

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：32613

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24700646

研究課題名(和文) ゴルフスイングを取り入れた衝突解析モデルによるクラブ性能評価法の開発

研究課題名(英文) Development of an evaluation of golf club performance using a finite element model for representing collision of a ball with a club during swing

研究代表者

田中 克昌 (TANAKA, Katsumasa)

工学院大学・工学部・准教授

研究者番号：90313329

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円、(間接経費) 1,050,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、有限要素法を用いてスイング中におけるクラブの挙動およびクラブによってインパクトされたボールの挙動を高い精度で表現できるシミュレーションモデルを構築した。また、構築したモデルを用いてスイングの特性を変化させたシミュレーションを行い、スイングを伴うクラブによる衝突解析から、ボールの打ち出しにはクラブヘッドの反発特性に加えて、スイングによって生じるヘッドの速度成分が寄与すること、さらにスイング特性を変化させた解析から、スイングの特性がインパクト直前のヘッドの挙動に及ぼすについて調べた。そして、クラブ性能の予測や評価を行う上で、本研究で構築した解析モデルが有用となる可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：The objective of this study was to construct a finite element model for simulating the mechanical behavior of a golf club and ball from swing to impact, and to evaluate club performances using the constructed model. An experiment using a golf robot was conducted to obtain the motion of the shaft grip, and the behavior of the club and ball. The swing model was developed by inputting the positional coordinate data of the grip, which was obtained from an experiment, into the grip model. The simulation results generally matched the experimental results. The ball launch behavior was analyzed using the model with different ball impact points. The ball launch velocity at impact points situated on the toe and sole side, rather than the sweet spot (SS), tended not to decrease as much from the SS impact. It was estimated that the trend was attributed to the distribution of the impact velocity of the clubhead, which tended to increase towards the toe and sole, from the heel and crown on the face.

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 スポーツバイオメカニクス 機械力学・制御 有限要素解析

1. 研究開始当初の背景

他国に例を見ないほど急速に高齢社会を迎えた日本において、余暇生活の充実や心身の健康維持に対する意識は年々高まっており、この手段としてスポーツの重要性が増している。ゴルフは年齢や性別を問わず、体力や技量に応じて自分のペースで取り組める点で、生涯にわたって楽しめるスポーツのひとつである。また、ゴルフボールをまっすぐ遠くに飛ばす爽快感は、他のスポーツにない魅力である。そのため、ゴルフ用具には「よく飛ばす」性能が要求される。

このような要求に対して、ゴルフクラブの開発は、主にボールの飛距離や方向性の向上の視点から行われている。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打ち出し(速度、角度、スピン)に集約され、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。このために、クラブの開発においてボールの打ち出しを正確に把握することが重要である。

また、クラブの開発は用具規則に対応することも重要である。近年、開発の方向性に大きく影響したクラブヘッドに関する規則として、ヘッドの反発係数に上限値が設定されたことが挙げられる。これにより、飛距離向上のための開発の方向性は、従来までのヘッドを高反発にすることから、ヘッドの反発を規則内としながらボールの角度やスピンを考慮することへと変化した。さらに、ヘッドには体積や慣性モーメントにも上限値が設定されている。このようにヘッドにさまざまな制限が設けられた結果、開発の対象をヘッドのみではなく、シャフトを含めたクラブとし、シャフトの特性を活かしてクラブ全体として飛距離を向上させることが重要になっており、そのために特にスイングを考慮した開発が求められている。

このように変化する規則や多様な要求に対応するために、数値解析を用いた開発設計が不可欠であり、そのための解析モデルにはより高い精度が要求されている。そして、スイング、インパクト、弾道の全体を見据えたクラブの開発が必要とされ、そのために、ヘッドとシャフト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、さらに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が重要となっている。

以上のように、スイングを考慮し、クラブ全体としてボールの飛距離や方向性を向上させるといった新たな開発コンセプトに対して有効な指針を示すためには、スイングからインパクトまでを一連として扱い、ヘッドとシャフトの組み合わせやスイング特性によって、スイング中のクラブの挙動やボールの打ち出しを予測できることは重要であると考えられる。さらに、このような視点からクラブの性能評価が行えることは、プレーヤー

がクラブを選択する上で有用な情報になることが期待される。

2. 研究の目的

本研究では、有限要素(FE)法を用いてスイング中におけるクラブの挙動およびクラブによってインパクトされたボールの挙動を高い精度で表現できるシミュレーションモデルを構築するとともに、そのモデルを用いてクラブの力学特性やスイングの特性を変化させたシミュレーションを行い、これらの特性とクラブの挙動やボールの打ち出しとの関係を明らかにすることにより、インパクト時のクラブヘッドの挙動やボールの打ち出しを指標としたクラブの性能評価方法を開発することを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 解析モデル構築のためのロボット実験

スイング軌道およびクラブ挙動の計測
スイングからインパクトまでを表現するモデルを構築するために、図1に示すように、ゴルフロボットを用いてクラブをスイングさせ、スイング中のロボットの運動およびシャフトの挙動、インパクト直前のヘッドの挙動を計測した。

実験に用いたロボットは、図1aに示すように、二重振り子を構成する2本のレバーとこれらの3軸まわりの回転によってスイングを表現している。また、3つの軸は、図1bに示すようにスイング平面(上部レバーの回転による軌跡としてできる仮想的な平面)に垂直な2つの軸(アーム軸、グリップ軸)とスイング平面に平行なシャフト軸線上の軸(シャフト軸)であり、アーム軸はスイング平面内に固定されている。そして、スイングは、上部レバーのアーム軸まわり、下部レバーのグリップ軸とシャフト軸まわりの回転によって表現されている。

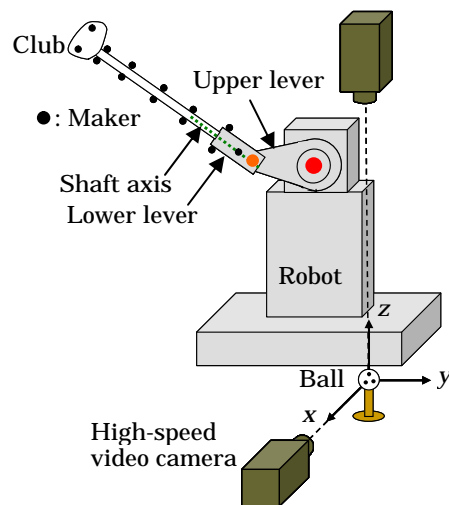
ロボットの運動およびシャフトの挙動は、光学式三次元動作解析装置を用いて、ロボットとクラブに貼り付けたマーカを追尾することにより計測した。ロボットの運動は、その運動を規定できるようにロボットに貼り付けたマーカの位置座標から算出した。またシャフトの挙動は、図1aに示すように、シャフトに沿ってホーゼルから同一距離に貼り付けた2つのマーカの位置座標の midpoint を算出することにより計測した。さらに、シャフトに一軸および二軸のひずみゲージを貼り付け、スイング中のひずみ応答も計測した。そして、ロボットの運動およびシャフトの挙動は、解析モデルの構築において、スイングの入力の算出およびシャフトのFEモデルの精度検証のためにそれぞれ用いた。

ヘッドの挙動は、図1aに示すように、2台の高速度ビデオカメラを用いて、側方(-x方向)および上方(-z方向)から撮影した。そして、撮影画像からヘッドに貼り付けたマーカの位置座標を用いて、衝突速度、実効ロフ

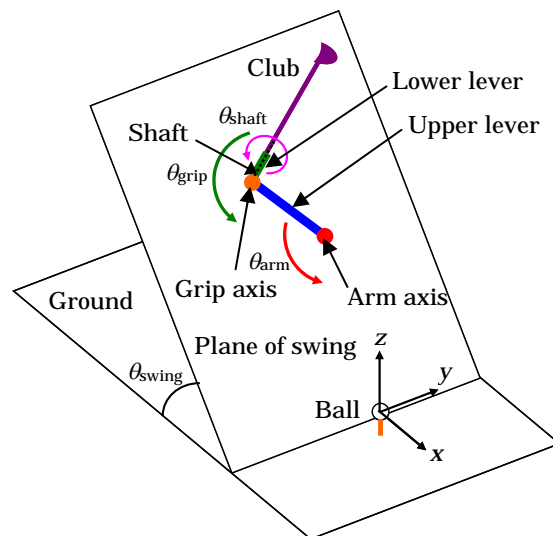
ト角，フェースの開きを算出した．衝突速度は，側方カメラの画像における衝突面に最も近いマーカの位置座標から，速度の各成分を求め，それを合成することによって算出した．実効口フト角は，側方カメラの画像を用いて，衝突面に沿って貼り付けた2つのマーカを結ぶ線分とz軸とのなす角として算出し，x軸に対して反時計回りの方向（フェース面が上を向く方向）の角度を正とした．フェースの開きは上方カメラの画像を用いて，衝突面に沿って貼り付けた2つのマーカを結ぶ線分とx軸とのなす角として算出した．フェースの開きはz軸に対して時計回りの方向の角度（いわゆる，フェースが開く方向）を正とした．これらは，解析モデルにおけるヘッドの挙動の精度を検証するために用いた．また，スイングは，ヘッドの衝突速度が30および40 m/sとなるように設定した．

スイングを表現するための回転角の算出
 3軸まわりの回転によってスイングを表現するためには，図1bに示すように，アーム軸，グリップ軸，シャフト軸まわりの各回転角 θ_{arm} , θ_{grip} , θ_{shaft} に関する時刻歴，さらにグリップ点（グリップ軸とスイング平面との交点）の位置座標の時刻歴，スイング平面と地面とのなす角 θ_{swing} が必要となる．本研究ではこれらを，三次元動作解析装置によって撮影されたロボットのマーカの位置座標から算出した．図2は，3軸まわりの角度に関する時刻歴（ヘッドの衝突速度：30 m/s）を示したものであり，時刻0はダウンスイング開始時を表している．また， θ_{swing} は，上部レバーに貼り付けたマーカの軌跡によってできる平面とx軸とのなす角として算出した．

(2)スイングを取り入れた解析モデルの構築
 解析モデルを構築するにあたり，モデル化を単純するためにロボットのレバーに相当する部位を省略し，スイングをグリップ点の並進運動，グリップ軸まわりの回転 $\theta_{arm} + \theta_{grip}$ およびシャフト軸まわりの回転 θ_{shaft} に関する時刻歴を与えることによって表現した．
 このような回転および並進運動をFEモデルによって表現するために，図3に示すような2つの立方体モデル（図3では重なって表示されている）を用いた．立方体モデルは，ともに八節点ソリッド要素により構成し，その材料特性を剛体とした．1つ目の立方体モデル（cube 1）を用いて，その中心を原点とするローカル座標系（0-XYZ座標系）を定義し，Y軸およびZ軸をそれぞれシャフト軸およびグリップ軸として設定した（中心0およびXY平面は，それぞれグリップ点およびスイング平面に相当する）．次に，2つ目の立方体モデル（cube 2）を用いてシャフトモデルを拘束し，cube 2に対して，グリップ点に関する全体座標系における並進運動，グリップ軸まわりの回転運動としてZ軸まわりに $\theta_{arm} + \theta_{grip}$ およびシャフト軸まわりの回転運動



(a) ロボットおよびカメラ配置



(b) 回転軸および座標系の定
 図1 ロボット実験の概要

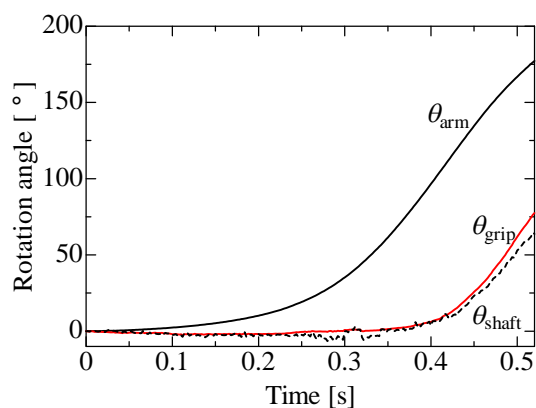


図2 実験より取得した角度の時刻歴

としてY軸まわりに θ_{shaft} の時刻歴をそれぞれ与えることにより，スイングを表現した．
 また，スイング開始はダウンスイングからとし，このときのクラブの姿勢は，実験より得たシャフト上の2点とヘッド上の1点のマーカの位置座標に対して，FEモデルの同位置の節点が一致するように決定した．そして，実験から得られた並進および回転運動の時刻歴を用いてスイングを再現した．なお，解析ソルバーにはLS-DYNA Ver. 9.71を用いた．

そして、構築した FE モデルによって、スイング運動およびクラブの挙動が表現できることを確認するために、解析からグリップ点の位置座標、スイング中のシャフトの挙動、インパクト直前のヘッドの挙動を算出し、これらの解析結果と実験結果を比較することにより、モデルの精度を検証した。

(3) 構築した解析モデルを用いたクラブの性能評価

スイングを取り入れた衝突解析によるボールの衝突位置の違いに着目したクラブの性能評価

クラブとボールとの衝突解析を、クラブに速度を与えた場合と、クラブをスイングさせた場合の条件にて行い、両者から得られるボールの打ち出しを比較した。クラブをスイングさせる場合の解析には、構築したモデルを用いた。一方、クラブに速度を与える場合の解析では、クラブの姿勢を、スイングさせた解析から得られたインパクト時のクラブヘッドの姿勢と同じくし、シャフトの変形は考慮しなかった。その速度はスイングさせた解析から得られたヘッドのスイートスポット (SS) における大きさとし、 y 軸と平行に与えた。

両者の解析において、クラブヘッドに対するボールの衝突位置は、SS を中心とする 20 mm の正方形内に対して 5 mm 間隔にて Toe-Heel および Sole-Crown 方向に変化させた計 25 点とした。そして、各衝突位置に対してボールの打ち出し速度、打ち出し角、バックスピン量およびサイドスピン量を算出した。

スイング特性がインパクト時のクラブ挙動に及ぼす影響

構築したモデルを用いて、スイング特性を変化させた解析を行い、その変化がインパクト直前のヘッドの挙動に及ぼす影響を調べた。このことにより、クラブの挙動に影響を及ぼすスイング中の動きを特定するとともに、構築したモデルがクラブの性能評価に対して有用となることを検証した。

解析は、 θ_{grip} の時刻歴を変化させた入力を用いて行った。 θ_{grip} は、図 2 に示した時刻歴を基準とし、式(1)に示すように k を変化させることによって入力される角度の加速度を変化させた。これは、 k の増加とともに、インパクトに向かってグリップ軸まわりの角速度が大きくなる履歴を表している (t_{impact} はスイング開始からインパクトまでの時間である)。

$$\theta_{grip}(k) = \left(\frac{t}{t_{impact}} \right)^k \theta_{grip}, \quad k = 0, 0.5, 1, 2 \quad (1)$$

そして、角度の入力を変化させた解析を行い、インパクト直前のヘッドの衝突速度、実効ロフト角、フェースの開きを算出した。

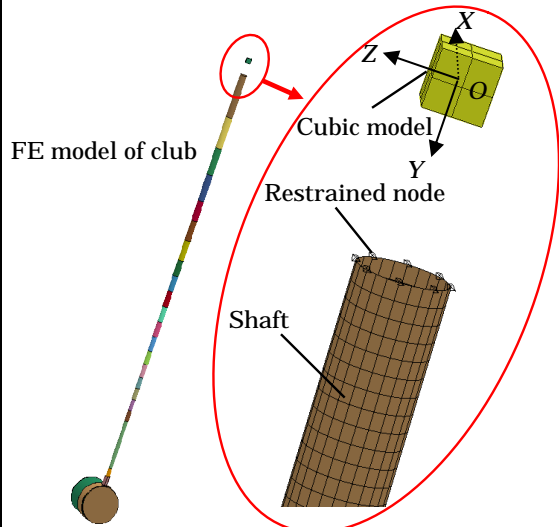


図 3 スイングを表現するためのモデル

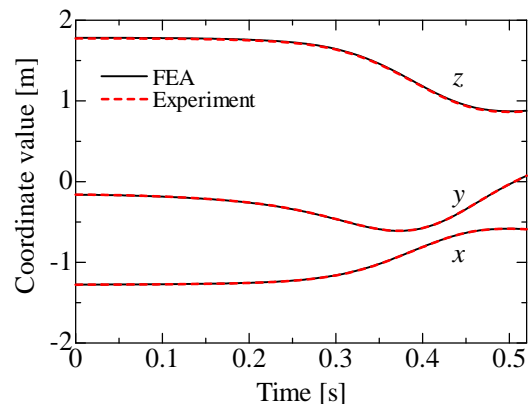


図 4 グリップ点における位置座標の時刻歴

4. 研究成果

(1) 構築したモデルの精度検証

図 4 は、グリップ点の位置座標について解析結果と実験結果 (ヘッドの衝突速度: 30 m/s) を比較したものであり、各座標の時刻歴 (時刻 0 はダウンスイング開始を表す) を表示している。両者の結果はよく一致しており、前述した方法によってスイング運動を表現できていることが示された。

図 5 は、シャフトの挙動として、ホーゼルの位置に相当するマーカ座標の時刻歴について、解析結果と実験結果 (ヘッドの衝突速度: 30 m/s) を比較したものである。また、図 6 は、ヘッドの衝突速度、実効ロフト角、フェースの開きについて解析結果と実験結果を比較したものである。シャフトおよびヘッドの挙動ともに、解析結果と実験結果はよく一致しており、このことからクラブの FE モデルがスイング中のクラブ挙動を高い精度で表現できているといえる。

以上のように、構築した解析モデルによって、スイング運動およびスイング中のクラブ挙動が表現できることが確認できるとともに、このように回転角を用いてスイングを表現することによって、スイングのパターンを変化させることができるようになり、スイン

グの特性に応じたクラブ評価への応用が可能になると考えられる。

(2) スイングの有無がボールの打ち出しに及ぼす影響

図7は、2種類の衝突解析から得られた衝突位置に対するボールの打ち出しに関する分布図である。図中の点は解析が行われた衝突位置を意味している。また、図中の値は、異なる衝突位置から得られた結果の中で最も大きい値によって各衝突位置の結果を除すことによって、割合として表示した。解析が行われていない範囲の値は、隣接する衝突位置における結果を線形補間することによって算出した。図の原点はヘッドのSSに相当しており、Toe-Heel および Sole-Crown 方向は図中に示すとおりである。

打ち出し速度の分布は、両解析条件によって大きく異なる傾向となった。クラブに速度を与えた場合は、SS付近において打ち出し速度が最大となり、衝突位置がSSから離れるにつれて低下する傾向となった。SSでのインパクト時に速度が最大になるというクラブヘッドの設計コンセプトを考慮すると、このような傾向はヘッドの反発特性を反映した結果であると考えられる。これに対して、スイングをさせた場合はSSからToeおよびSole側にかけての範囲において速度が大きくなり、そして、他の範囲における速度の低下は初速度を与えた解析の場合よりも小さくなる傾向となった。

スイングをさせた解析から、インパクト時のToe, Heel, Sole, Crownの位置における速度および速度成分を調べたところ、位置によって異なる傾向となった。衝突速度の大きさは、Toe-Heel方向はToe側ほど、Sole-Crown方向はSole側ほど大きくなった。また、各位置における速度成分の大きさを比較したところ、yおよびz成分は衝突速度の大きさと同様の大小関係であった。このような速度の傾向には、スイングに伴って生じるシャフトの挙動が影響していると考えられる。

このように、クラブをスイングさせたときのボールの打ち出しは、クラブの反発特性と

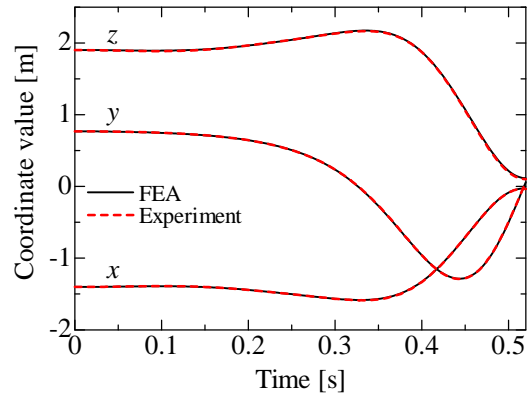
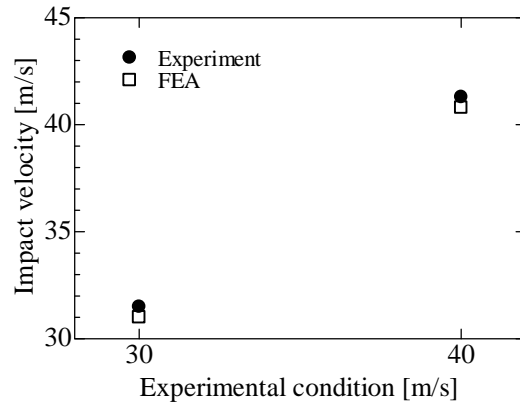
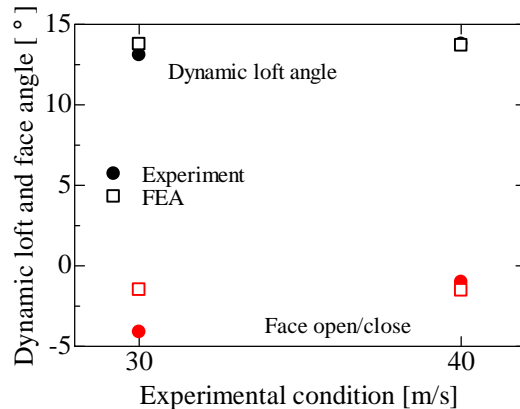


図5 シャフト上のマーカ座標の時刻歴

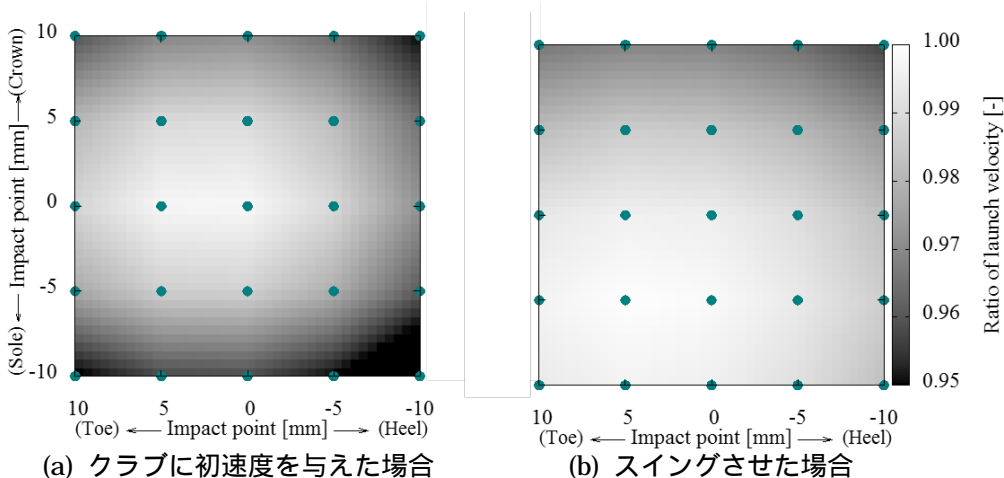


(a) 衝突速度



(b) 実効ロフト角とフェースの開き

図6 実験結果と解析結果の比較



(a) クラブに初速度を与えた場合

(b) スイングさせた場合

図7 ボールの打ち出し速度に関する比較

は異なる傾向が見られることから、クラブの性能を評価するにあたっては、スイングからインパクトまでを取り扱うことが必要であり、そのために、本研究で構築したモデルが有効であることが示された。

(3) スイング特性がインパクト時のクラブ挙動に及ぼす影響

図8は、 θ_{grip} を式(1)のように変化させたときのヘッドの衝突速度と実効ロフト角に関する解析結果を示したものである。 k が小さい、すなわちインパクトを迎えるまでの加速が小さいと、衝突速度は小さく、実効ロフト角は大きくなる傾向となった。

このようなヘッドの挙動の変化について、スイング中のシャフトの挙動に着目して、以下に考察する。 k が大きい、すなわちインパクト手前で加速が大きい場合、グリップ部がインパクト直前で急加速されることとなり、このときのシャフトは、グリップ部がヘッドよりも常に先行するしなりとなって、グリップ部が先行したまま（ヘッドが遅れたまま）インパクトを迎える傾向となった。これに対して、 k が小さい場合、スイング前半において、グリップ部はヘッドよりも先行しているものの、スイング後半からインパクトに向かう際に、その前半に生じたシャフトのしなりが戻ることによって、ヘッドがグリップ部よりも先行するしなりとなってインパクトを迎える傾向となった。また、 $k=1$ の場合は、インパクト時におけるシャフトのしなりがほぼなくなり、ロフト角でのインパクトが実現されていた。このように、グリップ軸まわりの加速の違いによって変化するシャフトのしなりが、実効ロフト角に影響しており、インパクトを迎えるまでの加速を小さくしてインパクト時にヘッドがグリップ部よりも先行する挙動になっているほど、実効ロフト角が大きくなる傾向となった。

また、グリップ軸まわりの角速度の変化は、ヘッドの衝突速度の速度成分にも影響を及ぼしていた。衝突速度の各成分を調べたところ、 k の増加とともに速度の y 成分は大きくなり、最も大きいこの成分が速度の大きさに寄与しているといえる。一方、鉛直上向きの成分である z 成分は、 k の減少とともに増加する傾向となり、これは k が小さい場合、インパクト直前においてグリップ部に対してヘッドが先行するシャフトのしなりとなり、鉛直上向きの速度成分が増加する傾向になることによるものと考えられる。このように θ_{grip} の k の変化に伴って、衝突速度の絶対値に加えて、その成分も変化していることから、その速度成分によってインパクト後のボールの打ち出しも影響を受けるといえる。そして、今回の解析条件の中では、インパクトを迎えるまでの加速を小さくすることにより、スイング前半のシャフトのしなりの戻りを活用して、ボールを高弾道に打ち出すヘッドの衝突速度および姿勢を作り出すことがで

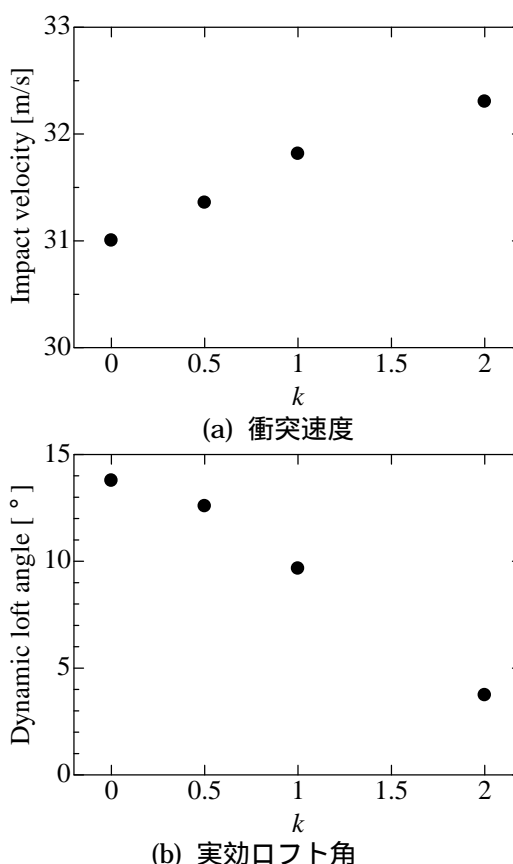


図8 グリップ軸まわりのスイング入力を変化させたときの解析結果

きる可能性が示唆された。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計3件)

田中克昌, ゴルフスイング特性がインパクト直前のクラブヘッド挙動に及ぼす影響, 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 2012, 2012年11月16日, 愛知大学

Katsumasa Tanaka, Construction of a finite element model from golf swing to impact and its application to an evaluation of club performance, The World Scientific Congress of Golf 2014, 2014.9.5-9.7, Australia

Katsumasa Tanaka, Influence of golf swing characteristics on the velocity and orientation of clubhead at impact using finite element analyses, The World Scientific Congress of Golf 2014, 2014.9.5-9.7, Australia

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 克昌 (TANAKA Katsumasa)

工学院大学・工学部・准教授

研究者番号: 9 0 3 1 3 3 2 9