を聞くとドライバーをスイングする際の風切り音も混入している。

3.3.2 芝生グラウンドでの測定①

3.3.1 よりマイクロフォンの位置を再検討し、また周囲に音が反射する構造物のない実験環境を整えて屋外での実験を再施行した。その実験風景を図 3.10 に示す。



図 3.10 実験風景

実験は法政大学小金井キャンパス緑町グラウンドにて行った。地面がコンクリートでなく芝生であり、また周囲に構造物も無い。測定にはマイクロフォンを使用し、マイクロフォンの位置はプレーヤーから反対に 0.5 [m] 離し、高さ 1.35 [m] の地点に設置した。これはドライバーをスイングした際の風切り音が混入することを極力防ぐようにするためである。また、実際に打球音を聞き取るプレーヤーの耳の位置から 180° 対称の位置を想定してマイクロフォンを設置した。

実験を行う前に暗騒音と素振りの音を録音した。結果を図 3.11, 3.12 に示す。

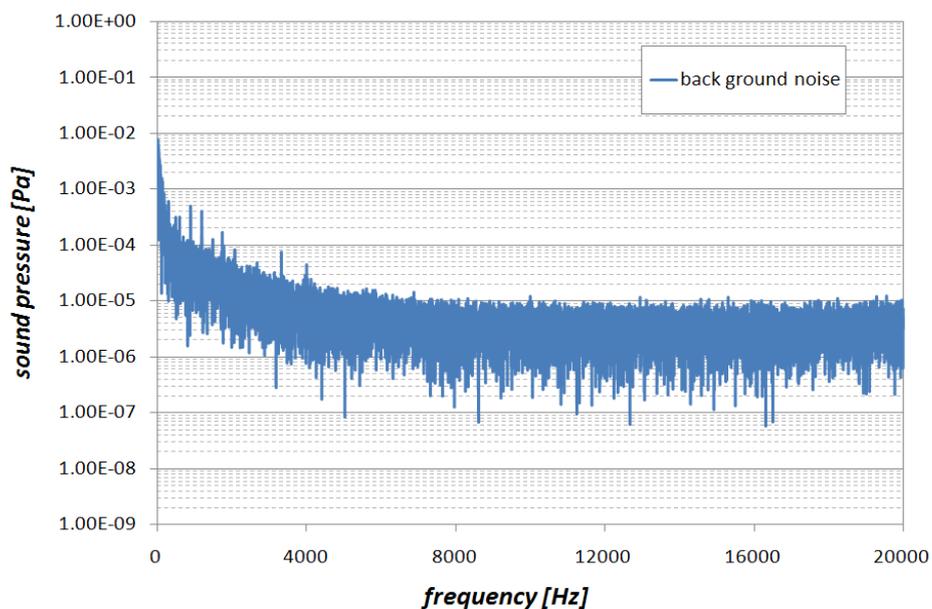


図 3.11 暗騒音

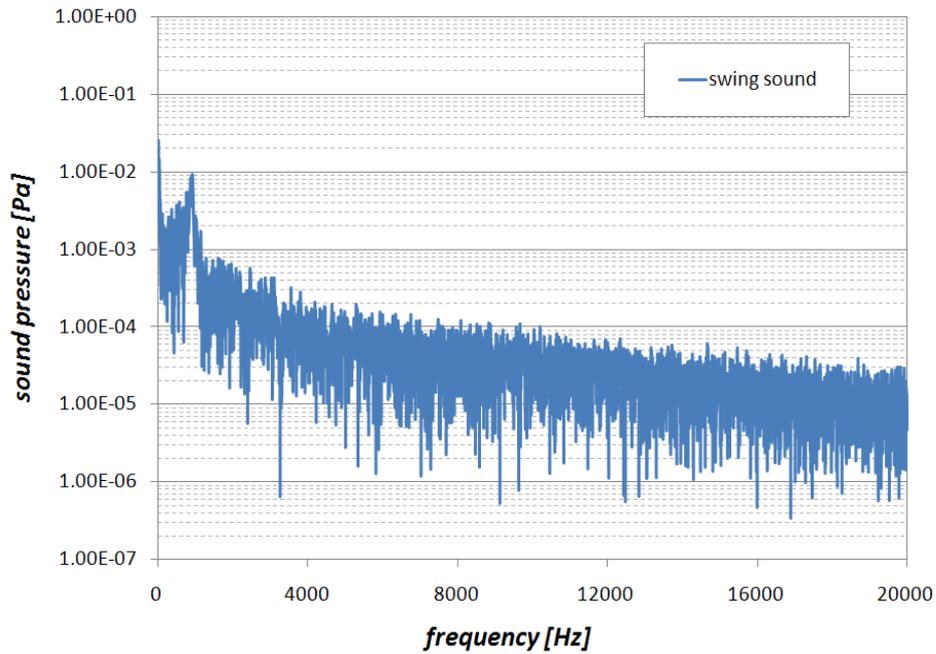


図 3.12 素振りの風切り音

以上の雑音を確認した．素振りの風切り音においては850 [Hz] 付近でピークを確認した．打球音と計算音の比較を図 3.13 に示す．3.2 と同様に，ボールは2種類で行った．

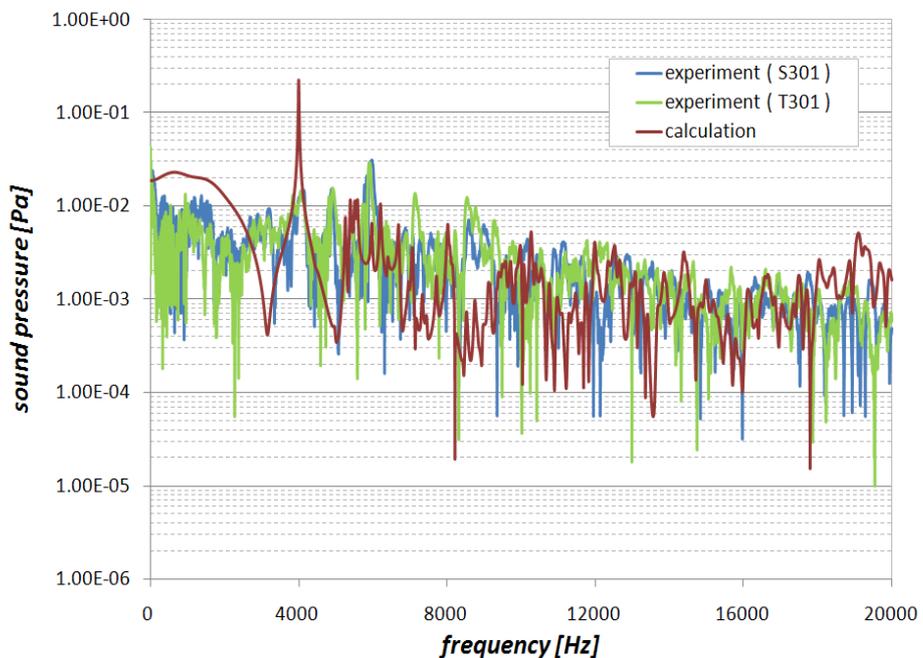


図 3.13 打球音と計算音の比較

グラフは横軸が周波数 [Hz] , 縦軸が音圧 [Pa] を示している. 青色が CROSS EIGHT S301 の打球音, 緑色が CROSS EIGHT T301 の打球音のグラフ, そして赤色が計算音のグラフを示している.

実験環境を整えたことで打球音のグラフのピークがはっきりと現れるようになった. 実際に録音した打球音を聞いてみると, 打球音が地面から反響する音も消えていた. マイクロフォンを音源から遠ざけることでドライバーをスイングする際の風切り音も軽減されていた. よって実験環境を整えることで, 正確な打球音を録音することに成功したと考えられる. しかし, 打球音と計算音のグラフを比較すると, 打球音では 6,000 [Hz] 付近にて最大のピークが現れていることに対して, 計算音では 4,000 [Hz] 付近のピークが最大となっている. そのため, 打球音の録音には成功したが音響シミュレーションプログラムを用いて打球音を再現することには失敗した.

打球音の再現に失敗したことについて原因を解明するために, JPX E310 のヘッド部分を用いて実験モード解析を行い, 最大のピークが現れていた 6,000 [Hz] 付近の固有モード形状を確認する.

実験モード解析で同定した 6,000 [Hz] 付近の固有モード形状を図 3.14 に示す.

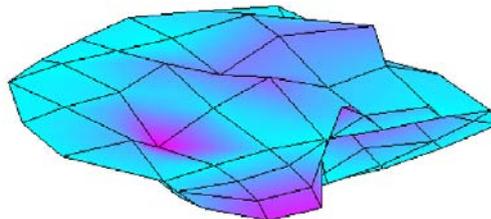


図 3.14 実験モード解析により同定した 6,000 [Hz] 付近の固有モード形状

同様に計算モード解析を行い, 固有モード形状を確認した. 確認した固有モード形状を図 3.15 に示す.

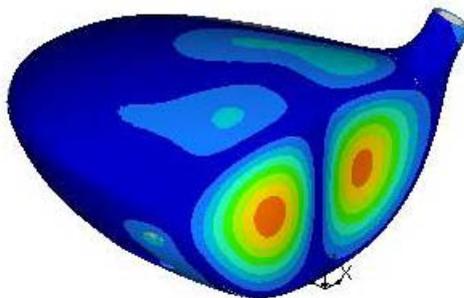


図 3.15 計算モード解析により求めた 6,000 [Hz] 付近の固有モード形状

また、計算音において最大であった4,000 [Hz] の固有モード形状も確認した。実験モード解析で同定した4,000 [Hz] 付近の固有モード形状と計算モード解析で求めた固有モード形状を以下の図3.16, 3.17に示す。

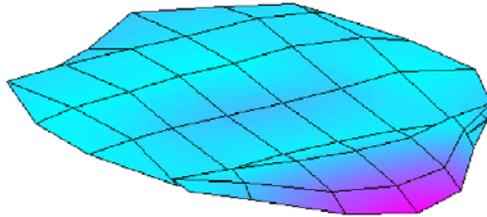


図 3.16 実験モード解析により同定した4,000 [Hz] 付近の固有モード形状

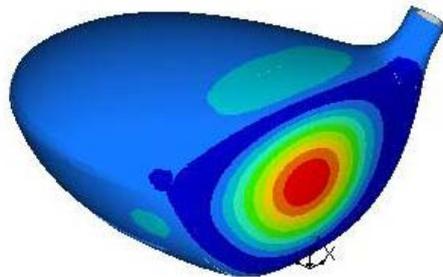


図 3.17 計算モード解析により求めた4,000 [Hz] 付近の固有モード形状

以上の結果より、ドライバーヘッドの6,000 [Hz] 付近のモード形状は、打球面に2つの腹ができるモード形状であることを確認した。一方で4,000 [Hz] 付近のモード形状は、打球面の中心が腹となるモード形状を示している。打球面の中心を加振した場合に現れるモード形状は4,000 [Hz] 付近のモード形状である。そのため打球音で6,000 [Hz] が強く現れていたことに関しては、実験でボールを打つときに打球面の中心ではなく、6,000 [Hz] のモード形状で現れている腹付近の中心部から左右に外れたところでボールを捉えていたのではないかと考えられる。

3.3.3 芝生グラウンドでの測定②

3.3.2より実験を再実行し、録音した音の中で打球面の中心でボールを捉えたときの音を採用し計算音との比較を行うことにした。ボールを打ったときに打球面の中心でボールを捉えたかを判断する方法としてチョークを使用し、ゴルフボールに色を塗りつぶし実験を行った。ボール

に色を塗りつぶすことによって、打球面に残った跡を確認し打球面の中心でボールを捉えていたか判断する。

実験は法政大学小金井キャンパス緑町グラウンドにて行った。ドライバーは JPX E310, ゴルフボールは CROSS EIGHT S301 と CROSS EIGHT T301 を使用した。音圧測定に使用したマイクロフォンはプレーヤーと反対に 0.8 [m] 離し, 高さ 1.6 [m] の地点に設置した。これはプレーヤーの耳と対称の位置である。実験後のドライバーの打球面に残されたチョークの跡を図 3.18, 3.19 に示す。



図 3.18 CROSS EIGHT S301 を打ったときに残されたチョーク跡



図 3.19 CROSS EIGHT T301 を打ったときに残されたチョーク跡

以上より、チョークを用いることで打点を確認することができた。図 3.19 のように、中心部でボールを捉えたときの打球音と音響シミュレーションプログラムの計算音を比較する。結果を図 3.20 に示す。

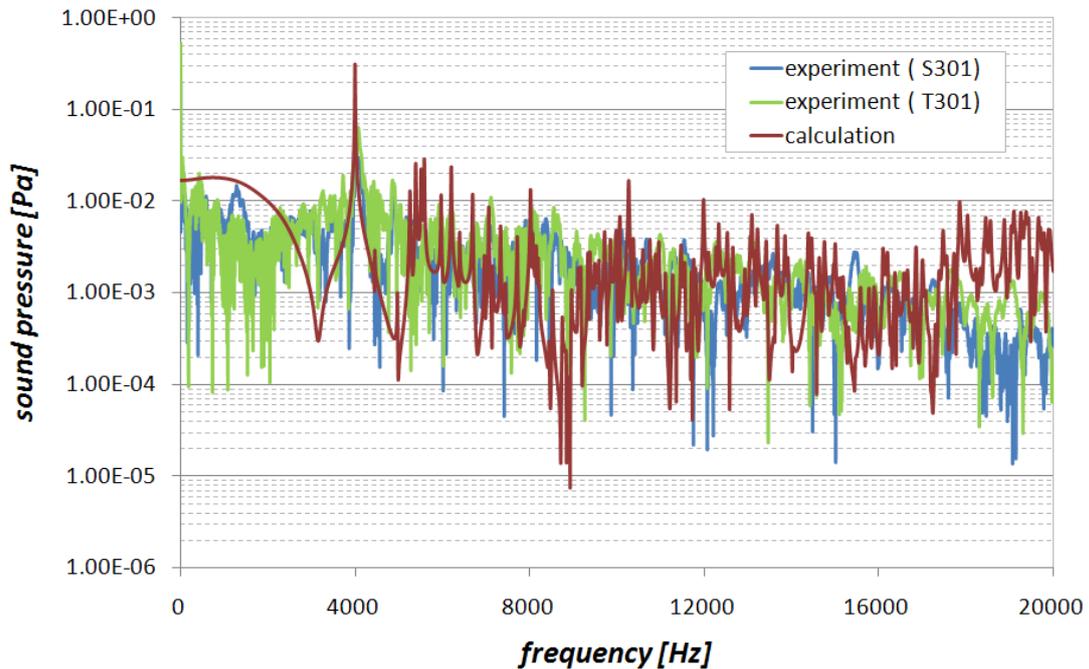


図 3.20 打球音と計算音の比較

グラフは横軸が周波数 [Hz]，縦軸が音圧 [Pa] を示している。青色が CROSS EIGHT S301 の打球音，緑色が CROSS EIGHT T301 の打球音のグラフ，そして赤色が計算音のグラフを示している。グラフより打球音と計算音に 4,000 [Hz] 付近において最も大きなピークが現れ，また固有振動数も一致していることがわかる。ピーク値は一致していないが，実際に音を聞き比べると計算音に比べ打球音は響きが足りないことがわかる。これは仮想ボールの打撃加振実験と同様に，計算音を作成する際に音響シミュレーションプログラム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，実験で使用しているドライバーにはシャフトが付いていることが原因であると考えられる。しかし音の高さという点に注目すると打球音と計算音は似ていた。2つの打球音を比べると，硬いボールである CROSS EIGHT T301 の打球音の方が高い音であり，計算音に似ているように思える。ボールの硬さによる打球音の違いを検討するべく，グラフの 4,000 [Hz] 付近に注目した。以下の図 3.21 に 3,500 [Hz] から 4,500 [Hz] までの音圧のグラフを示す。

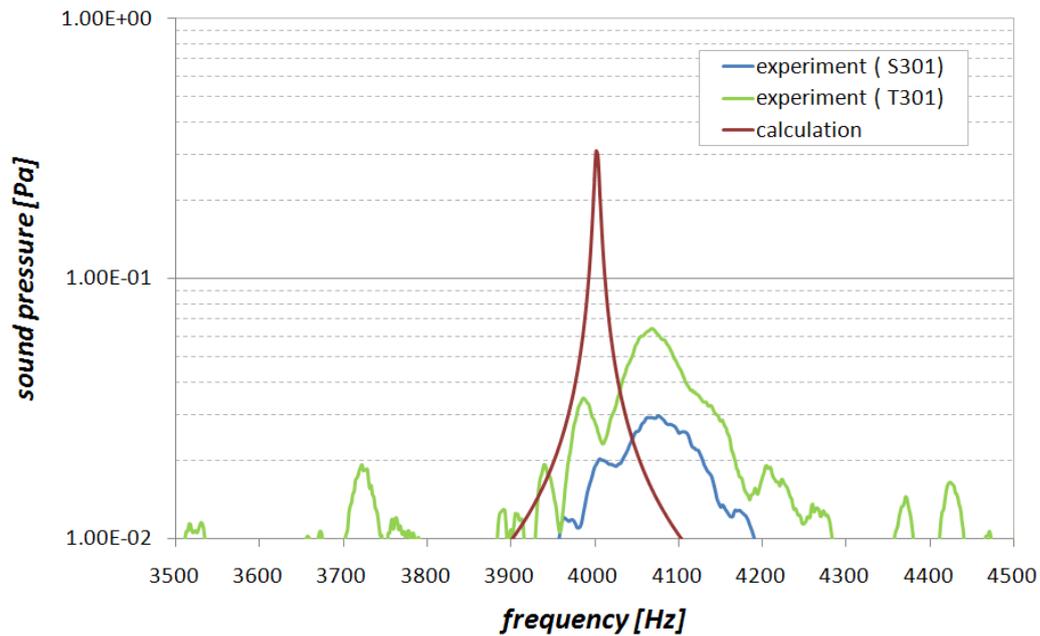


図 3.21 打球音と計算音の 4000Hz 付近における比較

グラフより、CROSS EIGHT T301 の打球音の方がピーク値は大きく、計算値に近づいていることがわかる。これは計算音を作成する際に有限要素モデルと同時に入力する加振点に原因があると考えられる。入力する加振点を図 3.22 に示す。

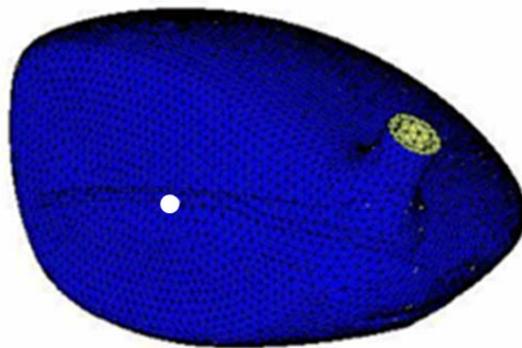


図 3.22 加振点

有限要素モデルの打球面の中心に白い点が記されている。音響シミュレーションプログラムでは、このような微小な点を加振するという条件を与えて計算音を作成する。一方でゴルフボールは実際に打球面との衝突時に弾性変形している。このゴルフボールの変形については高速度ビデオカメラを用いて打球時の撮影を行い確認した。CROSS EIGHT S301, CROSS EIGHT T301 の打球時の変形の様子を図 3.23, 3.24 に示す。



図 3.23 CROSS EIGHT S301 の弾性変形



図 3.24 CROSS EIGHT T301 の弾性変形

2つの図より打球時のゴルフボールの弾性変形が確認できる。そして硬いゴルフボールの方が打球面と接触する面積が狭くなっていることがわかり、そのため音響シミュレーションプログラムの計算条件に近づく結果と一致する。そのため硬いゴルフボールである CROSS EIGHT T301 の打球音の方が CROSS EIGHT S301 の打球音に比べ、音が似ていると考えられる。

以上より、音響シミュレーションプログラムの放射音予測における精度の良さを確認できたが、それと同時に課題点も明確になった。まず、実験を行う環境について問題があると考えられる。本来であれば音圧の測定は無響室にて行うことが望ましいが、そのような施設が大学内にはないため、屋外でしか行うことができない。そのため雑音が混入することはやむを得ないが、実験環境を試行錯誤した結果、打球音の測定としては許容範囲内の雑音に抑えることに成功したと考えられる。次に音の響き具合の違いに関しては、シャフトが大きな影響を与えていると考えられる。これまで有限要素モデルやモード減衰比に関しては、シャフトの影響を考慮しておらず、今後有限要素モデルの再構築や、シャフトの付いた状態でドライバーのモード減衰比を同定する必要があることがわかった。また、実験では打球面に与える加振力の値を測定することができないため、

正確な値を音響シミュレーションプログラムに入力することができていないことが挙げられる。さらに打球時にはゴルフボールは弾性変形をしているため、打球面との間に、計算音を作成する際に入力する加振点よりも遥かに広い面積で衝突している。衝突しているときの加振力と面積については、圧力が分布していることが考えられるため、詳しく検討する必要があると考えられる。このように様々な問題を解決することで、より精度良くドライバーの打球音を予測できると考えられる。

3.4 結論

1. 仮想ボールを用いてドライバーの打球面を打撃加振し、その際に発生する音を録音した。しかし計算と実験の加振波形の違いにより、精度良く再現できたとはいえなかった。
2. 実際の打球音の測定には芝生グラウンドのように、地面や周囲の反射を極力防がなければならぬことがわかった。またマイクロフォンの位置もこれまでのように出来るだけ近づけるのではなく、プレーヤーの耳の位置に近い場所とした方が雑音を防げることを秋ラマにした。
3. 打球面の中心から左右に外れたところでボールを捉えたときの打球音は6,000 [Hz] 付近のピークが最も大きく現れ、打球面の中心でボールを捉えたときの打球音は4,000 [Hz] 付近のピークが最も大きく現れることがわかった。これは6,000 [Hz] 付近のモードではフェース部に2つの腹を持つモード形状であるのに対し、4,000 [Hz] 付近のモードではフェース部に1つの腹を持つモード形状であることに起因する。
4. 硬いボールの打球音の方が、軟らかいボールの打球音に比べて計算音に近い音であった。これは計算音を作成する際に入力する加振点が微小面積であるために、打球面との衝突時に弾性変形が小さく衝突面積が狭くなる硬いボールの方が計算音に近くなることがわかった。
5. 実験で録音した音と計算音を比較すると響きに差が見られた。これは計算音の作成にはドライバーのヘッド部分のみの形状データを入力していることに対して、実験ではシャフト付きのドライバーを使用したため、モード減衰比の値などにシャフト部分が影響を与えたと考えられる。

第 4 章 音の響きを再現するための モード減衰比の同定

第4章 音の響きを再現するためのモード減衰比の同定

4.1 緒論

本章では、これまでに見つかった課題点の一つである音の響き具合の再現を目指す。音響シミュレーションプログラムによりゴルフドライバーの打球音を作成する際に、音の響きとしてモード減衰比を入力する。これまでは、音の発生の主要因であるドライバーヘッド部のみのモード減衰比で再現可能であると判断し、それを入力してきた。しかし、第3章において行った屋外での打球音の測定により、ヘッド部のみのモード減衰比では実際の打球音を再現するには限界があると結論付けられた。そこで本章では、シャフトの付いた状態のゴルフドライバーのモード減衰比を同定する。そして同定したモード減衰比を音響シミュレーションプログラムに入力し、実際の打球音と計算音をグラフ・音で比較し、より精度の高い打球音の作成を目指す。

4.2 シャフト付きドライバーのモード減衰比の同定

4.2.1 支持条件

実験は、シャフト付きのドライバーをスポンジで固定して行う。ドライバーは第3章で用いた jpxe-310 を使用する。支持方法に関しては、ドライバー本体のモード減衰比を同定するため自由支持状態で行った。自由支持状態を作成するにあたって、軽量の紐で吊るした状態やスポンジで固定した状態で実験を行ったが、以下に示す通り、本実験はレーザードップラー振動計を用いて応答を測定するため、測定する方向以外に振動しない状態で行う必要がある。また、フェース部の表面振動が音に大きく影響を与えるため、フェース部を地面に垂直にする必要がある。そのため、軽量の紐で吊るした状態では加振した際のドライバーの揺れが大きく、精度良く測定することは不可能であった。そこで本実験では、スポンジに乗せた状態で実験を行った。以下の図 4.1 にスポンジ支持の風景を示す。

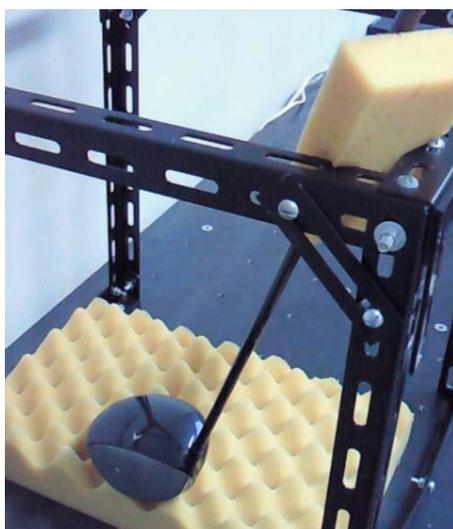


図 4.1 スポンジ支持

4.2.2 同定方法

モード特性の同定方法は、インパルスハンマ・レーザードップラー振動計・FFTアナライザを使用した実験モード解析による。以下の表 4.1 に実験器具の詳細を、図 4.2 に実験器具の写真を示す。一般的に応答の測定には、加速度ピックアップなどの対象に接着させる計測器を用いるが、ゴルフクラブのような高周波・軽量なものを測定する場合は、レーザードップラー効果を利用し速度を測定するようなレーザードップラー振動計などの非接着型計測器の方が精度良く測定できることを昨年示した。^[6] また、レーザードップラー振動計は高精度な測定を行えるため、インパルスハンマによるインパクト加振の精度向上も求められる。そこで、当研究室では精度良いインパクト加振を行うため、インパルスハンマを固定する治具を作成した。それを図 4.3 に示す。

表 4.1 実験器具の詳細

名称	メーカー	型式
インパルス・ハンマ	PCB PIEZO TRONICS	084A14
レーザードップラー振動計	小野測器	LV-1720
FFTアナライザ	RION	SA-01
モード解析用シームレスソフト	CATEC	CAT-System



インパルスハンマ



FFTアナライザ



レーザードップラー振動計

図 4.2 実験器具



図 4.3 インパルスハンマを固定する治具

上記の支持状態，実験器具にて実験モード解析を行う．一連の流れを図 4.4 に示す．

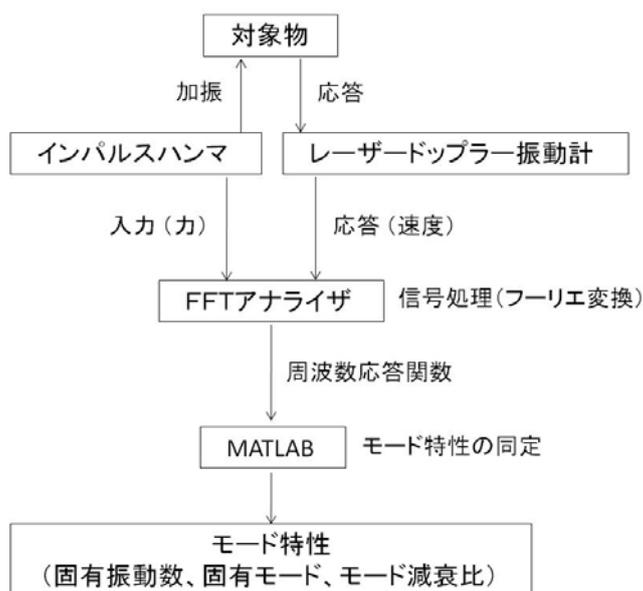


図 4.4 実験モード解析の流れ

なお，測定したデータからモード特性を同定するにあたっては，予め偏分反復法や非線形最適化法¹⁾を用いて周波数応答関数からモード特性を同定するプログラムをプログラミング言語であるMATLABにより作成してあり，これを使って同定を行う．このプログラムの妥当性の検討として，以下の図 4.5 に同定結果と実験結果を比較する．

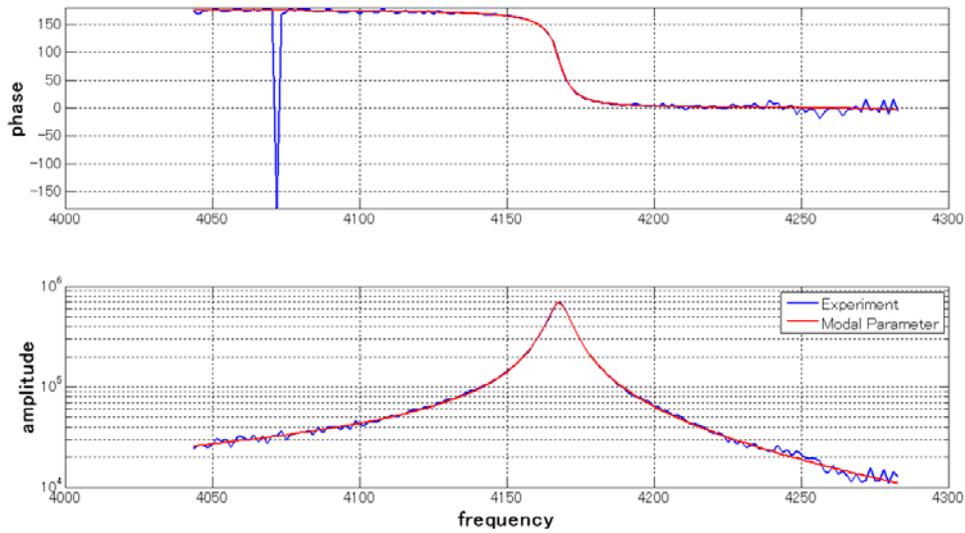


図 4.5 MATLABによる同定結果

上記グラフは、実際の実験データと MATLAB により同定したモード特性により理論的に描いたグラフである。上が位相、下が振幅のボード線図となっている。青い線が実験データ、赤い線が同定したデータである。両者を比較すると、精度良くモード特性を同定できていることがわかる。

以下の図 4.6 に加振点・応答点を示す。加振点はドライバーのスウィートスポットにし、応答点は発生する音の主要因であるフェース部で且つ各モード特性が出るよう、中心から少し外側にずらした点とする。また、モード減衰比の同定は誤差が生じやすく、一定の値をとることは困難である。そのため、各実験を 5 回繰り返し行うことで、それらの傾向を把握する。

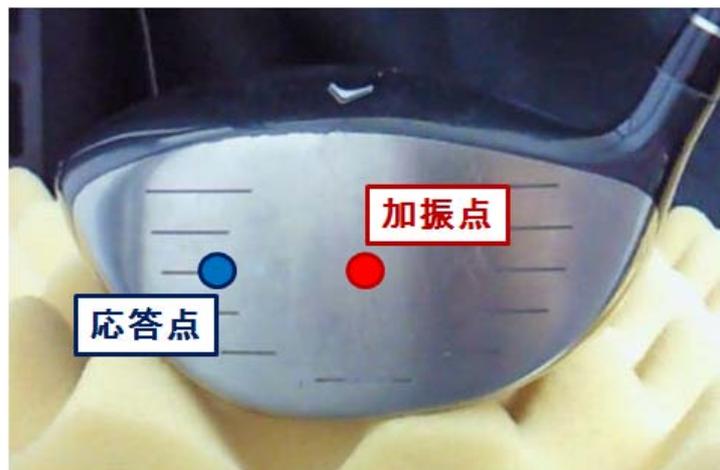


図 4.6 加振点と応答点

4.2.3 実験結果

上記の支持条件・同定方法による実験結果を図4.7に示す。

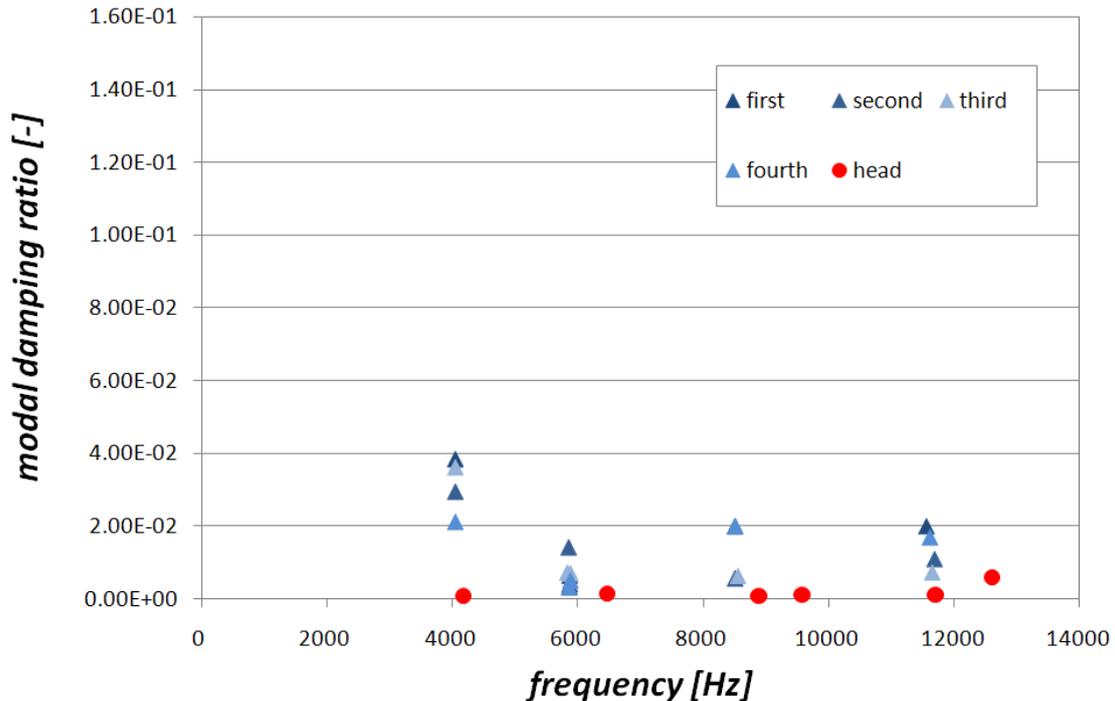


図4.7 各モードにおける固有振動数に対するモード減衰比

グラフは横軸が周波数 [Hz], 縦軸がモード減衰比 [-]を示している。赤の丸いマークがヘッド部のみの値, 青の三角マークの first から fourth までがシャフト付きドライバーの値である。ヘッド部のみは6次まで, シャフト付きは4次までの各モードにおける固有振動数 [Hz]とモード減衰比 [-]をプロットしたグラフである。

まず, シャフト付きの値のばらつきを見ると多少誤差は生じているが, 最大で 0.017 [-]と非常に微小であり, モード減衰比の値としては許容範囲内であると判断する。次にシャフト付きとヘッド部のみで比較すると, 各モードにおいてモード減衰比の値がヘッド部のみよりシャフト付きの方が大きくなっていることがわかる。特に1次モードでは, ヘッド部のみとシャフト付きのモード減衰比の最大差が 0.038 となった。このことにより, シャフトはドライバーのモード減衰比に影響を与えていると考えられる。また, モード減衰比だけでなく固有振動数で比較すると, 各モードにおいてシャフト付きの方が低くなっている。その他にも, ヘッド部では 9,000[Hz]と 12,000[Hz]付近に2つのモードが見られたが, シャフト付きでは見られなかった。この原因としては, ドライバーのモード形状が1次と2次のモードではフェース部のみが主に振動するモード形状であるのに対し, 3次以降の高周波領域のモードではシャフト部を含むクラウン部が大きく振動するモード形状であることが挙げられる。以上より, ドライバーにシャフトを付けると

モード減衰比と固有振動数が変化することがわかり、またモード形状にも影響を与えることが予想されるため、シャフト付きドライバーについてもモード形状を確認する必要があると考えられる。

4.3 シャフト付きドライバーのモード形状の同定

4.3.1 実験方法

実験は、4.2と同様の実験モード解析によって行った。ただし本実験ではモード形状を同定することを目標としているため、4.2のように加振点を1点のみとるのではなく複数点加振する必要がある。以下の図4.8に加振点・応答点を示す。

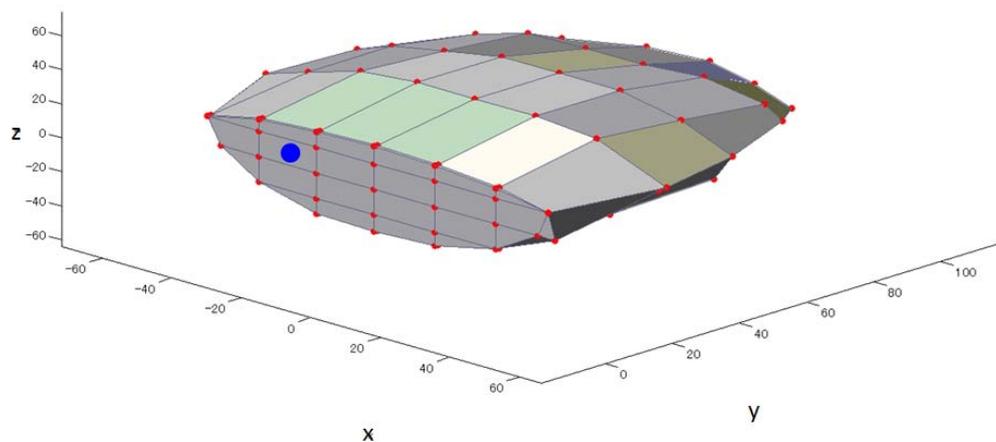


図 4.8 加振点と応答点

上記の図の赤い点を加振点、青い点を応答点とする。シャフト付きのドライバーに対して実験モード解析を行うが、シャフト部まで加振点とすると全体のモードが変化してしまうため、実際に加振するのはヘッド部のみである。モード形状を詳細に同定するため、ヘッド部全体の85箇所に加振点を取り、フェース部のスイートスポットから少しずらした場所を応答点とした。

支持条件は4.2と同様にスポンジで固定した状態で行う。ただし、本実験はヘッド部全体を加振する必要があるため、ソール部を加振する際はドライバーを逆さまにして行った。この支持方法の変更に関しては、加振点と応答点をフェース部とし支持条件を変えて行った実験比較により、影響は出ないことを確認している。

4.3.2 実験結果

以下の図4.9に、実験により得たドライバーのモード形状を示す。まず、固有振動数の違いが少ない4,000 [Hz]、6,000 [Hz]、8,500 [Hz]、12,000 [Hz] 付近のモード形状を示す。左がヘッド部のみ、右がシャフト付きとする。

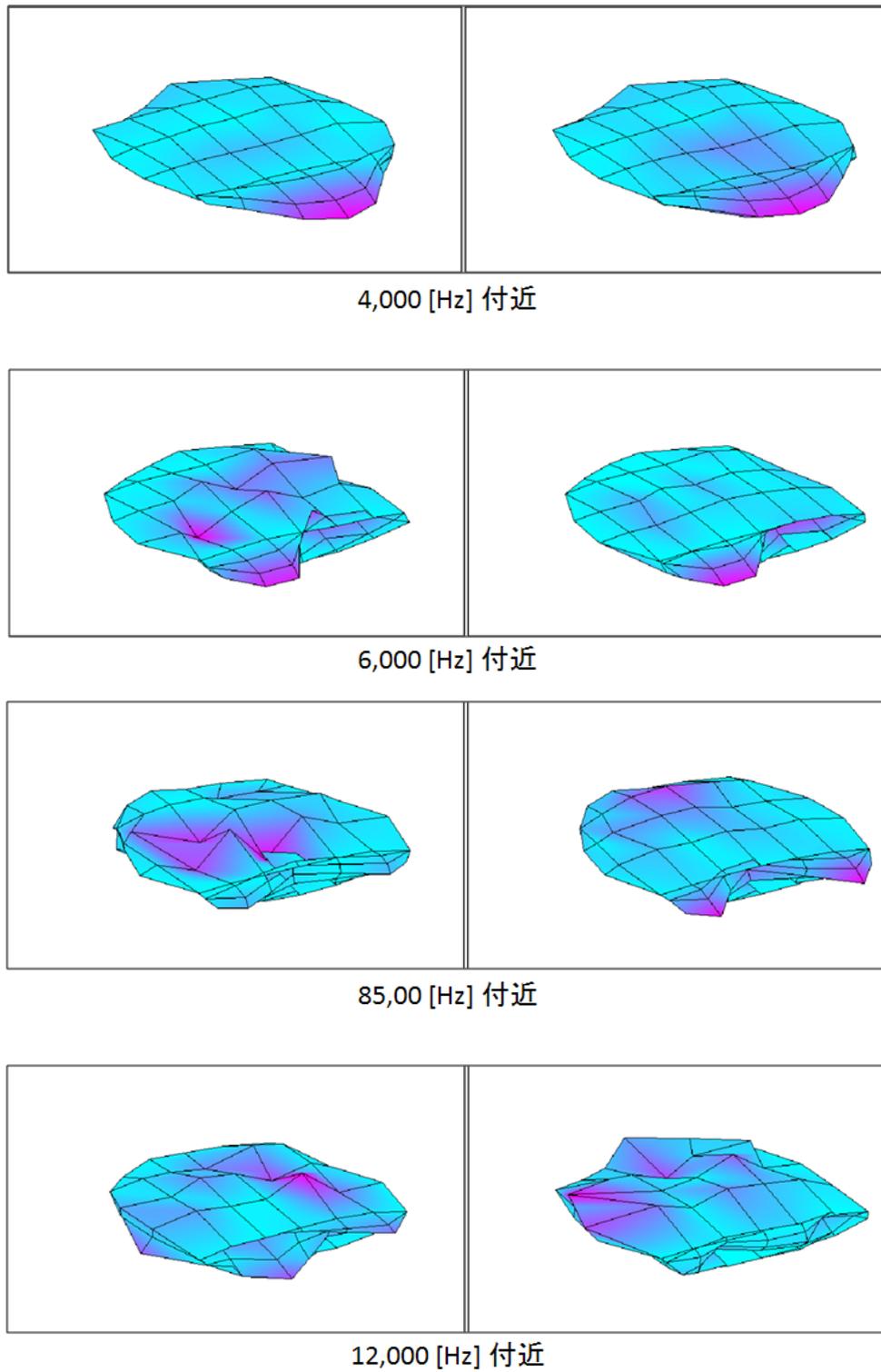
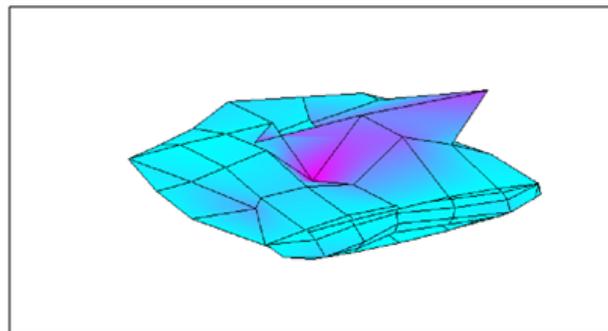


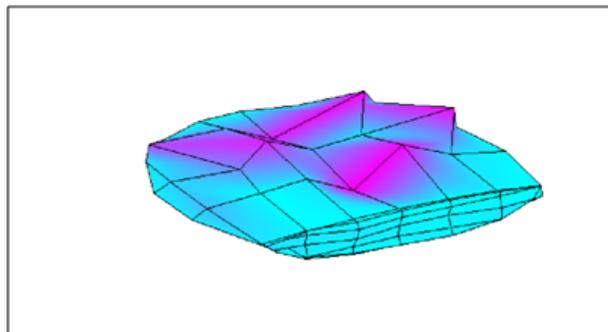
図 4.9 固有振動数の違いが少ないモード形状

ヘッド部とシャフト付きのモード形状を比較すると、多少の振幅の違いは見受けられるが、固有振動数の近いモードでは、同様のモード形状を示していることがわかる。また各モード形状を見ると、それぞれシャフト部はあまり動いておらず、フェース部の動きが特徴的なモード形状であることがわかる。このことから、以上の4つのモードではシャフト部の影響を受けにくいモード形状であるため、固有振動数が近い値となったと考えられる。

次に、シャフト付きでは現れなかった9,500 [Hz]と12,500 [Hz]のヘッド部のみのモード形状を図4.10に示す。



95,00 [Hz] 付近



125,00 [Hz] 付近

図 4.10 シャフト付きでは現れなかったヘッド部のみのモード形状

以上の2つのモード形状を見ると、図4.9のようにフェース部が主に動くモード形状ではなく、シャフト部の動きが大きくなるモード形状であることがわかる。つまり、シャフト付きのドライバーでは、この周波数帯ではシャフトにより荷重が加わり振動が強く抑えられ、これらのモードが現れなかったと考えられる。

以上の結果より、ヘッド部とシャフト付きのドライバーでは全体的にモード減衰比の値が異なり、またモードによってはシャフトの影響で消えてしまうものがあることがわかった。そのため、音響シミュレーションプログラムにモード減衰比を入力する際には、これまでのヘッド部のモード減衰比ではなく、シャフト付きの状態で同定したモード減衰比を入力する必要がある。また、音響シミュレーションプログラムではヘッド部のみの有限要素モデルをもとに計算音を作成し

ているため、消えるモードに関して通常のモード減衰比の何倍もの値を入力するなどの考慮をしなければならない。

4.4 計算音と打球音の比較

4.2で同定したシャフト付きドライバーのモード減衰比を音響シミュレーションプログラムに入力し、計算音を作成する。その計算音と打球音をモビリティ・音圧にて比較・検討することで、計算音の音の響きという点での精度向上を確認する。比較対象の打球音は、第3章で測定した実際の打球音では加振波形などの不確定要素が多いため、モード減衰比によって計算音が精度良くなったのかが判断し辛い。そこで本章では、シャフト付きドライバーを糸で吊るした自由支持状態において、インパルスハンマによってスイートスポットを加振した際の打球音と比較・検討する。音の測定はマイクロフォンを使用し、学内の比較的静かな場所で行った。図4.11に実験風景を示す。



図 4.11 実験風景

実験結果を図 4.12, 4.13 に示す。

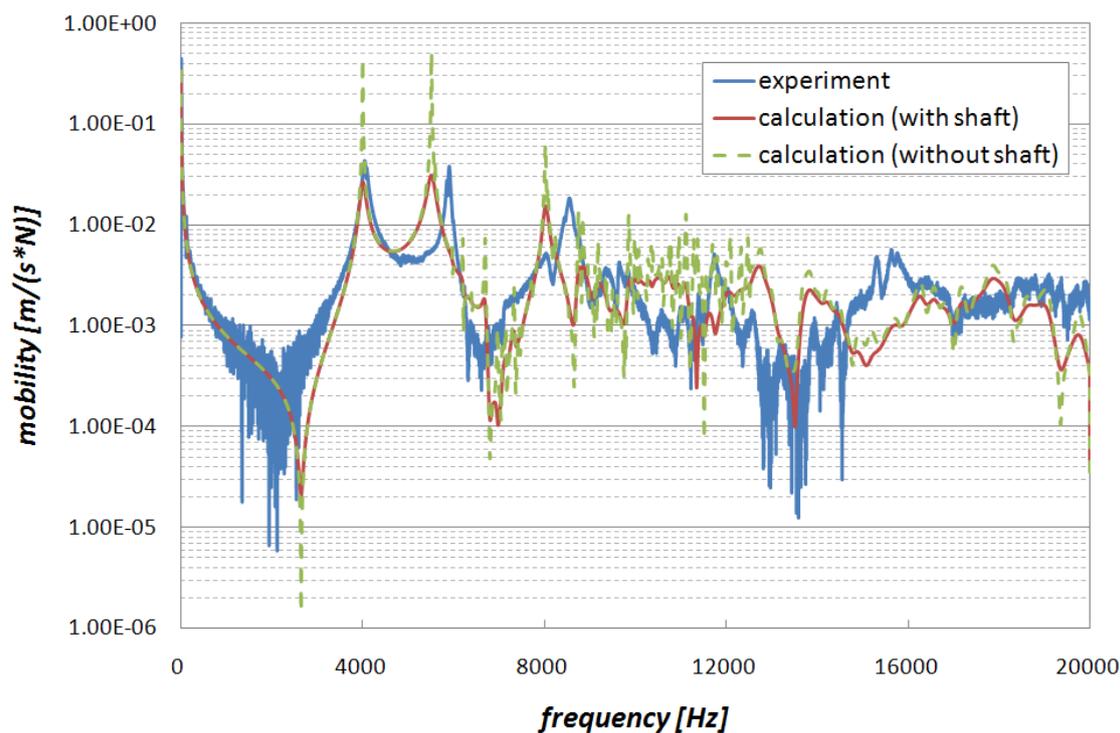


図 4.12 モビリティによる比較

図 4.12 のグラフは、シャフト付きの実験データと音響シミュレーションプログラムにシャフト付きとヘッド部のみのモード減衰比をそれぞれ入力し作成した計算音の比較グラフである。横軸が周波数 [Hz]、縦軸が計算過程で使うモビリティ $[m/(s*N)]$ とする。青い線が実験データ、赤い線がシャフト付きのモード減衰比を入力した計算音、緑色の破線がヘッド部のみで同定したモード減衰比を入力した計算音である。音響シミュレーションプログラムに入力するモード減衰比の値を変更すると、ピークの高さに影響を与える。つまり、ヘッド部からシャフト付きに変更する場合、モード減衰比が大きくなるためピークの高さが低くなる。実験データとそれぞれを比較すると、モビリティにおいてはピークの高さが近づくため、より精度のよい計算音を作成できることがわかる。また高周波領域に関しては、実験データは近い周波数のピーク同士が重なり大きな一つのピークとなることがわかる。その点に関しても、音響シミュレーションプログラムに大きなモード減衰比を入力することで再現できていることがわかる。

次に、このモビリティのデータを基に作成した音圧データの比較グラフを図 4.13 に示す。

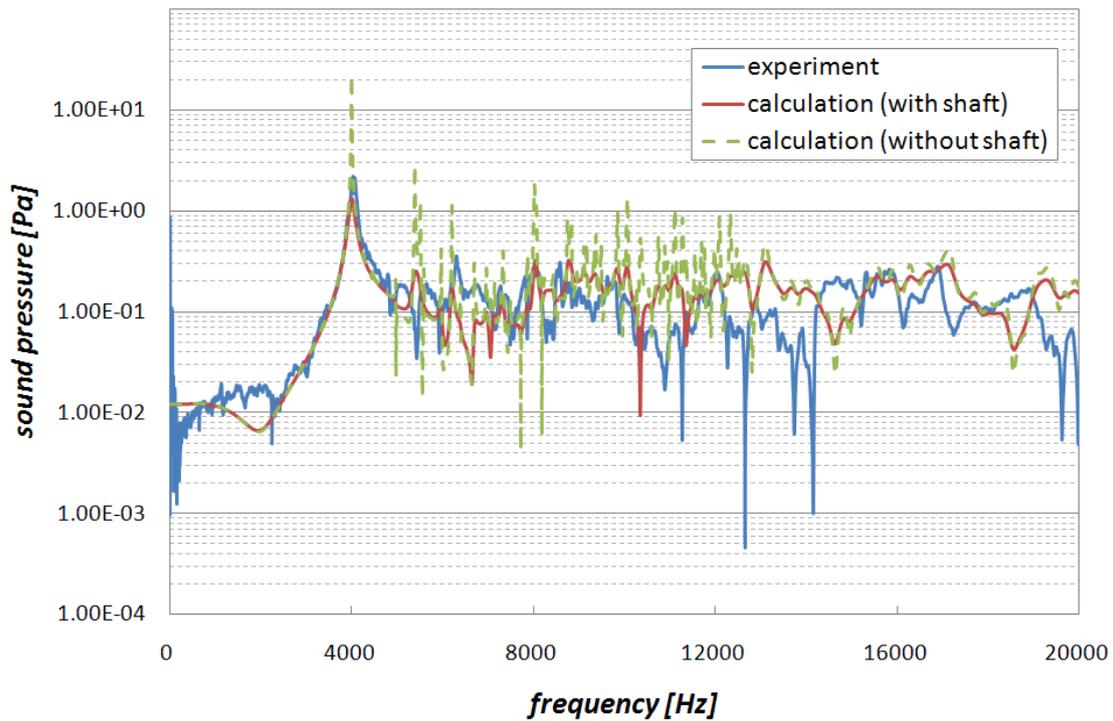


図 4.13 音圧による比較

グラフを比較すると、図 4.13 と同様にモード減衰比をシャフト付きの値にすると、ピークの高さに関して大幅に実験値に近づくことがわかる。またモビリティでも見られたように、高周波領域においてピークの山が重なり実験値と同様な傾向になっていることがわかる。またこの音圧データを基に wave ファイルを作成し実際の音で比較すると、音の高さの面でシャフト付きのモード減衰比を入力した方が近づくことを確認した。

4.4 結論

1. ゴルフクラブのヘッド部のみのモード減衰比とシャフト付きのドライバーのモード減衰比の同定を行った。それらを比較することで、シャフト付きドライバーのモード減衰比の値の方が大きくなり、音の響き具合にはシャフト部の影響が出ることを明らかにした。
2. シャフト付きのドライバーのモード減衰比を同定する過程で、シャフト部は固有振動数に対しても影響を与えることがわかった。
3. 実験モード解析により、シャフト付きのドライバーのモード形状を同定した。ヘッド部とシャフト付きのモード形状を比較すると、固有振動数の近いモードでは同一のモード形状であることがわかった。そしてシャフト付きでは現れなかった 9,500 [Hz] と 12,500 [Hz] のヘッド部のみのモード形状をみると、シャフト部の動きが大きくなるモード形状であり、その結果この周波数帯ではシャフトにより振動が強く抑制されモードが現れなかったこと

を明らかにした。

4. 本章で同定したシャフト付きドライバーのモード減衰比を音響シミュレーションプログラムに適用し、計算音を作成した。計算過程のモビリティと音圧で計算値と実験値を比較すると、ヘッド部のみのモード減衰比を入力した計算値よりもシャフト付きのモード減衰比を入力した方が双方で実験値に近づくことがわかった。これにより計算音も実際の音に響き具合に関して近づけることに成功した。

第 5 章 衝突実験装置を用いた 加振波形の同定実験

第 5 章 衝突実験装置を用いた加振波形の同定実験

5.1 緒論

第 2 章の音響シミュレーションプログラムによる計算手順で示した通り、計算音を作成する上で加振波形を入力する必要がある。加振波形とはドライバーを打撃する力 [N] を時間軸で示したものであり、当研究ではインパルスハンマで加振する波形と実際の打球時の波形を使用する。インパルスハンマで加振する波形に関しては、インパルスハンマの性質上得ることは簡単であるが、それに対し実際の打球時の波形を得ることは困難とされてきた。そこで、その加振波形は理論的に算出した波形を入力しており、その波形の妥当性の検討は行ってこなかった。しかし、第 3 章の屋外での実際の打球音の測定において、ボールの弾性変形による打球音への影響を含む実際の加振波形の測定の必要性を確認した。そこで本章では、法政大学の新井研究室にある衝突実験装置を利用し、実際の加振波形を測定することに試みる。

5.2 実験装置の概要

5.2.1 衝突実験装置

実際の打球時の加振波形を得るために、衝突実験装置を用いる。実験装置としては、法政大学の新井研究室にある超臨界流体を用いた飛翔体発射装置である超臨界流体ガンを使用する。この作動行程および実験工程の概要を図 5.1 に、各装置を図 5.2 に示す。

本装置はヘリウムガスや二酸化炭素を用いて飛翔体を加速するものであり、ボンベ、電磁バルブ、蓄圧器、エア駆動バルブ、発射管およびゲージから構成される。本実験では飛翔体の作動力には、発射速度を一般的な成人男性のヘッドスピードである 45 [m/s] 程度と低速度にするため、二酸化炭素を用いる。本実験ではゴルフボールを飛翔体とするため、ボールの直径 42.6[mm] に対し発射管の直径は 45 [mm] のものを使用する。また、飛翔体は発射管内の手前側（蓄圧器側）にセットし、ターゲットとなるドライバーはゲージ内に設置する。

作動行程は以下に示す通りである。

まず、ボンベ内の作動流体である二酸化炭素 (1) を蓄圧器 (3) 内に送ることで加圧する。ここで、二酸化炭素を蓄圧器に送り込む過程の間には電磁バルブ (2) を介している。これは、送り込まれた二酸化炭素が逆流してしまうのを防ぐためである。このようにして二酸化炭素の流入を制御し、加圧状態を実現させている。

続いて、蓄圧器の前方にはエア駆動バルブ (4) が設置してある。これは、蓄圧器内で加圧された二酸化炭素を、その圧力に応じて開閉するものである。すなわち、加圧された二酸化炭素がある圧力に達した時点でバルブが開き、前方へ放出させる役割を果たしている。

そして、放出された二酸化炭素が発射管 (5) 内に流入し、管内にセットした飛翔体を加速させ、ゲージ (6) 内に設置されたターゲットに衝突させるものである。また、蓄圧器には圧力計と温度計が取り付けられており、発射時における蓄圧器内の圧力と温度を計測することができる。

本装置は、多くの研究機関で用いられている二段式軽ガスガンに比べ、本体、ランニングコスト共に比較的低価格で、かつ小スペースである。また、1日に可能な実験回数は数十回であるため、実験における作業工程の面で非常に有利である。

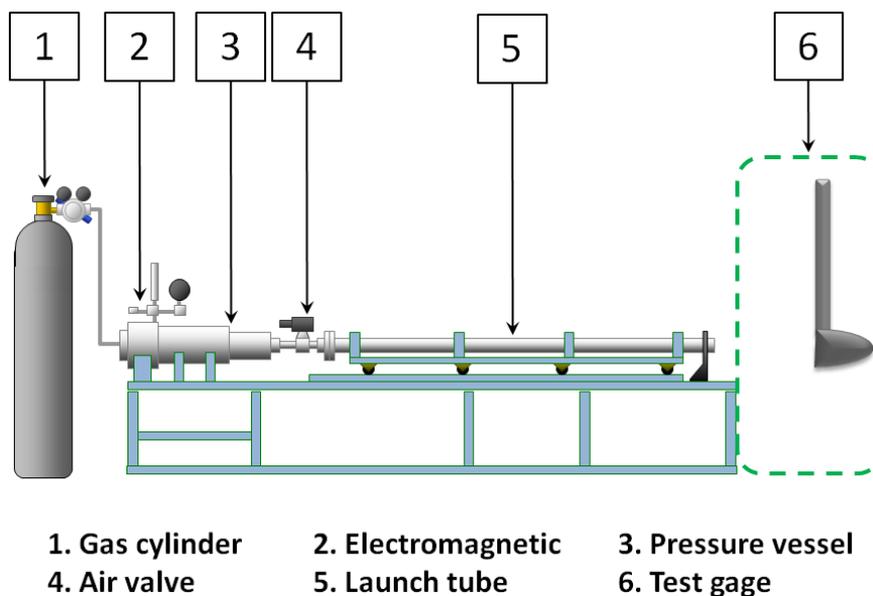


図 5.1 超臨界流体ガンの概要

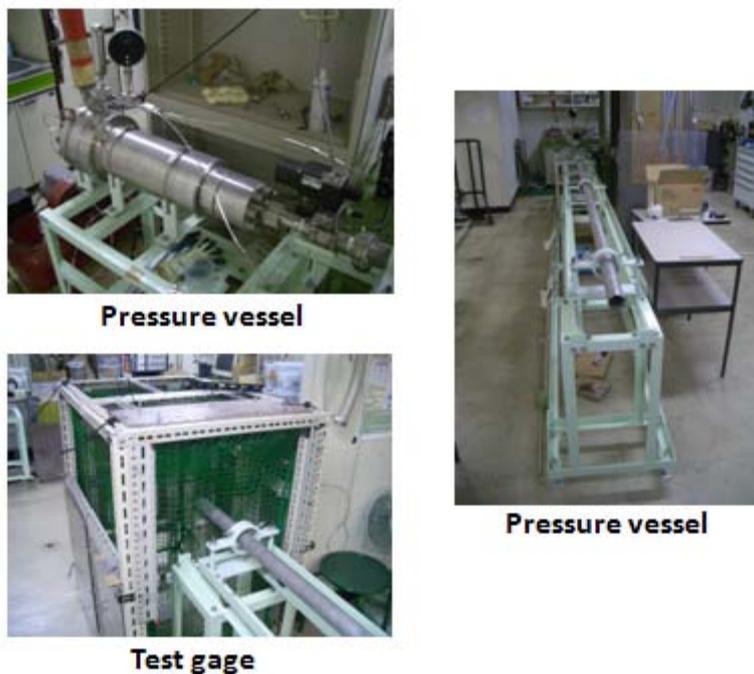


図 5.2 衝突実験装置

5.2.2 ピエゾフィルム

衝突実験装置から発射されたゴルフボールをドライバーに衝突させ、その時の圧力波形をピエゾフィルムにて測定する。ピエゾフィルムの概要を以下の表 5.1, 図 5.3 に示す。本章で使用するピエゾフィルムは、ピエゾフィルムに電極を銀インクスクリーン印刷し、薄いアクリルコーティングが施されている。圧力の測定にピエゾフィルムを適用することにより、ドライバーフェース部の曲線にそって貼り付けることができ、またわずかなひずみでも 10[mV]の電圧を発生させるため一般的なストレインゲージよりも大きな値をとることができる。容量はピエゾフィルムの面積に比例し厚さに反比例するため、広く厚いものが理想である。しかし衝突時はボールが弾性変形し、またフィルムの厚さが減衰として働いてしまうため、それらの影響を極力なくするため小さく薄いものを使用する。

表 5.1 ピエゾフィルム寸法諸元

型番	シート部寸法 [mm]		電極部寸法 [mm]	
	A	C	B	D
DT1-028K/L	16	41	12	30
全体の厚さ t [μm]	フィルムの厚さ [μm]		静電容量 [nF]	
40	28		1.38	

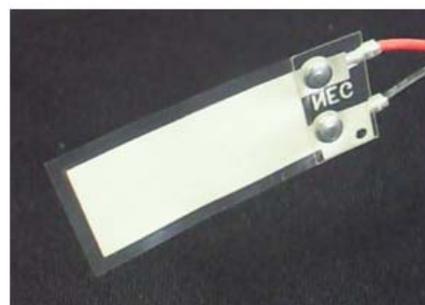
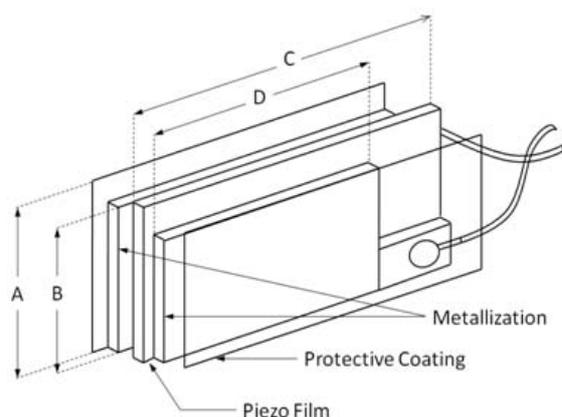


図 5.3 ピエゾフィルム

piezofilm で測定した圧力は非常に大きな値であるため、これまでにデータの収録で使用した SA-01 では入力インピーダンスが低く測定できない。そこで piezofilm からのデータは、入力インピーダンスが大きいオシロスコープ (株式会社キーエンス, パソコンオシロ NR-350) により表示・収録する。オシロスコープの概要を図 5.4 に示す。



図 5.4 オシロスコープ NR-350

5.3 加振波形の同定方法

5.3.1 マスターカーブの作成

衝突実験装置により飛翔体を飛ばす際には、その飛翔体では加圧した二酸化炭素の圧力に対し速度がどのように変化するかを把握しなければならない。つまり、圧力と速度の変化をグラフ化する必要がある、それを示したものがマスターカーブである。

本実験では、飛翔体として第 3 章で示した硬さの異なるゴルフボールを 2 種類 (S301・T301) 用いる。以下の表 5.2 にボールの寸法諸元を示す。

表 5.2 ボールの寸法諸元

型番	直径 [mm]	質量 [g]	硬さ
CROSS EIGHT S301	42.6	46.6	柔らかい
CROSS EIGHT T301	42.6	45.6	硬い

マスターカーブを作成するにあたり、各ボールにおいて 0.24 [MPa] から 0.29 [MPa] の圧力でボールを発射させ、その際のボールスピードを測定した。ボールスピードの測定は高速度ビデオカメラ (株式会社フォトロン, FASTCAM-APX RS) にて行い、シャッタースピードは 1/10000 [sec] とし、フレームレートは 10000 [fps] とした。測定回数は傾向が明らかになる程度を目標に、20

回とした。また、ボールスピードは一般的な成人男性のヘッドスピードである 45 [m/s] 付近になるようにした。以下の図 5.5 に S301 と T301 のマスターカーブを示す。

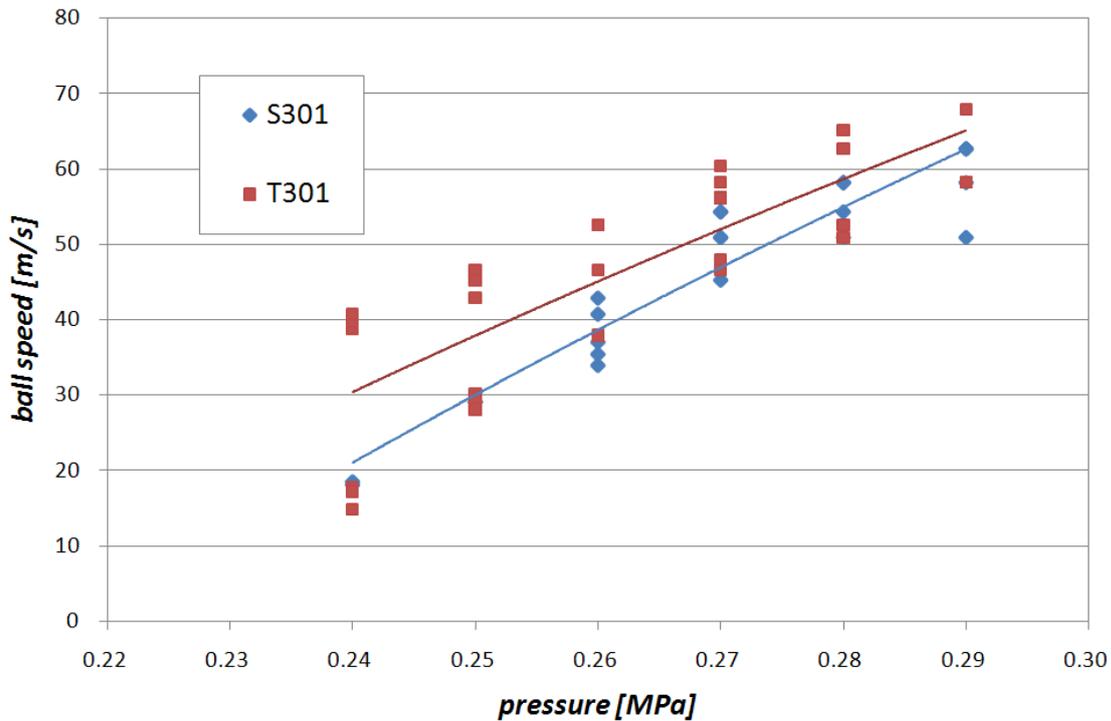


図 5.5 マスターカーブ

グラフは横軸が圧力 [MPa]、縦軸がボールスピード [m/s] とし、青い点が S301、赤い点が T301 の圧力に対するボールスピードである。グラフを見ると、圧力が低いとボールスピードのばらつきが大きくなっていることがわかる。これは、本実験で使用している超臨界流体ガンは、通常 100 [m/s]以上の速度で飛翔体を飛ばすように設計されていることから、今回の 45 [m/s] 程度のボールスピードでは速度が低すぎ、設定した圧力を満たすまでの時間が短く、二酸化炭素が均一に加圧されないことが原因として考えられる。また、ボールの直径が 42.6 [mm] に対し発射管の直径が 45 [mm] のため 2.4 [mm] のクリアランス (すきま) がある。そのため、発射角度やボールの回転数に若干の誤差が生じることも原因の一つであると考えられる。しかし、ばらつきはあるものの 45 [m/s] 付近の速度は出ているため、実際の実験では複数回繰り返すことにより 45 [m/s] 付近のデータを採用することで、これらの問題に対応する。このマスターカーブにより、実際の実験では圧力を 0.25 [MPa] から 0.28 [MPa] として衝突実験を行う。

5.3.2 衝突実験

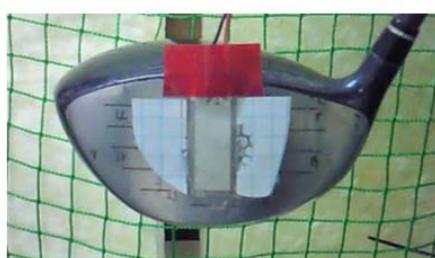
これまでに示した衝突実験装置である超臨界流体ガン・ピエゾフィルム・オシロスコープなどを使用し、実際の打撃時の加振波形を同定するため衝突実験を行う。実験手順は以下の通りであ

る。

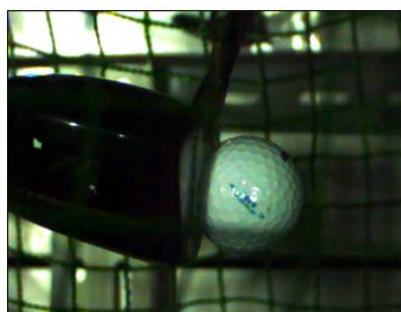
まず、2種類の硬さの異なるゴルフボールを超臨界流体ガンにより発射させ、ゲージ内に設置したドライバーに衝突させる。ドライバーはシャフト付きのものを使用し、シャフト部のみを固定しヘッド部は自由支持状態とした。またクリアランスによる発射角度のずれを確認するため、ピエゾフィルムの両脇にショットセンサーを貼り付け、ボールの当たった場所を特定する。

そして、ボールとドライバーとの衝突の際の時間軸での圧力を、ピエゾフィルムとオシロスコープにより測定する。ボールスピードは一般的な成人男性のヘッドスピードである 45 [m/s] 程度とし、ボールスピードは高速度ビデオカメラにて測定する。実験は複数回行うことで傾向を把握し、最も確からしいものを採用する。

以下の図 5.6 に実験風景を示す。



Piezo film and shot sensor



Collision



Supported driver

図 5.6 実験風景

5.4 同定結果

以下に衝突実験の同定結果をまとめる。実験方法および測定方法はこれまでに示した通りである。

まずは柔らかいボールの S301 を衝突させた時の加振波形を図 5.7 に示す。ただし、ボールスピードは 45 [m/s] を目標としてマスターカーブにより圧力を設定したが、やはりクリアランスの影響が大きくその周辺の速度でしか測定が行えなかった。そこで 45 [m/s] 付近の速度として、42.96 [m/s] , 50.43 [m/s] , 52.73 [m/s] の 3 種類の速度での加振波形を示す。

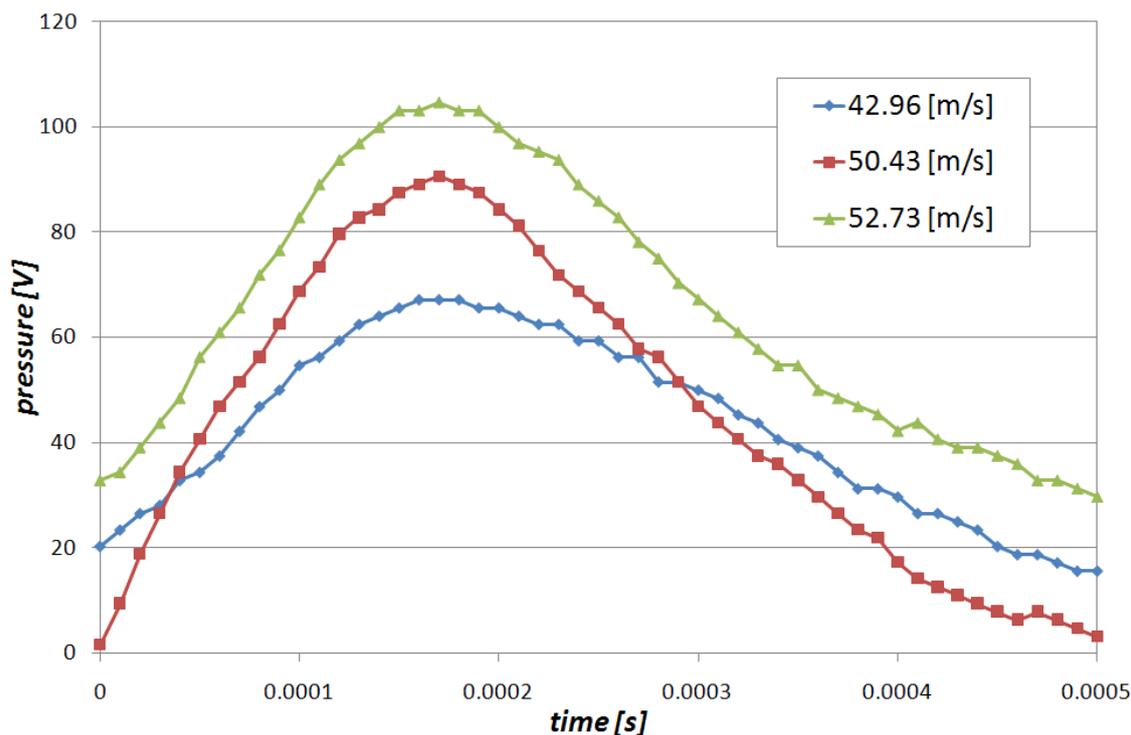


図 5.7 S301 による加振波形

グラフは横軸が時間 [s] で縦軸が圧力 [V] とし、各ボールスピードでの波形を示している。グラフを見ると、それぞれのボールスピードにおいて **sin** 波形を描いていることがわかる。ゴルフボールをドライバーで打撃すると、ボールは大きく弾性変形をすることは第 3 章で示した。また、今回も高速度ビデオカメラで衝突の瞬間を確認すると、ボールは大きく弾性変形していた。つまり、ボールは衝突の瞬間からわずかな時間ではあるがボールに接触し続け、ボールによる圧力も増加する。そして一定の圧力に達した後は、ボールはドライバーから徐々に離れていく。そのため加振波形は **sin** 波形を描くと予想でき、今回の測定でもそれを確認することができるため測定は成功していると考えられる。また、一つの山に対し約 50 点データの測定が行えているため、サンプリング点数としても十分な点数を測定できたと言える。他にも、ボールスピードが上がると波形の山のピークも上がっていることから、今回の実験の精度の高さを確認することができる。

次に同様の実験手順で、ボールを硬い T301 にした時の加振波形を図 5.8 に示す。ただし S301 と同様に、ボールスピードは 45 [m/s] を目標としてマスターカーブにより圧力を設定したが、やはりクリアランスの影響が大きくその周辺の速度でしか測定が行えなかった。そこで 45 [m/s] 付近の速度として、38.67 [m/s] , 52.73 [m/s] , 58.00 [m/s] の 3 種類の速度での加振波形を示す。

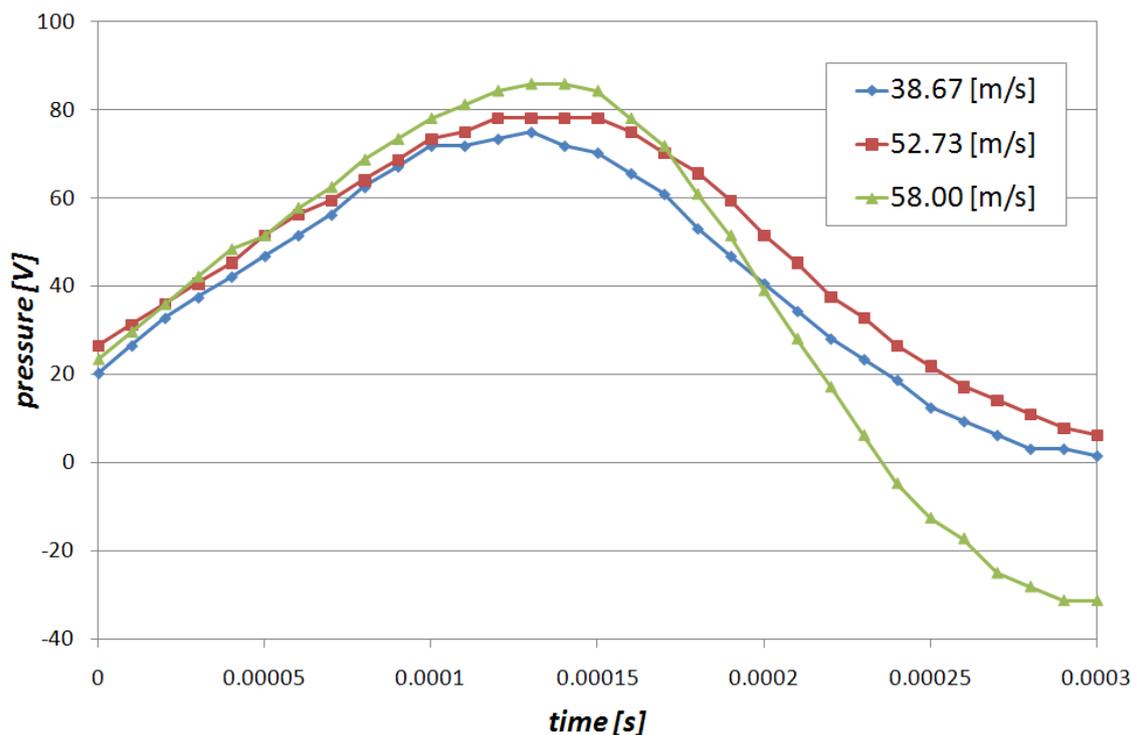


図 5.8 T301 による加振波形

グラフは横軸が時間 [s] で縦軸が圧力 [V] とし、各ボールスピードでの波形を示している。グラフを見ると、S301 と同様に各加振波形が sin 波形を描いていることから、測定に成功していると考えられる。

しかし、実験を行っていく過程で、結果にはあらわれない課題が多く見つかった。

まず一つ目は、圧力の単位が [V] であることが挙げられる。この衝突実験は、実際に加振波形を測定することで音響シミュレーションプログラムに入力する加振波形の見直し、より計算音を実際の打球音に近づけることを目的に行った。しかし、音響シミュレーションプログラムに入力する加振波形の圧力の単位は [N] でなくては計算できないため、加振波形の単位を [V] から [N] に校正しなければならない。

二つ目は、ピエゾフィルムの面積である。今回使用したピエゾフィルムは手に入る限りで最小面積のものであるが、図 5.6 の写真を見てわかるとおり、ボールの接触面積に対し大きい。そのためボールの接触位置により接触面積が変化してしまい、ボールの発射角度による波形への影響が大きくなってしまう。今回はショットセンサーにより大まかな接触位置の把握を行ったが、より加振波形を明確に同定するためにはピエゾフィルムの面積をより小さくする必要がある。また、音響シミュレーションプログラムでは加振波形は一点に集中すると仮定して入力するように構成されているので、面で加振波形を入力できるように改良しなければならない。

三つ目は、これまでも指摘してきたが発射管とボールの直径とのクリアランスである。今回はゴルフボール用の発射管の作成は行わず、元からあった発射管を使用した。そのためクリアラ

ンスが生じてしまい、ボールスピードの調節や発射角度による接触面積の変化など多くの問題を引き起こしてしまった。そのため、今後はゴルフボールの直径に合った発射管を作成しこれらの問題を解決することで、より精確な加振波形の同定を行う必要があると考える。

5.5 結論

1. これまで研究を進めてこなかった加振波形の同定を試み、実験を行える環境を整えた。
2. 超臨界流体ガンによりゴルフボールを45 [m/s] 付近の速度で発射することが可能であることがわかった。しかし、発射管とゴルフボールの直径とのクリアランスに関して考慮する必要がある。
3. ピエゾフィルムとオシロスコープにより、加振波形の測定が行えることを明らかにした。今後は測定した圧力の単位を [V] から [N] に校正するための校正値を導かなければならない。
4. 本実験ではドライバーのシャフト部を固定しヘッド部を自由支持状態にしたが、これらの支持条件に関して検討する必要がある。また、ボールの接触箇所の特定にショットセンサーを使用したか、非接触でこれが行える方法も考えなければならない。

第6章 音響シミュレーションプログラムの 精度向上

第6章 音響シミュレーションプログラムの精度向上

6.1 緒論

当研究では、2003年度に作成された放射音を予測する音響シミュレーションプログラムの実用性の検討を中心に進めてきた。これまで音の響き具合に対するモード減衰比の同定や、プログラムに入力する加振波形の同定などからプログラムの精度向上を進めてきた。それにより実際の打球音に計算音を近づけることに成功してきたが、完全な一致には至っていない。そこで、音響シミュレーションプログラムに関してここで一度見直し、その精度の確認を行う。

今回プログラムの精度を正確に把握するために、単純な動特性が得られる平板を用いて実験と計算を行う。そして精度に関係していると考えられる「プログラムの基本的な計算の精度」、ならびに現在のプログラムで考慮していない「音の回折による回り込み音の影響」の2点について、多方面から比較・検討を行う。

6.2 平板を用いた音響シミュレーションプログラムの計算精度の確認

6.2.1 平板の作成

プログラムの計算精度の確認としては、まずこれまで計算の対象としてきたゴルフクラブなどの構造物ではなく、単純な動特性が得られる均一の単純な平板を作成し対象物とする。そしてその平板の表面速度および音圧を算出し、計算値と実験値を比較・検討する。単純な平板として3つの形状の異なるアルミ製の平板を用いる。以下の図6.1に平板の寸法、図6.2に平板の写真、図6.3に3次元CADデータから作成した有限要素モデルを示す。なお、材質は純アルミであり、heiban1、heiban2は周波数応答関数などの動特性が単純であると考え用いた。これとは別に、形状が複雑になることによる影響を調査するために、段差の付いたdheibanを用いた。

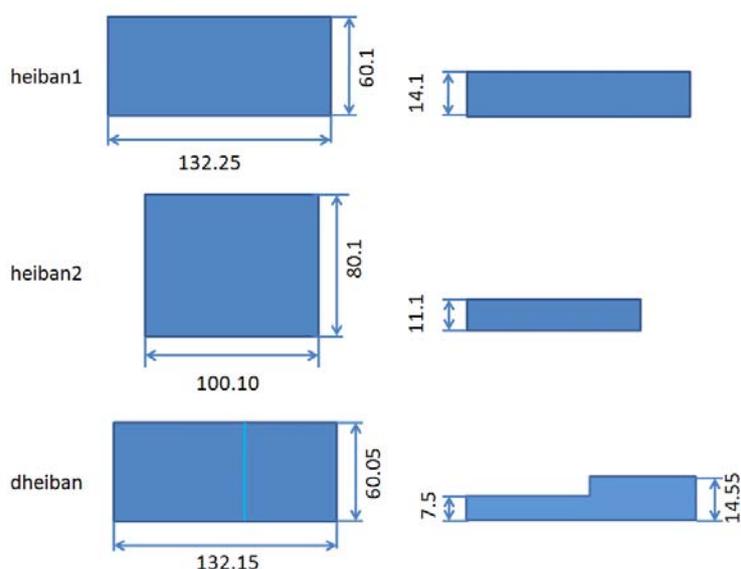


図 6.1 平板の寸法



dheiban



heiban1

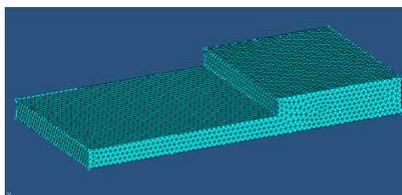


heiban2

図 6.2 平板

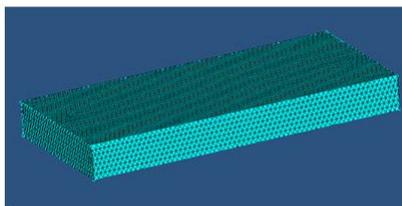
dheiban

接点数 59402
要素数 46988



heiban1

接点数 71866
要素数 56381



heiban2

接点数 64750
要素数 50948

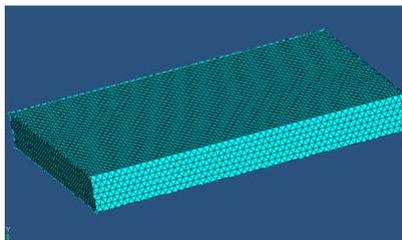
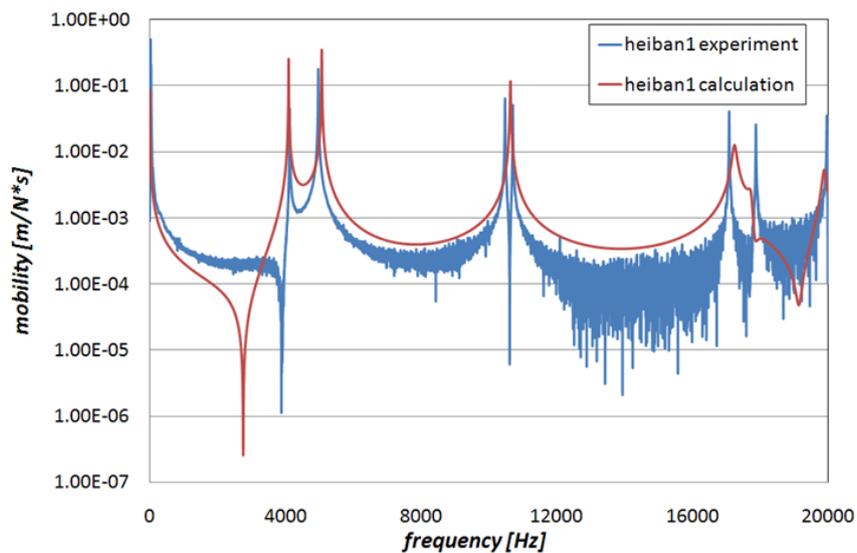


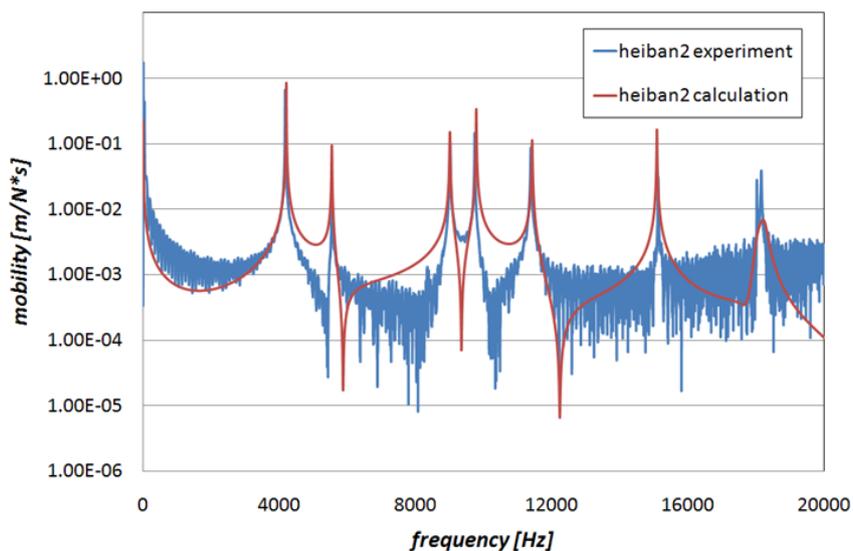
図 6.3 平板の有限要素モデル

6.2.2 表面速度による比較

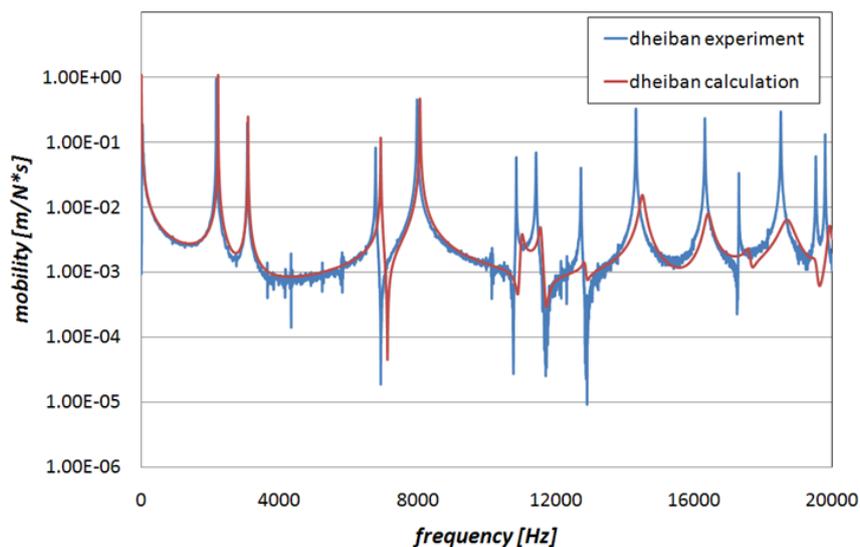
6.2.1 で示した3種類の平板を用いて、計算と実験で得た表面速度により比較・検討を行う。実験方法としては、まず支持条件は対象の動特性が出やすいようにスポンジによる自由支持状態とする。インパルスハンマにより平板を加振し、レーザードップラー振動計により表面速度を測定した。ここで、音響シミュレーションプログラムに入力するモード減衰比も合わせて同定する。同定方法は第4章に示した通りである。以下の図6.4に表面速度のグラフを示す。



(a) heiban1



(b) heiban2



(c) dheiban

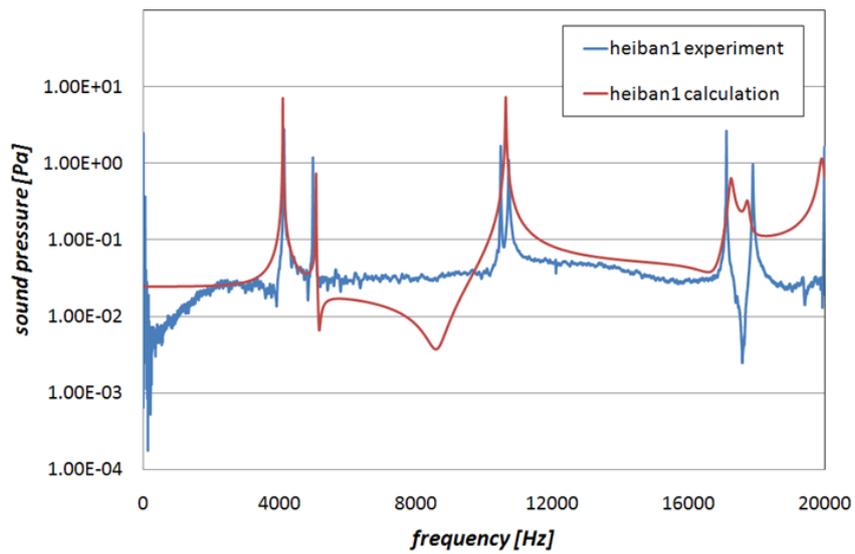
図 6.4 平板による表面速度の比較

heiban1 と heiban2 の実験値と計算値のピークに着目すると、固有振動数は一致しているがピークの高さでは 18,000 [Hz] 以降に違いが見られた。しかし dheiban についてはピークの固有振動数や 10,000 [Hz] 以降でのピークの高さに大きな違いがみられた。このことから、3つの平板に共通してピークの高さに違いがみられ、周波数が高くなるとその違いがより顕著になった。ピークの高さの違いはモード減衰比の影響が主な要因であるため、精度のよいモード減衰比の同定方法が確立できれば実験値との一致が見られると考えられる。

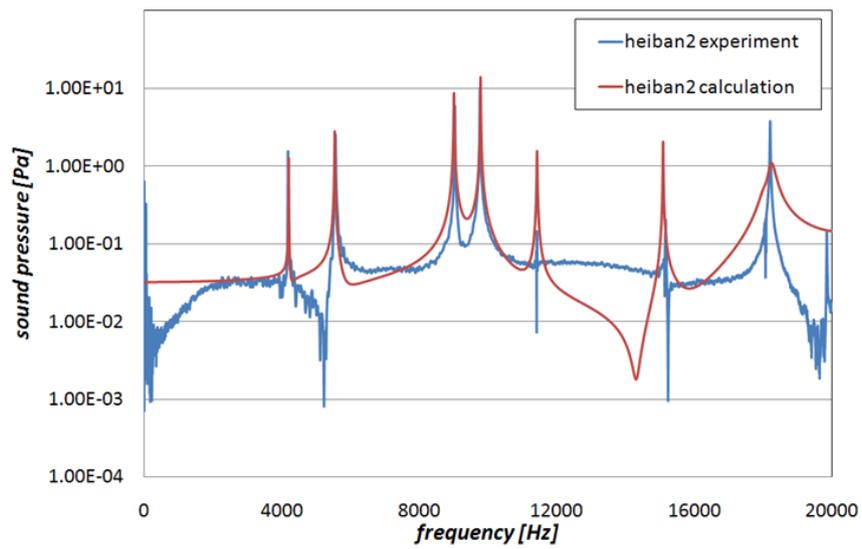
dheiban で固有振動数に一致がみられなかったのは、平板の形が変わったことによって固有値データの精度が低下したためだと考えられる。

6.2.3 音圧による比較

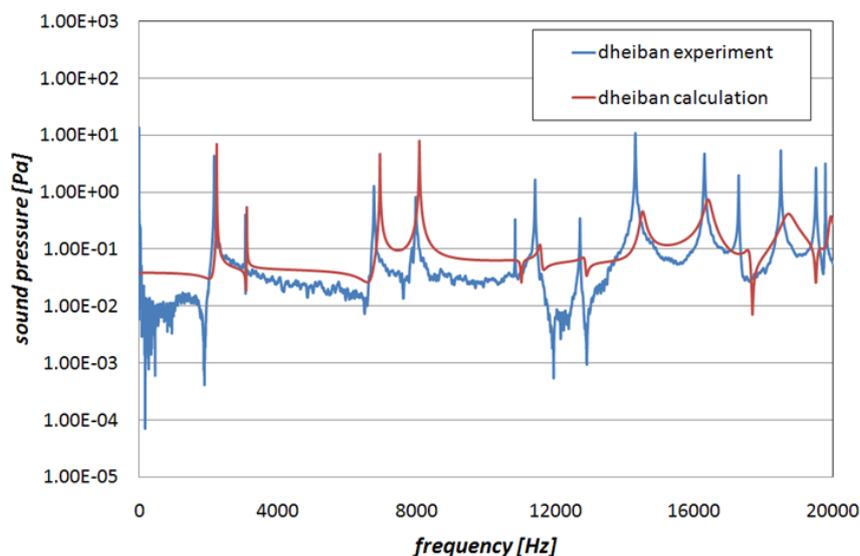
6.2.2 で示した表面速度から、音響シミュレーションプログラムにより音圧が得られる。また学内の静かな場所で平板をインパルスハンマで加振し、その時の音圧をマイクロフォンにより測定する。平板は天井から軽量の糸で吊るし、自由支持状態にした。マイクロフォンの位置は、平板から 0.2 [m] 離れた場所に設置した。この実験結果と音響シミュレーションプログラムにより算出した音圧を比較し、プログラムの精度を確認する。6.2.2 と同様に、対象は形状の異なるアルミ製の板を 3 種類用いた。



(a) heiban1



(b) heiban2



(c) dheiban

図 6.5 平板による音圧の比較

それぞれのグラフを見ると、10,000 [Hz] までの固有振動数やピークの高さに関してはほぼ一致していることがわかる。しかし3つの平板に共通して、1,000 [Hz] 以降のピークにおける音圧の差が大きいことが確認でき、これに関してもモード減衰比の影響が関係していると考えられる。このことから、音圧のグラフにおいても表面速度と同様な傾向が得られており、表面速度の影響を強く反映していることがわかった。

音にして実際に耳で聞いて比較を行うと、heiban2は同じような音に聞こえ、heiban1、dheibanは音の違いが感じられた。この原因としては、人間が聞き取りやすい周波数が1,000～4,000 [Hz] であり、heiban2が4,000 [Hz] 付近で実験値と一番一致していることが挙げられる。また3つの平板に音の響きという点で違いが感じられ、これはモード減衰比の影響だと考えられる。

6.3 回折現象による回り込み音の影響

6.3.1 回り込み音

回折とは、媒質中を伝わる波に対し障害物が存在するとき、波がその障害物の背後などに回り込んで伝わる現象のことである。本章では回折による音を回り込み音とする。以下の図 6.6 に回り込み音に関する概要図を示す。当研究室で開発した放射音を予測する音響シミュレーションプログラムでは、この回り込み音の影響は非常に微小であると判断し考慮していない。しかし、これまで多様な検討を進める中で、さらなる精度向上を目指すためにはこの回り込み音に関し検討する必要があると考えた。そこで本章では、回り込み音の影響を確認するため、対象を中心に周囲 360° を 10° 刻みで 36 点位置を設定しそこで音を集録する。また同条件で音響シミュレーシ

シミュレーションプログラムにより計算値を算出し、実験値と計算値を比較・検討する。

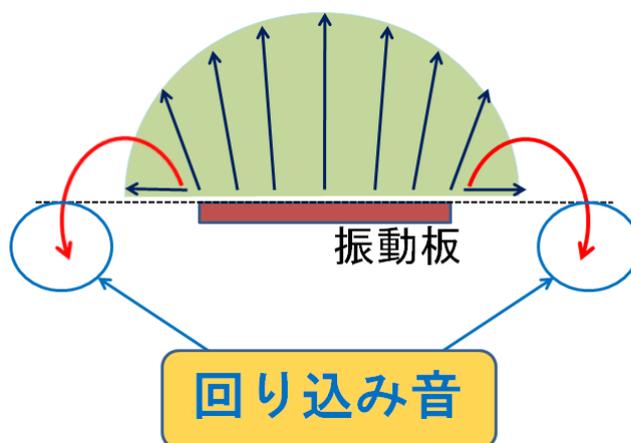


図 6.6 回り込み音

6.3.2 実験結果

実験方法は 6.2.3 で音圧を測定した実験環境と同様にし、平板を中心に半径 0.2m の円周上等間隔に 36 分割し、その各点で音圧を収録した。平板の向きは図 6.6 の通りで、円周上に 1～36 番まで番号をふっている。これと同様の点をプログラムで計算し、それぞれのピークでの最高音圧値をレーダーグラフにして比較を行った。なお、今回は 6.2 で実験と計算の結果が一番一致した heiban2 を使用する。以下の図 6.7 に、実験結果を示す。

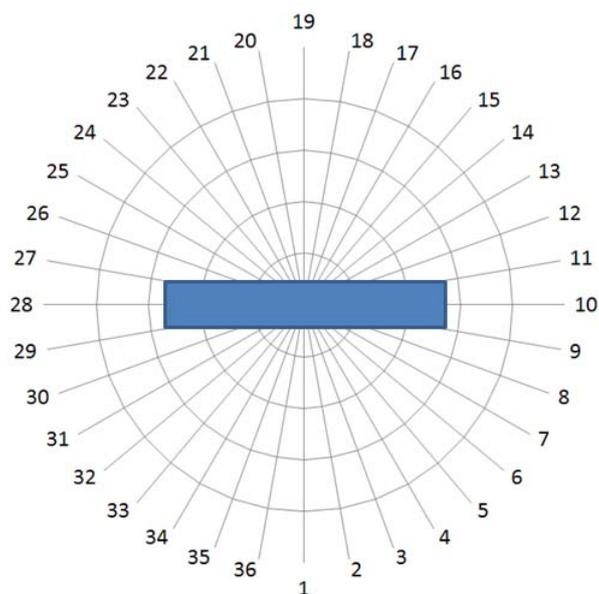
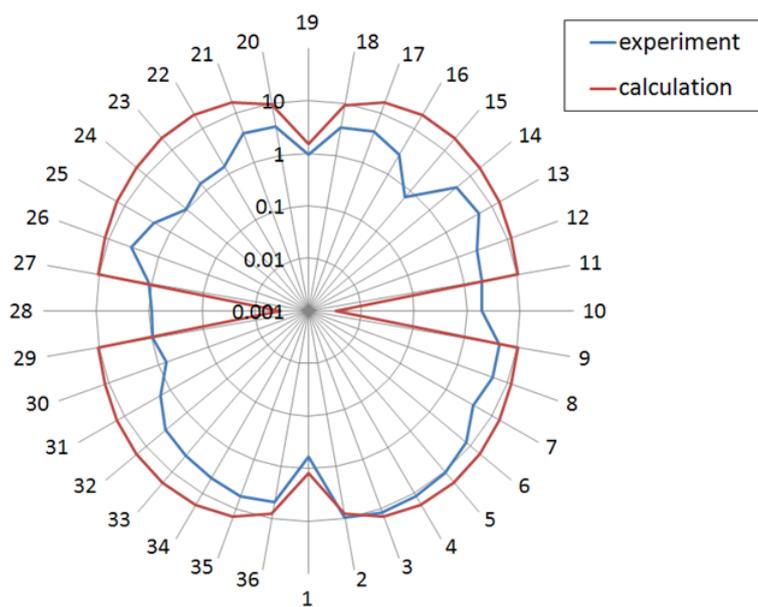
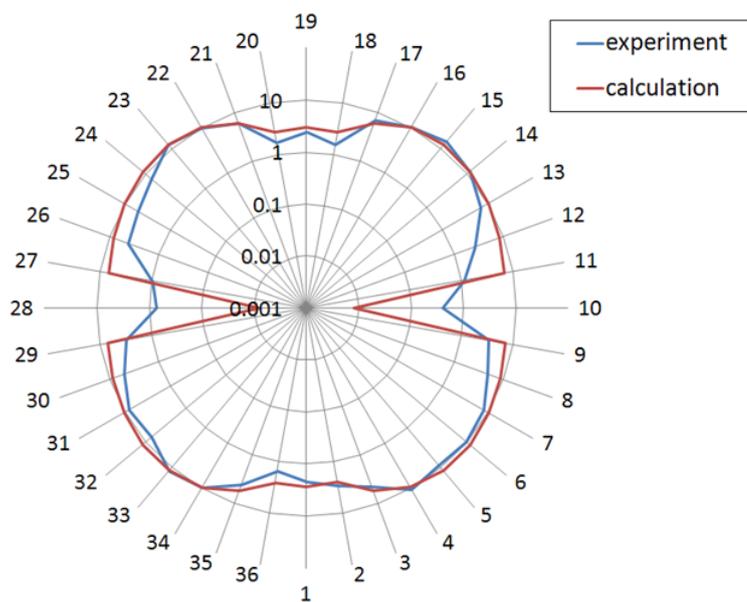


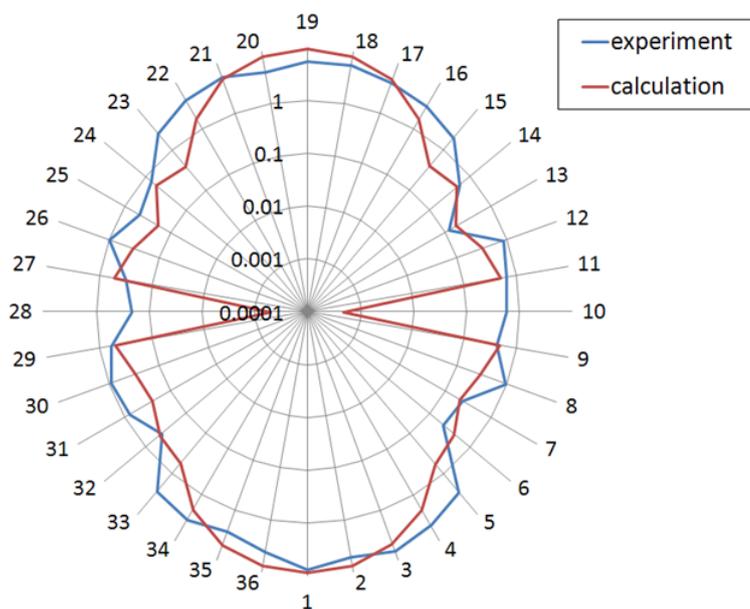
図 6.6 平板の向き



(a) ピーク値 4,000 [Hz]



(b) ピーク値 5,500 [Hz]



(c) ピーク値 9,000 [Hz]

図 6.7 回り込み音

グラフは青い線が実験値、赤い線が計算値を示している。グラフを見ると、すべてのピーク値で10番と28番において計算値が低くなっていることがわかる。音響シミュレーションプログラムでは、聞く位置と向かい合っている面の表面速度のみを計算するようにプログラミングされている。そのため10番と28番では、一番面積の小さい面からの放射音のみ計算していないことから、ピーク値が低くなっていると考えられる。しかし実験値ではあまり値が低くないことから、実際には他の面からの回り込み音の影響が大きいことがわかる。

6.4 結論

1. 音響シミュレーションプログラムの精度を確認するため、3種類の形状のことなるアルミ製の板を作成し、多方面から検討を行った。
2. 単純な平板では表面速度、音圧ともに固有振動数は一致したが、ピークの最大値に違いが見られた。これはそれぞれの平板のモード減衰比が精確に同定できていないことが原因として考えられ、今後モード減衰比の同定方法に関して検討しなければならない。
3. 段差をつけた平板においては、固有値解析により算出した固有振動数と実験モード解析により同定した固有振動数が一致しなかった。そのため、段付きの平板に関しては有限要素モデルの再構築が必要である。
4. 平板の円周上で音を収録し計算音とピーク値で比較すると、平板の狭い面に対し直角の位置では計算音のピーク値が低くなることがわかった。これは計算では向き合った面からの放射音しか計算していないことが原因であると考えられる。また実験値では低くないことから、回り込み音の影響も確認することができた。

第 7 章 結論

第7章 結論

本研究では、ゴルフクラブ特にドライバーの打球音予測を目的として、実際の打球音の測定、音の響き具合に関する検討、実際の打撃時の加振波形の同定、音響シミュレーションプログラムの計算精度の確認、回り込み音の影響など、プログラムの精度向上のため多角的に検討を行った。

以上の検討事項により明らかになった結論を、ここでまとめる。

1. 打球音の測定として、仮想ボールを使用した打球音の測定を行った。ここでは正確な加振波形の入力ができず、計算値と実験値では大きな差が生じた。
2. 屋外で打球音の測定を行い、その際にはマイクロフォンの位置はプレーヤーの耳の対象の位置に設置すると雑音が低減し、またボールの当たった場所によりピークの位置が変わることがわかった。
3. 実際の打撃時にはボールは弾性変形していることがわかった。この結果、プログラムの加振波形の入力方法の改良の必要性を確認した。
4. 実際の打球音とこれまでの計算音を比較すると、音の響き具合に関して大きな違いがあった。そのため、これまでのヘッド部のみのモード減衰比ではなく、新たにシャフト付きドライバーのモード減衰比を同定しプログラムに適用したところ、音圧のピークの高さを以前より一致させることに成功し、音の響き具合に関して精度を向上させることができた。
5. シャフト付きドライバーのモード減衰比を同定する過程で、9,500 [Hz] と 12,500 [Hz] 付近のピークがシャフト付きドライバーでは現れないことがわかった。これに関しては、ヘッド部のみのモード形状を同定し確認したところ、クラウン部が大きく振動するモードであることがわかり、この周波数帯ではシャフト部により振動が抑制されてしまうことを明らかにした。
6. これまで研究を進めてこなかった加振波形を同定するため、超臨界流体ガンを使用し衝突実験を行った。波形を測定することには成功したが、圧力の単位の校正やボールと発射管のクリアランスをなくす必要性を確認した。
7. 音響シミュレーションプログラムの計算精度を確認するため、簡単なモデルとしてアルミ製の平板を3種類作成した。しかし、固有値解析した計算値と実験値の固有振動数で違いがしょうじてしまったため、まずは有限要素モデルの再構築する必要がある。
8. 平板の円周上で音を収録し計算音とピーク値で比較することで、平板の狭い面に対し直角の位置では計算音のピーク値が低くなることがわかった。これは計算では向き合った面からの放射音しか計算していないことが原因であると考えられ、実験値では低くなっていないことから回り込み音の影響を確認することができた。

参考文献

1. 長松昭男, モード解析入門, (1993), コロナ社
2. 長松昭男, モード解析, (1985), 培風館
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
4. 平松 香梨他, Sound and Vibration Simulation of the Golf Club, (2006),
法政大学計算科学研究センター
5. 松村信宏, ゴルフクラブの音響・振動シミュレーション, (2007), 法政大学
大学院工学研究科修士論文
6. 榎本真宜, Hitting Sound Simulation of the Golf Club, (2008), 法政大
学計算科学研究センター
7. 小山修人, CFRP および高分子材料を用いたシールドのスペースデブリ防御
性能, (2008), 法政大学大学院工学研究科修士論文
8. MSC NASTRAN 2001 日本語オンラインマニュアル, MSC Software, 2001
9. MSC NASTRAN 2004 リリースガイド, MSC Software, 2004

謝辞

まず、研究の場を与えて頂いた担当教授である長松昭男教授に、本研究を遂行するにあたり、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。

本研究を行うにあたり、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。特に本研究を行うにあたり、お忙しい中何度も本校に出向き、本研究の進行に対して助言、御指導頂いた寺西様に厚く御礼申し上げます。

また、衝突実験を行う際に発射装置を貸して頂いた法政大学の新井和吉教授をはじめとする新井研究室の学生の皆様に感謝致します。

最後に、共にゴルフクラブの研究を行ってくれた同長松研究室の榎本真宜君、浅井友浩君、齋藤幸宏君、また数々の実験を手伝ってくれた金松祐介君及び研究を行うに当たり励ましあった同研究室諸君に感謝の意を捧げます。