

機関番号：12608

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2009～2010

課題番号：21700615

研究課題名（和文）有限要素解析によるスウィング特性を考慮した
ゴルフクラブの性能評価法の確立研究課題名（英文）Construction of a finite element model for a golf ball colliding with
a club during a swing and an evaluation of a golf club performance

研究代表者

田中 克昌（TANAKA KATSUMASA）

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号：90313329

研究成果の概要（和文）：

本研究は、構築した有限要素（FE）モデルを用いて、インパクトにおけるゴルフクラブ特性とボールの打ち出し（速度、角度、スピン）との関係を調べた。シャフトのヤング率やホーゼル付近への付加質量が、ボールの反射速度の変化を抑えたまま、角度やスピン量を変化させられることを特定した。また、スウィング中のクラブ挙動とインパクトによるボールの打ち出しを表現できるFEモデルを構築し、打ち出しを指標としてスウィングを考慮したクラブの性能評価方法を提案した。

研究成果の概要（英文）：

The golf ball rebound was analysed using the constructed finite element (FE) models by varying Young's modulus of the shaft and an added mass attached to the shaft. The effect for the rebound velocity tended to be small, and the rebound angle and spin rate were affected by the impact force which depended upon Young's modulus and the weight and position of the added mass. Also, an FE model, which can simulate the behaviour of a shaft during a 2D swing and that of impact, was constructed. Then, an evaluation method for golf club performance was developed by visualizing the results of impact behaviors as a color map on the clubhead face.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学 スポーツ科学

キーワード：スポーツ工学, ゴルフ, 有限要素解析, 衝撃工学, 高速度撮影

1. 研究開始当初の背景

近年のゴルフプレーにおけるボールの飛距離や方向性の向上は、プレーヤーのパフォーマンスの向上だけでなく、ゴルフクラブに代表される用具の進歩による影響が大きいと言われている。ボールの飛距離や方向性を

支配するのは、空力的な問題を除けばインパクトから弾道に繋がるボールの速度、角度、スピン（以下、打ち出し）に集約される。そして、この打ち出しは、クラブとボールの相互作用により決定される。

クラブ、特にドライバーはその材料が軽く

て強いチタン合金へと変化することによって、中空構造であるヘッドをより薄肉とすることが可能になり、ドライバーの開発はヘッドの衝突面をトランポリンのように反発を高めてボールの飛距離を増大させる方向性で行われてきた。しかし、このようなクラブの高反発化に対して、ヘッドの反発係数に上限値を設定する規則が設けられ、この値を上回る高反発なクラブの使用が制限された。このためドライバーの開発は、ヘッドの反発を基準値内に抑えながらボールの角度やスピンの着目し、ボールの打ち出しを考慮することにより、飛距離を向上させる方向性になってきている。

また、高反発なクラブの使用が制限される一方で、ヘッドとシャフトが容易に取り換えやすい設計の着脱式のクラブが解禁された。このことによって、数個のヘッドと数種類のシャフトを用意しておけば、プレーする前に、プレーヤーが好みやそのときの状況に適したヘッドとシャフトの組み合わせのクラブを使用することができるようになる。

このように、ヘッドの反発係数に明確な上限値が設定された結果、設計段階で反発係数の厳密な予測が求められるようになり、それに対して有効な手法であるコンピュータモデルを用いた衝突解析には、より高い精度が求められている。また、打ち出しを考慮して飛距離を向上させるという開発コンセプトにおいて、インパクトにおけるクラブ特性とボールの打ち出しとの関係を把握することが重要となってくる。そして、ヘッドとシャフトの組み合わせを選択できるようになることにより、それらの組み合わせによって、どのようなボールの打ち出しになるのか、プレーヤーのパフォーマンスにどのような影響を与えるのかについて把握しておくことは重要となってくる。

さらに、シャフトを考慮し、スウィングからインパクトまでを一連に扱い、ヘッドとシャフトの組み合わせ、スウィング特性、スウィング中のクラブ挙動やボールの打ち出し、の関係について把握しておくことは、目まぐるしく変化する規則や多様な要求に対して有効な指針を示すために重要であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究ではインパクトにおけるクラブ特性とボールの打ち出しとの関係を把握するとともに、スウィング中のクラブ挙動とインパクトによるボールの打ち出しを表現できる有限要素 (FE) モデルを構築し、スウィング特性を考慮したゴルフクラブの性能評価法を確立することを目的とした。

3. 研究の方法

(1)有限要素法による模擬クラブとボールとの衝突解析モデルの構築

①解析モデルの精度検証のための衝突実験

解析モデルの精度を検証するために、エアガンから発射されたゴルフボールを、シャフトのグリップ部に相当する部位を拘束したクラブに衝突させる実験を行った。そして、衝突前後のボールの運動とクラブのひずみ応答を計測した。ボールの運動は、高速度ビデオカメラ (HSVC) を用いて撮影した画像から、衝突速度、反射速度、反射角度、スピン量を求めた。また、ひずみ応答は、ヘッドとシャフトにひずみゲージを貼り付けて計測した。

本研究では、円筒形状の中空構造であるヘッドにシャフトを取り付けたクラブ (模擬クラブ) を製作して用いた。模擬クラブのヘッド (図 1) はドライバーヘッドの仕様 (質量、体積、重心位置) を考慮して形状を単純にしたものであり、材料にはチタン合金を用いた。なお、本研究ではロフト角 α を $0, 10^\circ$ とした。また、シャフトはスチール製を用いた。このように、ヘッドやシャフトの機械的特性を明確に定義できる模擬クラブを用いることにより、ボールの打ち出しとクラブ特性との関係を把握しやすくなるようにした。

また、同様の方法にて、市販のゴルフクラブ (ドライバー) とボールとの衝突実験を行うことにより、模擬クラブによるボールの打ち出しの傾向が一般的なゴルフクラブのそれと一致することを確認した。

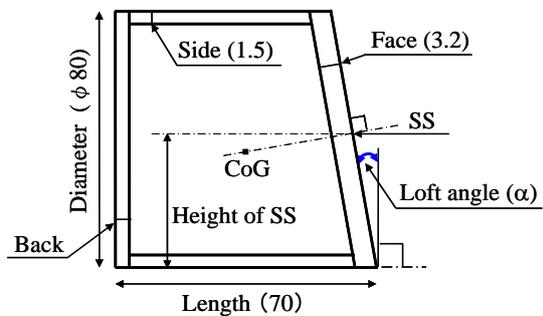
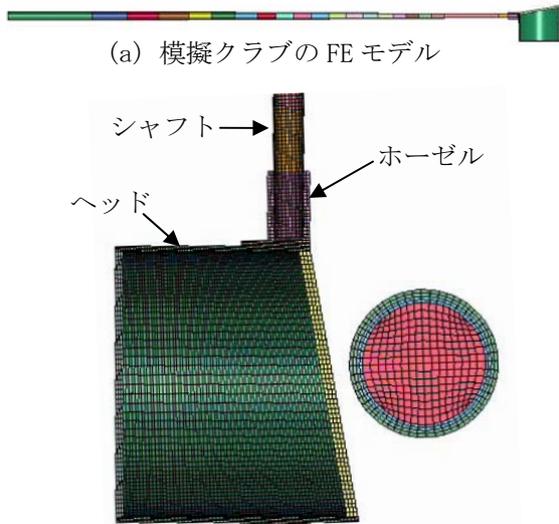


図 1 模擬クラブの断面図

②模擬クラブの FE モデルの構築

模擬クラブの FE モデルは、実験で用いたクラブと同様に、ヘッド、ホーゼル、シャフトから構成され、図 2 に示すように構築した。ヘッドおよびホーゼルの FE モデルは 8 節点ソリッド要素により構成し、その材料モデルは線形弾性体とした。また、シャフトの FE モデルは 4 節点シェル要素で構成し、ステップについても表現した。その材料モデルは線形弾性体とした。

なお、ボールの FE モデルは研究代表者がすでに構築したものをを用いた。



(a) 模擬クラブのFEモデル
 シャフト → ホーゼル
 ヘッド
 (b) 模擬クラブ (拡大) とボールのFEモデル
 図2 模擬クラブとボールとの解析モデル

③衝突解析モデルの精度検証

衝突解析は、実験と同様に模擬クラブの衝突面にボールを衝突させて行い (図2)、ボールの運動およびクラブのひずみ応答を算出した。そして、その解析結果と実験結果とを比較することにより、解析モデルの精度を検証した。なお、解析ソルバーには、LS-DYNA Ver. 9.71 を使用した。

(2) 衝突解析によるクラブ特性がボールの打ち出しに与える影響に関する考察

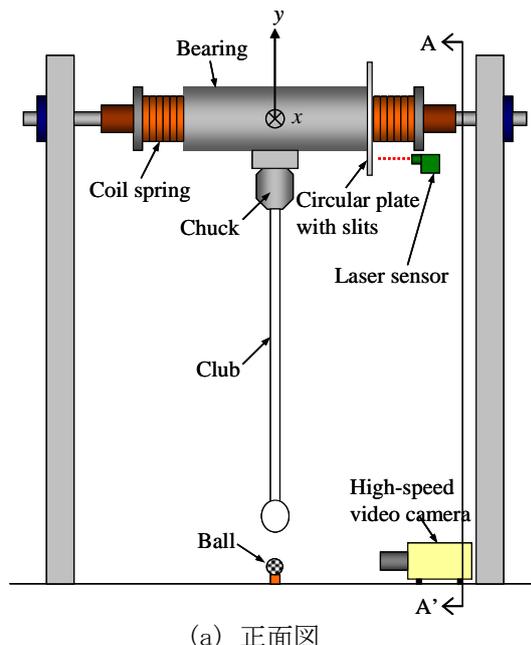
構築した衝突解析モデルを用いて、クラブ特性を変化させてボールとの衝突解析を行い、ボールの打ち出しへの影響を調べた。変化した特性は、シャフトの曲げ剛性、質量分布、取付位置とした。曲げ剛性については、それを決定するヤング率と断面二次モーメントのうち、本研究ではヤング率を変化させた。また、質量分布は、FEモデルの節点に質量を与え、その位置や大きさを変化させた。これは、プレー時にシャフトに鉛テープなどを貼り付けることにより、クラブのバランスを調整することを想定したものである。

(3) スウィング実験によるクラブ挙動およびボールの打ち出しの取得

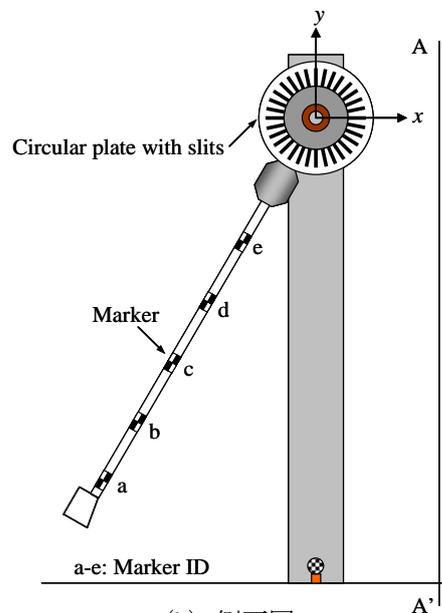
FE解析において、スウィングを表現するために必要な入力条件や境界条件、また解析モデルの精度を確認するために必要なクラブおよびボールの挙動を取得するために、スウィングからインパクトまでを再現する実験を行った。ゴルフスウィングは三次元的な運動であるが、本研究では現象を単純化して、二次元スウィング運動を対象とした。

①スウィング装置の製作と実験の実施

スウィングからインパクトまでを再現す



(a) 正面図



(b) 側面図

図3 製作したスウィング装置

るために、クラブを円運動させる機械装置 (図3) を設計製作し、実験を行った。この装置は、ねじりばねを用いて軸受に動力を与え、軸受は回転軸に垂直な xy 平面内で円運動する構造である。実験は、模擬クラブを軸受に取り付けたチャックに固定してスウィングさせ、ボールをインパクトさせた。

②クラブとボールの動的挙動の同時計測

スウィング中のシャフトの挙動およびグリップ部の運動、インパクト前後のヘッドおよびボールの運動を同時に計測した。シャフトの挙動はスウィング全体を撮影した HSVC の画像を用いて、シャフトに貼り付けたマーカー (図3) の軌跡から求めた。ヘッドおよび

ボールの運動は、インパクトを撮影した別のHSVCの画像を用いて、ヘッドの衝突速度および衝突角度、ボールの打ち出し速度、打ち出し角度、スピン量を算出した。また、グリップ部の運動は、スリットを入れた円板を軸受の側面に取り付け(図3)、円板に照射したレーザー光の反射応答を読み取ることにより角速度として計測した。

(4) スウィングからインパクトまでを表現する有限要素解析モデルの構築

スウィングは、実験から取得したグリップ部の角速度を、構築したクラブのFEモデルのグリップ部に与えることによって表現した。このとき、グリップ部は実験時のグリップ部の設置状況を考慮して、スウィングの回転軸まわりの回転以外の運動を拘束した。また、インパクト時のボールとヘッドとの境界条件は、衝突解析モデルと同様にした。

そして、FE解析からシャフトの挙動、ヘッドおよびボールの運動を算出し、これらの結果を実験結果と比較することにより、モデルの精度を検証した。

(5) 有限要素解析によるクラブの性能評価およびその方法の提案

構築した解析モデルを用いて、ボールの衝突位置を変化させた解析を行い、衝突位置によるボールの打ち出しの変化を調べた。そして、ボールの打ち出しを指標として、その分布をヘッドの衝突面上にマッピングすることによって、クラブの性能を評価する方法を提案した。さらに、スウィングの有無によるそのマップの傾向を比較し、スウィングを考慮してクラブを評価することの有効性について検討した。

4. 研究成果

(1) 高精度な衝突解析モデルの構築

模擬クラブとボールとの衝突挙動を高い精度で表現する解析モデルが構築できた。

その結果の一例として、図4はボールの反射速度について実験結果と解析結果を比較したものであり、衝突速度ごとに模擬体のロフト角に対する結果を示している。また、図5は衝突面とシャフトのひずみ応答について示したものである。これらの結果より、解析結果と実験結果はよく一致していることが確認できた。このことから、構築したFEモデルは、ボールと模擬クラブとの衝突挙動を高い精度で再現できており、インパクト挙動を詳細に考察するために十分な精度を持っているといえる。また、このモデルの構築手法は、他のクラブにも応用することができ、この方法により構築したモデルを用いて反発係数の厳密な予測も可能であるといえる。

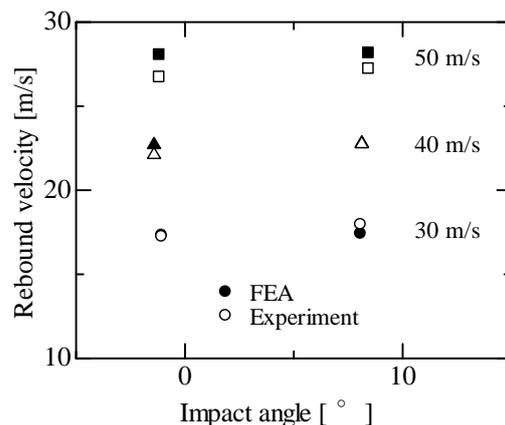


図4 反射速度に関する実験結果と解析結果

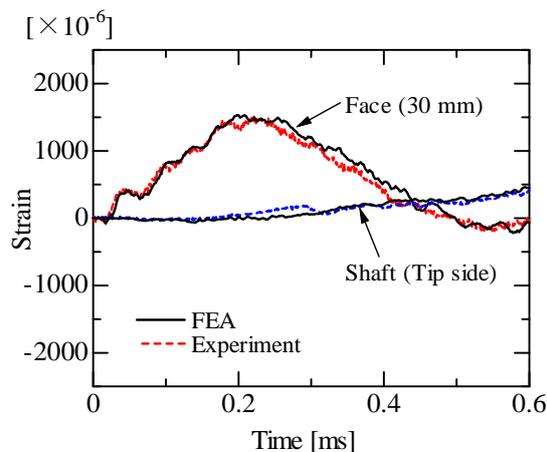


図5 ひずみ応答に関する実験結果と解析結果

(2) インパクトにおけるクラブ特性がボールの打ち出しに与える影響

インパクトにおいてクラブ特性がボールの打ち出しに与える影響やその要因として、以下のことが明らかになった。

シャフトの曲げ剛性は、反射速度への影響は小さく、反射角度やスピン量に影響し、ヤング率の増加とともに角度を大きく、スピン量を小さくさせる傾向となった。そして、その影響は、曲げ剛性の変化により、衝突荷重、特にシャフト軸方向成分の荷重が変化することに依存していることを特定した。

シャフトの質量分布は、反射速度への影響は小さいものの、反射角度とスピン量への影響は大きかった。この影響の度合いは、付加質量の位置がヘッドに近いほど、またその質量が大きいくほど、大きくなる傾向となった。そして、ボールの打ち出しは、ヘッド周辺部の質量分布に伴って変化する衝突荷重の影響を受けていることを特定した。

本研究で対象としたクラブ特性に着目することは、ヘッドの反発を基準値内にしながら角度やスピン量を調整して飛距離を向上させるクラブ開発の要求に対して、有効な手

段のひとつとなり得る可能性を示すことができた。

(3) スウィングからインパクトまでの解析モデルの構築

図 6 はシャフトの挙動として、実験と FE 解析から算出したシャフトのマーカ (図 3) の軌跡を比較したものである。この図において、原点はスウィングの回転軸に相当し、スウィングが座標 (0, 1000) 付近から始まり、ボールとインパクト (座標 (0, -1000) 付近) するまでの軌跡を示している。なお、図中の凡例 a~e はマーカ ID (図 3) に対応している。この図より実験結果と解析結果はよく一致していることが確認でき、構築した解析モデルがシャフトの挙動を高い精度で表現できていることを示している。

また、表 1 は実験と解析から算出したインパクト時のヘッドおよびボールの運動を示したものである。実験結果と解析結果は、おおむね一致する傾向にあることが確認できた。ここで、角度の精度は速度やスピン量のそれに比べて低い傾向にあるものの、この精度は、シャフトとヘッドを結合しているホーゼル付近のモデルを改良することによって向上できると考えられる。

このように、構築したモデルはスウィングからインパクトまでを同時に取り扱うことができ、そのときのクラブとボールの挙動を実用的な精度をもって再現できた。この精度の高い結果は、ボールやクラブの FE モデルが高精度に構築されていることに加えて、グリップ部の運動やその拘束、ボールとヘッドとの摩擦が適切に表現されていることによって得られているといえる。

他の研究では、スウィングとインパクトの解析を別々に扱ったり、どちらかに主眼が置かれたりすることが多く、また解析精度の検証が十分とはいえないのが現状である。これに対して、本研究では、スウィングとインパクトを同時計測し、その結果をもとに検証を行うことにより、解析モデルの精度を保証できており、この点は優位である。また、本研究におけるモデルの構築方法は、ゴルフロボットのようにグリップ部の運動や拘束が定義しやすい条件におけるクラブの評価に対して適用できると考えられる。今後は、より適用範囲を広げるために、三次元挙動を取り扱うことができるモデルへと拡張していくことが望まれる。そのために、まずスウィングからインパクトまでの三次元挙動に関する高精度な計測データを蓄積していくことが課題として挙げられる。

(4) スウィングを考慮したクラブ性能評価

図 7 は、マッピングの例として、衝突位置の変化に対するボールの打ち出し速度の解

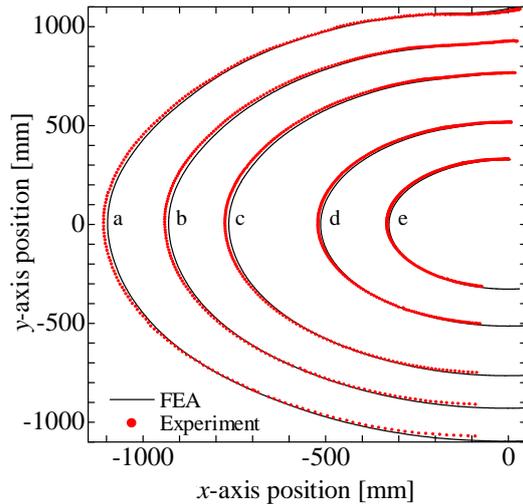


図 6 スウィング中のシャフトの挙動

表 1 ヘッドおよびボールの運動に関する
実験結果と解析結果

	実験結果	解析結果
衝突速度	20.8	20.3
衝突角度	10.6	12.9
打ち出し速度	33.7	32.9
打ち出し角度	8.9	11.3
スピン量	1107	1161

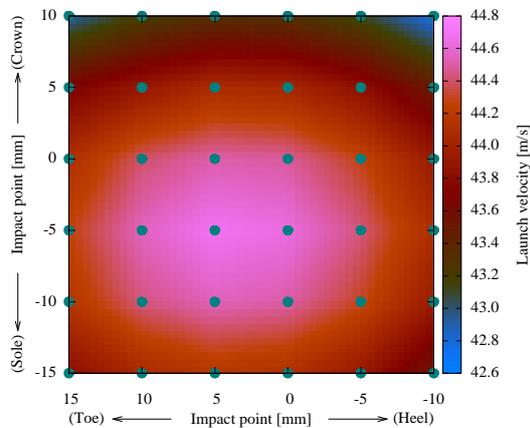


図 7 マッピングによる可視化の例 (速度)

析結果を示したものである。座標 (0, 0) は、衝突位置がスイートスポット (SS) であることを意味している。このように、ボールの打ち出しを指標として、その分布をヘッドの衝突面上にマッピングすることによって、クラブ性能を評価する方法を提案した。

また、図 7 より打ち出し速度が最も高くなったのは、SS よりもやや Toe 側かつ Sole 側に衝突した場合であった。この結果は、クラブヘッドによる反発のみを考慮した場合に

において SS での反発が最も高くなる傾向と異なっていた。このように、本解析モデルによって、従来のインパクトのみに着目した評価では得られなかった傾向を把握することができ、スウィングを考慮してクラブ性能を評価する有効性を示すことができた。今後は、異なるクラブによっても同様の評価が可能であることを確認することにより、この方法の汎用性をより高めることが望まれる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

① 田中克昌, 寺西幸弘, 宇治橋貞幸, 有限要素解析によるゴルフクラブ特性がボールの反発特性に与える影響の解明, 日本機械学会論文集 C 編, 76 巻 772 号, pp. 3343-3349, 2010, 査読有

〔学会発表〕(計3件)

① 田中克昌, 有限要素解析によるシャフトの取付位置がゴルフボールの反発特性に与える影響の考察, 日本機械学会シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2010, 2010 年 11 月 5 日, 東京工業大学

② Katsumasa Tanaka, Experimental and finite element analyses of a golf ball colliding with a simplified club during a two-dimensional swing, 8th Conference of the International Sports Engineering Association, 2010.7.14, Vienna (Austria)

③ Katsumasa Tanaka, Construction of Finite Element Models for Impact Between Golf Ball and Club, 4th Asia-Pacific Congress on Sports Technology, 2009.9.21, Hawaii (USA)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 克昌 (TANAKA KATSUMASA)

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・助教

研究者番号: 90313329