

## 論文の内容の要旨

論文題目 個人のスイング特性に応じたゴルフシャフトの最適設計

氏 名 下野 智史

スポーツ用具はプレイヤーのパフォーマンスを最大化するために日々進化している。各プレイヤーは体格や筋力はもちろんのこと、そのスキルや動作の戦略まで異なるため、スポーツ用具には個人の特性に合わせた最適設計が求められる。本論文では、ゴルファー個人のスイング特性に応じたゴルフシャフトの最適設計を試みる。現状ではゴルファー本人や設計者の主観に頼ることが多い分野に対して、客観的・科学的な視点での最適設計手法確立を目指す。また状況に応じて許される計測負荷、計算時間等が異なるため、実際の設計シーンにて考慮すべきいくつかの場面を想定した最適設計手法を構築する。具体的には「有限要素法による時刻歴応答解析を用いた手法」、「実験計画法と応答曲面法を用いた手法」、「自己組織化マップによるスイングデータ予測を用いた手法」、「マルチボディダイナミクスによる飛距離と再現性の多目的最適化を用いた手法」である。それぞれ独立の章に記載する。

なお本研究では、広義の最適設計として用具選定を含む。現実には全てのプレイヤーに対してオーダーメイドで最適設計を行うことは不可能であり、既存のライナップから選ぶ必要があるためである。確立した手法を用いて実際にシャフト選定システムを構築し、合わせてその有効性を確認する。

### 【第1章】

まずはスポーツ科学の発展を先行研究より概観し、本研究の位置付けを明確にする。スポーツ科学の先行研究は大きく次の4つの領域に分けることができる。1) 人間の計測、2) 用具の計測、3) 人間の解析、4) 用具の解析の4つである。各領域はそれぞれ多くの研究がなされており、領域ごとには十分に発展していると言える。ゴルフはクローズドスキルであるため実験を行いやすく、これらのスポーツ科学の発展を牽引してきた。

上述の通りゴルフシャフトの設計においては、個人のスイング特性に応じた最適設計が求められる。しかしながら、上記4つの領域を独立に扱うだけでは十分な最適設計を行うことはできない場合が多く、現実にはゴルファーや設計者の主観に頼った設計が行われている。そこで本研究では、上記4つの複合領域を扱うことで熟練したゴルファーおよび熟達した設計者の主観による精度を上回る科学的・客観的

な設計手法を確立することを目的とする。またスポーツ用具だけでなく医療や教育、サービスに至るまでテーラーメイド化、個別化が重要視されているため、他分野に対しても応用可能なソリューションを確立することを視野に入れる。

## 【第2章】

個人に応じた最適設計を行うための有効な手法として、有限要素法によってゴルフシャフトの弾性モデルを作成し、繰り返し計算を行うことで最適な設計を見つける手法が挙げられる。本章では、有限要素モデルを陰解法で解くことで最適設計を見出すことを目指す。この際、熟練設計者4名の設計手法を模したアルゴリズムを構築することで計算時間の短縮と精度向上を試みる。

本アルゴリズムを用いることで、女子プロゴルファー1名に対して、熟練設計者が設計したシャフトと同等のシャフトを短時間で導き出すことが可能となった。一方、他の被検者として選んだ男子プロゴルファー1名とアマチュアゴルファー1名については、十分な精度の解が得られなかった。正確に解が得られた女子プロゴルファーとの違いは、シャフトによってスイングを変化させやすいか否かによるものと推察され、スイングを変化させにくいプレイヤーにおいて本アルゴリズムが有効に機能したものと考えられる。

## 【第3章】

本章では、前章で得られた結果を踏まえ、全てのプレイヤーはシャフトによってスイングを変化させる、という前提に立つ。その場合でも、プレイヤーごとに最適設計ができる手法を開発することを試みる。

まず実験計画法を用いて、9本のトライアル用シャフトを作成し、6軸の加速度・角速度センサを用いて上述のトライアル用シャフトでスイングした際の各プレイヤーのスイングデータを計測する。必要最小限のスイング回数でスイング変化の傾向を掴むためである。続いて、応答曲面法を用いて、スイングをシャフト性能の関数として表現することで、あらゆるシャフトをスイングした場合のスイングデータを推定する。最後に、この推定した多くのデータとシャフト性能を対応させ、有限要素法による時刻歴応答解析を行うことで、最適なヘッド挙動を成し得るシャフトを設計する。

一般的なアマチュアゴルファー市場では、最適設計＝シャフト選定であることから、本手法を用いて最適シャフト選定システムを開発し、精度確認を行った。中上級者103名の被検者のうち89名で本システムが提案する最適シャフトを使用することで、飛距離又は方向性、あるいはその両方が改善できることが明らかとなった。この精度は十分に熟練設計者や熟練フィッターに匹敵するものである。

## 【第4章】

前述の通り，実験計画法と応答曲面法を用いた手法によって有効な結果が得られたが，一方で初級者は9本を安定してスイングすることができず，上述の手法から最適設計を見出すことが困難である．そこで本章では，中上級者のスイングデータ変化量から初級者のスイングデータ変化量を予測することで，初級者の実測本数を3本に削減することを目指す．繰り返し試技を行うことができる本数まで初期の計測本数を削減し，スイングのバラつきを補う考えである．

本章の前提として，「基準となるシャフトにて類似したスイング特性を持つゴルファー同士は，他のシャフトをスイングした場合のスイング変化量も類似している」という立場に立つ．第3章で示した通り，中上級者のトライアルシャフト9本を用いたスイングデータは数多くある．そこで，これらの中上級者のデータを用いて次のようにして予測する．まず，9本のうち基準シャフトでのスイングデータを自己組織化マップとK-means法を用いてクラスタリングする．次に，初級者の基準シャフトでのスイングデータがどのクラスと類似しているかを見つけ出す．続いて，中上級者のスイング変化量を初級者のスイング変化量として，その他のシャフトでのスイングデータを得る．最後に，第3章と同様の手法を用いて個人のスイング特性に応じた最適設計を行う．

結果として，初級者の場合は9本の実測データを用いるよりも，3本を3球ずつスイングした実測データの平均値，及び6本の予測データを用いることで，飛距離，方向性ともに改善できることが明らかとなった．

## 【第5章】

前章まででは，飛距離と方向性に焦点を当ててきた．これらはゴルフにおいては最も大きな関心事ではあるが，それと同様に再現性や安定性と呼ばれるものも非常に重要なファクターである．ゴルフでは繰り返し同じショットを打つ必要があるためである．

本章では，ゴルフショットにおける再現性の指標として身体負荷量を提案し，飛距離と再現性を同時に満たすためのゴルフシャフトの最適設計を試みる．飛距離の指標となるクラブスピードの算出には有限要素法，再現性の指標となる身体負荷量の算出にはマルチボディダイナミクスによる逆動力学解析を用いる．身体負荷量は，閾値を考慮した上半身が発揮する関節トルクの総量と定義する．最適化計算時には，計算負荷を考慮して応答曲面法を用いる．クラブスピードと身体負荷量とはトレードオフの関係にあるため，そのパレート解よりクラブスピードを重視した場合，身体負荷量を重視した場合それぞれの最適ゴルフシャフト及びそのときの動作を得

る.

クラブスピードを重視した場合の最適シャフトを作成し実証実験を行った結果、コントロールシャフトと比較して、飛距離、再現性共に改善されることが明らかとなった。

## 【第6章】

本章は第1章～第5章のまとめである。

本研究では個人のスイング特性に応じたゴルフシャフトの最適設計を試みた。有限要素法によるシミュレーションモデルを作成し、繰り返し計算を行うことによって最適解を得ることをベースとした。しかしながら、ゴルフシャフトは人間が使う道具であるが故に、単純な繰り返し計算を行うだけでは最適解に辿り着くことはできない。例えば、用具が変わることでスイングが変わる、初心者は安定してスイングすることができない、求めるニーズが人によって異なる、等が挙げられる。本研究では、数学的手法を取り入れることで、これらの課題を解決しゴルフシャフトの最適設計手法を確立した。

また、本研究で得られた知見をもとにシャフト選定システムを開発し市場に投入した。2017年現在、全国5か所で稼働しており今後もその拠点は増える予定である。ゴルファーのスイングデータは日々蓄積しており、さらなるブラッシュアップを行う予定である。

本研究では、実用的な時間で計算可能な科学的・客観的な最適設計手法を確立した。これは、ゴルフシャフトだけに限られるものではなく、個別設計が求められる他の産業に応用可能である。本研究の成果が、今後多くの分野に活用されることを願い、各章の手法を一般化したフローチャートを記載した。