

## スイング中のゴルフクラブ挙動予測

先納 義和 (BS) <sup>\*1</sup>, 高尾 浩二 (BS) <sup>\*2</sup>, 松永 英夫 (BSP) <sup>\*3</sup>, 岩出 浩正 (BSP) <sup>\*4</sup>

### Golf club behavior simulation during a swing

Yoshikazu SENNO <sup>\*1</sup>, Koji TAKAO, Hideo MATSUNAGA and Hirotada IWADE

<sup>\*1</sup> Bridgestone Corporation, Central Research, Research Department II  
Ogawahigashi-cho 3-1-1, Kodaira-shi, Tokyo 187-8531, Japan

During a golf swing, a bending and torsion occur on the shaft of a golf club, and it changes a head speed and a head angle etc. The behavior of such a golf club mainly originates in the input from a swing of a golfer. In recent years, many researches and development pay their attention to more upstream stage of the swing motion. Moreover, to understand the mechanism which connects a swing and a golf club behavior, many researches in consideration of the oscillation characteristic of the golf club and of a simulation by Multi Body Dynamics are being studied. This paper, which studies the highly accurate analysis technology in consideration of those all, shows the technology called Swing Simulation. It can predict a golf club behavior during a swing, formed by Multi Body Dynamics constructed with three-body golf club model with oscillation characteristic and by a three-dimensional displacement data reproducing swing characteristics. Compared a simulation result with actual golf club behavior, such as a position, a head speed and a bending, a simulation accuracy is confirmed.

**Key Words** : Golf, Golf swing, Golf club, Multi Body Dynamics, Simulation, Experiment

### 1. 結 言

ゴルフスイングにおける最終的な結果であるボールの飛距離や左右ブレは、打ち出し直後のボール挙動（ボールの初速・打ち出し角・スピン量など）に起因し、ボールの影響を除いて考えれば、ボール挙動はインパクト時のヘッド挙動（ヘッド速度・フェース角など）に起因する。また、ヘッド挙動はスイング中のゴルフクラブの挙動に起因し、ゴルフクラブ挙動はスイング動作の主体となるゴルフからの入力に起因する。

近年は、より運動の上流（原因系）に着目した数多くの研究・開発が為されており<sup>(1)(2)(3)</sup>。また、スイングとゴルフクラブ挙動を繋ぐメカニズム解明の為、ゴルフクラブの振動特性を考慮した研究や<sup>(4)(5)</sup>、コンピュータを活用したマルチボディダイナミクスによるシミュレーションが研究されている<sup>(6)(7)(8)(9)</sup>。しかし、これらすべてを考慮した高精度な解析技術を研究している事例は少ない。

本論文では、スイング特徴とゴルフクラブの振動特性を考慮し、マルチボディダイナミクスを活用した、スイング中のゴルフクラブ挙動を予測する技術（スイングシミュレーション技術）について示す。

<sup>\*1</sup> 正員, 株式会社ブリヂストン (〒187-8531 東京都小平市小川東町 3-1-1)

<sup>\*2</sup> 株式会社ブリヂストン (〒187-8531 東京都小平市小川東町 3-1-1)

<sup>\*3</sup><sup>\*4</sup> ブリヂストンスポーツ株式会社 (〒368-0005 埼玉県秩父市大野原 20)

E-mail: senno.yoshikazu@bridgestone.co.jp

## 2. スイングシミュレーションモデル

本論文におけるスイング中のゴルフクラブ挙動を予測するスイングシミュレーションモデルは、機構解析（マルチボディダイナミクス）に従い構築されている。図1は、スイングシミュレーションモデルの基本構成を示している。これは、様々な特性のゴルフクラブに対し、スイングデータを入力することで、スイング中のゴルフクラブ挙動を算出するモデルを表している。

以下、スイングシミュレーションモデル構築における、ゴルフクラブのモデル化と、ゴルフクラブモデルに与えるスイングのモデル化について説明する。

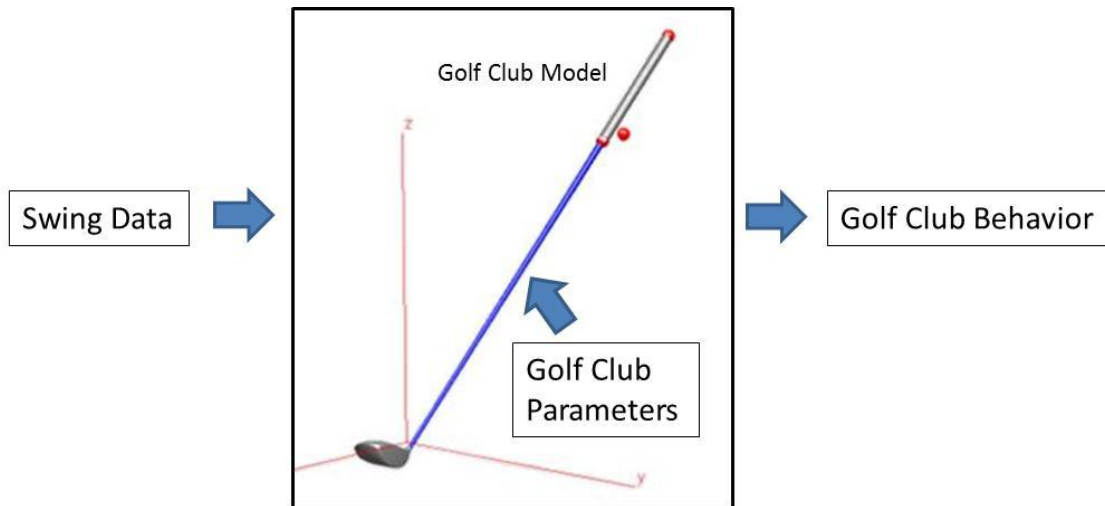


Fig. 1 Swing Simulation Model

### 2・1 ゴルフクラブのモデル化

ゴルフクラブモデルは、図2に示すように、ヘッドとグリップを剛体、シャフトを弾性体とした合計3つのボディで定義されている。



Fig. 2 Golf Club Model

#### 2・1・1 ヘッドとグリップのモデル化

剛体であるヘッドとグリップについては、それぞれの重量、重心位置、および慣性モーメントの3つの特性を有するボディで設定される。これら3つの特性は実測値が反映されている。ヘッド・グリップの両ボディは、所定の位置でシャフトと0自由度拘束（剛結）されている。

### 2・1・2 シャフトのモデル化

弾性体であるシャフトはスイング中に変形し、その変形挙動はシャフトを梁要素として FEM で計算を実施する。まず梁の全体長さを決め、ここでは梁を複数に分割し、分割したそれぞれの部位に、密度、断面形状、曲げ剛性、ねじれ剛性等の特性を設定する。これらの特性は実測値が反映されている。

スイング中のシャフト変形挙動を高精度で予測する為には、さらにシャフトのモード特性の反映が重要であると考え<sup>6)</sup>。ここで、モード特性とは、固有モード（モード形状）、固有振動数、モード減衰比の3つを指す。3つの内、モード形状と固有振動数については、密度、断面形状など上述の特性による梁モデルで決定されるが、モード減衰比については別途定義する必要がある。そこで、今回は実際のゴルフクラブで実験モード解析を行い、各モードのモード減衰比を取得した。なお境界条件は、ゴルフのスイングを考慮し、グリップ部分を固定した片持ち支持である。

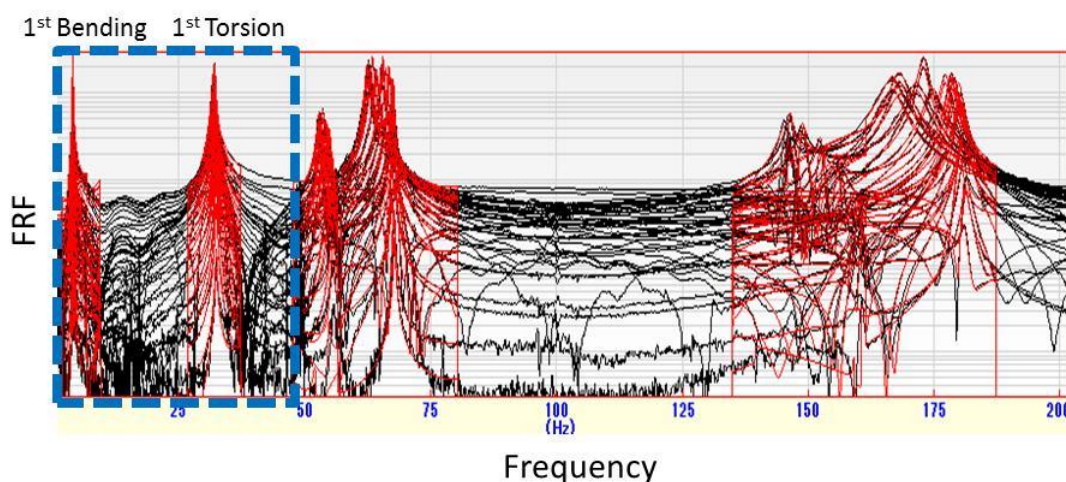


Fig. 3 FRF of Golf Club

図3に、実験モード解析によって得られたゴルフクラブ上の計測ポイントでの周波数応答関数 (FRF) を示す。この結果から得られたモード特性を設定する。ゴルフクラブは高次まで多くのモードが存在するが、人のダウンスイング時間はおよそ 0.2~0.5 秒であり、スイングは速くても十数 Hz の運動であることから、今回のモデルでは、50Hz 以下の周波数に存在する2つのモード特性（1次曲げモードと1次ねじれモード）を考慮した。

以上のように、ゴルフクラブモデルは、ヘッド・グリップ・シャフトの3ボディにそれぞれ実測値を反映させた特性で構築されている。

### 2・2 スイングのモデル化

前述のように、シミュレーション上でスイングを表現する方法は様々に研究が為されている。モデルとしては、ゴルフクラブ単体を扱う1リンクモデルや、手首・腕などの機構を考慮した多リンクモデルがあり、スイングを表現する物理量としては、変位、力・トルク等がある。本シミュレーションモデルでは、後述する理由により、ゴルフクラブのグリップ部への変位入力によりスイングを表現している。

この変位入力においても、シミュレーションモデルへのスイングの入力方法は多くの手法が検討されている。例えば、3次元計測したグリップ座標から、グリップの重心座標に対する並進運動と回転運動、及び軸周りの回転運動を算出しスイングのシミュレーションを行う方法、また、磁場内を運動するレーザーの時系列座標とオイラー角からグリップ上の3点の並進運動を算出しシミュレーションを行う方法等が検討されている。

これらの方法では、計測したスイングの3次元座標データに対し、複数回の演算が必要であるため、計測値に含まれる場合はその誤差が増幅される。そこで本研究では、簡便かつ誤差の増幅を最小化する為、計測した3次元座標の時系列データをそのまま与える手法を選択した。

スイングを表現するには、グリップ部に並進・回転の6自由度運動を与えなければならない。その内、並進の3自由度は1点の3次元座標データで表現できるが、回転の3自由度を3次元座標データのみで表現するには、最低3点が必要であり、且つ3点で平面を形成する必要がある。ここでは、3点により形成される平面を仮想平面と呼ぶ。

グリップ部に仮想平面を特定可能な3つのマーカーを装着し撮像する。マーカーは球状であり、図4に示すように、ここでは3つのマーカーをシャフト軸上のグリップエンド(M1)、グリップ下(M3)、及びグリップからフェース方向に数十mmオフセットした位置(M2)に取り付けている。

マーカーの3次元座標計測の為に、撮像は2台以上のカメラで行う。ここでは、モーションキャプチャシステムを用いて、複数台のカメラにより動きの速いスイングを高感度で撮影した。

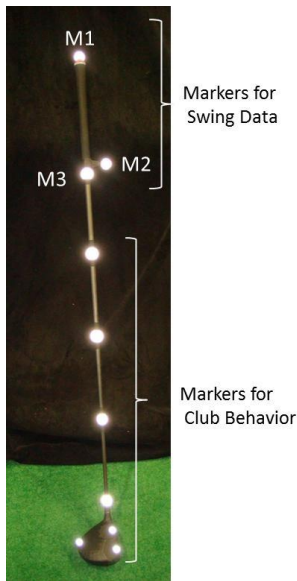


Fig. 4 Markers on Golf Club

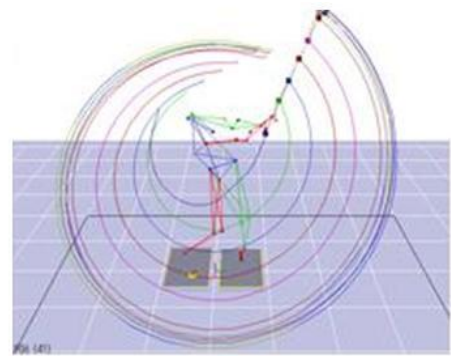


Fig. 5 Swing Measurement

図5に、計測状態と結果の概要を、図6に、仮想平面を構成する3点の時系列3次元座標データを示す。このデータをゴルフクラブモデルに入力する為、図7に示すように、ゴルフクラブモデル上に、計測時に取り付けた3点のマーカーと同位置の入力ポイントを設定する。

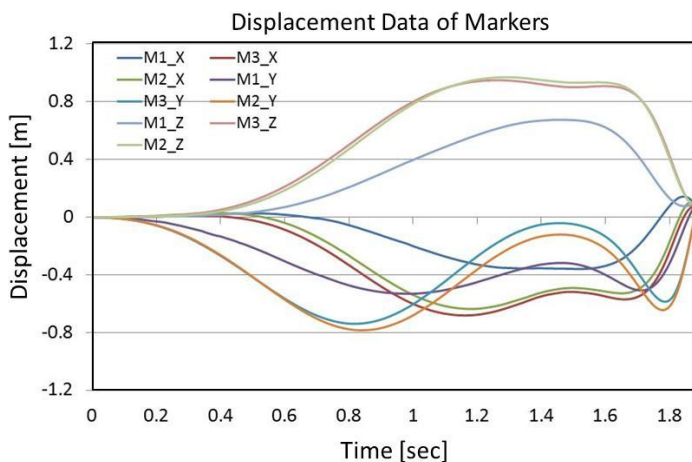


Fig. 6 Displacement Data of Three Markers

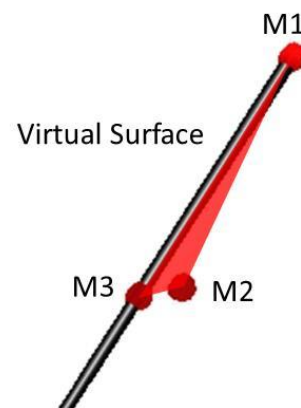


Fig. 7 Swing Data Input Points on Golf Club Model

### 3. スイングシミュレーションによる予測

スイングシミュレーションによって予測したゴルフクラブ挙動と、実測したゴルフクラブ挙動を比較し、予測精度の検証を行った。また、本スイングシミュレーションを活用し、スイングに最適なゴルフクラブスペックを予測した一例を合わせて示す。

#### 3・1 予測精度検証

図8は、スイング中のシャフト先端の時系列3次元座標を、シミュレーション結果とモーショキャプチャ計測値の両方を重ねて比較している。また、図9は、スイング中のシャフト先端速度を、シミュレーション結果とモーショキャプチャのデータから算出した値で比較している。図から明らかなように、シャフト先端位置・速度とも、良好に一致している。

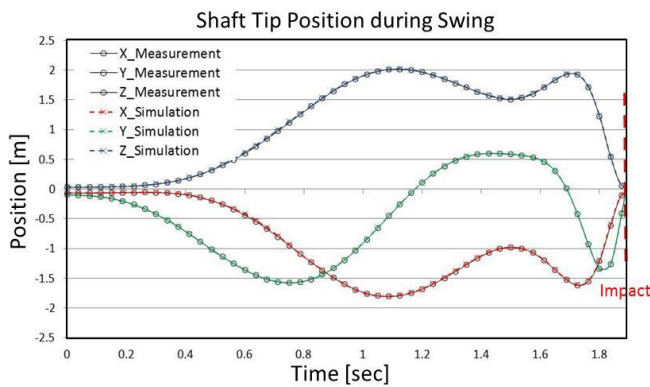


Fig. 8 Position Comparison

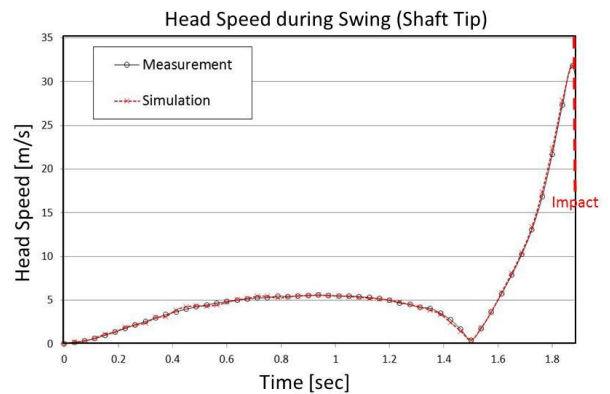


Fig. 9 Head Speed Comparison

更にシャフト全体の変形挙動についても比較している。図10は、ダウンスイング中の、シャフトに設置した複数のマーカーより得られる3次元座標を、シミュレーション結果とモーショキャプチャ計測値の両方を重ねてプロットしている。ダウンスイング中のシャフト全体のしなり挙動についても、良好に一致していることを確認した。

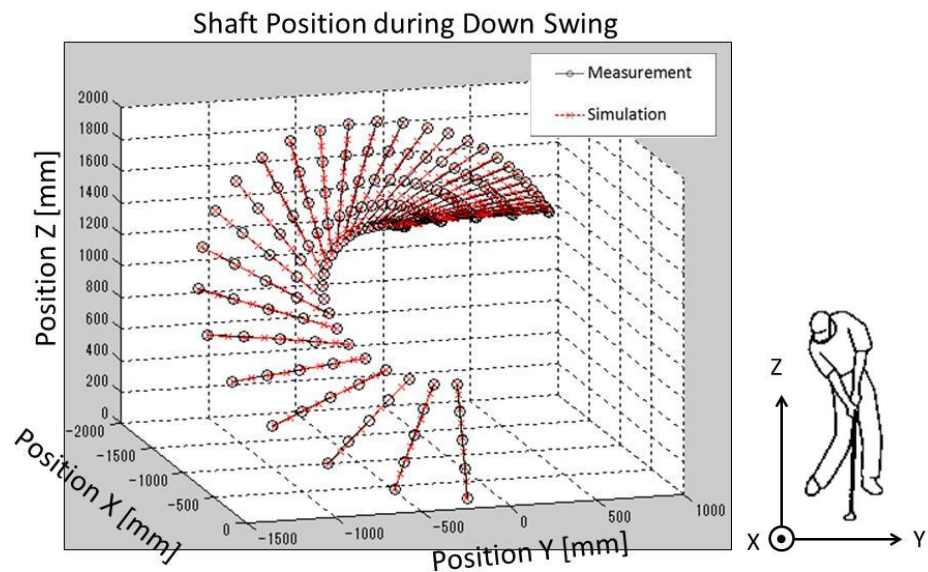


Fig. 10 Bending Behavior Comparison



### 3・2 最適ゴルフクラブスペックの予測

本スイングシミュレーションを活用し、飛距離と方向性を向上させる、初級・中級レベルのゴルファーに最適なシャフト曲げ剛性を予測した。今回は、ゴルフクラブ挙動としてインパクト時のヘッドスピードと左右フェース角を予測している。

前述のモーションキャプチャ撮像により、数十人のスイングデータを取得した。また数十本の曲げ剛性違いのゴルフクラブモデルを作成し、1000パターン以上のシミュレーション実施により、ヘッドスピードと左右フェース角を向上させるスイングに最適な曲げ剛性分布を決定した。図 11 に、コントロールシャフト（シャフト A）と、それに対しシミュレーションで予測した最適シャフト（シャフト B）の曲げ剛性分布を示す。

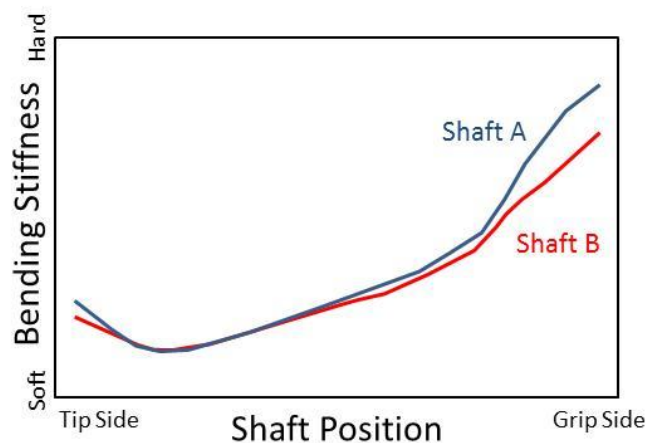


Fig. 11 Bending Stiffness Distribution of Shaft

また実際にシャフト A, B を試作し、その予測結果と比較している。図 12 に、シャフト A, B をシミュレーションしたときの、インパクト時のヘッド速度と左右フェース角の結果を示す。また、図 13 に、シャフト A, B を実打したときの、飛距離と左右ブレの実測結果を示す。両結果から明らかなように、スイングシミュレーションにより予測した最適シャフトは、実測でも性能向上を示している。

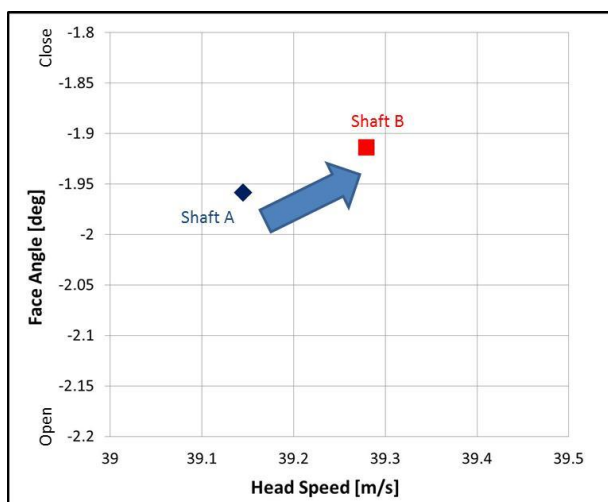


Fig. 12 Simulation Result

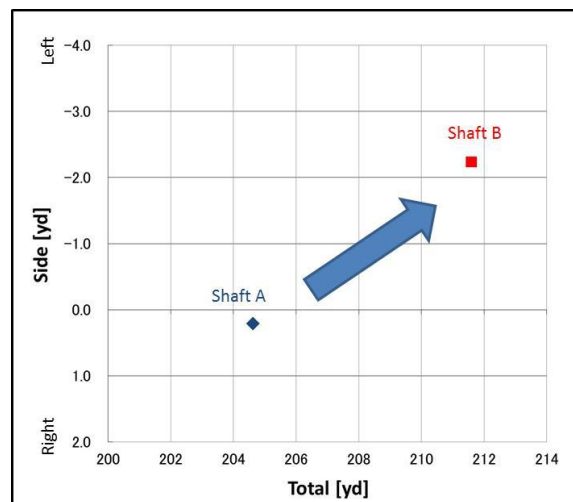


Fig. 13 Experiment Result

#### 4. 結 語

スイングをゴルフクラブに貼りつけたマーカーの撮像による時系列3次元座標データで表現し、振動特性を反映した弾性体でモデル化したゴルフクラブへ入力することで、スイング中のゴルフクラブ挙動を高精度で予測可能なスイングシミュレーション技術を構築した。

今回は、ゴルフクラブ挙動として、スイング中のシャフト軌跡、ヘッド速度、インパクト時の左右フェース角を選択し実測との比較を示した。本スイングシミュレーションにより予測できるゴルフクラブ挙動は、インパクト時のロフト角、シャフトのしなり速度、シャフトのねじれ挙動、ヘッドの軌道・進入角、スイングプレーン、スイング中のシャフト変形量・曲げモーメント・ねじれトルクなど様々である。

また、スイングデータとクラブ諸元によりゴルフクラブ挙動を予測できることから、3・2でも一例を述べたように、あるスイングにおいてゴルフクラブ挙動を変化させるためには、どのようなクラブ諸元が必要かを予測可能であることを意味している。

今後もスイングシミュレーションの更なる予測精度向上の為、ゴルフクラブ特性の影響や、スイングの更なるモデル化などを継続して研究する予定である。

#### 文 献

- (1) 岩壺卓三 他, “ゴルフクラブの最適設計に関する研究”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 56, No. 529 (1990), pp. 2386-2391.
- (2) 岩壺卓三 他, “インパクト現象に及ぼすゴルフクラブの特性の影響に関する研究”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 64, No. 623 (1998), pp. 2354-2361.
- (3) 佐藤文宣 他, “スイング中のゴルフクラブシャフトのしなりに関する考察”, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 65, No. 630 (1990), pp. 572-578.
- (4) 細川健治 他, “スイング中のゴルフクラブの挙動解析”, Dynamics & Design Conference 2013 USB 論文集, (2013) . No113
- (5) 邊吾一 他, “CFRP ゴルフシャフトの曲げおよびねじり振動の実験結果と FEM 解析の比較”, スポーツ工学シンポジウム論文集, 18S, (1995), pp.94-97
- (6) 鈴木克幸 他, “マルチボディダイナミクスに基づくゴルフクラブ最適設計”, Transactions of JSCES, Vol.1999, 19990011, (1999).
- (7) 鈴木克幸 他, “スウィング特性を考慮したゴルフクラブの最適設計”, 最適化シンポジウム講演論文集 2006(7), 1-4, 2006-12-08, (2006).
- (8) 大屋敷由香 他, “ゴルフスイングの動力学モデルに関する研究 (2 リンクマルチボディによるモデル化)”, 日本機械学会 SHD2010 論文集, No. B27, (2010), pp. 325-328.
- (9) 大屋敷由香 他, “ゴルフスイングの動力学モデルに関する研究 (シャフト設計パラメータの飛びへの影響)”, 日本機械学会 SHD2012 論文集, No. 222, (2012), pp. 287-292.