

身体負荷を考慮したゴルフクラブの最適設計

076782 磯部信
指導教官 鈴木克幸

The Optimum design of golf shaft is carried out using explicit time integration FEM analysis and mathematical programming technique. The 3 dimensional motions of the grip and the body of the player are measured using motion sensor and used to analyze the force and torque which act on the body. It is also used for the input of FEM, and shaft is divided into several segment, and bending rigidity and torsional rigidity of each segment is taken to be the design variables. The speed of club head and the load to the player's body are taken as objective function to maximize. Pareto solution is also introduced to solve the double objective function.

Key Words : Explicit FEM, Optimal Design, Pareto solution, Inverse Kinematics, Multibody Dynamics , Golf Swing

1. 緒言

本研究の目的は、ゴルフクラブの最適化に数値シミュレーションを導入することで、これまで熟練技術者の経験と勘に頼っていたところに客観性を持たせることである。これにより、クラブ開発における経済的あるいは人的コストの削減や、商品開発期間の短縮と品質向上による商品競争力強化につながる事が期待される。

前回までの試みとしては、グリップの動きを3次元計測し、その計測結果に基づきゴルフクラブの運動の解析を行った。また、ゴルフクラブの曲げ剛性、ねじり剛性、ヘッド重量などの特性の変化によるスイングの変化の影響を考慮するために、実験計画法に基づき試作したクラブに対してプロのゴルファーによるスイング計測を行い、その計測データを多項式による応答曲面で補間し、それを用いて最適化を行った。最適化の目的関数としボールをより遠くにとばすという目的のためのインパクト時のヘッド速度、および方向安定性を考えたねじり角を採用し、2目的関数としてパレート解を求めた。

しかし考察の結果、安定性としてねじり角を評価することは適切ではなく、またクラブ特性のスイングへの影響もグリップ動作だけでなく体全体について考慮する必要があった。

そこで本研究では、最適化の目的関数として安定性、快適性に大きく影響すると考えられる身体負荷を導入し検討する。手法としては、特性を様々に変化したクラブを用いたスイング計測実験の際に体の各関節部分にマーカーをつけ、高速カメラで撮影した画像を基に各関節の座標を算出する。そして、各関節位置データから身体にかかる負荷を計算する

ために、マルチボディダイナミクス理論を用いた逆運動学解析を行う。こうして得るスイング時の身体負荷をボール初速度と共に定量的評価をし、ゴルフクラブの最適化を行う。また、クラブ特性変化によるスイング変化としてもグリップ部分のみから体全体へと拡張する。

2. スイング計測実験

2.1 実験目的

本実験は、異なるシャフト特性を持つ9本のクラブを被験者に振ってもらい、そのスイング動作データを元にシャフト特性の変化に対するスイング動作応答曲面の式を作成することである。

2.1 実験内容

ゴルフ試打場等の場所に、高速カメラを数台設置し、全てパソコンにつなぎ同期させておく。プレイヤーの各関節およびクラブ上の各所にマーカーを付ける。スイング開始時に高速カメラによる連続撮影を開始し、スイング終了時まで撮影を行う。この手順を、実験計画法に基づき様々に特性を変化させたクラブ全てについて行う。

2.2 実験計画および実施

本研究のシャフト最適化では設計変数をフレックス、調子、ねじれ角とする。フレックスはシャフトの曲げ硬さ、調子は硬さ分布のバランス、ねじれ角はねじれ硬さを意味する。

Table 1 3 levels of 3 elements

	最小	中間	最大
フレックス	160	180	200
調子	0	0.5	1
ねじれ角	4°	5°	6°

要素と水準を決定したら、それを元に実験計画法に基づいた直交表を作成する。

クラブ No.	フレックス	調子	ねじれ角
1	200	0	6°
2	200	0.5	5°
3	200	1	4°
4	180	0	5°
5	180	0.5	4°
6	180	1	6°
7	160	0	4°
8	160	0.5	6°
9	160	1	5°

この表に基づき9本のクラブを用意し、スイング動作計測実験を行い、9通りの各関節軌跡を取得した。各関節データから本研究の解析が必要となる、体幹上部、体幹下部、上腕、前腕およびクラブグリップの姿勢を算出する。

3. スイング動作応答曲面作成

実験で算出された9通りの各部位の姿勢を元に、スイング動作応答曲面を作成する。応答曲面の式は以下ようになる。

$$f(x, y, z, t) = a_1(t) + a_2(t) * x + a_3(t) * y + a_4(t) * z + a_5(t) * x^2 + a_6(t) * x^2 + a_7(t) * y^2 + a_8(t) * z^2 \tag{1}$$

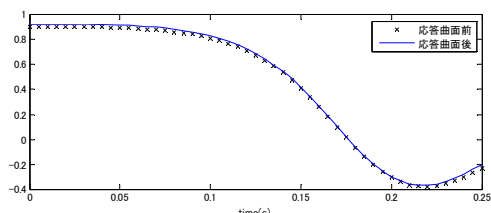


Fig. 1 response Surface of posture data

作成された応答曲面は、応答曲面前のデータを精度良く表現していることがわかる。

4. ヘッド速度解析

この章3章で求めたスイング動作応答曲面を使い、シャフト特性が変化するとヘッドのインパクト直前の速度がどのように変わるかを解析する。スイング解析の際のクラブモデルは Fig.2 のようになる。また、解析には有限要素解析ソフト LS-DYNA を用いた。ここで、ある被験者についてヘッド速度解析を行い、そのときに実測したヘッド速度と比較した。比較した結果をTable2に示す。この表を見ると、本解析がほぼ実測に沿った値を出していると判断でき

る。

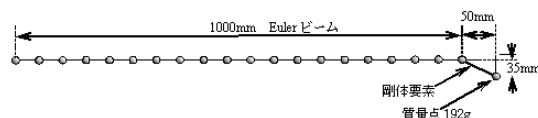


Fig. 2 club model

Table 2 head speed of swing analysis

クラブ No.	1	2	3	4
実測値 (m/s)	48.1	48.5	48.5	51.6
解析値 (m/s)	45.8	49.1	48.7	52.1
誤差 (m/s)	2.3	0.6	0.2	0.5

5	6	7	8	9
50.0	48.9	48.5	50.0	50.0
49.4	47.5	49.1	50.4	51.8
0.6	1.4	0.6	0.4	1.8

5. 身体負荷解析

5.1 解析方法

解析のための人体モデルとしては、体幹下部、体幹上部、上腕、前腕、クラブの計7つのボディからなるモデルを作成した。

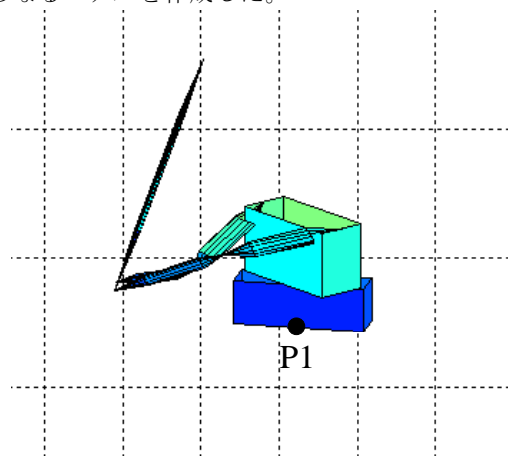


Fig. 3 body model of multibody analysis

クラブはここでは剛体として扱っている。体の各部位の質量、質量中心、慣性モーメントの値は、AIST 人体特性文献データベース(*1)の値を使用した。

運動方程式は、拘束条件付きのニュートン・オイラーの運動方程式(式(2))になる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_r^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}' & \mathbf{C}_{\theta'}^T \\ \mathbf{C}_r & \mathbf{C}_{\theta'} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{r}} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}}' \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}^A \\ \mathbf{n}'^A - \tilde{\boldsymbol{\omega}}' \mathbf{J}' \boldsymbol{\omega}' \\ \boldsymbol{\gamma} \end{bmatrix} \quad (2)$$

5.2 解析結果

作成したモデルに対するスイング動作応答曲面を用いた逆動力学計算によって得られる各部位の関節トルクについて解析結果を示す。これら関節トルクは、各物体座標系で表示したものであり、各筋肉の力の発生方向に合わせたトルクを表示している。これらの値は、各関節への受動トルク量ではなく、その逆の各関節が発揮すべきトルク量で表現される。Fig.4は腹部のねじりトルク(上)および腹部前後曲げ(下)実線がスイング動作応答曲面を用いた解析結果、くさび状線がスイング動作実測値を用いた解析結果である。これらはほぼ重なり、よく一致している。

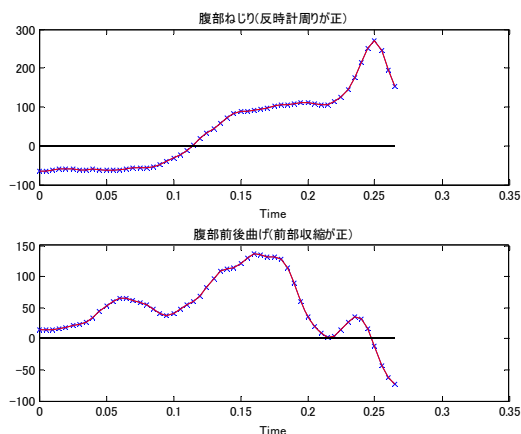


Fig. 4 body torque example

5.3 身体負荷の評価

得られた時系列の各関節発揮トルクをどう評価するかについて述べる。最適化の際に目的関数として評価するためには、評価値をスカラー値として出す必要がある。本研究では、各部位トルク量の力積の総和を取り、それを評価値とすることを考える。ただし、単に全力積を総和するのではなく、これ以上発揮したくないトルク量のボーダーラインを設定しておき、その値を超えるトルクのみを考慮する。ここで、ボーダーラインのトルク量を Tb 、ステップ間隔を Δt とし、腹部トルクの各ステップ時刻発揮量を $T_1, T_2, \dots, T_i \dots T_N$ とすると、身体負荷評価値は、

$$\sum_{i=1}^N |\bar{T}_i| \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \bar{T}_i &= T_i - Tb & (T_i > Tb) \\ \bar{T}_i &= 0 & (T_i \leq Tb) \end{aligned}$$

で表され、この値を評価する全トルクについて総和する。なお、ボーダーラインは各部位個別に設定することが可能である。

6. シャフト最適化

6.1 最適化方法

本章ではまずヘッド速度、身体負荷それぞれの応答曲面化を作成し、その後にそれぞれの応答曲面化した式を総合評価した目的関数を作成する。最後にこの目的関数に対して最適な設計変数の解を求める。

6.2 ヘッド速度応答曲面

3章での解析を用いてヘッド速度の応答曲面を作成する。ヘッド速度は三次の応答曲面を作成する。

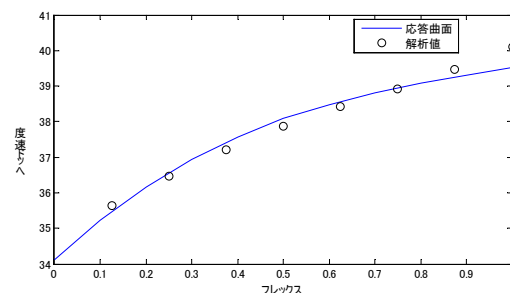


Fig. 5 Flex and head Velocity

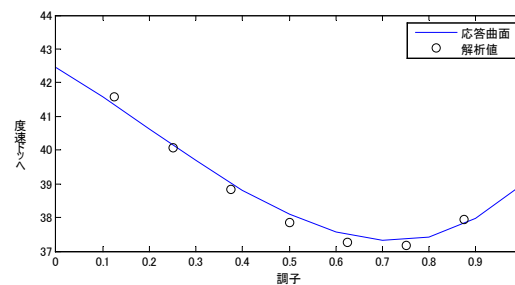


Fig. 6 Pitch and head Velocity

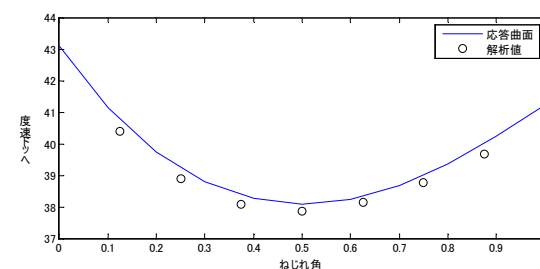


Fig. 7 Twist nad head Velocity

Fig.5,6,7は、フレックス、調子、ねじれ角それぞれの

変化に対するヘッド速度の変化の様子である。応答の変化の特徴としては、フレックスが大きくなり曲げ剛性は全体として柔らかくなるほどヘッド速度が大きくなる。調子は小さくなりより先調子の方がヘッド速度を向上させ、0.7~0.8付近が最も遅くなる。ねじれ角についても、両側で大きな速度を出し、真ん中で速度が遅くなる。

6.2 身体負荷応答曲面

4章での解析および評価方法を用いて身体負荷の応答曲面を作成する。ヘッド速度同様三次の応答曲面を作成する。応答の変化の特徴としてはフレックスが大きくなり柔らかくなるほど負荷は小さくなる。ねじれ角も同様に大きくなり柔らかくなるほど負荷が小さくなる。一方調子の応答は窪んだ形になり、真ん中の値で負荷が最も小さくなる。

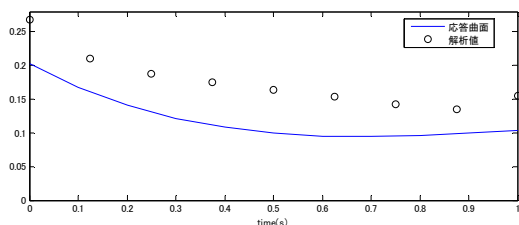


Fig. 8 Flex and body torque

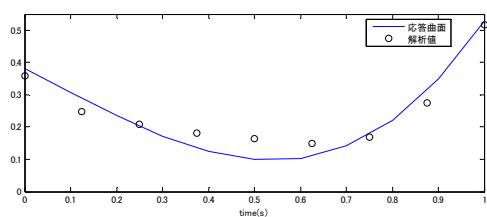


Fig. 9 Pitch and body torque

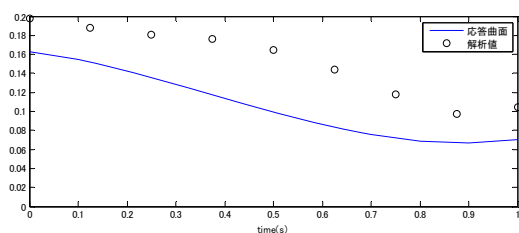


Fig. 10 Twist and body torque

6.3 目的関数作成

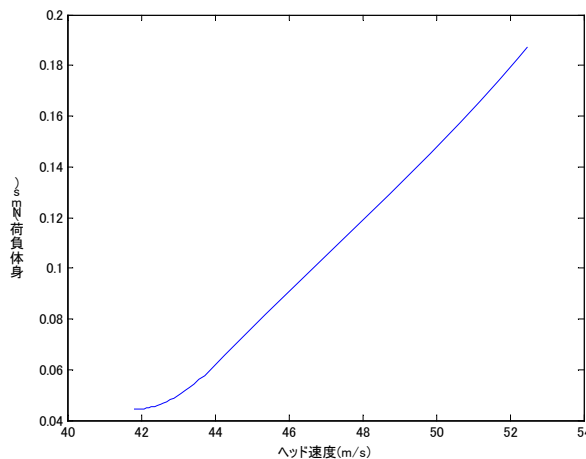
本最適化の目的関数は、ヘッド速度解析値の最小・最大値をそれぞれ $fvel\ min$ 、 $fvel\ max$ とし、また

同様に身体負荷についても最大・解析値の最小・最大値を $fbody\ min$ 、 $fbody\ max$ とし、最後に重み係数を α とすると、本最適化の目的関数は式(3)のようになる。

$$F = -\alpha \frac{fvel(x, y, z)}{fvel\ max - fvel\ min} + (1 - \alpha) \frac{fbody(x, y, z)}{fbody\ max - fbody\ min} \quad (3)$$

6.4 パレート最適解

重み係数 α の値を0から1まで少しずつずらしながら最適化計算することでパレート最適解を得る。



7. 結言

5.1 今後の計画・展望

本研究から新しく導入した身体負荷解析による体への負担の評価をヘッド速度と同時に考慮して最適化を行うことにより、それらの相反する特性によりパレート最適解を得ることができた。これにより、被験者それぞれのヘッド速度、身体負荷に対する重視の度合いによって、柔軟に選択の幅を持って最適シャフトを提示することができた。

課題としては身体負荷解析のさらなる精度向上である。何らかの手段を用いてその精度を検証する必要がある。これは今後の大きな課題である。

ただ、これらのことを解決できれば、新しい実用的な設計手法として世の中に提供することができると思う。

参考文献

- [1] 清水信行、今西悦二郎. 「マルチボディダイナミクス(1)—基礎理論」. コロナ社, 2008
- [2] Digital Human Research Center. AIST 人体寸法・形状データベース