

博士論文

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

下野 智史



# 目次

1. 序論	2
1.1 スポーツ科学と用具開発	2
1.1.1 スポーツ科学の発展	2
1.1.2 炭素繊維強化樹脂の特徴	2
1.1.3 本研究のテーマと意義	4
1.1.4 スポーツ用具市場	5
1.1.5 ゴルフの歴史と用具の発展	6
1.1.6 ゴルフシャフトの特徴と役割	8
1.2 テーラーメイド設計の重要性	9
1.2.1 現状のテーラーメイド設計	9
1.2.2 現状の課題	10
1.2.3 先行研究と本研究の位置付け	11
1.3 本研究の目的	17
1.4 本論文の構成	17
2. 有限要素法による時刻歴応答解析を用いた最適設計	20
2.1 緒言	20
2.1.1 有限要素法	20
2.1.2 ゴルフシャフトへの適用背景	21
2.1.3 ゴルフパフォーマンスの基本原則と先行研究	21
2.1.4 本章の狙い	23
2.2 スイング動作の計測	23
2.2.1 従来の課題と解決策	23
2.2.2 6軸センサ	23
2.2.3 計測結果	26
2.3 有限要素法によるシミュレーション	27
2.3.1 ゴルフスイングのモデリング	27
2.3.2 トップインパクトの切り出し	27
2.3.3 解析結果と実測結果の比較	29
2.4 最適シャフト設計手法の提案	30
2.4.1 検討	30
2.4.2 実際のシャフト設計手順	31
2.4.3 最適SPEC導出アルゴリズム	32
2.4.4 弾道の最適条件と目的関数	33
2.4.5 解析結果及び検証実験	34

2.5	結言	41
3.	実験計画法と応答曲面法を用いた最適設計	44
3.1	緒言	44
3.1.1	背景	44
3.1.2	現状の最適設計	44
3.1.3	要素技術と先行研究	44
3.1.4	本章の狙い	46
3.2	計測及び解析の準備	46
3.2.1	一般的な解析手法を用いた場合	46
3.2.2	実験計画法	47
3.2.3	応答曲面法	51
3.2.4	結果の妥当性評価	58
3.3	フィッティングシステムの構築	62
3.3.1	システム概要	62
3.3.2	ヘッド挙動データの可視化	62
3.3.3	最適ゴルフシャフトの選定	65
3.3.4	確認試験	67
3.4	結言	69
3.5	今後の展望と課題	69
4.	自己組織化マップによるスイングデータ予測を用いた最適設計	72
4.1	緒言	72
4.1.1	背景	72
4.1.2	先行研究	72
4.1.3	本章の狙い	72
4.2	自己組織化マップ	72
4.2.1	原理	72
4.2.2	クラスタリング	74
4.2.3	クラスタリングの有効性確認	76
4.3	スイングデータの予測	77
4.3.1	概要	77
4.3.2	予測手法	78
4.3.3	基準シャフトの選定	78
4.3.4	重み付け	79
4.4	結果検証	81
4.4.1	初級者への適用精度	81
4.4.2	基準シャフトを1本とした場合の検討結果	83
4.4.3	予測データを用いた最適シャフト選定	83

4.5	結言	84
5.	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設計	88
5.1	緒言	88
5.1.1	背景	88
5.1.2	先行研究	88
5.1.3	本章の狙い	88
5.1.4	概要	89
5.2	計測	90
5.2.1	スイング動作の計測	90
5.2.2	応答曲面法	94
5.3	解析	94
5.3.1	クラブスピード	94
5.3.2	身体負荷量	95
5.4	最適化	97
5.4.1	クラブスピードおよび身体負荷量の応答曲面算出	97
5.4.2	パレート解	98
5.4.3	解析結果	99
5.4.4	実証実験	101
5.5	結言	103
6.	結論	106
	研究業績リスト	121
	謝辞	123



# 第 1 章 序 論

## 1. 序論

### 1.1 スポーツ科学と用具開発

#### 1.1.1 スポーツ科学の発展

スポーツ科学の起源を辿れば古代ギリシア時代にまで遡る。当時、都市国家の代表選手の動作が研究されていたことが記録されている[1][2]。

その後、スポーツ科学はヨーロッパでの医学研究を中心に発達してきた。一方、日本で初めて「スポーツ科学」という用語が用いられたのは1960年代と言われる[3]。1964年に東京オリンピックを控え、科学的な分析が勝利につながると考えられたためである。計測技術が発達したためスポーツの分析ができた、と見ることもできるが、スポーツ中継や分析のニーズが計測技術を押し上げる結果となった、とも言える。

また、用具開発とスポーツ科学の発展にも強い結びつきがある。例えば2008年の北京オリンピックの水泳種目にて、speedo社製の競泳水着「Izr racer」を身に付けた選手が世界記録を何度も更新したことは記憶に新しい[4][5]。その後この水着はルールで規制されるまでに至った。水泳の場合はプレイヤーの身体能力や技術を競うためのものであるからである。一方、用具を使うことを前提としたスポーツも多数存在する。ゴルフやテニス、自転車競技等がその代表格と言える。また、2012年のロンドンパラリンピック以降パラスポーツへの関心も増している[6][7]。パラスポーツはまさしく人間と用具が一体となって行われるスポーツである。そのため、近年では個人の特性に応じたスポーツ用具開発が重要視されている[8][9]。

これらのスポーツ用具の発展に大きな寄与をしたものとして、炭素繊維強化樹脂が挙げられる。

#### 1.1.2 炭素繊維強化樹脂の特徴

炭素繊維強化樹脂(Carbon Fiber Reinforced Plastics ; 以下, CFRP)は、マトリックス(母材)と呼ばれる高分子材料を炭素繊維で強化する、という考え方が一般的であるが、むしろ極めて高い強度と剛性を持つ炭素繊維を使いやすくするためにマトリックスで固めた、という言い方がふさわしい[10]。Fig. 1-1に、金属材料と繊維方向におけるCFRPの比剛性、比強度を示す[11][12][13]。このように、CFRPは既存の金属の特性をはるかに凌駕する性能を持つ。炭素繊維以外にもアラミド繊維、ボロン繊維、ガラス繊維等を用いた繊維強化材料も存在するが、炭素繊維強化材料が最も

優れている。さらに炭素繊維にも数種のグレードがあり、用いる繊維によっても性能が大きく変わる。具体的な数値の一例を挙げると、汎用的な繊維を用いてチタンと比較した場合、比剛性で約 8 倍、比強度で約 10 倍の性能を持つと見積もることができる。

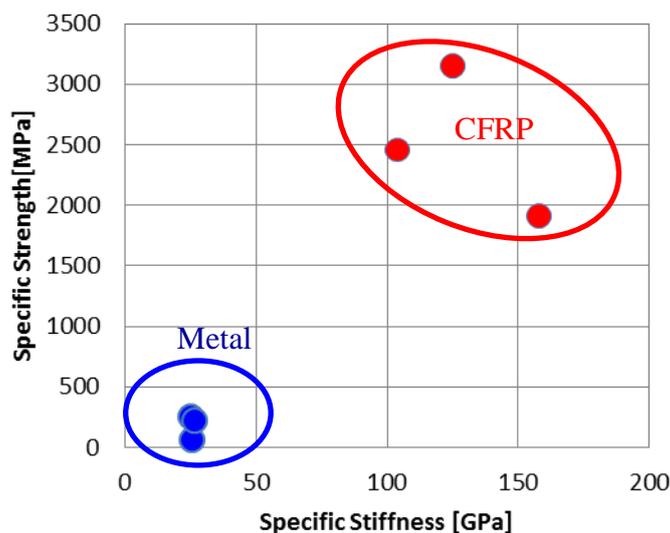


Fig. 1-1 Specific stiffness and strength of CFRP (Data source is ref. [10][11][12][13]).

また、CFRP のもう一つの大きな特徴として異方性が挙げられる。金属等の一般的な材料は、どの方向に対しても同様の剛性、強度を持つため「等方性材料」と呼ばれる。これに対して CFRP は、繊維方向に対しては上述したように極めて高い比剛性、比強度を示すが、繊維と垂直方向に対しては金属の性能より遥かに劣る。ほぼマトリックスの性能と同等にまで低下する。そのため、「異方性材料」と呼ばれる。単一の等方性材料を用いて製品を設計した場合、形状によってその性質が規定される。しかし、異方性材料を用いた場合は形状に加えて材料の積層角度も考慮する必要がある。さらに、通常は一定方向のみで用いることはほとんどなく、いくつかの角度、いくつかの材料を複合し製品設計を行う。CFRP の設計が複雑な要因は、まさしくこの異方性が存在するためであり、と同時に、設計できる材料と呼ばれる所以でもある。例えば、CFRP からなる積層版の長軸方向の弾性率  $E$  は、式 1- (1) で表され、積層角度  $\theta$  の関数となる[14]。

$$E = \frac{E_T}{1-\nu_L\nu_T} \sin^4 \theta + 2 \left( \frac{\nu_L E_T}{1-\nu_L\nu_T} + 2G_{LT} \right) \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \frac{E_L}{1-\nu_L\nu_T} \cos^4 \theta \quad 1- (1)$$

ここで、 $E$ 、 $G$ 、 $\nu$  はそれぞれ縦弾性係数、横弾性係数、ポアソン比を示し、添え字  $L$ 、 $T$  はそれぞれ繊維と水平方向および垂直方向を示す。

以上のように、軽量、高強度、高剛性だけでなく多種多様な性能が求められるスポーツ用具にとって、CFRPは非常に有力な選択肢となる。

CFRPの用途需要に着目すると、まず人工衛星に導入され、その後テニスラケットやゴルフシャフトで技術が磨かれた。さらにエアバス320やボーイング777等の航空機に応用され、2017年現在では自動車に普及し始めている[15]。このように、1980年代前半の導入期から1990年代中盤の拡大期に至るまで、CFRPはスポーツ用途にて最も多く使用されてきた。すなわちスポーツ用具の研究は、航空宇宙や軍事と同様に市場の黎明期にて行われることが多いため、その後の技術発展速度に影響を与え得るものである。

### 1.1.3 本研究のテーマと意義

本研究のテーマは、「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」である。すなわち、テーラーメイドのゴルフシャフトを設計することにある。しかしながら、ゴルフやスポーツ用具に限られたものではなく、広く産業界に応用することを見据えている。

テーラーメイドのゴルフ用具開発は古くから行われているが、その多くはゴルファーや開発者の主観的な判断によるものであり、個人のスキルや経験、勘といったものに依存している。このような段階にある場合、産業としての発展は難しい。本研究では、上述のような属人的な特性を排除するものであり、産業発展、技術確立に寄与することを目指す。「暗黙知を形式知化するための研究」と換言することもできる。同様の課題は他の分野にも見られ、それらを解決しようとする動きも数多くある。例えば、近年の代表的なものとしてテーラーメイド医療が挙げられる[16]。テーラーメイド医療は、個人の特性に基づいて処方箋を変えることで治療や施術のパフォーマンスを最大化する試みである。これまでは医師が豊富な経験と知識によってその役割を担っていたが、慢性的な医師不足の問題が顕著であり、画一的な治療にならざるを得なかった。そこで、患者のDNAや身体特性データから客観的な判断ができれば、患者個人にとってより有効な治療を行うことができる、というものである。しかし、医療現場では人の生命に関わるため、新しい技術確立には十分にその安全性を確認する必要がある。そのため、既存の技術が用いられることが多い。また、日本のモノづくりにおけるいわゆる「職人技」の伝承も同様の課題を抱えている。そこで、挑戦的なテーマ設定が可能であるスポーツ分野において、これまで専門家に頼らざるを得なかった判断をデータからの判断に切り替える技術を確立することで、広く産業や人間生活の向上の一助とすることができればと考えて

いる。

また、多くのゴルフシャフトは CFRP からなる。CFRP は「設計できる材料」とも言われており[17]、CFRP を用いた成型加工品は非常に複雑で高度な設計スキルが要求される。CFRP を用いた最適設計という観点で見ると、市場規模としても非常に大きい。例えば、CFRP 成型加工品・マテリアル関連市場は 2015 年で 1 兆 3018 億円であり、2030 年には 5 兆 3900 億円と約 4 倍に拡大されることが予想されている[18]。

このように、属人的な性質を排除することでの産業発展への寄与と、市場規模の拡大に基づく有用性の両面にて、本研究のテーマは意義あるものとなると考えられる。

#### 1.1.4 スポーツ用具市場

Fig. 1-2 に国内の各スポーツにおける市場規模を示す[19]。ゴルフ用品は 2500 億円以上の規模で推移しており、スポーツ全体の約 20% と最大の市場規模を持つ。2015 年に着目すると、ゴルフが 18.6%、次いで釣りの 9.1%、野球・ソフトボールの 5.1%、サッカー・フットサルの 4.5%、テニスの 4.1% と続く。このように、他のスポーツと比較して圧倒的に大きな市場を形成している。また市場規模に加えて、プレイヤーが止まっているボールを打つ、というクローズドスキルであるため非常に分析が行いやすい。そのため、高速度カメラでの分析や弾道追尾装置の実用化等、常にスポーツ全体の技術発展を牽引してきた。ゴルフで確立した弾道追尾装置は、今やテニスの試合中継や日米双方のプロ野球界でも積極的に活用されている[20]。

このように、市場規模の大きさを背景とした研究開発費用の規模、ゴルフというスポーツの特性を背景とした分析のしやすさは、今後も変わらず続くため、スポーツ業界ひいては産業全体の発展のため、ゴルフの分析が先端技術を開発する役割を担い続けることになると考えられる。

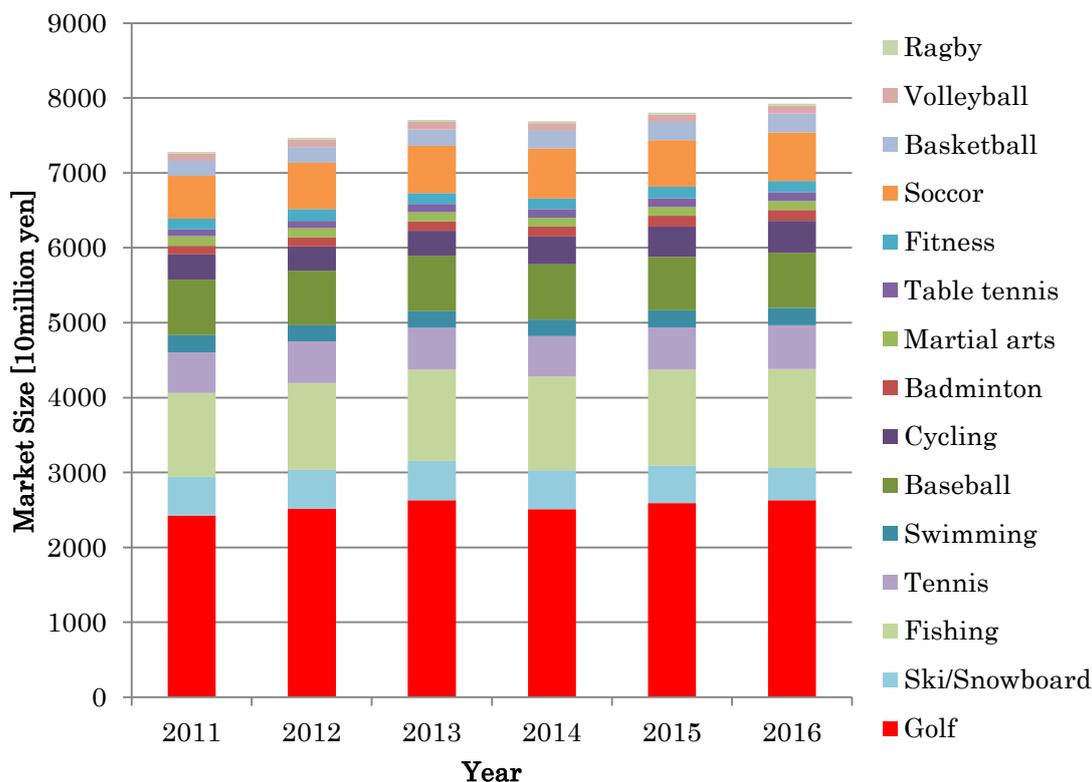


Fig. 1-2 Market size of each sports in Japan (Data source is ref. [19]).

### 1. 1. 5 ゴルフの歴史と用具の発展

ここで、ゴルフの歴史と用具の発展を振り返る。ゴルフの発祥としては諸説あるが、14世紀から15世紀にかけてスコットランドで始まったとされるのが有力である[21]。当初のボールは羽毛を皮で包んだもの、クラブはモクセイ科の硬い木で作られたものであり、現在のホッケースティックのようにヘッドとシャフトに明確な区別はなかった。その後しばらくは大きな用具の変化はなくゴルフは各地で愛されるようになる。最初のブレイクスルーは18世紀中盤、ガッタボールと呼ばれるこれまでより硬いボールが開発されたことに端を発する。これを機に用具開発が一気に加速することになる。それまでウッドとアイアンに明確な境界線はなかったが、鉄製のアイアンクラブが作られるようになり、19世紀初頭にはスチールシャフトが登場した。ドライバーではヒッコリー製シャフトとパーシモンヘッドが開発され、その性能の良さから半世紀以上ヒッコリーとパーシモンの時代が続くことになる。

2度目のブレイクスルーは、1970年代～80年代にかけて起こった。それを担ったのがメタルヘッドとカーボンシャフトである。ゴルフ業界にとっては材料革命でもあった。これ以後、科学的なゴルフ用具の分析が進むようになり、新素材が随時市

場に投入されるようになる。例えば、1990年代の前半から中盤にかけて、チタンの採用によってヘッドを軽量、高強度に作るできるようになり、ヘッドの大型化が進んだ。ヘッドを大きくすることでヘッド重心回りの慣性モーメントを増大させ、オフセンターヒット時でも飛距離ロスや方向性損失を防ぐ目的である[22]。一方、このヘッドの高慣性モーメント化によってひとつの弊害が生まれた。通常、バックスイングではヘッドは外側に振れ、インパクト時にスクエアに戻る。しかし、ヘッドの高慣性モーメント化によってスクエアに戻らないという現象が生じた。そこでこれをシャフトで解決するために、カーボンの異方性を活用し振れにくいシャフトが開発されることになった[23]。このように、ヘッドとシャフトは車の両輪のように互いに影響しながらゴルフクラブとして発展していくこととなる。

Fig. 1-3 に 2000 年以降のゴルフクラブの技術変遷を示す。これまで、前述のように車の両輪として改良が続けられていたヘッドとシャフトであるが、2002 年を境にその様相がガラリと変わることになる。The R&A(Royal and Ancient Golf Club of Saint Andrews, 全英ゴルフ協会)により SLE 規制が発表されたからである(実施開始は 2008 年)[24]。SLE 規制とは、Spring like Effect と呼ばれる効果にある一定の上限を設けたもので、ヘッドの反発力による飛距離増大を規制するものである。そのため、ヘッドで飛距離を伸ばす時代は終焉を迎えた。これをカバーするために、シャフトで飛距離を伸ばす工夫が進むことになる。その急先鋒としてシャフトの長尺化が行われた。長尺化することによって、角速度を一定に保ちながらヘッドの速度を高めて飛距離を伸ばすための対処である[25]。これには当然、シャフトの軽量化、ヘッドの軽量化、コントロール性能の増大が求められ、それらの方向に技術開発がシフトしていくこととなった。しかし、クラブ自体が長くなることでボールにジャストミートさせることが難しく、結果として飛距離損失を招くことになる。そのため長尺化クラブは、非常にスイングが安定しているある一定数のプレイヤーにのみ支持されるにとどまり、適度な長さに落ち着くことになる。次に 2010 年ごろには、ボールのスピンの量をコントロールするために、ヘッドのロフト角や重心位置をコントロールする技術が開発される。スピンが少なければ、ランが出るためトータル飛距離を大きくすることができるためである。ボールも当然スピンの量を軽減するための開発がなされていくことになる[26]。スピンの量が少なければ確かに飛距離は伸びるものの、一方で方向安定性に欠くことになる。これは、ボールにバックスピンがかかることによってジャイロ効果が生まれスピン軸は水平に近づき、ボールの曲がり幅が少なくなる、という原理による。そのため、スピンの量を減らすことは方向安定性とのトレードオフになる。よって、この技術もあるところで平衡状態に陥った。また、シャフトでスピンを減らす工夫も当然なされている[27]。次に、2015 年頃からはヘッド自体の重量を増すことで衝突エネルギーを増大させ、飛距離を伸ばそうという試

みが活発となった。ヘッドが重くなるため、シャフトはより軽く、かつ重心位置をグリップ側に移動させる技術が求められた[28]。スイング時の慣性モーメントをこれまでと同様にすることで、重いヘッドでも同程度のクラブスピードを得られるようにするためである。上記の技術はそれぞれ代表的な特許を引用したが、Fig. 1-3の最下段に各年代における関連特許の件数を示した。

このように、ゴルフクラブ発展の歴史を振り返ると、実は用具の物理的な要素はほぼ全てが出尽くしており、金属やカーボンシャフトが登場した時のような材料革命が起こらない限り、改良の余地はほとんど残されていないように思われる。そのためゴルフ業界では、個人のスイング特性に合わせた最適設計、テーラーメイドのクラブ設計や、既存のクラブから最適なものを選択するフィッティングが求められている。特にゴルフシャフトはルールの規制も少なく、CFRP の特性を活かすことで非常に幅広い設計が可能であるため、最適設計、テーラーメイド設計、フィッティングの中心的なパーツと目されている。

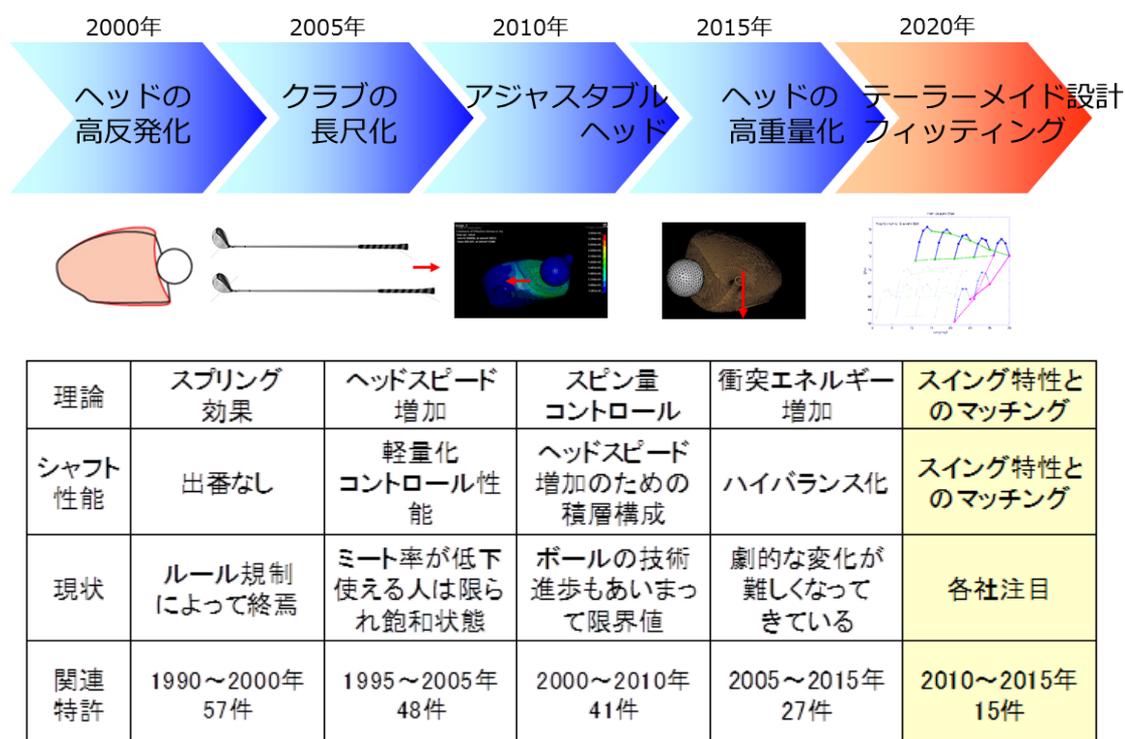


Fig. 1-3 Technical transition of golf club.

### 1.1.6 ゴルフシャフトの特徴と役割

次にゴルフシャフトの特徴と役割を述べる。ゴルフシャフトは弾性体であり、ス

イング中に曲げモーメントと振りモーメントを生じるという特徴を持つ。ゴルフヘッドの重心がシャフト軸線上からオフセットしているためである。さらに、ゴルファーによってスイングが全く異なるため、上記の2つのモーメントもゴルファーによって異なり、その動きは非常に複雑なものとなる。仮にゴルフシャフトを剛体と見なせば、ゴルフシャフトの動きとしてはシンプルなものになる。しかしながら、弾性体であるために、しなり戻りを活用してクラブスピードを増大させることが可能となっているのである。また、ゴルフシャフトがしなるということはヘッドの位置や姿勢が変わるということでもある。すなわち、ゴルフシャフトの役割は「ヘッド挙動の制御」と言うことができる。

ボールの行方はインパクト直後のボール初期値でほぼ決まる。飛行中のボールに働く空力、スピンのほどこけ具合も当然飛距離や方向性に影響するものの、ボール飛翔後の独立事象であるため本研究では考慮しない。主なボール初期値は、ボール初速、スピン量、上下打ち出し角であり、「飛びの3要素」と呼ばれる[29]。方向性を考える場合はこれとは別に、スピン軸の傾き、左右方向の打ち出し角も考慮する。これらボールの初期値は、ボール自身の特性を除けば、インパクト時のヘッド挙動とヘッド特性の2つによって決まる。ヘッド特性がルールで規制されているとなれば、残すはヘッド挙動をいかに制御するかがカギとなる。

このように、シャフトの役割は「ヘッド挙動の制御」＝「弾道の決定」＝「ゴルフのパフォーマンス」であるため、ゴルフクラブ開発者の多くはシャフトに焦点を当てている。

## 1.2 テーラーメイド設計の重要性

### 1.2.1 現状のテーラーメイド設計

ヘッド開発が中心の時代には、ヘッドとボールの物理的な衝突を解明すればよかったが、前述の通りシャフトはスイングによってしなり方が変わる。そのため、各ゴルファーのスイングに合わせたテーラーメイド設計が重要になる。現状のテーラーメイド設計は、特にプロゴルファーに対して行われている。各シャフトメーカーやクラブメーカーでは、選任者がプロゴルファーに対してヒアリングやスイングの観察を行い、各プロゴルファーにフィットするクラブやシャフトを提案している。この選任者を本研究では「フィッター」と呼ぶこととする。フィッターは、プロゴルファーの練習会場や試合会場にアテンドし、そこで得た情報をシャフト設計者にフィードバックする。例えば、プロゴルファーが「このシャフトは走らない」といったコメントをしたとすれば、フィッターは「もう少し先端を動くように改良して

欲しい」と設計者に依頼するのである。これらのコメントをシャフト設計者が自身の経験に基づいて解釈し、設計に落とし込む。また、時にはフィッター自身が解釈し、「先端を柔らかくしてほしい」といった依頼をする場合もある。なお、「シャフトが走らない」といった表現は、ゴルフ業界特有のものでありヘッドが動きにくく感じられるときに使用される表現である。

一方、アマチュアゴルファーに対するテーラーメイド設計はどうだろうか。一部、完全にテーラーメイド設計を行っているシャフトメーカーも存在するが、膨大なコストがかかるため普及には至っていない。その代わりに、既存のラインナップからシャフトを選ぶ「フィッティング」が盛んに行われている。フィッティングも広義の意味でのテーラーメイド設計であり、本研究では区別しない。フィッティングを行うのもフィッターの役目である。プロ専属のフィッターが、アマチュアゴルファーに対してフィッティングを行うこともあるが、多くはアマチュア専門のフィッターが存在する。

### 1.2.2 現状の課題

これらプロゴルファーに対するテーラーメイド設計にしても、アマチュアゴルファーに対するフィッティングにしても共通の課題がある。それは、人の主観的な判断があまりにも多いことである。

例えば、プロゴルファーのテーラーメイド設計を見てみると、まずプロゴルファー自身がシャフトに対してコメントする。次に、フィッターがそのコメントを解釈し、開発者へ伝える。開発者は、どのプロの言葉か、フィッターの判断は適切かを吟味して設計に落とし込む。実に3人の主観的な判断が入り混じっている。これには、よほど熟練した者でないと最適な設計を行うことは難しい。事実、最適と思われるシャフトを設計したとしても、全般的な外れなこともよくある。そのため、数多くのシャフトを試作し、その中で良さそうなものをプロゴルファーが選ぶ、という場合も多い。

次に、アマチュアゴルファーが抱える課題を見る。多くのゴルフ店舗にていわゆるフィッターが存在し、彼らフィッターのアドバイスに基づいてシャフトやクラブ選びが行われている。しかし、これらフィッターは店員が兼任していることが多く、必ずしもゴルフへの造詣が深いわけではない。計測機器を設置している店舗も多いが、アマチュアゴルファーでは試技ごとのバラつきも大きく、計測でよい結果を出したものが最適なシャフトとは限らない。さらに、数多くの試打を行うことも難しく、3～5本打った中から決める、というのが現状である。一部、プロのフィッター

と専門のスタジオを準備している店舗もあるが、その多くはレッスンと一体型になったフィッティングであり、本当にシャフトの違いにより結果が変わったのか、それともレッスンの賜物なのかは定かではない。

### 1.2.3 先行研究と本研究の位置付け

次に先行研究について述べる。ここでは、Fig. 1-4 に示すように、用具と人間、計測と解析という2つの軸を切り口として先行研究を整理し、本研究の位置付けを明らかにする。

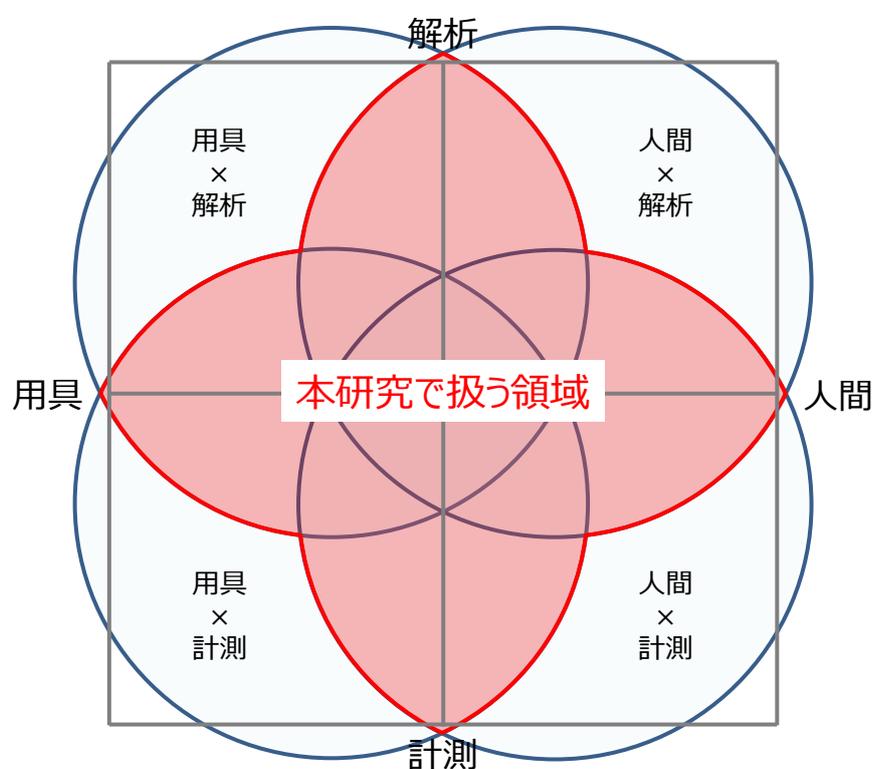


Fig. 1-4 Precedence research and position of this research.

[用具×計測]

まず左下の領域にある用具×計測に関して述べる。

#### ・静的計測

用具の静的な計測は、各業界団体のルールによって規定される。例えば、ゴルフであれば The R&A (The Royal and Ancient Golf Club of Saint Andrews, 全英ゴルフ協

会) や USGA (United States Golf Association, 全米ゴルフ協会)によってゴルフ規則が定められ, クラブの硬さやねじれ角等の計測方法が決められている[30]. その他のスポーツも同様に, 用具の静的な計測方法は十分に確立されている.

#### ・動的計測

動的な計測の場合は, Williams ら(2002), Arakawa ら(2006)による高速度カメラを用いたヘッド運動の計測や, Martin(2012)や Nathan(2017)にあるように, ドップラー効果を用いたボール弾道の計測等があり, ゴルフに限らず様々なスポーツ場面に広く応用されている[31][32][33][34].

#### [人間×計測]

次に右下の人間×計測に着目する.

#### ・3D モーションキャプチャシステム

3D モーションキャプチャシステムを用いた全身動作計測を行ったものとして, Egret ら(2003), Myers ら(2008), Horan ら(2011)が挙げられる[35][36][37]. 例えば Myers(2008)は, 上半身の回転角速度がクラブスピードに貢献することを見出し, それにはスイングのトップ時点で上半身と骨盤のねじれ角の差を大きくすべきであるという結論を導き出しており, 様々なスキルへの示唆が人間の計測から生まれている.

#### ・センサ

上述の 3D モーションキャプチャシステムは高価で, 実験負荷も高いため, グリップセンサを用いて簡易的に計測を行う技術も開発されている. 例えば, 仰木ら(2004)は, ゴルファーのスイング特性を簡易的に計測するために, 3軸加速度センサを用いてスイング動作を計測する手法を提案した[38]. 太田ら(2012)は, 3軸加速度センサと3軸ジャイロセンサを用いてより詳細かつ簡便に各ゴルファーのスイング動作を計測する手法を提案し, その有効性を示した[39].

また, センサを用いて全身動作の計測を行った研究も進められており, Peppoloni ら(2015)は, センサフュージョン技術を用いて, センサのみで全身動作の計測が可能であることを示した. この際, カルマンフィルターを用いてデータ補正を行っている[40]. また, Fasel ら(2015)は, 全身動作をセンサのみで計測するには, センサ同士のキャリブレーションが重要で, 精度を考慮すると慎重に行う必要があると述べている[41]. Pons-Moll ら(2010)は, 全身動作をセンサのみから簡便に計測する技術を発展させ, カメラデータと組み合わせたもので精度向上が可能であるとしている[42]. 以上のように, 複数のセンサを組み合わせることで全身動作を計測するセンサフ

ユージョン技術が開発されつつある。しかしながら、これらはまだまだ精度向上の余地がある。

#### [用具×解析]

次に、左上の用具×解析に移る。

##### ・シミュレーションモデルの構築

ゴルフ用具でのシミュレーションモデル構築に関する先行研究として下記が挙げられる。シャフトに着目したものとして、松本ら(2000)による、有限要素法(以下、FEM)を用いてシャフトの振動を解析し、より簡略化されたビーム要素モデルでもシェル要素モデルと同等の精度が得られたことを示したものの[43]、井上ら(2000)による、グリップ部の境界条件を設定することで、より実際の現象に近い条件でシミュレートすることに成功したとの報告[44]、岩壺ら(2001)による、シャフトのねじり振動解析を行うことで、スイング中のシャフトのねじれが1回のスイングにおいて複数回周期的に出現することを明らかにした研究[45]等である。また、クラブに着目したものとしては、Matsumotoら(2017)による、クラブ・シャフト・ヘッド・グリップそれぞれの慣性モーメントの違いによって、どのようにヘッド動作が異なるかをFEMによって示した研究[46]等が挙げられる。

ゴルフ以外のスポーツでも、物体のシミュレーションモデル自体は、Cooke(2002)、Choら(2009)、Allenら(2010)にあるように、バドミントンのシャトル、シューズ、テニスラケット等、様々なスポーツ用具にて構築され、その動作の解明に役立てられている[47][48][49]。

##### ・最適設計

シミュレーションモデルを用いて繰り返し計算を行い、用具の最適設計まで行った研究としては、ゴルフ分野では次のような研究がなされている。Nakaiら(2004)は、ゴルフクラブヘッドの厚みを設計変数とし、ボールスピードを目的関数として最適化計算を行い、飛距離向上にはボールとのインピーダンスマッチングが重要であることを示した[50]。また、Petersenら(2009)はFEMによる繰り返し計算を用いて、ゴルフクラブヘッドとボールの最適設計を行い、初期条件よりも7%のボール速度向上が見られたと述べている[51]。Wuら(2017)は、ベシスベクトル法を用い、ゴルフクラブヘッドの形状と質量分布およびボールの層ごとの材料厚みを設計変数、ボールの初速度を目的関数として最適化計算を行った結果、従来のヘッドとボールよりも初期速度が4.9%向上するとしている[52]。

##### ・ゴルフ以外のスポーツ

ゴルフ以外のスポーツでは、Khajah ら(2015)は、最適化計算を用いて怪我のリスクを低減させる靴のソールの材料パラメータを算出した[53]。また、Seo ら(2015)は、スキージャンプ台の目的関数として飛距離、飛距離のスキル依存性、コスト、安全度の4つを採用し、その形状の最適化を行った[54]。Stier ら(2015)は、FEM と既存の最適化ソフトウェアを用いてカイトの最適設計を行い、重量を最小化する解を見出し、実際にそれを作成した[55]。Kaufmann(2015)は、FEM を用いてスノーボードの特性をシミュレートすることで、上下非対称の積層構成とすることでスノーボードの性能が向上することを報告している[56]。

以上のように、物理的な性能についてシミュレーションモデルを用いて最適化する取り組みは、ゴルフ分野では特にヘッドにおいて進められている。また、同様の最適化計算は、スキージャンプ台やカイト等、大小様々なスポーツ用具に適用されている。このように、人間を含まない物理的な現象のみを取り扱うのであれば、FEM モデルを繰り返し実行することで最適解が得られるため、スポーツに限らず多くの工学問題で適用されている。

#### [人間×解析]

次に、右上の人間×解析に目を向ける。

##### ・ゴルフ

岩壺ら(1990)は、ゴルファーのスイングモデルを構築し、異なるスイング特性を持つプレイヤーはシャフトのしなり方も異なるため、異なる硬さのシャフトを使用すべきであることを示唆した[57]。大屋敷ら(2012)は、ある特定のプレイヤーのスイングデータ1つを用いて、数種類の特性の異なるシャフトのスイングをシミュレートすることによって、それぞれのヘッド挙動を算出した[58]。Joyce ら(2016A)は、体幹上部と体幹下部の屈曲角が、打ち出し角に及ぼす影響をスイングモデルを用いて調査し、高いクラブスピードと低い打ち出し角を達成するには体幹下部の屈曲を小さくすることが有効であることを明らかにした[59]。Takagi ら(2017)は、クラブフェースとスイングプレーンの関係をモデリングし、感度解析を行うことによってクラブフェースはシャフト角度と大きく関係していることを示した[60]。以上のように、ゴルフは特に身体動作を計測しやすいスポーツであるため、ゴルフスイングの身体動作解析は日々進められている状況にある。

##### ・ゴルフ以外のスポーツ

ゴルフ以外にも多くのスポーツでプレイヤーの動作モデルは構築されている。例えば、Belling ら(2015)、Oberegger ら(2010)、Minetti ら(2011)にあるように、野球、ス

キー，サイクリング等が例示できる[61][62][63].

ここまで述べてきたとおり，上述の4領域はここで挙げた以外にも多くの研究がなされており，それぞれの領域は十分に発展していると言える．そこで，本研究ではこれらの複合領域に焦点を当てる．実際のスポーツ現場におけるテーラーメイド設計や最適設計は，これらの複合領域を考える必要があるためである．まずは，この複合領域に属する先行研究を述べる．

#### [複合領域]

##### ・ゴルフ

Joyce ら(2016B)は，2種類の調子の異なるゴルフシャフトを用いることで，プレイヤーのスイングが変化することを見出し，先調子ではコックのリリースが早まることで打ち出し角が約 $2^\circ$ 高くなったとしている[64]. Mackenzie ら(2017)は，2種類のゴルフシャフト剛性の違いがどのようにスイングとヘッド動作に影響を与えるかを調べ，33名の被検者のうちの約半数では，ヘッド速度に有意差があったとしている．またこの影響は，シャフト動作の違いよりもグリップ動作の違いによって生じたものだとしている[65]. これらは計測×人間，計測×用具の複合領域と言え，使用するシャフトが人間の身体動作に影響を及ぼすことを示している．

Mackenzie(2009)は，順動力学によるゴルフスイングモデルを構築し，シャフトの硬さによってヘッド動作がどのように変化するか調べた．これによると，クラブスピードの向上は見られず，フェース向きとインパクトロフトのみに影響するとの結論であった．また，シャフトによって最適動作が異なることにも言及している[66]. Balzerson ら(2016)は，身体動作，クラブ運動，ヘッドとボールのインパクト，ボールの弾道の全てを含んだ3次元のゴルフスイング動力学モデルが新たな性能のクラブ開発に役立つことを述べているが，モデルの構築に留まっている[67]. これらは解析×人間，解析×用具の複合領域に属し，モデルの構築や最適設計の重要性を述べてはいるものの実際に最適設計を行うには至っていない．

すなわち，ゴルフ分野においては数理的な最適設計手法は確立されていない．

##### ・ゴルフ以外のスポーツ

次に，ゴルフ以外の分野に目を向ける．小池ら(2012)は，バドミントンのスマッシュ動作において，ラケットの特性によってスイングが変化することを示唆した[68]. これは，ゴルフと同様に用具が人間の身体動作に影響を及ぼすことを示したものである．

身体の形状など静的な身体特性をもとにテーラーメイド設計を行った例としては、服やブーツのテーラーメイド設計に関する研究がある。例えば、Ling ら(2014)は、3D スキャナーで各個人の体型を計測し、さらに3D プリンタでその個人の体型に合わせた服を作成した[69]。Colonna ら(2017)は、熱可塑性の樹脂を用いて熱による変形を利用することで各プレイヤーにフィットするスキーブーツ開発した[70]。

動的な身体特性を考慮したテーラーメイド設計を行ったものとしては、次の3件の研究が挙げられる。Eberle ら(2017)は、アルペンスキーの着地時にかかる衝撃力をモンテカルロシミュレーションによって求め、各個人のブーツの最適なリア硬さを算出し、怪我のリスクを低減させることを試みた[71]。Usma-Alvarez ら(2014)は、車イスラグビーにおいて、車イスと選手の動作の交互作用に着目し、各選手における最適な車イスを実験計画法を用いて算出した。設計変数は、車輪の直径、キャンバー角、シートの高さ、およびキャンバーの深さであり、5名の選手の車イスの最適設計を行った。車イス選択のために、コーチやその関係者、あるいは車イス自体の発展に貢献できるとしている[72]。瀬尾ら(2014)は、円盤投げの形状に関わる変数を用具の設計変数、円盤飛翔の初期条件に関わる変数を選手スキルの設計変数とし、飛距離を目的関数とすることで用具とスキルの同時最適化を試みた。用具とスキル変化の相乗効果によって、世界記録を上回る可能性が示された[73]。

以上のように、ゴルフにおいてはテーラーメイド設計のために複合領域における研究の有効性が示されているものの、テーラーメイド設計手法は確立されていない。ゴルフ以外のスポーツではいくつか報告されているものの、その対象は極めて限られている。そこで、本研究ではこの複合領域に焦点を当てる。

#### [その他]

以下、その他本研究に関連する先行研究をここに記載する。必要に応じて本文においても再度引用する。

##### ・関節トルクと再現性

関節トルクと再現性の関連に着目したものとして、平井ら(2009)は、パターにおける安定性(再現性)には関節トルクが関係すると報告している[74]。Whiteside(2015)は、テニスサーブにて、上級者はトスアップの位置が異なっても関節トルクを調節することで、コンスタントにサーブを打つことができるとしている[75]。Ae ら(2015)は、野球のスイング動作にて、打点が異なる場合の体幹の発揮トルクについて考察している。これによると、打点によって発揮トルクが異なることが述べられている

[76].

以上のように再現性やコントロール性能は、完全には明らかにされていないものの、関節トルクが関与していることが示唆されている。

#### ・床反力の推定

床反力の推定に着目したのものとして、前田(2017)は、歩行時のモーションキャプチャデータについて、末端側から運動方程式を解くことでフォースプレートを用いずに動力学解析を行う手法を提案した。解析で得られた床反力と、計測との誤差は、左右方向 16.6%, 前後方向 5.9%, 上下方向 5.8%であったとしている[77]。Fry ら(2016)は、スクワット動作時についてモーションキャプチャデータのみから床反力を算出した。解析値と計測値とを比較して 5%水準で有意差はない、としている[78]。

以上のように、フォースプレートのデータを用いずに動力学計算を行うことも可能であり、その精度も定量的に明らかにされつつある。

### 1.3 本研究の目的

本研究は、上記の先行研究の状況を鑑み、客観的、定量的に、個人のスイング特性に応じたテーラーメイドのゴルフシャフトの最適設計手法を確立することを目的とする。また、これまでフィッターや熟練設計者が担ってきた役割に匹敵する精度を達成することを目標とする。

### 1.4 本論文の構成

前述の目的を達成するため、第2章では有限要素法を用いてゴルフシャフトの弾性モデルを構築し、熟練設計者4名の設計手法を模したアルゴリズムにて最適設計を行った。第3章では実験計画法と応答曲面法を用いて、シャフトが変わることでのゴルファーのスイング動作変化までも考慮した最適設計手法を構築した。第4章では自己組織化マップを応用し、中上級者のスイング動作変化量から初級者のそれを予測することで、第3章の最適設計手法の適用範囲を初級者にまで拡張した。第5章では再現性の指標として身体負荷量を提案し、飛距離と再現性を両立するための多目的最適化を行った。第6章では本研究のまとめと共に、ゴルフ以外の製品に本研究成果を適用するため、各章の手法を一般化したフローチャートを記載した。



## 第 2 章 有限要素法による 時刻歴応答解析を用いた最適設計

## 2. 有限要素法による時刻歴応答解析を用いた最適設計

### 2.1 緒言

#### 2.1.1 有限要素法

ゴルフシャフトの最適設計を行う上で、有限要素法による時刻歴応答解析は非常に有力な解決手段である。ここではまず、有限要素法について概説する。

有限要素法とは、微分方程式を近似的に解くための数値解析手法である。一般に単純な形状であれば解析的に微分方程式を解くことができるが、複雑な形状の場合は微分方程式を解くこともさることながら、その方程式を立てること自体が難しい。そこで、物体を有限個数の単純な要素に分割し、それらの総和から全体の挙動を予測しようというものである[79][80][81]。静的問題、動的問題のいずれにも応用可能な汎用的な手法であるが、ここではゴルフスイングの解析であるため、動的問題に着目する。動的問題は次のように定式化できる。

離散化された運動方程式を時刻 $t + \Delta t$ において表すと、次の式となる。

$$M {}^{t+\Delta t}\ddot{U} + C {}^{t+\Delta t}\dot{U} + {}^{t+\Delta t}Q = {}^{t+\Delta t}F \quad 2- (1)$$

ここで、 $M$ 、 $C$ は質量マトリックスと減衰マトリックス、 ${}^{t+\Delta t}Q$ 、 ${}^{t+\Delta t}F$ は内力ベクトルと外力ベクトルである。

このような動的問題を解くには運動方程式の逐次時間積分を用いる。時間積分法には大きく分けて陽解法と陰解法の2つがある。

陽解法とは時刻 $t$ における値 $U(t)$ を基にして、時刻 $t + \Delta t$ の値 $U(t + \Delta t)$ の値を代数的に求める計算方法である。この方法の利点は、時間ステップあたりの計算負荷を減少することができるということである。しかしながら、 $\Delta t$ を大きくとると解が発散してしまうため $\Delta t$ の大きさに制限ができ、境界値に近づくほど解の精度は悪くなる。これにより、多くの時間ステップを作る必要がある。陰解法は次のように定式化できる。

$$u_j^{n+1} = (1 - 2r)u_j^n + ru_{j-1}^n + ru_{j+1}^n \quad 2- (2)$$

ここで、 $r = \Delta t / \Delta x^2$ であり、 $\Delta t$ は時刻の間隔を、 $\Delta x$ は空間点の間隔を示す。また、 $u_j^n$ は $U(x_j, t_n)$ の数値的近似を表す。

式2-(2)が収束する条件は次のようになる。

$$r \leq 1/2 \quad \Leftrightarrow \quad \Delta t \leq \Delta x^2 / 2 \quad 2- (3)$$

陰解法とは時刻  $t + \Delta t$  の値  $U(t + \Delta t)$  を仮定し、その値の正誤の判定をその場の支配方程式を用いて調べ、誤差がゼロになるように仮定値を収束させていく計算方法である。この方法では線形方程式を解かなければならないため、時間ステップあたりの計算量は多くなるが、陽解法のように  $\Delta t$  への制約は無いため、より少ないステップ数で計算することができ、式 2- (4) のように表すことができる。

$$(1 + 2r)u_j^{n+1} - ru_{j-1}^{n+1} - ru_{j+1}^{n+1} = u_j^n \quad 2- (4)$$

### 2.1.2 ゴルフシャフトへの適用背景

計算力学の発達により、これまで人間による主観的な評価がメインであったゴルフ業界に有限要素法のような客観的手法が取り入れられ始めた。また、プロゴルファーや競技ゴルファーはもちろんのこと、一般的なアマチュアゴルファーにおいても、一打一打のパフォーマンス、すなわち飛距離や方向性を数値的に把握する傾向が高まっている。そのパフォーマンスに大きな影響を及ぼすのが、スイングと用具のマッチングである。前述の通り用具自体は改良の余地が少ないため、相対的にこのマッチングの重要度が高まっている。仮に用具自体に改良の余地が十分に残されていたとしてもこのマッチングはゴルフにおいては非常に大きなウェイトを占める。

ゴルフではしばしば「Far & Sure」という用語が使用される。この言葉が示す通り、ゴルフの究極の目的はボールを「遠くへ、正確に」飛ばすことである。事項ではその原理を概説する。

### 2.1.3 ゴルフパフォーマンスの基本原則と先行研究

ゴルフボールの飛距離を決める要素として、いわゆる「飛びの3要素」と呼ばれるものがある。ボールスピード、スピン量、打ち出し角の3つがそれである。飛びの3要素を決めるには、ボールの性能、ゴルフクラブヘッド(以下、ヘッド)の反発性能、重心位置等が関連するが、ヘッドの運動が最も大きな影響を及ぼす。

例えば、ボールスピードはクラブスピード(ヘッドスピード)と大きな相関があり、ボールスピードが大きいほど飛距離が伸びる。また、スピン量はヘッドの上下方向

のスイング軌道と相関があり、下から上に打ち上げればスピン量が減り、上から下に打ち下ろせばスピン量が増える。スピン量が少なすぎるとボールの対空時間が短くなり、いわゆる「ドロップ」と呼ばれる弾道となり飛距離は落ちる。逆にスピン量が多すぎても、いわゆる「吹け上がり」と呼ばれる弾道となりこれもまた飛距離が落ちる要因となる。さらに、打ち出し角はインパクトロフトと相関があり、ボールスピードに応じた最適な打ち出し角が存在する。そのため適切な上下方向のスイング軌道とインパクトロフトで打つことが重要である。このように、インパクト時のヘッド運動をコントロールすることが飛距離の最大化へと繋がる。

一方、ゴルフボールの方向性を決める要素として次の2つが考えられる。一つはインパクト時のフェース向き、もう一つが左右方向のスイング軌道である。フェース向きとスイング軌道が一致しているとき、ボールは曲がることなく真っ直ぐ飛ぶ。フェース向きに対してスイング軌道がインサイドから入る場合、ボールにはフック回転が生じ左に曲がる。逆にアウトサイドから入る場合はスライス回転が生じ右に曲がる。狙った地点に正確にボールを落とせるか否かはフェース向きとスイング軌道の関係性で決まる。

以上で述べたヘッド運動以外には、ボールのディンプルによる空気抵抗[82]、ボールの材料特性[83]、ヘッドの反発係数[84]、ヘッド重心位置[85]などが影響することが知られているが、本研究では上述のゴルフクラブヘッドの運動に焦点を当てる。前述のとおりヘッド運動はその動きのほとんどをゴルファーのスイング特性とシャフト特性に支配されるためである。

シャフトの動的シミュレーションに着目した先行研究として、FEMを用いてシャフトの振動を解析し、より簡略化されたビーム要素モデルでもシェル要素モデルと同等の精度が得られたことを示した研究がある[43]。また、グリップ部の境界条件を設定することで、より実際の現象に近い条件でシミュレートすることに成功したと報告されるものもある[44]。さらに、シャフトのねじり振動解析を行うことで、スイング中のシャフトのねじれが1回のスイングにおいて複数回周期的に出現することを明らかにした研究も行われている[45]。他にも、クラブ・シャフト・ヘッド・グリップ、それぞれの慣性モーメントの違いによって、どのようにヘッド動作が異なるかをFEMモデルによって示した研究[46]、クラブフェースとスイングプレーンの関係について感度解析を行い、クラブフェースはシャフト角度と大きく関係していることを示し、フェース角度すなわちボールの方向性のコントロールに役立つとしている研究もある[60]。

ゴルファーのスイング特性を簡易的に計測することに主眼を置いたものとして、3軸加速度センサを用いてスイング動作を計測する手法が提案されている[38]。さら

に、3軸加速度センサと3軸ジャイロセンサを用いてより詳細かつ簡便に各ゴルファーのスイング動作を計測する手法も提案され、その有効性が示されている[39].

シャフト選定が主な目的である研究としては次の2点が挙げられる。1点目は、異なるスイング特性を持つプレイヤーはシャフトのしなり方も異なるため、異なる硬さのシャフトを使用すべきであることを示唆したものである[57]。2点目は、ある特定のプレイヤーのスイングデータ1つを用いて、数種類の特性の異なるシャフトのスイングをシミュレートすることによって、それぞれのヘッド挙動を算出したものである[58].

#### 2.1.4 本章の狙い

以上のようにいくつかの研究はなされているが、それぞれの研究が独立して行われており体系的に研究されておらず、また実際のシャフト設計場面での使用が想定されていないために、各個人に応じた用具の選定や最適設計を実践的に行うには至っていない。

そこで本章では、実際にシャフト設計に活用することを想定し、有限要素法を用いて各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手法を確立することを目指した。

## 2.2 スイング動作の計測

### 2.2.1 従来の課題と解決策

これまで多くのスポーツ動作計測の場面においては、複数の高速度カメラで計測しDLT法による画像分析によって動作解析がなされてきた。しかしながら、画像分析には大掛かりな装置が必要となる上に分析に時間がかかる。さらに本章で必要となるのはグリップ動作のみであるため、センサ計測が好ましい。先行研究にならい[38][39]、3軸の加速度センサと3軸の角速度センサを持つ6軸センサを用いてゴルフのスイング動作を計測した。

### 2.2.2 6軸センサ

6軸センサは普段のゴルフスイング動作を妨げないように Fig. 2-1 のようにグリップ部に挿入できる形態にした。センサ本体の重量は約7gであった。通常のグリップが約50g、軽量グリップが約42gであるため軽量グリップを用いることで通

常のクラブと同等の重量を再現できる。軽量化困難な電池と Bluetooth モジュールはセンサ本体から切り離し、被検者の腕に取り付けケーブルでセンサ本体と接続する。センサ本体にて計測されたデータは、ケーブルを通じて Bluetooth モジュールへ送られ PC へ送信される。このような構成でプレイヤーのスイングを邪魔することなく、かつリアルタイムでスイングデータを得ることができる。

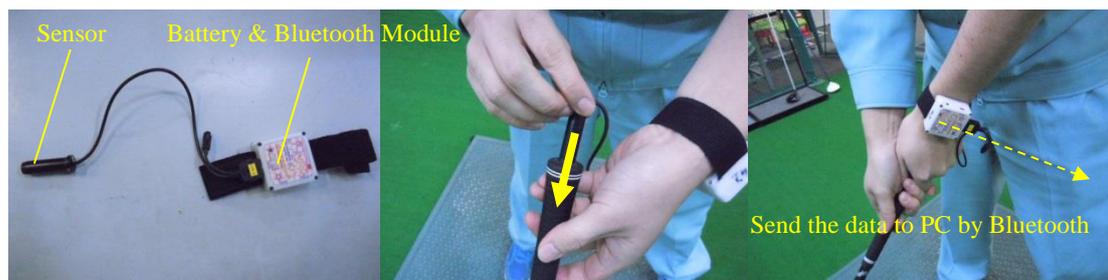


Fig. 2-1 The 6-axis sensor and attachment scenes

通常、歩行等の計測には加速度の計測可能範囲が $\pm 30 \text{ m/s}^2$ 、角速度は $\pm 10 \text{ rad/s}$ のセンサがあれば十分に計測可能である。しかしながら、ゴルフスイングは加速度、角速度ともにこの範囲を大きく超える。そこで、本研究では3軸の加速度 $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$ 、 $\alpha_z$ の計測範囲として $\pm 350 \text{ m/s}^2$ 、3軸の角速度 $\omega_x$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_z$ の計測範囲として $\pm 100 \text{ rad/s}$ まで計測できる6軸センサを用いた(Microstone 社製)。座標軸は Fig. 2-2 の通り、シャフト軸方向を  $x$  軸、アドレス時のフェース方向を  $y$  軸、 $x$  軸と  $y$  軸に直交する方向を  $z$  軸とした。サンプリング周波数は  $1000 \text{ Hz}$  とした。なお、センサデータはバターワース型ローパスフィルタでフィルタリングを行い、カットオフ周波数は加速度が  $200 \text{ Hz}$ 、角速度が  $100 \text{ Hz}$  であった。このフィルタリングはセンサデータの出力ソフトに内蔵されたプログラムにて自動的に実行される。

ここで、 $y$  軸について明確にしておく。直感的には、 $y$  軸は Fig. 2-2 にあるマトの中心方向であるが、各ゴルファーで統一するにはアドレス時点でセンサの向きがそのマトの中心に向いておく必要がある。しかし、ゴルファーのアドレス方向は人によって異なり必ずしもマトを向いているとは限らない。そこで、多くのゴルファーがアドレス時にフェースをマトに向けることから、フェース向きとセンサの  $y$  軸を予め一致させてグリップに挿入する。そうすることで、 $y$  軸が被検者間で概ね統一されるようにした。

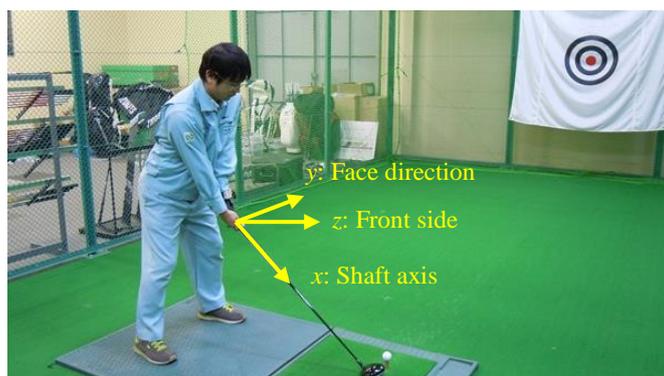


Fig. 2-2 The definitions of the coordinate axis.

以上の通りの準備を整え、3名の被検者について下記の条件でスイングデータの計測を行った。なお、本研究に関する実験においては、MCC コンポジットプロダクツ社の倫理委員会での審査を経て、その承認を得ている。

### 【計測条件】

#### [被検者]

- ・女子プロゴルファー：1名  
(年齢；25歳，身長；164cm，体重；55kg)
- ・男子プロゴルファー；1名  
(年齢；23歳，身長；175cm，体重；76kg)
- ・男子アマチュアゴルファー；1名  
(年齢；45歳，身長；172cm，体重；68kg，経験年数；10年，  
ハンディキャップ；9)

#### [クラブ]

- ・長さ；45.5inch
- ・ヘッド；Talormade 社製 R11 Loft9.5°  
(重量；196g，ロフト角；9.5 deg，フェース角；0 deg，重心距離；35 mm，  
重心深度；35 mm，重心高；20 mm)
- ・シャフト；三菱レイヨン社製 Diamana B50R  
(重量 50 g，トルク 4.0 deg，硬さ；250 cpm，中調子)
- ・グリップ；ゴルフプライド社製ツアーベルベット・ライト  
(重量；42g，サイズ；M60)

#### [プロトコル]

- ・十分なウォーミングアップを行う
- ・連続して、3球のボールを打つ

- 上記のグリップセンサを用いて、3球のグリップ動作を取得する
- Trackman 社製弾道計測器「Trackman3.0」を用いて、ボールの弾道データおよびヘッドの運動データを取得する
- 最も飛距離の大きかったもののグリップセンサデータを計測データとする

### 2.2.3 計測結果

各被検者の計測結果を Fig. 2-3 に示す. 先行研究に, 男子アマチュアゴルファーのグリップ速度に関して述べたものがある[86].  $\alpha_z$  に相当する加速度が約  $100 \text{ m/s}^2$  であることを示しており本研究と概ね一致する. また, コックの運動に関しても, 本研究の角速度  $\omega_y$  に相当するものが記載されており, 男子アマチュアゴルファーの  $\omega_y$  の最大値は約  $20 \text{ rad/s}$  であるとしている. 以上, 2 件の報告より本研究での計測結果が過去の研究と大きな相違がなく, 精度よく計測できていることが確認された. また, 最もパワーのある男子プロゴルファーについても,  $\alpha_z$  で約  $200 \text{ m/s}^2$ ,  $\omega_z$  で約  $40 \text{ rad/s}$  であることが確認され, 本研究に用いた 6 軸センサであれば, 男子プロゴルファーからアマチュアゴルファーまで, すべてのゴルファーのスイングデータを簡便に計測できることが分かった.

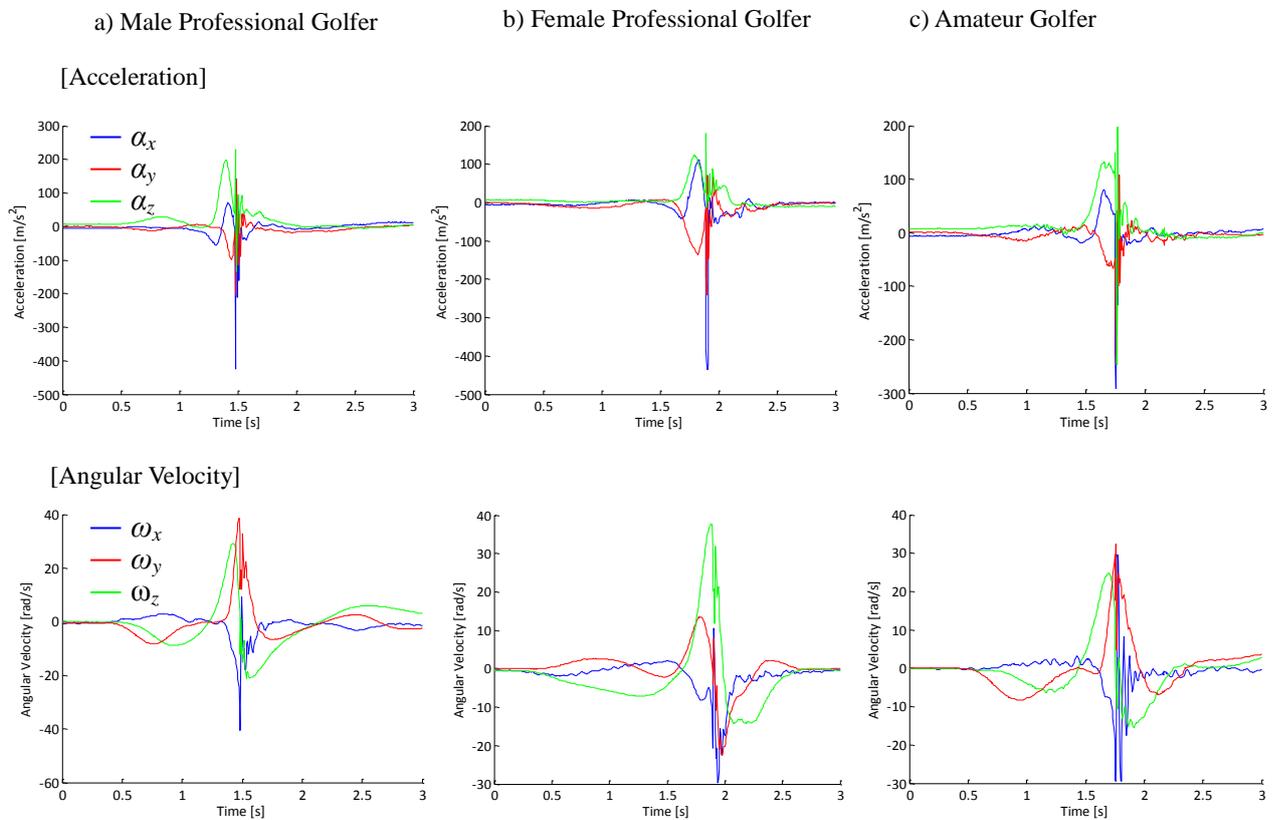


Fig. 2-3 The results of the three subjects.

## 2.3 有限要素法によるシミュレーション

### 2.3.1 ゴルフスイングのモデリング

次に前述のセンサでの計測データを用いて FEM によるシミュレーションを行う。モデリングは Fig. 2-4 の通り、シャフトからヘッドまで全てビーム要素で構成した。要素 1~21 までがシャフト、要素 22~24 までがヘッドを示す。シャフト要素は弾性体とし、シャフトの材料特性を入力した。ヘッド要素は剛体とし、接点 25 をヘッドの重心と定義しヘッド質量として 196 g を与えた。実験で用いたヘッドと同じく、重心距離を 35 mm、重心深度を 35 mm、重心高を 20 mm とした。また、スイング動作は接点 1 に強制変位として与えた。ソルバーには ABAQUS を用いた。

本モデルを用いて陽解法と陰解法での解析時間の比較を行った。結果としては、一つのステップにかかる計算時間は陰解法が 270 倍の時間がかかるが、ステップ数が 1/760 と少なくて済む。そのため、陰解法にて計算時間を 1/3 に短縮可能となることが明らかとなったため、本研究では陰解法を用いることとした。最適化計算を行う上で計算時間短縮は極めて重要なファクターの一つである。

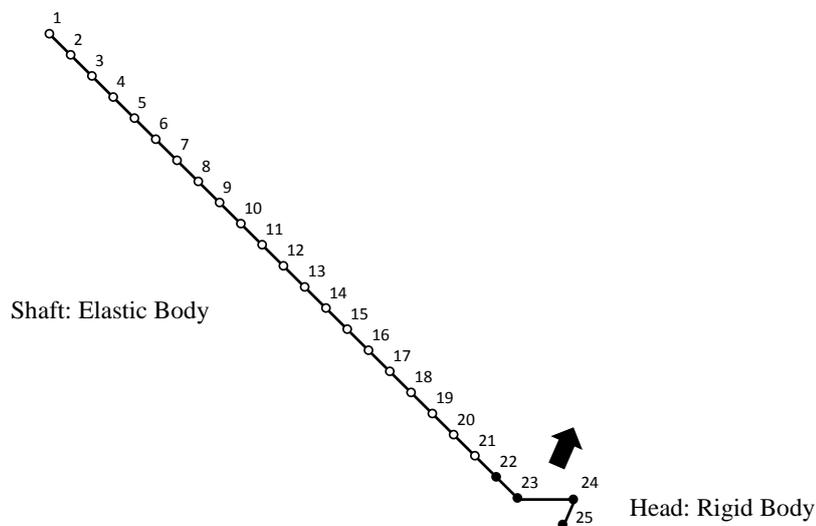


Fig. 2-4 Finite Element Model.

### 2.3.2 トップインパクトの切り出し

ここで、さらに計算時間の短縮が可能か考える。ゴルフスイングはアドレス、バックスイング、トップ、ダウンスイング、インパクト、フォロースイング、フィニッシュの7つのフェーズに分けて考えることができる。このうち、アドレス、バックスイング、トップまではかなりゆったりとした遅い動作であるため、シャフトの

しなりは重力によってたわむ程度である。ダウンスイング、インパクトにおいてはシャフトに大変形が生じるため非線形解析が必要になる。フォローイング、フィニッシュではすでにボールを打ち終えた後のため、ボールの行方には影響しない。そこで、本研究では非線形性の強いトップからインパクトまでを解析対象とした。そのため、スイングデータからトップとインパクトを検出するアルゴリズムが必要になる。ここで、トップの位置での大きなシャフト変形はないものとした。

まずトップの検出について考える。ゴルフスイングにおけるトップは言葉上から解釈すると「手が最も高い位置にある点」と解される。しかしその場合、各個人のスイングによっては正確にトップとはいえない場合がある。例えばオーバースイングのゴルファーのトップは最高点よりも低い位置にある。そこで本研究ではいわゆる「切り返し」と呼ばれるバックスイングからダウンスイングに切り替わるタイミングに着目し、式 2- (5) で示される時刻をトップと定義した。すなわち、角速度の絶対値の総和が最小となる点である。

$$Top = \min\left(\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2 + \omega_z^2}\right) \quad 2- (5)$$

ここで、 $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  はそれぞれ、グリップ部における  $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸の角速度を示す。

次にインパクトを決定する。インパクトはヘッドとボールの衝突であるものの、その衝撃力はグリップに装着したセンサまで伝わる。そのため、式 2- (6) のように加速度の絶対値の総和が閾値  $X$  を超えた点で検出できる。

$$Impact = \sqrt{\alpha_x^2 + \alpha_y^2 + \alpha_z^2} \geq X \quad 2- (6)$$

ここで、 $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$ ,  $\alpha_z$  はそれぞれ、グリップ部における  $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸の加速度を示す。また、本研究では各種スイングデータを確認し、 $X=80$  とした。 $X$  が小さすぎる場合はスイング中のノイズや何らかの衝撃をインパクトとして誤認識してしまう恐れがある。逆に  $X$  が大きすぎる場合は力のない被検者ではインパクトが検出できない事態に陥る。また、厳密には上記式 2- (6) ではインパクトの衝撃データも混在してしまう可能性がある。完全に衝撃データを排除するため、式 2- (6) で決定される時刻の 3 mmsec 前をインパクトと定義した。

代表して、女子プロゴルファー 1 名のデータを Fig. 2-5 に示す。トッパーインパクトを切り出した解析モデルを用いることで、1 回の計算に必要な時間を 1/10 に短縮することができた。なお、CPU として intel(R) Xeon(R) CPU E5-1620 3.6GHz を使用した場合の計算時間は約 4.3 秒であった。また、データ切り出し後、ノイズ除去の観点から 6 次関数で近似したものを各ゴルファーのスイング特性と定義した。

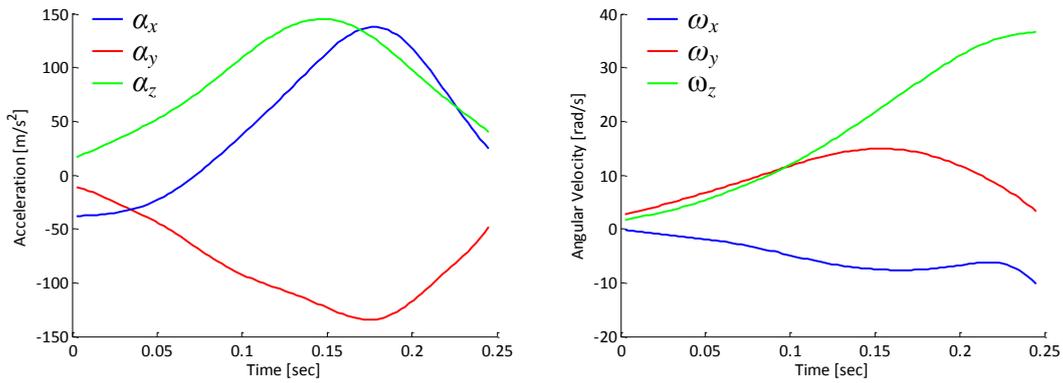


Fig. 2-5 The female professional golfer's swing data from 'Top' to 'Impact'.

### 2. 3. 3 解析結果と実測結果の比較

Table 2-1 及び Table 2-2 に各被検者の解析結果と実測結果を示す. ここでは弾道に影響の大きいインパクトの瞬間のクラブスピード, フェースアングル, アタックアングルの3つを選んだ. フェースアングルは「トップ時とインパクト時における姿勢を, それぞれグリップ部が重なるように座標変換したときのフェースアングルの差」と定義し, アタックアングルは, 「シャフトを弾性体としたときのインパクト時におけるロフトアングルと, シャフトを剛体としたときのインパクト時におけるロフトアングルとの差」と定義した. つまり, フェースアングルはシャフトのしなりと捩れによって変化したヘッド向きを示す. また, トップでのシャフトのしなりはないものと仮定した. すなわち, インパクト時におけるセンサ座標系の基底ベクトルを  $e_x, e_y, e_z$ , ヘッド座標系の基底ベクトルを  $e'_x, e'_y, e'_z$  とすると,

$$\begin{Bmatrix} e'_x \\ e'_y \\ e'_z \end{Bmatrix} = R_z(\theta_z)R_y(\theta_y)R_x(\theta_x) \begin{Bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{Bmatrix} \quad 2- (7)$$

ここで,  $R_x(\theta_x)$ ,  $R_y(\theta_y)$ ,  $R_z(\theta_z)$  は回転行列である. フェースアングルを  $FA$ , アタックアングルを  $AA$  とすると, 式 2- (8), (9) のように定義できる.

$$FA = \theta_x \quad 2- (8)$$

$$AA = \theta_y \quad 2- (9)$$

また, クラブスピードを  $CS$  とすると, 式 2- (10) のように定義できる.

$$CS = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad 2- (10)$$

ここで、 $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$ はヘッド座標系におけるヘッド重心の速度成分を示す。

実測には、上述の通りドップラー効果によってボールの弾道やヘッド挙動を計測する Trackman 社製弾道計測装置「Trackman3.0」を用いた。表 1 及び表 2 に示すとおり、絶対値は異なるもののその関係性は良好にシミュレートできているため、最適設計に活用することが十分可能であることが確認できた。

Table 2-1 Analytical results of the head movement.

Subject	Club Speed [m/s]	Face Angle [deg.]	Attack Angle [deg.]
Female Professional Golfer	48.9	-0.8	-2.1
Male Professional Golfer	55.1	-1.5	-4.1
Male Amateur Golfer	39.2	-2.1	2.4

Table 2-2 Experimental results of the head movement.

Subject	Club Speed [m/s]	Face Angle [deg.]	Attack Angle [deg.]
Female Professional Golfer	45.3	1.2	1.3
Male Professional Golfer	48.2	0.5	-1.2
Male Amateur Golfer	38.5	-5.8	4.6

## 2.4 最適シャフト設計手法の提案

### 2.4.1 検討

次に、各個人のスイング特性に応じた最適シャフトの設計手法を提案する。これまで、ゴルフヘッドに関しては肉厚分布を最適化計算から導き出す研究は行われてきたが[50][51][52]、シャフトに関する同様の研究はほとんど見られない。ヘッドの最適化問題は単なるボールとの衝突問題として扱うことができるが、シャフトにはゴルファーのスイングが大きく影響する。そのため前述した簡易なスイング動作の測定方法、及び計算コストの低減が達成される必要があった。前段までの検討によって十分に簡易な測定方法と計算コストの低減が達成されたため、それらを利用し

た各個人のスイング特性に応じた最適シャフトの設計手法を検討する。

最適化の手法は、焼きなまし法や遺伝的アルゴリズム等これまでも様々な分野で研究されてきたが、ゴルフシャフトの場合はゴルファーの振り心地(=フィーリング)も重要な要素である。FEM からフィーリングを予測することは非常に困難であるため、設計を微調整することを前提として解を導く必要がある。上述の最適化アルゴリズムを用いた場合、1 点の最適解を効率的に見つけることに主眼を置いているため、微調整の際に必要な情報が欠落してしまう恐れがある。そのため全 SPEC の組み合わせを導出することが理想である。しかしながらそれには膨大な計算時間を要する。例えばゴルフシャフトの主な設計変数である、重量:10 パターン、トルク(振れ剛性):10 パターン、硬さ(曲げ剛性):10 パターン、EI 分布(曲げ剛性の分布):100 パターンを計算するだけで  $10 \times 10 \times 10 \times 100 = 100000$  通りの組み合わせが存在する。そのため前述のように 1 回の計算時間を 4.3 秒に短縮したとしても、並列化をしなければ約 120 時間必要になる。実際のゴルフシャフトの設計場面を考慮すると、大規模なシステムを構築することも 120 時間を計算に費やすこともできない。熟練したシャフト設計者であれば、もっと短時間かつシンプルなシステムでベストに近いシャフトを設計することができるためである。

そこで、実際の熟練したシャフト設計者 4 人(経験年数 5 年以上)の設計手順を確認し、それを参考にアルゴリズムを構築することとした。

#### 2.4.2 実際のシャフト設計手順

熟練したシャフト設計者が行う設計手順は以下の 4 つのステップに大別される。上記の 4 人に共通の手順であり、本手順によって熟練したシャフト設計者は限りなく最適に近いシャフトを設計しているものとする。ここでは話を単純化するためクラブはドライバーに限定する。以下の 4 ステップを経て、実際に作成したサンプルシャフトを試打することによって、さらなる微調整を行っていく。この 4 項目(重量、トルク(振り剛性)、硬さ(曲げ剛性)、EI 分布)が、本章でのシャフトの設計変数となる。

##### 1) 重量の決定

大まかな狙いの重量を決める。

##### 2) トルク(振り剛性)の決定

トルクは重量と大きな相関があるため重量の次に決定され、以下のように測定される。

[トルク測定方法]

シャフトチップ端から 1035 mm の位置を固定し、シャフト先端に 1.356 Nm(1.0 ft·lbf)の力を加えたときの捩れ角度.

### 3) 硬さ(曲げ剛性)の決定

カーボンシャフトの場合積層方向によって異なる性能を発揮させることができるため、重量やトルクとは独立に設計できる。硬さは以下のように測定される。

[硬さ測定方法]

シャフトバット端から 180 mm の位置を固定し、先端に 196 g の錘を装着しその先端を 10 cm 程度たわませてから振動させたときの 1 分間あたりの振動数.

### 4) EI 分布の決定

EI 分布は積層板の複合則や積層パラメータによっても算出されるが、ゴルフシャフトの場合研磨を行うため、厳密には下記のような実測値がよく用いられる。設計者はあらかじめ研磨量を見越して狙いの EI 分布を決定しており、以下のように計測される。

[EI 分布計測方法]

シャフトを支点間距離  $S = 300$  mm で支持し、シャフトの細径端部からの距離  $L$  mm の位置に荷重  $F = 196$  N を加え、距離  $L$  における曲げたわみ量  $\delta$  mm を計測する。式 2- (11)により、距離  $L$  における EI [ $N \cdot mm^2$ ]を求め、距離  $L$  を順次変更し、EI 分布を求める。

$$EI = \frac{1}{48} \times \frac{F \cdot S^3}{\delta} \quad 2- (11)$$

## 2.4.3 最適 SPEC 導出アルゴリズム

上述の熟練したシャフト設計者の設計手順を参考に、次のような 4 つのステップによってシミュレーションを行うことで最適 SPEC を導出することとした。

### 1) WEIGHT Search

まずは最適なシャフト重量を見つけ出す。35 g~80 g まで 5 g 刻みでシミュレートする。その他の変数は中間値で固定しておく。

### 2) TORQUE Search

次に 1)で見つけた最適重量を用い、最適なトルクを探索する。トルクとし

ては 2.0-11.0 deg まで 1.0 deg 刻みでシミュレートする。同じくその他の変数は中間値で固定しておく。

### 3) FLEX Search

次に 1), 2) で決定した重量とトルクを用い、最適な硬さを探す。210-300 cpm まで 10 cpm 刻みでシミュレートする。

### 4) EI Search

最後に、1), 2), 3) で得られた値を用いて、シャフトとして性能差が出ると思われる EI 分布を全てシミュレートする。EI 分布としては 100 種類程度が考えられ、具体的には剛性を変化させる位置、長さ、レベルを順次変化させたものとした。

## 2.4.4 弾道の最適条件と目的関数

次に、最適シャフトを決めるために弾道の最適条件について考察する。本被検者は 3 名ともドライバーショットに飛距離を求めているため、飛距離を最大化する条件について考察する。

一般的に、より大きな飛距離を得るためには、ボールスピードが大きいことはもちろんのこと、打ち出し角が大きくかつスピン量が少ない、いわゆるハイドロアの弾道を得ることが必要と言われている。

これを達成するためのインパクト時のヘッド運動として捉えると、クラブスピード、フェースアングル、アタックアングルがそれぞれ大きい値をとる必要がある。上述の結果のみでは、3 変数はそれぞれ別々に算出されているため、最適シャフトを決めることができない。

そこで本研究では、これら 3 つの変数を同時に達成する指標として式 2- (12) で表される評価値  $F$  を目的関数とした。

$$F = \alpha ZscoreCS + \beta ZscoreFA + \gamma ZscoreAA \quad 2- (12)$$

ここで、 $CS$ 、 $FA$ 、 $AA$  はそれぞれ、式 2- (8)~(10) で定義したクラブスピード、フェースアングル、アタックアングルを示し、 $Zscore$  は平均が 0、分散が 1 となるような正規化処理を示し、式 2- (13) の通り定義される。 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  は重み係数である。

$$ZscoreX = \frac{X_i - \bar{X}}{SD_X} \quad 2- (13)$$

ここで、 $SD_x$ はベクトル $X$ の標準偏差を示す。

重み係数 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ は、一般的にゴルフ業界のノウハウとして語られることに基づき、クラブスピードの飛距離への貢献度が最も高いことから次の通り $\alpha$ の重みを他の係数の2倍の重みとした。すなわち、 $\alpha=2$ 、 $\beta=1$ 、 $\gamma=1$ とした。

ここで、上記の妥当性について考察する。フェースアングルが小さいということはフェースが外側に向いてボールとインパクトすることを意味する。この際、ボールにはスライス回転がかかり、これにはバックspin成分を多く含む。そのため、ボールが高く上がり、ランが出ないという弾道になる。そのため、フェースアングルが大きくスライス回転を防いだ弾道の方が飛距離には好影響であると言われている。しかし、フェースアングルが大きすぎる場合には、弾道が低くなり飛距離が落ちる要因となる。本被検者らのフェースアングルは、それぞれ、 $1.2^\circ$ 、 $0.5^\circ$ 、 $-5.8^\circ$ でありシャフトを変えたとしても飛距離に悪影響を及ぼす領域には達しないと考えられる。また、アタックアングルが大きい場合はボールのバックspin量を減らすことができ、ランを稼ぐことができる。しかし、一般にアタックアングルが大きすぎる場合、spin量が少なくなりすぎ、いわゆる「ドロップ」と言われる弾道になり飛距離が落ちると言われている。本被検者らは、Table 2-2に示した実験値の値から、それぞれのアタックアングルは $1.3^\circ$ 、 $-1.2^\circ$ 、 $4.6^\circ$ である。シャフトの違いによって変わるアタックアングルはせいぜい $2\sim 3^\circ$ であることから[65][66]、ドロップになるほどの領域にはなり得ない。よって、アタックアングルを大きくすることでの飛距離への弊害はないものと考えられる。そこで、3名とも上記の目的関数で飛距離が大きくなると判断した。

#### 2.4.5 解析結果及び検証実験

Fig. 2-6, 2-7, 2-8に各被検者の解析結果を示す。上述の通り、設計変数はシャフトの重量、トルク、硬さ、EI分布であり、目的関数は式2-(8)で表わされるヘッド動作の線形結合を用いたF値である。ここから、本女子プロゴルファーにとって飛距離を最大化するシャフトは重量55g、トルク $6.0^\circ$ 、硬さ270cpm、先調子系であり、本男子プロゴルファーにとっては、重量75g、トルク $2^\circ$ 、硬さ210cpm、元調子系、本男子アマチュアゴルファーにとっては、重量65g、トルク $5^\circ$ 、硬さ220cpm、元調子系であることが分かる。

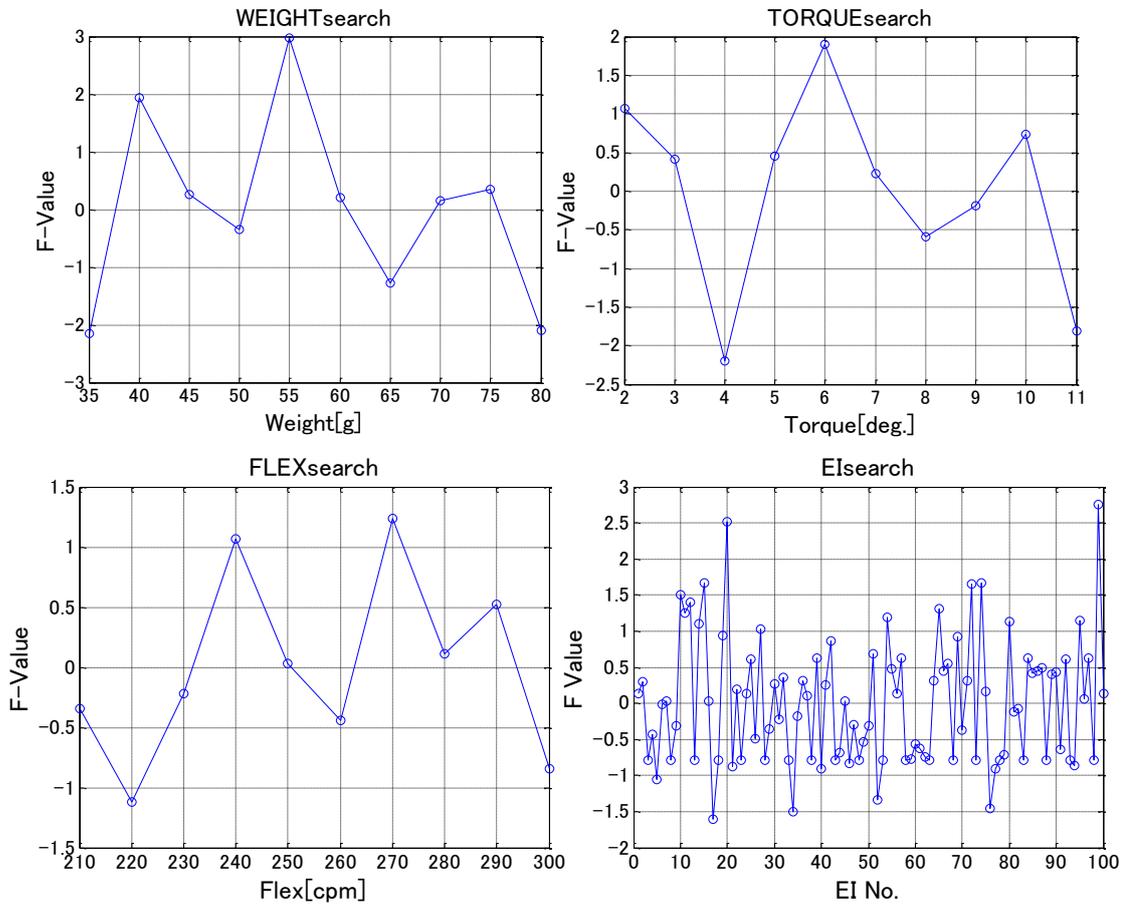


Fig. 2-6 Analysis results of the female professional golfer.

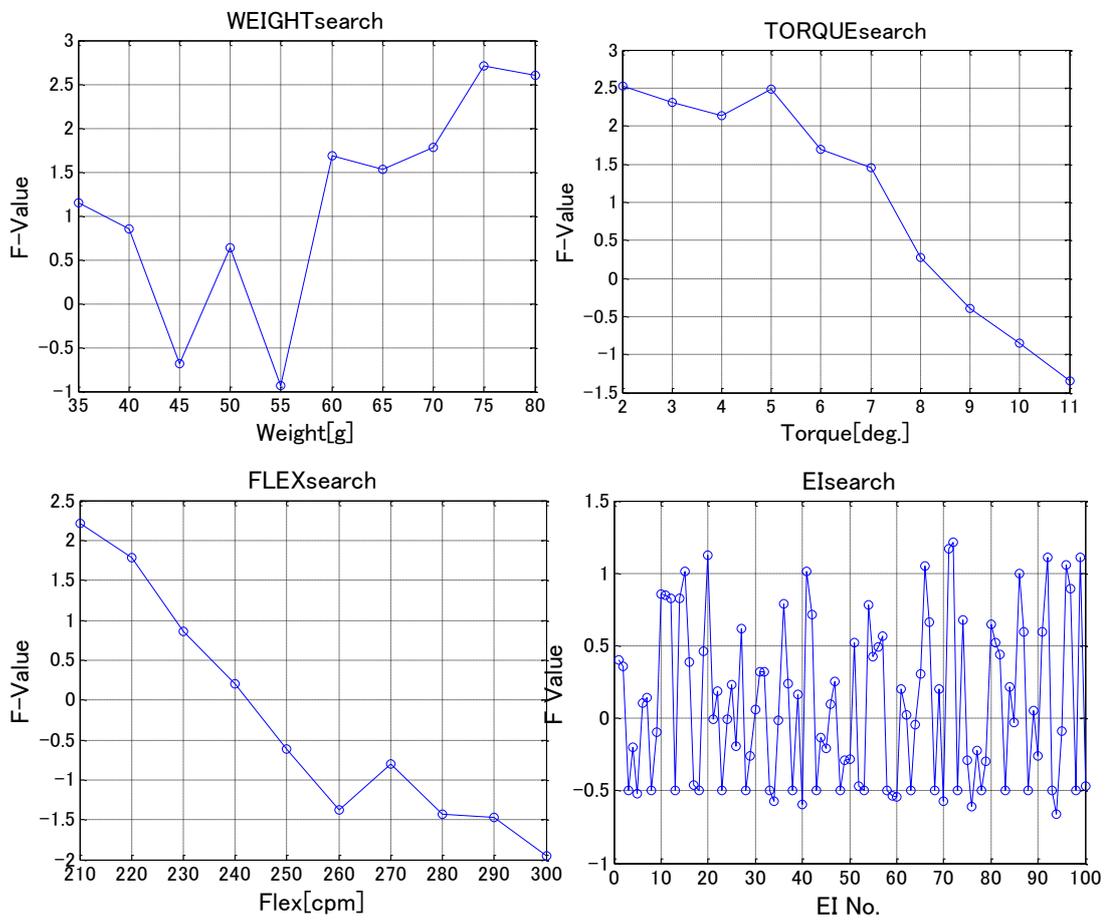


Fig. 2-7 Analysis results of the male professional golfer.

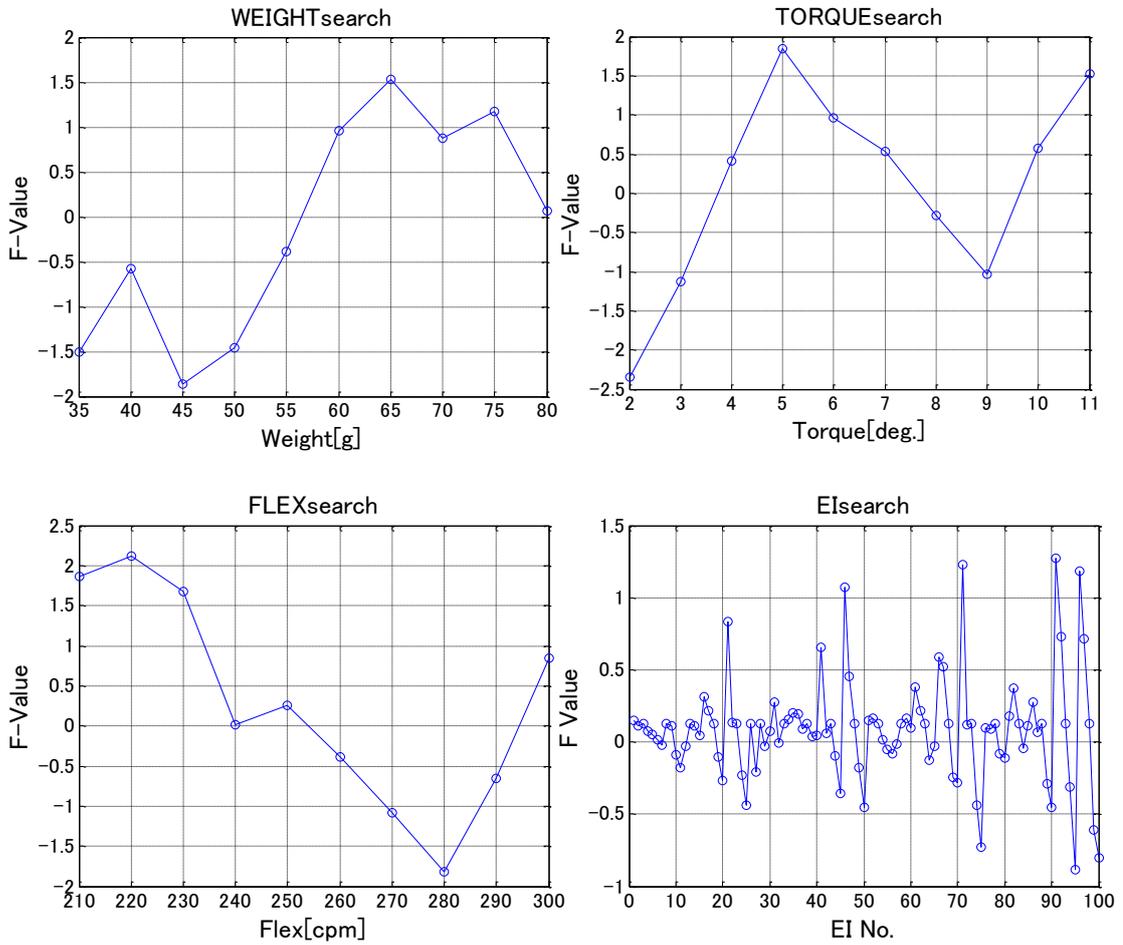


Fig. 2-8 Analysis results of the male amateur golfer.

Table 2-3 に各ゴルファーの最適シャフトと、同レベルのゴルファーが一般的によく使用するシャフト性能をコントロールシャフトとして記載する。以後、これらを用いて検証を進める。なお、EI 欄に記載してある括弧中の Low, Mid, High はそれぞれ EI 分布の傾向から調子に変換したものを示し、それぞれ先調子, 中調子, 元調子を意味する。

Table 2-3 Characteristics of optimized shaft and control shaft.

Subject	Shaft	Weight [g]	Torsion [deg.]	Flexibility [cpm]	EI [No.]
Female professional	Optimized Shaft	55	6.0	270	99 (Low)
	Control Shaft	50	4.0	240	50 (Mid)
Male professional	Optimized Shaft	75	2.0	210	72 (High)
	Control Shaft	80	3.0	290	50 (Mid)
Male Amateur	Optimized Shaft	65	5.0	220	91 (High)
	Control Shaft	60	3.5	270	50 (Mid)

Table 2-4 に示す通り、解析上は3名の被検者ともクラブスピード、フェースアングル、アタックアングルのいずれもコントロールシャフトと比較して、最適シャフトにて高い値を示した。

Table 2-4 Analytical results of the optimized shaft and the control shaft

Subject	Shaft	Club Speed [m/s]	Face Angle [deg.]	Attack Angle [deg.]
Female professional	Optimized Shaft	49.5	1.3	-0.2
	Control Shaft	48.9	-0.8	-2.1
Male professional	Optimized Shaft	57.8	0.2	-2.1
	Control Shaft	56.4	-2.0	-5.2
Male Amateur	Optimized Shaft	41.6	-2.1	2.7
	Control Shaft	38.1	-1.8	2.6

次に、上記の解析結果を確認するため、下記の計測条件で検証実験を行った。

#### 【計測条件】

[被検者] (2.2.2 と同一の被検者)

- ・女子プロゴルファー；1名  
(年齢；25歳，身長；164cm，体重；55kg)
- ・男子プロゴルファー；1名  
(年齢；23歳，身長；175cm，体重；76kg)
- ・男子アマチュアゴルファー；1名  
(年齢；45歳，身長；172cm，体重；68kg，経験年数；10年，  
ハンディキャップ；9)

[クラブ]

- ・長さ；45.5inch
- ・ヘッド；Talormade 社製 R11 Loft9.5°  
(重量；196g，ロフト角；9.5deg，フェース角；0deg，重心距離；35mm，  
重心深度；35mm，重心高；20mm)
- ・シャフト；Table 2-3 に記載の通り，各被検者にとっての最適シャフトと  
コントロールシャフトの2種
- ・グリップ；ゴルフプライド社製ツアーベルベット

(重量 ; 50g, サイズ ; M60)

[プロトコル]

- ・十分なウォーミングアップを行う
- ・最適シャフト, コントロールシャフトの順に, 3球ずつボールを打つ
- ・グリップセンサでの計測は行わない
- ・Trackman 社製弾道計測器「Trackman3.0」を用いて, ボールの弾道データおよびヘッドの運動データを取得する

Table 2-5 に, 検証実験の結果を示す. 女子プロゴルファーにおいてはボールスピード, 打ち出し角がそれぞれ大きくなり, スピン量が小さく抑えられることで 11 yds 飛距離が伸びるという結果が得られ, 飛距離を最大化する最適シャフトが設計できたと言える. しかしながら, 男子プロゴルファーと男子アマチュアゴルファーに対しては, いずれも, コントロールシャフトと比較して飛距離が落ちる結果となった.

この原因として考えられることは, シャフト変えたことによってスイングまでも変わってしまい, 異なる結果になった可能性が挙げられる. 一般に用具の変化につられてスイングが変わることが知られている[64][65][66][67][68]. また, これら 2名の被検者の内省報告にて, 「シャフトが柔らかすぎて全力でスイングできない」とのコメントを得ている. 第 3 章では, この問題を解決するために用具によるスイングの変化を考慮した最適設計を試みる.

なお, 本研究の女子プロゴルファーは, 自分に合っていないクラブを使うと極端に成績が悪くなるゴルファーである. つまり, クラブによるスイング変化が少ないプレイヤーと考えられる. 本研究のシミュレーションにおいては, スイングを不変として扱っているため, 本章の手法で最適設計を行う上での典型的な好例であったと言える.

Table 2-5 Experimental results of the optimized shaft and the control shaft

Golfer	Shaft	Club Speed [m/s]	Face Angle [deg.]	Attack Angle [deg.]	Vert. Launch [deg.]	Spin Rate [rpm]	Distance [yds]
Female professional	Optimized Shaft	46.2	1.2	1.8	13.0	2456	276
	Control Shaft	44.9	0.7	1.1	12.3	2643	265
Male professional	Optimized Shaft	46.7	-0.2	-1.5	11.5	3089	282
	Control Shaft	48.5	0.5	-1.5	10.8	2954	305
Male Amateur	Optimized Shaft	38.2	-2.2	3.0	15.1	3512	221
	Control Shaft	39.4	-3.4	2.0	15.8	3857	225

## 2.5 結言

本章では個人のスイング特性に応じた最適シャフトを設計することを目的とした。6軸センサを用いてスイング動作を計測し、その計測結果を用いてシミュレーションから最適解を導くこととした。最適化のアルゴリズムには、実際のシャフト設計者4名に共通する設計ステップを取り入れた。本研究の手法で設計することにより、被検者である女子プロゴルファー1名においては、クラブスピード、フェースアングル、アタックアングルが大きくなることで飛距離が約11 yds伸び、本研究の手法の有効性が示された。

一方、他の被検者2名については望ましい結果が得られなかった。これは、この2名がシャフトの変化によってスイングを大きく調節していたためと推察される。次章では、このような用具によるスイングの変化を考慮した最適設計を試みる。



### 第3章 実験計画法と応答曲面法を用いた最適設計

### 3. 実験計画法と応答曲面法を用いた最適設計

#### 3.1 緒言

##### 3.1.1 背景

第2章で示したとおり,有限要素法を用いた最適設計は一定の効果が認められた。しかしながら,一部の被検者についてのみ認められた効果であり,非常に限定的なものであった。この理由として,シャフトの違いによってゴルファーのスイング間で異なることが考えられる。本章ではこの点に着目し論を進めることとする。なお,前述のとおり本研究では最適設計の概念にはシャフト選択を意味するフィッティングを含む。

##### 3.1.2 現状の最適設計

現状の最適設計やフィッティングのほとんどは「フィッター」と呼ばれる豊富な経験と知識を持つ専門家が行っている。例えば,プロゴルファーに対しては,メーカー専属のフィッターが練習や試合会場に足を運び,彼らとの対話やスイングの観察から最適であろうと思われる用具を開発陣へフィードバックする。またアマチュアゴルファーに対しては,資格を持つフィッターが店舗に常駐してフィッティングを行っている。これは,ゴルフスイングではプレイヤー自身の動作のバラつきを含んでいることに加えて,用具を変えることでもまたプレイヤーのスイングが変わり,その結果としてシャフトのしなり方,ヘッドの挙動,ボールの弾道等が大きく変わるという複雑な動作であるため,システム化が困難なことに起因する。しかしながら,高度な専門知識を持つフィッターはその絶対数が限られているためプロゴルファー優先となりがちであり,アマチュアゴルファーへ向けたフィッティングが普及しにくい状況にある。

##### 3.1.3 要素技術と先行研究

ここでは前章と重複する文献もあるが,それぞれを最適設計やフィッティングに必要な要素技術に分解し,その要素技術に関連する先行研究を述べる。

第一の要素技術として,シミュレーション技術が挙げられる。上述の通り,現状ではフィッターのスキルに依存することになる。この依存性を取り除くためにはシャフトやヘッド挙動を時刻歴応答解析を用いてシミュレーションできるモデルを作成し,これを繰り返し計算と最適化アルゴリズムを用いて理想的な挙動を示すシ

シャフト性能を探索すればよいことになる。シミュレーションに着目した先行研究として、有限要素法を用いてシャフトの振動を解析し、より簡略化されたビーム要素モデルでもシェル要素モデルと同等の精度が得られたことを示した研究がある[43]。また、グリップ部の境界条件を設定することで、より実際の現象に近い条件でシミュレートすることに成功したと報告するものもある[44]。さらに、シャフトのねじり振動解析を行うことで、スイング中のシャフトのねじれが1回のスイングにおいて複数回周期的に出現することを明らかにした研究も行われている[45]。シミュレーションを用いた最適設計やシャフト選定に着目した研究としては次の研究が挙げられる。ある特定のプレイヤーのスイングデータ1つを用いて、数種類の特性の異なるシャフトのスイングをシミュレートすることによって、それぞれのヘッド挙動を算出したものである[58]。また、第2章では、熟練したシャフト設計者の設計手順をアルゴリズムとして導入し、多くのシャフト特性についてシミュレートを行うことで最適なシャフトを見出そうとした。シャフト以外の分野へ目を向けると、ゴルフヘッドとボールの最適設計[50][51][52]、スキージャンプ台[53]、カイト[54]等にてシミュレーションを用いた最適設計がなされており、多様な工学分野へ応用されている。

第二の要素技術として、計測技術が挙げられる。シミュレーションを行うにはグリップがどのように動いたかを簡易的に知る必要があるが、モーションキャプチャシステムでは高価で大掛かりな設備が必要な上に隠れ点も発生する。これらを同時に解決するものとしては、センサ計測システムがベストなものとなろう。センサ計測に着目した先行研究としては、ゴルファーのスイング特性を簡易的に計測することに主眼を置き、3軸加速度センサを用いてスイング動作を計測した研究[38]、3軸加速度センサと3軸ジャイロセンサからなる6軸センサを用いて、より詳細かつ簡便に各ゴルファーのスイング動作を計測するシステムに関する研究等がある[39]。

第三の要素技術として、スイング変化の考慮が挙げられる。一般に、ゴルフスイングはマクロな視点では個人内では不変とされているが、ミクロな視点では変化することが知られている。ゴルフに関するクラブによるスイング変化を論じたものとして、2種類の調子の異なるゴルフシャフトを用いることで、プレイヤーのスイングが変化することを見出し、先調子ではコックのリリースが早まることで打ち出し角が約 $2^{\circ}$ 高くなったと報告する研究がある[63]。また、2種のゴルフシャフト剛性の違いがどのようにスイングとヘッド動作に影響を与えるかを調べ、33名の被検者のうちの半数では、ヘッド速度に有意差があったとしており、この影響はシャフト動作の違いよりもグリップ動作の違いによって生じたものだと報告する研究も見られる[64]。

ゴルフ以外に着目すると、バドミントンのスマッシュ動作において、ラケットの特性によってスイングが変化することを示唆したもの[68]、円盤投げの形状に関わる変数を用具の設計変数、円盤飛翔の初期条件に関わる変数を選手スキルの設計変数とし、飛距離を目的関数とすることで用具とスキルの同時最適化を試みたものがある[73]。さらに、アルペンスキーの着地時にかかる衝撃力をモンテカルロシミュレーションによって求め、ブーツのリアの硬さによって怪我のリスクを低減させることができるとする研究[71]、車イスと選手の動作の交互作用に着目し、各選手における最適な車イスを、実験計画法を用いて算出した研究もある[72]。

このように、シミュレーション、計測、スイング変化に関する研究がなされつつあり、特にゴルフにおいてはミクロなスイング変化が最終的なゴルフボールの弾道に大きな影響を及ぼすことは、ゴルフ経験者であれば誰もが納得する感覚であるものと考えられる。しかしながら、研究としては各ゴルファーに最適なシャフトを提案するまでには至っていない。

### 3.1.4 本章の狙い

そこで本章では、シャフトの違いによるスイング変化を定量的に考慮したゴルフクラブの最適設計手法を開発することを目的とする。また、その手法を用いてシャフトフィッティングシステムを構築し、その妥当性を評価する。

このような手法とシステムを開発することで、プロゴルファーにとってはフィッターからより客観的なデータを得ることで結果に納得できるようになり、アマチュアゴルファーや店舗にとってはフィッター不足を補うことができるツールとなる。

## 3.2 計測及び解析の準備

### 3.2.1 一般的な解析手法を用いた場合

計測手法及び解析手法は第2章と同一である。ここで、第2章のようにプレイヤーのスイング変化を考慮しない一般的な解析手法を用いた場合の結果を示す。一例として男子プロゴルファー1名のスイングデータを用いて、シャフトの硬さを変更したときのクラブスピードの解析結果を示す(Fig. 3-1 左)。なお、本研究ではクラブスピードをインパクト直前のクラブヘッド重心の速さと定義した。本結果は、柔らかいシャフトほどクラブスピードが大きくなることを示している。これはロボット試験の結果とよく一致する。しかしながら、実際に本男子プロゴルファーが様々なシャフトを打つ試打実験においては、硬いシャフトほどクラブスピードが大きくなる

という正反対の結果となった(Fig. 3-1 右). これは, 上述の通りプレイヤーがシャフト特性に応じてスイングを変化させているためであると考えられる. ゴルフにおいてはスイングの微妙な変化によって結果が大きく変わるため, シャフトによるスイング変化を見極めることは本研究における重要なポイントとなる. 第2章においても, スイングを変化しないものとして捉えて最適シャフトの導出を行った場合, もともとスイングを変化させにくいプレイヤーにて, 6 軸センサによる計測と有限要素法によるシミュレーションを用いることで十分な精度が得られることが明らかになっておりその有効性が示されている. しかしながら, スイングを大きく変化させるプレイヤーにおいては, 従来の解析手法では実際の現象をうまくシミュレートできないという示唆が得られた.

上述の通り, ゴルファーはシャフトが変わることによってスイング動作そのものまで変化させているため単純な有限要素法ではそのスイングを適切にシミュレートすることができない. そこで本章では, 実験計画法と応答曲面法を用いてこの問題を解決することとした.

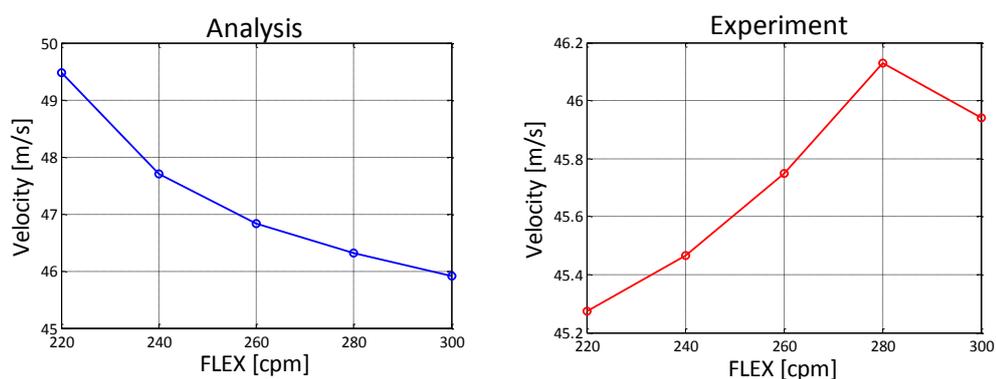


Fig. 3-1 Comparison of analytical results with the experimental one.

### 3.2.2 実験計画法

実験計画法とは, 実験を効率的に計画し適切な解析を行うための統計的手法である. 例えば, いくつかの因子を段階的に変化させて実験するケースを考える. 実験計画法においては, このときの因子を要因, 段階を水準と呼ぶ. 全ての要因と水準の組合せを実験するには, 非常に多くの実験が必要であるが, 実験計画法を用いることで実験回数を大幅に削減することができる. 同時に, 実験のバラつきを吸収する効果も持つ[87][88]. ゴルフのように人間が絡む実験では最小限の努力で最大限の効果が期待できるものである.

ゴルフシャフトの主な設計変数として本章では、硬さ(Flex)、調子(Kick point : シャフトのしなりが最も大きくなる位置)、重量(Weight)の3つに着目する。この3つが実験計画法でいうところの要因となる。最適値を見つけるためには少なくともそれぞれについて3水準必要である。もし実験計画法を用いない場合は、 $3^3 = 27$ 回のスイングが必要になるが、これでは一人がスイングする回数としてはあまりにも多い。実験計画法のL9型直行表の左側3列を用いることで、試打本数を9回に削減することができる。

そこでTable 3-1にある通りの3つの要因(硬さ、調子、重量)が異なる9本のトライアルシャフトを設計した。0, 0.5, 1はそれぞれの水準を示し、硬さが0の場合は硬いシャフト、調子が0の場合は先調子のシャフト、重量が0の場合は重いシャフトを示す。これらのシャフトを用いることで9本のスイングで合理的にスイングデータを集めることができる。スイングデータは第2章と同じく、6軸センサを用いて計測した。

また、Table 3-2には実際に作成したシャフト性能を示した。なお、調子を数値化するために藤倉ゴム社製キックポイントゲージを用いた。

Table 3-1 Orthogonal table type L9 of Design of Experiment.

Shaft No.	Flexibility	Kick point	Weight
1	0	0	0
2	0	0.5	0.5
3	0	1	1
4	0.5	0	0.5
5	0.5	0.5	1
6	0.5	1	0
7	1	0	1
8	1	0.5	0
9	1	1	0.5

Table 3-2 Shaft characteristics of the nine trial shafts.

Shaft No.	Flexibility [cpm]	Kick Point [%]	Weight [g]
1	290	46	80
2	290	45	70
3	290	44	60
4	270	46	70
5	270	45	60
6	270	44	80
7	250	46	60
8	250	45	80
9	250	44	70

上記の実験計画法を用いたスイングデータの計測条件は下記の通りであった。

### 【計測条件】

#### [被検者]

- ・プロゴルファー：3名(男子1名，女子2名)  
(年齢； $24 \pm 3$ 歳，身長； $168 \pm 3$ cm，体重； $61 \pm 5$ kg)
- ・男子アマチュアゴルファー(上級者)；3名  
(年齢； $48 \pm 11$ 歳，身長； $167 \pm 5$ cm，体重； $64 \pm 8$ kg，  
経験年数； $21 \pm 6$ 年，ハンディキャップ； $8 \pm 1$ )
- ・男子アマチュアゴルファー(中級者)；3名  
(年齢； $45 \pm 6$ 歳，身長； $173 \pm 4$ cm，体重； $69 \pm 6$ kg，  
経験年数； $10 \pm 7$ 年，ハンディキャップ； $21 \pm 8$ )
- ・男子アマチュアゴルファー(初級者)；3名  
(年齢； $44 \pm 12$ 歳，身長； $169 \pm 3$ cm，体重； $67 \pm 4$ kg，  
経験年数； $3 \pm 1$ 年，ハンディキャップ； $48 \pm 5$ )

#### [クラブ]

- ・長さ；45.5inch
- ・ヘッド；Talormade社製 R11 Loft $9.5^\circ$   
(重量；196g，ロフト角； $9.5 \text{ deg}$ ，フェース角； $0 \text{ deg}$ ，重心距離；35mm，)

重心深度 ; 35 mm, 重心高 ; 20 mm)

- ・シャフト ; Table 3-2 に記載の通り, 実験計画法によって設計されたトリアルシャフト 9 種
- ・グリップ ; ゴルフプライド社製ツアーベルベット・ライト (重量 ; 42g, サイズ ; M60)

[プロトコル]

- ・十分なウォーミングアップを行う
- ・シャフトが変わるたびに 1 回素振りを行う
- ・各シャフトで No.1 から順に 1 球ずつ試技を行う
- ・上記のグリップセンサを用いて, それぞれの試技のグリップ動作を取得する
- ・Trackman 社製弾道計測器「Trackman3.0」を用いて, ボールの弾道データおよびヘッドの運動データを取得する

Fig. 3-2 に, 一例として女子プロゴルファー 1 名の計測結果を示す. プロゴルファーといえども, 各シャフトで微妙にスイングが変化していることがわかる. ゴルフにおいては, 微妙なスイング変化が結果に大きな影響を及ぼすため, この変化を捉えることが重要なポイントとなる. スイングデータは, そのゴルファーの特徴をよく表すトップからインパクトまでのデータとし, 時間軸としてトップを 0%, インパクトを 100%とした. 第 2 章と同様に, 計測データはノイズ除去の観点から 6 次関数で近似した.

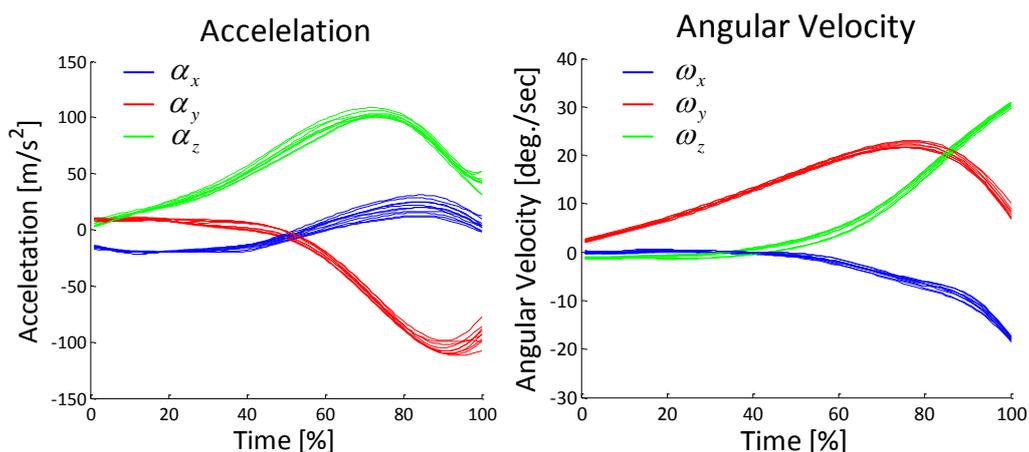


Fig. 3-2 Swing data of the female professional golfer.

### 3.2.3 応答曲面法

次に応答曲面法を用いる。応答曲面法とは、設計変数と目的関数の関係性を効率よく近似する手法の1つである。例えば、離散的に取得されたデータから、全体の解空間を予測する場合等に用いられる。これにより、実測した9本のトライアルシャフト以外のスイングデータを求めることができる。ここで、応答曲面の作成法についていくつか例示するとともにその特徴を記し、必要に応じて実際に応答曲面を作成した。

#### [多項式モデル]

一般に、応答曲面法としては多項式モデルが最も広く用いられている。多項式モデルは弱多峰性のモデルに適用できることから、広く一般に使われてきた。しかしながら、次数に任意性はあるものの凹凸が多くある応答に対しては、完全なフィッティングは困難となることが懸念される。さらに、多項式には直交性の制約が存在する。また、応答曲面の生成過程において構築された応答曲面の近似精度が不十分な場合には、精度が良くなりそうな空間を推定して応答曲面を再構築する必要があるため、局所的にしか近似精度の改善がなされない危険性も指摘されている[89]。

本研究では実験計画法を用いて実験数を減らすことが前提としてあるため、データの追加や削除を行う必要がない。また、6軸センサは相対軸において値を取得していることから取得する値は不変量ではないため直交性の制約も問題なく、RBFネットワークやKriging法のようにデータを不変量として扱う必要もない。これらのことから、多項式を本研究で使用することは好ましいと考えられる。

弱多峰性の応答曲面を作成する際に、2次の多項式が広く用いられている。ここでも2次の多項式を用いるが、共役項は相関の大きい硬さと調子のみを用いる。

$$\begin{aligned} f(x, y, z, t) = & a_1(t) + a_2(t)x + a_3(t)y + a_4(t)z \\ & + a_5(t)xy + a_6(t)x^2 + a_7(t)y^2 + a_8(t)z^2 \end{aligned} \quad 3-(1)$$

ここで、 $f(x, y, z, t)$ はスイングデータ、 $x, y, z$ はシャフトの硬さ、調子、重量、 $a_1 \sim a_8$ はそのゴルファーのスイング特性を示す。

9本分のクラブの硬さ、調子、重量を $(x_1, y_1, z_1) \cdots (x_9, y_9, z_9)$ とすると式3-(1)は、

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 & x_1 y_1 & x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 & x_2 y_2 & x_2^2 & y_2^2 & z_2^2 \\ & & & & \dots & & & \\ 1 & x_9 & y_9 & z_9 & x_9 y_9 & x_9^2 & y_9^2 & z_9^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \\ \dots \\ a_8(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ \dots \\ f_9(t) \end{Bmatrix} \quad 3- (2)$$

ここで、一般化逆行列  $A^+$  を用いて式 3- (2) を整理すると、

$$\begin{Bmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \\ \dots \\ a_8(t) \end{Bmatrix} = A^+ \begin{Bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ \dots \\ f_9(t) \end{Bmatrix} \quad 3- (3)$$

以上より、スイングの応答曲面式は式 3- (4) のように表される。

$$f(x, y, z, t) = [1 \quad x \quad y \quad z \quad xy \quad x^2 \quad y^2 \quad z^2] \begin{Bmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \\ \dots \\ a_8(t) \end{Bmatrix} \quad 3- (4)$$

多項式モデルを用いて生成された応答曲面を Fig. 3-3 に示す。これらは、作成した応答曲面から硬さ、調子、重量をそれぞれ(5, 5, 3)の水準として計 75 本分のスイング動作を算出したものである。

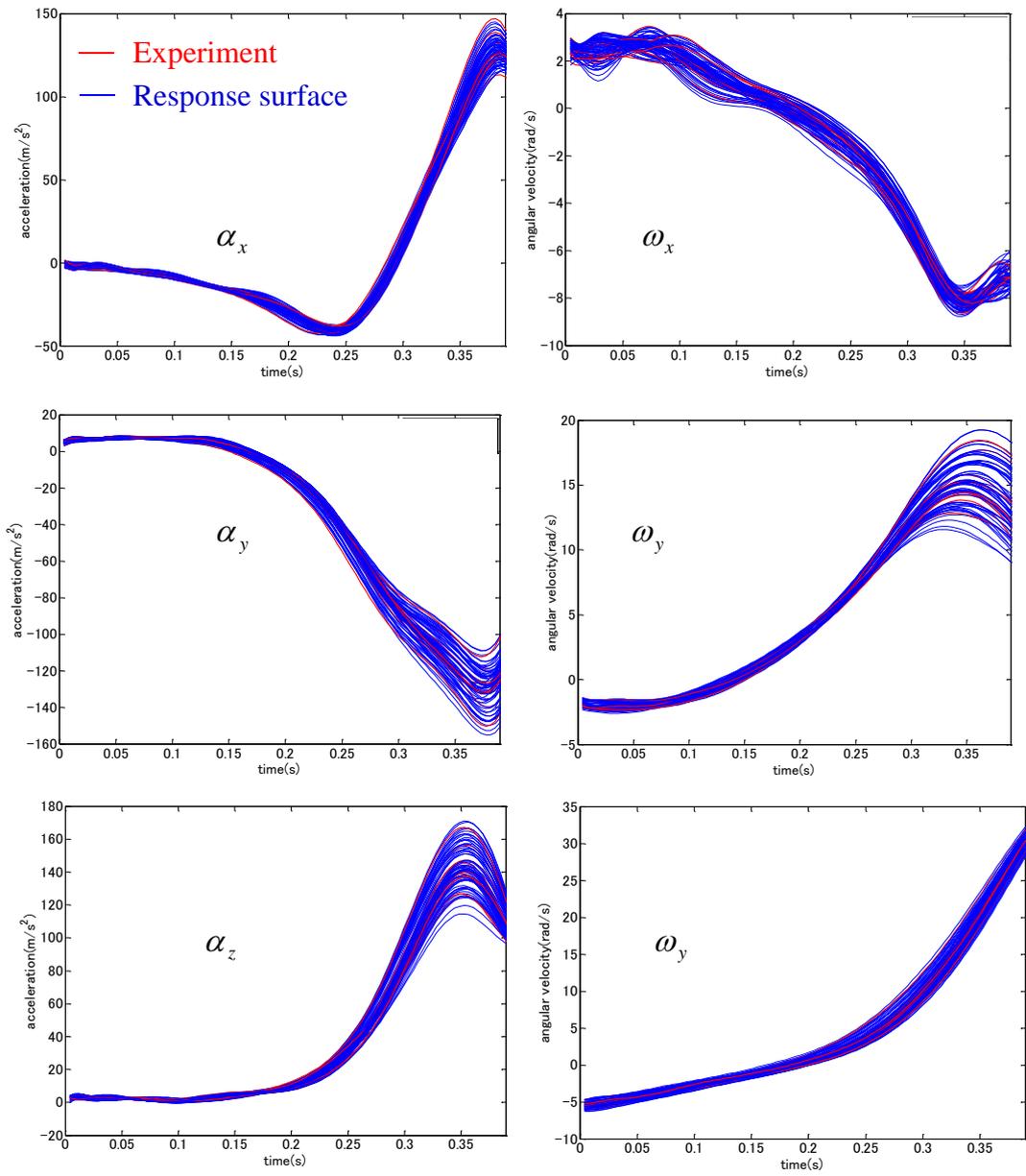


Fig. 3-3 Response surface using polynomial function.

## [RBF ネットワーク]

RBF ネットワークはニューラルネットワークの一種であり、一般に基底関数としてガウス分布が採用される。ガウス分布の重ね合わせにより応答曲面が生成される [90][91]。

RBF ネットワークの利点としては、ネットワークの学習が逆行列を求める問題に帰着できることから、ニューラルネットワークの中では学習が早いことが挙げられる。さらに追加学習、学習の忘却も簡易に行うことができる。RBF ネットワークは多項式モデルに比べて、設計空間全体にわたる実際の関数分布への適合性に優れており、サンプル点は直交性条件を満たす必要がない。よって、応答曲面の精度が悪い場合には、新しくサンプル点を追加して精度を向上させることができる。しかしながら、RBF ネットワークでは新たなサンプル点の望ましい場所についての情報が得られない、という問題点もある。

本研究においては、実験計画法を用いることにより学習の追加・忘却などサンプル点の逐次追加が不必要であることから、RBF ネットワークの持つ強みが十分に活かすことができない可能性が高い。しかしながら、例えばガウス分布の形を変えることにより弱峰性の関数から多峰性の関数まで幅広く近似でき、汎用性はある。

RBF ネットワークは、以下のように表わすことができる。

$$y_i(x) = \sum_{j=1}^m w_{ij} h(x, c_j, r_j) \quad 3- (5)$$

ここで、 $y_i(x)$ はスイングデータ、 $m$ は中間素子数であり、 $w_{ij}$ は重みを示す。 $h(x, c_j, r_j)$ は基底関数であり、以下の式で表される。

$$h(x, c, r) = \exp\left(-\frac{\|x - c\|^2}{r^2}\right) \quad 3- (6)$$

ここで、 $c$ は基底関数の中心、 $r$ は基底関数の半径を表す。

RBF ネットワークにおける学習は、学習用データ  $x_j$  に対して教師データを  $y_{ij}$  とすると、次式で表されるネットワークのエネルギー  $E_i$  を最小化する問題となる。

$$E_i = \sum_{j=1}^p (y_{ij} - y_i(x_j))^2 + \sum_{k=1}^m \lambda_{ik} w_{ik} \quad 3- (7)$$

ここで、第一項はネットワークの出力値と教師データの誤差の二乗和になる。第二項の  $\lambda_{ik}$  は特定の基底に引っ張られ過ぎることを防ぎ、これによりデータに含まれるノイズを抑止するとともに、学習過程における正則性を保証している。

RBF ネットワークの学習は式 3- (7)に示すエネルギー $E_i$ を最小化させる重み $w_{ik}$ を見つけることである。行列形式に整理して、

$$A = (H^T H + \Lambda) \quad 3- (8)$$

としたときに、エネルギーの最小化は

$$\Lambda w_i = H^T y_i \quad 3- (9)$$

ここで、 $H$ ,  $\Lambda_i$ は下記の通りである。

$$H = \begin{bmatrix} h(x_1, c_1, r_1) & h(x_1, c_1, r_1) & \cdots & h(x_1, c_1, r_1) \\ h(x_1, c_1, r_1) & h(x_1, c_1, r_1) & \cdots & h(x_1, c_1, r_1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h(x_1, c_1, r_1) & h(x_1, c_1, r_1) & \cdots & h(x_1, c_1, r_1) \end{bmatrix} \quad 3- (10)$$

$$\Lambda_i = \begin{bmatrix} \lambda_{i1} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{i1} \end{bmatrix} \quad 3- (11)$$

以上の結果より、

$$A^{-1} = (H^T H + \Lambda)^{-1} \quad 3- (12)$$

を用いて、求めたい重みは

$$w_i = A^{-1} H^T y_i \quad 3- (13)$$

となる。

つまり、RBF ネットワークの学習は  $A^{-1}$  を求めることに帰着される。また、RBF では追加学習と忘却が容易に行われる。Fig. 3-4 を用いて生成された応答曲面を示す。

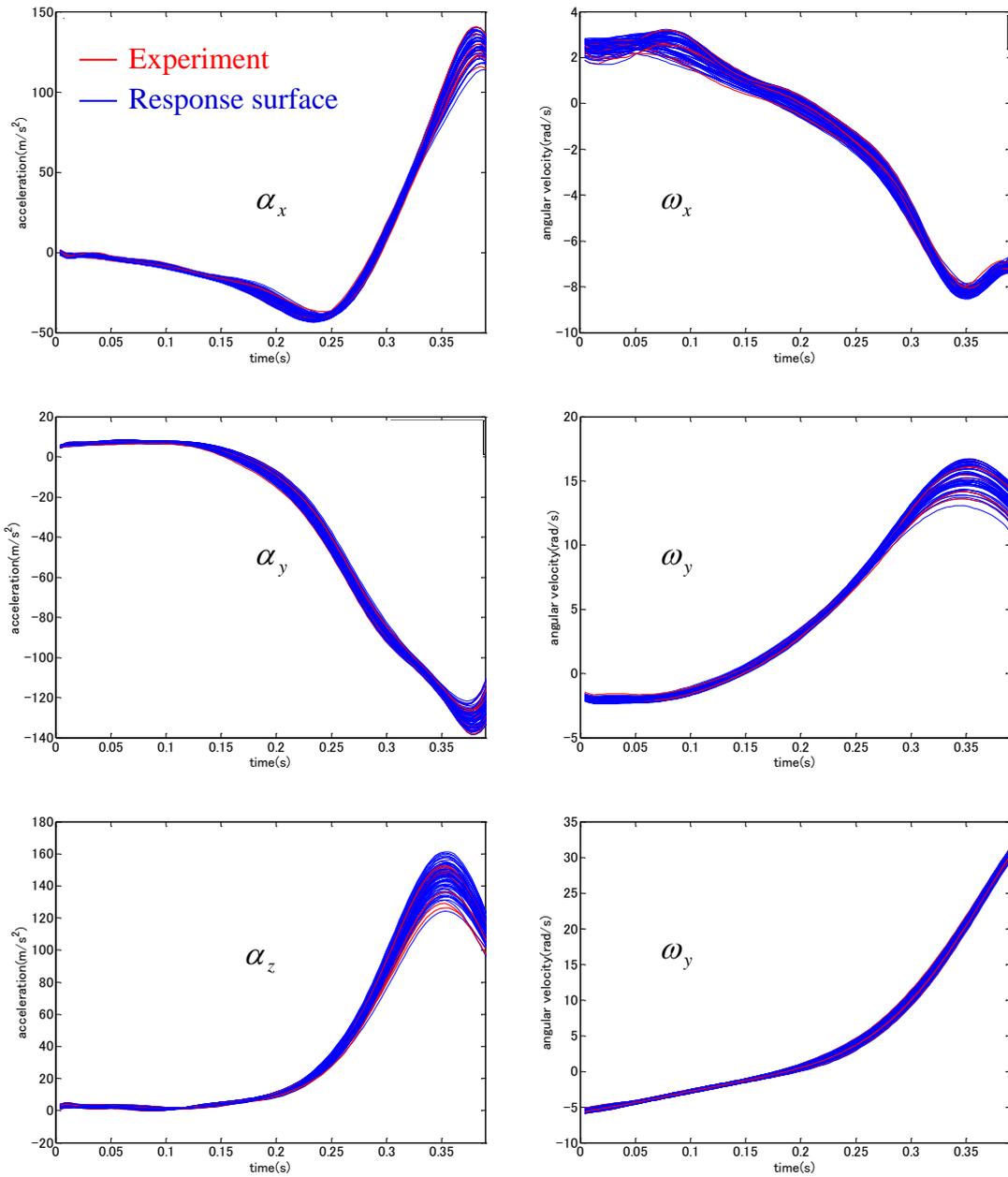


Fig. 3-4 Response surface using RBF network.

## [Kriging 法]

Kriging 法は、非線形関数の近似に適しており、RBF ネットワークとは異なり新たな追加すべきサンプル点を決定する際に非常に役立つ手法である[89]。地形学から生まれ、地形の起伏などの強峰性のある面を作成する際に使われる。しかし、Kriging 法は多項式や RBF ネットワークと比較して計算量が非常に多く、多峰性を有する応答をサンプル点の逐次追加を行いながら決定していく際に好まれる手法であることから、本研究で生成する応答曲面には不向きなことは明らかである。以上より、Kriging 法は本研究には不適と判断し詳細は割愛する。

本研究では、設計変数とスイングデータとの応答曲面における弱峰性や、サンプリング点を実験計画法で事前に決定していることなどを考慮して多項式を利用した応答曲面を作成し、比較として RBF ネットワークによる応答曲面を作成した。また、Fig. 3-3, 3-4 に示したように、応答曲面によって設計変数を任意の水準に分割して取り出し、様々なクラブ特性に対するスイング動作の応答を調べることができるようになった。多項式、RBF ネットワークともに応答曲面を生成できており、両者に大きな差異は見られなかった。

本研究においては実験計画法を用いて実験数を減らすことが前提としてあることから、RBF ネットワークが得意とする応答曲面生成に必要なサンプリングデータの迅速な追加、削除の処理を行う必要がない。また、慣性ユニットセンサは相対軸において値を取得していることから、取得する値は不変量ではなく、多項式法が持つ直交性の条件も問題とはならない。一方、RBF ネットワークでは加速度、角速度データ各軸のスイングデータを不変量として扱い応答曲面を作成する。さらにスイング動作が生む波形は個人によって大きく形状が異なることから、基底関数として用いられるガウス分布の半径や分散は動的に決定する必要があるため、計算に要する時間コストが大きい。よって、本研究では、多項式法を用いて応答曲面を作成することとした。

Fig. 3-5 に、一例として多項式での応答曲面適用後の女子プロゴルファーのスイングデータを示す。このように、実験計画法、及び応答曲面法を用いて、実際にはスイングしていないシャフトでのスイングデータを得た。

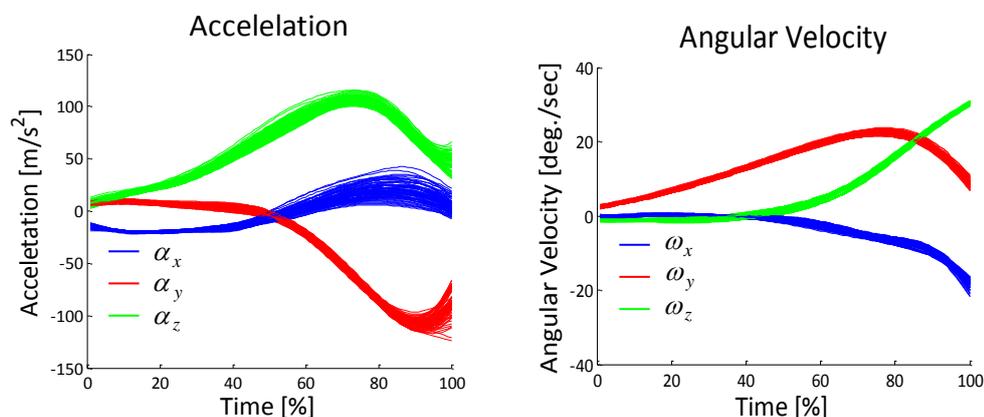


Fig. 3-5 Swing data calculated with Response Surface Method.

### 3. 2. 4 結果の妥当性評価

次に、実験計画法と応答曲面法を用いて算出されたスイングデータの妥当性を、実測結果と比較することによって評価する。そこで、実験計画法の No.1, 4, 8 のシャフトから、硬さのみ、調子のみ、重量のみをそれぞれ 0 から 1 へと最大限変化させた 3 種類のシャフト Fc, Pc, Wc を新たに作成した。Table 3-3 に新たな 3 種類のシャフト性能の水準を示す。

Table 3-3 Shaft characteristics for evaluation of RSM.

Shaft ID.	Flexibility	Kick point	Weight
Fc	1	0	0
Pc	0.5	1	0.5
Wc	1	0.5	1

これら 3 種のシャフトについてのスイングデータ算出が妥当であれば、他のシャフトについても妥当な結果が得られると考え、次のような条件で計測を行った。

## 【計測条件】

[被検者] (3.2.2 と同一の被検者)

- ・プロゴルファー：3名(男子1名，女子2名)  
(年齢；24±3歳，身長；168±3cm，体重；61±5kg)
- ・男子アマチュアゴルファー(上級者)；3名  
(年齢；48±11歳，身長；167±5cm，体重；64±8kg，  
経験年数；21±6年，ハンディキャップ；8±1)
- ・男子アマチュアゴルファー(中級者)；3名  
(年齢；45±6歳，身長；173±4cm，体重；69±6kg，  
経験年数；10±7年，ハンディキャップ；21±8)
- ・男子アマチュアゴルファー(初級者)；3名  
(年齢；44±12歳，身長；169±3cm，体重；67±4kg，  
経験年数；3±1年，ハンディキャップ；48±5)

[クラブ]

- ・長さ；45.5inch
- ・ヘッド；Talormade 社製 R11 Loft9.5°  
(重量；196 g，ロフト角；9.5 deg，フェース角；0 deg，重心距離；35 mm，  
重心深度；35 mm，重心高；20 mm)
- ・シャフト；Table 3-3 に記載の通り，Fc，Pc，Wc の3種
- ・グリップ；ゴルフプライド社製ツアーベルベット・ライト  
(重量；42g，サイズ；M60)

[プロトコル]

- ・十分なウォーミングアップを行う
- ・Fc，Pc，Wc の順に各シャフトで2球ずつ試技を行う
- ・グリップセンサを用いて，それぞれの試技のグリップ動作を取得する

これら2球の実測値における平均値と，応答曲面法にて算出した各シャフトに相当する計算値を比較し，応答曲面法によるスイングデータ計算値の妥当性を評価する．評価基準  $E_v$  は式 3- (14) の通り，計算値  $f(t)$  と実測値  $g(t)$  の差における積分値から，実測値  $g(t)$  の積分値を除いた値であり， $E_v$  が 0.15 よりも大きいか否かでその成否を判断した．すなわち，計算値の積分値が実測値の積分値に対して，±15% 以内の誤差であれば正答とし，±15% よりも大きければ誤答とした．

$$E_v = \frac{\int |f(t) - g(t)| dt}{\int |g(t)| dt} \leq 0.15 \quad 3- (14)$$

次に、±15%と規定した理由を述べる。一般に、ゴルファーのスイングは同一クラブであっても必ずバラつきを生じる。そこで、個人内の最大バラつき幅を見積もるために、上記の新たに作成した3本のシャフトで2球ずつ実測したデータのうち、最も積分値の差が大きくなったシャフトでのスイングデータを選出した。式3-(15)で示す。

$$Es = \frac{\int |h_1(t) - h_2(t)| dt}{\int |h_2(t)| dt} \quad 3-(15)$$

ここで、 $h_1(t)$ は9本のうち積分値が大きいスイングデータ、 $h_2(t)$ は積分値が小さいスイングデータを示す。これらを用いてスイングの最大バラつき幅を示す  $Es$  を定義した。

$Es$ は加速度  $a_x, a_y, a_z$ , 角速度  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  でそれぞれ異なるものの、上記12名の各  $Es$  の平均値は0.157であったため、上述の通り、±15%と規定した。すなわち、一般的なスイングのバラつきの範囲内にあるものを正答と判断した。Fig. 3-6に代表的な正答例として、シャフトFcにおける加速度  $a_x$  の実測値と計算値を示す。また、比較例として9本のシャフトのうち最も平均的な性能を持つNo.5シャフトの実測データを記載した。

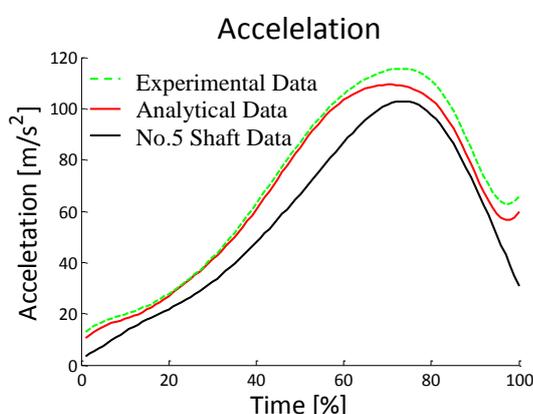


Fig. 3-6 Successful example of x-axis acceleration in calculation.

Table 3-4 に、上記評価方法を用いた時の被検者12名の結果をスキルレベルごとに示す。なお、スキルレベルは一般にゴルフ業界で言われていることをもとに決めた。すなわち、プロはプロライセンスを持つゴルファー、上級者はシングルハンディキャップを持つゴルファー(ハンディキャップ1~9)である。また、「スコア108を切ったら一人前のゴルファー」と言われている通り、中級者はスコアが82~108

(すなわちハンディキャップ 10~36)とし、それより大きいハンディキャップを持つゴルファーを初級者と定義した。正答率は、被検者ごと、センサの軸ごと、シャフトごとに別々に評価したため、合計  $12 \times 6 \times 3 = 216$  通りの正誤が存在する。このように、プロゴルファーから中級者においては 80%以上の正答率を示し、初級者になると正答率が 50%以下と急激に悪くなることが明らかとなった。この結果は、中級者以上であれば、個人内でのスイングのバラつきよりも、シャフトを変えた際のスイング変化の方が大きいことを示唆する。一方、初級者においては、個人内でのスイングのバラつきが大きいため、実験計画法と応答曲面法を用いてスイングデータを算出することは困難であることが明らかとなった。また、Fig. 3-7 に被検者レベルごとに  $Ev$  の値を 0.05 ずつ刻んだ場合のスイングの正誤数の分布をヒストグラムで示す。中級者以上では分布に大きな差はなく、初級者のみ異なる傾向にある。また、中級者以上では  $Ev=0.15$  に正答率の閾値があることも確認できる。以上より、本研究で構築するフィッティングシステムは、ハンディキャップ 36 以下のゴルファーを対象とする。

Table 3-4 Accuracy rate of the swing data from RSM.

Conditions	Professional	Advance	Midrange	Beginner
Accuracy Rate [%]	87.6	83.2	80.3	46.5

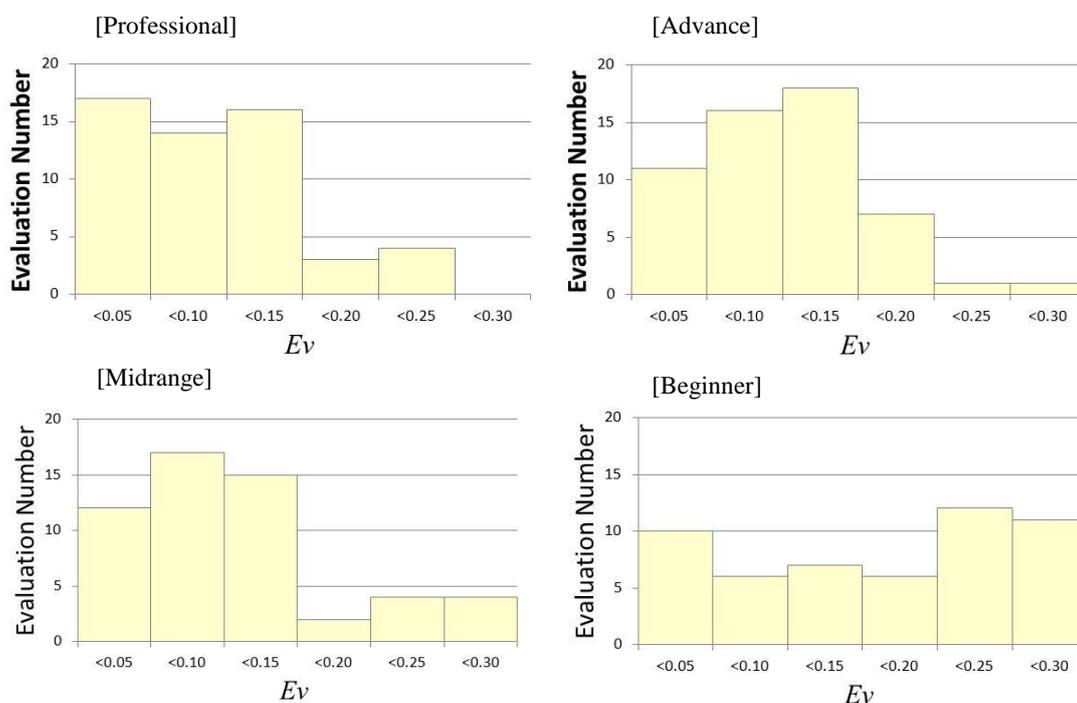


Fig. 3-7 Histogram of evaluation number.

### 3.3 フィッティングシステムの構築

#### 3.3.1 システム概要

以上の結果をもとにフィッティングシステムを構築した。概要は以下の6つのステップに分類される。

- 1) 実験計画法に基づいた9本のシャフトで実打試験を行い、スイングデータを6軸センサにより取得する。
- 2) 応答曲面法を用いて、スイングしていないシャフトでのスイングデータ(シャフトラインナップを網羅できる75通り)を算出する。
- 3) スイングデータとシャフトデータを対応させ、有限要素法による時刻歴応答解析を行いインパクト直前のヘッド挙動を算出する。
- 4) 得られたインパクト直前のヘッド挙動データを可視化し、ゴルファーのスイング傾向を言語化する。
- 5) 各種ヘッド挙動データから、理想に最も近いインパクトを迎える最適ゴルフシャフトを選定する。
- 6) 選定された最適ゴルフシャフトで実打試験を行う。

#### 3.3.2 ヘッド挙動データの可視化

上述の6つのステップのうち1)～3)はすでに述べた。ここでは4)のヘッド挙動データの可視化について述べる。可視化は、計75通りのクラブスピード、フェースアングル、インパクトロフトをそれぞれ算出し、 $x$ 軸方向をわずかにオーバーラップさせてプロットし、シャフト性能との関連が分かるように線分で結ぶことで行った。

詳述すると下記の4つのSTEPとなる。

##### ・STEP1

通常のプロットとして75本のシャフトに通常プロット No.を振る。通常プロットではこれが $x$ 軸となる。この際、25本ごとに重量が軽くなるように、かつ5本ごとに硬さが柔らかくなるように、1本ごとに調子に変化するような順とする。 $y$ 軸には、クラブスピード、フェースアングル、インパクトロフトを取る。

##### ・STEP2

No.26-50 に関しては 20 を減じ、No.51-75 に関しては 40 を減じた No.を DNA プロット No.として再プロットする。

• STEP3

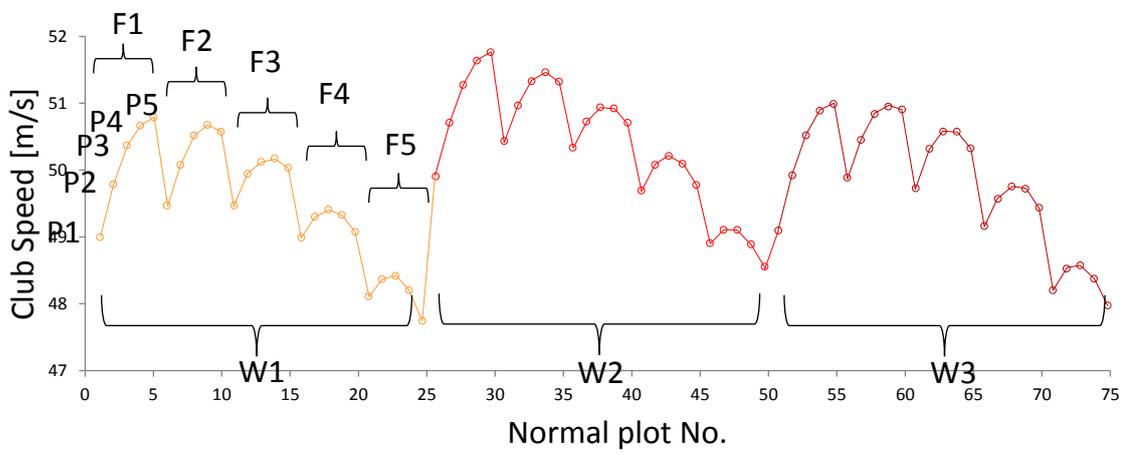
調子だけが異なり重量と硬さが同一のものを青線で、硬さだけが異なり重量と調子が同一のものを緑線で、重量だけが異なり硬さと調子が同一のものをピンク線で結ぶ。煩雑さを防ぐため、硬さと重量の線は、すべては書き込まずに両端の性能のものに限る。

• STEP4

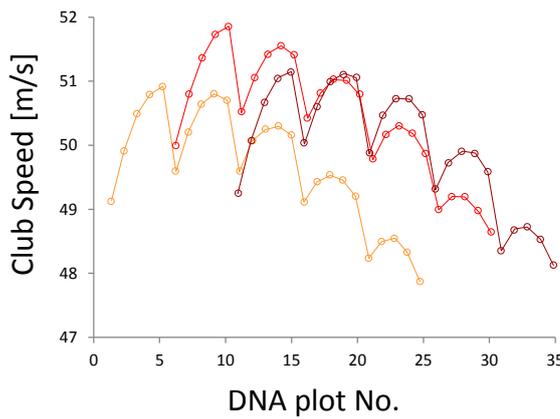
可視性を考慮して濃淡をつけ、実線と破線で識別する。

Fig. 3-8 に上記の 4STEP を図示した。最下段にある STEP4 での完成図を用いて説明する。各点は全部で 75 個存在し、それぞれの点が 75 通りのシャフトを示し、縦軸がクラブスピードを示す。ここで、緑線が硬さ、青線が調子、ピンク線が重量を示す。また、オレンジの点が最適シャフトを示し、本被検者がクラブスピードを高めるには、硬さ X-FLEX, 元調子, 重量 70 g のシャフトが最適であることが分かる。さらに、各線分の傾きに応じて本被検者のスイング傾向を言語化した。例えば、本被検者の場合は、緑線が左肩上がりの傾向にあるため硬さが硬いほどクラブスピードが上がる、青線は最適点近傍で右肩上がりの傾向にあるため調子が元調子であるほどクラブスピードが上がる、ピンク線は中間部が突出しているため重量が中間であるほどクラブスピードが上がる、等である。

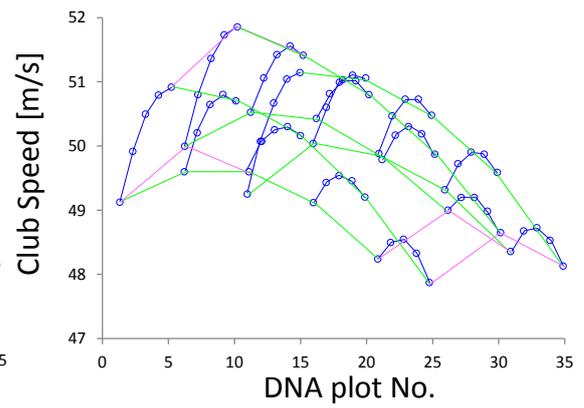
STEP1



STEP2



STEP3



STEP4

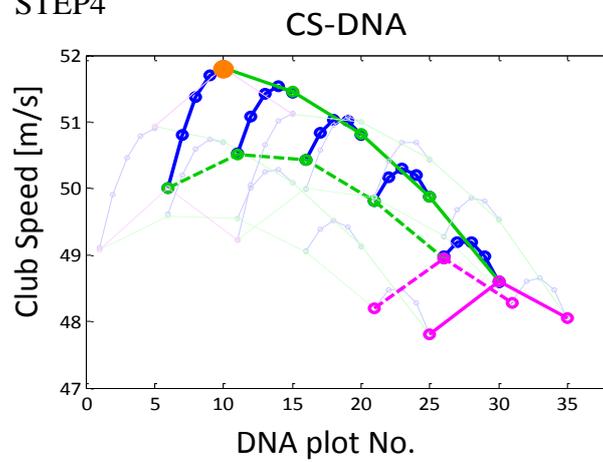


Fig. 3-8 Visualization step of DNA plot.

また、クラブスピードだけでなく、フェースアングル、インパクトロフトもそれぞれ同様にプロットしたものを Fig. 3-9 に示す。フェースアングル、インパクトロフトについても同様に可視化、言語化を行った。

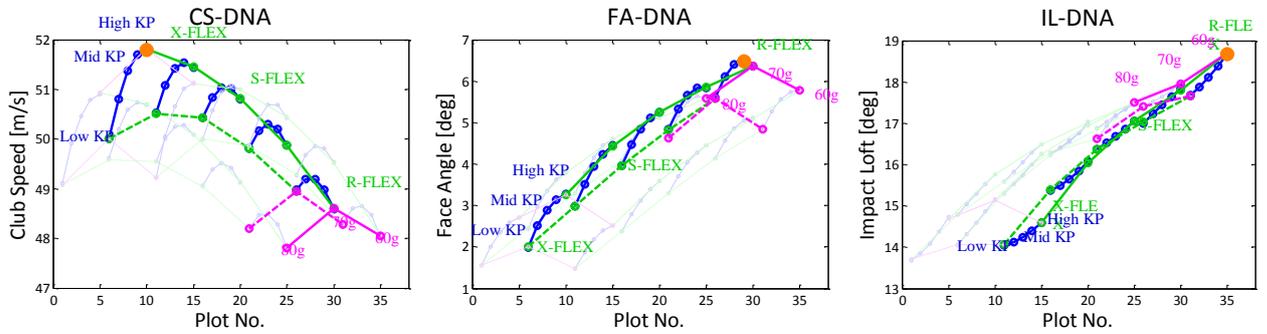


Fig. 3-9 Visualization of the head motions data.

### 3.3.3 最適ゴルフシャフトの選定

ここで、5) の最適ゴルフシャフトに関して、一般的にゴルフの専門家間で語られることから考察する。ゴルファーがドライバーに求めることは、「飛んで曲がらない」ことである。飛距離を伸ばすためには、クラブスピードが大きければ大きいほど有利である。また、狙った方向に打ち出すには、フェースアングルが  $0^\circ$  に近ければ近いほど有利である。インパクトロフトに関しては諸説あるが、飛距離と方向性を両立させることを考えると、アマチュアゴルファーにおいては  $14^\circ$  程度が適切であろうと考えられている。

以上の条件を、目的関数に落とし込むことを考える。そこで、式 3- (16) で表わされる評価値  $F$  を目的関数とした。

$$F = \alpha ZscoreCS + \beta Zscore|FA| + \gamma Zscore|IL - 14| \quad 3- (16)$$

ここで、 $CS$  はクラブスピード、 $FA$  はフェースアングル、 $IL$  はインパクトロフトを示し、 $Zscore$  は、2.4.4 と同じく平均が 0、分散が 1 となるような正規化処理を示す。なおインパクトロフト  $IL$  は下記の式 3- (17) で定義される。

$$IL = AA + 9.5 \quad 3- (17)$$

ここで 9.5 はゴルフヘッドのロフト角を示す。

また、ゴルフでの一般論からの推測にはなるが、通常クラブスピードが最も重視

されることを考慮し、 $\alpha=2$ ,  $\beta=-1$ ,  $\gamma=-1$ とした。この定義によって、クラブスピードを高め、フェースアングルを $0^\circ$ に近づけ、インパクトロフトを $14^\circ$ に近づける、飛んで曲がりにくい条件が達成されるものと考えられる。

ここで、第2章との目的関数との違いを記す。第2章ではプレイヤーが限られ、プロ2名とシングルプレイヤー1名という非常にレベルの高いプレイヤーであったため、飛距離を最優先する目的関数とした。式2-(8)を再度記載する。

$$F = \alpha ZscoreCS + \beta ZscoreFA + \gamma ZscoreAA \quad 2-(8)$$

ここで、 $CS$ はクラブスピード、 $FA$ はフェースアングル、 $AA$ はアタックアングル、を示し、 $\alpha=2$ ,  $\beta=1$ ,  $\gamma=1$ であった。

つまり、第2章ではクラブスピードを大きく、フェースアングルを大きく(ドローボールを打つため)、アタックアングルを大きく(スピンを減らすため)するための目的関数であった。

対して本章ではより広いレベルのプレイヤーが対象である。そのため、必ずしもドローボールが適切ではない。むしろ真っ直ぐ飛ばす方が重要である。そこで、フェースアングルは絶対値が小さく、すなわち $0^\circ$ に近づくように $\beta=-1$ とした。また、第3章では上下方向の打ち出しを決めるパラメータとして、アタックアングルではなく、インパクトロフトを選んでいる。第2章では、高いレベルのゴルファーであるため、打ち出し角はそれなりに適正な値に近づいている。そのためスピン量を減らすほど飛距離が伸びる。これに対して、第3章で対象としているゴルファーは、そもそも適切な打ち出し角で打ち出すことができない場合が多い。そのため、インパクトロフトを適切な角度( $14^\circ$ )とすることがパフォーマンス向上への近道であるため、このように目的関数を変更した。

ヘッドデータと同様に評価値 $F$ についてもFig. 3-10のように可視化し、同時に言語化も行った。さらに、既存ラインナップの中から最適シャフトと最も近い性能のシャフトを各ゴルファーに提案した。

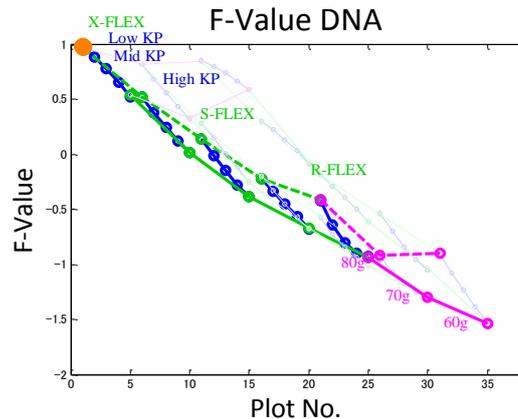


Fig. 3-10 Visualization of F-value.

### 3.3.4 確認試験

最後に、システムが選定した最適ゴルフシャフトで 6) の確認試験を行った。確認試験の条件は次の通りであった。

#### 【計測条件】

##### [被検者]

- ・プロゴルファー：3名(男子1名，女子2名)  
(年齢； $24 \pm 3$ 歳，身長； $168 \pm 3$ cm，体重； $61 \pm 5$ kg)
- ・アマチュアゴルファー(上級者)；38名  
(年齢； $54 \pm 8$ 歳，身長； $169 \pm 7$ cm，体重； $64 \pm 6$ kg，  
経験年数； $18 \pm 8$ 年，ハンディキャップ； $7 \pm 2$ )
- ・アマチュアゴルファー(中級者)；62名  
(年齢； $49 \pm 10$ 歳，身長； $170 \pm 6$ cm，体重； $65 \pm 7$ kg，  
経験年数； $15 \pm 7$ 年，ハンディキャップ； $24 \pm 7$ )

##### [クラブ]

- ・長さ；45.5inch
- ・ヘッド；Talormade 社製 R11 Loft $9.5^\circ$   
(重量；196 g，ロフト角； $9.5 \text{ deg}$ ，フェース角； $0 \text{ deg}$ ，重心距離；35 mm，  
重心深度；35 mm，重心高；20 mm)
- ・シャフト；Table 3-2 に記載の通り，実験計画法によって設計されたトリアルシャフト9種，及び本システムで導き出された最適シャフト1種
- ・グリップ；ゴルフプライド社製ツアーベルベット・ライト  
(重量；42g，サイズ；M60)

##### [プロトコル]

- ・十分なウォーミングアップを行う
- ・シャフトが変わるたびに1回素振りを行う
- ・9種のシャフトでNo.1から順に1球ずつ試技を行う
- ・上記のグリップセンサを用いて、それぞれの試技のグリップ動作を取得する
- ・システムが選んだ最適シャフトで5球試技を行う
- ・Trackman社製弾道計測器「Trackman3.0」を用いて、ボールの弾道データおよびヘッドの運動データを取得する

9本のトライアルシャフトのうちのベストショットをコントロールシャフトでのショットとし、最適ゴルフシャフトでのショットと比較した。9本のうちのベストショットの選択は、トータル飛距離から左右のズレ量を引いた値を弾道スコアとし、その弾道スコアが最も高いものとした。最適ゴルフシャフトでは、5回試打したうちの弾道スコアが高いもの3球を選びその平均値を算出した。9本のうちのベストショットよりも最適ゴルフシャフトでの弾道スコアが高い場合に、そのゴルファーのパフォーマンスが改善された、と判断した。弾道計測にはTrackMan社製弾道計測器「TrackMan Golf Launch 4.0」を用いた。

Table 3-5 に、プロ、上級者、中級者別に103名の実験結果を示す。このように、本フィッティングシステムでのシャフト提案により103名のうち89名、86.4%のゴルファーの弾道スコアが改善され、飛距離、方向性共に良好な結果が得られることがわかった。また、103名のゴルファーでの弾道スコアの平均改善値は14 ptであり、標準偏差は±12であった。t検定の結果、標準シャフトと最適シャフトには5%水準で有意差があることが明らかとなった。これは、飛距離にして7 yds、同時に方向性も7 yds改善することが期待できる値である。

Table 3-5 Results of the trajectory score and the improvement rate.

Improved Valuables	Professional	Advance	Midrange	Total
Trajectory Score Ave. (control shaft)	258	225	187	223
Trajectory Score Ave. (the best shaft)	263	244	204	237
Improved golfers / Total golfers	2 / 3	33 / 38	54 / 62	89/103
Improvement Rate [%]	66.7	86.8	87.0	86.4

### 3.4 結言

本研究では、実験計画法と応答曲面法を用いて用具の違いによる個人内のスイング変化量を見積り、その妥当性を評価した。L9型直行表と二次多項式による応答曲面を採用することで、ハンディキャップ36以下のゴルファーにとって、妥当なスイングデータを算出できることが明らかとなった。算出されたスイングデータを用いて有限要素法によるシミュレーションを行うことで、スイング変化を考慮したゴルフシャフトの最適設計手法を開発した。

また、その技術を活用しフィッティングシステムを構築した。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。

### 3.5 今後の展望と課題

本研究による手法やシステムを普及させることができれば、多くのゴルファーに現状よりも良い結果を得られるシャフトを提案することができると考えられる。しかしながら、初級者への適用には課題は残る。初級者が9本のクラブを安定してスイングすることは難しいためである。そこで、次章では初級者にも適用するための工夫について述べる。



## 第4章 自己組織化マップによる スイングデータ予測を用いた最適設計

## 4. 自己組織化マップによるスイングデータ予測を用いた最適設計

### 4.1 緒言

#### 4.1.1 背景

第3章に記載した通り、実験計画法と応答曲面法を用いることである一定レベル以上のスイングが安定したゴルファーに対しては、9本のシャフトをスイングすることで最適なシャフトを見つけ出すことが可能となった。しかしながら、前述したとおりスイングの安定しないゴルファーに対しては適切なソリューションがない。前述した専門知識を持つフィッターにとっても、スイングの安定しない初級者へのフィッティングは困難を極める。

#### 4.1.2 先行研究

先行研究としても、初級者を対象とした最適設計やフィッティングの研究は見当たらない。初級者に対しては、上級者との比較を通じてスイングの指導的な研究が行われているのみである[92]。これは、一般にゴルフの現場で言われているように「初級者はクラブ選びの前に練習をすべき」といった提言と一致する。ある意味、的を得ている提言である一方で、初級者であってもクラブを選びたいというニーズがあるのも事実である。さらに、ゴルフ歴が長いプレイヤーでも、スイングが安定しない初級者の域を脱しない場合もある。なお、本研究での初級者の定義はスコアで108を切れないゴルファーとする。

#### 4.1.3 本章の狙い

そこで本研究では、初級者にも適用できるよう少ない実験本数での最適設計を可能とするため、中上級者のスイングデータベースを用いたスイング動作の予測技術を確立することを狙いとする。

そのために、自己組織化マップを用いて中上級者のスイングデータをクラスタリングする。

## 4.2 自己組織化マップ

### 4.2.1 原理

ここで自己組織化マップ(Self-Organizing Maps; 以下, SOM)の原理について説明

する。SOM は、1982 年にフィンランドの Kohonen が提唱したモデルであり、高次元データの類似度を 2 次元マップ上の距離で表す特徴を持つ[93][94][95][96]。

SOM は入力データ(入力層)と参照ベクトル(出力層)の 2 つの層からなる。入力データ  $\mathbf{X}$  と参照ベクトル  $\mathbf{W}$  はいずれも同次元のベクトルを表す。参照ベクトル  $\mathbf{W}$  は二次元平面上に配置されたニューロンとして捉えられ、学習によってその値が更新される。すなわち、学習によって更新された参照ベクトル  $\mathbf{W}$  は、入力データ  $\mathbf{X}$  の写像を表しており、そのまま SOM と呼ばれるものになる。それぞれ式 4- (1), 4- (2) のように表わすことができる。

$$\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3, \dots, \mathbf{x}_n) \quad 4- (1)$$

$$\mathbf{W}_i = (\mathbf{w}_{i1}, \mathbf{w}_{i2}, \mathbf{w}_{i3}, \dots, \mathbf{w}_{in}) \quad 4- (2)$$

ここで、 $\mathbf{X}$  はスイングデータの集合を示し、 $\mathbf{x}_i$  は各被検者ごとのスイングデータを示す。 $\mathbf{W}_i$  は  $\mathbf{X}$  の写像を示す。

参照ベクトルの学習は、以下の 5 ステップのアルゴリズムで行われる。

#### 1) 入力データの選択

入力データ  $\mathbf{X}$  の集合の中から 1 つのデータが無作為に選択する。

#### 2) 勝者ニューロンの決定

参照ベクトル  $\mathbf{W}$  の中から「勝者ニューロン」と呼ばれる参照ベクトルを決める。勝者ニューロンとは、選択された入力データと最も類似度の高い参照ベクトルのことである。本章では類似度の評価にユークリッド距離を採用した。勝者ニューロンは以下の式 4- (3), 4- (4) で決定される。

$$|\mathbf{X} - \mathbf{W}_c| = \min_i (|\mathbf{X} - \mathbf{W}_i|) \quad 4- (3)$$

$$|\mathbf{X} - \mathbf{W}_i| = \sqrt{\sum_j (\mathbf{x}_j - \mathbf{w}_{ij})^2} \quad 4- (4)$$

ここで、式 4- (3) の  $\mathbf{W}_c$  が入力データと最も類似している参照ベクトルであり、すなわち勝者ニューロンである。

#### 3) 更新則の適用

更新則 4- (5), 4- (6) によって参照ベクトル  $\mathbf{W}$  の値が更新される。

$$\mathbf{W}_i(t+1) = \mathbf{W}_i(t) + h_{ci}(t) \{ \mathbf{X}(t) - \mathbf{W}_i(t) \} \quad 4- (5)$$

$$h_{ci}(t) = \alpha(t) \cdot \exp \left( - \frac{|r_c - r_i|^2}{2\sigma^2(t)} \right) \quad 4- (6)$$

ここで、 $\alpha(t)$ は学習率と呼ばれるパラメータで、学習の強度を決定する。 $t$ は現在の学習回数である。 $\sigma(t)$ は学習半径を表し、学習の範囲を決定する。 $\alpha(t), \sigma(t)$ はともに時間の単調減少関数である。 $r_c, r_i$ はユニット $c, i$ の座標である。

#### 4) 繰り返し

1)~3)の操作をすべての入力データに対して一定回数繰り返す。一度選択されたデータは次回の1)では入力データ集合から除く。入力データ集合にデータがなくなった場合、再度すべての入力データの中からデータを選択する。

#### 5) 写像の表示

マップ上に入力データの写像を表示する。入力データ1つ1つに対して2)で行った手法と全く同様の手法を用いて勝者ニューロンを決定する。入力データに対応した勝者ニューロンを、入力データのマップへの写像とみなす。以上の操作により、高次元データの類似度を二次元マップ上の距離で表すことが可能となる。

### 4.2.2 クラスタリング

本章では、9本のクラブでスイングした161名分の中上級者データのうち、基準クラブ(ここでは一例としてNo.5のクラブ)のスイングデータをクラスタリングすることを試みた。これらのデータは第3章のシステムを運用しながら得た。この際の計測条件は下記の通りであった。

#### 【計測条件】

##### [被検者]

- ・アマチュアゴルファー：161名(男子151名，女子10名)  
(年齢； $50 \pm 12$ 歳，身長； $168 \pm 12$ cm，体重； $64 \pm 11$ kg，  
経験年数； $17 \pm 13$ 年，ハンディキャップ； $22 \pm 12$ )

##### [クラブ]

- ・長さ；45.5inch
- ・ヘッド；Talormade社製 R11 Loft $9.5^\circ$   
(重量；196g，ロフト角； $9.5 \text{ deg}$ ，フェース角； $0 \text{ deg}$ ，重心距離；35mm，

重心深度 ; 35 mm, 重心高 ; 20 mm)

- ・シャフト ; Table 3-2 に記載の通り, 実験計画法によって設計されたトリアルシャフト 9 種
- ・グリップ ; ゴルフプライド社製ツアーベルベット・ライト  
(重量 ; 42g, サイズ ; M60)

[プロトコル]

- ・十分なウォーミングアップを行う
- ・シャフトが変わるたびに 1 回素振りを行う
- ・9 種のシャフトで No.1 から順に 1 球ずつ試技を行う
- ・上記のグリップセンサを用いて, それぞれの試技のグリップ動作を取得する

上述した通り, 式 4- (1)に代入する入力データ  $\mathbf{X}$  はスイングデータに相当し,  $\mathbf{X}_i$  はトップからインパクトまでのスイングデータを 40 分割したベクトルである. 添え字の  $n$  は被検者数を表す. 上記 1)~5)のアルゴリズムを適用することで, スイングデータの類似度が二次元 MAP 上に表示される[47]. これを K-means 法にて色分けした結果が Fig. 4-1 である. なお, 以上の SOM とクラスタリングの処理は, Laboratory of Computer and Information Science の SOM toolbox を用いた. K-means 法のクラスタ数は Davies-Bouldin Index で最小値を示した数とした. Davies-Bouldin Index とはクラスタ内の凝集性およびクラスタ間の離散性を評価する指標である.

スイングデータは 6 軸センサデータであるため, MAP は 6 枚存在する. 一例として  $\alpha_x$  について示した. このように SOM を応用することでスイングデータの類似度を数理的にクラスタリングすることが可能となる.

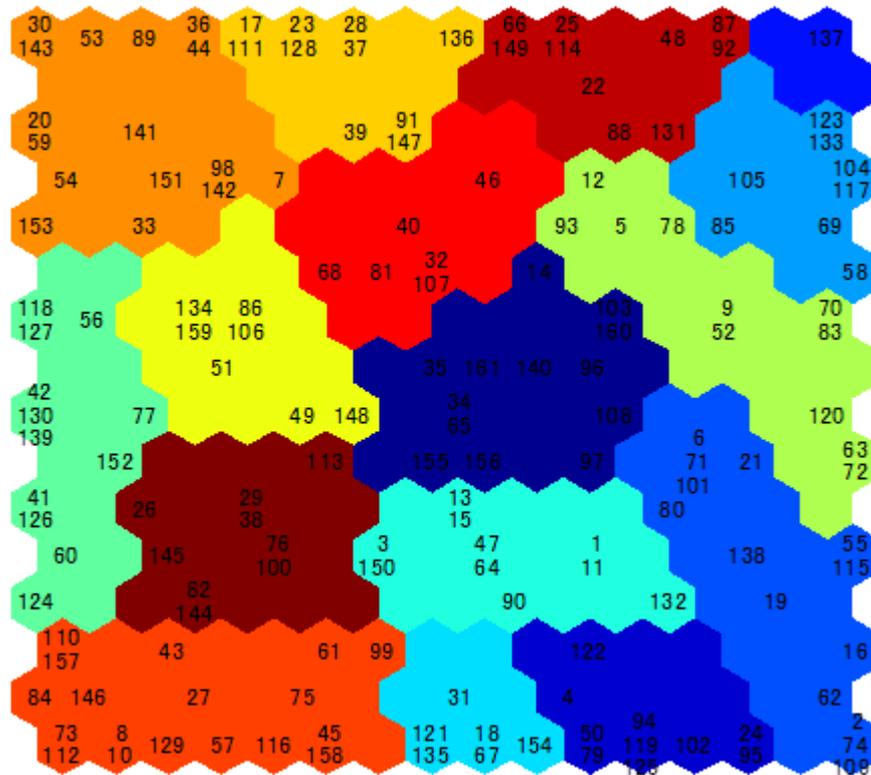


Fig. 4-1 Self Organizing Maps of swing data.

#### 4.2.3 クラスタリングの有効性確認

ここで、上記のクラスタリングがどの程度有効に実施されているかを確認する。Fig. 4-2 に、SOM 上で互いに近い被検者 No.30, 143 と、それらとは遠い No.19 のスイングデータ  $\alpha_x$  を示す。Fig. 4-2 に示す通り、SOM 上で近いものは類似したデータとなり、遠いものは異なるデータとなることわかり、SOM を用いたスイングデータのクラスタリングが有効であることが確認された。

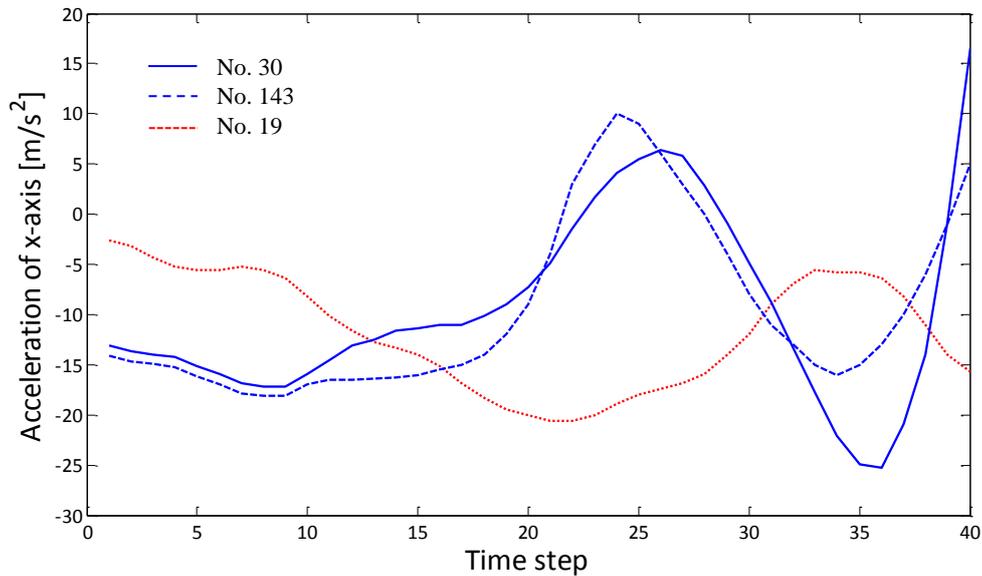


Fig. 4-2 Swing data of x-axis acceleration

### 4.3 スイングデータの予測

#### 4.3.1 概要

スイングデータの予測手法の概要を Fig. 4-3 に示す。まず、第 3 章の手法で得られたスイングデータをデータベースとして参照する。その中で基準となるシャフトに着目し、自己組織化マップを用いてクラスタリングを行う。次に、新規プレイヤーの基準シャフトでのデータがどのクラスタに所属するかを判断し、各クラスタ内の基準シャフト以外のスイング変化量を考慮することで、新規プレイヤーの他のシャフトでのスイングを予測する。最後に、予測されたスイングデータに基づいて最適設計を行う。また本章の内容は以下の仮説に基づく。

「基準となるスイングが類似していれば、シャフトを変化させた時のスイング変化も類似する。」

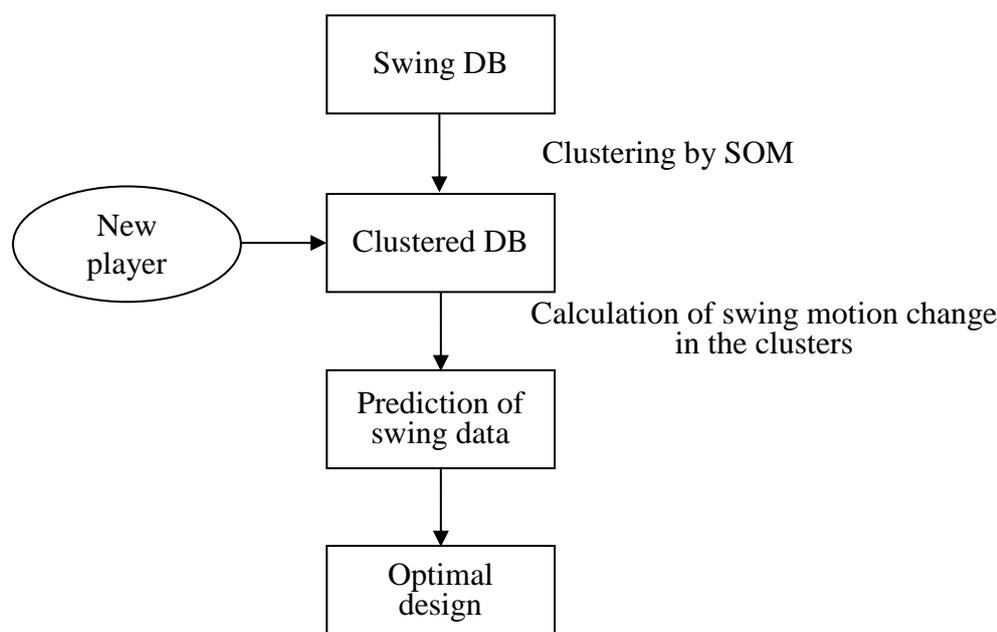


Fig. 4-3 Overview of prediction

#### 4.3.2 予測手法

ここで、スイングデータの予測手法に関してやや詳細に述べる。スイングデータの予測は Fig.4-3 に示した通り、SOM によってクラスタリングされたマップを参照して行う。

まず、新規プレイヤーの基準シャフトでのスイングデータと最も類似している既存プレイヤーをデータベース内から探索する。最も類似度の高い勝者ニューロンの決定と同じ操作で探索できる(式 4-(3), (4))。次に、その既存プレイヤーが所属するクラスタを特定し、そのクラスタ内でシャフトを変化させたときの平均変化量をシャフトごとに算出する。最後に、新規プレイヤーの基準シャフトでのスイングデータに前述のクラスタごと、シャフトごとの平均変化量を加算する。

以上のようなデータ処理を行うことで、新規プレイヤーは基準シャフトのみを計測することで、その他のシャフトの予測データを得ることができる。

#### 4.3.3 基準シャフトの選定

ここで、基準シャフトの選定について考察する。上記の原理から考えると、基準シャフトを1本スイングするだけで、残りの8本のスイングデータを予測することが可能である。しかしながら、Table 3-1 に示したのものから1本を選んだ場合、シャ

フトによってその予測精度が異なる。また、1本だけではミスショットする場合も十分に考えられる。そこで、基準シャフトを No.1, 5, 9 の3本とし、各基準シャフトからの予測データに重み付けを行うことで最終的な予測データを得ることとした(なお、基準シャフトを No.5 の1本だけとした場合の検討結果は、4.4.2 に後述する)。これにより、予測精度がロバストなものとなる。すなわち、予測データ  $f_i(x)$  は式 4- (7)の通り表すことができる。

$$f_i(x) = w_1 \{f_1(x) + \Delta f_{1j}\} + w_5 \{f_5(x) + \Delta f_{5j}\} + w_9 \{f_9(x) + \Delta f_{9j}\} \quad 4- (7)$$

ここで、 $f_1(x)$ ,  $f_5(x)$ ,  $f_9(x)$ は新規プレイヤーの No.1, 5, 9 シャフトでの実測データ、 $w_1$ ,  $w_5$ ,  $w_9$  はそれぞれの重み係数である。また、 $\Delta f_{ij}$ は下記の通り表わされる。

$$\Delta f_{ij} = \overline{f_{ij}(x) - f_{kj}(x)} \quad 4- (8)$$

ここで、 $\overline{f_{ij}(x) - f_{kj}(x)}$ は新規プレイヤーの属するクラスタ  $j$  内における各プレイヤーの No. $i$  シャフトと No. $k$  シャフトの差分を取り、クラスタ  $j$  内の全プレイヤーの平均を示す。すなわち、クラスタごとのスイング変化量を示す。

#### 4.3.4 重み付け

$w_1$ ,  $w_5$ ,  $w_9$  の重みは次のように決定した。まず、各係数にランダムな値を代入し、それぞれのケースでの予測成功率を多項式近似する。予測成功率が最大となる係数を最適化計算によって求め、最終的な重み係数を決定する。

多項式近似の次数は、赤池情報量基準(Akaike's Information Criterion; 以下 *AIC*)を用いて決定した。*AIC* とは、最大尤度を用いてモデルの煩雑さと適用度のバランスを取るために使用され、近似次数決定時のオーバーフィッティング問題を避けることができるものである。例えば、次数が高い場合、個別の問題に対してはよい近似を示すが、その近似モデルを使い他のデータを予測する場合にはうまくいかない。本研究の  $w_1$ ,  $w_5$ ,  $w_9$  を決める場合も目的は他プレイヤーのスイングデータ予測であるため、*AIC* が好適に用いられる。*AIC* は以下の式で定義され、*AIC* が最小となるモデルが最も妥当なモデルである[97]。

$$AIC = -2l_n L + 2k \quad 4- (9)$$

ここで、 $l_n$  は自然対数、 $L$  は最大尤度、 $k$  は次数を示す。

データベースに用いた 161 人とは別の 20 人を検証プレイヤーとし、各プレイヤーについて 1 次から 5 次までの AIC を算出した。個人ごとに最小となる AIC が異なるため、Table 4-1 に次数ごとに AIC が最小となった人数を示した。その結果、より多くのプレイヤーに当てはまる近似次数は 3 であると判断し、3 次多項式で近似することとした。

Table 4-1 Numbers of minimum AIC for each approximation order.

Approximation order	1	2	3	4	5
Numbers of minimum AIC	2	4	11	3	0

次に 3 次多項式近似した各重み係数のなかから、正答率が最大となるような係数の組み合わせを最適化計算にて特定する。式 4- (10)の通りの定式化を行った。

$$\begin{aligned}
 &MAX : f_{evaluate}(w_1, w_2, w_3) \\
 &Subject\ to : w_1 + w_5 + w_9 = 1 \\
 &\quad -1 \leq w_1 \leq 1 \\
 &\quad -1 \leq w_5 \leq 1 \\
 &\quad -1 \leq w_9 \leq 1
 \end{aligned}
 \tag{4- (10)}$$

ここで、 $f_{evaluate}$  は上述の 20 人の正答率平均値を 3 次の近似多項式を表す。

Fig. 4-4 に、一例として No.1, 5, 9 の重み係数決定の計算結果を示す。また、Table 4-2 に全シャフトでの最適重み係数を示す。No.1 では  $w_1 = 0.84$ , No.5 では  $w_5 = 0.85$ , No.9 では  $w_9 = 0.91$  とそれぞれ自身のデータの重みが大きくなっており、妥当な予測ができていると考えられる。すなわち、中上級者のスイングデータベースを用いて、同じく中上級者のスイングを予測する場合は、本手法が有効に機能するものと考えられる。しかしながら、本章の狙いは中上級者のスイングデータベースから、初級者のスイングを予測することである。事項にて、その精度検証を行う。

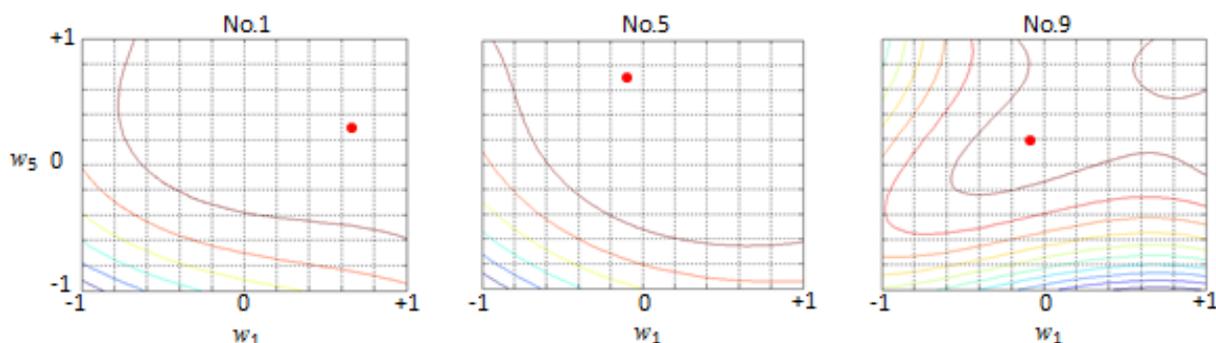


Fig. 4-4 Calculation of weighting

Table 4-2 Optimal weighting coefficient

Shaft No.	$w_1$	$w_5$	$w_9$
1	0.84	-0.31	0.47
2	-0.45	0.62	0.83
3	-0.21	0.71	0.50
4	0.68	0.57	-0.25
5	-0.31	0.85	0.46
6	0.72	-0.72	1.00
7	-0.22	0.88	0.34
8	0.77	0.10	0.13
9	0.31	-0.22	0.91

#### 4.4 結果検証

##### 4.4.1 初級者への適用精度

本手法の初級者への適用精度を探るため、次のような計測条件にて検証実験を行った。

##### 【計測条件】

##### [被検者]

- ・アマチュアゴルファー(初級者)；10名  
(年齢；35±7歳，身長；168±6cm，体重；66±10kg，  
経験年数；5±2年，ハンディキャップ；50±8)

##### [クラブ]

- ・長さ；45.5inch
- ・ヘッド；Talormade社製 R11 Loft9.5°  
(重量；196g，ロフト角；9.5deg，フェース角；0deg，重心距離；35mm，  
重心深度；35mm，重心高；20mm)
- ・シャフト；Table 3-2に記載の通り，実験計画法によって設計されたトリアルシャフト9種
- ・グリップ；ゴルフプライド社製ツアーベルベット・ライト  
(重量；42g，サイズ；M60)

[プロトコル]

- ・十分なウォーミングアップを行う
- ・9種のシャフトで No.1 から順に 3 球ずつ試技を行う
- ・上記のグリップセンサを用いて、それぞれの試技のグリップ動作を取得する
- ・Trackman 社製弾道計測器「Trackman3.0」を用いて、ボールの弾道データおよびヘッドの運動データを取得する

各シャフトで 3 球の平均値をその被検者の実測値とした。これは、バラつきが多い初級者のスイングを同定するための措置である。

次に、No.1, 5, 9 のデータを用いてスイングデータを予測し、実測データとの比較を行った。以下の式 3- (14) に当てはまるとき、予測が成功したと判断した。これは、第 3 章で示したとおり、一般的なスイングのバラつきの範囲(±15%)以内に予測データが収まっていることを示す。

$$Ev = \frac{\int |f(t) - g(t)| dt}{\int |g(t)| dt} \leq 0.15 \quad 3- (14)$$

ここで  $f(t)$  は予測値，  $g(t)$  は実測値である。

また、Fig. 4-5 に各被検者(被検者 A-I)の予測結果を個別にプロットしたもの、Table 4-3 に各シャフトの予測成功率を示す。No.4, 5 のシャフトについては特定の被検者によって結果が押し下げられていること、No.2, 6 は全体的に予測精度が低いことが分かる。シャフトによってバラつきがあるものの、平均すると約 75%の精度で予測に成功していることが分かる。

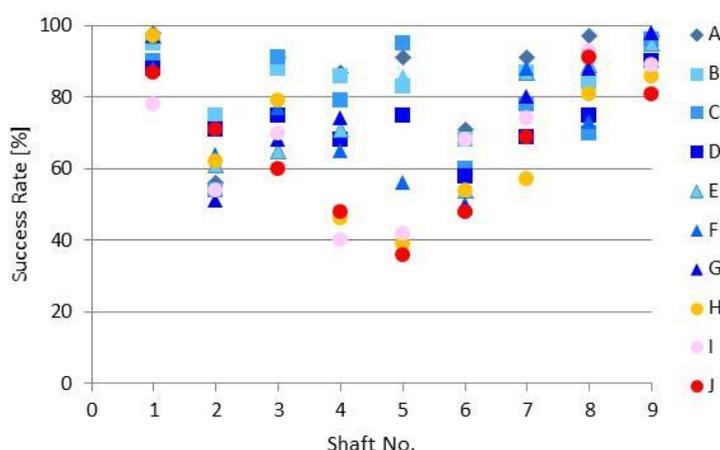


Fig. 4-5 Success rate of prediction using the three for each player.

Table 4-3 Average success rate of prediction using the three shafts.

Shaft No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Average
Success Rate [%]	91.5	61.9	76.4	66.4	67.8	58.0	78.0	84.1	92.5	75.2

#### 4.4.2 基準シャフトを1本とした場合の検討結果

前述したとおり、基準シャフトを No.5 の1本のみとした場合の予測精度を、Table 4-4 に示す。この場合、スイングデータの予測精度が 50%以下に低下することが分かる。そのため、基準シャフトは上述の通り、複数ある方が望ましい。

Table 4-4 Success rate of prediction using a shaft.

Shaft No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Average
Success Rate [%]	34.3	59.2	19.7	45.3	87.5	65.0	29.1	49.9	34.4	47.2

#### 4.4.3 予測データを用いた最適シャフト選定

次に、予測データを用いた最適ゴルフシャフト選定を行う。予測データは 4.4.1 で計測した No.1, 5, 9 のシャフトを3球ずつ計測したデータの平均値を用い、残りの6本のシャフトデータを予測した。なお、No.1, 5, 9 は予測データと実測データの両方が存在するが、ここでは予測データを用いた。次に、第3章で構築済みの応答曲面法を用いた最適ゴルフシャフト選定システムを利用して最適シャフトを特定した。

ここで、予測データを用いた初級者に対するゴルフシャフト最適設計の有効性を検証するため、次のような計測条件にて実験を行った。

##### 【計測条件】

[被検者] (4.4.1 と同一の被検者)

- ・アマチュアゴルファー(初級者) ; 10名  
(年齢 ; 35±7 歳, 身長 ; 168±6cm, 体重 ; 66±10kg,  
経験年数 ; 5±2 年, ハンディキャップ ; 50±8)

[クラブ]

- ・長さ ; 45.5inch
- ・ヘッド ; Talormade 社製 R11 Loft9.5°

(重量 ; 196 g, ロフト角 ; 9.5 deg, フェース角 ; 0 deg, 重心距離 ; 35 mm, 重心深度 ; 35 mm, 重心高 ; 20 mm)

- ・シャフト ; 予測データを用いて算出した最適シャフトと, 実測データを用いて算出した最適シャフトの 2 種
- ・グリップ ; ゴルフプライド社製ツアーベルベット (重量 ; 50g, サイズ ; M60)

[プロトコル]

- ・十分なウォーミングアップを行う
- ・予測シャフト, 実測シャフトの順で 5 球ずつ試技を行う
- ・Trackman 社製弾道計測器「Trackman3.0」を用いて, ボールの弾道データおよびヘッドの運動データを取得する

結果を Table4-5 に示す. 10 名のプレイヤーの飛距離と方向性の平均値を示す. 方向性はターゲットからの左右方向の距離を示す. 合わせて, コントロール群として 9 本のトライアルシャフトのうちのベストショットの結果を示す.

Table 4-5 にあるとおり, 9 球全てを実測で行った場合, コントロールシャフトと比較して優位な差は得られなかったが, 予測データを用いることで飛距離 13 yds, 方向性 15 yds を改善できることが明らかとなった.

Table 4-5 Comparison of each condition.

Condition	Prediction	Experiment	Control
Distance	215 ± 12	205 ± 16	202 ± 14
Direction	26 ± 14	39 ± 18	41 ± 21

#### 4.5 結言

本章では, 初級者におけるシャフトの違いによる個人内のスイング変化量を, 中上級者のデータベースを用いて予測すること目的とした. まず, 9 本の異なるシャフトでスイングされた 161 名のグリップ部の 6 軸センサデータを中上級者データベースとした. そのうち基準となるシャフトのデータについて SOM を用いてクラスタリングした. そして, データベースにない新規プレイヤーの基準シャフトでのスイングがどのクラスタに所属するか特定し, クラスタごとのスイング変化量を考慮することで新規プレイヤーの基準シャフト以外のスイングデータを予測した.

スイングデータの予測成功率は約 75%であった。また、スイングのバラつきが大きい初級者においては実測データを用いた最適設計では有意な効果を得られなかったが、予測データを用いた最適設計では 10 名の被検者にて飛距離 13 yds, 方向性 15 yds が改善された。

なお、本章では各クラスタがどのような特徴を持つかの確認は行っていない。そのため、初級者のスイングがクラスタの外にある可能性も否定できないことを付記しておく。この点に関しては、今後各クラスタのスイングを可視化し検討を進める予定である。



## 第5章

# 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設計

## 5. 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設計

### 5.1 緒言

#### 5.1.1 背景

これまでの章で見てきたとおり，飛距離と方向性を満足する目途が立った．しかし，ゴルフの競技特性を考えた場合にはもうひとつ重要な指標がある．それは再現性と呼ばれる繰り返し同様のパフォーマンスを行う技術である．なかでもドライバーショットは最も飛距離の出るショットであると同時に，最も再現性を欠くショットでもある．ドライバーショットは1ゲームでショートホールを除く14ホールで使用されるため，ゴルフゲームのパフォーマンスに大きな影響を及ぼす．例えば，飛距離が大きい方がゴルフゲームは有利に進められるため，多くのプレイヤーがドライバーショットに飛距離を求める．一方，飛距離を求めるあまり力が入りすぎて再現性を欠きミスショットとなる場面もしばしば見られる．このように飛距離と再現性はトレードオフの関係にある．本章ではこの点に着目し論を進めることとする．

#### 5.1.2 先行研究

実はこれまで，再現性に真正面から取り組んだ研究はあまり見られない．再現性は重要な項目であるにもかかわらず，再現性の指標とするパラメータの決定が難しく研究が進みにくい状況にあるためである．ゴルフでは唯一，パターにおける安定性(再現性)には関節トルクが関係するとされるものがある[74]．ゴルフ以外にも広げると，テニスサーブにて，上級者はトスアップの位置が異なっても身体動作を調節することで，コンスタントにサーブを打つことができるとしている[75]．また，野球のスイング動作にて，打点によって発揮トルクが異なることが述べられている[76]．以上のように再現性やコントロール性能は，完全には明らかにされていないものの，関節トルクが関与していることが示唆されている．

上述の通り，再現性に着目した研究は例が少なく，さらにゴルフドライバーの再現性に着目した研究は見られない．また，飛距離と再現性は一般にトレードオフの関係にあり，より一層研究を難しくしている．

#### 5.1.3 本章の狙い

そこで本章では，トレードオフの関係にある飛距離と再現性を多目的最適化問題として定式化し，そのパレート解を得る．そこから，飛距離と再現性を両立させる

ためのゴルフシャフト設計手法の確立を目指す。

#### 5.1.4 概要

Fig. 5-1 に本研究の概要を示す。はじめにスイング動作を計測する。その計測データを用いて有限要素法によるクラブスピードの時刻歴応答解析，マルチボディダイナミクスによる逆動力学計算を用いて身体負荷量解析を行う。身体負荷量は，閾値を考慮した各関節トルクの総和と定義する。本研究では飛距離の指標としてクラブスピードを，再現性の指標として身体負荷量を用いる。最後に，上記のクラブスピードと身体負荷量のパレート解を算出しゴルフシャフトの最適設計を行う。また，計測・計算時間削減のために身体動作の計測やクラブスピード及び身体負荷量の解析は離散値にて行い，その後各変数の応答曲面を算出する。

本研究では再現性の指標として身体負荷量を提案する。再現性はしばしば安定性とも呼ばれ，着弾点のバラつきやスイングのバラつきが少ないことを再現性が高い，安定性がよい，などと言うことがある。本来，再現性を計測するには複数回の計測が必要になるが，被検者の負担やゲーム中の状況変化を考えると複数回計測することが難しい。現実のゴルフショットを考えた場合，力を入れ過ぎると弾道が不安定となりミスショットに繋がる。すなわち，一定の身体負荷量を発揮しつつそれが大きくなり過ぎないほど再現性が高いと考えられる。身体負荷量の定義は後述するが，上述の通り身体負荷量と再現性は相関があるものだと考えられる。また，身体負荷量はゴルファーの怪我を防止する意味でも重要な指標となる。

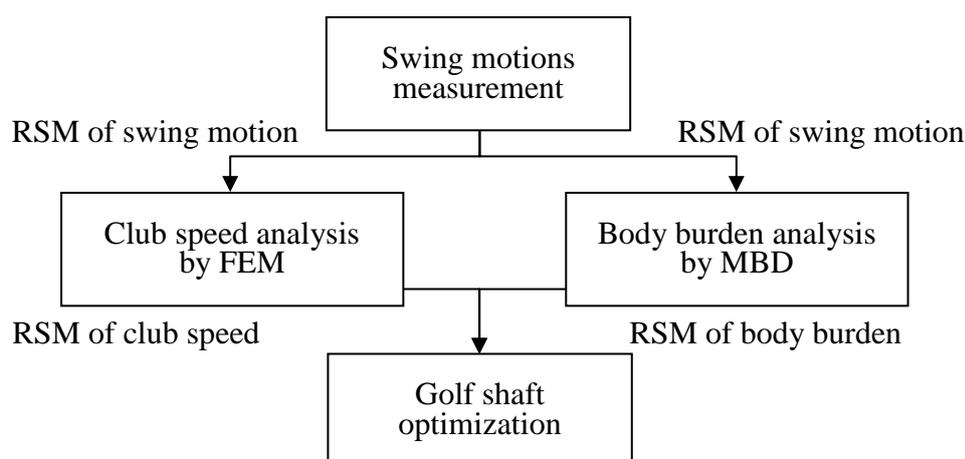


Fig. 5-1 Analysis flow of chapter 5.

## 5.2 計測

### 5.2.1 スイング動作の計測

プレイヤーの全身スイング動作は4台のカメラを用いてDLT法にて計測した。マーカ位置はFig. 5-2に記載の通り、身体上として左右腰部，左右肩部，左右肘関節外側，左右肘関節内側の計8点，クラブ上としてグリップ，シャフト，突起部の計3点であった。第2章～第4章ではセンサで計測したグリップ動作をそのゴルファーのスイング動作としていたが，本章では身体負荷量を計算するためこれらマーカ位置座標をスイング動作と定義する。



Fig. 5-2 Markers locations for measurement.

計測条件をまとめると下記の通りである。

#### 【計測条件】

##### [被検者]

- ・男子アマチュアゴルファー(上級者)；1名  
(年齢；49歳，身長；170cm，体重；70kg，  
経験年数；22年，ハンディキャップ；9)

##### [クラブ]

- ・長さ；45.5inch
- ・ヘッド；Talormade 社製 R11 Loft9.5°

(重量 ; 196 g, ロフト角 ; 9.5 deg, フェース角 ; 0 deg, 重心距離 ; 35 mm, 重心深度 ; 35 mm, 重心高 ; 20 mm)

- ・シャフト ; Table 5-2 に記載の通り, 実験計画法によって設計されたトリアルシャフト 9 種
- ・グリップ ; ゴルフプライド社製ツアーベルベット (重量 ; 50g, サイズ ; M60)

[プロトコル]

- ・十分なウォーミングアップを行う
- ・9 種のシャフトで 1 球ずつ試技を行う
- ・4 台のカメラで身体 8 点, クラブ 3 点のマーカ位置座標を計測する

なお, スイング動作モデル構築のため, 左右肩部から左右肩関節を, 左右腰部から左右大転子を, グリップ部から左右手関節を同定した. このように, 近くのマーカから必要な部位を同定することでマーカによってスイング動作を妨げることなく計測できる. 一例として, 肩部から肩関節の同定手法を下記に示す.

Fig. 5-3 のようにあらかじめ被検者の静止画を撮影し, 肩関節と肩関節上マーカの正面から見た位置関係を計測する.

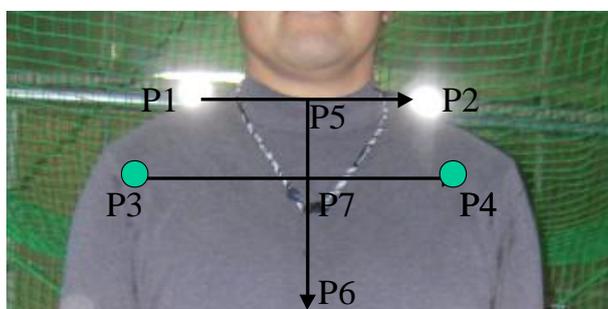


Fig. 5-3 Identification of sholder joint.

ここで肩関節上マーカをそれぞれ P1, P2, 肩関節位置を P3, P4 とすると, 左右肩関節上マーカを結んだ直線 P1P2 と, 左右肩関節を結んだ直線 P3P4 はスイング中平行であると考えられる. また, 左右肩関節上マーカ中点を P5, 左右腰マーカ中点を P6 とすると, 直線 P1P2 の中点と直線 P5P6 中点を結ぶ直線は身体の背骨軸を表現する. 直線 P1P2 と直線 P3P4 は, いずれも直線 P5P6 と垂直の関係にある. この関係を用い, ベクトル  $r_{12}$ ,  $r_{56}$  の単位長さベクトルをそれぞれ  $e_{12}$ ,  $e_{56}$  とすると, 式 5-(1)~(4)を導くことができる.

$$r_{12} = P1 - P2 \quad 5- (1)$$

$$r_{56} = P6 - \frac{P1 + P2}{2} \quad 5- (2)$$

$$e_{12} = \frac{r_{12}}{\|r_{12}\|} \quad 5- (3)$$

$$e_{56} = \frac{r_{56}}{\|r_{56}\|} \quad 5- (4)$$

また，P1P2 の静止画像上のピクセル距離を  $a_{12}$ ，実測長さを  $l_{12}$  とすると，静止画像上の距離と実測長さの比率  $r$  は式 5- (5) の通りとなる．

$$r = \frac{l_{12}}{a_{12}} \quad 5- (5)$$

以上より，P3 および P4 の位置は式 5- (6)，(7) の通り表現できる．

$$P3 = \frac{P1 + P2}{2} + ra_{57}e_{56} + ra_{37}e_{12} \quad 5- (6)$$

$$P4 = \frac{P1 + P2}{2} + ra_{57}e_{56} + ra_{47}e_{12} \quad 5- (7)$$

このように，静止画像上のマーカーから肩関節の位置 P3 及び P4 を同定できる．

また，第 3 章で述べた通りクラブによってスイングが変化する．ゴルフにおいてはスイング変化によるパフォーマンスへの影響が非常に大きい．そこで，被検者には硬さ，調子，振り剛性の異なる 9 種のトライアルシャフトをスイングしてもらい，それぞれの場合のマーカー位置を計測した．9 種のシャフト特性は Table 5-1, 5-2 に示す通りであった．これらは実験計画法に基づいて設計されており，最小の実験負荷で最大の効果を得るためのものである．

第 5 章でのシャフト設計変数は，硬さ，調子，振り剛性の 3 つである．第 3 章，第 4 章での設計変数は，硬さ，調子，重量の 3 つであったが，重量を振り剛性に変更した．第 3 章，第 4 章では既存のシャフトから選ぶフィッティングシステム構築に主眼を置いていたため，既存シャフトでの選択肢の少ない振り剛性を排除するという考えのもと設計変数を選んだ．対して第 5 章では重量は他の変数に比べて身体負荷に及ぼす影響が遥かに大きいと考えられる．そのため，硬さと調子の影響が見

えにくくなると考えられる。そこで、重量から振り剛性へと設計変数を変更し、各種設計変数の影響を調べることにした。

Table 5-1 Orthogonal table type L9 of Design of Experiment.

Shaft No.	Flexibility	Kick point	Torsion
1	0	0	0
2	0	0.5	0.5
3	0	1	1
4	0.5	0	0.5
5	0.5	0.5	1
6	0.5	1	0
7	1	0	1
8	1	0.5	0
9	1	1	0.5

Table 5-2 Shaft characteristics of the nine trial shafts.

Shaft No.	Flexibility [cpm]	Kick point [%]	Torsion [deg.]
1	290	46	4
2	290	45	5
3	290	44	6
4	270	46	5
5	270	45	6
6	270	44	4
7	250	46	6
8	250	45	4
9	250	44	5

### 5.2.2 応答曲面法

式 5- (8)に記載の通り，応答曲面法を用いて全身動作のスイング動作応答曲面を算出し，あらゆるパターンのシャフトに関するスイング動作を算出した．第3章と同様の手法である．

$$f(x, y, z, t) = a_1(t) + a_2(t)x + a_3(t)y + a_4(t)z + a_5(t)xy + a_6(t)x^2 + a_7(t)y^2 + a_8(t)z^2 \quad 5- (8)$$

ここで， $f(x, y, z, t)$ はスイングデータ， $x, y, z$ は硬さ，調子，振り剛性， $a_1 \sim a_8$ はそのゴルファーのスイング特性を示す．

9本分のクラブの硬さ，調子，振り剛性を $(x_1, y_1, z_1) \cdots (x_9, y_9, z_9)$ とすると式 5- (8)は，

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 & x_1 y_1 & x_1^2 & y_1^2 & z_1^2 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 & x_2 y_2 & x_2^2 & y_2^2 & z_2^2 \\ & & & & \cdots & & & \\ 1 & x_9 & y_9 & z_9 & x_9 y_9 & x_9^2 & y_9^2 & z_9^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \\ \cdots \\ a_8(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ \cdots \\ f_9(t) \end{Bmatrix} \quad 5- (9)$$

ここで，一般化逆行列  $A^+$ を用いて式 5- (9)を整理すると，

$$\begin{Bmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \\ \cdots \\ a_8(t) \end{Bmatrix} = A^+ \begin{Bmatrix} f_1(t) \\ f_2(t) \\ \cdots \\ f_9(t) \end{Bmatrix} \quad 5- (10)$$

以上より，スイングの応答曲面式は式 5- (11)のように表される．

$$f(x, y, z, t) = [1 \quad x \quad y \quad z \quad xy \quad x^2 \quad y^2 \quad z^2] \begin{Bmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \\ \cdots \\ a_8(t) \end{Bmatrix} \quad 5- (11)$$

## 5.3 解析

### 5.3.1 クラブスピード

クラブスピードは，グリップに強制変位を与えることで解析を行う．4台のカメラで計測したグリップの3次元座標データを入力値とし，陽解法有限要素解析ソフト LS-DYNA による時刻歴応答解析を用いて算出した．Table 5-3に9本のシャフト

での実験結果と解析結果を示す。このように、実験値と解析値に大きな乖離はないことが確認された。

Table 5-3 Club speed of experiment and analysis.

Shaft ID.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9
Experiment [m/s]	48.1	48.5	48.5	51.6	50.0	48.9	48.5	50.0	50.0
Analysis[m/s]	45.8	49.1	48.7	52.1	49.4	47.5	49.1	50.4	51.8

### 5.3.2 身体負荷量

身体負荷量算出のため、各関節トルクが必要となる。関節トルク算出のため、マルチボディダイナミクスを用いてスイング動作モデルを作成し逆動力学解析を行った。以下、詳述する。

Fig. 5-4 に示すように体幹下部、体幹上部、左上腕、右上腕、左前腕、右前腕、クラブの計7つのボディからなるスイング動作モデルを作成した。上述した通り、各ボディは計測マーカークからの同定値を用いて構成した。各ボディは球ジョイントで連結され、その自由度は3である。阿江らによる各ボディの慣性特性は先行文献を参照し、本被検者の身体的特徴を反映した[98]。

体幹下部の最下中央部 P1 の並進位置を各変量算出の基準点とした。また、5.2.2 にて任意のシャフトでのスイング動作が得られているため、ここではシャフトは剛体として近似的に解析した。解析時間を大幅に短縮するための措置である。

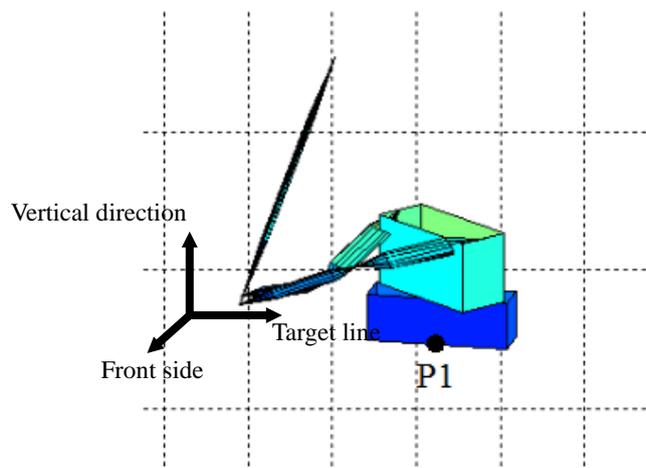


Fig. 5-4 Swing motion model for calculation of body burden.

本スイング動作モデルより、位置拘束式とその2回微分である加速度拘束式、及びニュートン・オイラー運動方程式を用いて剛体多体系の運動方程式の一般形を得る。

位置拘束式は、式 5- (12)のように表される。

$$\mathbf{C} = \mathbf{C}(\mathbf{q}) = \mathbf{C}_q \delta \mathbf{q} = \mathbf{C}_r \delta \mathbf{r} + \mathbf{C}_\theta \delta \boldsymbol{\theta} = \mathbf{0} \quad 5- (12)$$

ここで、一般化座標を  $\mathbf{q}$ 、 $\mathbf{C}(\mathbf{q})$  を一般化座標  $\mathbf{q}$  で偏微分したときのヤコビアンマトリックスを  $\mathbf{C}_q$ 、さらに  $\mathbf{C}_q = [\mathbf{C}_r \ \mathbf{C}_\theta]$  と分割し、仮想変位  $\delta \mathbf{q} = [\delta \mathbf{r} \ \delta \boldsymbol{\theta}]$  であるとした。 $\mathbf{r}$  は P1 を基準とした各剛体重心の位置ベクトル、 $\boldsymbol{\theta}$  は各剛体の回転角度を示す。

加速度拘束式は、式 5- (12)を2回微分することで式 5- (13)のように得られる。

$$\mathbf{C}_r \ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{C}_\theta \dot{\boldsymbol{\omega}} = \boldsymbol{\gamma} \quad 5- (13)$$

ここで、 $\boldsymbol{\omega}$  は角速度を示す。

ニュートン・オイラー運動方程式は、ラグランジュの未定乗数法を用いることで式 5- (14)、5- (15)のように書ける。

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{C}_r^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{f} \quad 5- (14)$$

$$\mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\omega}} + \mathbf{C}_\theta^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{n} - \tilde{\boldsymbol{\omega}} \mathbf{J} \boldsymbol{\omega} \quad 5- (15)$$

ここで、各剛体の質量を  $\mathbf{M}$ 、外力を  $\mathbf{f}$ 、慣性モーメントを  $\mathbf{J}$ 、外モーメントを  $\mathbf{n}$  とした。 $\boldsymbol{\lambda}$  はラグランジュ乗数である。

以上より、剛体多体系運動方程式の一般形は、式 5- (13)、5- (14)、5- (15)をまとめて式 5- (16)のように書くことができる。本式を解くことにより、身体の各部位における関節トルクを求めることができる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_r^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{J} & \mathbf{C}_\theta^T \\ \mathbf{C}_r & \mathbf{C}_\theta & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{r}} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \\ \boldsymbol{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ \mathbf{n} - \tilde{\boldsymbol{\omega}} \mathbf{J} \boldsymbol{\omega} \\ \boldsymbol{\gamma} \end{bmatrix} \quad 5- (16)$$

多くの場合、関節トルクを求める際には床反力を計測するが、上記の手法で床反力の値がなくとも関節トルクを推定できる。すなわち床反力自体も推定できる。歩行動作時の計測と解析の誤差として、前田(2017)は、左右方向 16.6%、前後方向 5.9%、

上下方向 5.8%であったとしている[77]. また, Fry ら(2016)は, スクワット動作時について, 解析値と計測値とを比較して 5%水準で有意差はない, としている[78]. このように, ゴルフスイング動作においても誤差は含むものの相対的な値を見るには十分な精度で解析できると判断した.

ここで, 身体負荷量を定義する. 身体負荷量は各関節が発揮した関節トルクの総和として定義される. この際, 関節ごとに閾値を設定し, その閾値以上の関節トルクのみを用いる. すなわち, 次の通りである.

時系列で得られた関節トルクから身体負荷量  $B$  を算出する. まず, 各関節に閾値  $L$  を設定し, その閾値を超える各時間の関節トルク  $t_i$  から  $L$  を差し引いたものを  $T_i$  とし, その総和を部位別身体負荷量  $B_p$  とする. 閾値を超えない関節トルクは 0 とする(式 5- (17), 5- (18)). その後, 部位別身体負荷量をそれぞれの閾値で除すことで正規化し, その総和を身体負荷量  $B$  とする(式 5- (19)).

$$B_p = \sum T_i \quad 5- (17)$$

$$T_i = \begin{cases} |t_i| - L & (|t_i| > L) \\ 0 & (|t_i| \leq L) \end{cases} \quad 5- (18)$$

$$B = \sum \frac{B_p}{L} \quad 5- (19)$$

本研究では体幹, 肩関節, 肘関節の閾値をそれぞれ 80Nm, 40Nm, 20Nm とした. このように身体負荷量を定義することで, 力の入り過ぎを防止することができる. 現実のゴルフでも力みすぎた場合, 弾道は途端に不安定になるため, 妥当な定義と考えられる. なお, 身体負荷量は無次元量となる.

## 5.4 最適化

### 5.4.1 クラブスピードおよび身体負荷量の応答曲面算出

最適化計算の際に各設計変数(硬さ, 調子, 振り剛性)を変化させながら, 上述の有限要素法や逆動力学解析を繰り返し実行するには膨大な計算時間が必要になる. そこで, クラブスピードと身体負荷量をそれぞれ離散化した値から応答曲面を作成し最適化計算に利用することとした. クラブスピードは 3 次の完全多項式で表現し, 身体負荷量は 5 次の完全多項式とした.

一例として, Fig. 5-5(a)に振り剛性を固定し硬さと調子を変化させたときのクラブ

スピードを, Fig. 5-5(b)に調子を固定し硬さと振り剛性を変化させたときの身体負荷量を示す. 硬さは0が硬く1が柔らかい, 調子は0が先調子で1が元調子, 振り剛性は0が振れにくく1が振れやすいことを示す. Fig. 5-5より, 硬さを柔らかく調子を先調子にすることでクラブスピードが増加する傾向にあり, 硬さを柔らかくねじれ剛性を小さくすることで身体負荷量が低下する傾向にあることがわかる. これらの事象は現実のゴルフでしばしば言われることと一致し, 妥当な応答曲面が得られたと考えられる.

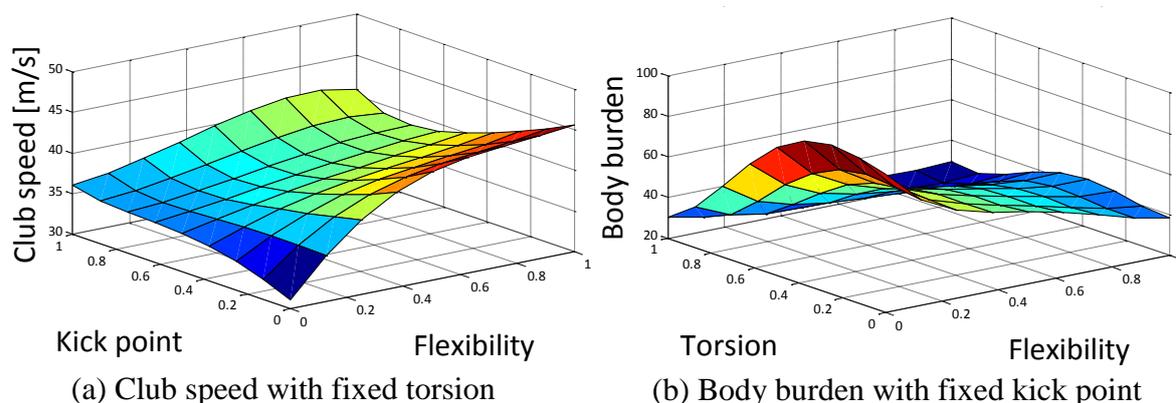


Fig. 5-5 Response surface of club speed and body burden.

#### 5.4.2 パレート解

最適化問題としては, クラブスピードを最大化しつつ身体負荷量を最小化する多目的最適化問題へと帰着される. すなわち, 式 5- (20), (21), (22)のように定式化される.

$$f_1 = -\frac{f_V(x, y, z)}{\max(V) - \min(V)} \quad 5- (20)$$

$$f_2 = \frac{f_B(x, y, z)}{\max(B) - \min(B)} \quad 5- (21)$$

$$\begin{aligned} &\min\{f_1, f_2\} \\ &s.t. \ 0 \leq x, y, z \leq 1 \end{aligned} \quad 5- (22)$$

ここで,  $f_V(x, y, z)$ はクラブスピードの応答曲面,  $f_B(x, y, z)$ は身体負荷量の応答曲面,  $x, y, z$ はそれぞれシャフトの硬さ, 調子, 振り剛性を示す. また, 両変数のオーダーを揃えるために, それぞれの最大値  $\max(V)$ ,  $\max(B)$ と最小値  $\min(V)$ ,  $\min(B)$ の差で除した.

さらに、式 5- (23) のようにすることで、単目的問題として扱うことが可能となる。 $\alpha$  の値を 0~1 まで変化させることで Fig. 5-6 のパレート解を得た。

$$\min\{\alpha f_1 + (1-\alpha)f_2\} \quad 5- (23)$$

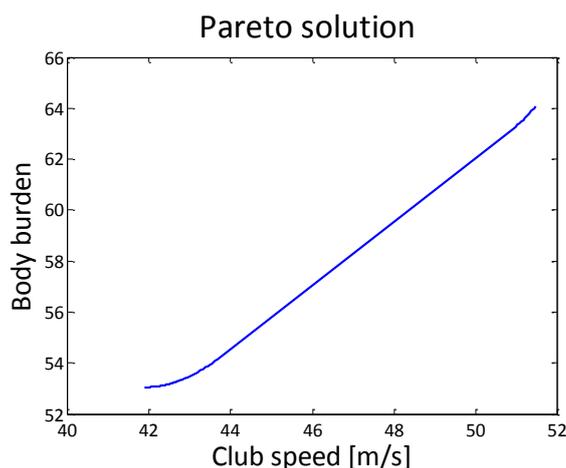


Fig. 5-6 Pareto solution with club speed and body burden.

#### 5. 4. 3 解析結果

Table 5-4 に、クラブスピード、身体負荷量、シャフト設計変数について、コントロールシャフトとして 9 本の実験用シャフトのうち No.2 のシャフト、 $\alpha = 0.8$  で最適化されたシャフト、 $\alpha = 0.2$  で最適化されたシャフトの 3 つのケースの解析結果を示す。ここで No.2 をコントロールシャフトとした理由は、本被検者が普段使用しているシャフト特性と最も近いためである。また、 $\alpha = 0.8$  を選んだ理由としては、普段の被検者のクラブスピードから考えて現実的なパフォーマンスアップとなる値を選んだ。なお、No.2 のシャフトにおいては実験値も存在するが、ここでは他の条件と合わせるため応答曲面による計算値を用いて各変量を算出した。

$\alpha = 0.8$  のようにクラブスピード増加を重視した場合は、No.2 と比較して硬さが若干柔らかく (Flexibility = 0.24)、若干元調子であり、(Kick point = 0.62)、振り剛性が大きい (Torsion = 0.10) ものが最適となった。一方、 $\alpha = 0.2$  のように身体負荷量軽減を重視した場合、硬さが最も柔らかく (Flexibility = 1)、やや先調子 (Kick point = 0.26) で、振り剛性が小さい (Torsion = 0.98) ものが最適シャフトとなった。このように、パレート解を用いることでクラブスピードだけでなく、身体負荷量も考慮して両者を両立させ得る解が得られる。

一般に、クラブスピードが速いプレイヤーは硬くて振り剛性が大きいシャフトを好み、クラブスピードが遅いプレイヤーは柔らかくて振り剛性が小さいシャフトを好む傾向にある。これまで経験的に上記の傾向が語られてきたが、クラブスピードと身体負荷量が関係していることが示唆された。また、 $\alpha = 0.8$ での最適シャフトでは、最適化されていないNo.2のシャフトよりもクラブスピードを2.2 m/s増大させ、かつ身体負荷量を約7%軽減できることが明らかとなった。

Table 5-4 Analysis results of each shaft.

Shaft ID.	Club speed [m/s]	Body burden	Flexibility	Kick point	Torsion
No.2	49.1	68.2	0	0.5	0.5
$\alpha = 0.8$	51.3	63.7	0.24	0.62	0.10
$\alpha = 0.2$	43.6	53.9	1	0.26	0.98

ここで、各シャフトを使用した際の関節トルクの時系列データを示す(Fig. 5-7)。No.2を破線、 $\alpha = 0.8$ を実線、 $\alpha = 0.2$ を丸印で示した。それぞれ青色が体幹の振り方向に対する関節トルク(左側に振る動作が正)、緑色が左肩関節の外旋トルク、赤色が右肘関節の回内トルクである。また、Time = 0がトップ、Time = 0.25がインパクトを表す。

No.2と $\alpha = 0.8$ を比較すると、 $\alpha = 0.8$ では体幹の振り方向に対する関節トルクのピークをより早い段階でかつ少ない量で発揮し、左肩関節の外旋トルクはより積極的に負のトルク(内旋方向への正のトルク)を発揮し、右肘関節の回内トルクはあまり発揮しないようにすることで、クラブスピードを高めつつ、身体負荷量を軽減できることが分かる。次に $\alpha = 0.2$ に着目すると、体幹の振り方向に対する関節トルクはさらに早い段階で発揮し、左肩関節の外旋トルクは閾値を超えない範囲で正のトルクを発揮してから負のトルクを発揮し、右肘関節の回内トルクはあまり発揮しないようにすることで、より身体負荷量を軽減できることが分かる。また、各関節トルクのピークを迎えるタイミングに着目すると、身体負荷量を軽減するには大きな関節から順にピークを迎える傾向にあることが分かる。これは、運動連鎖が身体負荷量の軽減に有効であることを示唆している。運動連鎖とは、効率的に末端(例えば腕)の速度を高めるために行われる動作戦略である。このように、本章で得られた関節トルクは一般的な動作戦略とも合致することが示唆される。

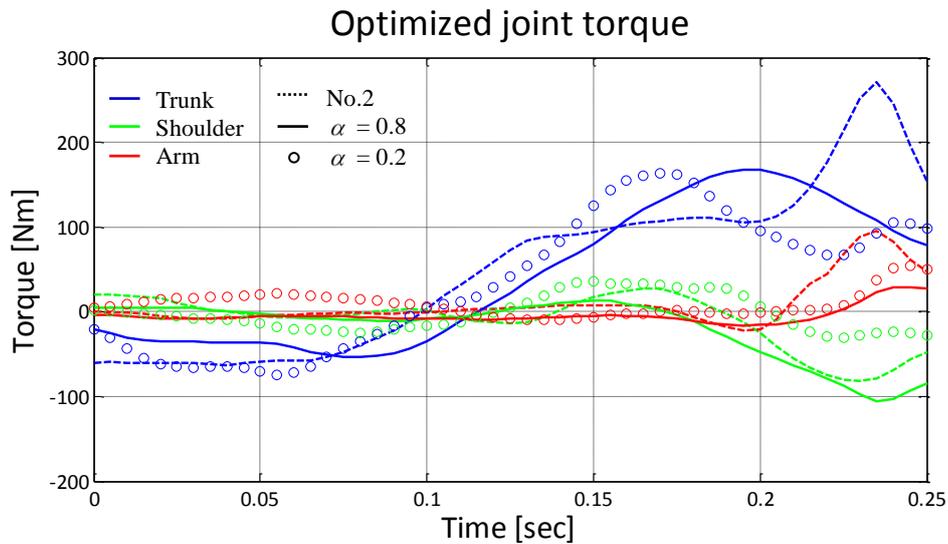


Fig. 5-7 Optimized joint torque from Top to Impact.

#### 5.4.4 実証実験

解析結果の妥当性を検証するため実証実験を行った。計測条件は下記の通りであった。

##### 【計測条件】

[被検者] (5.2.1 と同一の被検者)

- ・男子アマチュアゴルファー(上級者) ; 1名  
(年齢 ; 49歳, 身長 ; 170cm, 体重 ; 70kg,  
経験年数 ; 22年, ハンディキャップ ; 9)

[クラブ]

- ・長さ ; 45.5inch
- ・ヘッド ; Talormade 社製 R11 Loft9.5°  
(重量 ; 196 g, ロフト角 ; 9.5 deg, フェース角 ; 0 deg, 重心距離 ; 35 mm,  
重心深度 ; 35 mm, 重心高 ; 20 mm)
- ・シャフト ; コントロールシャフトとしてトライアルシャフトのうち No.2,  
 $\alpha = 0.8$  にて最適化されたシャフトの 2 種
- ・グリップ ; ゴルフプライド社製ツアーベルベット  
(重量 ; 50g, サイズ ; M60)

[プロトコル]

- ・十分なウォーミングアップを行う
- ・コントロールシャフトにて 10 球の試技を行う

- ・下記の教示を行う

「体幹のねじりトルクのピークをより早い段階でかつ少ない量で発揮し、肩関節はより積極的に負のトルクを発揮し、肘関節の回転はあまり使わないようにする」

- ・  $\alpha = 0.8$  で最適化されたシャフトにて 10 球の試技を行う
- ・ Trackman 社製弾道計測器「Trackman3.0」を用いて、ボールの弾道データおよびヘッドの運動データを取得する

ここで、教示を行った理由を述べる。第 2 章～第 4 章までは、確認試験では高々 3～5 球であったため、シャフトを変えた際の自然なスイング変化によって単発の試行においてはパフォーマンスが向上した。しかし、本章では再現性を評価するために 10 球ずつの比較とした。この際、ゴルフスイングの特徴として、しばらくすると(3～5 球打つと)また元のシャフトで行っていたスイングに戻るといった性質がある。その後、トレーニングを積むことで初期の自然なスイング変化へ近づいていき適正な結果が得られるようになる。しかしながら本研究においては十分なトレーニング期間を設けることができなかつたため、上記のように教示することでトレーニングの代替とした。

Table 5-5 に各種実験値と解析値の一部を示す。まずクラブスピードに着目する。解析値として期待される 2.2 m/s のクラブスピード増加に対して、実測値は 0.9 m/s 増であった。一見小さい変化のように感じられるが、ゴルフにおけるクラブスピードの 0.9 m/s の改善は決して小さな値ではないものと考えられる。このクラブスピードの増加によって飛距離は約 8 yds 増大した。次に再現性と身体負荷量に着目する。再現性は左右の着弾点における標準偏差とした。身体負荷量の 7 % 減によって、再現性は左右方向で 16 yds 改善された。弾道測定結果を Fig. 5-8 に示す。このように、身体負荷量は再現性の指標として有効に機能するものと考えられる。

Table 5-5 Verification results.

Shaft ID.	Experimental data			Analytical data	
	Distance [yds]	Club speed [m/s]	Dispersion [yds]	Club speed [m/s]	Body burden
No.2	274	48.3	±28	49.1	68.2
$\alpha = 0.8$	282	49.2	±12	51.3	63.7

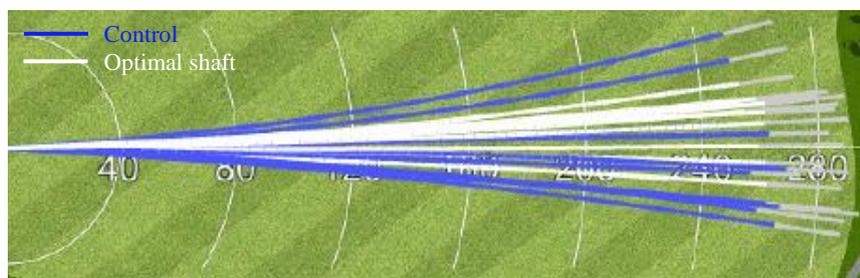


Fig. 5-8 Overhead view of trajectory.

## 5.5 結言

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た。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た。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した。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た。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が得られた。

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。コントロールシャフトと比較して、飛距離にして平均 8yds, 再現性にして平均 16yds 改善された。

しかしながら、本手法では全身動作の計測が必要なため実験負荷が高く、被検者は1名のみに残っている。そのため、身体負荷量と再現性の関連は被検者数を増やして確認する必要がある。今後は、一企業だけでなくモーションキャプチャを常備する研究機関との連携や、より簡易な全身動作計測手法の開発が望まれる。一方、用具と身体動作の同時最適化はゴルフに限らず、あらゆるスポーツにおいて応用可能な考え方に思われる。



## 第 6 章 結 論

## 6. 結論

～本研究のまとめ～

スポーツ用具は、個人の身体特性やスキルに応じて個別に設計されることが求められる。競技のパフォーマンスを最大化するためである。個別設計の多くの場合、設計者や選手の主観に頼ることになる。しかしながら、設計者や選手の力量によっては最適な設計に辿り着くことが難しく、トライアンドエラーの繰り返しによって設計に多大な時間を要する。そこで本研究では、数理的なアプローチを用いることで科学的・客観的に各個人に最適なゴルフシャフトを設計することを試みた。

第1章では、スポーツ科学の発展を概観し、スポーツ用具が技術開発の重要なドライビングフォースとなっていることを述べた。例えば、1970年代、CFRPをいち早く取り入れた分野は航空宇宙用途や軍用途であったが、その拡大はスポーツ用途が担ってきた。さらに、スポーツ用途ならではの課題として各選手に応じた個別の最適設計がある。本研究では、この個別最適設計に焦点を当てたが、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個別設計が重要視されているため、他分野への適用可能性も視野に入れたテーマ選定とした。

そこで本研究の目的は、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客観的な設計手法を確立することとした。

第2章では、その具体的手段として、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、最適な設計を見つけることを試みた。ゴルフスイングの計測手法も同時に構築した。有限要素法では陽解法と陰解法、それぞれの有限要素モデルを作成し、その計算時間と精度を比較した。計算時間、精度の両面から陰解法を選択し、繰り返し計算を行い網羅的に全てのシャフト特性にて繰り返し計算を行うことを考えたが、全体の総計算時間の観点から実用的ではない。そこで、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た。

構築した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に成功した。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いことも明らかとなった。

Fig 6-1 に、第2章の手法を一般化したフローチャートを示す。使用する用具によってインプットとなる動作データが変化しない問題に対して、有効に機能するものと思われる。人間が絡まない問題が好ましい。

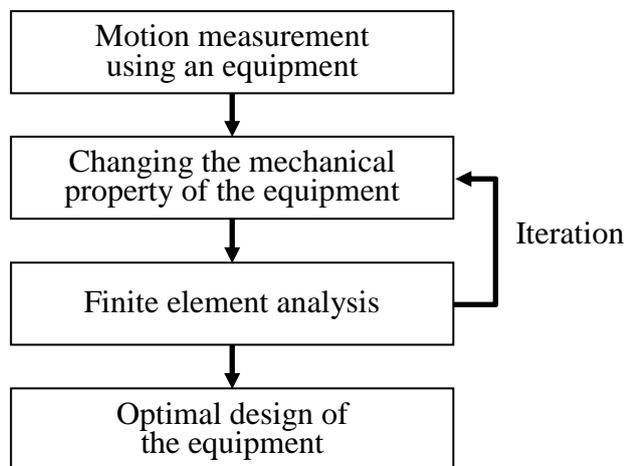


Fig. 6-1 Generalized flowchart of Chapter 2.

第3章では、前章で良好な解が得られた女子プロゴルファーと、十分な精度の解が得られなかったプレイヤーとの差について考察し、その解決を試みた。この両者の差は、シャフトの性能差によってスイングが変化しやすいか否かである、という仮説を立てた。すなわち、良好な解が得られた女子プロゴルファーは異なる特性のシャフトを使用してもスイングが常に一定であり、男子プロゴルファーとアマチュアゴルファーはスイングをシャフトによって変化させている、というものである。この仮説を証明するため、ゴルフスイングロボット試験、プレイヤー試験、シミュレーション結果を比較した。その結果、ゴルフスイングロボットとシミュレーションの結果は概ね一致していること、プレイヤーとシミュレーション結果には人によって乖離があることが明らかとなり、前記仮説が支持された。そして、プレイヤーはシャフトによってスイングを変化させる、という前提に立ち、その場合でもプレイヤーごとに最適設計ができるような手法を開発することを試みた。

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した。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した。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達成し得るシャフトを導き出した。また、この手法を用いることで、上記のシミュレーションと実測のギャップも解消されることを確認した。

一般的なアマチュアゴルファー用のシャフト市場では、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、その精度確認を行った。結果として、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それぞれ平均 7 yds ずつ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った。

Fig. 6-2 に、第 2 章と同じく第 3 章のフローチャートを一般化したものを記載した。用具によって動作が異なる問題に適用できる。ゴルフに限らず人間が用具を用いる場合は多くがこのケースに当てはまるだろう。

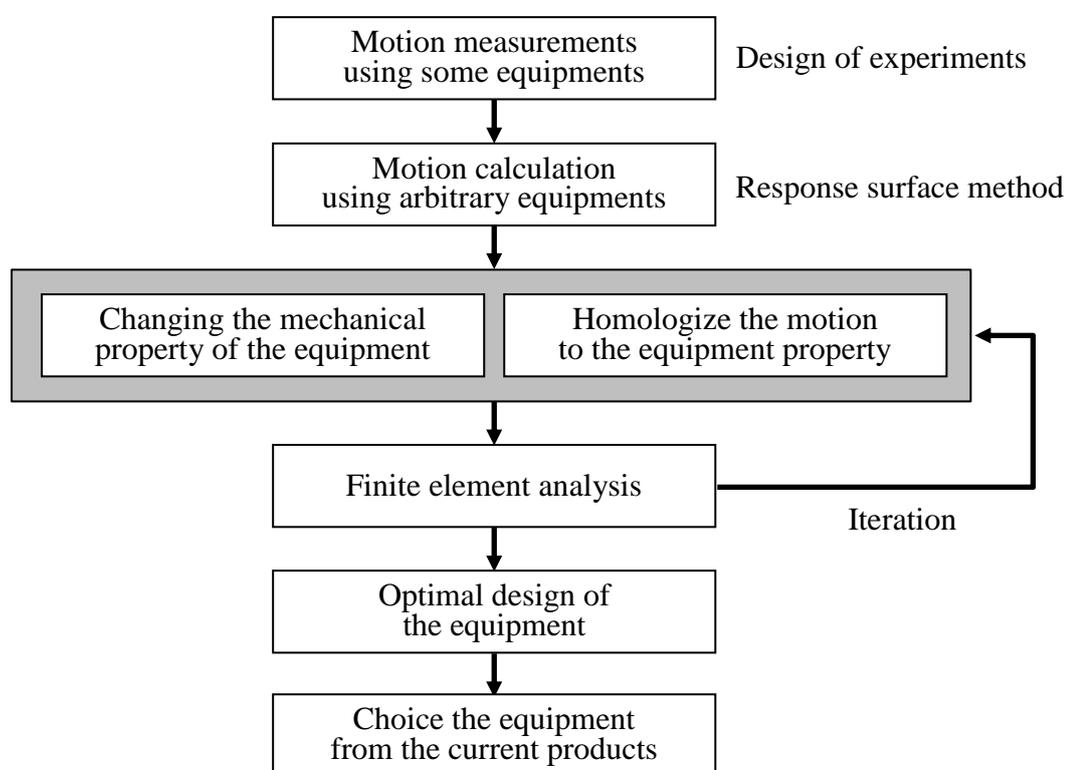


Fig. 6-2 Generalized flowchart of Chapter 3.

第 4 章では、第 3 章では解決しきれなかった課題に挑んだ。すなわち、初級者においてはトライアル用シャフト 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ったことである。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削減することを目指した。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、安定性を補う考えである。

本章の前提として、「ある 1 本の基準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」という立場に立った。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ため、これらの中上級者のデータを用いて次のようにして初級者のデータを予測した。

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した。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特定した。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た。その後、基準シャフトを3本としてその予測精度が最大となるように、予測式の重み係数を最適化した。最後に、基準シャフト3本の実測データと、6本の予測データの計9本のスイングデータを用いて、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った。

初級者10名を被検者として確認試験を行った結果、初級者の場合は9本の実測データを用いるよりも、3本の実測データと6本の予測データを用いることで、最適設計の精度を向上できることが明らかとなった。定量的には、10名の平均値で飛距離13yds、方向性15ydsが改善された。

Fig. 6-3に、第4章の一般化フローチャートを示す。多くのデータが集まる問題であれば、本章のように予測データを用いることで計測を簡略化できる。ゴルフシャフトでは初級者のスイングのバラつき問題を補い、第3章の手法に繋げるために予測データを用いたが、応用としてはこれに限らない。

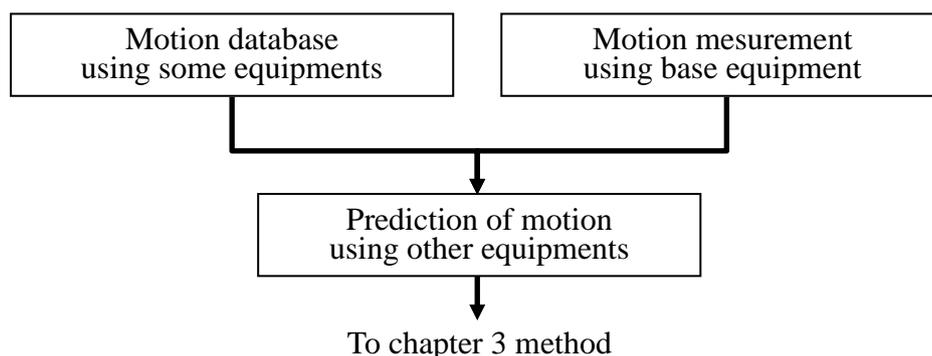


Fig. 6-3 Generalized flowchart of Chapter 4.

第5章では、再現性にフォーカスした。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。

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た。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た。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した。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た。クラブスピードと身体負荷量はトレードオフの関係にあるため、これらを多目的最適化問題として定式化を行った。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が得られた。

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。コントロールシャフトと比較して、飛距離にして平均 8yds, 再現性にして平均 16yds 改善された。

Fig. 6-4 に、フローチャートを示す。パフォーマンスと身体負荷の両立に応用できるものと考えられる。

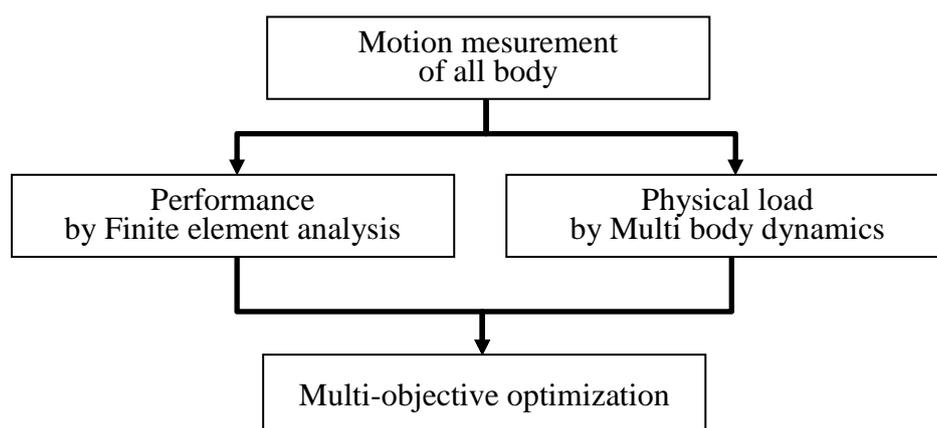


Fig. 6-4 Generalized flowchart of Chapter 5.

また、本研究で得られた第2章～第4章の知見をもとにシャフト選定システムを開発し、実用化した。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。そこで得られたデータから、さらなるブラッシュアップを行う予定である。

以上述べてきたように、本研究では実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と考えている。本研究の成果が、今後多くの分野に活用されていくことを期待する。



## 引用文献

- [1] Harris, H. A. (1972). *Sport in Greece and Rome*, Vol. 16. Cornell University Press.
- [2] Crowther, N. B. (1983). Greek Games in Republican Rome. *L'Antiquité classique*, 52, 268-273.
- [3] 岸野雄三(1974). スポーツ科学とスポーツ史, 体育学研究, 19(4-5), 167-174.
- [4] Chatard, J. C., Senegas, X., Selles, M., Dreanot, P., & Geysant, A., (1995). Wet suit effect: a comparison between competitive swimmers and triathletes. *Medicine and science in sports and exercise*, 27(4), 580-586.
- [5] Chatard J. C., Wilson B, (2017). Effect of Fastskin Suits on Performance, Drag, and Energy Cost of Swimming, *Med. Sci. Sports Exerc.*41, 1149-1154.
- [6] Hambrick, M. E., Hums, M. A., Bower, G. G., & Wolff, E. A. (2015). Examining elite parasport athletes with sport involvement and sports equipment. *Adapted physical activity quarterly*, 32(1), 1-18.
- [7] Perret, C. (2017). Elite-adapted wheelchair sports performance: a systematic review. *Disability and rehabilitation*, 39(2), 164-172.
- [8] Janta, M., Ebert, C., & Senner, V. (2012). Functionality and performance of customized sole inlays for various sports applications. *Procedia Engineering*, 34, 290-294.
- [9] Gerrits, A., Jones, C. L., & Valero, R. (2006). Custom-fit: quality of life of european sporting public through custom-fit products. *The Engineering of Sport* 6, 5-10.
- [10] 三木光範, 福田武人, 元木信弥, & 方丈正樹(1997). 複合材料, 産業図書.
- [11] 炭素繊維協会, 炭素繊維の特徴とその性質,  
<http://www.carbonfiber.gr.jp/material/feature.html>., (2017年2月アクセス).
- [12] 京都大学ニュースリリース,  
[http://www.kyoto-u.ac.jp/notice/05\\_news/documents/050413\\_2.htm](http://www.kyoto-u.ac.jp/notice/05_news/documents/050413_2.htm)., (2017年9月アクセス).
- [13] 三菱ケミカルウェブサイト,  
[https://www.m-chemical.co.jp/products/departments/mcc/cfc/product/1200531\\_7304.html](https://www.m-chemical.co.jp/products/departments/mcc/cfc/product/1200531_7304.html)., (2017年9月アクセス).
- [14] 福田博, 邊吾一(1989). 複合材料の力学序説, 古今書院.
- [15] 炭素繊維協会, 第24回複合材料セミナー資料, PAN系炭素繊維の現状と将来,

<http://www.carbonfiber.gr.jp/tech/seminar.html>., (2017年2月アクセス).

- [16] 科学技術動向, テーラーメイド医療の進展と現状～国民への情報提供システムの重要性, <http://data.nistep.go.jp/dspace/handle/11035/1625>, (2017年2月アクセス).
- [17] 植村政彦(1992). 複合材料の歴史－釣竿から自動車まで－, 繊維学会誌 vol48, No.12, 636-642.
- [18] 富士経済レポート(2017). 炭素繊維複合材料関連技術・用途市場の展望.
- [19] 矢野経済研究所, 2016年5月31日プレスリリース., スポーツ用品市場に関する調査, <https://www.yano.co.jp/press/index.php>, (2017年2月アクセス)
- [20] Trackman baseball ホームページ, <https://baseball.trackman.com/>, (2017年2月アクセス).
- [21] 月刊ゴルフマネジメント, 2011年3月号., ゴルフの歴史とこれからの課題 ゴルフ発祥と発達の歴史, [http://www.jsgca.com/05\\_column/gm2011-03.html](http://www.jsgca.com/05_column/gm2011-03.html), (2017年2月アクセス).
- [22] 蛭田正臣, & 江崎裕志(1997). ゴルフクラブヘッド, ブリヂストン株式会社, 特許第 3220954 号, 2001年8月17日登録.
- [23] 鵜野澤晶(1999). ゴルフシャフト, 株式会社マミヤ・オーピー, 特許第 4382206 号, 2009年10月2日登録
- [24] R&A 公式ホームページ, <http://www.randa.org/TheRandA/Working-for-Golf/RandA-News>, (2017年2月アクセス).
- [25] 伊吹努, 渥美哲也, 昇浩明, & 滝口郁朗(2001). ゴルフクラブ用シャフト, 三菱レイヨン株式会社, 特許第 4402784 号, 2009年11月6日登録.
- [26] 平宇勉, & 多羅尾俊之(2007). ゴルフボール, 株式会社ダンロップスポーツ, 特許第 5258265 号, 2013年5月2日登録.
- [27] 下野智史, 木川弘康, 伊吹努, & 金子崇(2009). ゴルフクラブ用シャフト及びゴルフクラブ, 三菱レイヨン株式会社., 特許第 5302799 号, 2013年6月28日登録.
- [28] 下野智史, & 金子崇(2013). ゴルフクラブ用シャフト, 三菱レイヨン株式会社, 特許第 5633654 号, 2014年10月24日登録.
- [29] 畔上道雄(1981). ゴルフの科学, ブルーバックス.

- [30] The Royal and Ancient Golf Club of Saint Andrews, United States Golf Association, Rules of Golf.
- [31] Williams, K. R., & Sih, B. L. (2002). Changes in golf clubface orientation following impact with the ball. *Sports Engineering*, 5(2), 65-80.
- [32] Arakawa, K., Mada, T., Komatsu, H., Shimizu, T., Satou, M., Takehara, K., & Etoh, G. (2006). Dynamic contact behavior of a golf ball during an oblique impact. *Experimental mechanics*, 46(6), 691-697.
- [33] Martin, J. J. (2012). Evaluation of Doppler Radar Ball Tracking and Its Experimental Uses (Doctoral dissertation, Washington State University).
- [34] Nathan, A. M. (2017). Analysis of Baseball Trajectories.
- [35] Egret, C. I., Vincent, O., Weber, J., Dujardin, F. H., & Chollet, D. (2003). Analysis of 3D kinematics concerning three different clubs in golf swing. *International journal of sports medicine*, 24(06), 465-470.
- [36] Myers, J., Lephart, S., Tsai, Y. S., Sell, T., Smoliga, J., & Jolly, J. (2008). The role of upper torso and pelvis rotation in driving performance during the golf swing. *Journal of sports sciences*, 26(2), 181-188.
- [37] Horan, S. A., Evans, K., & Kavanagh, J. J. (2011). Movement variability in the golf swing of male and female skilled golfers. *Medicine and science in sports and exercise*, 43(8), 1474-1483.
- [38] 仰木裕嗣, 馬場敏之, & 坂口勇夫(2004). 加速度センサと映像を併用したゴルフスイングフォーム診断装置の開発. In *ジョイント・シンポジウム講演論文集: スポーツ工学シンポジウム: シンポジウム: ヒューマン・ダイナミクス 2004*, 177-181.
- [39] 太田憲, 仰木裕嗣, & 澁谷和宏(2012). ゴルフスイングにおける内力を利用したエネルギー伝達. *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講演論文集*, 293-298.
- [40] Ruffaldi, E., Peppoloni, L., & Filippeschi, A. (2015). Sensor fusion for complex articulated body tracking applied in rowing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 229(2), 92-102.
- [41] Fasel, B., Spörri, J., Kröll, J., Müller, E., & Aminian, K. (2016). Using inertial sensors for reconstructing 3D full-body movement in sports-possibilities and limitations on the example of alpine ski racing, *ISBS-Conference Proceedings Archive*, 33(1).
- [42] Pons-Moll, G., Baak, A., Helten, T., Müller, M., Seidel, H. P., & Rosenhahn, B.

- (2010). Multisensor-fusion for 3d full-body human motion capture. In *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2010 IEEE Conference on IEEE*. 663-670
- [43] 松本金矢, 座古勝, & 松本紀生(2000). カップリング特性を考慮した CFRP ゴルフクラブシャフトの振動解析. *日本機械学会論文集 C 編*, 66(652), 3855-3859.
- [44] 井上喜雄, 甲斐義弘, & 谷岡哲也(2000). ゴルフスイングの動力学に関する一考察: シャフト弾性とリスト部の境界条件. In *ジョイント・シンポジウム講演論文集: スポーツ工学シンポジウム: シンポジウム: ヒューマン・ダイナミックス*, 63-67.
- [45] 岩壺卓三, 河村庄造, 河瀬陽敬, & 大貫正秀(2001). スイングによるゴルフクラブのねじり振動解析, In *ジョイント・シンポジウム講演論文集: スポーツ工学シンポジウム: シンポジウム: ヒューマン・ダイナミックス*, 121-125.
- [46] Matsumoto, K., Tsujiuchi, N., Koizumi, T., Ito, A., Ueda, M., & Okazaki, K. (2016). The Influence of a Golf Club's Inertia on Shaft Movement During the Golfer's Swing. *Procedia Engineering*, 147, 360-365.
- [47] Cooke, A. (2002). Computer simulation of shuttlecock trajectories. *Sports Engineering*, 5(2), 93-105.
- [48] Cho, J. R., Park, S. B., Ryu, S. H., Kim, S. H., & Lee, S. B. (2009). Landing impact analysis of sports shoes using 3-D coupled foot-shoe finite element model. *Journal of mechanical science and technology*, 23(10), 2583-2591.
- [49] Allen, T., Hart, J., Spurr, J., Haake, S., & Goodwill, S. (2010). Validated dynamic analysis of real sports equipment using finite element; a case study using tennis rackets. *Procedia engineering*, 2(2), 3275-3280.
- [50] Nakai, K., Wu, Z., Sogabe, Y., & Arimitsu, Y. (2004). A study of thickness optimization of golf club heads to maximize release velocity of balls. *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering*, 20(10), 747-755.
- [51] Petersen, W., & McPhee, J. (2009). Shape optimization of golf clubface using finite element impact models. *Sports Engineering*, 12(2), 77-85.
- [52] Wu, Z., Tamaoki, T., Sogabe, Y., & Arimitsu, Y. (2017). Design Optimization of Golf Clubhead and Ball with Numerical Analysis. *Global Journal of Research In Engineering*.
- [53] Khajah, T., & Hou, G. (2015). Parameter identification for vertical ground reaction forces on feet while running. *Sports Engineering*, 18(4), 217-226.
- [54] Seo, K., Nihei, Y., Shimano, T., Watanabe, R., & Ohgi, Y. (2015). Optimizing the design of the landing slope of the Zao jumping hill. In *3rd International Congress on Sport Sciences Research and Technology Support, icSPORTS 2015*. SciTePress.

- [55] Stier, B., Bednarczyk, B. A., Böddeker, T., Springmann, R., Simon, J. W., & Reese, S. (2015). Analysis, manufacturing, testing, and structural optimization of a novel composite kiteboard design. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 229(4), 248-265.
- [56] Kaufmann, J. (2015). New Materials for Sports Equipment Made of Anisotropic Fiber-reinforced Plastics with Stiffness Related Coupling Effect. *Procedia Engineering*, 112, 140-145.
- [57] 岩壺卓三, 小西暢樹, & 山口哲男(1990). 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*, 56(529), 2386-2392.
- [58] 大屋敷由香, 富永潤, 大倉健, & 弘元修司(2012). ゴルフスイングの動力学モデルに関する研究: 第二報: シャフト設計パラメータの飛びへの影響, In シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集, 287-292.
- [59] Joyce, C., Chivers, P., Sato, K., & Burnett, A. (2016A). Multi-segment trunk models used to investigate the crunch factor in golf and their relationship with selected swing and launch parameters. *Journal of sports sciences*, 34(20), 1970-1975.
- [60] Takagi, T., Yokozawa, T., Inaba, Y., Matsuda, Y., & Shiraki, H. (2017). Relationships between clubshaft motions and clubface orientation during the golf swing. *Sports Biomechanics*, 1-12.
- [61] Belling, P. K., Sada, J., & Ward, P. (2015). Assessing hitting skill in baseball using simulated and representative tasks.
- [62] Oberegger, U. F., Kaps, P., Mössner, M., Heinrich, D., & Nachbauer, W. (2010). Simulation of turns with a 3D skier model. *Procedia Engineering*, 2(2), 3171-3177.
- [63] Minetti, A. E. (2011). Bioenergetics and biomechanics of cycling: the role of 'internal work'. *European journal of applied physiology*, 111(3), 323-329.
- [64] Joyce, C., Burnett, A., Cochrane, J., & Reyes, A. (2016B). A preliminary investigation of trunk and wrist kinematics when using drivers with different shaft properties. *Sports biomechanics*, 15(1), 61-75.
- [65] MacKenzie, S. J., & Boucher, D. E. (2017). The influence of golf shaft stiffness on grip and clubhead kinematics. *Journal of sports sciences*, 35(2), 105-111.
- [66] MacKenzie, S. J., & Sprigings, E. J. (2009). Understanding the role of shaft stiffness in the golf swing. *Sports engineering*, 12(1), 13-19.
- [67] Balzerson, D., Banerjee, J., & McPhee, J. (2016). A three-dimensional forward dynamic model of the golf swing optimized for ball carry distance. *Sports Engineering*, 19(4), 237-250.
- [68] 小池関也, & 橋口友洋(2012). ラケットシャフト部の変形を考慮したバドミン

トン・スマッシュ動作の動力的分析: ラケットの慣性パラメータがスイング動作に及ぼす影響. In シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集, 305-310).

- [69] Yap, Y. L., & Yeong, W. Y. (2014). Lifestyle product via 3D printing: wearable fashion.
- [70] Colonna, M., Pazi, N., Moncalero, M., Gioia, C., De Bon, F., Giovanelli, D., & Farella, E. (2017). Thermo-formation process of plastic shells for winter sport boots for improved comfort. *Sports Engineering*, 1-8.
- [71] Eberle, R., Heinrich, D., Kaps, P., Oberguggenberger, M., & Nachbauer, W. (2017). Effect of ski boot rear stiffness (SBRS) on maximal ACL force during injury prone landing movements in alpine ski racing: A study with a musculoskeletal simulation model. *Journal of sports sciences*, 35(12), 1125-1133.
- [72] Usma-Alvarez, C. C., Fuss, F. K., & Subic, A. (2014). User-centered design customization of rugby wheelchairs based on the Taguchi method. *Journal of Mechanical Design*, 136(4), 041001.
- [73] 瀬尾和哉, 高岡夏南, & 下山幸治(2014). 円盤投のスキルと円盤サイズの同時最適化. 最適化シンポジウム OPTIS, 11, 4.
- [74] 平井隆之, 岩壺卓三, 長谷川宏, & 大貫正秀(2009). 安定性の良いパタークラブの推定に関する研究. 日本機械学会ジョイント・シンポジウム講演論文集: スポーツ工学シンポジウム: シンポジウム: ヒューマン・ダイナミクス, 7-12.
- [75] Whiteside, D., Elliott, B. C., Lay, B., & Reid, M. (2015). Coordination and variability in the elite female tennis serve. *Journal of sports sciences*, 33(7), 675-686.
- [76] Ae, K., & Koike, S. (2016). Kinetic analysis of the upper limbs in baseball tee-batting under low hitting point height condition, In *ISBS-Conference Proceedings Archive*, 33(1).
- [77] 前田時生(2017). フォースプレートを用いない動力学歩行解析方法の提案と精度検証. In *理学療法学 Supplement*,44(2), 0849.
- [78] Fry, A. C., Herda, T. J., Sterczala, A. J., Cooper, M. A., & Andre, M. J. (2016). Validation of a motion capture system for deriving accurate ground reaction forces without a force plate. *Big Data Analytics*, 1(1), 11.
- [79] 戸川隼人(1994). 変分法と有限要素法, 日本評論社.
- [80] 春海佳三郎, & 大槻明(1990). 有限要素法入門, 日本評論社.
- [81] 東町高尾(1993). 有限要素法のノウハウ, 森北出版株式会社.

- [82] 鳴尾丈司, & 溝田武人(2004). ゴルフボールの空気力測定と 3 次元飛翔軌道解析. 日本流体力学会誌 「ながれ」, 23(3), 203-211.
- [83] 大貫正秀, & 金炯哲(2011). ゴルフボールのスピンの及ぼすボール構造の影響. In シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集, 430-434.
- [84] 岩壺卓三, 河村庄造, 古市一志, & 山口哲男(2001). 高反発特性を有するゴルフクラブヘッドの設計に関する研究: 機械力学, 計測, 自動制御. 日本機械学会論文集 C 編, 67(656), 922-928.
- [85] 君塚渉, & 大貫正秀(2012). ゴルフクラブヘッドの重心位置がシャフト挙動に及ぼす影響. In シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集, 510-514.
- [86] 穂苺真樹, 土岐仁, & 永作清(2004). ゴルフドライバースイングにおけるコック運動計測. In ジョイント・シンポジウム講演論文集: スポーツ工学シンポジウム: シンポジウム: ヒューマン・ダイナミクス, 173-176.
- [87] 星野直人, & 関庸一(2007). Excel で学ぶ理論と技術 実験計画法入門, ソフトバンククリエイティブ.
- [88] 大村平(2013). 実験計画と分散分析のはなし(改訂版), 日科技連.
- [89] 下山幸治, 鄭信圭, & 大林茂(2012). 多目的最適化における Kriging 応答曲面法のためのサンプル追加指標の比較. 進化計算学会論文誌, 3(3), 173-184.
- [90] 北山哲士, 荒川雅生, & 山崎光悦(2010). RBF ネットワークによる逐次近似最適化: サンプル関数の基礎的検討 (機械力学, 計測, 自動制御). 日本機械学会論文集 C 編, 76(768), 1978-1987.
- [91] 荒川雅生, 中山弘隆, & 石川浩(2001). ラディアルベシス関数ネットワークと領域適応型遺伝的アルゴリズムを用いた最適設計 (第 1 報, 制約条件のない場合における検討). 日本機械学会論文集 C 編, 67(655), 789-796.
- [92] 小野地柊, & 竹田唯史(2015). 初心者対象としたゴルフ指導に関する研究 (09 体育方法, 一般研究発表, 2020 東京オリンピック・パラリンピックと体育・スポーツ科学研究). In 日本体育学会大会予稿集, 66, 293.
- [93] Kohonen.T. (1995). Self organizing maps, Springer.
- [94] 仲濱正大, 納富一宏, 斎藤恵一, & 外山比南子(2013). 自己組織化マップを用いた在院日数予測と評価. In バイオメディカル・ファジィ・システム学会大会講演論文集, 26, 85-88.

- [95] Vesanto, J., & Alhoniemi, E. (2000). Clustering of the self-organizing map. *IEEE Transactions on neural networks*, 11(3), 586-600.
- [96] Ananthakrishna, T., Shama, K., & Niranjana, U. C. (2004). K-Means nearest neighbor classifier for voice pathology. In *India Annual Conference, Proceedings of the IEEE INDICON*, 352-354.
- [97] Akaike, H. (1998). Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In *Selected Papers of Hirotugu Akaike*. Springer New York. 199-213.
- [98] 阿江通良, 湯海鵬, & 横井孝志(1992). 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定. *バイオメカニズム*, 11, 23-33.



## 研究業績リスト

### (1) 学術雑誌等に発表した論文：

〔 掲載済 〕

- 1) 下野智史, 塩川満久, 高橋和文, 磨井祥夫, “ボールの回転軸に着目した直接フリーキックにおける 3 次元動作解析”, バイオメカニクス研究, Vol.11, No.1, 2007.
- 2) 下野智史, 児玉斎, 鈴木克幸, “プレイヤーのスイング特性に応じたゴルフシャフトの最適設計”, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.834(2016), DOI:10.1299 / transjsme.15-00294.
- 3) 下野智史, 児玉斎, 鈴木克幸, “シャフトの性能差によるスイング動作変化を考慮したゴルフクラブの最適設計” , 日本機械学会論文集, Vol.82, No.834(2016), DOI:10.1299 / transjsme.16-00210.
- 4) 下野智史, 児玉斎, 鈴木克幸, “飛距離と再現性を考慮したゴルフシャフトの多目的最適設計” , 日本計算工学会論文集, Vol.2017.

〔 投稿中 〕

- 5) S. Shimono, K. Suzuki, “Prediction of golf swing motion and optimal design for the shaft by self-organizing maps”, *Journal of the International Sports Engineering*.

### (2) 学術会議における発表：〔 ○：発表者 〕

- 1) ○大谷真史, 塩坪捷矢, 下野智史, 鈴木克幸, “自己組織化マップを用いたユーザレベルに応じたゴルフクラブの最適設計”, シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2014, (2014-10).
- 2) ○下野智史, 児玉斎, 鈴木克幸, “応答局面法を用いた最適ゴルフシャフト選定システムの開発”, シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2015, (2015-11).
- 3) ○S. Shimono, H. Kodama, and K. Suzuki, “Fitting System of Optimal Golf Shaft with Response Surface Method”, *Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2016*, (2016-5).
- 4) S. Kawauchi, S. Yoshino, S. Shimono, and ○K. Suzuki, “Selection of sampling points and response surface generation for periodic design variable in optimal design of CFRP products”, *Asian Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization 2016*, (2016-5).
- 5) ○下野智史, 磯部信, 児玉斎, 鈴木克幸, “飛距離と再現性を考慮したゴルフシャフトの多目的最適設計”, シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2016, (2016-11).

- 6) 芳野修一, 下野智史, ○畑中峻志, 鈴木克幸, “ゴルフクラブ最適設計のためのシステム同定に基づくスイング予測”, シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2017, (2017-11).

[ 発表予定 ]

- 7) ○S. Shimono, S. Yoshino, and K. Suzuki, “Prediction of golf swing motion and optimal design for the shaft by self-organizing maps”, International Sports Engineering Association. (2018-3)

### (3) その他 :

[ 招待講演 ]

- 1) ○下野智史, “最適ゴルフシャフト選定システムの開発”, 平成 28 年度広島体育学会(2016-11).

[ 著書 ]

- 2) 下野智史, “スポーツバイオ科学と先進スポーツギアの開発”, シーエムシー出版(第三編, 第 8 章, ‘ユーザーのスイング特性に応じた最適なゴルフシャフトの決定’ を執筆)(2015-10)

### (4) 特許 :

- 1) エムアールシーコンポジットプロダクツ株式会社, 下野智史, 木川弘康, 伊吹努, 金子崇, “ゴルフクラブ用シャフト及びゴルフクラブ”, 特開 2011-15830, 登録済み
- 2) 三菱レイヨン株式会社, 児玉斉, 鈴木克幸, 下野智史, “ゴルフ用具フィッティングシステム, 及びゴルフ用具フィッティングプログラム”, WO2014/132885, 登録済み(登録国: JP, US, EP, KR, CN)
- 3) 三菱ケミカル株式会社, 下野智史, 鈴木克幸, “ゴルフ用具フィッティングシステム, ゴルフ用具フィッティング方法, ゴルフ用具フィッティングプログラム, ゴルフスイング分類方法, ゴルフシャフトフィッティングシステム, ゴルフシャフトフィッティング方法, 及びゴルフシャフトフィッティングプログラム”, WO2016/185894, 出願中(出願国: JP, US, EP, KR, CN)

以上

## 謝辞

本研究は、東京大学人工物工学研究センターと株式会社 MRC コンポジットプロダクツで実施した「ゴルフスイングのシミュレーションおよびクラブの最適化手法の研究」の共同研究の一部になります。本共同研究に関わって頂いた全ての方々に感謝申し上げます。

本論文の主査を引き受けて頂いた東京大学人工物工学研究センター 教授 鈴木克幸先生には、研究のいろはや進め方等の基本はもちろんのこと、一見解決することが不可能に思える課題でも様々な角度からアプローチすることで突破口を見出すことができる、ということを教えて頂きました。本研究を通じて、前人未到の領域に挑むやりがい、それを成し遂げたときの達成感、そして研究の面白さを実感することができました。単に知識を得るだけではなく、いかにその知識を使うか、また実社会で有用な研究とするかを、鋭いご洞察と的確なご指摘によって温かくご指導いただきました。今後、私自身も鈴木先生を見習い、深い知識を習得する努力を怠らず、それを活用して新しいことにチャレンジし続けたいと思います。ここに最大限の感謝の意を表します。

また、本論文の審査を引き受けて頂いた東京大学人工物工学研究センター 教授 栗山幸久先生、東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻 准教授 白山晋先生、同准教授山田知典先生、東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻 准教授 福崎千穂先生には、学術論文としてあるべき構成や研究者として持つべき俯瞰的な視点等、私に不足している点を的確にアドバイス頂きました。皆様のご助言なしには、論文として残せるような形にはできていなかったと思います。ここに、感謝の意を表します。

職場の大先輩にあたる、当時 MRC コンポジットプロダクツ株式会社の児玉齊氏には、企業という枠にとらわれない大胆な発想と、異なる分野の専門性を結び付けることの重要性を教えて頂きました。私の企業内研究者としての最初の上司であり、共に研究を進める仲間でもあり、本研究成果に対しても多大なる助言を頂きました。また、私自身が本研究に携わるきっかけを与えてくださった方でもあり、いくら感謝しても足りないと感じています。この場をお借りして厚く御礼申し上げます。

三菱ケミカル株式会社の金子崇氏、渥美哲也氏には、利益に厳しい職場環境にも関わらず自由に研究ができる土壌を作って頂きました。また、研究内容を実用化する際には数多くの困難を共に乗り越えた戦友とも呼ぶべき存在です。新しいことを始めるには、時に既存のステークホルダーとの衝突は避けられませんが、常に私の意図を組んで社内の説得にあたってくれました。両氏の支援なしにはこの研究を完

成させることは叶わなかったものと感じています。改めて深く感謝致します。

鈴木研の優秀な学生諸君は、誰一人として本研究の推進に欠かせない存在でした。研究の迷路にはまり一緒に迷うことも多々ありましたが、活発な議論や柔軟な発想には非常に刺激を受けました。社会に出てからもその能力を遺憾なく発揮し、ますますご活躍されることを心よりお祈り申し上げます。

被検者として参加してくださった述べ196名の方々には、厳しい要求にも関わらず快く実験に参加して頂きました。本研究内容に興味を持って頂けたことを非常にうれしく思います。これだけ多くの方と知り合いになれたことは、今後の私の人生における大切な財産となっています。本当にありがとうございました。

最後に、妻に対して心より「ありがとう」という言葉を伝えたいと思います。社会人として働きながらもこの論文を仕上げることができたのは、休日が潰れることに対して、時には文句を言いながらも応援してくれた妻のおかげです。これまで支えてくれた分はこれからゆっくり埋め合わせしていこうと思います。