

ゴルフクラブにおける打球音シミュレーション

IWAHARA, Mitsuo / 齋藤, 幸宏 / 久保田, 孝佑 / 久保田, 康
稔 / 岩原, 光男 / 御法川, 学 / SAITO, Yukihiro / KUBOTA,
Kosuke / KUBOTA, Yasutoshi / MINORIKAWA, Gaku

(出版者 / Publisher)

法政大学情報メディア教育研究センター

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学情報メディア教育研究センター研究報告

(巻 / Volume)

24

(開始ページ / Start Page)

109

(終了ページ / End Page)

118

(発行年 / Year)

2011-06-01

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00007313>

ゴルフクラブにおける打球音シミュレーション

BATTING SOUND SIMULATION OF GOLF CLUB

齋藤 幸宏¹⁾ 久保田 孝佑¹⁾ 久保田 康稔²⁾ 岩原 光男³⁾ 御法川 学³⁾
Yukihiro Saitou, Kousuke Kubota, Yasutosi Kubota, Mituo Iwahara, Gaku Minorikawa

¹⁾ 法政大学大学院工学研究科機械工学専攻御法川研究室

²⁾ 法政大学工学部機械工学科御法川研究室

³⁾ 法政大学理工学部

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 in 2003. 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 accuracy of radiation sound forecast program is examined by comparing experiment with calculation by using cylinder model.

Keywords : Sound, Vibration, Simulation, Modal Analysis, Finite Element Method, Velocity Potential

1. はじめに

近年、振動や音に付加価値を求める工業製品が増えてきた。本研究の研究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。これはよく言われる「ゴルフ愛好者は打球感でクラブを選択する」という言葉からも伺える。そして打球感に大きな影響を及ぼす要因として打球音が挙げられており、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いる。またゴルフクラブの飛距離性能やコントロール性能が格段に向上したことで、各国のゴルフ協会がゴルフクラブの性能を制限する規定を設け始めている。その代表的なものとしてS L Eルールが挙げられる。S L Eルールは飛距離性能の向上に歯止めを掛けるため、ゴルフクラブの打球面の反発係数を0.83以下に制限するルールである。このような規定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の付加価値が重要視されている。また最近の製品開発では、開発期間の短縮・コストの削減に対する要求が強まっており、その要求に加えて常に製品の品質向上も要求されている。そのため開発期間・コストを抑えつつ打球音の良さを追及するには「図面段階での打球音の事前検討」を可能にする必要がある。

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。その結果、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た。そこで本年度は放射音予測プログラムの精度向上を試みた。そしてプログラムの計算精度をあらゆる角度から検討した。以下にその検討結果を述べる。

2. 放射音予測プログラム

2.1 放射音予測プログラムの概要

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Fig.1に示す。

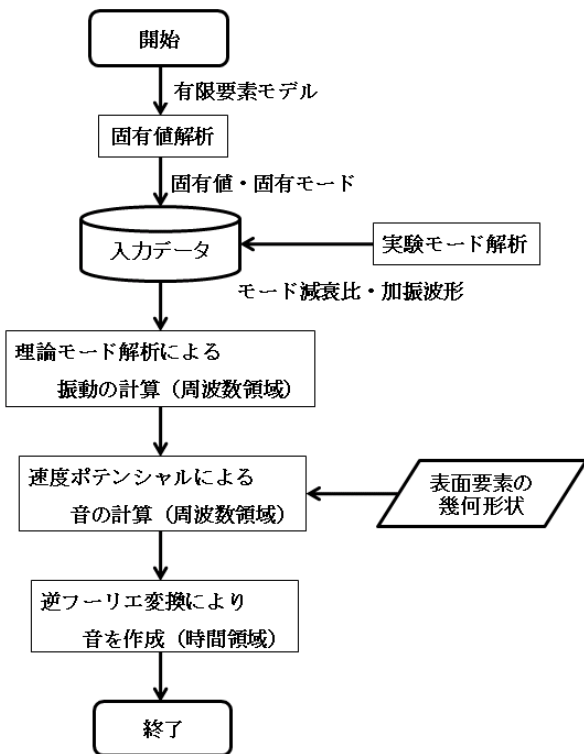


Fig.1 Program flowchart

2.2 放射音予測プログラムの改良点

音には大きく分けると直接音、回折音、反射音がある。直接音は「音源から直接届く音」、回折音は「音源からの音が障害物の背後などに届く音」、反射音は「音源からの音がある面で跳ね返り届く音」である。また実際の音は回折音がさらに回折する2次回折音、反射音がさらに反射する2次反射音など回折や反射が繰り返されている。

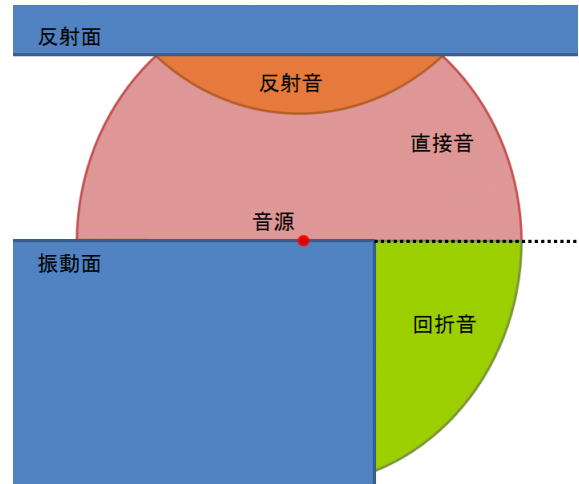


Fig.2 The nature of sound

今までの放射音予測プログラムは直接音のみ計算していた。そのため位置によって実際の音とプログラムにより計算した音に大きな違いがみられた。そこで本年度はホイヘンスフレネルの原理⁶⁾を用いて1次回折音、1次反射音の計算を試みた。ホイヘンスフレネルの原理とは「ある時刻の波面から出される素元波の重ね合わせによって新しい波面が形成される」という原理である。概念図をFig.3に示す。

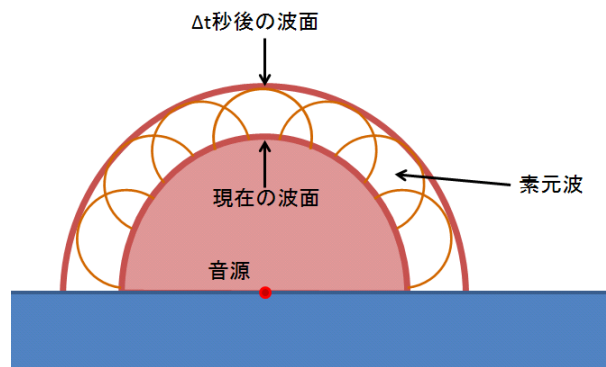


Fig.3 Huygens-Fresnel principle

2.3 速度ポテンシャルによる直接音の計算

放射音予測プログラムの直接音の計算方法を述べる。剛壁の表面上に点音源がある場合、壁面の前方の半空間に形成される音場の速度ポテンシャル ϕ を式で表すと

$$\phi = \frac{A_0}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (1)$$

- r : 点音源までの距離
- A₀ : 点音源の強さ
- k : 波数, k=2π/波長
- j : 虚数

この式をさらに発展させて考えると、ある大きさの振動面が音を放射している場合、振動面を微小面積要素に分割し、それぞれの面積要素が点音源として音を放射していると考えれば、振動面の振動による直接音を求めることができる。

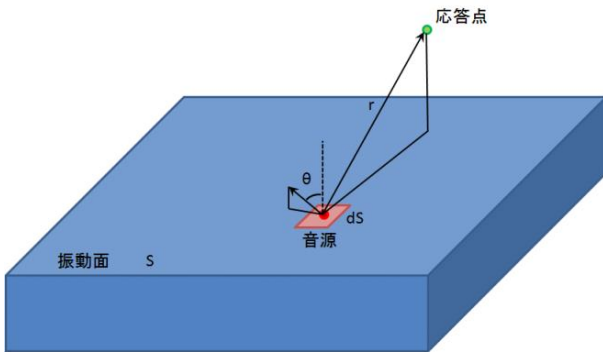


Fig.4 Calculation of direct sound

振動面上の微小面積 dS の部分が振動速度 $\xi_0 e^{j\omega t}$ で振動しているとき、 dS 部分を点音源と考えると、この点音源の強さ A_0 は $A_0 = \xi_0 \cos \theta \times dS$ と表される。ここで θ は微小面の法線ベクトルと振動速度ベクトルのなす角である。従ってこの微小面積の振動による応答点での速度ポテンシャル $d\phi$ は

$$d\phi = \frac{\xi_0 \cos \theta \times dS}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (2)$$

半径方向の粒子速度 ξ_r は

$$\xi_r = -\frac{\partial(d\phi)}{\partial r} = \left(\frac{1}{r} + jk\right) d\phi \quad (3)$$

また面積 S の振動面によって応答点に生じる直接音の速度ポテンシャル ϕ は

$$\phi = \frac{1}{2\pi} \iint_S \frac{\xi_0 \cos \theta}{r} e^{j(\omega t - kr)} dS \quad (4)$$

音圧 p は

$$p = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} = j\omega \rho \phi \quad (5)$$

ρ : 媒質の密度

2.4 速度ポテンシャルによる回折音の計算

今までの放射音予測プログラムは回折音が計算できなかった。そこでホイヘンスフレネルの原理を用いて回折音の計算を試みた。計算方法は、音源からエッジまで広がった波面を微小面積要素に分割し、それぞれの微小面積要素を新たな点音源として考え、振動面の振動による回折音を求める。

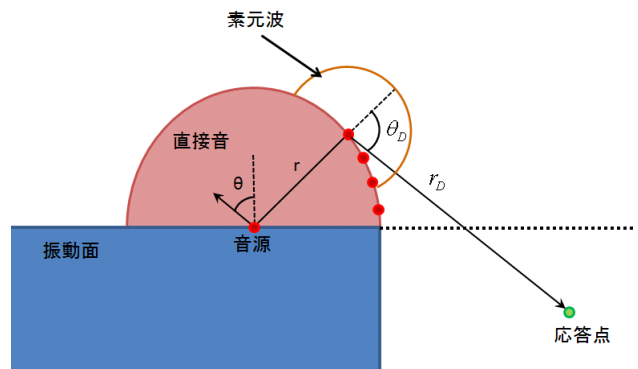


Fig.5 Calculation of diffracted sound

まず音源からエッジまで広がった波面上の微小面積 dS_D 部分の半径方向の粒子速度は $\xi_r = \left(\frac{1}{r} + jk\right) d\phi$ である。このとき dS_D 部分を点音源と考えると、この点音源の強さ A_D は $A_D = \xi_r \times dS_D$ と表される。従って、音源の回折音による応答点での速度ポテンシャル $d\phi_D$ は

$$d\phi_D = \left(\frac{1}{r} + jk\right) \frac{\xi_0 \cos \theta \times dS}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \times \iint_{S_D} \frac{e^{j(\omega t - kr_D)}}{2\pi r_D} K(\theta_D) dS_D \quad (6)$$

ここで $K(\theta_D)$ は傾斜係数⁶⁾である。式(7)に示すように $\theta_D = 0$ のとき 1, $\theta_D = \pi$ のとき 0 をもつ係数として定義されている。また θ_D は粒子速度ベクトルと微

小面積 dS_D から応答点までのベクトルとのなす角である。

$$K(\theta_D) = \frac{1 + \cos \theta_D}{2} \quad (7)$$

また面積 S の振動面によって応答点に生じる回折音の速度ポテンシャル ϕ_D は

$$\phi_D = \frac{1}{4\pi^2} \iint_S \left(\frac{1}{r} + jk \right) \frac{\dot{\xi}_0 \cos \theta}{r} e^{j(\omega t - kr)} \times \iint_{S_D} \frac{e^{j(\omega t - kr_D)}}{r_D} K(\theta_D) dS_D dS \quad (8)$$

音圧は直接音と同様の方法で算出できる。

2.5 速度ポテンシャルによる反射音の計算

今までの放射音予測プログラムは床や壁からの反射音は計算していた。しかし計算対象の表面同士による反射音は計算できなかった。そこでホイヘンス-フレネルの原理の考え方をういて反射音の計算を試みた。計算は音源からの音が反射面で拡散反射すると考えた。そのため、音源から反射面まで広がった波面を微小面積要素に分割し、それぞれの微小面積要素を新たな点音源として考え、振動面の振動による反射音を求める。

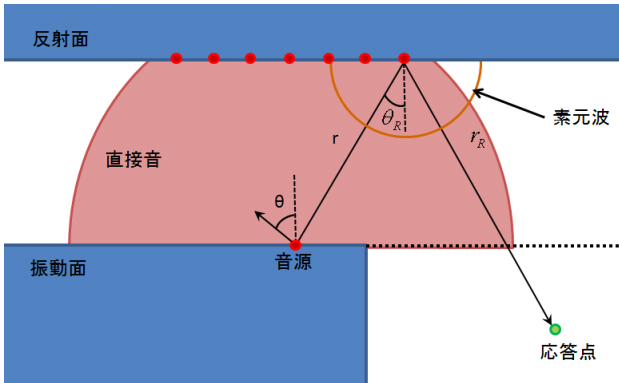


Fig.6 Calculation of reflected sound

まず音源から反射面まで広がった波面上の微小面積 dS_R 部分の粒子速度は $\dot{\xi}_r = \left(\frac{1}{r} + jk \right) d\phi$ である。このとき dS_R 部分から反射される音を点音源として考えると、この点音源の強さ A_r は $A_r = R \dot{\xi}_r \cos \theta_r \times dS_R$ と表される。ここで R は拡散反射率。また θ_r は粒子

速度ベクトルの入射角である。従って、音源の反射音による応答点での速度ポテンシャル $d\phi_R$ は

$$d\phi_R = \iint_{S_R} R \left(\frac{1}{r} + jk \right) \frac{\dot{\xi}_0 \cos \theta \times dS}{2\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \times \frac{e^{j(\omega t - kr_R)}}{2\pi r_R} \cos \theta_R dS_R \quad (9)$$

また面積 S の振動面によって応答点に生じる反射音の速度ポテンシャル ϕ_R は

$$\phi_R = \frac{R}{4\pi^2} \iint_S \iint_{S_R} \left(\frac{1}{r} + jk \right) \frac{\dot{\xi}_0 \cos \theta}{r} e^{j(\omega t - kr)} \times \frac{e^{j(\omega t - kr_R)}}{r_R} \cos \theta_R dS_R dS \quad (10)$$

音圧は直接音と同様の方法で算出できる。

3. 円筒による放射音予測プログラムの精度検討

3.1 目的

本章では放射音予測プログラムで計算した直接音、回折音、反射音の精度を検討する。検討方法は「実際の実験によって測定した実験音」と「プログラムにより計算した計算音」を比較することで行う。比較対象には回折音、反射音の影響が表れやすい形状として円筒形状が考えられた。そこでアルミ合金製の円筒を作成した。Fig. 7, Fig. 8 にその円筒および計算に使用した円筒モデルを示す。また実物とモデルの質量誤差についても Table. 1 に示す。



Fig.7 Cylinder

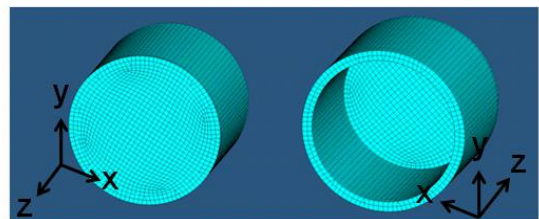


Fig.8 FEMmodel

Table.1 Mass error of cylinder model

Experiment [g]	FEMmodel [g]	Error [%]
445.6	448.3	0.61

円筒は位置によって直接音，回折音，反射音の影響が大きく異なっている．そこで今回は Fig.9 に示すように測定位置を3箇所に設け，それぞれの位置で比較を行う．また計算には音を出すために円筒に加えた加振波形が必要になる．そこで実験は力センサを内蔵したインパルスハンマで打撃して音を測定した．そのため金属同士がぶつかる甲高い音に関する実験音と計算音の比較になる．

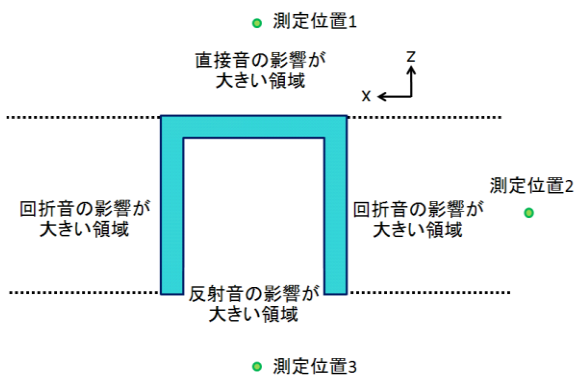


Fig.9 Location of measurement at three points

3.2 表面振動速度の比較

音は物体の表面が振動することで発生し，その大きさは振動の速度に比例する．そのため実験音と計算音が一致するには表面振動速度の一致も必要になる．そこで表面振動速度の実験値と計算値の比較を行う．まず実験方法について述べる．円筒を糸で吊るし，四方向に糸で引張り固定することで自由支持状態とした．インパルスハンマで加振を行い，円筒から 0.2m の間隔をとり設置したレーザードップラ振動計にて表面振動速度を測定した．この測定を 5 回平均した．



Fig.10 Experiment scenery of surface velocity

表面振動速度の計算値は理論モード解析により算出した．ここで計算にはモード減衰比が必要となるが理論的に求めることが出来ない．そのため今までは非線型最適化法を使用して同定を行っていた．しかし共振峰が小さい所や共振峰同士が隣接している所では十分な精度が得られなかった．そこで今回は実験値に一致するようにモード減衰比を調整し放射音予測プログラムに用いた．Fig.11 に表面振動速度の比較結果のグラフを示す．

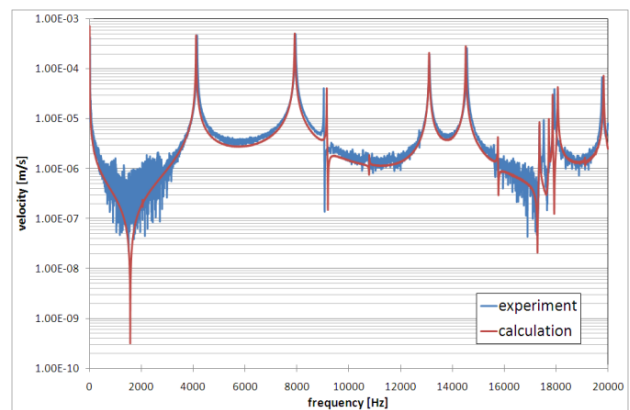


Fig.11 Comparison of surface velocity

共振峰に着目すると，0～16,000[Hz]付近まで固有振動数は一致しており，速度の振幅にも一致がみられる．また 18,000[Hz]付近で固有振動数に違いがみられるが，人間の耳は 1,000～4,000[Hz]で最も感度が高いため十分に一致していると考えられる．

3.3 直接音の比較

直接音の影響が大きい測定位置 1 での比較を行う．まず実験方法について述べる．実験は半無響室で行い，インパルスハンマで加振し，マイクロフォンにより音を測定した．また円筒は表面振動速度の実験と同様に糸で宙吊りにすることで，壁や床からの反射音の影響を低減した．この測定を 5 回平均した．



Fig.12 Experiment scenery of sound

音の計算方法は前章で述べた式を使用している。また人間の可聴域が 20~20,000[Hz]であることから、本研究では 0~25,000[Hz]の周波数範囲内にある固有モードを採用し、それ以上のものは省略して計算を行っている。Fig. 13, Fig. 14 に音の周波数領域と時間領域の比較結果のグラフを示す。

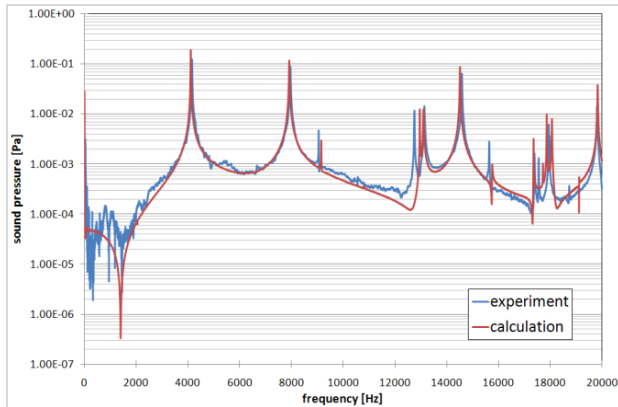


Fig. 13 Comparison of sound at measurement Location 1 (frequency domain)

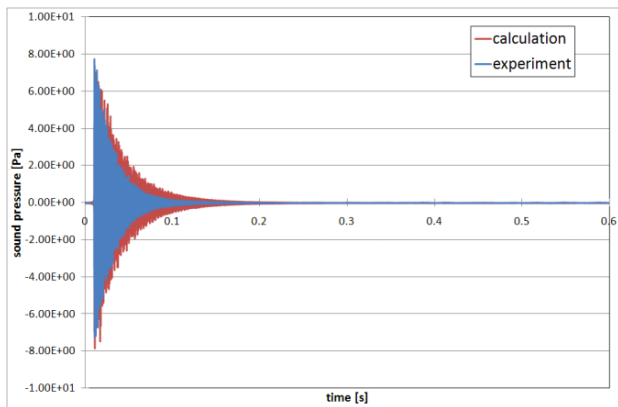


Fig. 14 Comparison of sound at measurement Location 1 (time domain)

周波数領域では、共振峰に着目すると固有振動数に一致が見られる。しかし多くの共振峰で計算値の振幅が大きくなっている。これは放射音予測プログラムに入力したモード減衰比が主な原因だと考えられる。モード減衰比は表面振動速度の実験値から求めた。そのため表面振動速度の実験と音の実験で糸の張り具合などが異なり、モード減衰比が変化することが原因だと考えられる。時間領域でも振幅の違いにより計算音が長く響く結果になった。この響きの違いは耳で聞いても確認できた。

3.4 回折音の比較

回折音の影響が大きい測定位置 2 での比較を行う。音の実験は測定位置 1 と同様の方法で行った。また比較結果には実験値、計算値に加え直接音のみの計算値を Fig. 15, Fig. 16 に示す。

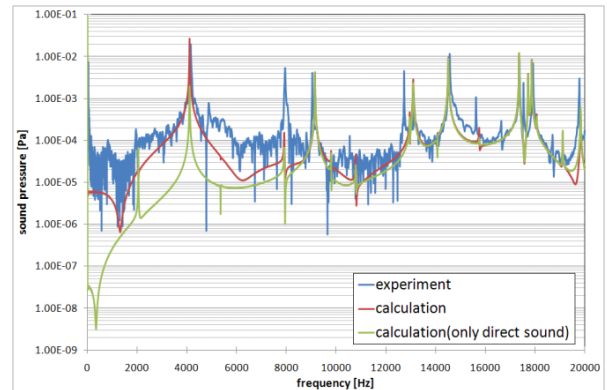


Fig. 15 Comparison of sound at measurement Location 2 (frequency domain)

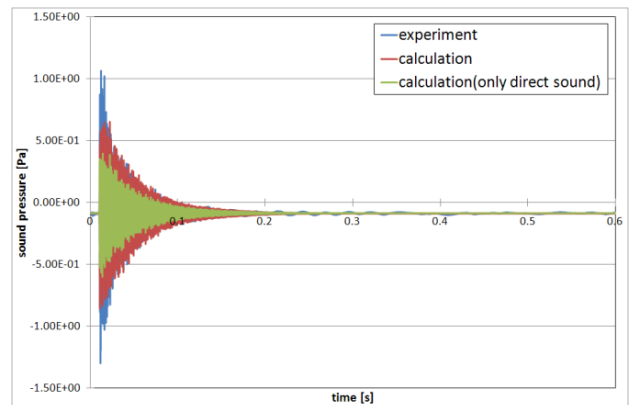
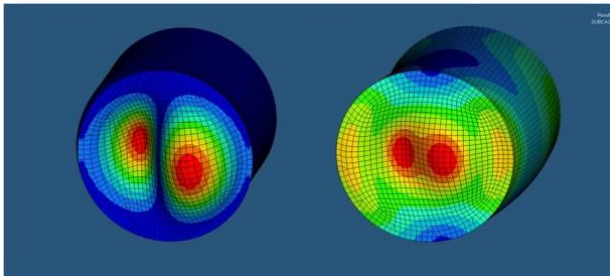


Fig. 16 Comparison of sound at measurement Location 2 (time domain)

周波数領域では、直接音のみの計算値と実験値で 0~10,000[Hz] 付近の振幅に大きな違いがみられる。それに比べ回折音を考慮した計算値の振幅は実験値と一致が見られる。このことから回折音が精度良く計算できていると考えられる。また 10,000~20,000[Hz] 付近の高周波になると直接音のみの計算値と回折音を考慮した計算値の差が少なくなっている。これは音が高周波になるほど回折しにくいためであり、このことから回折音が精度良く計算できていることが伺える。しかし回折音を考慮した計算値と実験値にも振幅の違いがみられる。4,000[Hz] 付近の振幅の違いは、直接音の比較結果と同様にモード減衰比が原因だと考えられる。また 8,000[Hz], 13,000[Hz] 付近でも振幅の違いがみられる。これは

Fig. 17 に示すように、計算が左右対称のモード形状であるのに対し、実物はこのようなきれいな左右対称のモード形状でないことが原因だと考えられる。時間領域でも上記で述べた振幅の違いにより音の響きに違いがみられる。



8,000 [Hz] 付近 13,000 [Hz] 付近
Fig.17 mode shape of cylinder model

3.5 反射音の比較

反射音の影響が大きい測定位置 3 での比較を行う。音の実験は測定位置 1 と同様の方法で行った。

まず反射音の計算に使用した拡散反射率について述べる。音の反射率は以下のように定義されている。

$$R = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \quad (11)$$

ρ_1 : 媒質 1 の密度 , ρ_2 : 媒質 2 の密度
 c_1 : 媒質 1 内の音速 , c_2 : 媒質 2 内の音速

拡散反射率はさらに対象の表面形状、音の波長などに関係する量だと考えられる。本来は円筒の拡散反射率を実験的に求めることができれば最適であった。しかし今回は拡散反射率を実験的に求めるまでには至らなかった。そのため空気に対して円筒の作成に使用したアルミ合金のほうが密度、音速ともに極めて大きいことから、今回は拡散反射率=1 に設定して計算を行った。比較結果のグラフを Fig. 18, Fig. 19 に示す。また比較結果には実験値、計算値に加え直接音のみの計算値を示す。

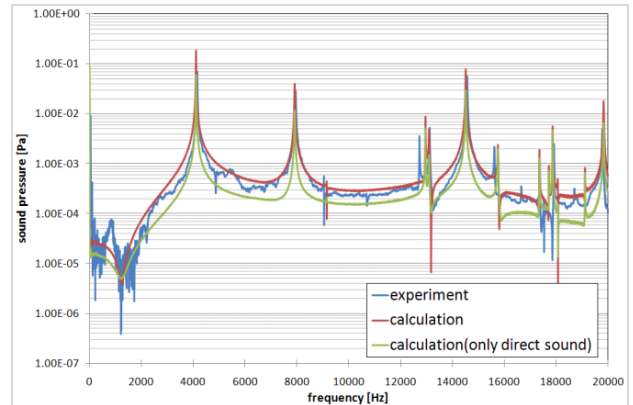


Fig.18 Comparison of sound at measurement
Location 3(frequency domain)

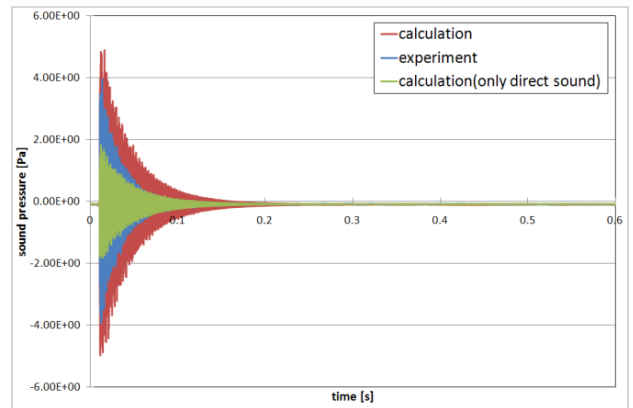


Fig.19 Comparison of sound at measurement
Location 3(time domain)

周波数領域では、直接音のみの計算値と実験値において多くの共振峰で計算値の振幅が小さくなっている。それに比べ反射音を考慮した計算値の振幅は実験値と一致が見られる。このことから反射音が精度良く計算できていると考えられる。また共振峰の裾野において直接音のみの計算値は傾斜角度が急である。しかし反射音を考慮した計算値は傾斜角度が実験値に近付いている。このことから反射音が精度良く計算できていることが伺える。しかし反射音を考慮した計算値と実験値に 4,000 [Hz] 付近で振幅の違いがみられる。これは今までの比較結果と同様にモード減衰比が原因だと考えられる。時間領域でも 4,000 [Hz] 付近の振幅の違いが大きく影響して音の響きに違いがみられたと考えられる。

3.6 円筒周囲の音の比較

今までに3箇所と比較結果から放射音予測プログラムの精度を検討してきた。しかし円筒周囲をもう少し詳細に比較したいと考えた。そのため円筒周囲を格子状に区切り、各格子点で音を測定してコンター図による比較を行った。また比較対象としている円筒は左右対称であり、周囲の音も左右対称になると考えられる。そのため円筒の左側のみを格子状に区切り測定を行った。測定位置の詳細を Fig. 20 に示す。

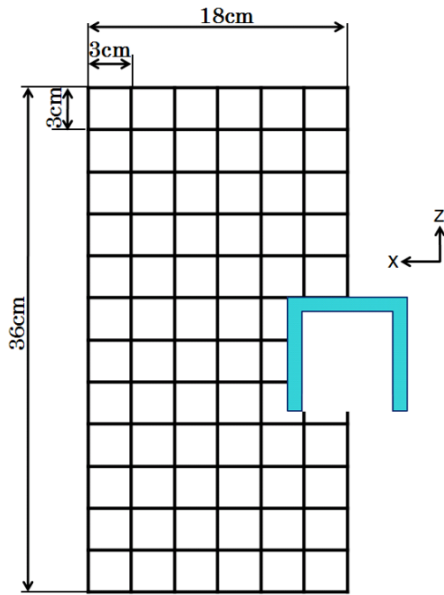
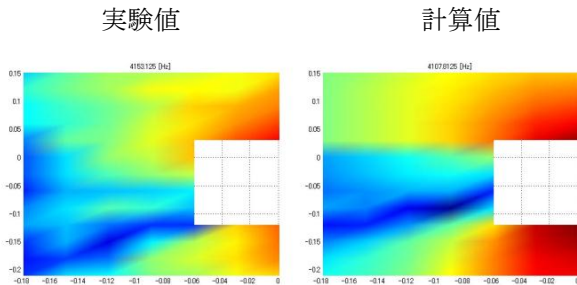
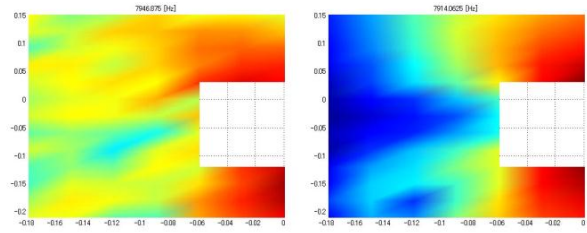


Fig.20 Location of measurement around cylinder

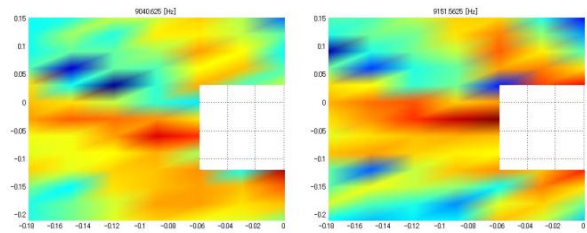
比較結果は 4,000 [Hz], 8,000 [Hz], 9,000 [Hz] 付近の共振点での音の最大振幅値を各格子点で色分けしてコンター図にしている。コンター図は MATLAB により作成した。Fig. 21 に左に実験値、右に計算値の結果を示す。またコンター図は振幅値が大きいほど赤くなり、小さいほど青くなっている。



4,000 [Hz] 付近



8,000 [Hz] 付近



9,000 [Hz] 付近

Fig.21 Comparison of contour map

4,000 [Hz] 付近の結果はモード減衰比の影響から全体で計算値の振幅が大きくなっている。8,000 [Hz] 付近の結果は計算モデルが左右対称のモード形状を示した周波数であり、実験値と計算値に差がみられる。特に回折音の影響が大きい領域では実験値と計算値に大きな違いがみられる。9,000 [Hz] 付近の結果は全体の傾向に一致が見られ精度良く計算できていると考えられる。

4. アイアンヘッドによる放射音予測プログラムの精度検討

4.1 目的

ここまでは円筒を対象に放射音予測プログラムの精度を検討してきた。ここで本来の目的であるゴルフクラブについてもプログラムの実用性を検討する。比較対象はミズノ社製のアイアンクラブ S-100 のヘッド部分を使用する。Fig. 22 および Table. 2 に S-100 の実物と計算モデルを示す。また実物と計算モデルの質量誤差についても示す。



Fig.22 S-100 and FEMmodel

Table.2 Mass error of S-100 model

Experiment [g]	FEMmodel [g]	Error [%]
257.2	256.9	-0.12

4.2 S-100 による比較

比較方法は円筒で行った実験と同様に表面振動速度、音を測定し、放射音予測プログラムによる計算値と比較する。Fig. 23～Fig. 25 に比較結果を示す。

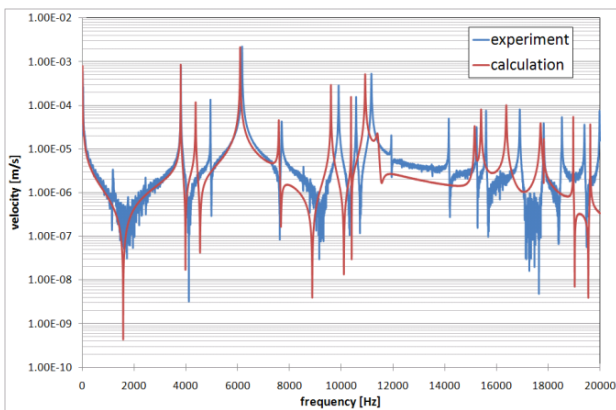


Fig.23 Comparison of surface velocity

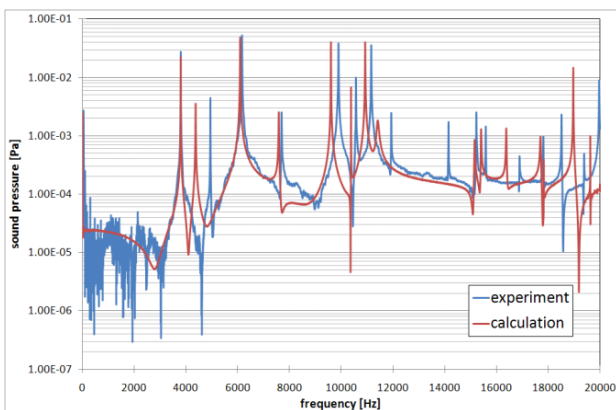


Fig.24 Comparison of sound (frequency domain)

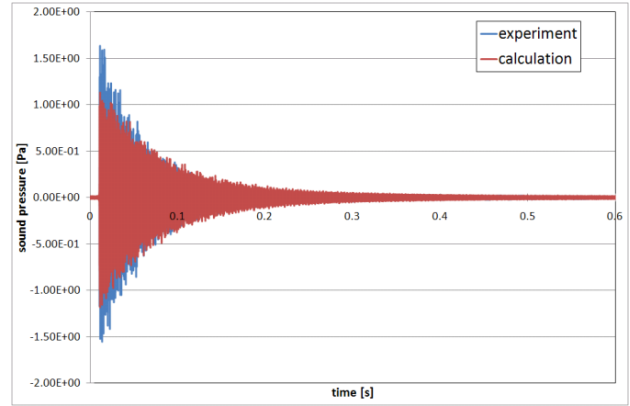


Fig.25 Comparison of sound (time domain)

まず比較結果から固有振動数に違いがみられる。特に 14,000～20,000 [Hz] では違いが大きく、14,000 [Hz] 付近では計算値に見られない共振峰が実験値に表れている。これは円筒に比べ形状が複雑であるため、有限要素モデルの精度が足りなかったことが原因だと考えられる。また振幅に関しては一致が見られるが、実際に音を聞いて比較すると計算音は甲高い音が響いていた。これは 10,000～12,000 [Hz] 付近の共振峰において、計算値の傾斜角度が急であることが原因だと考えられる。傾斜角度が急であるほど減衰の作用が小さい。そのため振幅が一致しても 10,000～12,000 [Hz] 付近の音が長く響くことになり、計算音に甲高い響きが表れたと考えられる。

5. 結論

本論文では放射音予測プログラムで今まで計算していなかった回折音、反射音の計算を試みた。そして円筒、アイアンヘッドにてプログラムの実用性を検討した。以下に本論文の結論をまとめる。

1. 円筒による測定位置 1 での比較結果は実験値と計算値に一致がみられた。そのため直接音の計算精度が高いことを確認できた。しかしモード減衰比が原因で音の振幅に違いが生じ、実際に耳で聞くと計算音が長く響く結果になった。
2. 円筒の測定位置 2 では回折音を考慮したことで実験値と計算値に一致がみられた。しかし左右対称のモード形状がみられた 8,000 [Hz]、13,000 [Hz] で振幅に大きな違いがみられた。この違いはコンター図でも確認できた。
3. 円筒の測定位置 3 では反射音を考慮したことで実験値と計算値に一致がみられた。しかし計算に使用した拡散反射率を実験的に求めるまでに

は至らなかった。そのため拡散反射率の求め方について検討が必要である。

4. S-100 による比較結果は固有振動数に違いがみられた。また振幅に一致が見られるものの、実際に音を聞いて比較すると計算音は甲高い音が響いていた。

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]松村信宏、“ゴルフクラブの音響・振動シミュレーション”、法政大学大学院工学研究科修士論文、2006
- [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]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
- [12] MSC Software、“MSC NASTRAN 2001 日本語オンラインマニュアル”、2001