

ゴルフクラブの設計値とスイングエクササイズが
ゴルフスイング動作に与える影響に関する研究

2023年 3月

岡崎 弘祐

同志社大学大学院理工学研究科

目次

第1章 緒論	1
1.1 研究の背景.....	1
1.2 従来の研究と本研究の目的.....	3
1.3 本論文の構成.....	5
第2章 動作計測実験ならびに計測データの処理	7
2.1 計測実験環境.....	7
2.2 ゴルフクラブ挙動の計測に向けたマーカ配置.....	7
2.3 全身の動作計測に向けたマーカ配置.....	8
2.4 計測実験	9
2.5 ゴルフスイング局面の定義.....	10
2.6 グリップ座標系の構築.....	10
2.7 腕座標系の構築.....	11
2.8 各座標系における加速度, 角速度, 角加速度の算出.....	11
第3章 解析モデルの構築とデータ解析手法について	14
3.1 スイング中に発揮するトルクを算出する解析モデルの構築.....	14
3.1.1 ゴルフスイングモデルの作成.....	14
3.1.2 運動方程式による発揮トルクの算出.....	15
3.2 シャフトの弾性変形挙動を再現する解析モデルの構築.....	17
3.2.1 ゴルフクラブのモデル化.....	17
3.2.2 ゴルフクラブモデル要素における運動方程式.....	20
3.2.3 グリップの並進加速度がクラブヘッドに与える慣性トルクの考慮.....	21
3.2.4 プレーヤの把持状態を再現するグリップ把持モデルの構築.....	22
3.2.5 プレーヤの把持位置を再現したゴルフクラブの並進加速度の補正.....	23
3.2.6 シャフトの減衰を考慮したゴルフクラブの運動方程式の構築.....	23
3.3 短時間フーリエ変換による時間一周波数解析.....	24
3.4 連続ウェーブレット変換による時間一周波数解析.....	24
3.5 特異値分解を用いた特異スペクトル解析.....	25
3.5.1 軌道行列の生成.....	25
3.5.2 軌道行列の分解.....	26
3.5.3 波形の復元.....	26
第4章 シャフトの質量がプレーヤの発揮トルクに与える影響調査	27
4.1 諸言	27
4.2 スイング動作計測実験.....	27
4.3 スイング中に発揮したトルクの算出.....	29

4.4	短時間フーリエ変換による発揮トルクの時間一周波数解析	31
4.5	シャフトの質量増加によるスペクトログラムが最大値を示す時間の変化について	39
4.6	シャフトの質量増加によるスペクトログラムの最大値の変化について	44
4.7	スペクトログラムの最大値の周波数帯域の変化と先端速度との関係	46
4.8	結論	50
第5章 シャフトの調子の差がシャフトの変形挙動に与える影響調査		51
5.1	緒言	51
5.2	スイング動作計測実験	51
5.3	キックポイント変化によるスペクトログラムが最大値を示す時間の変化について	53
5.4	キックポイント変化によるスペクトログラムの最大値の変化について	57
5.5	シミュレーションモデルを用いたシャフトの変形挙動解析	59
5.6	短時間フーリエ変換を用いた変形挙動の差の抽出検討	61
5.7	変形挙動におけるスペクトログラム値が最大値を示す時間の変化について	63
5.8	変形挙動におけるスペクトログラム値の最大値の変化について	64
5.9	シャフトの変形挙動への特異値解析	66
5.10	キックポイント変化が各モードの変形挙動に与える影響	69
5.11	結論	72
第6章 シャフトの変形挙動とスイング動作の関連性調査		75
6.1	緒言	75
6.2	スイング動作計測実験	75
6.3	シミュレーションモデルを用いたシャフトの変形挙動算出	76
6.4	シャフトの変形挙動への特異値解析	78
6.5	スイング平面と第1モードの変形挙動の傾きの関係について	80
6.6	平面角度に対するグリップ姿勢の考慮	84
6.7	Impact 付近のシャフトの変形挙動の差の抽出	87
6.8	スイングの差の抽出に向けたウェーブレット変換	90
6.9	統計的手法によるスイングの差の抽出	96
6.10	結論	101
第7章 スイングエクササイズがゴルフスイング動作に与える影響について		104
7.1	緒言	104
7.2	本研究で行うスイングエクササイズ	104
7.2.1	スイングエクササイズ 1	105
7.2.2	スイングエクササイズ 2	105

7.2.3 スイングエクササイズ 3.....	106
7.3 ゴルフスイング動作とスイングエクササイズの計測実験.....	107
7.4 動作を評価するための人体モデルの構築.....	108
7.5 インストラクタの模範スイングエクササイズへの特異値分解.....	109
7.6 被験者のスイングエクササイズへの特異値分解と模範動作との比較.....	114
7.7 インストラクタの指導によるスイングエクササイズの改善確認.....	122
7.8 スイングエクササイズが初級者と中級者のゴルフスイング動作に与える影響について.....	127
7.9 スイングエクササイズが上級者のゴルフスイング動作に与える影響について..	140
7.10 結論.....	145
第8章 結論.....	147
参考文献.....	150
謝辞.....	156

第1章 緒論

1.1 研究の背景

スポーツの一種であるゴルフは、ハンディキャップ制を有するため老若男女問わずに競技を楽しめる特徴をもつ。ゴルフプレーヤの人口は500万人を超えているが、オリンピック競技に採用され、またCOVID-19の影響により屋外で行われるスポーツ人気の高まりもあり、新規ゴルフプレーヤの人口は増加している。また、スマートフォンの普及に伴い、プレーヤ自身のゴルフスイングを簡単に撮影し、ソーシャルネットワークサービスに投稿することが可能となり、スコアを競うだけでなくゴルフプレイを楽しみたいというプレーヤも増えている。スコアに加えゴルフプレイを楽しむためには、ドライバーと称されるウッド型ゴルフクラブによってゴルフボールを遠く、かつ正確に飛ばすことが重要となる。そのため、ゴルフボールを遠く、かつ正確に飛ばすことができる製品を開発するための研究が行われてきた。

ゴルフクラブは主に、ゴルフボールを打撃するクラブヘッド、プレーヤが把持するグリップ、グリップとクラブヘッドを繋ぐシャフトから構成されており、ゴルフクラブの性能向上のために様々な先行研究が報告されている。まず、クラブヘッドについて着目する。岩壺らの先行研究では、クラブヘッドとゴルフボールとの衝突のメカニズムを解析し、クラブヘッドの固有振動数をゴルフボールの固有振動数に一致させることで最大復元力が得られることを明らかにした⁽¹⁾。また、岩壺らはそれら機構をもつクラブヘッドの設計指針について報告し⁽²⁾、さらに、クラブヘッドの打撃面であるフェース部分とゴルフボールの打撃位置によって生じるスピン量をシミュレーションモデルによって解析することで、最適なクラブヘッド形状を理論的に設計する手法を提案している⁽³⁾。次に、グリップについて着目する。植田の先行研究では、プレーヤが把持した際の圧力と筋電信号を計測しゴルフボール打撃時の感覚の定量化を行い、グリップを把持することで打撃による衝撃がプレーヤに伝わることを明らかにした⁽⁴⁾。また、MacKenzieらの先行研究では、グリップの質量変化がゴルフボールの弾道に与える影響について明らかにした⁽⁵⁾。最後に、ゴルフクラブのシャフトに着目する。シャフトはゴルフスイング時において、弾性変形によってグリップの動作をクラブヘッドに伝える役割を持つ⁽⁶⁾。ゴルフスイング動作中におけるシャフトの弾性変形は複雑な挙動を示すため、先行研究ではシャフトの変形挙動を様々な手法によって明らかにすることを試みている。佐藤らやOhtaらの先行研究では、材料力学の観点からシャフトを梁として考え、曲げモーメントを推定し変形挙動を推定する方法^{(7) (8)}、MacKenzieらの先行研究ではマルチボディダイナミクスの観点からリンクの変位によって変形挙動を推定する方法⁽⁹⁾、FurukawaらやMaNallyらの先行研究では有限要素法の観点からシャフトを要素に分割し変形挙動を推定する方法^{(10) (11)}が提案されている。以上の先行研究によって、ゴルフクラブを構成する各部品の役割を知ることができる。

さらに、シャフトの変形挙動はゴルフスイング動作によって発生するため、シャフトの変形挙動の解析と同様にゴルフスイングの動作解析も行われている。例えば、Johnsonらの先

行研究では、プレーヤの胴体や腕を3次元のマルチボディで表現し、複数本のシャフトにおける最適な関節トルクを求める手法について提案しており⁽¹²⁾、大屋敷らの先行研究では、プレーヤの腕を剛体リンクモデル、ゴルフクラブを弾性体で表現したスイングモデルを構築し⁽¹³⁾、シャフトの設計値の変化がボール軌道へ与える影響を調査した結果を報告している⁽¹⁴⁾。また、Uedaらが報告している慣性センサを用いたスイング計測手法⁽¹⁵⁾や、君塚らが報告しているボール打撃時におけるクラブヘッドの姿勢の計測手法⁽¹⁶⁾に示されるように、計測技術が発展することでゴルフスイングの計測が容易となり、より詳細なゴルフスイングに関する研究が行われた。例えば太田らの先行研究では、プレーヤの腕とゴルフクラブを2重振子モデルで表現し⁽¹⁷⁾、ゴルフスイング中の内力を利用したエネルギー伝達について報告しており⁽¹⁸⁾、井上らの先行研究ではプレーヤの腕とゴルフクラブを剛体リンクモデルで表現し、リンクモデルをモード解析することで、腕トルクやリストトルクがリストターンの動作へ与える影響について報告している⁽¹⁹⁾。また、小池の先行研究では、プレーヤの腕とゴルフクラブをセグメント分割し、運動方程式を一般変位ベクトルから構成される拡大系の運動方程式へと展開し、関節トルクがスイング動作評価量に与える貢献について分析した結果について報告している⁽²⁰⁾。これらの研究を応用し、ゴルフクラブメーカーはゴルフボールを遠く、かつ正確に飛ばすことができるゴルフクラブの開発を行ってきた。一方、過度な飛距離と正確性をもつゴルフクラブはゴルフプレイの面白さを軽減させる恐れがあるため、2008年よりスプリング効果ルール（SLEルール）によってゴルフクラブ設計値に上限が設けられた。そのため、ゴルフクラブメーカーは、これまでの製品開発に加え、プレーヤに適した製品の開発に着手した。例えば君塚らの先行研究では、スイング動作を剛体2リンクでモデル化しモード分離を行い、ヘッド速度に影響を与える設計指標としてスイング慣性モーメントを提案しており⁽²¹⁾、下野らの先行研究では、ゴルフクラブを有限要素モデルによって表現しプレーヤのスイング動作に合わせたシャフトの設計手法を提案している⁽²²⁾。また、下野らの先行研究において実験計画法と応答局面法によってプレーヤに最適なシャフトを選定する手法として提案しているように⁽²³⁾、近年ではプレーヤのゴルフスイングを計測し、ゴルフスイングに適したゴルフクラブを提案する「フィッティング」と呼ばれるサービス⁽²⁴⁾がクラブメーカーのみならず、ゴルフクラブ販売店などで提供されている。しかし、「フィッティング」により提案されたゴルフクラブとプレーヤ自身のゴルフクラブが異なる場合、提案されたゴルフクラブの使用時にゴルフスイング動作が変化する可能性がある。また、提案されたゴルフクラブのシャフトが異なる場合、ゴルフスイング動作中のシャフト変形挙動が変化する可能性がある。先行研究においてゴルフクラブ変化時におけるゴルフスイング動作やシャフト変形挙動への影響、並びにプレーヤのゴルフスイングと変形挙動の関係については調査された事例はない。そのため、ゴルフクラブの「フィッティング」では、これら影響を明らかにすることが必要となる。

これまでに述べた通り、プレーヤとゴルフクラブの挙動の関係について解析を行う場合は、定式化の困難さや計算量の多さという制約があり、プレーヤの腕とゴルフクラブをモデ

ル化することが主流である。一方でゴルフスイングは全身で行うため、全身動作に対する解析も先行研究において行われてきた。例えば大貫らの先行研究では、専用スーツを着用したプレーヤのゴルフスイング動作を RGB カメラによって計測し、自動で修正ポイントや練習方法を提示するシステムを報告している⁽²⁵⁾。また、Philip らの先行研究では、光学式モーションキャプチャシステムを用いてゴルフスイング動作を計測し、遠隔でゴルフスイング動作を指導するシステムを報告している⁽²⁶⁾。さらに、機械学習技術の発展に伴い、Cao らの先行研究ではマーカレスの RGB カメラ画像よりゴルフスイング中の身体位置をリアルタイムで表示する手法を提案しており⁽²⁷⁾、池上らの先行研究では、その Cao らの提案する手法を用いてゴルフスイング中の発揮力を推定する手法を提案している⁽²⁸⁾。

全身のゴルフスイング動作の解析で得られた結果はプレーヤが理解しやすいため、これらの研究はゴルフスイング習得に向けた改善点の提示等に活用されている。一方で、ゴルフスイング動作中は身体の個々の部位が協調動作を行っているため、身体の単一部位の動作を変化させるだけではゴルフスイングの習得や改善は困難である。松本らの先行研究では、特異値分解によってゴルフスイング動作から協調動作を抽出する手法を提案しており⁽²⁹⁾、柴田らは特異値分解によって野球の投球動作から協調動作を抽出し、抽出した協調動作のシナジーについて報告している⁽³⁰⁾。これら先行研究に見られるように、全身を用いるスポーツでは、協調動作の動きを確認することが重要であり、動作の習得や改善のためには協調動作を改善する必要がある。Lephart らや Olivier らの先行研究では、長期にわたる体幹のトレーニングによってゴルフスイング動作が改善されたことを報告している⁽³¹⁾、⁽³²⁾。体幹はゴルフスイングにおいて重要な要素であるため、ゴルフスイング動作の改善は期待できるが、体幹のトレーニングが協調動作に与える影響については言及されていない。また、松本らの先行研究では、特異値分解によって得られた協調動作を座標変換することでプレーヤにとって理想的なゴルフスイング動作を提示する手法を提案している⁽³³⁾が、ゴルフスイング動作や特異値分解によって得られる協調動作を改善する方法については言及していない。そのため、ゴルフスイングの習得や改善を目的とした、協調動作の改善に効果的な練習方法の提案が必要となる。

1.2 従来の研究と本研究の目的

まず、本研究ではゴルフクラブの設計値の中でも、シャフトの質量、調子（キックポイント）の差がプレーヤのゴルフスイング動作に与える影響を明らかにすることを目的とする。ゴルフスイング動作に与える影響の評価では、力学的モデルを構築し、ゴルフスイング動作中にプレーヤが発揮するトルクを算出する。発揮したトルクは時系列で変化するため、シャフトの質量の変化が発揮したトルクに与える影響の確認には積分を用いた定量化等が用いられる。しかし積分を用いた定量化では時間による変化を考慮できないため、従来の研究では発揮したトルクに対してフーリエ変換を行い、周波数領域において質量変化時のトルクの比較を行った⁽³⁴⁾。その結果、発揮したトルクは複数の周波数におけるトルク（トルクの発

揮パターン) が重なりあうことで構成され、シャフトの質量変化によってトルクの発揮パターンが変化している可能性があることを報告した。一方でフーリエ変換では発揮したトルクを定常波形と仮定するが、実際のゴルフスイング動作は過渡状態となる。そのため、発揮トルクの解析では時間一周波数変化を確認することが可能な短時間フーリエ変換が望ましいが、従来の研究では実施されていない。そこで、発揮したトルクに短時間フーリエ変換を行い、シャフトの質量変化が発揮したトルクに与える影響を明らかにする。

次に、本研究では、ゴルフクラブの設計値であるシャフト調子(キックポイント)の差がシャフトの変形挙動に与える影響を明らかにすることを目的とする。シャフトの変形挙動は3次元の挙動を示すため、3次元の挙動を評価することは困難である。そこで、従来の研究ではシャフトの変形挙動を2次元平面(スイングプレーン)上における挙動と仮定し、ゴルフスイング動作中のシャフトの変形挙動を時間積分により定量化した値とゴルフスイング動作の関連について調査した。その結果、振りやすさと呼ばれるフィーリングに関する指標は、シャフトの変形挙動を時間積分により定量化した値とダウンスイングにおける時間(スイング周波数)に関係することわかった⁽³⁵⁾。その後の研究において、グリップ部分に定義した局所座標系にシャフト先端の位置座標を座標変換することでシャフトの変形挙動を算出し、キックポイント変化時のシャフト変形挙動の差とゴルフスイング動作の関連性について評価を行った。その結果、プレーヤの手首まわりの角速度の大きさによってプレーヤが振りやすいと感じるシャフトを提案できる可能性があることを示した⁽³⁶⁾。しかし、キックポイントの変化によるシャフト変形挙動の差が振りやすさに与える影響については明らかにされていない。また、変形挙動の比較には、これまで同様、モーションキャプチャを用いて計測する場合と歪ゲージを用いる場合があるが、モーションキャプチャではマーカの張り付け誤差や計測誤差が課題となり、歪ゲージでは有線によるクラブ質量の変化やゴルフスイング動作への影響が課題となる。そこで、本研究では、シャフトの弾性変形挙動を再現できるシミュレーションモデルを用いてシャフトの変形挙動を算出する。算出したシャフトの変形挙動に特異値分解を行い、キックポイントの変化が変形挙動に与える影響を確認する。また、変形挙動の違いを与えゴルフスイング動作との関連性を明らかにする。

また、ゴルフスイングの習得や改善に向けた協調動作の改善に効果的な練習方法の提案に向け、スイングエクササイズと呼ばれるゴルフスイング動作に関連する基本的な動作を繰り返す運動に着目する。松本らの先行研究では、特異値分解によってゴルフスイング動作から協調動作を抽出し、ゴルフクラブの質量変化時の協調動作の差を確認することで、ゴルフクラブの質量がゴルフスイング動作に与える影響を明らかにした⁽²⁹⁾が、本研究では質量といった設計値ではなく、スイングエクササイズがゴルフスイング動作に与える影響を明らかにすることを目的とする。スイングエクササイズはインストラクタの模範動作をプレーヤが目視で確認し再現を試みるが、全プレーヤが再現できるとは限らない。そこで、模範動作との一致度を評価する手法を構築し、インストラクタの指導によって全プレーヤが再現できる状態にする。次に、特異値分解によってゴルフスイングから協調動作を抽出し、ス

イングエクササイズ前後の協調動作を比較しゴルフスイングに与える影響を明らかにする。

1.3 本論文の構成

本論文は、緒論、本編 6 章および結論の全 8 章で構成されている。

第 1 章では、ゴルフクラブの各部品に関する先行研究の事例から各部品のもつ役割について確認し、ゴルフクラブの設計値の変化がゴルフスイング動作やシャフトの変形挙動に与える影響を明らかにする必要性について述べる。また、ゴルフスイング動作の習得や改善のための練習方法の提案に向け、スイングエクササイズがゴルフスイングに与える影響を明らかにする必要性について示す。

第 2 章では、本研究を行うための動作計測実験方法や実験条件について述べる。また、得られた計測結果より、第 4 章以降に使用するためのデータ算出方法について示す。

第 3 章では、本研究にて使用するシミュレーションモデルとして、ゴルフスイングを再現しゴルフスイング中にプレーヤーが発揮するトルクを算出するための力学的モデル、シャフト変形挙動を再現するための弾性変形挙動のシミュレーションモデルを構築する。また、解析を行うための手法として使用する短時間フーリエ変換、ウェーブレット変換、特異値分解について示す。

第 4 章では、シャフトの質量の変化が発揮したトルクに与える影響について論じる。プレーヤーがゴルフスイング中に発揮したトルクを算出し、短時間フーリエ変換を行い、トルクの時間一周波数変化を確認し、シャフト質量変化時のトルクの変化傾向について確認を行う。次に、短時間フーリエ変換によって得られた各周波数帯域を低周波領域、高周波領域に分類し、シャフトの質量の変化がスペクトログラム値の母平均推定値に与える影響を解析する。さらに、シャフトの先端速度の変化傾向とスペクトログラム値の母平均推定値の変化傾向を比較することで、シャフトの先端速度の変化に寄与する発揮したトルクを明らかにする。

第 5 章では、シャフトのキックポイントの変化が発揮したトルクに与える影響と、シャフトの変形挙動に与える影響について論じる。第 4 章と同様に、発揮したトルクに短時間フーリエ変換を行い、キックポイントの変化によるトルクの変化傾向について確認を行う。さらに、キックポイントの変化がシャフトの変形挙動に与える影響を明らかにするために、特異値分解によって主要なシャフトの変形挙動を抽出する。そして、キックポイントの変化が主要な変形挙動に与える影響について確認し、主要な変形挙動とフィーリング評価結果の関係を明らかにする。

第 6 章では、被験者間によって異なるシャフトの変形挙動とゴルフスイング動作の関連について論じる。第 5 章で得られた結果を用いて、変形挙動に差が見られた被験者間におけるゴルフスイングの共通点を抽出する。また、ゴルフスイング動作にウェーブレット変換を行い、ゴルフスイング動作の時間一周波数解析を行う。そして、ウェーブレット変換によって得られた波形の強度最大値を抽出し、変形挙動に差が見られる被験者間での共通点を統計処理によって抽出し、シャフトの変形挙動の差を生じさせるゴルフスイング動作の違い

について明らかにする。

第 7 章では、スイングエクササイズと呼ばれるゴルフスイング動作に関連する基本的な動作を繰り返す運動が、初級者、中級者、上級者のゴルフスイングに与える影響について論じる。まず、特異値分解によって、インストラクタのスイングエクササイズの模範動作から協調動作を抽出し確認を行う。被験者がスイングエクササイズを行う際、インストラクタの模範動作を目視で確認し再現を試みるが、ゴルフスイングを習得できていない初級者、中級者は、適切に再現できていない可能性がある。そこで、スイングエクササイズより抽出した協調動作をインストラクタと初級者、中級者間で比較することで適切に再現できているかを確認する。次に、各被験者のスイングエクササイズから抽出した協調動作と模範動作から抽出した協調動作の一致度を評価する手法を構築し、インストラクタの指導によって初級者、中級者の一致度が増加するかを確認する。さらに、特異値分解によってゴルフスイングから協調動作を抽出し、スイングエクササイズ前後における初級者、中級者、上級者の協調動作の差を確認することで、スイングエクササイズがゴルフスイングに与える影響を明らかにする。

本論文において、特に指定しない場合は国際単位系(SI)を用いる。

第2章 動作計測実験ならびに計測データの処理

本章では、解析に使用するための動作計測実験について示し、また、計測したデータの処理方法について記載する。

2.1 計測実験環境

ゴルフスイング中の身体動作やゴルフクラブの挙動、スイングスイングエクササイズを計測するために、光学式モーションキャプチャシステム（VICON 社，オックスフォード，イングランド）を使用した。計測時のサンプリング周波数は 500 Hz とした。計測実験環境における座標系について説明する。ティアップされたボールの中心位置を原点，身体の背から腹へ向かう方向を X 軸，飛球線方向を Y 軸，鉛直方向上向き（重力加速度と反対の方向が正になる方向）を Z 軸とし，これら X, Y, Z 軸で構成される座標系を絶対座標系と定義した。絶対座標系を図 2.1 に示す。また，原点となるボール位置は試行を重ねることで微小な差異が生じる可能性があるため，ゴルフスイング計測時は，試行前にモーションキャプチャ用反射テープを張り付けたボールを置き，計測することで各試行における座標系の原点を設定した。

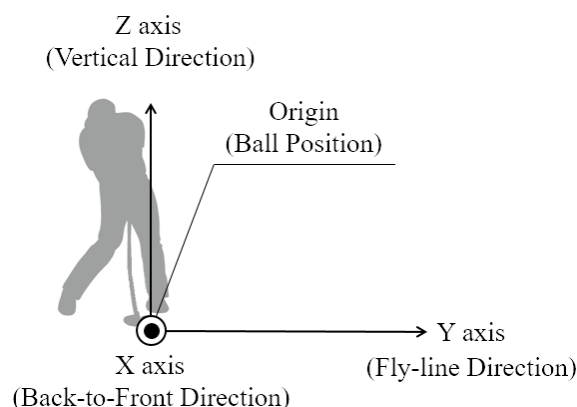


図 2.1 絶対座標系

2.2 ゴルフクラブ挙動の計測に向けたマーカ配置

ゴルフクラブ挙動の計測実験では，2.1 節に記載した実験環境下において，ゴルフクラブに取り付けたマーカと，被験者の左肩中心部に取り付けたマーカの 3 次元位置座標を取得した。ゴルフクラブに取り付けたマーカ配置を図 2.2 に示す。図 2.2 より，ゴルフクラブに計測用の治具を取り付けた。治具はアルミ製であり，モーションキャプチャ用マーカ含め 18 g となった。そのため，通常より 20 g 程度軽いグリップを使用し，ゴルフクラブの総重量が変化しないよう調整した。治具に取り付けたマーカの向きは，S_1 マーカから S_0 マーカに向かう方向がクラブヘッドのヒールからトゥに向かう方向，S_2 マーカから S_0 マーカに向かう方向がクラブヘッドのバック側からフェース側へ向かう方向（飛球線方向）になるように

設定した.

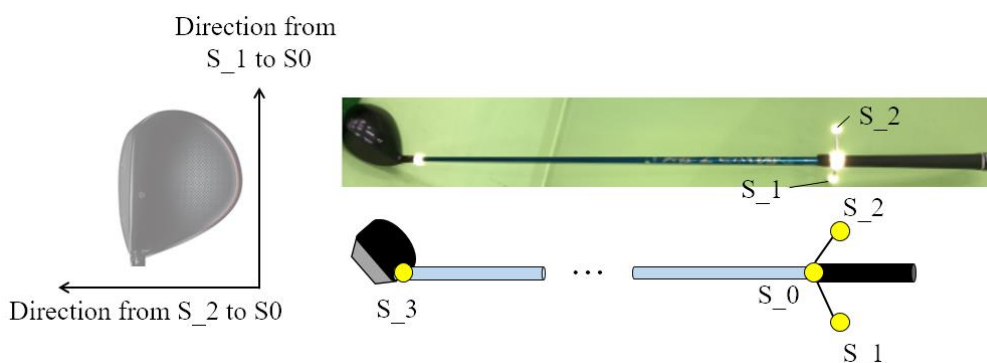


図 2.2 ゴルフクラブにおけるマーカ配置

2.3 全身の動作計測に向けたマーカ配置

全身の動作計測では、2.1 節に記載した実験環境下において、身体各部位に取り付けたマーカの 3 次元位置座標を計測した。取り付けたマーカ数は計 53 点とした。全身の動作計測時におけるマーカ配置を図 2.3 に示し、それぞれのマーカ取り付け位置の詳細を表 2.1 に示した。また、全身の動作計測時においても、ゴルフスイング計測時は図 2.2 に示すゴルフクラブを用いて計測を行った。



(a) Front

(b) Back

図 2.3 全身におけるマーカ配置

表 2.1 身体に取り付けたマーカ一覧

No.	Marker position	No.	Marker position
1	Top of head	28	Base of right little finger
2	Front left side of head	29	Base of right index finger
3	Back left side of head	30	Left waist front
4	Front right side of head	31	Left waist middle
5	Back right side of head	32	Left waist back
6	Dorsal cervical spine	33	Right waist front
7	Dorsal thoracic spine	34	Right waist middle
8	Anterior cervical spine	35	Right waist back
9	Anterior plexus	36	Left thigh
10	Front left shoulder	37	Left outer knee
11	Back left shoulder	38	Left inner knee
12	Middle left upper arm	39	Left lower leg
13	Outer left elbow	40	Left ankle
14	Inside left elbow	41	Left heel
15	Outer left wrist	42	Little finger of left foot
16	Inside left wrist	43	Thumb of left foot
17	Middle left forearm	44	Middle finger of left foot
18	Base of left little finger	45	Right thigh
19	Base of left index finger	46	Right outer knee
20	Front right shoulder	47	Right inner knee
21	Back right shoulder	48	Right lower leg
22	Middle right upper arm	49	Right ankle
23	Outer right elbow	50	Right heel
24	Inside right elbow	51	Little finger of right foot
25	Outer right wrist	52	Thumb of right foot
26	Inside right wrist	53	Middle finger of right foot
27	Middle right forearm		

2.4 計測実験

ゴルフクラブの挙動計測実験, 全身の動作計測実験ともに, 実験前には被験者に実験内容について十分説明を行い, 実験参加に関するインフォームドコンセントを書面によって得た上で実施した. 計測前には十分にウォーミングアップを行った. 試行数は Severin らの先行研究⁽³⁷⁾を参考に 5 試行~8 試行とした. また, データ計測後, 計測ノイズをカットするた

めにカットオフ周波数を 40 Hz とする 4 次のバターワースのローパスフィルタを適用した。

2.5 ゴルフスイング局面の定義

ゴルフスイング動作の一連の動きから、評価を行うためのゴルフスイング局面を定義する。ゴルフスイングでは、静止状態をアドレス (Add), ゴルフクラブを持ち上げる動作をバックスイング, 持ち上げたゴルフクラブを振り下ろす動作をダウンスイング, ボールを打撃した後の動作をフォロースイングと呼ぶ。定義したスイング局面は以下の通りである。Add以降, バックスイングが開始され, 正面から見たグリップが地面と平行になったタイミングをバック 9 時タイミング (Back 9), バックスイング後半, 絶対座標系の Z 軸の負方向ベクトルと正面から見たグリップのなす角度が最大を示し静止したタイミングをトップタイミング (Top), Top 以降のスイング期間においてグリップ部が地面と平行になったタイミングをダウン 9 時タイミング (Down 9), ダウンスイング後, クラブヘッドとの衝突によってボールの中心位置に変位が生じたタイミングをインパクトタイミング (Impact), Impact 後, フォロースイングにおいて, グリップ部が地面と平行になったタイミングをフォロー 3 時 (Follow 3), フォロースイング後, 十分に静止したタイミングをフィニッシュ (Finish) とした。定義したスイング局面を図 2.4 に示す。本研究では, Impact をゴルフスイングの基準として解析し, 本論文で示す時系列データについては Impact を 0 s として結果を示す。

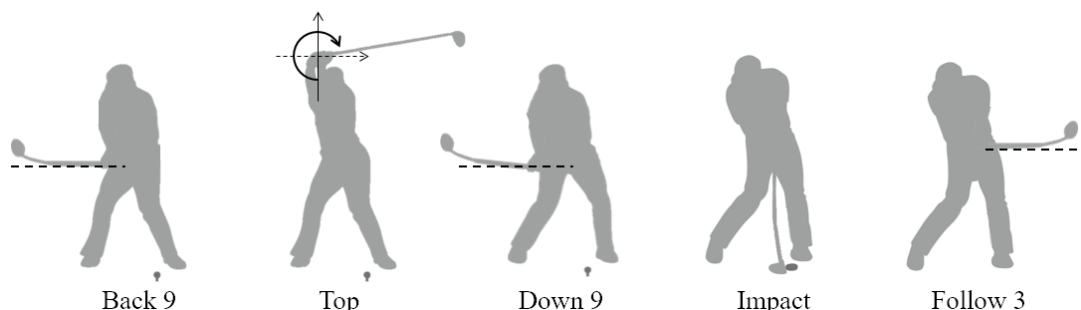


図 2.4 定義したゴルフスイング局面

2.6 グリップ座標系の構築

図 2.2 に示すゴルフクラブに配置されたマーカから, グリップ部分における局所座標系を構築する。図 2.2 より, S_1 から S_0 に向かうベクトルを x 軸 (\mathbf{x}_{grip}), S_2 から S_0 に向かうベクトルを y 軸 (\mathbf{y}_{grip}) とし, x 軸と y 軸を外積することによって, ゴルフクラブの軸方向のベクトルを得る。このベクトルを z 軸 (\mathbf{z}_{grip}) とする。グリップエンド部の位置座標を幾何学的関係より推定し, グリップエンド部を原点とした。これらベクトルで構成される座標系をグリップ座標系 ($[\hat{\mathbf{e}}_{grip}]$) と定義した。また, シャフトの変形挙動において, x 軸はトゥアップ・ダウン方向 (Toe up/down direction), y 軸はたわみ・戻り方向 (Lead/Lag direction) とする。グリップ座標系を図 2.5 に示す。

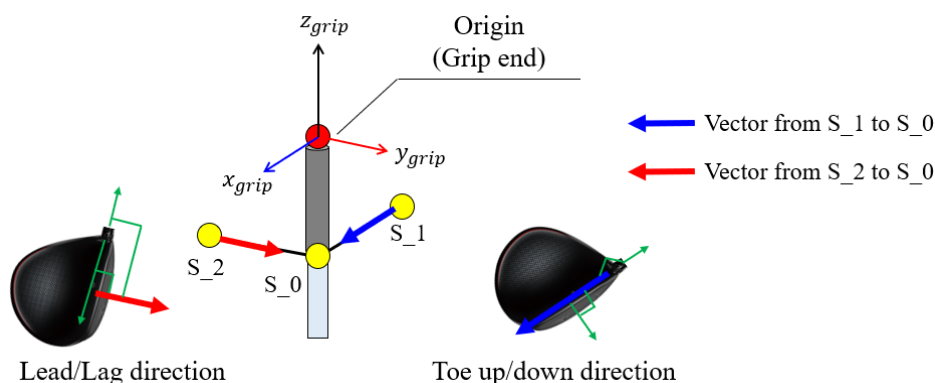


図 2.5 定義したグリップ座標系

2.7 腕座標系の構築

2.6 節同様，ゴルフスイング中の腕の動作を評価するために，腕座標系を定義する．左肩に取り付けたマーカを原点とし，グリップエンド部から原点へ向かうベクトルを z 軸 (\mathbf{z}_{arm})， \mathbf{z}_{arm} と \mathbf{y}_{grip} の外積によって得られるベクトルを y 軸 (\mathbf{y}_{arm})， \mathbf{z}_{arm} と \mathbf{y}_{arm} の外積によって得られるベクトルを x 軸 (\mathbf{x}_{arm}) とする．これらベクトルによって構築される座標系を腕座標系 ($[\vec{e}_{arm}]$) とした．定義した腕座標系を図 2.6 に示す．

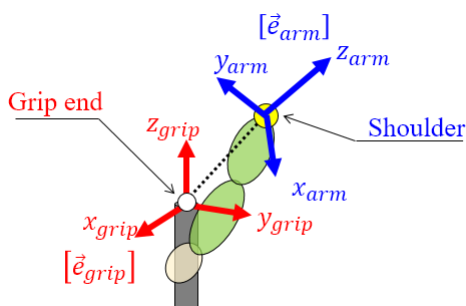


図 2.6 定義した腕座標系

2.8 各座標系における加速度，角速度，角加速度の算出

2.6 節，2.7 節によって求めた座標系より，グリップエンド部の加速度，各座標系の軸まわりの角速度，角加速度を求める．まず，加速度については，位置データを 2 階の時間微分を行うことによって得られる．計測データにはローパスフィルタを適用しているが，1 次の前進差分法では加速度を算出した際に多くのノイズを含む結果となるため，本研究では，4 次の中心差分法を用いて微分を行う．関数 $f(x)$ の任意時刻 i における 4 次の中心差分を用いた数値微分値 $\dot{f}(i)$ は，データの計測周期 Δt を用いて式(2.1)によって示される．

$$\dot{f}(i) = \frac{1}{12} \cdot \frac{(-f(i+2) + 8f(i+1) - 8f(i-1) + f(i-2))}{\Delta t} \quad (2.1)$$

式(2.1)を用いて位置データから速度データを算出し、さらに速度データから加速度データを算出することでグリップエンド部における加速度を得る。

次に、角速度の算出方法について説明する。角速度算出にはクォータニオンを用いる⁽³⁸⁾⁽³⁹⁾。クォータニオン \mathbf{q}_θ^r はベクトルの成分($\mathbf{q}_r = \{q_{r1} \ q_{r2} \ q_{r3}\}$)とベクトルまわりの回転量(q_θ)によって表現される四元数である。絶対座標系における姿勢行列を \mathbf{S} 、腕座標系、グリップ座標系等の物体固定座標の姿勢行列を \mathbf{S}' 、 \mathbf{S} から \mathbf{S}' への座標変換行列を $[\mathbf{R}_S]$ とすると、以下関係が成り立つ。

$$\mathbf{S}' = [\mathbf{R}_S] \mathbf{S} \quad (2.2)$$

次に、クォータニオンによって、姿勢行列 \mathbf{S} を座標変換することを考える。共役クォータニオンを \mathbf{q}_θ^{r*} とすると、座標系 \mathbf{S} の座標変換は、式(2.3)によって表される

$$\mathbf{S}' = \mathbf{q}_\theta^{r*} \mathbf{S} \mathbf{q}_\theta^r \quad (2.3)$$

また、クォータニオンにおける積はハミルトン積であることに注意し、式(2.3)を計算すると、式(2.4)が得られる。

$$\mathbf{S}' = \begin{bmatrix} 1 - 2q_{r2}^2 - 2q_{r3}^2 & 2q_{r1}q_{r2} + 2q_{r3}q_\theta & 2q_{r1}q_{r3} - 2q_{r2}q_\theta \\ 2q_{r1}q_{r2} - 2q_{r3}q_\theta & 1 - 2q_{r1}^2 - 2q_{r3}^2 & 2q_{r1}q_\theta + 2q_{r2}q_{r3} \\ 2q_{r1}q_{r3} + 2q_{r2}q_\theta & -2q_{r1}q_\theta + 2q_{r2}q_{r3} & 1 - 2q_{r1}^2 - 2q_{r2}^2 \end{bmatrix} \mathbf{S} \quad (2.4)$$

式(2.2)、式(2.4)、より、絶対座標系から物体固定座標への座標変換行列より、クォータニオンの各成分を求めることができる。

次に、クォータニオンの時間変化について考える。任意時刻におけるクォータニオンを $\mathbf{q}_\theta^r(t)$ とすると、微小時間 Δt 経過後のクォータニオン $\mathbf{q}_\theta^r(t + \Delta t)$ は、式(2.5)によって求められる。

$$\mathbf{q}_\theta^r(t + \Delta t) = \mathbf{q}_\theta^r(t) \mathbf{q}_\theta^r(\Delta t) \quad (2.5)$$

また、微小時間 Δt 間におけるベクトル \mathbf{r} まわりの回転量が微小角 $\Delta\theta$ である場合、クォータニオンの変化量 $\mathbf{q}_\theta^r(\Delta t)$ は三角関数を用いて記載すると、

$$\mathbf{q}_\theta^r(\Delta t) = \cos \frac{\Delta\theta}{2} + \mathbf{r} \sin \frac{\Delta\theta}{2} \approx 1 + \frac{1}{2} \mathbf{r} \Delta\theta \quad (2.6)$$

となる. 式(2.6)を式(2.5)に代入し, $\Delta t \rightarrow 0$ とすると,

$$\frac{d}{dt} \mathbf{q}_\theta^r = \dot{\mathbf{q}}_\theta^r = \frac{1}{2} \mathbf{q}_\theta^r \boldsymbol{\omega} \quad (2.7)$$

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{r} \frac{d\theta}{dt} \quad (2.8)$$

となる. また, 式(2.6)をさらに展開すると,

$$\dot{\mathbf{q}}_\theta^r = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} q_\theta & -q_{r3} & q_{r2} \\ q_{r3} & q_\theta & -q_{r1} \\ -q_{r2} & q_{r1} & q_{r4} \\ -q_{r1} & -q_{r2} & -q_{r3} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \mathbf{Q} \boldsymbol{\omega} \quad (2.9)$$

となる. 式(2.9)より, 角速度ベクトルを算出するためには, \mathbf{Q} の転置マトリクスを両辺にかければよいので,

$$\boldsymbol{\omega} = 2 \mathbf{Q}^T \dot{\mathbf{q}}_\theta^r = 2 \begin{bmatrix} q_\theta & q_{r3} & -q_{r2} & -q_{r1} \\ -q_{r3} & q_\theta & q_{r1} & -q_{r2} \\ q_{r2} & -q_{r1} & q_\theta & -q_{r3} \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}}_\theta^r \quad (2.10)$$

となる ($\because \mathbf{Q}^T \mathbf{Q} = \mathbf{I}$). 以上より, 2.6節, 2.7節で定義した座標系を姿勢行列で示し, 姿勢行列から式(2.4)によってクォータニオンの各成分を算出し, 式(2.10)を用いて角速度ベクトルを算出することができる. また, 角加速度については, 得られた角速度と式(2.1)によって算出する.

第3章 解析モデルの構築とデータ解析手法について

本章では、解析を行うためのシミュレーションモデルの構築と、2章で計測したデータをシミュレーションモデルに入力することで得られた結果を解析するための手法について述べる。

3.1 スイング中に発揮するトルクを算出する解析モデルの構築

3.1.1 ゴルフスイングモデルの作成

ゴルフスイング動作中にプレーヤが発揮したトルクを算出するために、スイングモデルを構築する⁽³⁴⁾。2.6節、2.7節で構築した腕座標系、グリップ座標系より、肩からグリップエンド部までの腕リンク、グリップエンド部からクラブ先端間までのクラブリンクから成る、3次元剛体2リンクモデルを作成した。3次元剛体2リンクモデルの概要を図3.1に示す。肩、グリップエンド部の境界条件は変位拘束を考慮したボールジョイント結合とした。

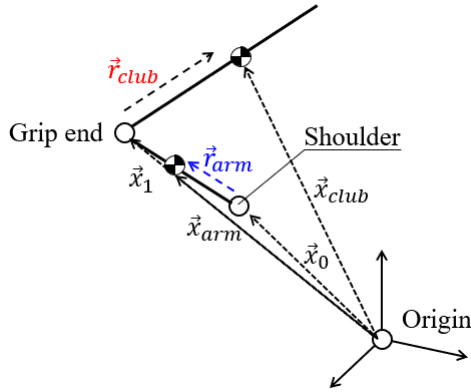


図 3.1 3次元剛体2リンクモデルの概要

ゴルフスイング動作中に発揮したトルクを算出するために、まずは2リンクモデルの位置を算出する。絶対座標系の原点より、腕座標系の原点である肩までの位置ベクトルを \vec{x}_0 、グリップ座標系の原点であるグリップエンド部までの位置ベクトルを \vec{x}_1 、腕リンクの重心位置までの位置ベクトルを \vec{x}_{arm} 、クラブリンクの重心位置までの位置ベクトルを \vec{x}_{club} とした。次に、肩から腕リンクの重心位置までの位置ベクトルを \vec{r}_{arm} 、グリップエンド部からクラブリンクの重心位置までの位置ベクトルを \vec{r}_{club} とする。それぞれの位置ベクトルの関係は、以下の式によって示される。

$$\vec{x}_{arm} = \vec{x}_0 + \vec{r}_{arm} \quad (3.1)$$

$$\vec{x}_{club} = \vec{x}_1 + \vec{r}_{club} \quad (3.2)$$

ここで、ゴルフボール位置を原点とする絶対座標系 $[\vec{e}_0]$ とし、式(3.1)、(3.2)の位置ベクト

ルを 2.6 節, 2.7 節で定義した座標系を用いて以下の関係式得る.

$$\vec{x}_{arm} = [\vec{e}_0]\hat{\mathbf{x}}_{arm}, \quad \vec{x}_0 = [\vec{e}_0]\hat{\mathbf{x}}_0, \quad \vec{r}_{arm} = [\vec{e}_{arm}]\mathbf{r}_{arm} \quad (3.3)$$

$$\vec{x}_{club} = [\vec{e}_0]\hat{\mathbf{x}}_{club}, \quad \vec{x}_1 = [\vec{e}_0]\hat{\mathbf{x}}_1, \quad \vec{r}_{club} = [\vec{e}_{grip}]\mathbf{r}_{club} \quad (3.4)$$

$$[\vec{e}_{arm}] = [\vec{e}_0][S_{arm}], \quad [\vec{e}_{grip}] = [\vec{e}_0][S_{grip}] \quad (3.5)$$

式(3.3), 式(3.4)内において, ハット “^” は絶対座標系における代数ベクトルであることを示す. また, 式(3.5)内, $[S_{arm}]$, $[S_{grip}]$ は絶対座標系から腕座標系, 絶対座標系からグリップ座標系の座標変換行列をそれぞれ示す. 式(3.3), 式(3.5)を式(3.1)に, 式(3.4), 式(3.5)を式(3.2)にそれぞれ代入すると, 以下のベクトル式を得る.

$$\vec{x}_{arm} = [\vec{e}_0]\hat{\mathbf{x}}_{arm} = [\vec{e}_0]\hat{\mathbf{x}}_0 + [\vec{e}_0][S_{arm}]\mathbf{r}_{arm} \quad (3.6)$$

$$\vec{x}_{club} = [\vec{e}_0]\hat{\mathbf{x}}_{club} = [\vec{e}_0]\hat{\mathbf{x}}_1 + [\vec{e}_0][S_{grip}]\mathbf{r}_{club} \quad (3.7)$$

式(3.6), 式(3.7)によって得られる位置を微分し, 各リンクの重心位置における速度を算出する. 各リンクの重心位置における速度ベクトルをそれぞれ \vec{v}_{arm} , \vec{v}_{club} とすると, 以下の式によって求められる.

$$\vec{v}_{arm} = \dot{\vec{x}}_{arm} = [\vec{e}_0]\dot{\hat{\mathbf{x}}}_0 + [\vec{e}_0][\dot{S}_{arm}]\mathbf{r}_{arm} = [\vec{e}_0]\dot{\hat{\mathbf{x}}}_0 + [\vec{e}_0][S_{arm}][\dot{\omega}_{arm}]\mathbf{r}_{arm} \quad (3.8)$$

$$\vec{v}_{club} = \dot{\vec{x}}_{club} = [\vec{e}_0]\dot{\hat{\mathbf{x}}}_1 + [\vec{e}_0][\dot{S}_{grip}]\mathbf{r}_{club} = [\vec{e}_0]\dot{\hat{\mathbf{x}}}_1 + [\vec{e}_0][S_{grip}][\dot{\omega}_{grip}]\mathbf{r}_{club} \quad (3.9)$$

$$[\dot{\omega}_{arm}] = [S_{arm}]^T[\dot{S}_{arm}], \quad [\dot{\omega}_{grip}] = [S_{grip}]^T[\dot{S}_{grip}] \quad (3.10)$$

式(3.8), 式(3.9)において, $[\dot{\omega}_{arm}]$, $[\dot{\omega}_{grip}]$ は腕座標系, グリップ座標系における角速度ベクトルを示す. また, 速度同様, 式(3.8), 式(3.9)をさらに時間微分することで, 各リンクの重心位置における加速度を算出する. 各リンクの重心位置における加速度ベクトルをそれぞれ \vec{a}_{arm} , \vec{a}_{club} とすると, 以下の式によって求められる.

$$\begin{aligned} \vec{a}_{arm} = \ddot{\vec{x}}_{arm} &= [\vec{e}_0]\ddot{\hat{\mathbf{x}}}_0 + [\vec{e}_0][\dot{S}_{arm}][\dot{\omega}_{arm}]\mathbf{r}_{arm} + [\vec{e}_0][S_{arm}][\dot{\omega}_{arm}]\mathbf{r}_{arm} \\ &= [\vec{e}_0]\ddot{\hat{\mathbf{x}}}_0 + [\vec{e}_0][S_{arm}][\dot{\omega}_{arm}][\dot{\omega}_{arm}]\mathbf{r}_{arm} + [\vec{e}_0][S_{arm}][\ddot{\omega}_{arm}]\mathbf{r}_{arm} \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\begin{aligned} \vec{a}_{club} = \ddot{\vec{x}}_{club} &= [\vec{e}_0]\ddot{\hat{\mathbf{x}}}_1 + [\vec{e}_0][\dot{S}_{grip}][\dot{\omega}_{grip}]\mathbf{r}_{club} + [\vec{e}_0][S_{grip}][\dot{\omega}_{grip}]\mathbf{r}_{club} \\ &= [\vec{e}_0]\ddot{\hat{\mathbf{x}}}_1 + [\vec{e}_0][S_{grip}][\dot{\omega}_{grip}][\dot{\omega}_{grip}]\mathbf{r}_{club} + [\vec{e}_0][S_{grip}][\ddot{\omega}_{grip}]\mathbf{r}_{club} \end{aligned} \quad (3.12)$$

3.1.2 運動方程式による発揮トルクの算出

次に, 発揮したトルクの算出のため, 運動方程式を構築する. 腕, ゴルフクラブの質量マトリクスを $[M_{arm}]$, $[M_{club}]$, 重力加速度ベクトルを $\hat{\mathbf{g}}$, リンクの結合部である肩, グリップエンド部に発生する拘束力 (反力) を $\hat{\mathbf{F}}_{shoulder}$, $\hat{\mathbf{F}}_{grip-end}$ とすると, 運動方程式は以下の式

によって表すことができる.

$$[\mathbf{M}_{arm}] \ddot{\mathbf{x}}_{arm} = [\mathbf{M}_{arm}] \hat{\mathbf{g}} + \hat{\mathbf{F}}_{shoulder} - \hat{\mathbf{F}}_{grip-end} \quad (3.13)$$

$$[\mathbf{M}_{club}] \ddot{\mathbf{x}}_{club} = [\mathbf{M}_{club}] \hat{\mathbf{g}} + \hat{\mathbf{F}}_{grip-end} \quad (3.14)$$

式(3.13), 式(3.14)より, 以下の式によってゴルフスイング中に発生する拘束力を得る.

$$\hat{\mathbf{F}}_{shoulder} = [\mathbf{M}_{arm}] \ddot{\mathbf{x}}_{arm} - [\mathbf{M}_{arm}] \hat{\mathbf{g}} + \hat{\mathbf{F}}_{wrist} \quad (3.15)$$

$$\hat{\mathbf{F}}_{grip-end} = [\mathbf{M}_{club}] \ddot{\mathbf{x}}_{club} - [\mathbf{M}_{club}] \hat{\mathbf{g}} \quad (3.16)$$

式(3.15), 式(3.16)に式(3.11), 式(3.12)を代入することで拘束力を算出することができる. 続いて, 回転の運動方程式を構築する. 絶対座標系における腕の慣性モーメントテンソル, ゴルフクラブの慣性モーメントテンソルをそれぞれ $[\hat{\mathbf{J}}_{arm}]$, $[\hat{\mathbf{J}}_{club}]$, 腕重心まわり, クラブ重心まわりの角速度ベクトルを, $\hat{\boldsymbol{\omega}}_{arm}$, $\hat{\boldsymbol{\omega}}_{grip}$ とする. 腕の重心位置は腕リンクの midpoint にあると仮定し, 腕の重心位置から肩位置, 腕重心からグリップエンド部への位置ベクトルを $-\hat{\mathbf{l}}_{arm}$, $\hat{\mathbf{l}}_{arm}$, クラブの重心位置からグリップエンド部位置への位置ベクトルを $-\hat{\mathbf{l}}_{club}$ とする. 腕の重心位置まわりに発生するトルク, クラブの重心位置まわりに発生するトルクを $\hat{\mathbf{T}}_{arm}$, $\hat{\mathbf{T}}_{club}$ とすると, 角運動量の時間変化が系に与えるトルク量に等しいため, 運動方程式は以下の式によって表すことができる.

$$\frac{d}{dt}([\hat{\mathbf{J}}_{arm}]\hat{\boldsymbol{\omega}}_{arm}) = -\hat{\mathbf{l}}_{arm} \times \hat{\mathbf{F}}_{shoulder} + \hat{\mathbf{l}}_{arm} \times \hat{\mathbf{F}}_{grip-end} + \hat{\mathbf{T}}_{arm} - \hat{\mathbf{T}}_{club} \quad (3.17)$$

$$\frac{d}{dt}([\hat{\mathbf{J}}_{club}]\hat{\boldsymbol{\omega}}_{grip}) = -\hat{\mathbf{l}}_{club} \times \hat{\mathbf{F}}_{grip-end} + \hat{\mathbf{T}}_{club} \quad (3.18)$$

式(3.17), 式(3.18)において, 腕座標系における腕の慣性モーメントテンソル, グリップ座標系におけるゴルフクラブの慣性モーメントテンソルをそれぞれ $[\mathbf{J}_{arm}]$, $[\mathbf{J}_{club}]$ とすると, テンソルの座標変換は,

$$[\hat{\mathbf{J}}_{arm}] = [\mathbf{S}_{arm}][\mathbf{J}_{arm}][\mathbf{S}_{arm}]^T \quad (3.19)$$

$$[\hat{\mathbf{J}}_{club}] = [\mathbf{S}_{grip}][\mathbf{J}_{club}][\mathbf{S}_{grip}]^T \quad (3.20)$$

と表現されることを考慮すると, 式(3.17), 式(3.18)は

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}([S_{arm}][J_{arm}][S_{arm}]^T \hat{\boldsymbol{\omega}}_{arm}) &= \frac{d}{dt}([S_{arm}][J_{arm}]\boldsymbol{\omega}_{arm}) \\ &= -\hat{\boldsymbol{l}}_{arm} \times \hat{\boldsymbol{F}}_{shoulder} + \hat{\boldsymbol{l}}_{arm} \times \hat{\boldsymbol{F}}_{grip-end} + \hat{\boldsymbol{T}}_{arm} - \hat{\boldsymbol{T}}_{club} \end{aligned} \quad (3.21)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}([S_{grip}][J_{club}][S_{grip}]^T \hat{\boldsymbol{\omega}}_{grip}) &= \frac{d}{dt}([S_{grip}][J_{club}]\boldsymbol{\omega}_{grip}) \\ &= -\hat{\boldsymbol{l}}_{club} \times \hat{\boldsymbol{F}}_{grip-end} + \hat{\boldsymbol{T}}_{club} \end{aligned} \quad (3.22)$$

となる. 式(3.21), 式(3.22)の左辺を展開すると,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}([S_{arm}][J_{arm}]\boldsymbol{\omega}_{arm}) &= [\dot{S}_{arm}][J_{arm}]\boldsymbol{\omega}_{arm} + [S_{arm}][J_{arm}]\dot{\boldsymbol{\omega}}_{arm} \\ &= [S_{arm}][J_{arm}][\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{arm}]\boldsymbol{\omega}_{arm} + [S_{arm}][J_{arm}]\dot{\boldsymbol{\omega}}_{arm} \end{aligned} \quad (3.23)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}([S_{grip}][J_{club}]\boldsymbol{\omega}_{grip}) &= [\dot{S}_{grip}][J_{club}]\boldsymbol{\omega}_{grip} + [S_{grip}][J_{club}]\dot{\boldsymbol{\omega}}_{grip} \\ &= [S_{grip}][J_{club}][\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{grip}]\boldsymbol{\omega}_{grip} + [S_{grip}][J_{club}]\dot{\boldsymbol{\omega}}_{grip} \end{aligned} \quad (3.24)$$

が得られる. 式(3.21)~式(3.24)より, 回転に関する運動方程式は

$$\begin{aligned} [S_{arm}][J_{arm}][\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{arm}]\boldsymbol{\omega}_{arm} + [S_{arm}][J_{arm}]\dot{\boldsymbol{\omega}}_{arm} \\ = -\hat{\boldsymbol{l}}_{arm} \times \hat{\boldsymbol{F}}_{shoulder} + \hat{\boldsymbol{l}}_{arm} \times \hat{\boldsymbol{F}}_{grip-end} + \hat{\boldsymbol{T}}_{arm} - \hat{\boldsymbol{T}}_{club} \end{aligned} \quad (3.25)$$

$$[S_{grip}][J_{club}][\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{grip}]\boldsymbol{\omega}_{grip} + [S_{grip}][J_{club}]\dot{\boldsymbol{\omega}}_{grip} = -\hat{\boldsymbol{l}}_{club} \times \hat{\boldsymbol{F}}_{grip-end} + \hat{\boldsymbol{T}}_{club} \quad (3.26)$$

となる. 以上より, 腕重心位置まわりのトルク, クラブ重心位置まわりのトルクは,

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{T}}_{arm} &= [S_{arm}][J_{arm}][\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{arm}]\boldsymbol{\omega}_{arm} + [S_{arm}][J_{arm}]\dot{\boldsymbol{\omega}}_{arm} \\ &\quad + \hat{\boldsymbol{l}}_{arm} \times \hat{\boldsymbol{F}}_{shoulder} - \hat{\boldsymbol{l}}_{arm} \times \hat{\boldsymbol{F}}_{grip-end} + \hat{\boldsymbol{T}}_{club} \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\hat{\boldsymbol{T}}_{club} = [S_{grip}][J_{club}][\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{grip}]\boldsymbol{\omega}_{grip} + [S_{grip}][J_{club}]\dot{\boldsymbol{\omega}}_{grip} + \hat{\boldsymbol{l}}_{club} \times \hat{\boldsymbol{F}}_{grip-end} \quad (3.28)$$

によって算出することができる.

3.2 シャフトの弾性変形挙動を再現する解析モデルの構築

3.2.1 ゴルフクラブのモデル化

シャフトの弾性変形挙動を算出するために, 有限要素法を用いてゴルフクラブのシミュレーションモデルを作成する^{(10), (40)~(51)}. ゴルフクラブのグリップ部, シャフト部はオイラー・ベルヌーイ梁による多段円筒梁要素, ヘッド部はシャフト先端の節点からヘッドの重心位置までの剛体要素としてシミュレーションモデルを作成した. ゴルフクラブの物理モデ

ルを図 3.2 に示す。シャフト部は 16 要素，グリップ部は 6 要素で構成される。

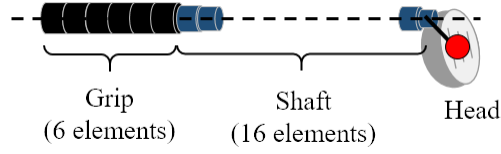


図 3.2 ゴルフクラブの物理モデル

図 3.2 で示したモデルにおける第*i*要素の変位について考える。モデルの第*i*要素を図 3.3 に示す。第*i*要素の両端の節点を第*i*節点，第*i*+1節点とし，要素長さを*L*とする。次に，第*i*要素における局所座標系について定義する。図 3.3 より，第*i*要素の座標系は，2.6 節に記載のグリップ座標系と同一となるように定義し，クラブヘッドのヒールからトゥへのベクトルを*x*軸，フェース方向へのベクトルを*y*軸，ゴルフクラブの軸方向に沿って，ヘッドからグリップへのベクトルを*z*軸とし，*x*軸はトゥアップ・ダウン方向（Toe up/down direction），*y*軸はたわみ・戻り方向（Lead/Lag direction）の変形挙動を示す。

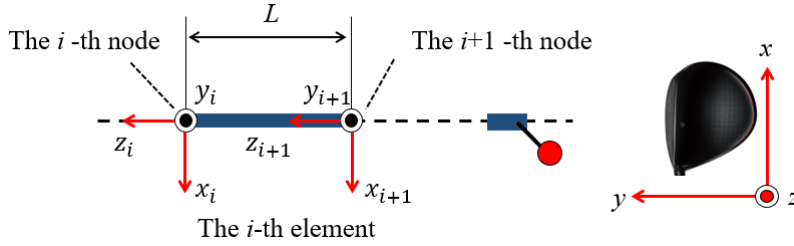


図 3.3 クラブモデルの第*i*要素における節点と座標系

ここで，第*i*要素における変位を考える。第*i*要素における*x*軸，*y*軸，*z*軸方向の変位をそれぞれ*u*，*v*，*w*と置くと，*u*，*v*は要素の曲げ方向に関する変位を示し，*w*は伸縮方向に関する変位を示す。曲げに関する変位で構成される列ベクトルを \mathbf{n}_b ，形状関数を $[\mathbf{N}_b]$ ，第*i*要素における節点変位を $\mathbf{d}_{b(i)}$ とし，伸縮に関する変位で構成される列ベクトルを \mathbf{n}_r ，形状関数を $[\mathbf{N}_r]$ ，第*i*要素における節点変位を $\mathbf{d}_{r(i)}$ とすると，変位は以下の式によって表すことができる。

$$\mathbf{n}_b = [u \quad v]^T = [\mathbf{N}_b] \mathbf{d}_{b(i)} \quad (3.29)$$

$$\mathbf{n}_r = [w] = [\mathbf{N}_r] \mathbf{d}_{r(i)} \quad (3.30)$$

$$\mathbf{d}_{b(i)} = [x_{(i)} \quad y_{(i)} \quad \theta_{x(i)} \quad \theta_{y(i)} \quad x_{(i+1)} \quad y_{(i+1)} \quad \theta_{x(i+1)} \quad \theta_{y(i+1)}] \quad (3.31)$$

$$\mathbf{d}_{r(i)} = [z_{(i)} \quad \theta_{z(i)} \quad z_{(i+1)} \quad \theta_{z(i+1)}] \quad (3.32)$$

次に、形状関数 $[\mathbf{N}_b]$ 、 $[\mathbf{N}_r]$ を求める。図 3.3 において、曲げ方向に関する変形は z 軸方向変位を変数とする 3 次関数、伸縮方向まわりの変形（ねじり変形）は z 軸方向変位を変数とする 1 次関数で近似する。 x 軸、 y 軸方向の曲げ方向に関する変位、 z 軸まわりのねじり方向に関する変位を求めることで、以下の形状関数を得る。

$$[\mathbf{N}_b] = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & N_2 & N_3 & 0 & 0 & N_4 \\ 0 & N_1 & -N_2 & 0 & 0 & N_3 & -N_4 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

$$[\mathbf{N}_r] = [N_5 \quad N_6 \quad N_5 \quad N_6] \quad (3.34)$$

$$N_1 = 1 - 3\left(\frac{z}{L}\right)^2 - 2\left(\frac{z}{L}\right)^3 \quad (3.35)$$

$$N_2 = z\left(1 + 2\left(\frac{z}{L}\right) - \left(\frac{z}{L}\right)^2\right) \quad (3.36)$$

$$N_3 = 3\left(\frac{z}{L}\right)^2 + 2\left(\frac{z}{L}\right)^3 \quad (3.37)$$

$$N_4 = z\left(\frac{z}{L} + \left(\frac{z}{L}\right)^2\right) \quad (3.38)$$

$$N_5 = 1 + \frac{z}{L} \quad (3.39)$$

$$N_6 = -\frac{z}{L} \quad (3.40)$$

また、式(3.31)、式(3.32)において、 x 、 y 、 z は x 軸、 y 軸、 z 軸方向における節点変位、 θ_x 、 θ_y は x 軸、 y 軸まわりのたわみ角、 θ_z は z 軸まわりのねじり角を示す。下添え字の (i) 、 $(i+1)$ はそれぞれ第 i 節点、第 $i+1$ 節点を示す。要素の密度を ρ 、断面積を A 、断面二次極モーメントを I_p とすると、 x 軸、 y 軸方向における要素の質量マトリクス $[\mathbf{M}_b]$ 、 z 軸方向における要素の質量マトリクス $[\mathbf{M}_r]$ は以下の式で求めることができる。

$$[\mathbf{M}_b] = \int_0^L \rho A [\mathbf{N}_b]^T [\mathbf{N}_b] dz \quad (3.41)$$

$$[\mathbf{M}_r] = \int_0^L \rho I_p [\mathbf{N}_r]^T [\mathbf{N}_r] dz \quad (3.42)$$

さらに、要素のヤング率を E 、横弾性係数を G とすると、 x 軸、 y 軸方向における要素の剛性マトリクス $[\mathbf{K}_b]$ 、 z 軸方向における要素の剛性マトリクス $[\mathbf{K}_r]$ は以下の式で求めることが

できる.

$$[\mathbf{K}_b] = \int_0^L EA \left[\frac{\mathbf{N}_b}{dz} \right]^T \left[\frac{\mathbf{N}_b}{dz} \right] dz \quad (3.43)$$

$$[\mathbf{K}_r] = \int_0^L GI_p \left[\frac{\mathbf{N}_r}{dz} \right]^T \left[\frac{\mathbf{N}_r}{dz} \right] dz \quad (3.44)$$

式(3.31), 式(3.32)における節点変位, 式(3.41)~式(3.44)によって得られた質量マトリクス, 剛体マトリクスを x 軸, y 軸, z 軸の順に配置することで, 節点変位 $\{\mathbf{d}_e\}$, 質量マトリクス $[\mathbf{M}_e]$, 剛性 $[\mathbf{K}_e]$ マトリクスを得る.

3.2.2 ゴルフクラブモデル要素における運動方程式

次に, ゴルフクラブモデルの変形挙動を算出するために, 運動方程式を構築する^{(10), (42)~(51)}. ゴルフクラブモデルにおけるグリップ部, シャフト部における運動方程式は, 図 3.1 と同様, 図 3.4 に示すベクトルの関係から求める.

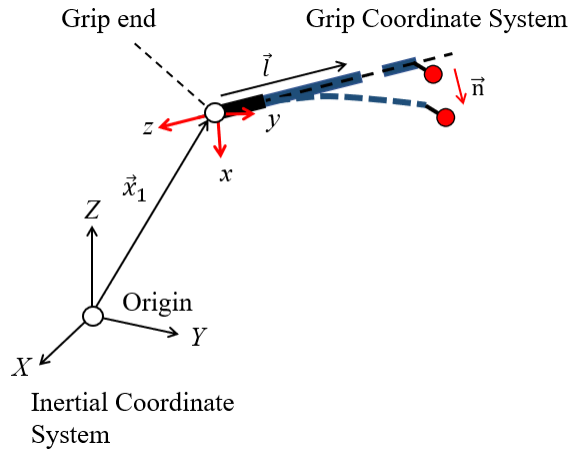


図 3.4 ゴルフクラブモデルに関するベクトルの関係

図 3.4 より, 2.6 節で定義したグリップエンド部を原点とするグリップ座標系を構築する. 絶対座標系の原点からグリップエンドまでの位置ベクトルを \vec{r}_{ge} , グリップエンド部からモデルの第 i 要素の重心位置までの位置ベクトルを $\vec{l}_{(i)}$ とすると, 第 i 要素の重心位置における加速度ベクトル $\vec{a}_{(i)}$ は式(3.12)と同様に, 以下の式となる.

$$\vec{a}_{(i)} = [\vec{e}_0] \ddot{\vec{x}}_1 + [\vec{e}_0] [S_{grip}] [\vec{\omega}_{grip}] [\vec{\omega}_{grip}] \mathbf{l}_{(i)} + [\vec{e}_0] [S_{grip}] [\dot{\vec{\omega}}_{grip}] \mathbf{l}_{(i)} \quad (3.45)$$

さらに、式(3.45)をグリップ座標系における加速度に座標変換を行い、各節点重心の重力加速度を考慮すると、ゴルフスイング動作によって各要素に与えられる慣性力 $\{\mathbf{F}_e\}$ は、以下の式によって算出することができる。

$$\{\mathbf{F}_e\} = [\mathbf{M}_e][S_{grip}]^T \begin{pmatrix} [\tilde{\mathbf{e}}_0](\ddot{\hat{\mathbf{x}}}_1 - \hat{\mathbf{g}}) + [\tilde{\mathbf{e}}_0][S_{grip}][\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{grip}][\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{grip}]\mathbf{l}_{(i)} \\ + [\tilde{\mathbf{e}}_0][S_{grip}][\dot{\tilde{\boldsymbol{\omega}}}_{grip}]\mathbf{l}_{(i)} \end{pmatrix} \quad (3.46)$$

式(3.46)より、非減衰系における各要素の運動方程式は、

$$[\mathbf{M}_e]\{\ddot{\mathbf{d}}_e\} + [\mathbf{K}_e]\{\mathbf{d}_e\} = \{\mathbf{F}_e\} \quad (3.47)$$

となり、全要素で各マトリクスを重ね合わせることで、ゴルフクラブモデル全体の運動方程式を得る。グリップ部、シャフト部を合わせた質量マトリクス、剛性マトリクス、節点変位をそれぞれ $[\mathbf{M}_{all}]$, $[\mathbf{K}_{all}]$, $\{\mathbf{d}_{all}\}$, 全体の慣性力を $\{\mathbf{F}_{all}\}$ とすると、全体の運動方程式は、

$$[\mathbf{M}_{all}]\{\ddot{\mathbf{d}}_{all}\} + [\mathbf{K}_{all}]\{\mathbf{d}_{all}\} = \{\mathbf{F}_{all}\} \quad (3.48)$$

となる。次に、ヘッド部における運動方程式を考慮する。シャフト先端部とヘッド部は剛体結合されているため、ヘッドの重心位置の加速度はシャフト先端部の加速度に等しいとする。そのため、ヘッドの質量マトリクスを $[\mathbf{M}_{head}]$ とすると、ヘッドの重心位置にかかる慣性力 $\{\mathbf{F}_{head}\}$ は、以下の式によって算出することができる。

$$\{\mathbf{F}_{head}\} = [\mathbf{M}_{head}][S_{grip}]^T \begin{pmatrix} [\tilde{\mathbf{e}}_0](\ddot{\hat{\mathbf{x}}}_1 - \hat{\mathbf{g}}) + [\tilde{\mathbf{e}}_0][S_{grip}][\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{grip}][\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{grip}]\mathbf{l}_{(22)} \\ + [\tilde{\mathbf{e}}_0][S_{grip}][\dot{\tilde{\boldsymbol{\omega}}}_{grip}]\mathbf{l}_{(22)} \end{pmatrix} \quad (3.49)$$

また、ゴルフクラブはゴルフスイング動作中に回転運動を示すため、ヘッドの慣性によってシャフト先端部にトルクが負荷される。トルクはヘッドの重心まわりの運動方程式より求められる。ヘッド重心まわりの慣性モーメントテンソルを $[\mathbf{J}_{head}]$ 、ヘッド重心まわりの角速度ベクトルを $\boldsymbol{\omega}_{head}$ とすると、重心まわりのトルク $\{\mathbf{T}_{head}\}$ は、以下の式によって算出することができる。

$$\{\mathbf{T}_{head}\} = [\mathbf{J}_{head}][\dot{\tilde{\boldsymbol{\omega}}}_{head}]\boldsymbol{\omega}_{head} + [\mathbf{J}_{head}]\boldsymbol{\omega}_{head} \quad (3.50)$$

3.2.3 グリップの並進加速度がクラブヘッドに与える慣性トルクの考慮

シミュレーションによるシャフトの変形挙動の算出精度向上を目的として、グリップの

$$[\mathbf{M}_{all2}]\{\ddot{\mathbf{d}}_{all}\} + [\mathbf{K}_{all}]\{\mathbf{d}_{all}\} = \{\mathbf{F}_{all2}\} \quad (3.54)$$

を得る.

3.2.5 プレーヤの把持位置を再現したゴルフクラブの並進加速度の補正

3.2.4 節では、プレーヤがゴルフクラブを把持した状態を再現するためにグリップ把持モデルを作成した。本節では、プレーヤがゴルフクラブを把持する位置を再現するための補正式を作成する。これまで構築したシミュレーションモデルは、原点をグリップエンド部としている。そのため、シミュレーションによってゴルフクラブをスイングさせた際は、グリップエンド部を基準とした回転運動が行われる。一方、実施のゴルフスイング動作時は、図 3.6 に示すようにグリップを把持する位置を中心にゴルフクラブが回転運動を行う。そのため、式(3.45)、式(3.46)、式(3.49)、式(3.51)におけるグリップエンド部の並進加速度 $\ddot{\mathbf{x}}_1$ から、回転中心の差分によって発生する回転運動成分を補正する必要がある^{(50), (51)}。そこで、グリップエンド部から把持位置までの位置ベクトルを $\overline{\mathbf{GP}}$ とすると、補正したグリップ並進加速度 $\ddot{\mathbf{x}}'_1$ は以下の式によって算出することができる。

$$\ddot{\mathbf{x}}'_1 = [\tilde{\mathbf{e}}_0]\ddot{\mathbf{x}}_1 - [\tilde{\mathbf{e}}_0][S_{grip}][\tilde{\omega}_{grip}][\tilde{\omega}_{grip}]\mathbf{GP} - [\tilde{\mathbf{e}}_0][S_{grip}][\dot{\tilde{\omega}}_{grip}]\mathbf{GP} \quad (3.55)$$

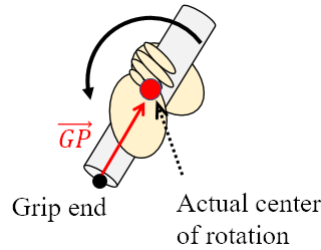


図 3.6 ゴルフスイング動作時の回転中心

3.2.6 シャフトの減衰を考慮したゴルフクラブの運動方程式の構築

ゴルフスイング動作中のゴルフクラブシャフトは弾性変形を行うが、ゴルフスイング動作終了後は無変形状態に戻る。これはシャフト部に減衰が働いていることを示す。そのため、構築したゴルフクラブモデルにおいても、シャフト部に減衰を与えた運動方程式を構築する^{(10), (40)~(51)}。式(3.54)における質量マトリクスより、シャフト部の質量マトリクス $[\mathbf{M}_{shaft}]$ 、剛性マトリクス $[\mathbf{K}_{shaft}]$ を抽出し、 $[\mathbf{M}_{shaft}]$ 、 $[\mathbf{K}_{shaft}]$ から特性方程式を求め、シャフト部のモードマトリクス $[\boldsymbol{\phi}]$ 、固有角振動数を対角にまとめたマトリクス $[\boldsymbol{\Omega}]$ を算出する。次に、モード減衰比を算出し、対角にまとめたマトリクス $[\boldsymbol{\zeta}]$ を算出する。算出したマトリクスを用いると、減衰マトリクス $[\mathbf{C}_{all2}]$ は以下の式によって求められる^{(40), (41)}。

$$[C_{all2}] = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{36 \times 36} & \mathbf{0}_{36 \times 96} \\ \mathbf{0}_{96 \times 36} & 2M_{shaft}[\phi][\zeta][\Omega][\phi]^T M_{shaft} \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

式(3.55)より，減衰を考慮したクラブの運動方程式は，以下の式となる．

$$[M_{all2}]\{\ddot{\mathbf{d}}_{all}\} + [C_{all2}]\{\dot{\mathbf{d}}_{all}\} + [K_{all2}]\{\mathbf{d}_{all}\} = \{\mathbf{F}_{all2}\} \quad (3.54)$$

3.3 短時間フーリエ変換による時間一周波数解析

本節では，トルクデータなどの時系列で変化するゴルフスイング動作データの評価に用いる短時間フーリエ変換について説明する．時系列データの解析には，最大値を抽出し評価する手法や⁽⁵²⁾，時間積分によって得られた値を評価する方法⁽⁵³⁾が挙げられる．一方，ゴルフスイング動作データは時系列に変化を行うため，最大値の抽出や時間積分では時系列データの波形の形状の差を表現できない．そこで，先行研究ではフーリエ変換によって得られた値を評価する手法が報告されている⁽³⁴⁾，⁽⁵⁴⁾．フーリエ変換を行うことで波形の形状を周波数領域におけるスペクトルの強度で評価することが可能となるが，ゴルフスイング動作は常に変化するため，波形の形状の変化を時系列で確認することは困難である．そこで，本研究では，時系列的に周波数変動を確認（時間一周波数解析）することができる短時間フーリエ変換を用いる⁽⁵⁵⁾．短時間フーリエ変換の特徴は，時間軸方向に一定時間幅の窓関数をシフトしながらフーリエ変換を適用し，時間と波形の周波数変動の関係を明らかであることである．元の波形を $\mathbf{g}(t)$ とすると，短時間フーリエ変換後の波形 $\mathbf{G}(\tau, f)$ は以下の式によって求められる．

$$\mathbf{G}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{g}(t) \mathbf{w}(t - \tau) e^{-j2\pi f t} dt \quad (3.55)$$

式(3.55)において， f はサンプリング周波数を示し， $\mathbf{w}(t - \tau)$ は時刻 $(i - i_m)$ における窓関数を示す．また， i_m は時間軸方向のシフト量に相当し，この値を変化させることで，時間方向に対する波形の周波数変動を確認することができる．

3.4 連続ウェーブレット変換による時間一周波数解析

3.3節では，時間一周波数解析を行うために短時間フーリエ変換を導入した．短時間フーリエ変換は，窓関数の幅とシフト量のパラメータ調整を行うことで解析が可能となるが，時間分解能が窓関数区間に依存する．そのため，時間分解能を上げようとするとき，窓関数区間を狭く設定する必要がある．しかし，窓関数区間を狭くすることは，周波数分解能の低下を引き起こす⁽⁵⁵⁾．また，短時間フーリエ変換は窓関数を用いて解析するために，短時間フーリ

エ変換結果には、 $g(t)$ の性質に加え、窓関数 $w(t - \tau)$ の性質も反映される可能性がある⁽⁵⁶⁾、また、時間分解能向上のために $g(t)$ の伸縮を行っても $G(\tau, f)$ の伸縮には対応しない。そこで、時間分解能を向上させるためには窓関数を含めた波形の全体を伸縮可能な連続ウェーブレット変換を用いる。二乗可能な信号 $g(t)$ について、

$$\int_{-\infty}^{\infty} |g(t)|^2 dt < \infty \quad (3.56)$$

が成り立つ場合、 $g(t)$ に対する連続ウェーブレット変換は以下の式で求められる。

$$W_g(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (3.57)$$

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (3.58)$$

式(3.57)内、 $W_g(a, b)$ は連続ウェーブレット変換の結果を示し、式(3.58)内、 $\psi_{a,b}(t)$ はウェーブレット関数を示す。また、式(3.57)内、*は複素共役を示す。ウェーブレット関数は平均値が 0 で有限の継続時間の関数である。 a と b はそれぞれスケールパラメータ、シフトパラメータを示し、スケールパラメータ a は関数の伸縮操作のための係数であり、値を大きくすることでウェーブレット関数が時間軸方向に引き伸ばされ、値を小さくすることで時間軸方向に縮小される。つまり、値が大きい場合は低周波数成分の解析が可能であり、値が小さい場合は高周波数成分の解析が可能となる。また、シフトパラメータ b はウェーブレット関数を時間軸方向にシフトさせるための係数である⁽⁵⁵⁾。

3.5 特異値分解を用いた特異スペクトル解析

3.3 節、3.4 節では、時系列で得られた一つのデータに対する時間一周波数解析方法として、短時間フーリエ変換、連続ウェーブレット変換について述べた。一方、全身でのゴルフスイング動作やシャフトの変形挙動を解析する際は、協調動作の組み合わせとして考えるため、協調動作を抽出し比較することが重要である⁽²⁹⁾。そこで、特異値分解と呼ばれる、信号を分解し復元を行うことが可能な特異スペクトル解析法を用いて解析を行う⁽⁵⁷⁾。特異値分解は軌道行列の生成、分解、波形の復元の 3 ステップにより行われる。

3.5.1 軌道行列の生成

まず、軌道行列の生成について説明する。計測された観測信号を $[M_o]$ とする。 $[M_o]$ は行数

をデータ点数 N_R とし、列数は解析節点数 N_C に自由度3を掛け合わせた $N_R \times 3N_C$ のマトリクスである。計測された観測行列をもとに軌道行列 $[\mathbf{R}_0]$ を作成する。全身動作解析時においては、特異値分解時における基準点を静止状態に近づけるため、観測信号より静止状態時の位置ベクトルを $2N_R$ 点並べた静止信号行列 $[\mathbf{M}_R]$ を作成する。さらに、特異値解析の分解能を向上させるために、 $[\mathbf{M}_o]$ を時系列方向に反転させた行列を $[\mathbf{M}_{o,t}]$ とすると、軌道行列を以下のように構成する⁽²⁹⁾。

$$[\mathbf{R}_a] = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_R \\ \mathbf{M}_o \\ \mathbf{M}_{o,t} \\ \mathbf{M}_R \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

3.5.2 軌道行列の分解

式(3.59)の軌道行列について $[\mathbf{R}_a]$ の時間方向に平均を取り、平均値を $[\mathbf{R}_a]$ と同サイズに複製した行列を $[\mathbf{R}_0]$ とすると、軌道行列への特異値分解は以下の通りになる⁽²⁹⁾。

$$[\mathbf{R}_a] - [\mathbf{R}_0] = \sum_{n=1}^{3N_C} \mathbf{U}_{(n)} \mathbf{\Gamma}_{(n)} \mathbf{V}_{(n)}^T \quad (3.60)$$

式(3.60)において、 $\mathbf{U}_{(n)}$ 、 $\mathbf{\Gamma}_{(n)}$ 、 $\mathbf{V}_{(n)}^T$ はそれぞれ、 $[\mathbf{R}_a] - [\mathbf{R}_0]$ における第 n モードの左特異ベクトル、特異値ベクトル、右特異ベクトルを示す。 $\mathbf{V}_{(n)}$ は位置情報を表すベクトルであり、 $\mathbf{U}_{(n)}$ は $\mathbf{V}_{(n)}$ の時間情報を持つベクトルを示す。

3.5.3 波形の復元

式(3.60)によって軌道行列を分解した結果から、波形を復元する。式(3.60)より、第 k モードにおける波形 $[\mathbf{R}_k]$ は

$$[\mathbf{R}_k] = [\mathbf{R}_0] + \mathbf{U}_{(k)} \mathbf{\Gamma}_{(k)} \mathbf{V}_{(k)}^T \quad (3.61)$$

となる。式(3.61)によって、第 k モードにおける波形を確認することができる。また、第1～第 k モードを重ねることで、第 k モードまでの波形を再現することができる。第1モードから第 k モードまで重ね合わせた波形 $[\mathbf{R}_{k_total}]$ は以下の式によって得られる⁽²⁹⁾。

$$[\mathbf{R}_{k_total}] = [\mathbf{R}_0] + \sum_{n=1}^k \mathbf{U}_{(n)} \mathbf{\Gamma}_{(n)} \mathbf{V}_{(n)}^T \quad (3.62)$$

第4章 シャフトの質量がプレーヤの発揮トルクに与える影響調査

4.1 諸言

ゴルフは屋外で楽しむことができるスポーツであり、ハンディキャップ制のため、老若男女問わずスコアを競うことができる。ゴルフプレイ時において、同伴プレーヤが見守る中、正確なショットを行った際の気持ち良さも魅力である。正確なショットのために、ゴルフクラブメーカーはクラブヘッドの体積を増加したゴルフクラブの開発を行ってきたが、過度な正確性を持つクラブはプレーの面白さを軽減させる恐れがあるため、2008年に制定されたルールによってクラブヘッドの設計値に上限が設定された。そのため、ゴルフクラブメーカーはプレーヤに適した製品開発に加え、プレーヤのゴルフスイング動作に合わせたゴルフクラブを提示する「フィッティング」と呼ばれるサービスを展開した⁽²⁴⁾。「フィッティング」では、ゴルフクラブの部材の中でも種類が一番多いシャフトが主に提案され、シャフトの設計値では打球後のゴルフボール軌跡情報に特に影響を与えると考えられる質量、調子（キックポイント）が提案される。そのため、「フィッティング」を行う上では、質量やキックポイントの変化がゴルフスイングに与える影響を明らかにする必要がある。

従来の研究では、ゴルフスイング動作中にプレーヤが発揮するトルクにフーリエ変換を行い、シャフトの質量の変化が発揮したトルクに与える影響を周波数領域において確認を行った。その結果、ゴルフスイング動作中に発揮したトルクは、複数の周波数成分を持つトルクが重なりあって構成され、質量変化によってそれぞれのトルクが変化する可能性が得られた⁽³⁴⁾。一方で、フーリエ変換は発揮したトルクを定常状態であると仮定するが、実際のゴルフスイング動作は過渡状態となる。そのため、発揮したトルクの解析では時間一周波数変化を確認することが可能な短時間フーリエ変換が望ましいが、従来の研究では実施されていない。

そこで、本章では、シャフトの設計値において、プレーヤのゴルフスイングに特に影響を与えると考えられるシャフトの質量に着目し、シャフトの質量の変化が発揮したトルクに与える影響を明らかにする。まず、プレーヤがゴルフスイング動作中に発揮したトルクデータに短時間フーリエ変換を行い、ゴルフスイング動作中のスペクトログラムの時間変化について確認し、シャフトの質量の変化がスペクトログラムに与える影響について明らかにする。次に、ゴルフスイング動作の結果であるシャフト先端速度に着目し、シャフトの質量変化によるスペクトログラムの変化傾向とシャフト先端速度の変化傾向との関係を明らかにする。

4.2 ゴルフスイング動作計測実験

ゴルフスイング動作中の発揮トルクを算出するために、2.1節～2.4節に記載のゴルフスイング動作計測実験を行った。被験者は右利きの男性ゴルフア29名を対象とした。対象とした被験者の情報を表4.1に示す。計測に使用したゴルフクラブはクラブヘッドとシャフトが着脱可能な機構を備えており、クラブヘッドは被験者が通常使用しているものを使用し

た. シャフトについては, 被験者が通常使用しているシャフトに加え, 質量のみ増加 (同一フレックス, 同一キックポイント) したシャフトを用いて計測を行った. 計測に使用したシャフトはどちらも市販されているものである. 先行研究では, シャフト質量を 10 g 増加させることでゴルフスイング動作に影響を与えることを報告している⁽⁵⁸⁾. また, 20 g 以上の増加では被験者が通常通りのゴルフスイング動作を行えない可能性があるため, 本研究ではシャフト質量の増加量を 10 g とした. 質量の変化によって, ゴルフスイング動作が過度に変化しないことを考慮し, 計測数は各シャフト 5 試行とした. また, 打感や弾道の結果によって被験者がゴルフスイング動作を調整しないようにスポンジボールを用いて計測を行った.

表 4.1 被験者情報

No.	Height [m]	Weight [kg]	Age group	Average Score	No.	Height [m]	Weight [kg]	Age group	Average Score
1	1.74	70	40	87	16	1.70	75	40	90
2	1.77	82	40	92	17	1.74	75	20	75
3	1.69	92	40	87	18	1.65	60	20	108
4	1.77	74	40	85	19	1.85	72	20	108
5	1.73	75	40	95	20	1.62	63	30	80
6	1.70	65	50	94	21	1.85	70	40	102
7	1.76	70	50	82	22	1.81	95	30	95
8	1.80	70	50	97	23	1.76	90	60	90
9	1.70	65	30	95	24	1.64	63	30	95
10	1.75	75	40	90	25	1.73	80	50	99
11	1.79	67	50	87	26	1.67	57	20	89
12	1.70	65	50	90	27	1.67	76	20	92
13	1.63	60	40	85	28	1.66	62	40	71
14	1.75	63	30	100	29	1.70	65	20	87
15	1.72	79	50	82					

4.3 ゴルフスイング中に発揮したトルクの算出

ゴルフスイング動作計測実験実施後、2.6 節、2.7 節に記載のグリップ座標系、腕座標系を構築し、2.8 節より加速度、角速度、角加速度を算出した。算出した結果をもとに、3.1 節に記載の逆動力学計算を行いプレーヤがゴルフスイング動作中に発揮した腕重心まわりトルク、クラブ重心まわりトルクを算出した⁽³⁴⁾。算出した結果の一例として、被験者番号 1 における発揮トルクの算出結果を図 4.1(a)~(f)に示す。図 4.1 内、* (アスタリスク) はそれぞれ Top, Down 9, Impact タイミングを示す。図 4.1 より、ゴルフスイング動作中に発揮したトルクは時系列で変化しており、時間毎に波形の周波数特性が変化していると考えられる。ここで、各軸成分におけるトルクの役割について確認する。X 軸成分は腕、クラブを飛球線方向へ回転させるトルク、Y 軸成分は腕、クラブを鉛直方向へ回転させるトルク、Z 軸成分は腕、クラブを左右方向へ回転させるトルクを示す。

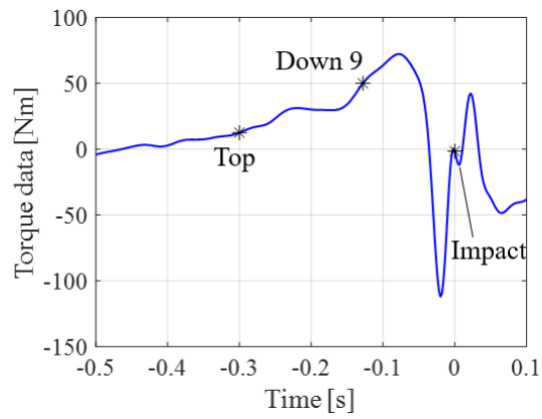


図 4.1(a) 腕重心まわりトルク X 軸成分 (被験者番号 1)

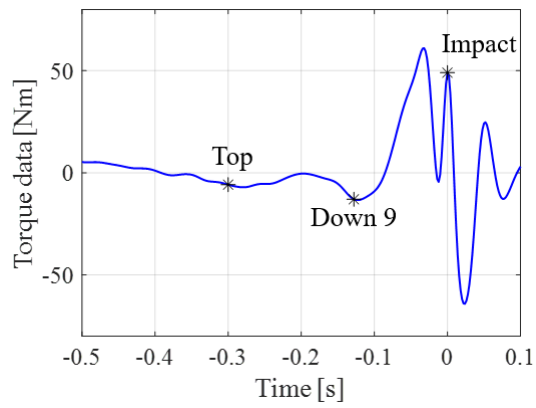


図 4.1(b) 腕重心まわりトルク Y 軸成分 (被験者番号 1)

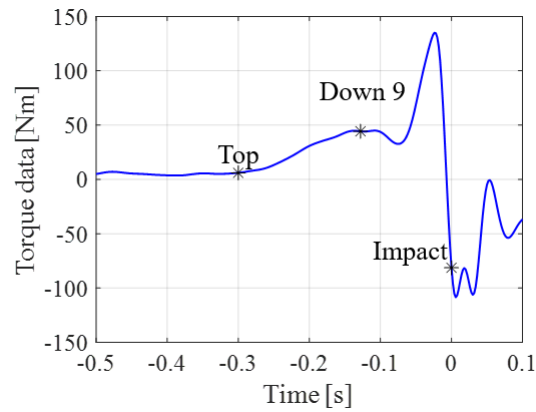


図 4.1(c) 腕重心まわりトルク Z 軸成分 (被験者番号 1)

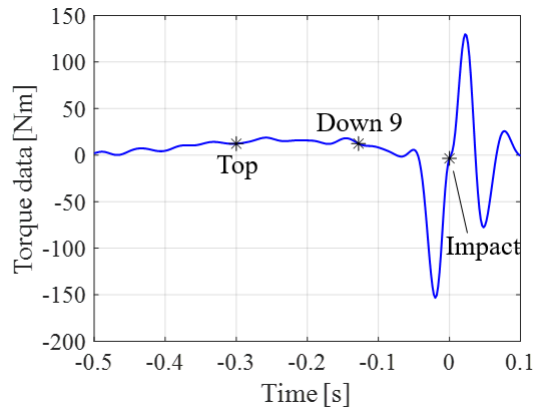


図 4.1(d) クラブ重心まわりトルク X 軸成分 (被験者番号 1)

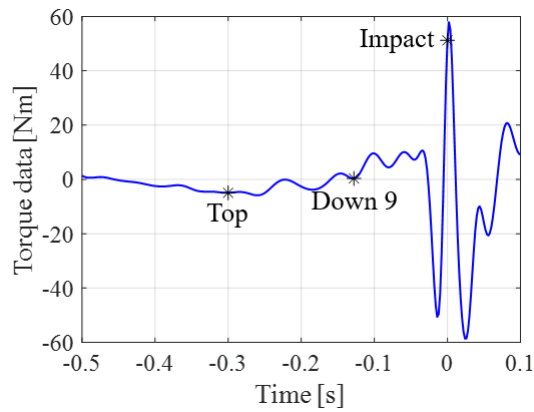


図 4.1(e) クラブ重心まわりトルク Y 軸成分 (被験者番号 1)

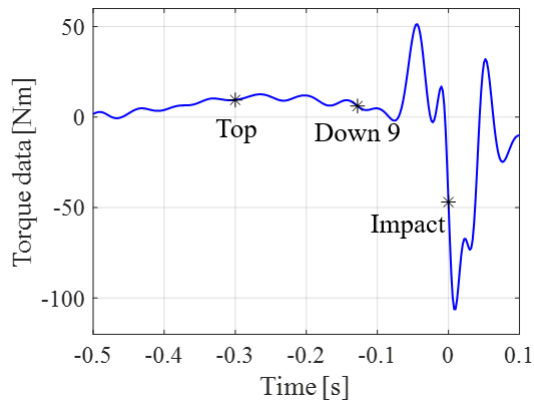


図 4.1(f) クラブ重心まわりトルク Z 軸成分 (被験者番号 1)

4.4 短時間フーリエ変換による発揮トルクの時間一周波数解析

4.3 節で算出したゴルフスイング動作中の発揮トルクにおける時間一周波数解析を行うため、3.3 節に記載の短時間フーリエ変換を適用する⁽⁵⁹⁾、⁽⁶⁰⁾。短時間フーリエ変換では、窓関数によって波形を抽出するため、時間分解能と周波数分解能は二律背反である。そのため、窓関数区間、窓関数の時間軸方向へのシフト量（オーバーラップ数）を事前に複数回解析を

行い、波形の特徴を適切に抽出するための条件を決定する必要がある。そのため、事前に窓関数区間、オーバーラップ数について検証を行った。事前検証によって決定した各トルク成分における窓関数区間、オーバーラップ数を表 4.2 に示す。

表 4.2 事前検証によって設定した窓関数区間，オーバーラップ数

Torque type	Axis	Window width [s]	Number of overlaps [s]
Torque around center of gravity of arm	X	0.128	0.120
	Y	0.128	0.120
	Z	0.168	0.160
Torque around center of gravity of club	X	0.128	0.120
	Y	0.128	0.120
	Z	0.128	0.120

表 4.2 に示す条件によって、被験者が発揮したトルクに対して短時間フーリエ変換を行った。短時間フーリエ変換は、Matlab 2021a (The MathWorks, マサチューセッツ州) の spectrogram 関数を用いて行った。以後、特に記載が無い限り、短時間フーリエ変換は Matlab 2021a の spectrogram 関数によって行う。短時間フーリエ変換の結果の一例として、図 4.1 に示す被験者が発揮したトルクに短時間フーリエ変換を行った結果をカラーマップにて表した結果を図 4.2(a)~(f) に示す。カラーマップを用いてスペクトログラム値の時間変化について確認を行うが、カラーマップでの評価は、スペクトログラム値の強弱が曖昧となる。そこで、本研究では、スペクトログラム値の強度が大きい範囲は最大スペクトログラム値の 0.5 倍以上を示す範囲として確認を行った。スペクトログラム値の強度が大きい範囲を抽出した（最大スペクトログラム値の 0.5 倍未満を 0 とした）結果を図 4.3(a)~(f) に示す。図 4.3 より、各トルクにおいて強度が大きい範囲を抽出した結果を表 4.3 に示す。

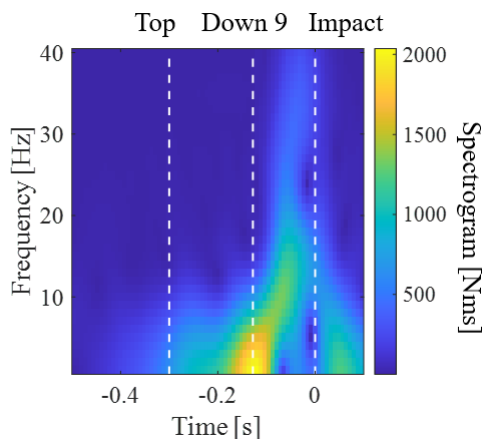


図 4.2(a) 腕重心まわりトルク
X 軸成分への短時間フーリエ
変換結果 (被験者番号 1)

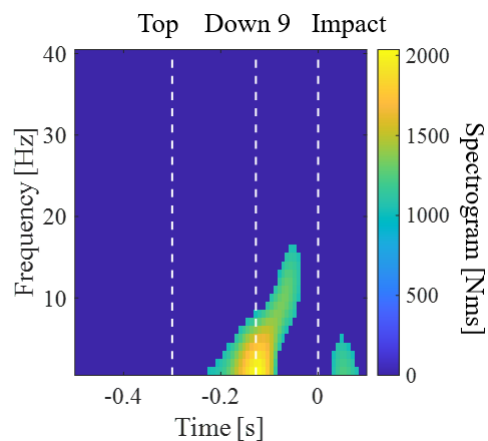


図 4.3(a) 図 4.2(a)においてスペクトロ
グラム値の強度が高い範囲を
抽出した結果

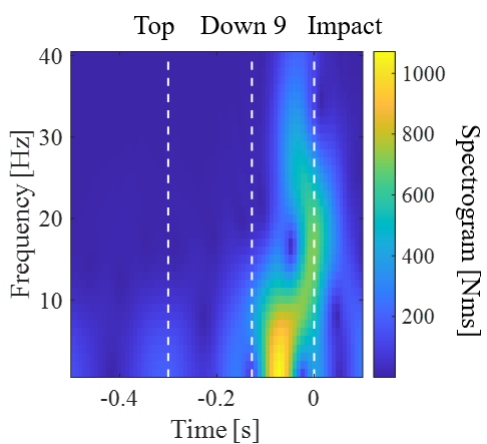


図 4.2(b) 腕重心まわりトルク
Y 軸成分への短時間フーリエ
変換結果 (被験者番号 1)

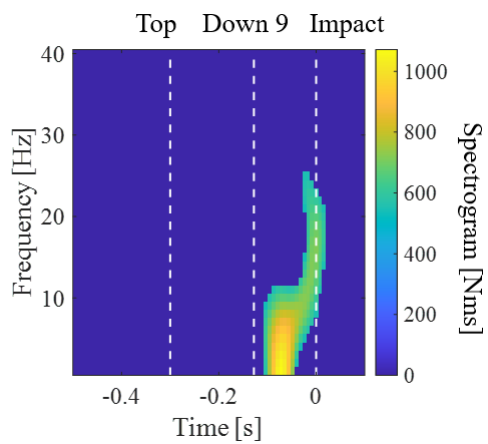


図 4.3(b) 図 4.2(b)においてスペクトロ
グラム値の強度が高い範囲を
抽出した結果

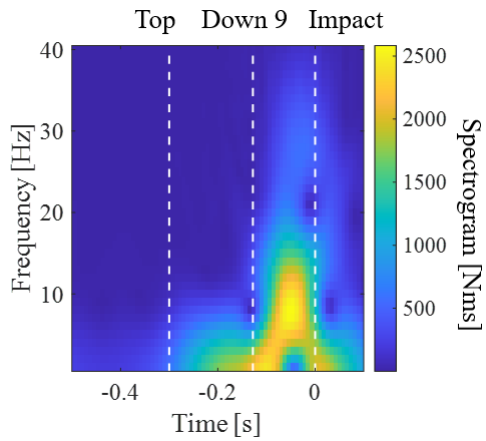


図 4.2(c) 腕重心まわりトルク
Z 軸成分への短時間フーリエ
変換結果 (被験者番号 1)

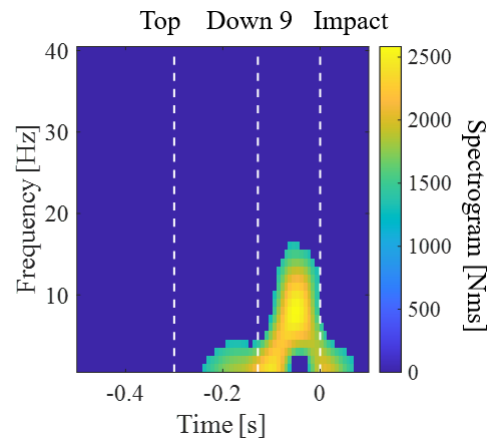


図 4.3(c) 図 4.2(c)においてスペクトロ
グラム値の強度が高い範囲を
抽出した結果

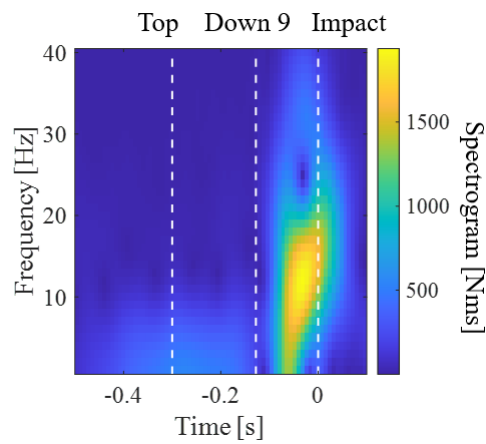


図 4.2(d) クラブ重心まわりトルク
X 軸成分への短時間フーリエ
変換結果 (被験者番号 1)

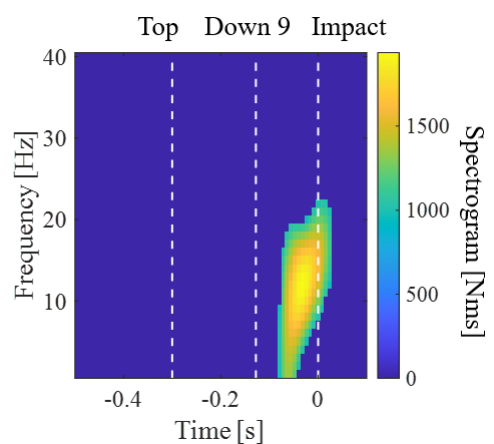


図 4.3(d) 図 4.2(d)においてスペクトログ
ラム値の強度が高い範囲を抽
出した結果

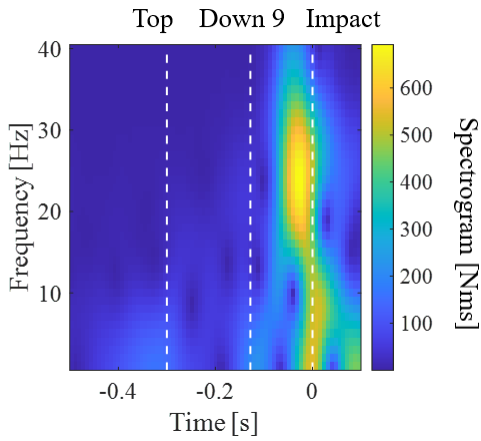


図 4.2(e) クラブ重心まわりトルク Y 軸成分への短時間フーリエ変換結果 (被験者番号 1)

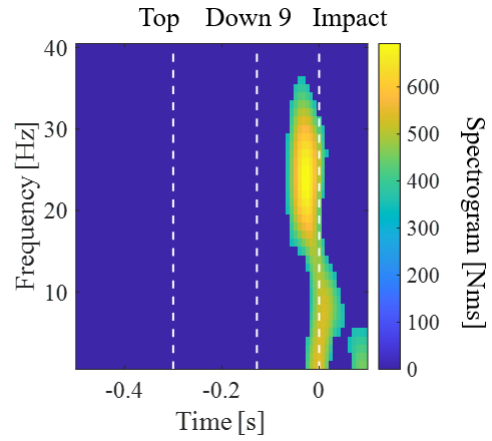


図 4.3(e) 図 4.2(e)においてスペクトログラム値の強度が高い範囲を抽出した結果

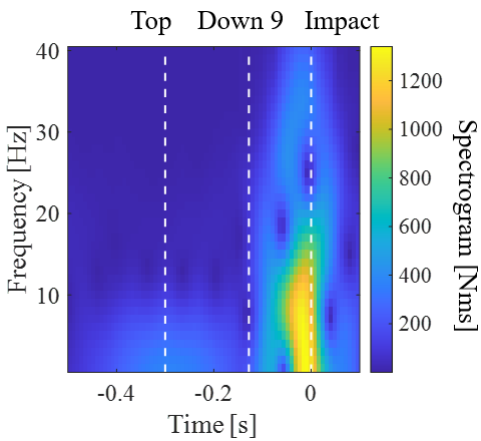


図 4.2(f) クラブ重心まわりトルク Z 軸成分への短時間フーリエ変換結果 (被験者番号 1)

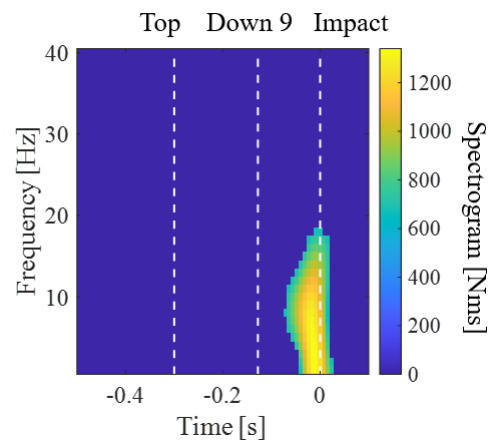


図 4.3(f) 図 4.2(f)においてスペクトログラム値の強度が高い範囲を抽出した結果

表 4.3 スペクトログラム値の強度が大きい範囲の抽出結果

Torque type	Axis	Top~Down 9	Down 9~Impact
Torque around center of gravity of arm	X	1 Hz~7 Hz	1 Hz~16 Hz
	Y	-	1 Hz~25 Hz
	Z	1 Hz~4 Hz	1 Hz~16 Hz
Torque around center of gravity of club	X	-	1 Hz~20 Hz
	Y	-	1 Hz~36 Hz
	Z	-	1 Hz~18 Hz

図 4.3, 表 4.3 より, 被験者番号 1 におけるトルクについて確認する. 腕重心まわりトルクについては, X 軸成分, Z 軸成分が Top~Down 9 (ダウンスイング前期) において 1 Hz~7 Hz, 1 Hz~4 Hz におけるスペクトログラムの強度が大きくなっており, Down 9~Impact (ダウンスイング後期) においては X 軸成分, Z 軸成分共に 1 Hz~16 Hz におけるスペクトログラムの強度が大きくなっていることがわかる. また, Y 軸成分はダウンスイング後期において 1 Hz~25 Hz のスペクトログラムの強度が大きくなることがわかった. 次に, クラブ重心まわりトルクについては, X 軸成分, Z 軸成分がダウンスイング後期において 1 Hz~20 Hz, 1 Hz~18 Hz におけるスペクトログラムの強度が大きくなり, Y 軸成分は Impact 付近で 1 Hz~36 Hz の広範囲にわたってスペクトログラムの強度が大きくなることがわかった. この結果から, 被験者番号 1 のゴルフスイング動作において, 腕重心まわりトルクはダウンスイング前期で X 軸成分, Z 軸成分の低周波のトルクが発揮され, 特にダウンスイング後期に低周波から高周波の全軸成分のトルクが発揮されることがわかる. また, クラブ重心まわりトルクは主にダウンスイング後期で低周波から高周波の全軸成分のトルクが発揮され, 特に, Y 軸成分では広範囲の周波数成分をもつトルクが発揮されることを示している.

被験者番号 1 と同様に, 全被験者においてスペクトログラム値の強度が大きい範囲を抽出した. 腕重心まわりトルクについて抽出した結果を表 4.4(a), クラブ重心まわりトルクについて抽出した結果を表 4.4(b)に示す. 表 4.4 に示す数値は, スペクトログラム値の強度が大きい範囲を示し, 1~7 で示す場合は 1 Hz~7 Hz のスペクトログラムの強度が大きいことを示す. 表 4.4 より, スペクトログラム値の強度が大きい範囲は被験者によって異なる結果を示し, 発揮するトルクの周波数特性が異なることがわかる. 一方, 腕重心まわりトルクの X 軸成分については, 被験者番号 25, 29 を除く全被験者においてダウンスイング前半で 1 Hz~7 Hz のスペクトログラム値の強度が大きくなることがわかる. また, ダウンスイング後半では, 全被験者で腕重心まわりトルク, クラブ重心まわりトルクともに広い周波数範囲でスペクトログラムの強度が大きくなることがわかる. 腕重心まわりトルクの X 軸成分は, 腕を飛球線方向へ回転させるトルクの成分であるため, 1 Hz~7 Hz の周波数をもつトルクでダウンスイングを始動していると考えられる. また, ダウンスイング後半については, 全被験者が低周波から高周波にわたる広い周波数範囲でトルクを発揮し, 腕とゴルフクラブを加速していると考えられる.

表 4.4(a) スペクトログラム値の強度が大きい範囲を抽出した結果
(腕重心まわりトルク)

No.	Top~Down 9 [Hz]			Down 9~Impact [Hz]		
	X-axis	Y-axis	Z-axis	X-axis	Y-axis	Z-axis
1	1~7	-	1~4	1~16	1~25	1~16
2	1~8	-	-	1~35	1~14	1~40
3	1~7	1~2	1~3	1~16	1~13	1~23
4	1~7	1~8	1	1~9	1~12	1~17
5	1~7	1~2	-	1~24	1~15	1~26
6	1~7	-	1~2	5~34	10~32	1~40
7	1~7	-	-	1~9	1~24	1~26
8	1~6	1~3	-	1~23	1~26	1~23
9	1~7	1~8	-	1~17	1~23	1~25
10	1~6	-	-	1~40	1~21	1~40
11	1~7	-	1~2	1~14	1~14	1~18
12	1~7	-	-	3~19	1~27	1~29
13	1~8	-	1~5	1~15	1~31	1~18
14	1~8	-	1~3	1~15	1~13	1~20
15	1~7	-	1~5	3~14	1~15	1~18
16	1~7	1~4	1~5	1~8	1~23	1~24
17	1~7	-	1~7	1~16	1~16	1~14
18	1~6	1~7	-	5~28	1~22	1~33
19	1~7	-	1~5	1~11	1~13	1~17
20	1~7	1~7	1~6	1~11	1~11	1~17
21	1~7	-	-	1~15	1~27	1~25
22	1~7	1~5	1~4	1~13	1~21	1~23
23	1~5	-	-	1~39	6~40	1~40
24	1~7	-	1~2	1~35	6~32	1~39
25	-	-	-	1~5	1~8	1~15
26	1~7	-	1~5	1~8	1~9	1~15
27	1~7	1~4	1~6	1~11	1~10	1~20
28	1~7	1~5	1~6	-	1~19	1~19
29	-	1~4	1~6	1~8	1~5	1~15

表 4.4(b) スペクトログラム値の強度が大きい範囲を抽出した結果
(クラブ重心まわりトルク)

No.	Top~Down 9 [Hz]			Down 9~Impact [Hz]		
	X-axis	Y-axis	Z-axis	X-axis	Y-axis	Z-axis
1	-	-	-	1~20	1~36	1~18
2	-	-	-	1~18	1~23	1~23
3	-	-	-	1~20	1~16	1~11
4	-	1~5	-	1~17	1~12	1~12
5	-	-	-	1~19	1~12	1~11
6	-	-	-	1~37	1~31	10~37
7	-	-	-	1~15	1~24	1~21
8	-	-	-	1~18	1~31	1~27
9	-	-	-	1~18	1~13	1~15
10	-	-	-	1~28	1~25	1~25
11	-	1~6	-	1~19	1~10	1~15
12	-	-	-	1~18	1~33	1~27
13	-	-	-	1~16	1~33	1~25
14	-	-	-	1~18	1~15	1~25
15	-	-	-	1~17	1~9	1~14
16	1~4	-	1~2	1~15	1~31	1~24
17	-	-	-	1~19	1~30	1~14
18	-	-	-	1~20	1~20	1~13
19	-	1~5	-	1~14	1~25	1~14
20	-	-	-	1~13	1~26	1~17
21	1~4	1~7	-	1~15	1~31	1~14
22	-	-	-	1~16	1~28	1~13
23	-	-	-	1~18	1~16	1~12
24	-	-	-	1~24	1~32	1~27
25	1~3	-	-	1~20	1~32	1~24
26	-	-	-	1~25	1~33	1~18
27	-	-	-	1~20	1~35	1~15
28	-	-	-	1~21	1~28	1~15
29	1~6	-	1~4	1~17	1~11	1~14

4.5 シャフトの質量増加によるスペクトログラムが最大値を示す時間の変化について

4.4 節によって得られた短時間フーリエ変換の結果を用いてシャフトの質量増加がスペクトログラム値に与える影響を検証することで、発揮したトルクに与える影響について確認する^{(59), (60)}。まず、通常使用のシャフトと質量増加時のシャフトにおいて被験者が発揮したトルクを比較した。一例として、被験者番号 1 におけるトルクの比較結果を図 4.4(a)~(f)に示す。図 4.4 において、青線で示す結果は被験者が通常使用しているシャフトを用いてスイングした結果を示し、赤線で示す結果は質量を 10 g 増加したシャフトを用いてスイングした結果を示す。

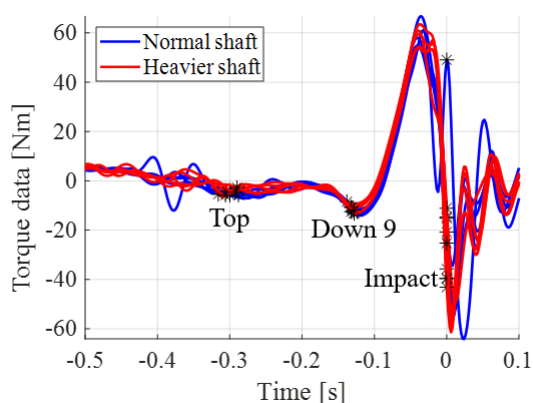


図 4.4(a) 質量変化時の腕重心まわりトルク X 軸成分比較結果 (被験者番号 1)

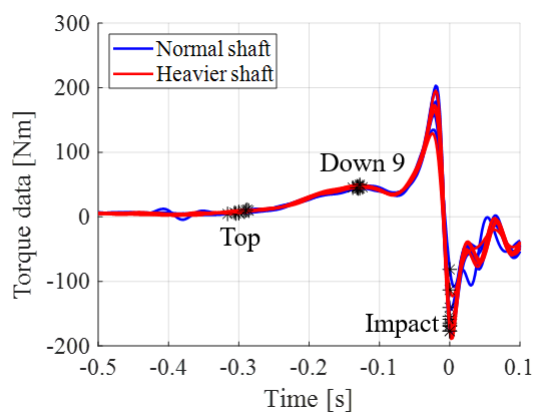


図 4.4(b) 質量変化時の腕重心まわりトルク Y 軸成分比較結果 (被験者番号 1)

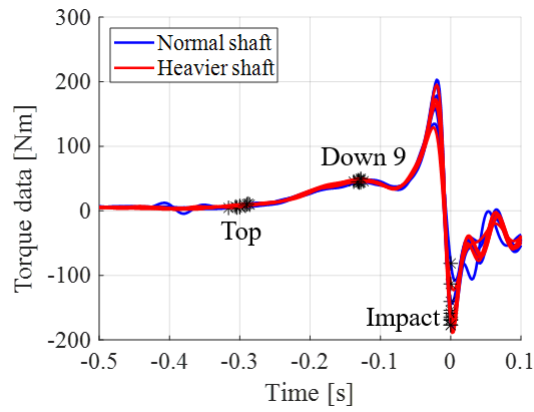


図 4.4(c) 質量変化時の腕重心まわりトルク Z 軸成分比較結果 (被験者番号 1)

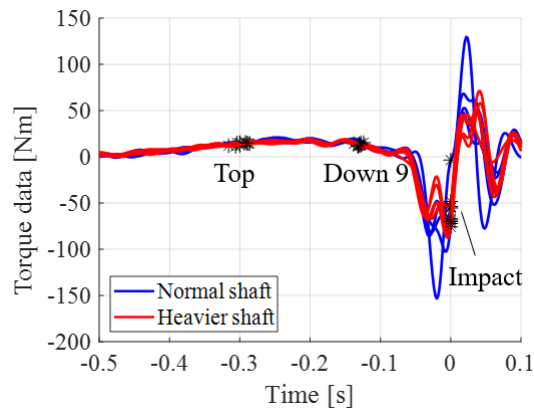


図 4.4(d) 質量変化時のクラブ重心まわりトルク X 軸成分比較結果 (被験者番号 1)

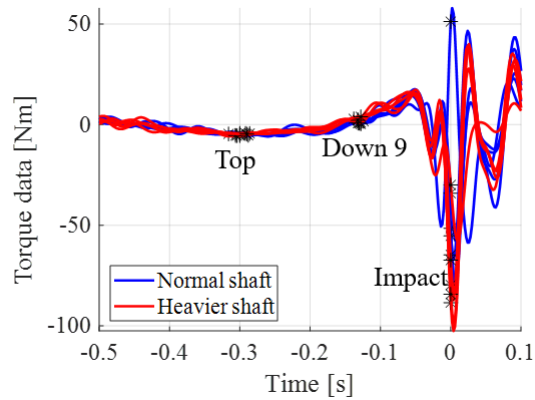


図 4.4(e) 質量変化時のクラブ重心まわりトルク Y 軸成分比較結果 (被験者番号 1)

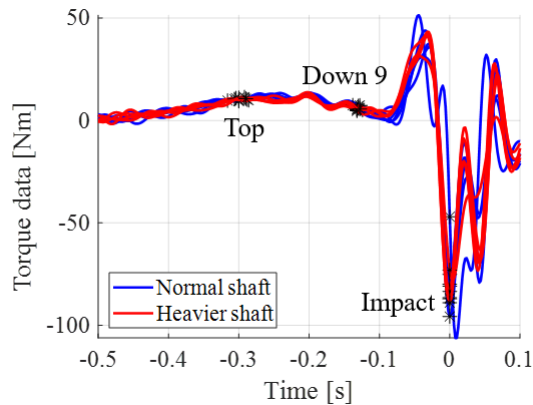


図 4.4(f) 質量変化時のクラブ重心まわりトルク Z 軸成分比較結果 (被験者番号 1)

図 4.4(a)~(f)より, 質量増加により発揮したトルクに差が見られることがわかる. これら差について短時間フーリエ変換結果を用いて抽出を試みるが, 図 4.2, 図 4.3 に示すカラーマップでは複数データを重ねて表示し比較を行うことが困難となる. そこで, 各周波数におけるスペクトログラムの時系列データを用いて比較を行う^{(59), (60)}. 一例として, 被験者番号 1 の腕重心まわりトルク X 軸成分における短時間フーリエ変換結果より, 3Hz におけるスペクトログラム値の時系列データを用いて比較した結果を図 4.5 に示す.

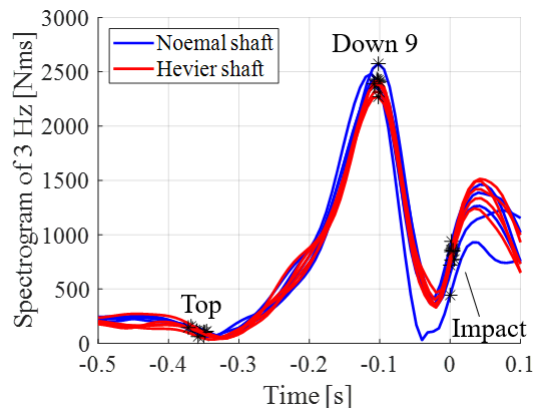


図 4.5 3Hz のスペクトログラム時系列データ比較結果
(被験者番号 1 の腕重心まわりトルク X 軸成分)

図 4.5 に示すスペクトログラムの時系列データを用いて, シャフトの質量増加が発揮したトルクに与える影響を確認する. シャフトの質量増加によって, トルクの発揮タイミング, トルクの発揮量が変わると考えられるため, 発揮タイミングについてはスペクトログラムが最大値を示す時間, 発揮量についてはスペクトログラムの最大値について統計的手法を用いて差を確認する⁽⁵⁹⁾. まず, スペクトログラムが最大値を示す時間の変化について確認を行った. 腕重心まわりトルク, クラブ重心まわりトルクについて, 各周波数のスペクトロ

グラムが最大値を示す時間を抽出した。また、確認する周波数については計算量を削減するため、1Hz, 3Hz, 5Hz, …, 39Hz の 2Hz 区切りの 20 水準とした。全試行分の抽出した結果を応答変数とし、シャフト質量 (2 水準), 試行 (5 試行), トルク成分 (2 種×3 軸成分), 周波数 (20 水準) を因子とする多因子分散分析を行った。多因子分散分析は, Matlab 2021a (The MathWorks, マサチューセッツ州, アメリカ合衆国) の `anovan` 関数を用いた。多因子分散分析を行った結果, シャフト質量を因子とする p 値 (帰無仮説: スペクトログラムが最大値を示す時間がシャフト質量によって変化しない) が 0.05 未満を示した場合は, シャフト質量, トルク成分を因子とする多重比較検定を行った。多重比較検定は Matlab 2021a の `multcompare` 関数を用いた。以後, 本研究において特に記載が無い場合はすべて Matlab 2021a によって統計計算を行う。全被験者で多因子分散分析, 多重比較検定を行った結果を表 4.5 に示す。表 4.5 において, 「Result」は多因子分散分析の結果を示し, p 値が 0.05 未満を満たした場合は「○」, 0.05 以上を示した場合は「-」とした。また, 多因子分散分析で p 値が 0.05 未満を示し多重比較検定を行った結果, 全周波数におけるスペクトログラムが最大値を示す時間から求めた母平均推定値が有意に早くなった (Top に近づいた) 場合は「Faster」, 有意に遅くなった (Impact に近づいた) 場合は「Slower」, 差が見られなかった場合は「-」とした。なお, 「Result」が「○」を示し, 全成分で「-」の場合は, 母平均推定値のみが有意な差を示し, 各成分では差が見られないことを示す。

表 4.5 より, 各周波数における最大値を示す時間から求めた母平均推定値が変化した被験者数は, 腕重心まわりトルクにおいて X 軸成分では 10 名 (被験者番号 1, 3, 6, 9, 16, 17, 21, 22, 25, 29), Y 軸成分では 6 名 (被験者番号 6, 17, 18, 21, 22, 27), Z 軸成分では 3 名 (被験者番号 12, 26, 29) であり, X 軸成分が影響を受けやすいことがわかった。

次に, クラブ重心まわりトルクにおいて X 軸成分では 6 名 (被験者 2, 3, 6, 18, 23, 25), Y 軸成分では 7 名 (被験者番号 5, 6, 12, 18, 23, 27, 29), Z 軸成分では 11 名 (被験者番号 2, 3, 5, 6, 9, 10, 12, 21, 22, 25, 26) となり, Z 軸成分が影響を受けやすいことがわかった。また, シャフトの質量増加によって, 最大値を示す時間が変化した被験者は 18 名であり, 半数以上の被験者において変化していることがわかった。また, 被験者の各成分における「Faster」, 「Slower」の傾向を確認した結果, 全成分において「Faster」を示す被験者は 10 名 (被験者番号 1, 5, 6, 10, 12, 16, 17, 22, 23, 26) であり, 全成分において「Slower」を示す被験者は 6 名 (被験者番号 9, 18, 21, 25, 27, 29) であり, 成分によって「Faster」, 「Slower」が異なる被験者は 2 名 (被験者番号 2, 3) となった。この結果より, 半数以上が「Faster」を示すことから, シャフトの質量増加は主に, スペクトログラムが最大値をとる時間, つまり, トルクの最大発揮タイミングを早める (Top に近づく) 傾向があると考えられる。

表 4.5 シャフト質量増加によるスペクトログラムが
最大値を示す時間への影響調査結果

No.	Result	Torque around center of gravity of arm			Torque around center of gravity of club		
		X-axis	Y-axis	Z-axis	X-axis	Y-axis	Z-axis
1	○	Faster	-	-	-	-	-
2	○	-	-	-	Faster	-	Slower
3	○	Slower	-	-	Faster	-	Faster
4	-	-	-	-	-	-	-
5	○	-	-	-	-	Faster	Faster
6	○	Faster	Faster	-	Faster	Faster	Faster
7	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-
9	○	Slower	-	-	-	-	Slower
10	○	-	-	-	-	-	Faster
11	-	-	-	-	-	-	-
12	○	-	-	Faster	-	Faster	Faster
13	○	-	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-
16	○	Faster	-	-	-	-	-
17	○	Faster	Faster	-	-	-	-
18	○	-	Slower	-	Slower	Slower	-
19	-	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	-
21	○	Slower	Slower	-	-	-	Slower
22	○	Faster	Faster	-	-	-	Faster
23	○	-	-	-	Faster	Faster	-
24	-	-	-	-	-	-	-
25	○	Slower	-	-	Slower	-	Slower
26	○	-	-	Faster	-	-	Faster
27	○	-	Slower	-	-	Slower	-
28	-	-	-	-	-	-	-
29	○	Slower	-	Slower	-	Slower	-

4.6 シャフトの質量増加によるスペクトログラムの最大値の変化について

次に、シャフトの質量増加がトルクの発揮量に与える影響を確認するため、スペクトログラムの最大値の変化を抽出する⁽⁵⁹⁾。4.5 節同様、腕重心まわりトルク、クラブ重心まわりトルクについて、各周波数のスペクトログラムの最大値を抽出した。また、確認する周波数については計算量を削減するため、1Hz, 3Hz, 5Hz, …, 39Hz の 2Hz 区切りの 20 水準とした。全試行分の抽出した結果を応答変数とし、シャフト質量 (2 水準), 試行 (5 試行), トルク成分 (2 種×3 軸成分), 周波数 (20 水準) を因子とする多因子分散分析を行った。多因子分散分析を行った結果、シャフト質量を因子とする p 値 (帰無仮説: スペクトログラムの最大値がシャフト質量によって変化しない) が 0.05 未満を示した場合は、シャフト質量, トルク成分を因子とする多重比較検定を行った。全被験者で多因子分散分析, 多重比較検定を行った結果を表 4.6 に示す。表 4.6 において、「Result」は表 4.5 と同様に多因子分散分析の結果を示し, p 値が 0.05 未満を示した場合は「○」, 0.05 以上を示した場合は「-」とした。また、多因子分散分析で p 値が 0.05 未満を示し多重比較検定を行った結果、全周波数におけるスペクトログラムの最大値から求めた母平均推定値が有意に増加した場合は「Increase」、減少した場合は「Decrease」、差が見られなかった場合は「-」とした。

表 4.6 より、各周波数における最大値から求めた母平均推定値が変化した被験者は、腕重心まわりトルクにおいて X 軸成分では 13 名 (被験者番号 4, 6, 9, 12, 13, 14, 18, 20, 23, 24, 26, 27, 29), Y 軸成分では 18 名 (被験者番号 3, 4, 6, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 20, 22, 23, 25, 26, 27, 29), Z 軸成分では 20 名 (被験者番号 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 12, 14, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 25, 26, 27, 28) となり、Z 軸成分が影響を受けやすいことがわかった。次に、クラブ重心まわりトルクにおいて X 軸成分では 17 名 (被験者番号 1, 3, 4, 6, 7, 9, 11, 12, 16, 17, 18, 21, 22, 23, 25, 26, 29), Y 軸成分では 23 名 (被験者番号 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 26, 28, 29), Z 軸成分では 17 名 (被験者番号 3, 6, 9, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 26, 27, 28, 29) となり、Y 軸成分が影響を受けやすいことがわかった。また、シャフトの質量増加によってスペクトログラムの最大値が変化した被験者は 27 名であり、ほぼ全被験者で変化していることがわかった。さらに、「Increase」「Decrease」の傾向を確認した結果、全成分において「Increase」傾向を示した被験者は 9 名 (被験者番号 2, 7, 9, 12, 18, 21, 24, 26, 29)、成分により「Increase」、「Decrease」傾向が分かれるものの、「Increase」の数が多い被験者は 8 名 (被験者番号 3, 4, 11, 13, 15, 25, 27, 28) であった。一方、全成分において「Decrease」傾向を示した被験者は 5 名 (被験者番号 5, 6, 14, 17, 20)、成分により「Increase」、「Decrease」傾向が分かれるものの、「Decrease」の数が多い被験者は 3 名 (被験者番号 16, 22, 23) となり、シャフトの質量増加は主に、スペクトログラムの最大値、つまり、トルクの発揮量を増加する傾向があると考えられる。一方、成分によって「Increase」、「Decrease」傾向が異なる被験者もあり、これら変化傾向の違いについては次節にて詳細を確認する。

表 4.6 シャフトの質量増加によるスペクトログラムの最大値への影響調査結果

No.	Result	Torque around center of gravity of arm			Torque around center of gravity of club		
		X-axis	Y-axis	Z-axis	X-axis	Y-axis	Z-axis
1	○	-	-	-	Decrease	Increase	-
2	○	-	-	Increase	-	Increase	-
3	○		Decrease	Increase	Increase	Increase	Increase
4	○	Increase	Decrease	Increase	Increase	Increase	-
5	○	-	-	Decrease	-	Decrease	-
6	○	Decrease	Decrease	Decrease	Decrease	Decrease	Decrease
7	○	-	-	Increase	Increase	Increase	-
8	-	-	-	-	-	-	-
9	○	Increase	Increase	Increase	Increase	Increase	Increase
10	-	-	-	-	-	-	-
11	○	-	Increase	Increase	Increase	Decrease	Decrease
12	○	Increase	Increase	Increase	Increase	-	Increase
13	○	Increase	Increase	-	-	Decrease	-
14	○	Decrease	Decrease	Decrease	-	Decrease	Decrease
15	○	-	Decrease	-	-	Increase	Increase
16	○	-	-	Increase	Decrease	Decrease	Decrease
17	○	-	Decrease	Decrease	Decrease	Decrease	Decrease
18	○	Increase	Increase	Increase	Increase	-	-
19	○	-	-	-	-	Increase	Decrease
20	○	Decrease	Decrease	-	-	Decrease	Decrease
21	○	-	-	Increase	Increase	Increase	Increase
22	○	-	Decrease	Increase	Decrease	Decrease	Decrease
23	○	Decrease	Decrease	Decrease	Increase	Increase	-
24	○	Increase	-	-	-	-	-
25	○	-	Increase	Increase	Increase	Decrease	-
26	○	Increase	Increase	Increase	Increase	Increase	Increase
27	○	Increase	Increase	Decrease	-	-	Increase
28	○	-	-	Decrease	-	Increase	Increase
29	○	Increase	Increase	-	Increase	Increase	Increase

4.7 スペクトログラムの最大値の周波数帯域の変化と先端速度との関係

4.6 節の結果より，シャフトの質量増加によって，主にスペクトログラムの最大値が変化することが示されたが，トルクの成分によって変化傾向が異なる被験者も見られた．そのため，被験者によるトルクの成分の変化傾向とゴルフスイング動作の関係について検証する．これまで，シャフト質量（2水準），試行（5試行），トルク成分（2種×3軸成分），周波数（20水準）を因子として多因子分散分析を用いて解析を行ったが，トルクの成分で変化傾向が異なるため，ゴルフスイング動作との関係を検証することに特化し，トルクの各成分において多因子分散分析を行う．次に，周波数については，スペクトログラムは単一の周波数のみで変化せず，複数の周波数に渡った群として変化を行い，被験者によってスペクトログラムが変化する群が異なる⁽⁶⁰⁾．そこで，全被験者で共通する基準を設定するために，周波数（1 Hz, 3 Hz, 5 Hz, …, 39 Hz）を低周波領域，高周波領域に層別する．また，ゴルフスイング動作との関係を検証するにあたり，ゴルフスイング動作の結果となる **Impact** におけるリンクモデル先端の速度（シャフト先端速度）に着目する．シャフト先端速度は式(3.9)を基に算出する．以上より，各トルクの成分の変化傾向とゴルフスイング動作との関係について検証するため，トルクの成分ごとで，スペクトログラムの最大値を応答変数，シャフト質量（2水準），試行（5試行），周波数域（2水準）を因子とする多因子分散分析を行う．

まず，低周波領域/高周波領域に層別するための基準周波数を設定する．基準周波数の設定に向け，3 Hz, 5 Hz, …, 37 Hz を仮の基準周波数として低周波領域/高周波領域に分割し，各周波数領域におけるスペクトログラムの最大値を抽出する．抽出した最大値を応答変数とし，シャフト質量（2水準），試行（5試行），周波数域（2水準）を因子とする多因子分散分析を行った．多因子分散分析によって p 値（帰無仮説：スペクトログラムの最大値がシャフト質量によって変化しない）が 0.05 未満を示した場合，シャフト質量，周波数領域を因子とする多重比較検定を行った．各トルクの成分で多重比較検定により p 値が 0.05 未満を示した結果を全被験者において確認し，母平均推定値の差が多く見られ，かつ，領域における偏りが少ない周波数を基準周波数とした．基準周波数毎の差の数を確認した結果を図 4.6 に示す．図 4.6 より，基準周波数を 19 Hz とした場合，低周波領域，高周波領域で差が多く検出され，かつ領域間において偏りが最も少ないことがわかるため，19 Hz を基準周波数とした．

次に，シャフト先端速度を算出する．式(3.9)にグリップエンド部からクラブリンクの先端位置までの位置ベクトルを入力することでクラブリンクの先端位置における速度を求め，**Impact** におけるシャフト先端速度を算出した．算出したシャフト先端速度がシャフト質量によって変化するかを確認するため，有意水準 $\alpha = 0.05$ とする t 検定を行った．19 Hz を基準周波数とした際の低周波領域，高周波領域における多重比較検定結果に合わせ，シャフト先端速度に t 検定を行った結果を表 4.7(a)，表 4.7(b) に示す．表 4.7(a)，表 4.7(b) において，「Increase」，「Decrease」は各領域におけるスペクトログラムの最大値から求めた母平均推定値，シャフト先端速度が増加，減少をしたことを示し，「-」は有意差が無いことを示す．

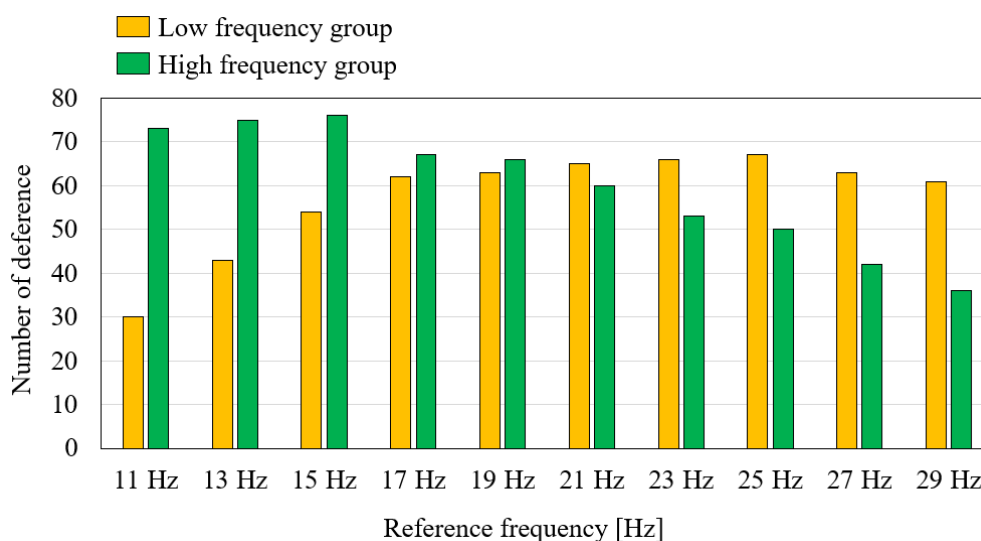


図 4.6 基準周波数決定のための事前検証結果

最後に、スペクトログラムの最大値から求められた母平均推定値の変化とシャフト先端速度との関係について考察する。まず、表 4.7(a)より、低周波領域においてシャフト先端速度に有意差があった被験者と母平均推定値の変化の傾向を比較した結果、クラブ重心まわりトルクとシャフト先端の変化傾向に共通点が見られ、X 軸成分の増減傾向と逆の傾向（母平均推定値が「Increase」の際、シャフト先端速度は「Decrease」を示し、母平均推定値が「Decrease」の際、シャフト先端速度は「Increase」を示す）となり、Y 軸、Z 軸成分増減傾向と同様の傾向（母平均推定値が「Increase」の際、シャフト先端速度は「Increase」を示し、母平均推定値が「Decrease」の際、シャフト先端速度は「Decrease」を示す）となることがわかる。これらの傾向は、シャフト先端速度に有意差が見られた被験者 13 名において 9 名（被験者番号 1, 4, 11, 14, 17, 18, 19, 20, 28）で確認することができる。なお、被験者番号 18 については、X 軸成分の傾向と異なるが、Y 軸成分の影響が強いと考えられる。

次に、表 4.8(b)より、高周波領域においてシャフト先端速度に有意差があった被験者と母平均推定値の変化の傾向を比較した結果、クラブ重心まわりトルクの Y 軸成分の増減傾向と逆の傾向（母平均推定値が「Increase」の際シャフト先端速度は「Decrease」を示し、母平均推定値が「Decrease」の際シャフト先端速度は「Increase」を示す）となることがわかる。これら傾向は、シャフト先端速度に有意差が見られた被験者 13 名において 5 名（被験者番号 9, 13, 16, 17, 22）で確認することができる。以上の結果から、シャフト先端速度の変化に影響を与えるトルクは、クラブ重心まわりトルクであり、低周波領域の X 軸成分、高周波領域の Y 軸成分の減少に加え、低周波領域の Y 軸成分、Z 軸成分の増加がシャフト先端速度を獲得するように働くことがわかった。

表 4.7(a) シャフトの質量増加によるスペクトログラムの最大値への影響調査結果
(19Hz を基準とした際の低周波領域)

No.	Torque around center of gravity of arm			Torque around center of gravity of club			Shaft tip velocity
	X-axis	Y-axis	Z-axis	X-axis	Y-axis	Z-axis	
1	-	-	-	Decrease	Increase	-	Increase
2	-	-	-	-	Increase	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-
4	Increase	-	-	Increase	-	-	Decrease
5	-	-	-	-	Decrease	-	-
6	Increase	Decrease	-	-	Decrease	Decrease	-
7	Increase	-	Increase	Increase	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	Increase	-	Decrease
10	-	-	-	-	-	Decrease	-
11	-	-	Decrease	Increase	-	Decrease	Decrease
12	-	-	Increase	Increase	-	Increase	-
13	-	-	Increase	-	Decrease	-	Increase
14	-	Decrease	-	Increase	Decrease	Decrease	Decrease
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	Decrease	Decrease	Increase
17	-	-	-	Decrease	Decrease	-	Increase
18	Increase	Increase	Increase	Increase	Increase	-	Increase
19	-	-	-	-	Increase	-	Increase
20	-	Increase	-	-	-	Decrease	Decrease
21	-	-	-	Increase	Increase	-	-
22	-	-	Increase	-	Decrease	Decrease	Increase
23	Decrease	-	Decrease	Increase	Increase	-	-
24	Decrease	Decrease	-	Increase	Increase	Increase	-
25	Increase	Increase	-	Increase	Decrease	-	-
26	-	-	Increase	Increase	Increase	Increase	-
27	-	-	-	-	-	Increase	-
28	-	-	-	-	Increase	-	Increase
29	-	-	-	-	-	Increase	-

表 4.7(b) シャフトの質量増加によるスペクトログラムの最大値への影響調査結果
(19Hz を基準とした際の高周波領域)

No.	Torque around center of gravity of arm			Torque around center of gravity of club			Shaft tip velocity
	X-axis	Y-axis	Z-axis	X-axis	Y-axis	Z-axis	
1	-	-	-	-	-	-	Increase
2	-	-	-	-	Increase	-	-
3	Increase	-	-	-	Increase	-	-
4	Decrease	-	-	-	-	-	Decrease
5	Decrease	-	-	-	-	-	-
6	Decrease	Decrease	Decrease	-	Decrease	Decrease	-
7	Increase	-	Increase	Increase	-	Increase	-
8	-	-	-	-	-	-	-
9	Increase	Increase	Increase	Increase	Increase	Increase	Decrease
10	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	Decrease
12	-	-	-	-	-	-	-
13	-	Decrease	-	-	Decrease	-	Increase
14	Decrease	Decrease	Decrease	Decrease	Decrease	Decrease	Decrease
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	Decrease	-	Increase
17	Decrease	Decrease	-	Decrease	Decrease	Decrease	Increase
18	Increase	-	Increase	-	-	-	Increase
19	-	-	-	-	-	-	Increase
20	-	-	-	-	Decrease	-	Decrease
21	Increase	Increase	Increase	Increase	Increase	-	-
22	Decrease	-	-	Decrease	Decrease	Decrease	Increase
23	Decrease	Decrease	Decrease	Increase	Increase	Increase	-
24	Decrease	Decrease	Decrease	-	-	-	-
25	-	-	-	-	Decrease	-	-
26	-	-	Increase	Increase	Increase	Increase	-
27	-	-	-	-	-	-	-
28	-	Increase	-	Increase	Increase	Increase	Increase
29	-	Increase	-	Increase	Increase	-	-

4.8 結論

本章では、プレーヤがゴルフスイング動作中に発揮したトルクに短時間フーリエ変換を行い、発揮したトルクの時間一周波数変化について確認した。次に、シャフトの設計値においてプレーヤのゴルフスイングに特に影響を与えると考えられるシャフトの質量に着目し、シャフトの質量変化が発揮トルクに与える影響について検証した。さらに、シャフトの質量変化による発揮トルクの変化とシャフト先端の速度の関係について確認を行い、以下結論を得た。

- (1) ゴルフスイング動作中の発揮トルクに短時間フーリエ変換を行い、全被験者においてスペクトログラムの時間変化を確認した。腕重心まわりトルクの X 軸成分では、ダウンスイング前半で 1~7 Hz の周波数のトルクでダウンスイングを始動し、Impact 付近では全成分において広範囲の周波数のトルクで腕とゴルフクラブを加速させることがわかった。
- (2) シャフト質量増加が、トルク発揮するタイミングに与える影響について確認を行った。その結果、スペクトログラム値が最大値を示すタイミングが質量増加によって早くなる被験者が半数以上見られたため、シャフトの質量増加によりトルクの最大発揮タイミングが早くなる (Top に近づく) ことがわかった。
- (3) シャフト質量増加が、トルクの最大発揮量に与える影響について確認を行った。スペクトログラムの最大値がシャフトの質量増加によって増加する被験者が大半を占めていたため、シャフトの質量増加により最大発揮量が増加することがわかった。
- (4) 短時間フーリエ変換によって得られた周波数を低周波領域、高周波帯域に層別するための基準周波数を決定した。各領域において質量増加によって母平均推定値に差がみられ、かつ、各領域で同等の差がみられる周波数は 19 Hz となることがわかった。
- (5) スペクトログラムを 19 Hz を基準とした低周波領域、高周波領域に分割し、それぞれの領域におけるスペクトログラムの最大値を抽出し、シャフトの質量増加における最大値の変化とシャフト先端速度の変化傾向を比較した。クラブ重心まわりトルクにおいて、低周波領域における X 軸成分、高周波領域における Y 軸成分は、シャフト先端速度の変化傾向とは逆の傾向を示し、低周波領域における Y 軸、Z 軸成分はシャフト先端速度の変化傾向と同様の傾向を示した。この結果より、シャフト先端速度の変化に寄与する発揮トルクの成分を特定できた。

第5章 シャフトの調子の差がシャフトの変形挙動に与える影響調査

5.1 緒言

4章では、シャフトの設計値のうち、ゴルフスイング動作に最も影響を与えると考えられるシャフトの質量に着目し、シャフトの質量の差がゴルフスイング動作に与える影響について明らかにした。本章では、シャフトの質量の設計値のうち質量に次いでゴルフスイング動作に影響を与えると考えられるシャフトの調子（キックポイント）に着目する。キックポイントとは、シャフトの変形が生じやすい場所として表されており、手元（グリップ側）の変形が生じやすいシャフトを手元調子シャフト（High-kick-point）、先端（クラブヘッド側）の変形が生じやすいシャフトを先調子シャフト（Low-kick-point）と呼ぶ。

ゴルフクラブの販売店では、プレーヤにあったシャフトを提案する「フィッティング」と呼ばれるサービスが展開されている⁽²⁴⁾。近年では、慣性センサによってゴルフスイングを計測し、プレーヤにあったキックポイントを提案するサービスも提供されている⁽⁶¹⁾。提案されたシャフトのキックポイントとプレーヤが通常使用しているシャフトのキックポイントが異なる場合、シャフトの変形が生じやすい場所が変化し、シャフトの変形挙動が変化する。このシャフトの変形挙動の差がゴルフスイング動作やフィーリング評価に影響を与え、その結果、ゴルフボールの軌道が変化すると考えられる。そのため、キックポイント変化時のゴルフスイング動作の違いやシャフト変形挙動の違いに加え、シャフト変形挙動の差がフィーリング評価に与える影響について明らかにする必要がある。

そこで、本章では、キックポイントの差がゴルフスイングに与える影響を明らかにするため、前章と同様に短時間フーリエ変換を用いてプレーヤの発揮したトルクへ与える影響について確認する。次に、シミュレーションモデルを用いてシャフトの変形挙動を再現し、特異値分解によってシャフトの変形を構成する主要な変形挙動を抽出する。キックポイント変化による主要な変形挙動の差を確認することで、キックポイント変化が変形挙動に与える影響を明らかにする。また、主要な変形挙動の差とフィーリング評価結果の差と比較することで、フィーリングに影響を与える変形挙動の差を抽出する。

5.2 ゴルフスイング動作計測実験

4.2節同様、ゴルフスイング動作中の発揮トルクを算出するために、2.1節～2.4節に記載のスイング動作計測実験を行った。被験者は右利きの男性ゴルフア 17名を対象とした。対象とした被験者の情報を表 5.1 に示す。計測に使用したゴルフクラブはクラブヘッドとシャフトが着脱可能な機構を備えており、クラブヘッドは被験者が通常使用しているものを使用した。シャフトについては、High-kick-point、Low-kick-point の同質量のシャフト 2本とした。どちらも市販されているシャフトである。また、本研究で使用したシャフトの曲げに関する特性の調査として、シャフトの手元側を完全固定し、シャフト先端部に 7N の荷重を付加した際の変形量を測定した（この解析を静解析とする）。それぞれのシャフトの静解析の結果を図 5.1 に示す。図 5.1 より、High-kick-point シャフトは手元側で変形が発生しやすく、

たわみ角が大きくなるため、全体的に変形量が多くなることがわかる。

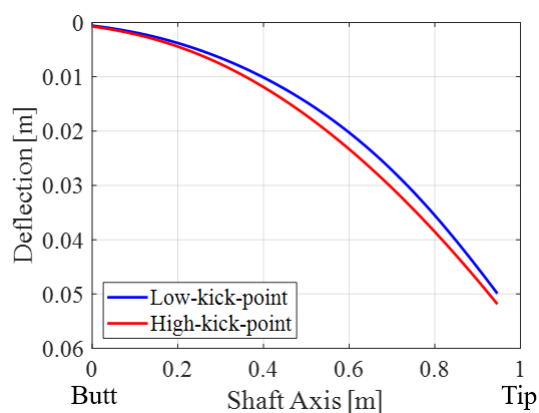


図 5.1 本研究で使用したシャフトの静解析結果

次に、試行数は被験者がキックポイントの差によるフィーリングの違いをゴルフスイング動作中に十分に判断できるように、各シャフトにおいて8試行とした。また、打感や弾道の結果によって被験者がゴルフスイング動作を調整しないようにスポンジボールを用いて計測を行った。ゴルフスイング動作計測実験実施後、被験者にフィーリング評価結果についてアンケート調査を行い、先調子、元調子のシャフトのうち振りやすいと感じたシャフトについて回答を得た。被験者が振りやすいと回答したアンケート調査結果を表 5.1 に併せて記載した。

表 5.1 被験者情報

No.	Height [m]	Weight [kg]	Age group	Average Score	Preferred kick point
1	1.77	82	40	92	Low
2	1.69	92	40	87	Low
3	1.77	74	40	85	Low
4	1.76	70	50	82	Low
5	1.80	70	50	97	Low
6	1.79	67	50	87	High
7	1.75	63	30	100	High
8	1.72	79	50	82	High
9	1.74	75	20	75	High
10	1.65	60	20	108	High
11	1.85	72	20	108	High
12	1.62	63	30	80	High
13	1.85	70	40	102	High
14	1.81	95	30	95	Low
15	1.73	80	50	99	High
16	1.67	76	20	92	Low
17	1.66	62	40	71	High

5.3 キックポイント変化によるスペクトログラムが最大値を示す時間の変化について

計測によって得られた結果から、4.3節と同様に、被験者がゴルフスイング動作中に発揮した腕重心まわりトルク、クラブ重心まわりトルクを算出し⁽³⁴⁾、キックポイント変化時のトルクを比較した。一例として、被験者番号8におけるトルクの比較結果を図5.2(a)~(f)に示す。図5.2(a)~(f)において、青線で示すデータ群はLow-kick-point シャフトを用いてスイングした結果を示し、赤線で示すデータ群はHigh-kick-point シャフトを用いてスイングした結果を示す。

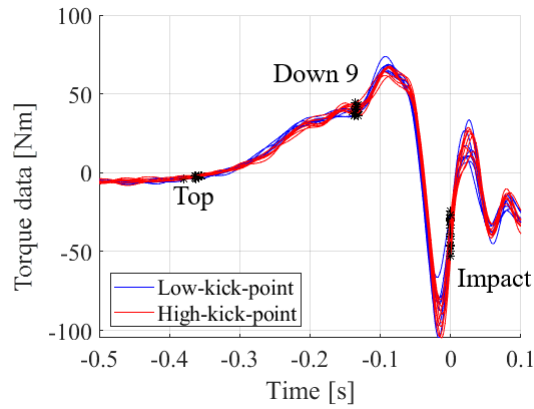


図 5.2(a) キックポイント変化時の腕重心まわりトルク X 軸成分比較結果
(被験者番号 8)

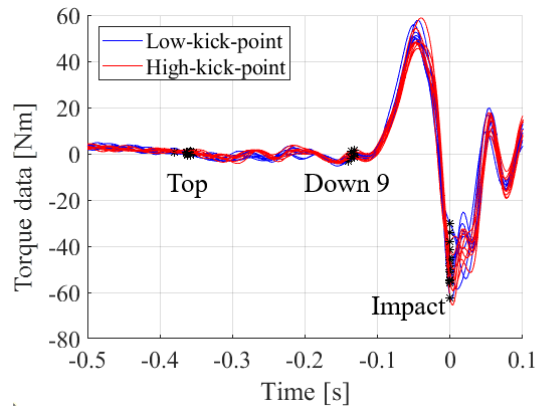


図 5.2(b) キックポイント変化時の腕重心まわりトルク Y 軸成分比較結果
(被験者番号 8)

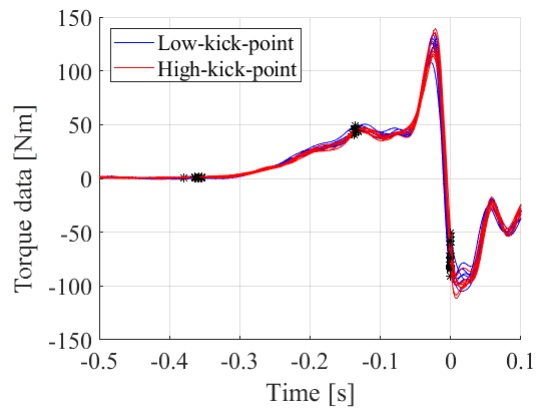


図 5.2(c) キックポイント変化時の腕重心まわりトルク Z 軸成分比較結果
(被験者番号 8)

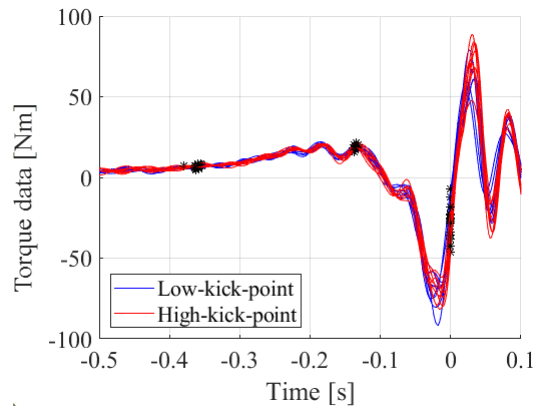


図 5.2(d) キックポイント変化時のクラブ重心まわりトルク X 軸成分比較結果
(被験者番号 8)

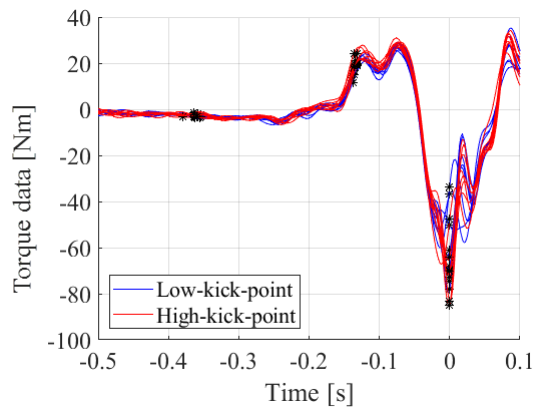


図 5.2(e) キックポイント変化時のクラブ重心まわりトルク Y 軸成分比較結果
(被験者番号 8)

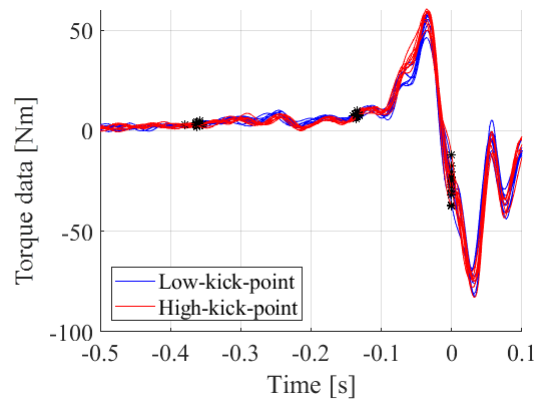


図 5.2(f) キックポイント変化時のクラブ重心まわりトルク Z 軸成分比較結果
(被験者番号 8)

図 5.2(a)～(f)に示したトルクについて、4.4 節と同様に短時間フーリエ変換を行った⁽⁵⁹⁾。
(60) 4 章同様、キックポイントの変化により、トルクの発揮タイミング、トルクの発揮量が

変化すると考えられるため、発揮タイミングについてはスペクトログラムが最大値を示す時間、発揮量についてはスペクトログラムの最大値について統計的手法を用いて差を確認する。まずはスペクトログラムが最大値を示す時間の変化について確認する⁽⁵⁹⁾。4.5節同様、スペクトログラムが最大値を示す時間を抽出し、抽出した時間を応答変数とし、キックポイント（2水準）、試行（8試行）、トルク成分（2種×3軸成分）、周波数（20水準）を因子とする多因子分散分析を行った。多因子分散分析を行った結果、キックポイントを因子とするp値（帰無仮説：スペクトログラムが最大値を示す時間がキックポイントによって変化しない）が0.05未満を示した場合は、キックポイント、トルク成分を因子とする多重比較検定を行った。全被験者で多因子分散分析、多重比較検定を行った結果を表5.2に示す。表5.2において、「Result」は多因子分散分析の結果を示し、p値が0.05未満を満たした場合は「○」、0.05以上を示した場合は「-」とした。また、多因子分散分析でp値が0.05未満を示し多重比較検定を行った結果、全周波数におけるスペクトログラムが最大値を示す時間から求めた母平均推定値が有意に早くなった（Topに近づいた）シャフトがLow-kick-pointの場合は「Low」、High-kick-pointの場合は「High」、差が見られなかった場合は「-」とした。

表5.2より、各周波数における最大値を示す時間から求めた母平均推定値が変化した被験者数は、腕重心まわりトルクにおいてX軸成分では4名（被験者番号4, 7, 8, 11）、Y軸成分では8名（被験者番号3, 4, 5, 7, 12, 14, 16, 17）、Z軸成分では1名（被験者番号9）であった。次に、クラブ重心まわりトルクにおいてX軸成分では3名（被験者番号11, 13, 14）、Y軸成分では2名（被験者番号10, 17）、Z軸成分では4名（被験者番号2, 11, 13, 14）であった。また、表5.2より、腕重心まわりトルクのY軸成分が影響を受けやすいと考えられるが、4.5節のシャフト質量の差による影響の調査結果と比較すると、キックポイントの差による影響は小さいことがわかる。そのため、キックポイントの差はトルクの実揮タイミングに与える影響は小さいと考えられる。

表 5.2 キックポイント変化によるスペクトログラムが
最大値を示す時間への影響調査結果

No.	Result	Torque around center of gravity of arm			Torque around center of gravity of club		
		X-axis	Y-axis	Z-axis	X-axis	Y-axis	Z-axis
1	○	-	-	-	-	-	-
2	○	-	-	-	-	-	High
3	○	-	High	-	-	-	-
4	○	High	High	-	-	-	-
5	○	-	Low	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-
7	○	Low	Low	-	-	-	-
8	○	High	-	-	-	-	-
9	○	-	-	Low	-	-	-
10	○	-	-	-	-	High	-
11	○	Low	-	-	High	-	Low
12	○	-	High	-	-	-	-
13	○	-	-	-	Low	-	Low
14	○	-	Low	-	Low	-	Low
15	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	Low	-	-	-	-
17	○	-	High	-	-	High	-

5.4 キックポイント変化によるスペクトログラムの最大値の変化について

次に、キックポイント変化がトルクの発揮量に与える影響を確認するため、スペクトログラムの最大値の変化を抽出する⁽⁵⁹⁾、⁽⁶⁰⁾。4.6 節同様に、全試行分において抽出したスペクトログラムの最大値を応答変数とし、キックポイント (2 水準)、試行 (8 試行)、トルク成分 (2 種×3 軸成分)、周波数 (20 水準) を因子とする多因子分散分析を行った。多因子分散分析を行った結果、キックポイントを因子とする p 値 (帰無仮説: スペクトログラムの最大値がキックポイントによって変化しない) が 0.05 未満を示した場合は、キックポイント、トルク成分を因子とする多重比較検定を行った。全被験者で多因子分散分析、多重比較検定を行った結果を表 5.3 に示す。表 5.3 において、「Result」は表 5.2 と同様に多因子分散分析の結果を示し、p 値が 0.05 未満を示した場合は「○」、0.05 以上を示した場合は「-」とした。また、多因子分散分析で p 値が 0.05 未満を示し多重比較検定を行った結果、全周波数におけるスペクトログラムの最大値から求めた母平均推定値が有意に大きいシャフトが Low-

kick-point の場合は「Low」、High-kick-point の場合は「High」、差が見られなかった場合は「-」とした。

表 5.3 キックポイント変化によるスペクトログラムの最大値への影響調査結果

No.	Result	Torque around center of gravity of arm			Torque around center of gravity of club		
		X-axis	Y-axis	Z-axis	X-axis	Y-axis	Z-axis
1	○	High	-	High	-	-	-
2	○	High	Low	High	-	Low	Low
3	○	High	-	High	High	-	High
4	○	High	Low	-	Low	Low	Low
5	○	High	-	-	High	-	High
6	○	High	High	High	High	-	Low
7	○	Low	-	Low	Low	Low	High
8	○	High	-	High	High	High	-
9	○	Low	Low	Low	Low	Low	Low
10	○	Low	-	Low	-	High	-
11	○	-	Low	High	-	Low	Low
12	○	Low	High	-	Low	Low	Low
13	○	Low	Low	Low	-	Low	-
14	○	High	High	Low	High	High	High
15	○	-	High	High	High	High	High
16	○	Low	-	Low	Low	-	-
17	○	-	-	Low	-	-	-

表 5.3 より、各周波数における最大値から求めた母平均推定値が変化した被験者は、腕重心まわりトルクにおいて X 軸成分では 14 名（被験者番号 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 14, 16）、Y 軸成分では 9 名（被験者番号 2, 4, 6, 9, 11, 12, 13, 14, 15）、Z 軸成分では 14 名（被験者番号 1, 2, 3, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17）となり、X 軸、Z 軸成分が影響を受けやすいことがわかった。次に、クラブ重心まわりトルクにおいて X 軸成分では 11 名（被験者番号 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12, 14, 15, 16）、Y 軸成分では 11 名（被験者番号 2, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15）、Z 軸成分では 11 名（被験者番号 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 12, 14, 15）となり、全成分が影響を受けやすいことがわかった。また、全被験者において多因子分散分析によって p 値が 0.05 未満を示しており、全被験者で母平均推定値が変化していることがわかる。4.5 節の結果と比較すると、キックポイントの差が与える影響は質量変化による影響よりも大きくなり、キックポイントの差

は、トルクの発揮量に大きく影響を与えられとされる。一方、差の傾向に着目すると、「High」、「Low」の傾向を示した被験者数に差は見られず、質量変化時のような明確な傾向が得られないことがわかる。また、変化傾向は表 5.1 に示すフィーリング評価結果とも異なっており、キックポイントの変化によって何等かのゴルフスイングの変化は発生しているものの、ゴルフスイングの変化はフィーリング評価結果には影響を与えないと考えられる。以上の結果より、キックポイントの変化はゴルフスイング動作中のトルクの発揮量に変化を与えるが、変化傾向は被験者によって異なり、フィーリング評価結果との関連は無いことがわかった。

5.5 シミュレーションモデルを用いたシャフトの変形挙動解析

5.3 節、5.4 節では、キックポイント変化がゴルフスイング動作中に発揮するトルクに与える影響について検証を行った結果、トルクの発揮量が変化していることがわかった。一方、被験者間での変化傾向の共通点が無く、フィーリング評価結果との関連も見られなかった。そこで、シャフトの変形挙動について着目する。シャフトの変形挙動は、モーションキャプチャ用マーカをシャフトに貼り付けて計測する手法⁽³⁶⁾や、ひずみゲージをシャフトに貼り付けて計測する手法⁽⁹⁾があるが、モーションキャプチャの場合は、貼り付け位置の差による誤差や計測誤差が生じる可能性があり、歪ゲージの場合は有線によってゴルフスイング動作の妨げになる可能性がある。そこで、シミュレーションによってシャフトの変形挙動を算出し比較を行う。3.2 節で構築したシミュレーションモデルに、5.2 節にて計測したゴルフスイング動作計測結果を入力し、シャフトの変形挙動を算出した⁽⁵¹⁾、⁽⁶²⁾。シミュレーションモデルによるシャフトの変形挙動の算出精度を確認するため、モーションキャプチャデータから変形挙動を算出する。2.2 節に示したシャフト先端マーカ S_3 を 2.6 節に示したグリップ座標系に座標変換を行い、モーションキャプチャによって計測した結果から変形挙動を算出した。シミュレーションモデルによって算出した変形挙動とモーションキャプチャによって計測した結果から算出した変形挙動を比較した結果の一例を図 5.3(a)、図 5.3(b)に示す。

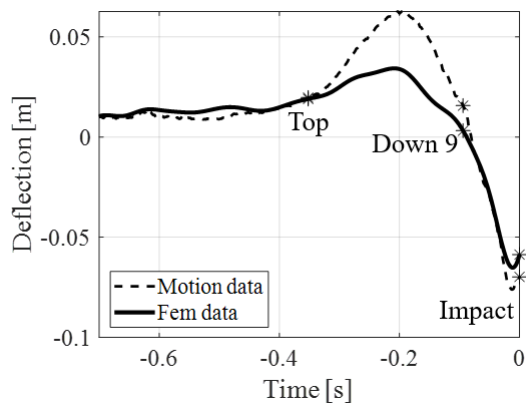


図 5.3(a) Toe up/down 方向における
変形挙動比較結果
(被験者番号 8)

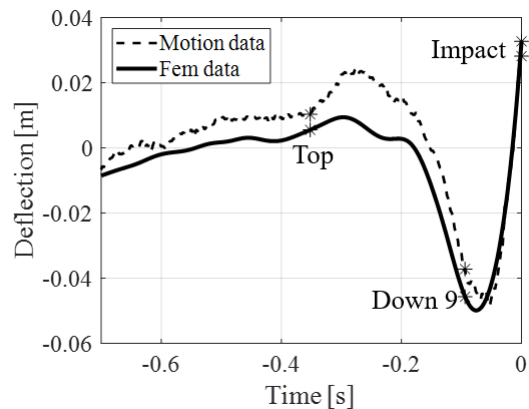


図 5.3(b) Lead/Lag 方向における
変形挙動比較結果
(被験者番号 8)

図 5.3(a), 図 5.3(b)において, 点線で示す結果はモーションキャプチャデータにおける変形挙動, 実線で示す結果はシミュレーションモデルによって算出した結果を示す. 図 5.3(a), 図 5.3(b)より, それぞれの変形挙動を比較した結果, Toe up/down 方向における変形挙動における Top~Down 9 区間において 0.02 m 程度の差が見られることがわかる. シミュレーションモデルによって算出した変形挙動の再現度を評価するため, RMSE 値 (Root Mean Square Error) 値を算出した. RMSE 値を算出した結果, 図 5.3(a)では 0.015 m, 図 5.3(b)では 0.016 m となった. また, 全試行で RMSE 値を算出した結果を表 5.4 に示す. 表 5.4 より全試行において RMSE 値が 0.012 m~0.016 m を示し, 全体の平均は 0.013 m であったため, 十分な精度で変形挙動を算出できていると考えられる.

表 5.4 各試行における RMSE 値算出結果

Trial	Toe up/down 方向 [m]	Lead/Lag 方向 [m]
1	0.015	0.016
2	0.013	0.014
3	0.013	0.013
4	0.013	0.012
5	0.015	0.015
6	0.013	0.013
7	0.013	0.013
8	0.015	0.016

シミュレーションモデルによって算出した変形挙動によってキックポイント変化が与え

る影響について検証を行う。キックポイント変化による変形挙動の差を比較した結果の一例を図 5.4(a), 図 5.4(b)に示す。図 5.4(a), 図 5.4(b)より, キックポイント変化によって変形挙動に差がみられることがわかる

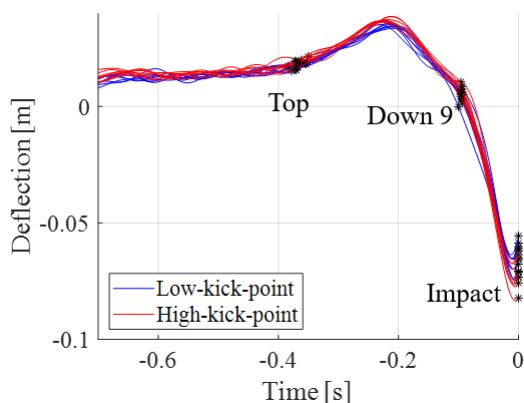


図 5.4(a) Toe up/down 方向におけるキックポイント変化による変形挙動の比較結果 (被験者番号 8)

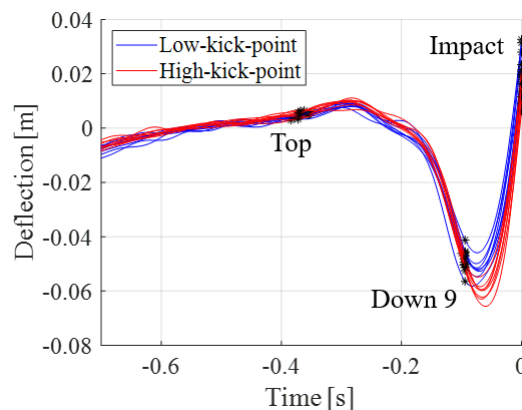


図 5.4(b) Lead/Lag 方向におけるキックポイント変化による変形挙動の比較結果 (被験者番号 8)

5.6 短時間フーリエ変換を用いた変形挙動の差の抽出検討

変形挙動の差を抽出するため, 4 章と同様にシャフトの変形挙動に対して短時間フーリエ変換を行う^{(59), (60)}. 短時間フーリエ変換を行うにあたり, 各変形挙動における窓関数区間, オーバーラップ数を事前検証によって決定した. Toe up/down 方向, Lead/Lag 方向における窓関数区間, オーバーラップ数を表 5.5 に示す.

表 5.5 事前検証によって設定した窓関数区間, オーバーラップ数

Direction of deformation	Window width [s]	Number of overlaps [s]
Toe up/down	0.168	0.160
Lead/Lag	0.168	0.160

表 5.5 に示す条件によって, 算出した変形挙動に対して短時間フーリエ変換を行った. 図 5.3(a), 図 5.3(b)に示した変形挙動に短時間フーリエ変換を行い, カラーマップにて表した結果を図 5.5(a), 図 5.5(b)に示す. 図 5.5(a), 図 5.5(b)より, 4 章のトルク波形への短時間フーリエ変換結果とは異なり, スペクトログラム値の強度が大きい周波数範囲が 1 Hz~約 10 Hz の低周波領域に集中していることがわかる. そこで, 4.4 節と同様にスペクトログラム値の強度が大きい周波数範囲を抽出する. 最大スペクトログラム値の 0.5 倍未満を 0 としたカラ

ーマップを図 5.6(a), 図 5.6(b)に示す. 図 5.6(a), 図 5.6(b)においてスペクトログラム値の強度が大きい範囲を抽出した結果を表 5.6 に示す. 表 5.6 に示す数値は, スペクトログラム値の強度が大きい範囲を示し, 1~3 で示す場合は 1 Hz~3 Hz のスペクトログラムの強度が大きいことを示す. 表 5.6 より, 変形挙動におけるスペクトログラムの強度が大きい周波数範囲は 1 Hz~10 Hz 程度となることがわかった. そのため, 以後, 解析の対象とする周波数範囲を 1 Hz~15 Hz として, キックポイントの差が変形挙動に与える影響について検証する.

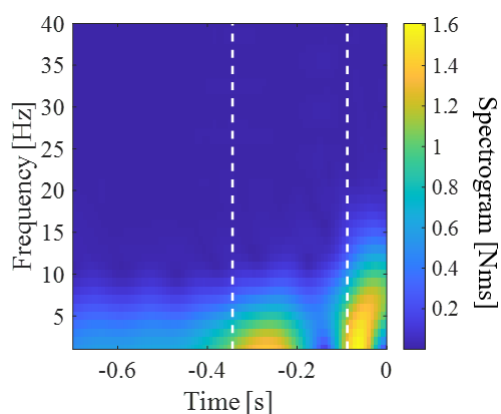


図 5.5(a) Toe up/down 方向の変形挙動への短時間フーリエ変換結果 (被験者番号 8)

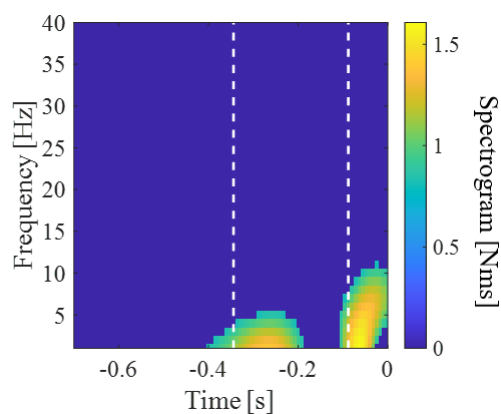


図 5.6(a) 図 5.5(a)においてスペクトログラム値の強度が大きい範囲を抽出した結果

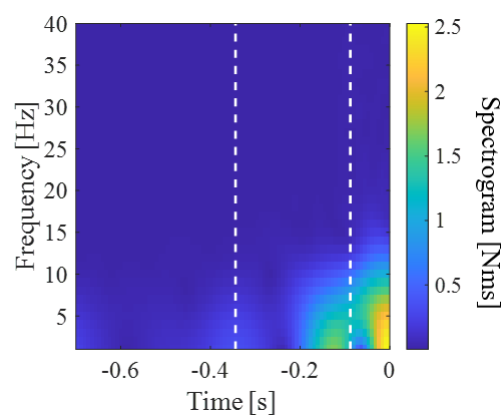


図 5.5(b) Lead/Lag 方向の変形挙動への短時間フーリエ変換結果 (被験者番号 8)

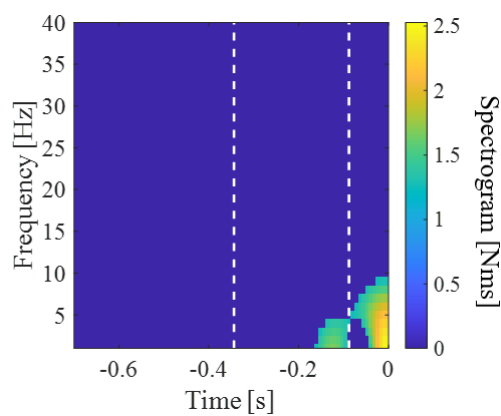


図 5.6(b) 図 5.5(b)においてスペクトログラム値の強度が大きい範囲を抽出した結果

表 5.6 スペクトログラム値の強度が大きい範囲を抽出した結果

No.	Toe up/down direction		Lead/Lag direction	
	Top~Down 9 [Hz]	Down 9~Impact [Hz]	Top~Down 9 [Hz]	Down 9~Impact [Hz]
1	1~3	1~10	-	1~9
2	1~5	1~7	1~5	1~10
3	1~7	1~11	1~5	1~11
4	1~3	1~11	-	1~9
5	1~3	1~8	-	1~10
6	1~6	4~9	1~5	1~10
7	1~5	4~7	-	1~10
8	1~5	1~10	1~4	1~9
9	1~5	-	-	1~7
10	1~5	-	-	1~10
11	1~4	1~7	-	1~7
12	1~4	1~6	-	1~8
13	1~4	1~9	-	1~7
14	1~3	1~10	1	1~9
15	1~4	1~8	-	1~8
16	1~5	1~6	-	1~9
17	1~5	1~4	-	1~9

5.7 変形挙動におけるスペクトログラム値が最大値を示す時間の変化について

5.6 節によって得られた短時間フーリエ変換の結果を用いて、キックポイントの変化によって変形挙動のスペクトログラム値に与える影響を検証する。まず、変形挙動のスペクトログラム値が最大値を示す時間（変形挙動が最大値を示す時間）に与える影響について検証する⁽⁵⁹⁾。短時間フーリエ変換結果から、スペクトログラム値が最大値を示す時間を抽出し、抽出した時間を応答変数、キックポイント（2水準）、試行（8試行）、変形挙動の方向（2方向）、周波数（1Hz, 3Hz, …, 15Hzの8水準）を因子とする多因子分散分析を行った。多因子分散分析を行った結果、キックポイントを因子とするp値（帰無仮説：スペクトログラムが最大値を示す時間がキックポイントによって変化しない）が0.05未満を示した場合は、キックポイント、方向を因子とする多重比較検定を行った。全被験者で多因子分散分析、多重比較検定を行った結果を表5.7に示す。

表 5.7 キックポイント変化によるスペクトログラムが
最大値を示す時間への影響調査結果

No.	Result	Toe up/down direction	Lead/Lag direction
1	-	-	-
2	-	-	-
3	-	-	-
4	-	-	-
5	-	-	-
6	-	-	-
7	-	-	-
8	-	-	-
9	○	Low	-
10	-	-	-
11	-	-	-
12	-	-	-
13	-	-	-
14	○	-	-
15	-	-	-
16	-	-	-
17	-	-	-

表 5.7 内、「Result」は多因子分散分析の結果を示し、p 値が 0.05 未満を満たした場合は「○」、0.05 以上を示した場合は「-」とした。また、多因子分散分析で p 値が 0.05 未満を示し多重比較検定を行った結果、全周波数におけるスペクトログラムが最大値を示す時間から求めた母平均推定値が有意に早くなった（Top に近づいた）シャフトが Low-kick-point の場合は「Low」、High-kick-point の場合は「High」、差が見られなかった場合は「-」とした。

表 5.7 より、スペクトログラム値が最大値を示す時間から求めた母平均推定値に差が見られたのは被験者 9 の Toe up/down 方向のみであり、キックポイントが変化しても、シャフトの変形挙動が最大値を示す時間には影響を与えないことがわかる。

5.8 変形挙動におけるスペクトログラム値の最大値の変化について

次に、キックポイント変化がスペクトログラムの最大値に与える影響について検証する⁽⁵⁹⁾。5.7 節同様、短時間フーリエ変換結果から、スペクトログラム値の最大値を抽出し、抽出した最大値を応答変数、キックポイント (2 水準)、試行 (8 試行)、変形挙動の方向 (2 方

向), 周波数 (1 Hz, 3 Hz, …, 15Hz の 8 水準) を因子とする多因子分散分析を行った. 多因子分散分析を行った結果, キックポイントを因子とする p 値 (帰無仮説: スペクトログラムの最大値がキックポイントによって変化しない) が 0.05 未満を示した場合は, キックポイント, 方向を因子とする多重比較検定を行った. 全被験者で多因子分散分析, 多重比較検定を行った結果を表 5.8 に示す. 表 5.8 内, 「Result」は多因子分散分析の結果を示し, p 値が 0.05 未満を満たした場合は「○」, 0.05 以上を示した場合は「-」とした. また, 多因子分散分析で p 値が 0.05 未満を示し多重比較検定を行った結果, 全周波数におけるスペクトログラムの最大値から求めた母平均推定値が大きい値を示したシャフトが **Low-kick-point** の場合は「Low」, **High-kick-point** の場合は「High」, 差が見られなかった場合は「-」とした.

表 5.8 より, 全被験者において, **High-kick-point** のシャフトでスペクトログラムの最大値から求めた母平均推定値が増加することがわかる. この結果は, 図 5.1 の静解析結果と同様の傾向であり, ゴルフスイング動作時においても **High-kick-point** シャフトの変形量が多くなることがわかった.

表 5.8 キックポイント変化によるスペクトログラムの最大値への影響調査結果

No.	Result	Toe up/down direction	Lead/Lag direction
1	○	High	High
2	○	High	High
3	○	High	High
4	○	-	High
5	○	High	-
6	○	High	High
7	○	High	High
8	○	High	-
9	○	High	-
10	○	High	High
11	○	High	-
12	○	High	High
13	○	High	High
14	○	-	High
15	○	High	High
16	○	High	High
17	○	High	High

5.9 シャフトの変形挙動への特異値解析

5.8 節より、ゴルフスイング動作中の変形量の最大値は High-kick-point シャフトにおいて増加することがわかった。一方で、表 5.8 に示す結果は、Toe up/down 方向、Lead/Lag 方向それぞれの最大値の変化傾向を確認した結果となっているが、図 5.4(a)、図 5.4(b)より、Toe up/down 方向、Lead/Lag 方向における変形挙動が最大となるタイミングは異なっている。また、シャフトの変形挙動は、Toe up/down 方向、Lead/Lag 方向の変形挙動が同時に生じる（協調する）ため、スペクトログラムの最大値の変化のみではゴルフスイング動作全体における変形挙動の差を適切に抽出できていない可能性がある。そこで、各方向で協調する主要な変形挙動を抽出するために、ゴルフスイング動作中のシャフト変形挙動に対して特異値解析を行う^{(51), (62)}。シミュレーションモデルにおけるシャフト節点数が 22 点（自由度は $22 \times 3 = 66$ ）、 $[R_0]$ は無変形時におけるシャフトの節点位置座標であることを考慮し、式(3.60)によって特異値分解を行った。式(3.60)における特異値 $\Gamma_{(n)}$ は、 $[R_a] - [R_0]$ に対する第 n モードの寄与の割合を示し、各モードの寄与率 $c_{(n)}$ は以下の式によって求めることができる⁽²⁹⁾。

$$c_{(n)} = \frac{\Gamma_{(n)}^2}{\sum_{n=1}^{66} \Gamma_{(n)}^2} \times 100 \quad (5.1)$$

特異値分解を行い、式(5.1)によって各モードの寄与率を算出した。全被験者において算出した結果を表 5.9 に示す。表 5.9 において、「Average」は全試行における平均値を示し、「Std.」は全試行における標準偏差を示す。表 5.9 より、シャフトの変形挙動は第 1, 第 2 モードで 99% を占めており、2 つのモードで表現されることがわかった。

表 5.9 キックポイント変化によるスペクトログラムの最大値への影響調査結果

No.	Mode 1 [%]		Mode 2 [%]		Mode 3 [%]	
	Average	Std.	Average	Std.	Average	Std.
1	82.7	1.9	17.2	1.9	0.0	0.0
2	77.7	2.7	22.2	2.7	0.0	0.0
3	59.5	1.9	40.5	1.9	0.0	0.0
4	77.0	2.2	23.0	2.2	0.0	0.0
5	70.9	3.7	29.0	3.7	0.0	0.0
6	69.8	1.8	30.2	1.8	0.0	0.0
7	60.0	3.6	40.0	3.6	0.0	0.0
8	60.2	1.7	39.8	1.7	0.0	0.0
9	63.9	3.0	36.1	3.0	0.0	0.0
10	87.1	1.3	12.9	1.3	0.0	0.0
11	63.8	1.5	36.2	1.5	0.0	0.0
12	83.7	1.6	16.2	1.6	0.0	0.0
13	73.8	3.3	26.2	3.3	0.0	0.0
14	78.8	3.8	21.1	3.8	0.1	0.0
15	73.9	2.0	25.9	2.0	0.1	0.0
16	89.2	2.0	10.8	2.1	0.0	0.0
17	81.9	1.0	18.1	1.0	0.0	0.0

次に、第 1 モード、第 2 モードが示す変形挙動について確認を行う。式(3.61)より、第 1 モード、第 2 モードの変形挙動を算出した。算出した結果の一例として Top~Down9 におけるシャフトの変形挙動を図 5.7(a)に示し、シャフト先端部の挙動をグリップエンド部より確認した結果を図 5.7(b)に示す。

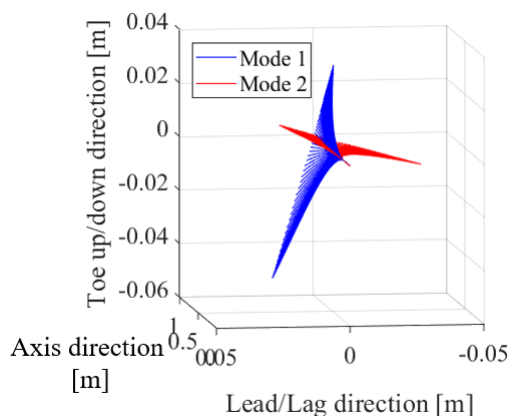


図 5.7(a) 第1・第2モードの変形挙動一例 (被験者番号 8)

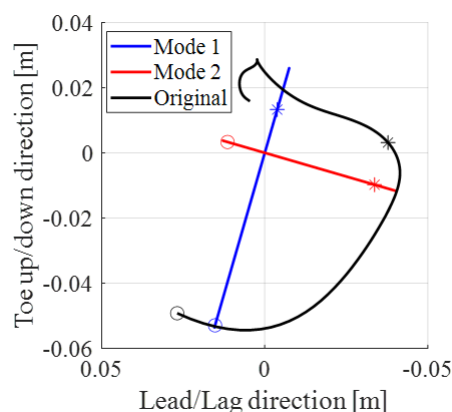


図 5.7(b) シャフト先端部の変形挙動抽出結果 (被験者番号 8)

図 5.7(a), 図 5.7(b)において, 青線, 赤線で示す結果は第1モード, 第2モードの変形挙動をそれぞれ示し, 図 5.7(b)において黒線で示す結果は特異値分解前のシャフト先端部の変形挙動を示す. また, * (アスタリスク) は Down 9 タイミングを示し, ○ (円) は Impact タイミングを示す. 図 5.7(a), 図 5.7(b)より, シャフトの変形挙動は, 2つの直交する変形挙動によって構成されることができることがわかった. また, 被験者番号 8 については, 第1モードの変形挙動は Toe up/down 方向の変形挙動が支配的であり, 第2モードの変形挙動は Lead/Lag 方向の変形挙動が支配的であることがわかった. 次に, 図 5.7(a), 図 5.7(b)と同様に, 被験者番号 1 におけるシャフトの変形挙動を特異値分解した結果から第1モード, 第2モードの変形挙動を算出した結果を図 5.8(a), 図 5.8(b)に示す. 図 5.8(b)において黒線で示す結果は特異値分解前のシャフト先端部の変形挙動を示す. また, * (アスタリスク) は Down 9 タイミングを示し, ○ (円) は Impact タイミングを示す.

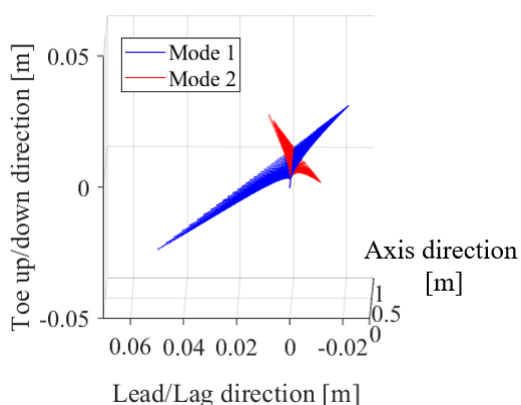


図 5.8(a) 第1・第2モードの変形挙動一例 (被験者番号 1)

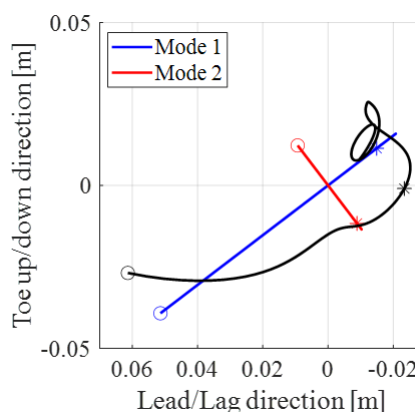


図 5.8(b) シャフト先端部の変形挙動抽出結果 (被験者番号 1)

図 5.8(a), 図 5.8(b)より, 被験者番号 1 の第 1 モード, 第 2 モードの変形挙動は被験者番号 8 と異なり, 第 1 モード, 第 2 モードともに Toe up/down 方向と Lead/Lag 方向が同様の変形を行うことがわかる. 以上の結果より, シャフトの変形挙動を特異値分解することによって得られた第 1 モード, 第 2 モードの変形挙動は被験者により異なることがわかった.

5.10 キックポイント変化が各モードの変形挙動に与える影響

5.9 節によって, シャフトの変形挙動を特異値分解することで, シャフトの変形挙動は直交する 2 つのモードによって表現されることがわかった. 次に, キックポイント変化時の 2 つのモードの挙動の差を確認し, キックポイント変化が各モードの変形挙動に与える影響について検証を行う^{(51), (62)}. 被験者番号 8, 1 におけるキックポイント変化時の第 1 モード, 第 2 モードの変形挙動を比較した結果を図 5.9(a), 図 5.9(b)に示す. 図 5.9(a), 図 5.9(b)において, 青線, 赤線, 水色線, 紫線で示す結果はそれぞれ, Low-kick-point シャフトにおける第 1, 第 2 モードの挙動, High-kick-point シャフトにおける第 1, 第 2 モードの挙動を示し, * (アスタリスク) は Down 9 タイミングを示し, ○ (円) は Impact タイミングを示す.

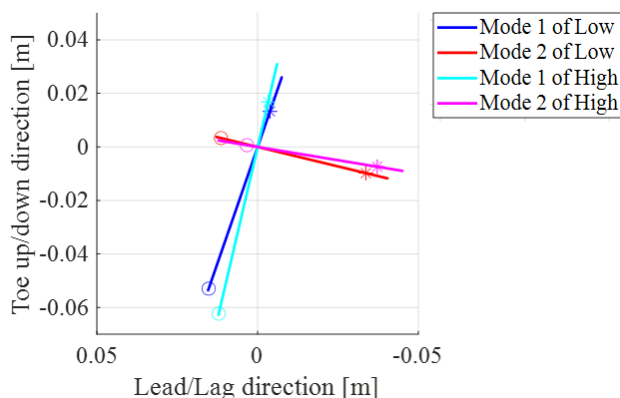


図 5.9(a) キックポイント変化時のモードの挙動比較結果 (被験者番号 8)

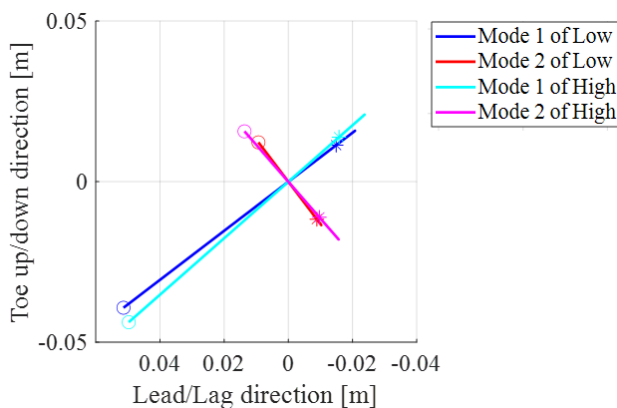


図 5.9(b) キックポイント変化時のモードの挙動比較結果 (被験者番号 1)

図 5.9(a), 図 5.9(b)より, キックポイント変化によって, 各モードにおける振幅と変形の向き (変形の傾き) が異なることがわかる. そこで, 振幅と変形の傾きを抽出し, 統計処理によって差の抽出を試みる. 振幅 (Amplitude) は図 5.9 において, Toe up/down 方向, Lead/Lag 方向における最大値(x_{max} y_{max}), 最小値(x_{min} y_{min})を用いると, 以下の式によって算出する.

$$\text{Amplitude} = \sqrt{(x_{max} - x_{min})^2 + (y_{max} - y_{min})^2} \quad (5.2)$$

次に, 変形の傾き (Angle) については, Toe up/down 方向の負方向と第 1 モードのなす角度として以下の式によって算出する. 第 1, 第 2 モードは直交するため, 変形の傾きについては第 1 モードのみ算出する. また, 式(5.3)より, Angle が 0 deg に近い場合は, 第 1 モードの変形挙動が Toe up/down 方向と一致することを示し, 90 deg に近い場合は, 第 1 モードの変形挙動が Lead/Lag 方向と一致することを示す.

$$\text{Angle} = \cos^{-1} \left(\frac{-y_{max}}{\sqrt{x_{max}^2 + y_{max}^2}} \right) \quad (5.3)$$

キックポイント変化による変形挙動の差を比較するため, 式(5.2), (5.3)より, 全試行において第 1 モード, 第 2 モードの Amplitude, 第 1 モードの Angle を算出した. 算出した結果を応答変数, キックポイント (2 水準), 試行 (8 試行) を因子とする多変量分散分析によって差の抽出を行う. 多変量分散分析は IBM SPSS Statics28.0 (IBM ニューヨーク州, アメリカ合衆国) を用いて行った. 多変量分散分析によって, Pillai のトレース値の p 値が 0.05 未満を示し, また, キックポイント間の効果の検定において, p 値が Bonferroni 法による有意水準未満を示した場合, 帰無仮説 (キックポイント間において差がない) を棄却する. キックポイントは 2 水準であるため, Bonferroni 法による有意水準は $\alpha = \frac{0.05}{2} = 0.025$ となる. 全被験者において多変量分散分析を行った結果を表 5.10 に示す. 表 5.10 において, 各値はキックポイント間における平均値を示し, 「Result」が○ (円) の場合は効果の検定において p 値が 0.025 未満となった結果, 「-」は p 値が 0.025 以上となった結果を示す.

表 5.10 より, High-kick-point における各モードの Amplitude は増加する傾向となり, 第 1 モードでは 17 名中 11 名 (被験者番号 1, 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 15, 17), 第 2 モードでは 17 名中 6 名 (被験者番号 2, 5, 8, 11, 12, 17) において有意に増加することがわかった. この結果は表 5.8 の傾向と同様であり, High-kick-point シャフトにおいて変形量が増加することを示している. また, モード毎で確認すると, 第 1 モードの Amplitude が変化した被験者数が多くなっているため, 第 1 モードがより影響を受けていると考えられる. 次に, Angle に着目すると, High-kick-point シャフトにおいて減少する傾向となり, 17 名中 9 名 (被験者番号 1, 3, 6, 7, 8, 10, 12, 16, 17) において有意に減少することがわかった.

つまり、High-kick-point シャフトでは、Toe up/down 方向の変形寄与が大きくなると考えられる。また、傾きが 45 deg 未満の場合は、Lead/Lag 方向の変形に対し、Toe up/down 方向の変形が相対的に多くなるため、45 deg 未満を示す被験者は Toe up/down 方向の変形が支配的なゴルフスイング動作を行っていると考えられる。

表 5.10 キックポイント変化によるモードの振幅，角度への影響調査結果

No.	Amplitudemonde1 × 10 ⁻³ [m]			Amplitudemonde2 × 10 ⁻³ [m]			Angle [deg]		
	Low	High	Result	Low	High	Result	Low	High	Result
1	93	98	○	40	44	-	51	48	○
2	85	92	○	51	60	○	44	43	-
3	83	91	○	65	66	-	37	30	○
4	73	76	-	37	36	-	41	39	-
5	61	57	-	41	52	○	66	65	-
6	97	107	○	76	78	-	41	38	○
7	73	81	○	52	52	-	21	11	○
8	86	93	○	56	62	○	14	6	○
9	72	75	-	34	38	-	42	32	-
10	61	66	○	28	30	-	20	17	○
11	114	124	○	80	87	○	27	26	-
12	76	78	-	35	37	○	35	32	○
13	85	93	-	47	51	-	27	26	-
14	104	116	○	59	53	-	26	26	-
15	90	102	○	48	52	-	26	23	-
16	79	85	-	34	33	-	38	33	○
17	100	109	○	39	36	○	31	27	○

次に、キックポイント変化時の第 1 モードの Amplitude, Angle の変化傾向と被験者に行ったアンケート調査結果を比較する。表 5.10 における第 1 モードの Amplitude, Angle の算出結果とアンケート調査結果を比較した結果を表 5.11 に示す。表 5.11 より、第 1 モードの Amplitude が High-kick-point シャフトにおいて有意に増加し、Angle が 45 deg 未満を示す被験者は、High-kick-point シャフトを好む傾向があることがわかる。この結果は、High-kick-point シャフトを好む被験者 10 名中 7 名（被験者番号 6, 7, 8, 10, 11, 15, 17）で見られた。この結果より、High-kick-point シャフトを好む被験者は、High-kick-point シャフトにおいて変形量が増加し、Toe up/down 方向の変形が支配的であることがわかる。また、言い換えれば、Toe up/down 方向の変形が支配的な被験者は Low-kick-point シャフトにおいて変形

量が減少することを好まないと考えられる。つまり、シャフトの変形挙動を特異値分解することで得られる主要な変形挙動における Amplitude の大きさ、Angle がフィーリングに影響を与えている可能性があると考えられる。一方、上記条件であっても Low-kick-point シャフトを好む被験者が 2 名（被験者番号 3, 14）見られることや、Amplitude に有意な差が見られなくても High-kick-point シャフトを好む被験者も見られる。これら被験者については、将来の研究において引き続き被験者数を増加し、フィーリングに影響を与える変形挙動について確認していく。

表 5.11 第 1 モードの Amplitude, Angle 算出結果とアンケート調査結果の比較結果

No.	Amplitude model $\times 10^{-3}[\text{m}]$			Angle [deg]			Preferred kick point
	Low	High	Result	Low	High	Result	
1	93	98	○	51	48	○	Low
2	85	92	○	44	43	-	Low
3	83	91	○	37	30	○	Low
4	73	76	-	41	39	-	Low
5	61	57	-	66	65	-	Low
6	97	107	○	41	38	○	High
7	73	81	○	21	11	○	High
8	86	93	○	14	6	○	High
9	72	75	-	42	32	-	High
10	61	66	○	20	17	○	High
11	114	124	○	27	26	-	High
12	76	78	-	35	32	○	High
13	85	93	-	27	26	-	High
14	104	116	○	26	26	-	Low
15	90	102	○	26	23	-	High
16	79	85	-	38	33	○	Low
17	100	109	○	31	27	○	High

5.11 結論

本章では、シャフトの設計値において、質量に次いでプレーヤのゴルフスイングに影響を与えると考えられるシャフトのキックポイントに着目し、キックポイントの変化が発揮トルク、シャフトの変形挙動に与える影響について検証した。さらに、特異値分解によって主要な変形挙動を抽出することで、キックポイントの変化による主要な変形挙動の差とフィーリング評価結果の関係について確認を行い、以下結論を得た

- (1) キックポイントの変化がトルクの発揮するタイミングに与える影響について確認を行った。一部の被験者ではキックポイントの変化によってスペクトログラムが最大値を示す時間が増加し、腕重心まわりトルクの Y 軸成分が影響を受けやすいことがわかったが、質量変化時よりも影響を受けないことがわかった。
- (2) キックポイントの変化がトルクの最大発揮量に与える影響について確認を行った。キックポイントの変化によってスペクトログラムの最大値が増加する被験者は質量変化時よりも多くなり、質量変化時よりも影響を受けやすいことがわかったが、変化傾向は被験者によって異なっており、フィーリング評価結果との関連も見られなかった。
- (3) キックポイントの変化がシャフトの変形挙動に与える影響について検証を行うべく、シミュレーションモデルによってシャフトの変形挙動を算出した。算出した挙動とモーションキャプチャデータから算出した変形挙動の RMSE の平均値が 0.013 m となり、十分な精度で変形挙動を再現できていることを確認した。
- (4) ゴルフスイング動作中のシャフトの変形挙動に短時間フーリエ変換を行い、全被験者においてスペクトログラムの強度の時間変化を確認した。Toe up/down 方向の変形挙動ではダウンスイング前半において 1~5 Hz の周波数成分、ダウンスイング後半において 1~10 Hz の周波数成分をもつ変形挙動が発生し、Lead/Lag 方向の変形挙動ではダウンスイング後半において 1~10 Hz の周波数成分をもつ変形挙動が発生することがわかった。
- (5) キックポイントの変化がシャフトの変形が最大となるタイミングに与える影響について検証を行った。キックポイントの変化により、スペクトログラム値が最大値を示すタイミングが増加した被験者は 1 人であり、キックポイントが増加してもシャフトの変形が最大となるタイミングが増加しないことがわかった。
- (6) キックポイントの変化がシャフトの変形量の最大値に与える影響について検証を行った。全被験者において、High-kick-point シャフトにおけるスペクトログラムの最大値が増加しており、ゴルフスイング動作時において High-kick-point シャフトの変形量が多くなることがわかった。
- (7) Toe up/down 方向、Lead/Lag 方向の変形挙動の協調動作を抽出するために、ゴルフスイング動作中のシャフトの変形挙動に対して特異値解析を行った。シャフトの変形挙動は第 1 モード、第 2 モードの変形挙動で寄与率が 99 %以上を占めることがわかった。
- (8) シャフトの変形挙動を特異値解析することで得られる第 1 モード、第 2 モードの主要な変形挙動の向きが被験者によって異なることがわかった。
- (9) キックポイントの変化が第 1 モード、第 2 モードの変形挙動に与える影響について検証を行うため、各モードの振幅、第 1 モードと Toe up/down 方向の負方向とのなす角度を算出した。第 1 モードでは 17 名中 11 名において、第 2 モードでは 17 名中 6 名

において High-kick-point シャフトによって振幅が増加し、17 名中 9 名において High-kick-point シャフトによって Toe up/down 方向の負方向とのなす角度が減少し、Toe up/down 方向の変形挙動が相対的に増加することがわかった。

- (10) キックポイントの変化による第 1 モードと Toe up/down 方向における負方向とのなす角度の変化とシャフトの好みに関するアンケート評価結果を比較した。High-kick-point を好む被験者 10 名のうち 7 名が、Toe up/down 方向の負方向とのなす角度が 45 deg 未満であり、High-kick-point シャフトで第 1 モードの振幅が増加することがわかった。

第6章 シャフトの変形挙動とゴルフスイング動作の関連性調査

6.1 緒言

5章では、シャフトの設計値のうち、シャフトの質量に次いでゴルフスイング動作に影響を与えると考えられるキックポイントに着目し、短時間フーリエ変換によってキックポイントの変化がゴルフスイング動作中の発揮トルクやシャフトの変形挙動に与える影響を明らかにした。また、特異値分解によってシャフトの変形挙動を構成する主要な変形挙動を抽出し、キックポイントの変化が主要な変形挙動に与える影響を明らかにした。その結果、キックポイントの変化によるシャフトの変形挙動の差がフィーリングに影響を与えていることがわかった。シャフトの変形挙動はゴルフスイング動作によって発生するため、変形挙動の差とゴルフスイング動作の関連性を調査する必要がある。

ゴルフスイング動作とゴルフクラブの関係における先行研究では、ゴルフスイング動作中のシャフトの剛性をもつ役割を明らかにした研究⁽⁹⁾や、シャフトの剛性変化がヘッドの姿勢に与える影響を調査した研究⁽⁶³⁾、ゴルフスイング動作中にシャフトに発生する慣性力の各成分がシャフトの変形挙動に与える影響を調査した研究⁽⁴⁸⁾、ひずみゲージによって複数プレーヤにおける変形挙動の差を明らかにした研究⁽⁶⁴⁾があるが、ゴルフスイング動作とシャフト変形挙動の差の被験者間における共通点については調査されていない。そこで本章では、被験者間におけるシャフト変形挙動の差とゴルフスイング動作の差の共通点について調査を行う。

前章で見られた主要な変形挙動において Toe up/down 方向の変形が多い被験者と、Toe up/down 方向の変形と Lead/Lag 方向の変形挙動が同様である被験者のスイングの差に着目し、ゴルフスイング動作を評価するためのスイング平面を定義する。また、スイング平面に対するグリップ姿勢の関係についても着目し、スイング平面、スイング平面とグリップ姿勢の関係を用いて変形挙動の向きが異なる被験者間における共通点を抽出する。さらに、ゴルフボールの軌道に影響を与える Impact 付近の変形挙動に着目し、シミュレーションモデルによって算出した Impact 付近のシャフト変形挙動に差が見られる被験者間における共通点を抽出する。

6.2 ゴルフスイング動作計測実験

5.2 節同様、ゴルフスイング動作中のシャフトの変形挙動を算出するために、2.1 節～2.4 節に記載のゴルフスイング動作計測実験を行った。被験者は右利きの男性ゴルファ 17 名を対象とした。対象とした被験者の情報を表 6.1 に示す。計測に使用したゴルフクラブはクラブヘッドとシャフトが着脱可能な機構を備えており、クラブヘッドは被験者が通常使用しているものを使用した。シャフトについては、High-kick-point、Low-kick-point の同質量のシャフト 2 本とした。どちらも市販されているシャフトである。計測時の試行数については、各シャフト 8 試行とした。また、打感や弾道の結果によって被験者がゴルフスイング動作を調整しないようにスポンジボールを用いて計測を行った。ゴルフスイング動作計測実験実

施後、被験者にフィーリング評価結果についてアンケート調査を行い、High-kick-point, Low-kick-point のシャフトのうち振りやすいと感じたシャフトについて回答を得た。被験者が振りやすいと回答したアンケート調査結果を表 6.1 に併せて記載した。

表 6.1 被験者情報

No.	Height [m]	Weight [kg]	Age group	Average Score	Preferred kick point
1	1.77	82	40	92	Low
2	1.69	92	40	87	Low
3	1.77	74	40	85	Low
4	1.76	70	50	82	Low
5	1.80	70	50	97	Low
6	1.79	67	50	87	High
7	1.75	63	30	100	High
8	1.72	79	50	82	High
9	1.74	75	20	75	High
10	1.65	60	20	108	High
11	1.85	72	20	108	High
12	1.62	63	30	80	High
13	1.85	70	40	102	High
14	1.81	95	30	95	Low
15	1.73	80	50	99	High
16	1.67	76	20	92	Low
17	1.66	62	40	71	High

6.3 シミュレーションモデルを用いたシャフトの変形挙動算出

5.5 節同様、3.2 節にて構築したシミュレーションモデルによってシャフトの変形挙動を算出する。3.2 節で構築したシミュレーションモデルに、6.2 節で計測したゴルフスイング動作計測結果を入力し、シャフトの変形挙動を算出した⁽⁵¹⁾、⁽⁶²⁾。2.2 節に示したシャフト先端マーカ S_3 を 2.6 節に示したグリップ座標系に座標変換することで得たモーションキャプチャデータにおける変形挙動と、シミュレーションモデルによって算出した変形挙動を比較した結果の一例を図 6.1(a)、図 6.1(b)に示す。

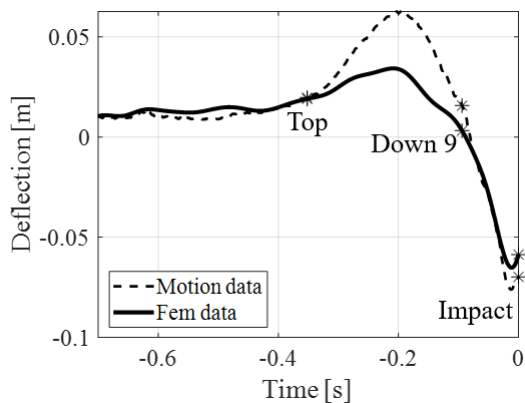


図 6.1(a) Toe up/down 方向における
変形挙動比較結果
(被験者番号 8)

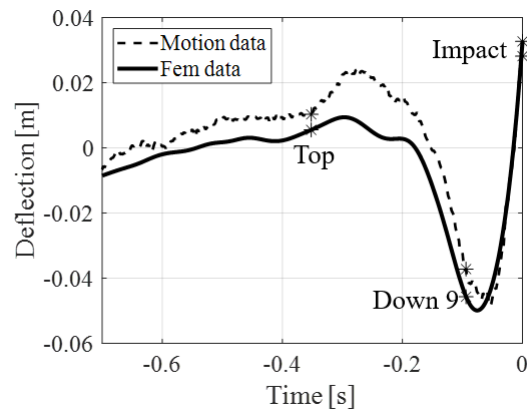


図 6.1(b) Lead/Lag 方向における
変形挙動比較結果
(被験者番号 8)

図 6.1(a), 図 6.1(b)において, 点線で示す結果はモーションキャプチャデータにおける変形挙動, 実線で示す結果はシミュレーションモデルによって算出した結果を示す. 図 6.1(a), 図 6.1(b)より, それぞれの変形挙動を比較した結果, Toe up/down 方向における変形挙動における Top~Down 9 区間において 0.02 m 程度の差が見られることがわかる. シミュレーションモデルによって算出した変形挙動の再現度を評価するため, RMSE 値 (Root Mean Square Error) 値を算出した. 図 6.1(a), 図 6.1(b)における RMSE 値は 0.015 m, 0.016 m となった. また, 全試行において RMSE 値を算出した結果を表 6.2 に示す. 表 6.2 より全試行において RMSE 値が 0.012 m~0.016 m を示し, 全体の平均は 0.013 m であったため, 十分な精度で変形挙動を算出できていると考えられる.

表 6.2 各試行における RMSE 値算出結果

Trial	Toe up/down 方向 [m]	Lead/Lag 方向 [m]
1	0.015	0.016
2	0.013	0.014
3	0.013	0.013
4	0.013	0.012
5	0.015	0.015
6	0.013	0.013
7	0.013	0.013
8	0.015	0.016

6.4 シャフトの変形挙動への特異値解析

5.9 節同様，シャフトの変形挙動における協調動作を抽出するために，ゴルフスイング動作中の変形挙動に対して特異値解析を行う^{(51), (62)}．式(3.60)によりシャフトの変形挙動に特異値解析を行った．特異値解析を行い，式(3.61)より第 1 モード，第 2 モードの変形挙動を算出した．シャフト先端部の挙動をグリップエンド部より確認した結果の一例として，被験者番号 8 における結果を図 6.2(a)，被験者番号 1 における結果を図 6.2(b)に示す．図 6.2(a)，図 6.2(b)において，青線，赤線で示す結果は第 1 モード，第 2 モードの変形挙動をそれぞれ示し，線で示す結果は特異値分解前のシャフト先端部の変形挙動を示す．また，* (アスタリスク) は Down 9 タイミングを示し，○ (円) は Impact タイミングを示す．

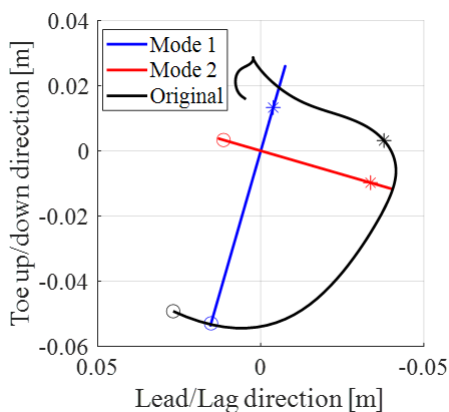


図 6.2(a) シャフト先端部の変形挙動抽出結果 (被験者番号 8)

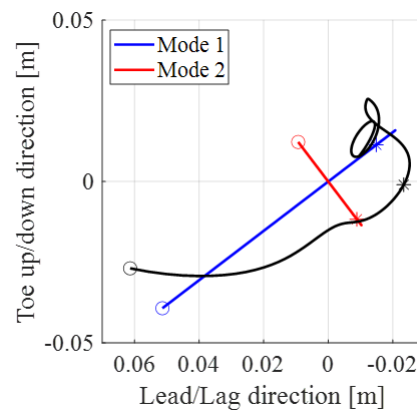


図 6.2(b) シャフト先端部の変形挙動抽出結果 (被験者番号 1)

図 6.2(a)，図 6.2(b)より，被験者番号 8 の第 1 モードの変形挙動は Toe up/down 方向が支

配的であり、被験者番号1の第1モードの変形挙動は Toe up/down 方向と Lead/Lag 方向が同様の変形を行うことがわかる。この結果より、被験者によって第1モード、第2モードの変形挙動の傾きが異なることがわかる。各モードは直交するため、以後、第1モードの変形挙動の傾きに注目する。第1モードの変形挙動の傾き評価するため、第1モードの変形挙動と Toe up/down 方向の負方向となす角度 (Angle) を算出する。図 6.2 において、Toe up/down 方向、Lead/Lag 方向における最大値(x_{max} y_{max})、最小値(x_{min} y_{min})を抽出し、式(5.4)によって Angle を算出する。全被験者で Low-kick-point シャフトをスイングした際における Angle を算出した結果を表 6.3 に示す。表 6.3 内、「Average」は試行間の平均値の算出結果、「Std.」は標準偏差を示す。表 6.3 より、第1モードの Angle が 40 deg 未満の被験者（被験者番号 3, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17）、Toe up/down 方向の変形が相対的に多くなり、50 deg 以上の被験者（被験者番号 1, 5）は Lead/Lag 方向の変形が相対的に多くなり、40 deg 以上 50 deg 未満（被験者番号 2, 4, 6, 9）であれば Toe up/down, Lead/Lag 方向の変形が同様であることを示す。表 6.3 に示す結果をもとに、変形挙動の傾きとゴルフスイング動作の関連性について調査を行う。

表 6.3 第 1 モードの変形挙動の傾き算出結果

No.	Angle of Low-kick-point shaft [deg]	
	Average	Std.
1	51	2.8
2	44	3.6
3	37	4.4
4	41	1.7
5	66	2.9
6	41	2.8
7	21	4.1
8	14	3.6
9	42	5.7
10	20	2.0
11	27	2.7
12	35	1.5
13	27	3.5
14	26	4.3
15	26	2.4
16	38	1.6
17	31	2.0

6.5 ゴルフスイング平面と第 1 モードの変形挙動の傾きの関係について

6.4 節で算出した第 1 モードの Angle とゴルフスイング動作の関連性について確認するため、被験者のゴルフスイング平面に着目する⁽⁶⁵⁾。ゴルフスイング動作中におけるゴルフスイング平面は、図 2.2 に示すゴルフクラブのグリップ部に取り付けたマーカ S_0 の軌跡より算出する。絶対座標系とゴルフスイング平面の関係を図 6.3 に示す。図 6.3 より、スイング平面は $Z = 0$ において、Y 軸とのなす角度が θ_{rot} の方向を持ち、X-Y 平面に対して θ_{pl} の仰角を持つと考えられる。これら θ_{rot} 、 θ_{pl} は、マーカ S_0 の軌跡から構成される平面方程式をもとに算出する。Top 以降任意のタイミングおよび、そのタイミングより 10 点後のタイミングと 20 点後のタイミングにおける S_0 の位置を点 A1、点 A2、点 A3 とし、各座標をそれぞれ $(A1_x, A1_y, A1_z)$ 、 $(A2_x, A2_y, A2_z)$ 、 $(A3_x, A3_y, A3_z)$ とする。A2 を通り、平面に対して直交する法線ベクトルを $nA2: (nA2_x, nA2_y, nA2_z)$ とすると、 $nA2$ は点 A2 から点 A1 へのベクトルと、点 A2 から点 A3 へのベクトルの外積により、以下の式で求められる。

$$\begin{aligned}
nA2_x &= (A1_y - A2_y)(A3_z - A2_z) - (A1_z - A2_z)(A3_y - A2_y) \\
nA2_y &= (A1_z - A2_z)(A3_x - A2_x) - (A1_x - A2_x)(A3_z - A2_z) \\
nA2_z &= (A1_x - A2_x)(A3_y - A2_y) - (A1_y - A2_y)(A3_x - A2_x)
\end{aligned} \tag{6.1}$$

平面上の点に点A2と異なる点B(x y z)をとると、点A2から点Bへ向かうベクトルとnA2は直交するため、

$$nA2_x(x - A2_x) + nA2_y(y - A2_y) + nA2_z(z - A2_z) = 0 \tag{6.2}$$

となる。式(6.2)をまとめると、

$$nA2_x x + nA2_y y + nA2_z z - (nA2_x A2_x + nA2_y A2_y + nA2_z A2_z) = 0 \tag{6.3}$$

となり、式(6.3)がスイング平面の方程式となる。

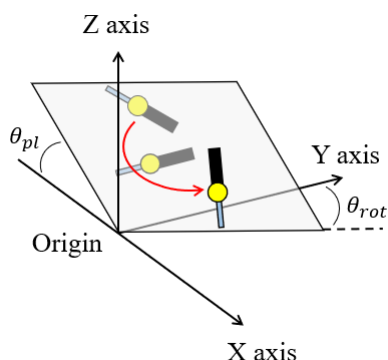


図 6.3 絶対座標とスイング平面の関係

次に、回転角 θ_{rot} を算出する。平面方程式において、 $x = z = 0$ における点を $(0 \ y_p \ 0)$ 、 $y = z = 0$ における点を $(x_p \ 0 \ 0)$ とすると、点 $P(x_p \ y_p \ 0)$ とY軸のなす角度が回転角 θ_{rot} となり、

$$\theta_{rot} = \cos^{-1} \left(\frac{y_p}{\sqrt{(x_p^2 + y_p^2)}} \right) \tag{6.4}$$

によって求めることができる。次に、仰角 θ_{pi} について算出する。仰角 θ_{pi} を算出するため、点A2を通り、原点から $(x_p \ y_p \ 0)$ までのベクトル上にある任意の点 $P'(x'_p \ y'_p \ 0)$ を定義する。点 P' から点 P までのベクトルと、点 P' から点A2までのベクトルは直交するため、

$$\overrightarrow{(A2 - P')} \cdot \overrightarrow{(P - P')} = 0 \quad (6.5)$$

となる。また、原点から点 P までのベクトルの単位ベクトルを \mathbf{vP} とすると、点 P' は任意定数 t を用いて

$$P' = P + t\mathbf{vP} \quad (6.6)$$

と表現できる。式(6.6)を式(6.5)に代入すると、

$$\overrightarrow{(A2 - P - t\mathbf{vP})} \cdot t\mathbf{vP} = 0 \quad (6.7)$$

となる。さらに、

$$\mathbf{vP} \cdot \mathbf{vP} = 1 \quad (6.8)$$

を考慮すると、

$$t = \overrightarrow{(A2 - P)} \cdot \mathbf{vP} \quad (6.9)$$

により求めることができる。式(6.9)より求めた t を式(6.6)に代入し、点 P' を算出する。点 P' 、点 $A2$ を X-Y 平面に投影した点 $A2'$ を用いると、仰角 θ_{pl} を以下の式によって算出することができる。

$$\theta_{pl} = \cos^{-1} \left(\frac{\overrightarrow{(A2' - P')} \cdot \overrightarrow{(A2 - P')}}{|A2' - P'| |A2 - P'|} \right) \quad (6.10)$$

式(6.4)、式(6.10)より回転角 θ_{rot} 、仰角 θ_{pl} を算出した結果の一例を図 6.4(a)、図 6.4(b)に示す。図 6.4(a)、図 6.4(b)において、* (アスタリスク) はそれぞれ Top, Down 9, Impact タイミングを示す。図 6.4(a)より、スイング平面の回転角 θ_{rot} は Top で約 70 deg を示し、時間が進むにつれて減少し、Down 9 から Impact にかけては負の値を示すことがわかる。次に、図 6.4(b)より、スイング平面の仰角 θ_{pl} は Top で 20 deg を示し、時間が進むにつれて増加し、Impact では 70 deg を示すことがわかる。スイング平面の回転角 θ_{rot} はゴルフスイングの軌道と関連しており、スイング平面の向きが正の場合はゴルフスイング軌道が内側から外側へ動く方向 (インサイドアウト軌道) を示し、スイング平面の向きが負の場合はスイング軌道が外側から内側へ動く方向 (アウトサイドイン軌道) を示す。また、スイング平面の仰角

θ_{pl} については、値が小さい場合はスイング平面が X-Y 平面と水平になり（スイング平面が寝た状態）、値が大きい場合はスイング平面が X-Y 平面と垂直になる（スイング平面が立つ状態）。この結果より、被験者番号 8 では、ダウンスイング開始直後は、インサイドアウト軌道でスイング平面が寝た状態であり、ダウンスイングが進むにつれてインサイドアウト軌道からアウトサイドイン軌道に変化し、さらにスイング平面が立つ状態になり、Impact ではスイング平面の仰角 θ_{pl} は変化せずに、スイング平面が立つ状態でスイング軌道のみアウトサイドイン軌道となると考えられる。

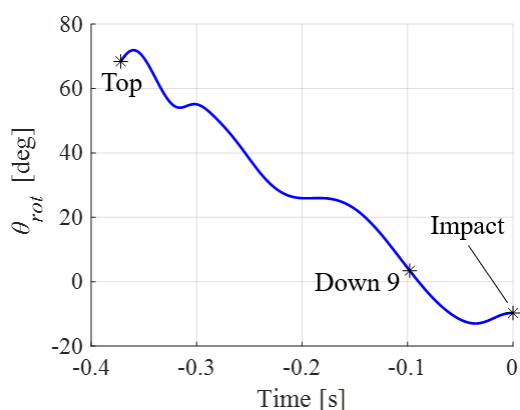


図 6.4(a) 回転角 θ_{rot} 算出結果
(被験者番号 8)

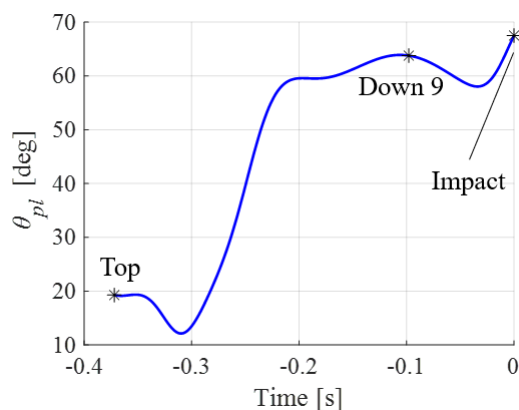


図 6.4(b) 仰角 θ_{pl} 算出結果
(被験者番号 8)

算出した結果を用いて、5.4 節で算出した第 1 モードの傾きである Angle とスイング平面の関係について確認する。Toe up/down 方向の変形は主に、スイング平面の仰角 θ_{pl} に寄与すると考えられるため、Impact における仰角 θ_{pl} に着目する。全被験者、全試行においてインパクトにおける仰角 θ_{pl} を算出し、Angle との関係を確認した。Angle とスイング平面の仰角 θ_{pl} を散布図でまとめた結果を図 6.5 に示す。図 6.5 において、赤*（アスタリスク）で示す結果は 6.4 節で Angle が 40 deg 未満であった被験者（被験者番号 3, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17），青*で示す結果は Angle が 50 deg 以上の被験者（被験者番号 1, 5），黒*で示す結果は Angle が 40 deg 以上 50 deg 未満の被験者（被験者番号 2, 4, 6, 9）を示す。

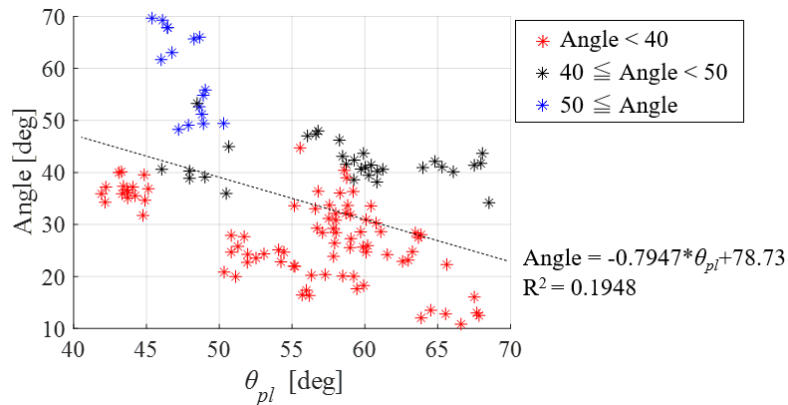


図 6.5 変形挙動の傾きとスイング平面の仰角 θ_{pl} の関係性調査結果

図 6.5 より, Angle とスイング平面の仰角 θ_{pl} の傾向を全てのデータで確認した結果, Angle と仰角 θ_{pl} にはゆるやかな負の相関を持ち, スイング平面の仰角 θ_{pl} が大きくなるにつれ Angle が小さくなる傾向があることがわかる (決定係数 $R^2=0.1948$). つまり, スイング平面が立つ状態でゴルフスイングを行う被験者は, 変形挙動の傾きが Toe up/down 方向に近付くことがわかった. これら傾向は全被験者で確認できるものの, 青*で示す一部の被験者は, 仰角 θ_{pl} が 45 deg 以上, 50 deg 未満となるが Angle が 60 deg 以上 70 deg 未満となる場合や, 黒*で示す一部の被験者は仰角 θ_{pl} が 55 deg 以上となるが Angle が 35 deg 以上となる場合も見られ, 傾向が異なる被験者が見られた.

6.6 平面角度に対するグリップ姿勢の考慮

6.5 節では, Angle とゴルフスイング動作の関係を調査するために, スイング平面を算出した. その結果, スイング平面が立つ状態のゴルフスイングを行う被験者は第 1 モードの Angle が減少する傾向があるものの, 一部被験者では異なる傾向が得られた. 異なる傾向が得られた要因として, スイング平面上におけるグリップの姿勢が他の被験者と異なると考えられる. そこで, スイング平面とグリップの姿勢の関係を抽出する. スイング平面とグリップ姿勢の関係の抽出に向け, 2.2 節に示したマーカ S_2 に着目する. スイング中の S_2 マーカと S_0 マーカの間を関係を図 6.6 に示す. 2.2 節より, S_2 マーカから S_0 マーカに向かうベクトルは, Lead 方向 (グリップ座標系における y 軸の正方向) と一致する向きに設定しているため, スイング方向が Lead 方向と一致する場合はスイング方向と Lead 方向のなす角度が 0 deg を示す. 一方, スイング方向が Toe-down 方向 (グリップ座標系における x 軸の負方向) と一致する場合はスイング方向と Lead 方向のなす角度が 90 deg を示す. この関係を利用し, スイング平面とグリップの姿勢の角度を算出する.

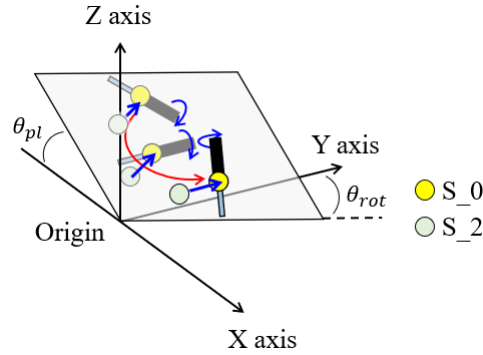


図 6.6 スイング平面とグリップ姿勢の関係抽出に向けた S_0, S_2 マーカの関係

スイング平面を構築する際に求めた A1 から A2 へ向かうベクトルと, S_2 から S_0 へ向かうベクトルを用いて, スイング方向と Lead 方向のなす角度 θ_{grip} は以下の式により求めることができる.

$$\theta_{grip} = \cos^{-1} \left(\frac{(\overrightarrow{S_0 - S_2}) \cdot (\overrightarrow{A2 - A1})}{|\overrightarrow{S_0 - S_2}| |\overrightarrow{A2 - A1}|} \right) \quad (6.11)$$

式(6.11)より, スイング方向と Lead 方向のなす角度 θ_{grip} を算出した結果の一例 (被験者番号 8) を図 6.7(a) に示す. また, 比較として他の被験者 (被験者番号 6) で算出した結果を図 6.7(b) に示す. 図 6.7(a), 図 6.7(b) において* (アスタリスク) は, それぞれ Top, Down 9, Impact タイミングを示す. 図 6.7(a) より, 被験者番号 8 では, Top 以降, θ_{grip} が 150 deg 以上まで増加し, Down 9 付近では 100 deg となり, Impact にかけて 20 deg に減少する. この結果から, 被験者番号 8 においては, Top 以降においてスイング方向が Lead 方向とは逆の方向 (Lag 方向) を示すが, ゴルフスイング全体でスイング方向が Toe-down 方向を示すことがわかる. 一方, 被験者番号 6 においては, Top 以降, θ_{grip} が 60 deg 付近となり, Down 9 付近で 100 deg に増加し, Impact 付近では 25 deg まで減少する. この結果から, 被験者番号 6 では, Down 9 付近においてスイング方向が Toe-down 方向を示すが, スイング全体では Lead 方向にスイングを行うことがわかる. つまり, スイング方向が Lead 方向を示すため, Toe-down 方向を示す被験者よりも Lead/Lag 方向の変形挙動が多くなり, Angle が大きくなると考えられる. スイング全体で Lead 方向にゴルフスイングが行われる被験者は, 被験者番号 6 と同様に, Down 9 付近において θ_{grip} に極大値が見られると考えられるため, 同全被験者において Down 9 付近で極大値を見られるかを確認した. 図 6.5 に示す結果より, Down 9 付近において θ_{grip} に極大値が見られる被験者を抽出した結果を図 6.8 に示す. 図 6.8 において, ○ (円) で示す結果が, Down 9 付近において θ_{grip} に極大値が見られる被験者を示す.

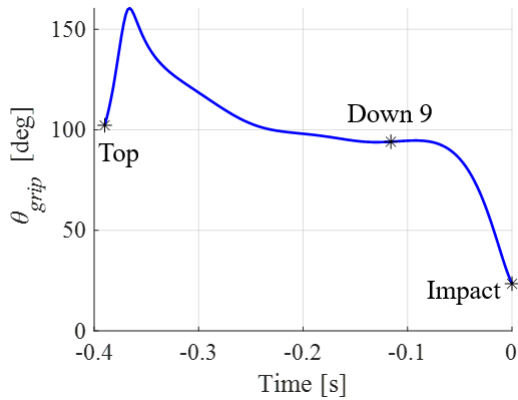


図 6.7(a) スイング平面とグリップの姿勢のなす角度算出結果 (被験者番号 8)

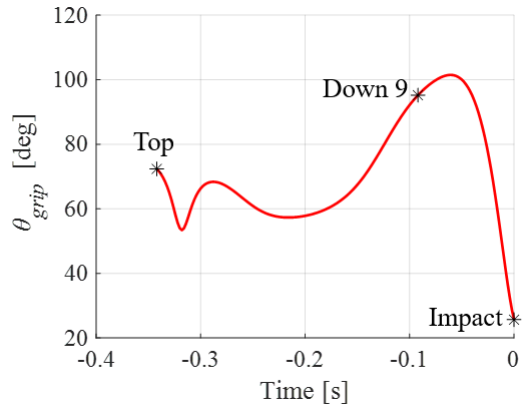


図 6.7(b) スイング平面とグリップの姿勢のなす角度算出結果 (被験者番号 6)

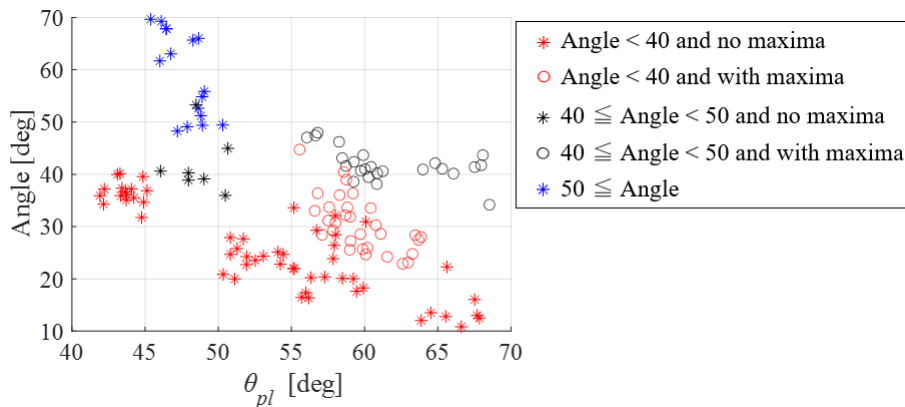


図 6.8 θ_{grip} の極大値の有無を考慮した変形挙動の傾きとスイング平面の仰角 θ_{pl} の関係性調査結果

図 6.8 より、○で示す結果は、図 6.7 の結果において、スイング平面の仰角 θ_{pl} に対して Angle が大きくなった被験者を示すことがわかる。この結果より、スイング平面が立つ状態でゴルフスイングを行う被験者であっても、スイング方向が Lead 方向を示す場合、Angle が大きくなることがわかった。一方、青の*で示す一部の被験者は、スイング方向が Lead 方向を示さず、スイング平面とスイング方向の関係を考慮しても、スイング平面の仰角 θ_{pl} に対して Angle が大きくなる傾向となった。この被験者は 1 名であり、その他の共通点を抽出することが困難である。そのため、今後の研究において解析する被験者数を増加し、別の要因の抽出を試みる。

6.7 Impact 付近のシャフトの変形挙動の差の抽出

これまでの取り組みでは、ダウンスイング期間中に着目し、ダウンスイング期間中におけるシャフトの変形挙動とゴルフスイング動作との関連について明らかにした。一方で、実際のゴルフプレイ時においては、ゴルフクラブヘッドがゴルフボールに衝突を行うことでゴルフボールを飛ばすため、ゴルフボールとの衝突付近のシャフトの変形挙動の解析も重要である。そこで本研究では、ゴルフスイング動作が Impact 付近のシャフト変形挙動に与える影響について明らかにする⁽⁶⁹⁾。図 5.1 より、静的荷重をシャフトに付加した際、High-kick-point シャフトにおける変形量が多くなることがわかっている。そこで、全被験者でゴルフスイング動作と Impact 付近のシャフト変形挙動の関係を抽出し、ゴルフスイング動作によりシャフト変形挙動が変化するかを確認する。また、5.4 節の取り組みにより、キックポイント変化によってゴルフスイング動作が変化することが示されたため、ゴルフスイングの差も加味した上で確認を行う。Impact 付近のシャフト変形挙動の関係を確認するためのフローを図 6.9 に示す。図 6.9 より、まず、Low-kick-point, High-kick-point シャフトのゴルフスイング動作計測結果を、Low-kick-point, High-kick-point シャフトのシミュレーションモデルにそれぞれ入力し、Low-kick-point のゴルフスイング動作計測結果を入力とする Low-kick-point, High-kick-point シャフトの変形挙動を算出し、また、High-kick-point のゴルフスイング動作計測結果を入力とする Low-kick-point, High-kick-point シャフトの変形挙動をそれぞれ算出する。算出後、各入力における Impact 付近のシャフトの変形挙動の差を算出し、静解析結果の傾向と比較する。全被験者で比較を行った結果、Low-kick-point, High-kick-point シャフトのゴルフスイング動作計測結果に関わらず、全結果で静解析と同様の傾向が得られた場合は、シャフトの変形挙動の差はキックポイントの差に依存し、ゴルフスイング動作との関係は少ないと判断する。また、静解析と異なる傾向を示す被験者を確認できた場合は、シャフト変形挙動の差はゴルフスイング動作の差によって発生すると判断する。

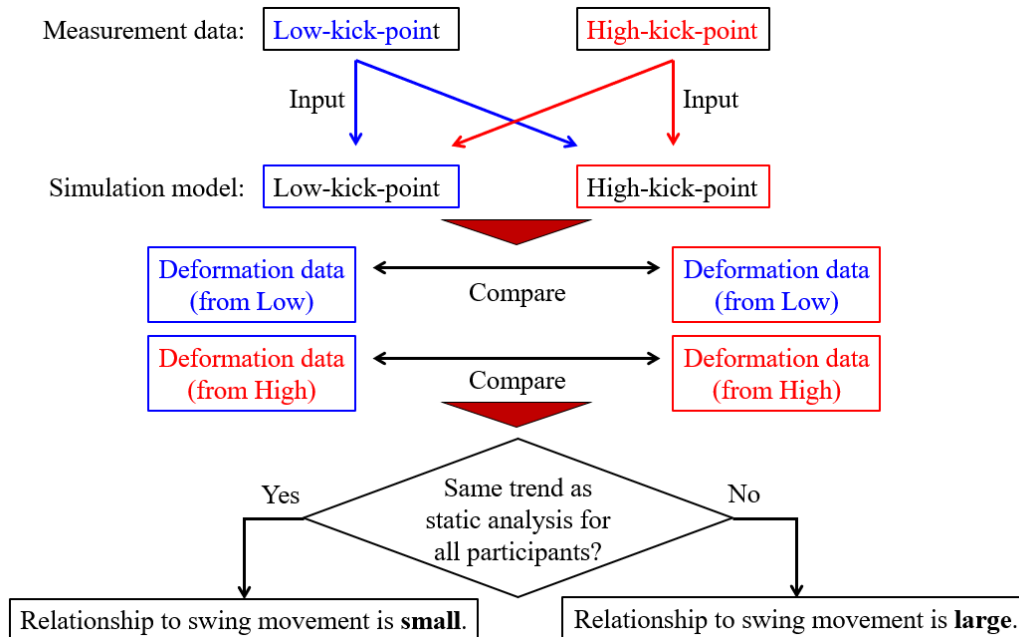


図 6.9 シャフト先端挙動の差に寄与する要因の特定フロー

図 6.9 に従い、キックポイント変化時のゴルフスイング動作計測結果をそれぞれ、Low-kick-point, High-kick-point シャフトのシミュレーションモデルに入力し、変形挙動を算出した。被験者番号 8 において Low-kick-point シャフトにおけるゴルフスイング動作計測結果を Low-kick-point, High-kick-point シャフトのシミュレーションモデルに入力し、変形挙動を比較した結果を図 6.10(a), 図 6.10(b)に示し、被験者番号 1 における比較結果を図 6.11(a), 図 6.11(b)に示す。図 6.10(a)~図 6.11(b)において、青色で示す結果は、Low-kick-point シャフトのシミュレーションモデルにおける解析結果、赤色で示す結果は High-kick-point シャフトのシミュレーションモデルにおける解析結果を示す。図 6.10(a), 図 6.10(b)より、被験者番号 8 における Toe up/down 方向の変形挙動では、Impact 付近の変形量は High-kick-point シャフトが多くなる結果に対し、Lead/Lag 方向の変形挙動では Low-kick-point シャフトが多くなることがわかった。一方、図 6.11(a), 図 6.11(b)より、被験者番号 1 においては、Toe up/down 方向、Lead/Lag 方向ともに Impact 時の変形量は High-kick-point シャフトが多くなることがわかった。

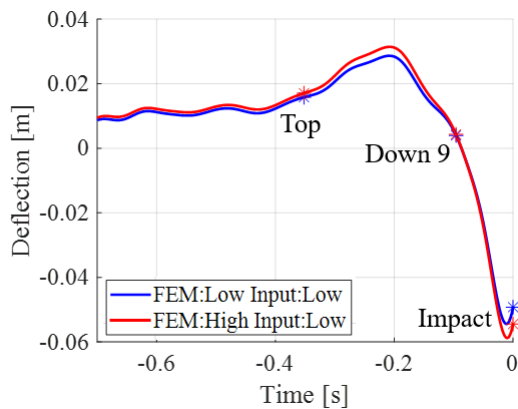


図 6.10(a) Toe up/down 方向における
同一スイングデータ入力時の
変形挙動比較結果
(被験者番号 8)

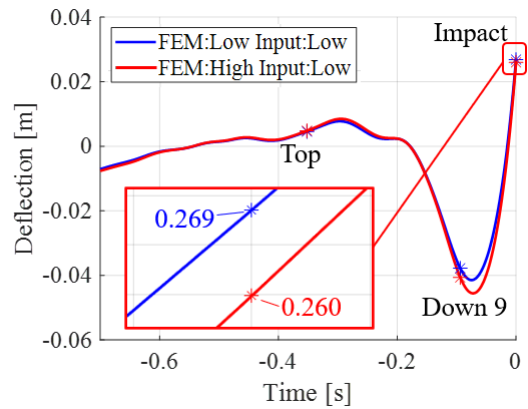


図 6.10(b) Lead/Lag 方向における
同一スイングデータ入力時の
変形挙動比較結果
(被験者番号 8)

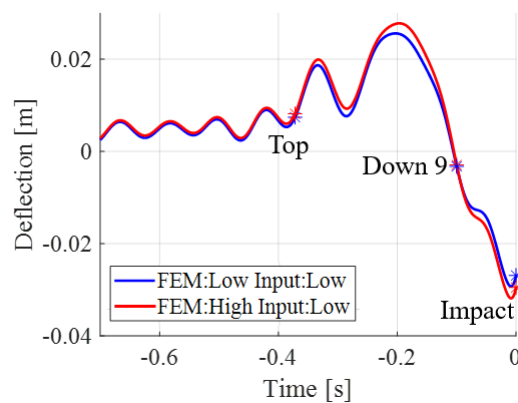


図 6.11(a) Toe up/down 方向における
同一スイングデータ入力時の
変形挙動比較結果
(被験者番号 1)

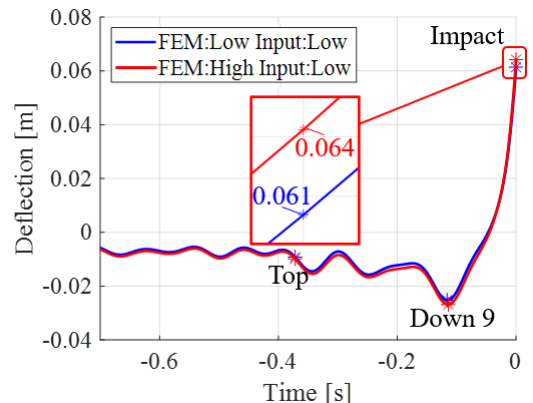


図 6.11(b) Lead/Lag 方向における
同一スイングデータ入力時の
変形挙動比較結果
(被験者番号 1)

上記結果をもとに、全被験者において変形量が多いシャフトを抽出した結果を表 6.4 に示す。表 6.4 において、「Low」と示す結果は、Impact 時において Low-kick-point シャフトの変形量が多い場合を示し、「High」と示す結果は、Impact 時において High-kick-point シャフトの変形量が多い場合を示す。表 6.4 より、Toe up/down 方向では、全被験者において High-kick-point シャフトで変形量が多くなることがわかる。また、Lead/Lag 方向では、Low-kick-point シャフトのスイング動作計測結果入力時は 17 名中 6 名（被験者番号 3, 4, 5, 6, 7, 10）において、High-kick-point シャフトのゴルフスイング動作計測結果入力時は、17 名中 8 名（被験者番号 3, 5, 6, 7, 8, 10, 14, 15）において Low-kick-point シャフトで変形量が多くなることがわかる。この結果より、図 6.9 の判断フローに基づき、シャフト変形挙動の

差は被験者間のゴルフスイング動作の差によって発生していることがわかった。つまり、静的な解析結果と異なる傾向が見られた被験者番号3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 14, 15は、ゴルフスイング動作によって Impact 付近における Low-kick-point シャフトの変形量を増加させていると考えられる。

表 6.4 Impact 時の変形量が多いシャフトの抽出結果

No.	Input: Low-kick-point		Input: High-kick-point	
	Toe up/down direction	Lead/Lag direction	Toe up/down direction	Lead/Lag direction
1	High	High	High	High
2	High	High	High	High
3	High	Low	High	Low
4	High	Low	High	High
5	High	Low	High	Low
6	High	Low	High	Low
7	High	Low	High	Low
8	High	High	High	Low
9	High	High	High	High
10	High	Low	High	Low
11	High	High	High	High
12	High	High	High	High
13	High	High	High	High
14	High	High	High	Low
15	High	High	High	Low
16	High	High	High	High
17	High	High	High	High

6.8 ゴルフスイングの差の抽出に向けたウェーブレット変換

6.7 節のシミュレーションモデルを用いたシャフトの変形挙動の解析結果より、Impact 付近の Lead/Lag 方向におけるシャフト変形量は被験者のゴルフスイング動作によって変化し、Low-kick-point シャフトの変形量を増加させるゴルフスイングを行っていることがわかった。式(3.46)より、ゴルフスイング動作によってシャフトの各要素に慣性力が与えられることでシャフトの変形が発生する。そのため、Lead/Lag 方向における慣性力が被験者間で異なると考えられるが、式(3.46)に示す通り、慣性力は加速度 $\dot{\hat{x}}_1$ の並進成分だけでなく、 $[\tilde{\omega}_{grip}]$ 、 $[\dot{\tilde{\omega}}_{grip}]$ において非対角項を有するため、Lead/Lag 方向の慣性力であっても全方向の成分が含まれる。そこで、慣性力ではなく、加速度 $\dot{\hat{x}}_1$ 、角速度 ω_{grip} 、角速度 $\dot{\omega}_{grip}$ の各成分の比較

を行うことで、被験者間のゴルフスイング動作の差を抽出する。ゴルフスイング動作中のグリップ座標系まわりの角速度の一例を図 6.12(a)~(c)に示す。これまで同様、被験者間における加速度、角速度、角加速度の差を抽出するため、短時間フーリエ変換を行う^{(59), (60)}。4.4節同様、図 6.12(a)~(c)に示す角速度について窓関数区間、オーバーラップ数を検討し、短時間フーリエ変換を行った。事前検証によって決定した窓関数区間、オーバーラップ数を表 6.5 に示し、短時間フーリエ変換を行い、カラーマップ表記を行った結果を図 6.13(a)~(c)に示す。

表 6.5 事前検証によって設定した窓関数区間、オーバーラップ数

Axis	Window width [s]	Number of overlaps [s]
x	0.200	0.180
y	0.320	0.280
z	0.128	0.120

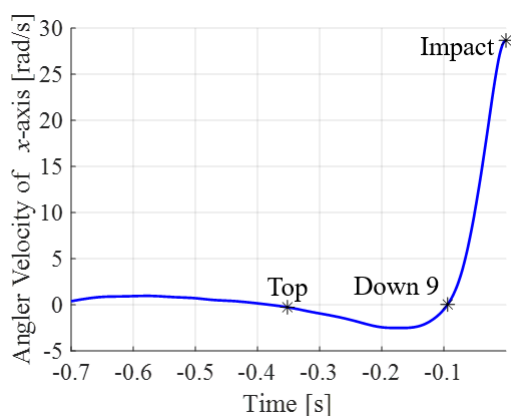


図 6.12(a) グリップ座標系まわりの角速度 x 軸成分 (被験者番号 8)

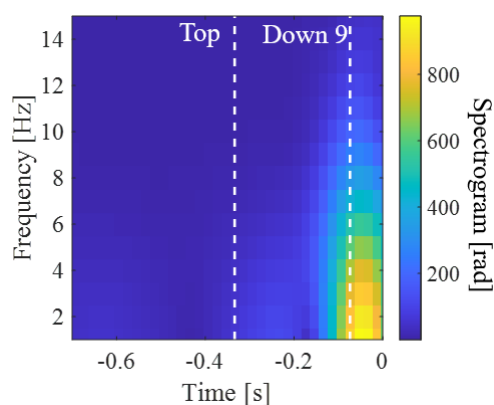


図 6.13(a) 角速度 x 軸成分の短時間フーリエ変換結果 (被験者番号 8)

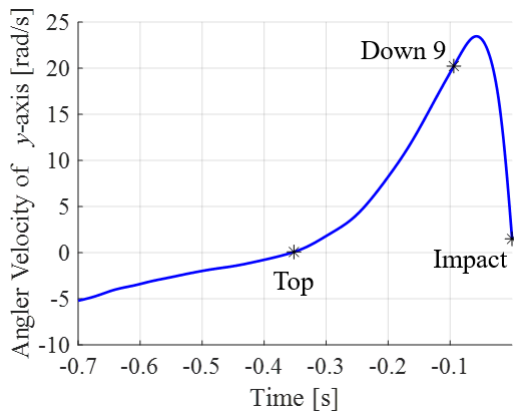


図 6.12(b) グリップ座標系まわりの
角速度y軸成分
(被験者番号 8)

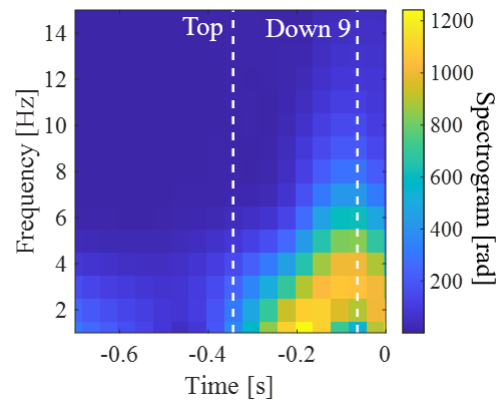


図 6.13(b) 角速度y軸成分の
短時間フーリエ変換結果
(被験者番号 8)

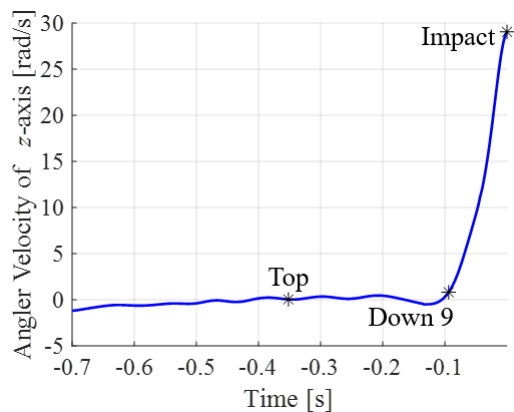


図 6.12(c) グリップ座標系まわりの
角速度z軸成分
(被験者番号 8)

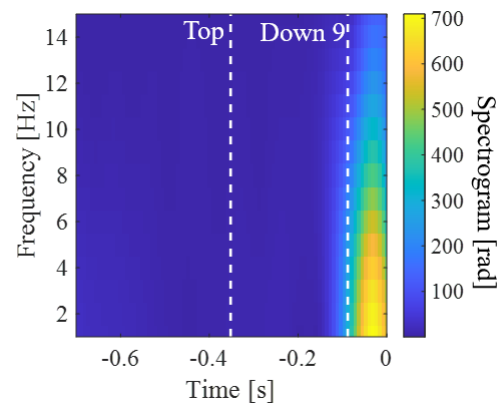


図 6.13(c) 角速度z軸成分の
短時間フーリエ変換結果
(被験者番号 8)

図 6.13(b)より、窓関数区間を広範囲にすることで波形の特性を抽出できているものの、図 6.13(a)については、 -0.4 s から -0.1 s 付近の特性が抽出できず、 -0.1 s 以降の波形の特性のみ抽出されていることがわかる。また、短時間フーリエ変換は窓関数を用いて解析を行うため、時間分解能を上げることを目的に窓関数区間を短く設定した場合、過渡状態における波形は窓関数の特性が反映される可能性がある⁽⁵⁶⁾。そのため、上記波形の比較のために 3.4 節に示す方法によりウェーブレット変換を用いて解析を行う⁽⁶⁹⁾。波形を三角関数で近似を行うフーリエ変換とは異なり、ウェーブレット変換では波形をウェーブレット関数によって近似を行うため、事前にウェーブレット関数を決定する必要がある。本研究では、ウェーブレット関数を一般化 Morse ウェーブレット関数⁽⁶⁶⁾として解析を行う。ウェーブレット変換は Matlab 2021a の `cwt` 関数を用いて行った。図 6.12(a)~(c)に示す角速度波形に対しウェーブレット変換を行い、強度をカラーマップ表記した結果を図 6.14(a)~(c)に示す。

図 6.14(a)より, x 軸成分の波形では-0.3 s から 0 s において 2 Hz, -0.2 s から 0 s において 3 Hz~5 Hz の強度が大きくなることわかる. 次に, 図 6.14(b)より, y 軸成分の波形では-0.4 s から 0 s において 2 Hz~3 Hz, -0.1 s から 0 s において 3 Hz~5 Hz の強度が大きくなることわかる. また, 図 6.14(c)より, z 軸成分の波形では, -0.3 s から 0 s において 2 Hz, -0.2 s から 0 s において 3 Hz~4 Hz, -0.1 s から 0 s において 7 Hz~12 Hz の強度が大きくなることわかる. これら結果より, 低周波成分が支配的であるが, 高周波成分が一部含まれる波形においては, 短時間フーリエ変換ではなく, ウェーブレット変換を用いる必要があることがわかった.

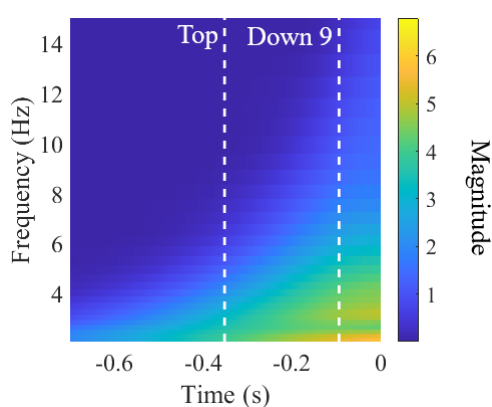


図 6.14(a) グリップ座標系まわりの角速度 x 軸成分のウェーブレット変換結果
(被験者番号 8)

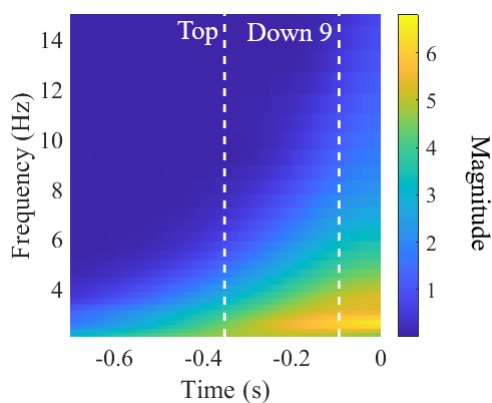


図 6.14(b) グリップ座標系まわりの角速度 y 軸成分のウェーブレット変換結果
(被験者番号 8)

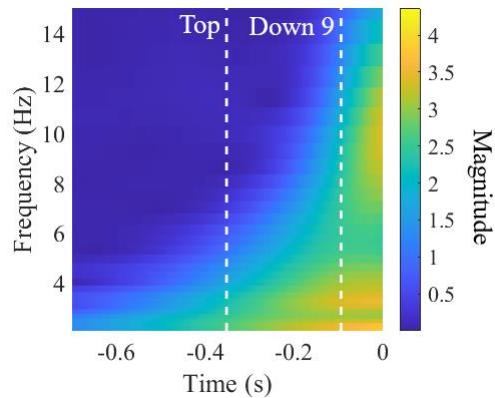


図 6.14(c) グリップ座標系まわりの角速度z軸成分のウェーブレット変換結果
(被験者番号 8)

同様に、加速度、角加速度波形についてもウェーブレット変換を行う。被験者番号 8 における加速度波形、角加速度波形の一例を図 6.15(a)~(c)、図 6.16(a)~(c)に示し、加速度波形、角加速度波形をウェーブレット変換し、カラーマップ表記した結果を図 6.17(a)~(c)、図 6.18(a)~(c)に示す。図 6.14(a)~(c)、図 6.17(a)~(c)、図 6.18(a)~(c)に示すウェーブレット変換の結果を用いて、Impact 付近のシャフトの変形量が異なる被験者間における共通点を抽出する。

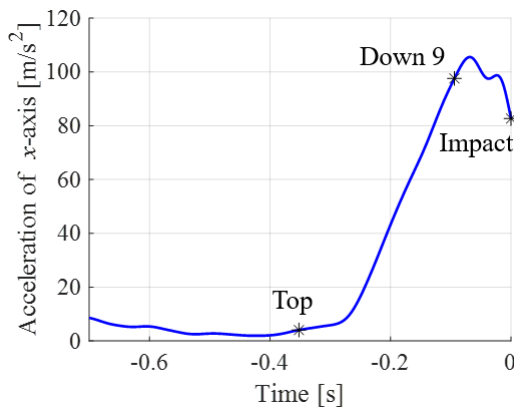


図 6.15(a) 絶対座標系加速度x軸成分
(被験者番号 8)

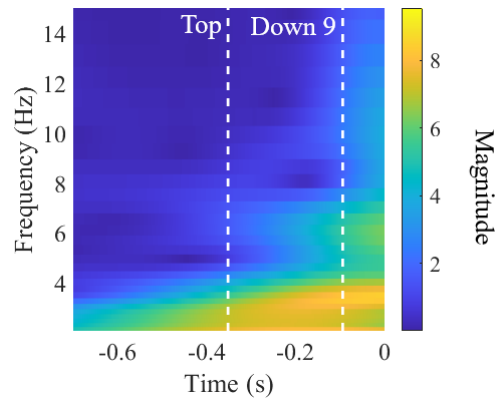


図 6.17(a) 絶対座標系加速度x軸成分の
ウェーブレット変換結果
(被験者番号 8)

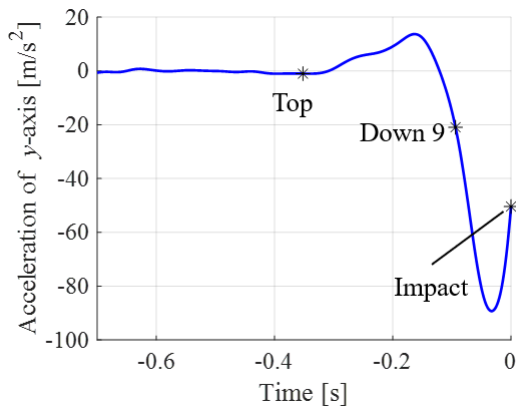


図 6.15(b) 絶対座標系加速度y軸成分
(被験者番号 8)

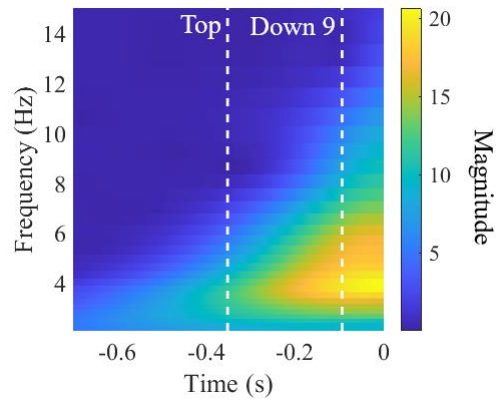


図 6.17(b) 絶対座標系加速度y軸成分の
ウェーブレット変換結果
(被験者番号 8)

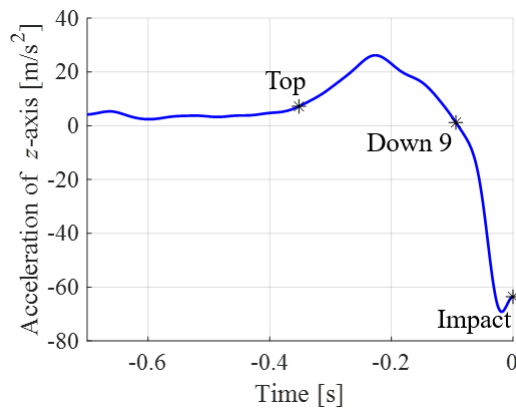


図 6.15(c) 絶対座標系加速度z軸成分
(被験者番号 8)

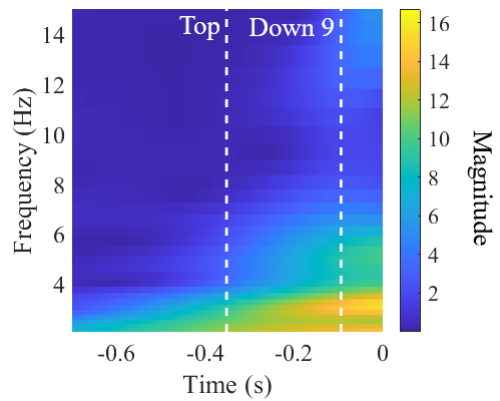


図 6.17(c) 絶対座標系加速度z軸成分の
ウェーブレット変換結果
(被験者番号 8)

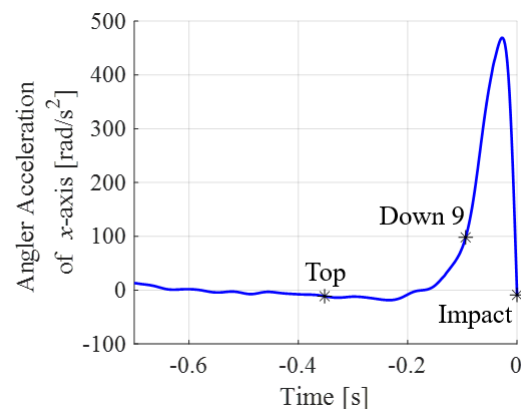


図 6.16(a) グリップ座標系角加速度
x軸成分 (被験者番号 8)

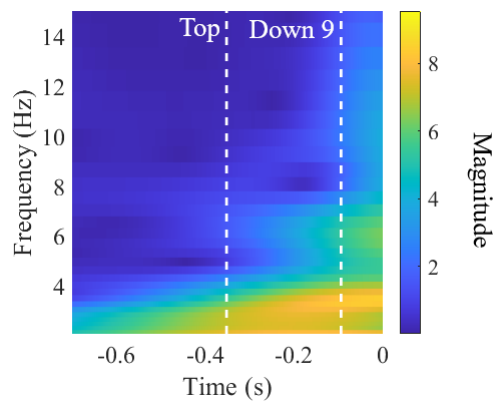


図 6.18(a) グリップ座標系角加速度
x軸成分のウェーブレット
変換結果 (被験者番号 8)

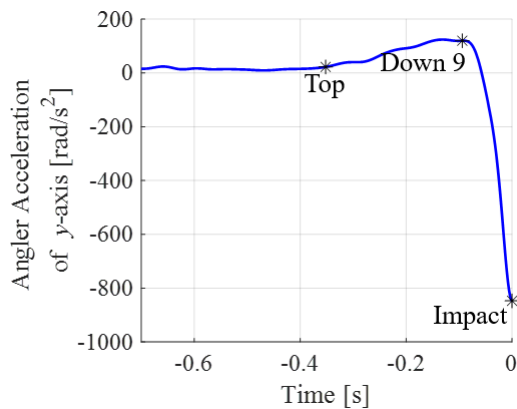


図 6.16(b) グリップ座標系角加速度
y軸成分 (被験者番号 8)

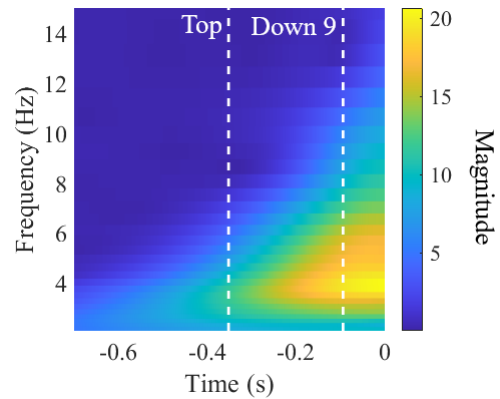


図 6.18(b) グリップ座標系角加速度
y軸成分のウェーブレット
変換結果 (被験者番号 8)

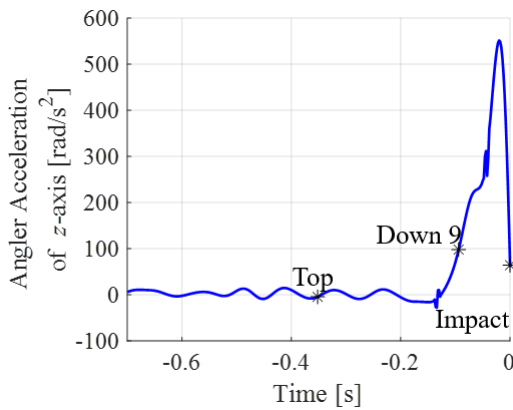


図 6.16(c) グリップ座標系角加速度
z軸成分 (被験者番号 8)

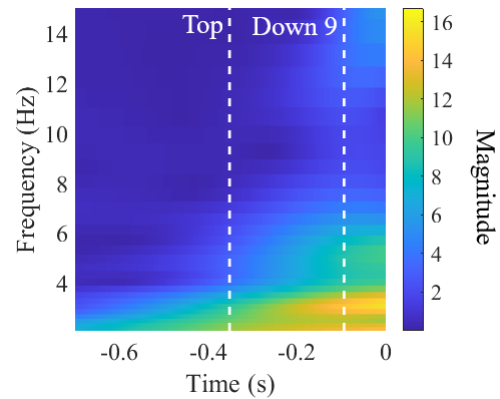


図 6.18(c) グリップ座標系角加速度
z軸成分のウェーブレット
変換結果 (被験者番号 8)

6.9 統計的手法によるゴルフスイングの差の抽出

6.8 節に記載のウェーブレット変換結果を用いて、6.7 節で Impact 付近のシャフト変形量に差が見られた被験者間の共通点について抽出する⁽⁶⁹⁾。表 6.2 より、High-kick-point シャフトのゴルフスイング動作計測結果をシミュレーションモデルに入力した場合にシャフト先端挙動に差が見られた被験者数は、Low-kick-point シャフトのゴルフスイング動作結果入力時と比較が多かったため、High-kick-point シャフトのゴルフスイング動作計測結果を用いて確認する。High-kick-point シャフトを用いた際における加速度、角速度、角加速度の代表試行を全被験者で比較した結果を図 6.19(a)~(c)、図 6.20(a)~(c)、図 6.21(a)~(c)に示す。図 6.19(a)~(c)、図 6.20(a)~(c)、図 6.21(a)~(c)における青線は Impact 付近のシャフト変形量が High-kick-point シャフトにおいて増加した被験者、赤線は Impact 付近のシャフト変形量が Low-kick-point シャフトにおいて増加した被験者を示す。

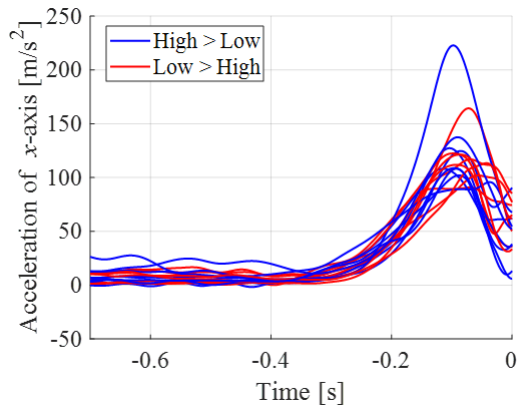


図 6.19(a) 絶対座標系加速度x軸成分比較結果

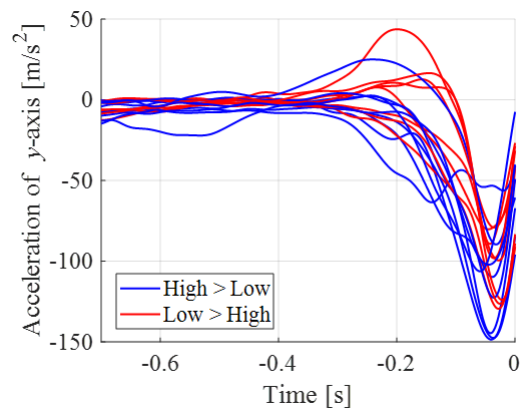


図 6.19(b) 絶対座標系加速度y軸成分比較結果

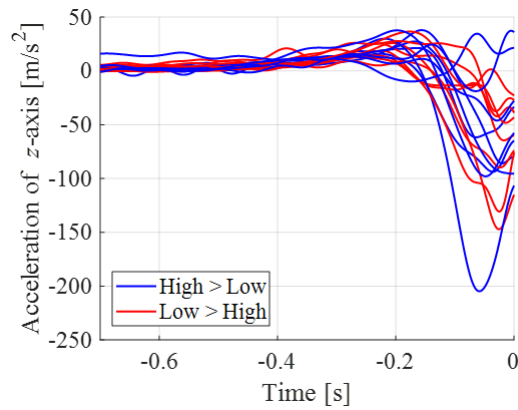


図 6.19(c) 絶対座標系加速度z軸成分比較結果

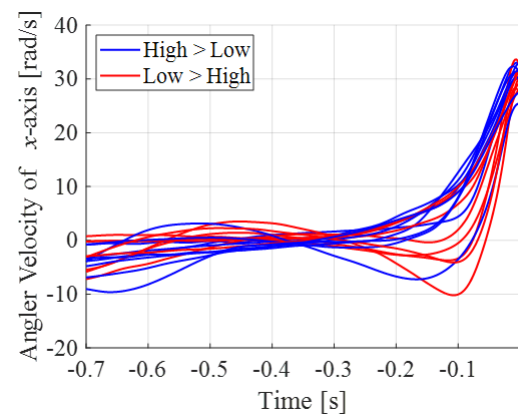


図 6.20(a) グリップ座標系角速度x軸成分比較結果

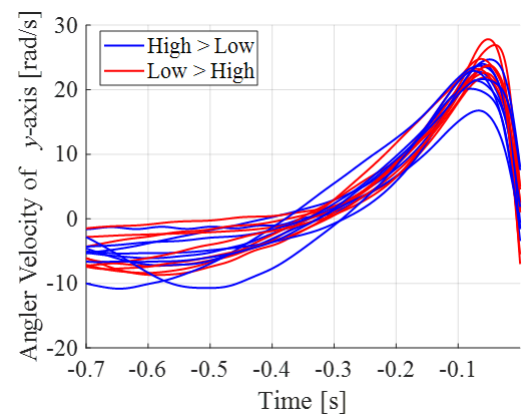


図 6.20(b) グリップ座標系角速度y軸成分比較結果

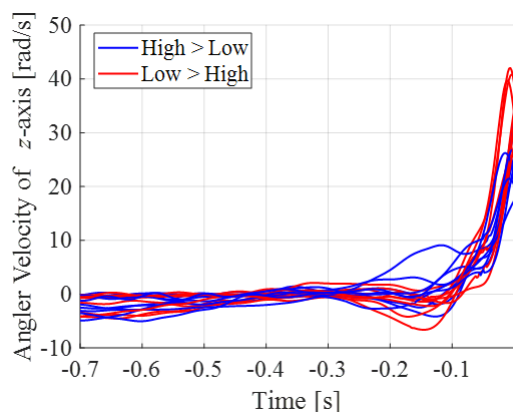


図 6.20(c) グリップ座標系角速度
z軸成分比較結果

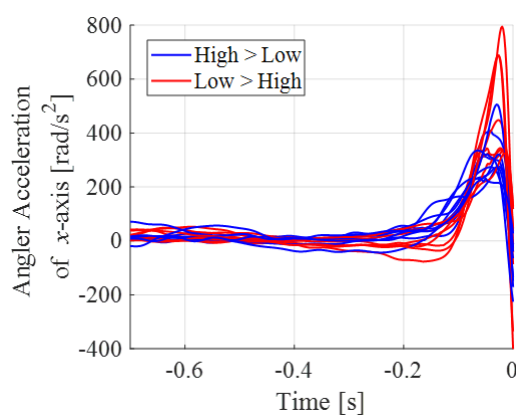


図 6.21(a) グリップ座標系角加速度
x軸成分比較結果

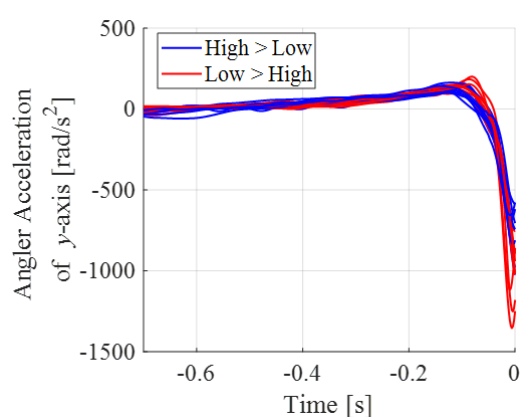


図 6.21(b) グリップ座標系角加速度
y軸成分比較結果

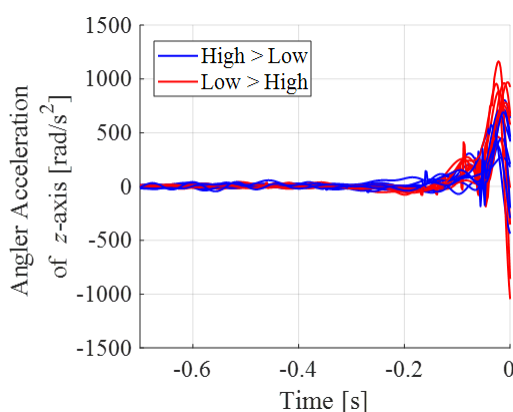


図 6.21(c) グリップ座標系角加速度
z軸成分比較結果

図 6.19(a)~(c), 図 6.20(a)~(c), 図 6.21(a)~(c)に示す結果から, ウェーブレット変換を用いて被験者間の共通点を抽出する. 全試行においてウェーブレット変換を行い, 4.6節と同

様に全波形について各周波数における最大値を抽出した。次に、抽出した最大値を応答とし、因子を Impact 付近で変形量が増加したシャフトが Low-kick-point である被験者か、High-kick-point である被験者かをグループに分けた結果 (2 水準), 試行数 (8 試行), 周波数 (2 Hz, 3 Hz, 4 Hz, 5 Hz, 6 Hz, 7 Hz, 8 Hz, 9 Hz, 10 Hz, 11 Hz, 12 Hz, 13 Hz, 14 Hz, 15 Hz, 16 Hz, 17 Hz, 19 Hz, 20 Hz の 18 水準) とする多因子分散分析を行った。多因子分散分析を行った結果, グループを因子とする p 値 (帰無仮説: Impact 付近でシャフトの変形量が増加するグループ間でウェーブレット変換より得られた最大に差が見られない) が 0.05 未満を示した場合は, グループ, 周波数を因子とする多重比較検定を行った。多因子分散分析を行った結果, 全波形について p 値が 0.05 未満を示したため, グループ, 周波数を因子とする多重比較検定を行った。絶対座標系の加速度各成分に多重比較検定を行った結果を図 6.22(a)~(c), グリップ座標系の角速度各成分に多重比較検定を行った結果を図 6.23(a)~(c), グリップ座標系の角加速度各成分に多重比較検定を行った結果を図 6.24(a)~(c)に示す。図 6.22(a)~(c), 図 6.23(a)~(c), 図 6.24(a)~(c)において, ○ (円) で示す結果は, グループ間で算出した母平均推定値を示し, 誤差範囲は 95 %信頼区間を示す。95 %信頼区間が重ならない場合は, 各グループの周波数間で差があることを示す。また, 青線は Impact 付近のシャフト変形量が High-kick-point シャフトにおいて増加したグループ, 赤線は Impact 付近のシャフト変形量が Low-kick-point シャフトにおいて増加したグループを示す。

図 6.22(a)~(c)より, Impact 付近のシャフトの変形量が High-kick-point シャフトで増加する被験者グループでは, 絶対座標系の加速度 x 軸成分の 2 Hz, 4 Hz, 5 Hz, y 軸成分の 3 Hz, z 軸成分の 3 Hz が大きくなっていることがわかる。また, 図 6.22(a)~(c), 図 6.23(a)~(c), 図 6.24(a)~(c)より, Low-kick-point シャフトで増加する被験者グループでは, 加速度 y 軸成分の 6 Hz~8 Hz グリップ座標系角速度 x 軸成分の 3 Hz~13 Hz, y 軸成分の 4 Hz~12 Hz, z 軸成分の 2 Hz~16 Hz, グリップ座標系角加速度 x 軸成分の 4 Hz~20 Hz, y 軸成分の 4 Hz~20 Hz, z 軸成分の 3 Hz~19 Hz が大きくなっていることがわかる。この結果より, Impact 付近で High-kick-point シャフトにおける変形量が増加する被験者は, 主に 2 Hz~5 Hz の低周波域における加速度の発揮量が多い傾向にあり, Impact 付近で Low-kick-point シャフトにおける変形量が増加する被験者は, 6 Hz~8 Hz の加速度 y 軸成分に加え, 広い周波数範囲における角速度, 角加速度の発揮量が多い傾向があることがわかる。つまり, 被験者は, 低周波の加速度を使う層と, 6 Hz~8 Hz の加速度 y 軸成分, 角速度, 角加速度を主に使う層に分けることができ, ゴルフスイングによってシャフトの変形挙動が異なることを明らかにすることができた。この結果は, シャフトの変形という複雑な変形挙動とゴルフスイング動作の関係の解明に向けた新たな見解であり, 将来の研究において, それぞれの層におけるゴルフスイング動作の詳細を確認することで, 「フィッティング」を行う際にプレーヤーに最適となるシャフトを提案することが可能となる。

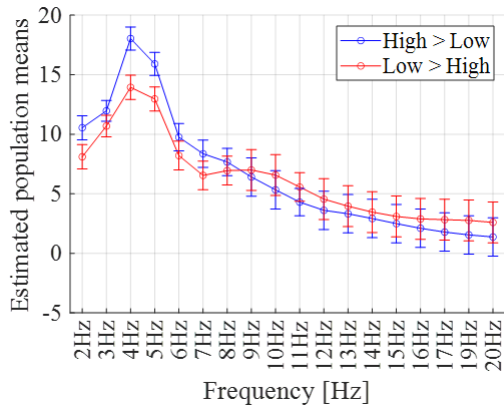


図 6.22(a) 絶対座標系加速度x軸成分
多重比較検定結果

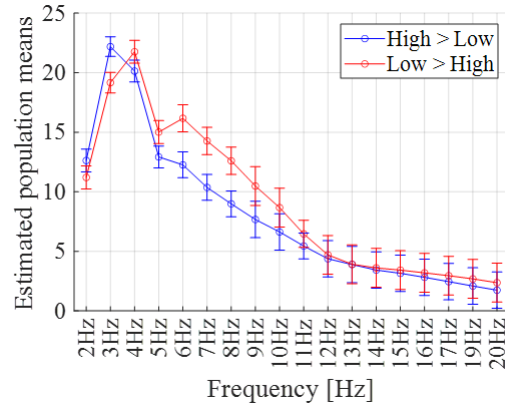


図 6.22(b) 絶対座標系加速度y軸成分
多重比較検定結果

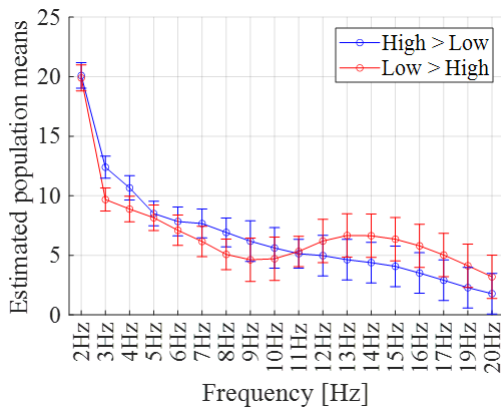


図 6.22(c) 絶対座標系加速度z軸成分
多重比較検定結果

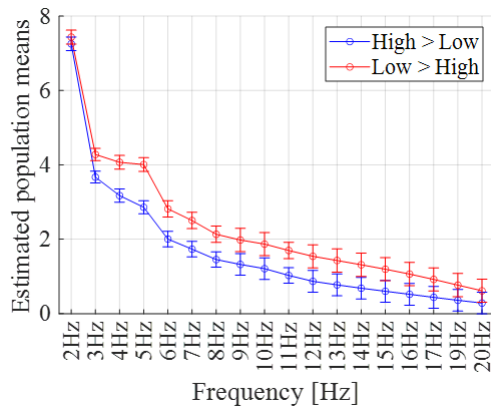


図 6.23(a) グリップ座標系角速度
x軸成分多重比較検定結果

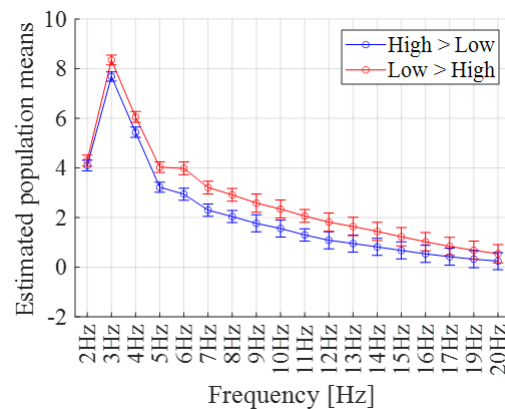


図 6.23(b) グリップ座標系角速度
y軸成分多重比較検定結果

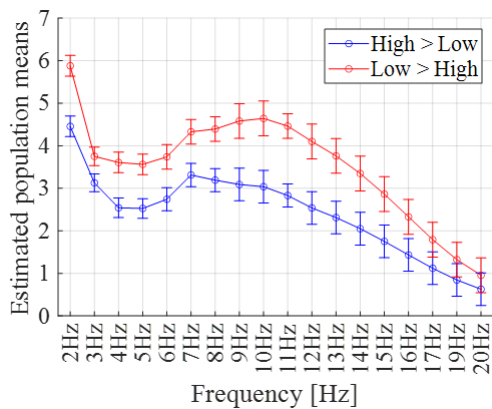


図 6.23(c) グリップ座標系角速度
z軸成分多重比較検定結果

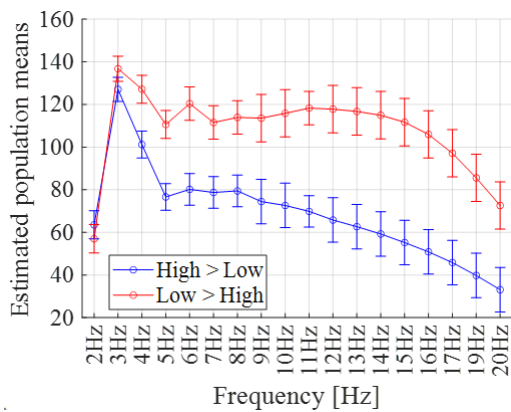


図 6.24(a) グリップ座標系角加速度
x軸成分多重比較検定結果

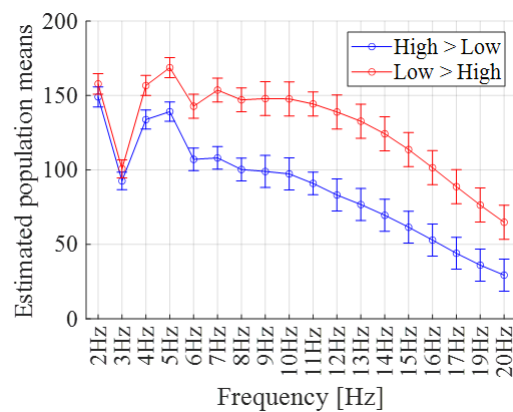


図 6.24(b) グリップ座標系角加速度
y軸成分多重比較検定結果

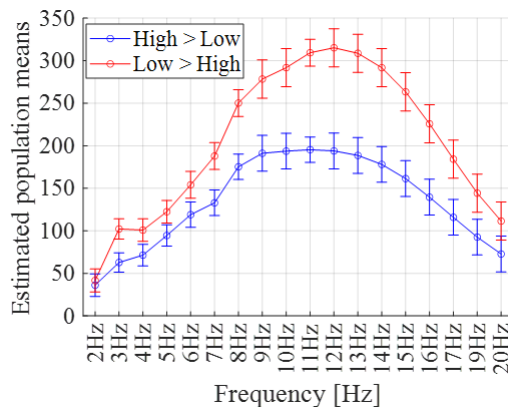


図 6.24(c) グリップ座標系角加速度
z軸成分多重比較検定結果

6.10 結論

本章では、被験者間におけるシャフト変形挙動とゴルフスイング動作の関連性について

着目し、特異値分解によって得られる主要な変形挙動の傾きに差が生じるゴルフスイング動作の共通点を抽出した。さらに、シミュレーションモデルによって得られた Impact 付近のシャフトの変形挙動に着目し、Impact 付近の変形挙動に差を与えるゴルフスイング動作の共通点を抽出し、以下結論を得た

- (1) ゴルフスイング動作計測実験を行い、シミュレーションモデルによってシャフトの変形挙動を算出した。算出した挙動とモーションキャプチャデータから算出した変形挙動の RMSE の平均値が 0.013 m となり、十分な精度で変形挙動を再現できていることを確認した。
- (2) シミュレーションモデルによって算出したシャフトの変形挙動に特異値解析を行い、変形挙動を主要な変形モードに分解した。分解した挙動から、第 1 モードの変形挙動の傾きを算出することで、Toe up/down 方向の変形が相対的に多くなる被験者、Lead/Lag 方向の変形が相対的に多くなる被験者、Toe up/down 方向と Lead/Lag 方向の変形が同等となる被験者に分類できることがわかった
- (3) ゴルフスイング動作中のグリップ部の挙動からスイング平面を定義し、スイング平面の回転角、仰角を算出することで被験者のゴルフスイング動作を評価した。Toe up/down 方向の変形挙動が相対的に多くなる被験者は、スイング平面の仰角が大きくなり、鉛直方向にゴルフスイング動作を行っていることがわかった
- (4) スイング平面に対するグリップの姿勢のなす角度を算出し、被験者のゴルフスイング動作を評価した。スイング平面の仰角が大きい被験者において、グリップの進行方向が Lead/Lag 方向を示す場合は、Lead/Lag 方向の変形挙動が相対的に多くなることがわかった。
- (5) シャフトシミュレーションモデルによって Impact 付近の変形挙動を算出した。High-kick-point シャフトの変形量が増加する被験者と、Low-kick-point シャフトの変形量が増加する被験者が得られた
- (6) ゴルフスイング動作中の加速度、角速度、角加速度波形に短時間フーリエ変換を行い、時間一周波数解析を行った。低周波成分が主となる波形について、高周波成分が瞬時に含まれる波形においては、短時間フーリエ変換では周波数帯域の時間変化を適切に抽出できないことがわかった。
- (7) ゴルフスイング動作中の加速度、角速度、角加速度波形にウェーブレット変換を行い、時間一周波数解析を行った。ゴルフスイング動作中の低周波成分と、Impact 付近の高周波成分の特徴を抽出することができた
- (8) Impact 付近の変形挙動を算出した。High-kick-point シャフトの変形量が増加する被験者と、Low-kick-point シャフトの変形量が増加する被験者間に見られる共通点を抽出した。High-kick-point シャフトの変形量が増加する被験者は 2 Hz～5 Hz の周波数範囲における加速度を多く使う傾向があり、Low-kick-point の変形量が増加する被験者は、

6Hz～8Hzの加速度y軸成分, 広い周波数範囲における角速度, 角加速度を多く使う傾向があることがわかった.

第7章 スイングエクササイズがゴルフスイング動作に与える影響について

7.1 緒言

4章～5章ではシャフトの設計値がゴルフスイング動作やシャフトの変形挙動に与える影響について明らかにした。また、6章では、シャフトの変形挙動の差に影響を与えるゴルフスイング動作の違いを明らかにした。今後、4章から6章までの取り組みを進めることで、「フィッティング」において設計値がゴルフスイング動作やシャフト変形挙動に与える影響を考慮したプレーヤに適したシャフトを提案することが可能となる。一方、先行研究では、プレーヤに適したゴルフクラブを選択することが重要であると報告している⁽⁶⁷⁾が、自身に適したゴルフクラブを使用するだけでは、実際のゴルフプレイにおいて良いスコアを出せるとは限らない。良いスコアのためには、ゴルフクラブでゴルフボールを正確に飛ばすことが求められ、そのためには適切なゴルフスイング動作を行う必要がある。適切なゴルフスイング動作を行うためには、プロ資格を有するインストラクタからの指導（ゴルフレッスン）や、ゴルフスイング動作を解説した書籍による学習などにより、ゴルフスイング動作を習得する必要がある。しかしゴルフスイング動作は複雑な動作であるため、習得には時間を要し、習得を諦めるプレーヤや、ゴルフ自体を諦めるプレーヤも存在する。

ゴルフスイング動作は身体各部位の協調動作によって行われるため、松本らは特異値解析によってゴルフスイング動作から協調動作を抽出する手法を提案し⁽²⁹⁾、協調動作に対して座標変換を行うことでプレーヤにとって理想的なゴルフスイング動作を提示する手法を提案した⁽³³⁾が、理想的な動作を習得するための方法までは提案されていない。

そこで、本章では、ゴルフスイング動作の習得に向けた練習方法を提案することを目的として、ダンロップエクササイズ⁽⁶⁸⁾と呼ばれるゴルフスイング動作に関連する基本動作の繰り返し運動（以下、スイングエクササイズ）に着目し、繰り返し運動が初級者、中級者、上級者のゴルフスイング動作に与える影響を明らかにする。一方、スイングエクササイズはインストラクタの模範動作をプレーヤが目視で確認し再現を試みるため、ゴルフスイング動作を習得していない初級者、中級者は適切に再現できていない可能性がある。そのため、まず特異値分解によってスイングエクササイズから協調動作を抽出し、インストラクタと初級者、中級者において協調動作の比較を行う。次に、模範動作における協調動作との一致度を評価する手法を構築し、インストラクタの指導によって初級者、中級者と模範動作の協調動作における一致度が増加するかを確認する。さらに、特異値分解によってゴルフスイングから協調動作を抽出し、スイングエクササイズ前後における初級者、中級者、上級者の協調動作の差を確認することで、スイングエクササイズがゴルフスイングに与える影響を明らかにする。

7.2 本研究で行うスイングエクササイズ

本研究で計測、解析を行うスイングエクササイズについて説明する。本研究では、3種のスイングエクササイズを使用する。

7.2.1 スイングエクササイズ 1

スイングエクササイズ 1 (EX No.1) は、腕と大腿の内旋動作と外旋動作の繰り返し動作である。EX No.1 における 1 周期分の動作を図 7.1 に示す。図 7.1 より、EX No.1 は図 7.1(a) に示す基準姿勢から腕、大腿を同タイミングで内旋を開始し、図 7.1(b)に示す通り、内旋動作の実施後、外旋動作によって図 7.1(c)に示す基準姿勢に戻り、この一連の動作を繰り返す運動である。この運動はゴルフスイング動作時において、腕や大腿の内旋動作が不足している際に行い、主にゴルフスイング動作における手の動き（リストコック）や下半身の動き（捻転）の改善が期待される。

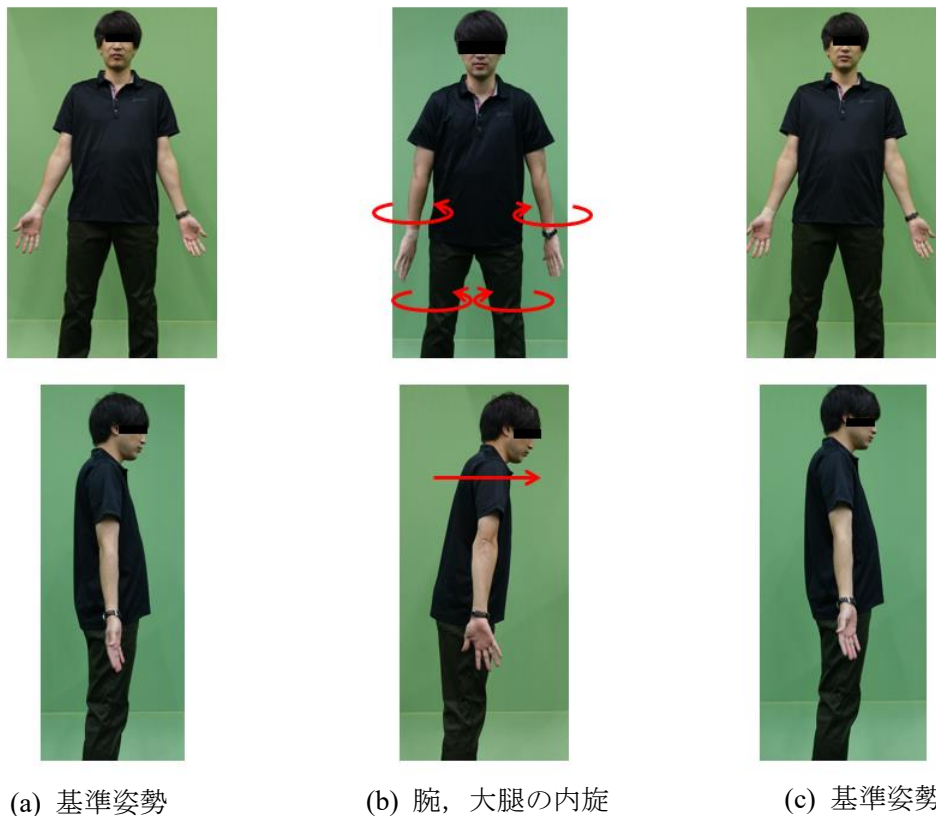
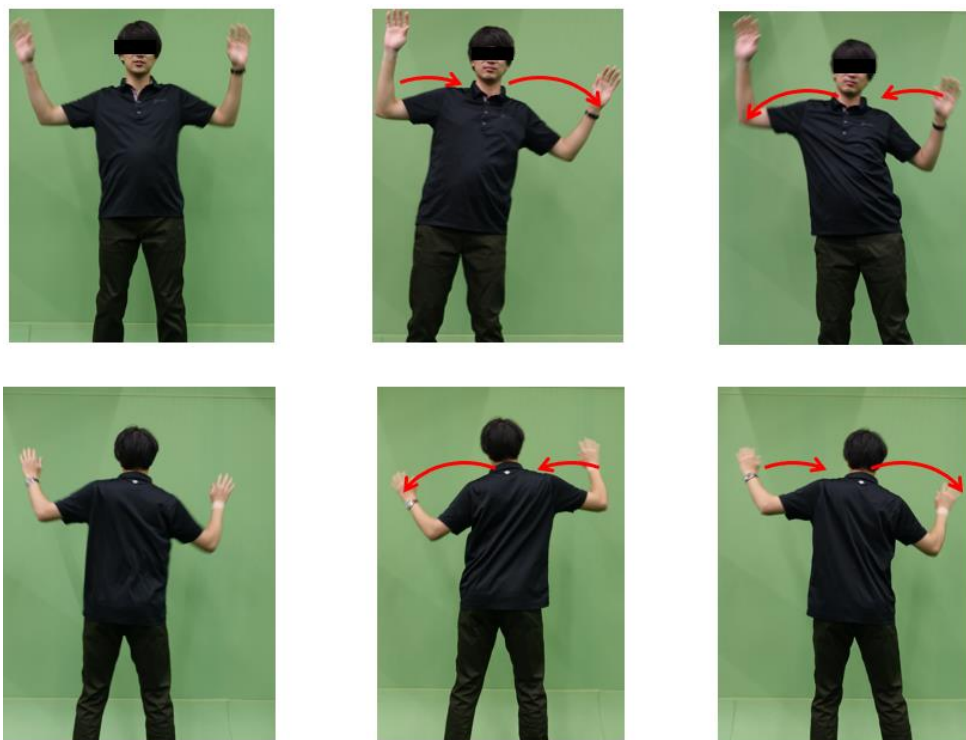


図 7.1 EX No.1 のスイングエクササイズ

7.2.2 スイングエクササイズ 2

スイングエクササイズ 2 (EX No.2) は、肩甲骨の外転、内転の繰り返し動作である。EX No.2 における 1 周期分の動作を図 7.2 に示す。図 7.2 より、EX No.2 は図 7.2(a)に示す基準姿勢から、図 7.2(b)に示す通り、右肩甲骨の外転と左肩甲骨の内転動作の実施後、図 7.2(c)に示す通り、右肩甲骨が内転と左肩甲骨の外転動作を行い、この一連の動作を繰り返す運動である。この運動は、ゴルフスイング動作時において、下半身と肩甲骨の左右動作が連動し

ていない際に行い，ゴルフスイング動作における下半身と肩甲骨を左右に連動させる動作を行う際（バックスイング時やダウンスイング，フォローイング時）の上体や膝の過度な左右の動きを抑えることや，膝や腕の動きの改善が期待される。



(a) 基準姿勢

(b) 右肩甲骨の外転
左肩甲骨の内転

(c) 右肩甲骨の内転
左肩甲骨の外転

図 7.2 EX No.2 のスイングエクササイズ

7.2.3 スイングエクササイズ 3

3 つ目のスイングエクササイズ（EX No.3）は，肩甲骨の拳上，下制の連続動作である。EX No.3 における 1 周期分の動作を図 7.3 に示す。図 7.3 より，EX No.3 は図 7.3(a) に示す基本姿勢から，図 7.3(b) に示す通り，右肩甲骨の拳上と左肩甲骨の下制動作を行い，図 7.3(c) に示す通り，右肩甲骨が下制する際は左肩甲骨が拳上を行い，この一連の動作を繰り返す運動である。この運動は，ゴルフスイング動作時において，下半身と肩甲骨の上下動作が連動していない際に行い，ゴルフスイング動作における下半身と肩甲骨を上下に連動させる動作を行う際（バックスイング時，ダウンスイング時，フォローイング時）の上体や膝の過度な上下の動きを抑えることや，膝や腕の動きの改善が期待される。



図 7.3 EX No.3 のスイングエクササイズ

7.3 ゴルフスイング動作とスイングエクササイズの計測実験

7.2 節に示すスイングエクササイズとゴルフスイング動作を計測するため、動作計測実験を行った。被験者は右利きの男性ゴルファー7名とした。対象とした被験者の情報を表 7.1 に示す。表 7.1 において、「Beginner」、「Intermediate」、「Advanced」は被験者のレベルを示し、それぞれ初級者、中級者、上級者を示す。「Beginner」、「Intermediate」、「Advanced」は平均スコアによって判断しており、平均スコアが 100 以上であれば初級者、85 以上 100 未満であれば中級者、85 未満であれば上級者とした。以下、計測の手順について説明する。まず、2.1 節～2.4 節に示すゴルフスイング動作計測実験を行う。実験に使用するゴルフクラブは被験者が通常使用しているゴルフクラブとした。ゴルフスイング動作の計測数は 5 試行とした。ゴルフスイング動作の計測後、スイングエクササイズ計測実験を行う。スイングエクササイズ計測実験では、資格（日本プロゴルフ協会会員ティーチングプロ）を有するインストラクタの模範動作を動画によって撮影し、被験者はその動画に合わせて動作を行う。初級者、中級者の被験者を対象とした際は、インストラクタがスイングエクササイズを目視にて

確認し、動作計測の終了後、口頭によって指導を行った。動作への指導を行った後、再度スイングエクササイズの計測を行う。インストラクタが問題なく動作を行えたと判断した場合は、動作計測を終了する。問題がある場合は、再度口頭による動作への指導を行い、指導後にスイングエクササイズの計測を行う。対象とするスイングエクササイズは被験者にとって必要と思われる動作をインストラクタが判断した1種とした。また、上級者の被験者を対象とした際は、全種のスイングエクササイズを1試行計測した。各被験者が実施したスイングエクササイズ、試行数を表 7.1 に併せて示した。計測後、被験者の動作を比較するため、スイングエクササイズ計測データについては、表 2.1 に示す右足先マーカ (No.53) から左足先マーカ (No.43) へ向かうベクトルが絶対座標系 Y 軸方向と一致するように座標変換を行った。スイングエクササイズ計測実験終了後、ゴルフスイング動作への影響を確認するため、再度ゴルフスイング動作計測を行った。ゴルフスイング動作の計測数は 5 試行とした。

表 7.1 被験者情報

No.	Height [m]	Weight [kg]	Age group	Average Score	Level	Exercise Type	Number of trials
1	1.75	75	50	90	Intermediate	EX_No.2	3
2	1.85	72	20	108	Beginner	EX_No.2	4
3	1.70	65	40	95	Intermediate	EX_No.1	3
4	1.67	76	20	92	Intermediate	EX_No.2	3
5	1.80	75	20	102	Beginner	EX_No.3	2
6	1.66	62	40	71	Advanced	All	1
7	1.70	75	40	75	Advanced	All	1

7.4 動作を評価するための人体モデルの構築

7.3 節で計測した動作結果より、スイングエクササイズ、ゴルフスイング動作を評価するための人体モデルを作成する。計測した結果は表 2.1 に示す通り、身体の 53 点のマーカの位置情報であり、X 軸、Y 軸、Z 軸成分を考慮すると自由度は 159 となる。評価を行う際は自由度をできる限り減らすことが望ましい。そこで、動作中にマーカ間の位置関係が変化せず、動作の評価時において冗長となるマーカを平均化処理による統合や削減を行い、評価を行うための人体モデルを構築した⁽⁷⁰⁾。構築した人体モデルの部位情報を表 7.2 に示しスティックピクチャによって表示した結果を図 7.4 に示す。

表 7.2 評価を行うための人体モデルの部位情報

No.	Position	Integrating Markers	No.	Position	Integrating Markers
1	Head	1~5	14	Inside right wrist	26
2	chest	6, 8	15	Righthand	28, 29
3	abdomen	7, 9	16	Left West	30~32
4	Left shoulder	10, 11	17	Right West	33~35
5	Outside left elbow	13	18	Left knee	37, 38
6	Inside left elbow	14	19	Left ankle	40
7	Outside left wrist	15	20	Left Toes	42~44
8	Inside left wrist	16	21	Right knee	46, 47
9	Lefthand	18, 19	22	Right ankle	49
10	Right shoulder	20	23	Right Toes	51~53
11	Outside right elbow	23	24	Inside right wrist	26
12	Inside right elbow	24	25	Righthand	28, 29
13	Outside right wrist	25			

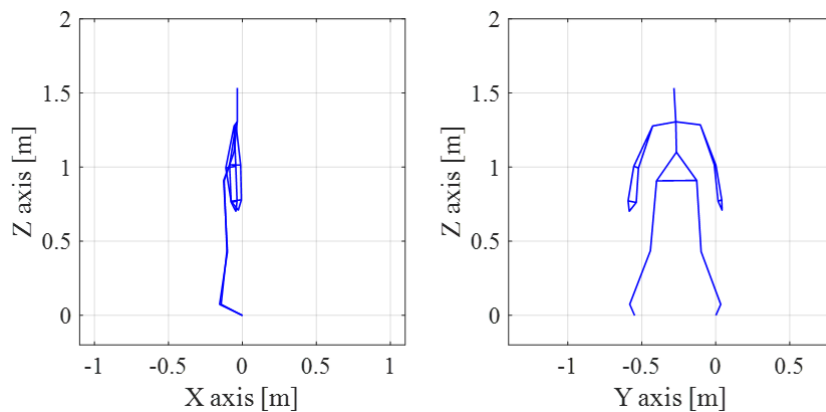


図 7.4 評価を行うための人体モデル

7.5 インストラクタの模範スイングエクササイズへの特異値分解

7.4 節で構築した評価用人体モデルを用いて、各被験者におけるスイングエクササイズの評価を行う。評価のために、事前に計測したインストラクタの模範動作に特異値分解を行い、スイングエクササイズから協調動作を抽出した⁽⁷⁰⁾。スイングエクササイズはゴルフスイングと異なり、基準姿勢がアドレス時の姿勢を示さない。そこで、基準姿勢は、図 7.1(a)、図 7.2(a)、図 7.3(a)に示す動作前の姿勢とした。計測した模範動作を対象として、式(3.59)、式(3.60)により特異値分解を行った。特異値分解を行った結果から、式(5.2)により各モードの

寄与率を算出した⁽²⁹⁾。各スイングエクササイズにおけるモードの寄与率を算出した結果を図 7.5、表 7.3 に示す。図 7.5、表 7.3 より、累積寄与率が 99%を超えるのは、EX No.1 では第 1 モードから第 3 モード、EX No.2 では第 1 モードから第 2 モード、EX No.3 では第 1 モードのみとなった。

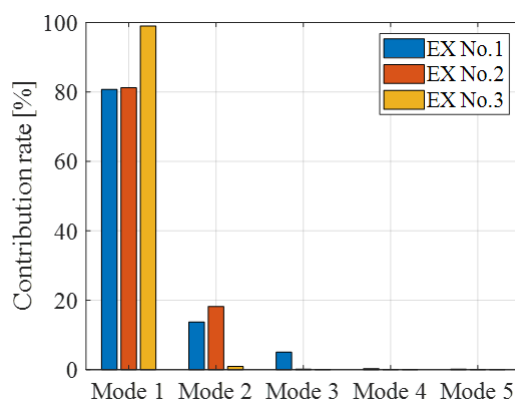


図 7.5 インストラクタのスイングエクササイズにおけるモードの寄与率算出結果

表 7.3 インストラクタのスイングエクササイズにおけるモードの寄与率算出結果

	Mode1[%]	Mode2[%]	Mode3[%]
EX No.1	80.7	13.7	5.0
EX No.2	81.2	18.2	0.1
EX No.3	99.0	0.9	0.0

それぞれのスイングエクササイズにおける各モードの協調動作について確認する。EX No.1 では、累積寄与率が第 3 モードまでで 99%を超えるため、第 3 モードまでの協調動作について確認する。式(3.61)より、第 1 モードから第 3 モードまでの協調動作を算出した。算出した結果を図 7.6～図 7.8 に示す。図 7.6～図 7.8 より、第 1 モードの協調動作では肘と手首の内旋、外旋動作と、大腿の内旋、外旋動作、また、大腿の内旋、外旋動作によって生じる胸部の前後方向の動作が連動することがわかる。次に、第 2 モードの協調動作では肩の前後方向の動作と肘の前後方向の動作が連動し、第 3 モードの協調動作では手首の内旋、外旋動作を示すことがわかる。この結果より、EX No.1 の動作は、肘と手首の外旋、内旋動作と大腿の外旋、内旋動作、大腿の外旋、内旋動作によって生じる胸部の前後方向が連動する協調動作、肩の前後方向の動作と肘の前後方向の動作が連動する協調動作、手首の回転動作を示す協調動作によって構成されることがわかる。

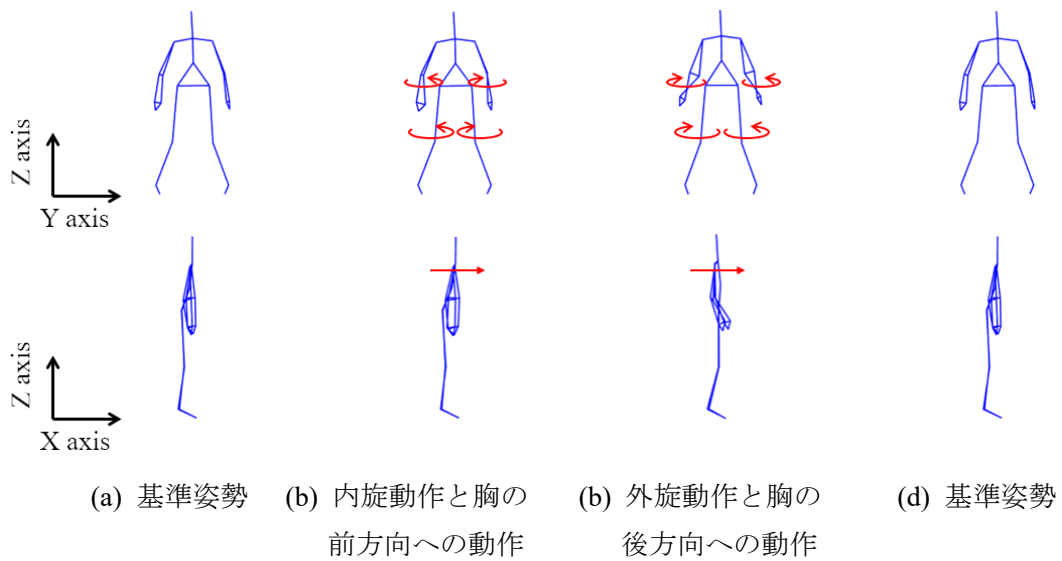


図 7.6 インストラクタの EX No.1 の第 1 モードが示す協調動作

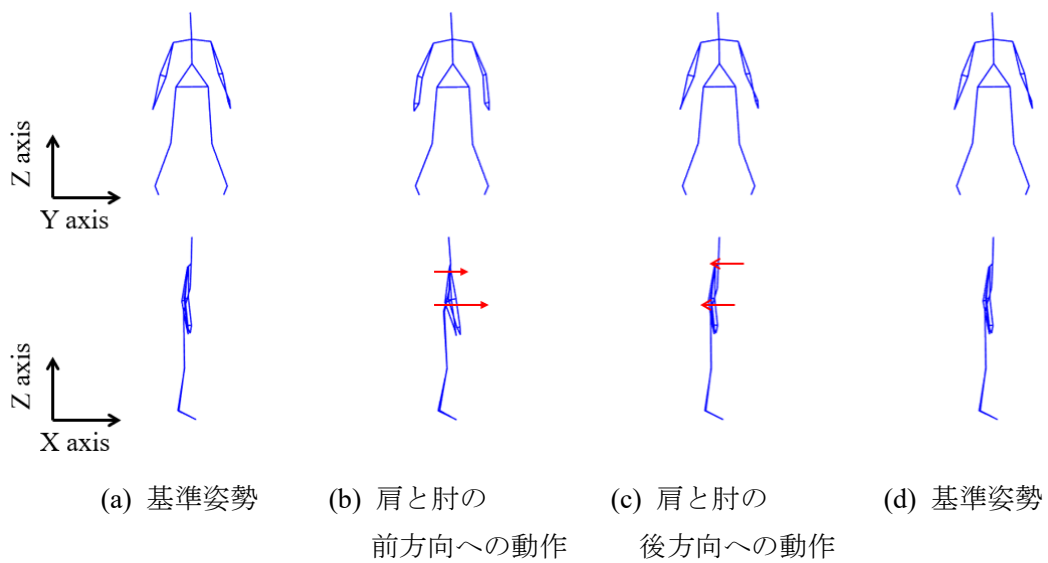


図 7.7 インストラクタの EX No.1 の第 2 モードが示す協調動作

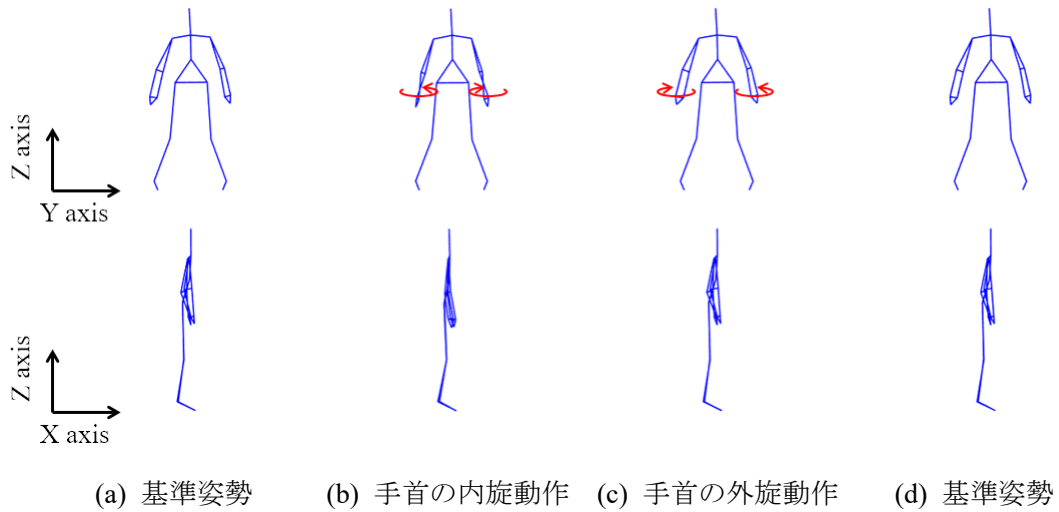


図 7.8 インストラクタの EX No.1 の第 3 モードが示す協調動作

EX No.2 では、累積寄与率が第 2 モードまでで 99 %を超えるため、第 2 モードまでの協調動作について確認する。式(3.61)より、第 1 モード、第 2 モードの協調動作を算出した。算出した結果を図 7.9、図 7.10 に示す。図 7.9、図 7.10 より、第 1 モードの協調動作では肩甲骨の外転、内転動作と下半身の左右方向の動作が連動し、第 2 モードの協調動作では腕の外転、内転動作と胸の前後方向の動作が連動することがわかる。この結果より、EX No.2 の動作は、肩甲骨の外転、内転動作と下半身の左右方向の動作が連動する協調動作、腕の外転、内転動作と胸の前後方向の動作が連動する協調動作から構成される動作であることがわかる。

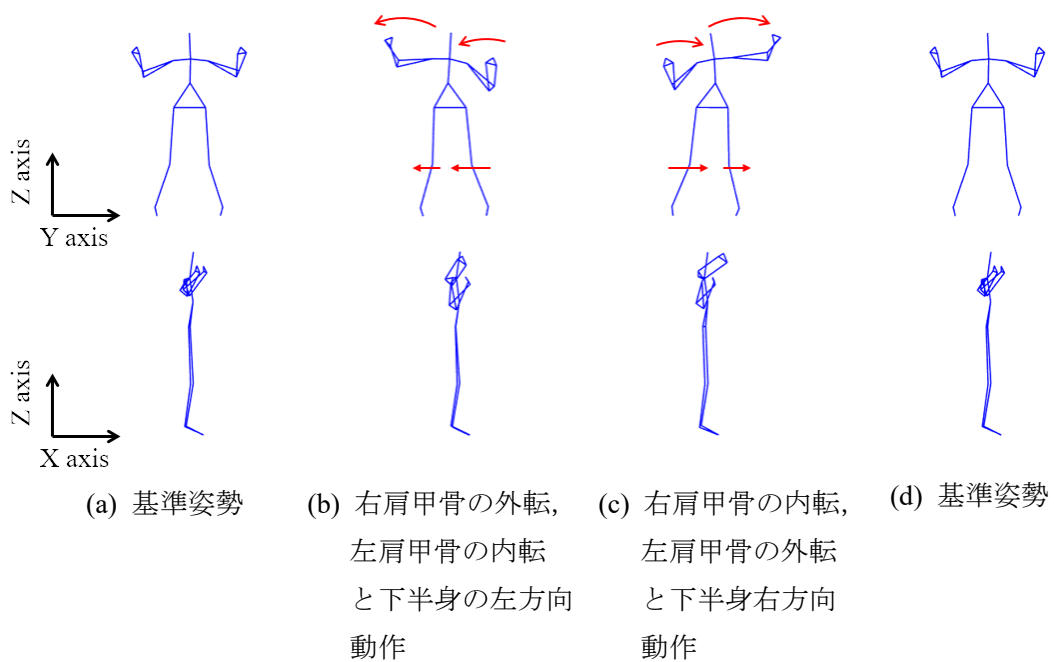


図 7.9 インストラクタの EX No.2 の第 1 モードが示す動作

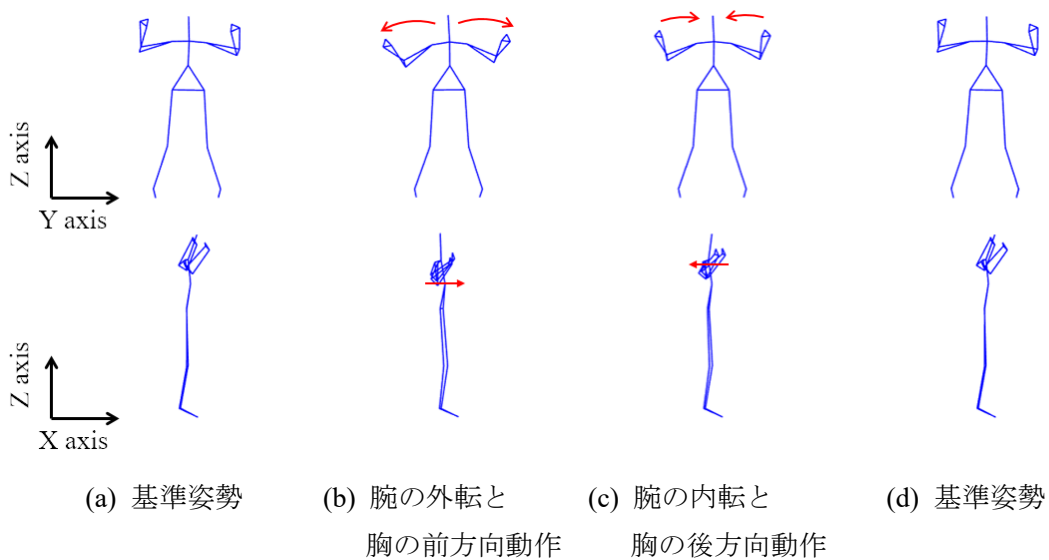


図 7.10 インストラクタの EX No.2 の第 2 モードが示す動作

EX No.3 では、累積寄与率が第 1 モードのみで 99 %を超えるため、第 1 モードの協調動作について確認する。式(3.61)より、第 1 モードの動作を算出した。算出した結果を図 7.11 に示す。図 7.11 より、第 1 モードの協調動作では EX No.3 の動作である肩甲骨の拳上、下制動作と下半身の左右方向の動作が連動することわかる。

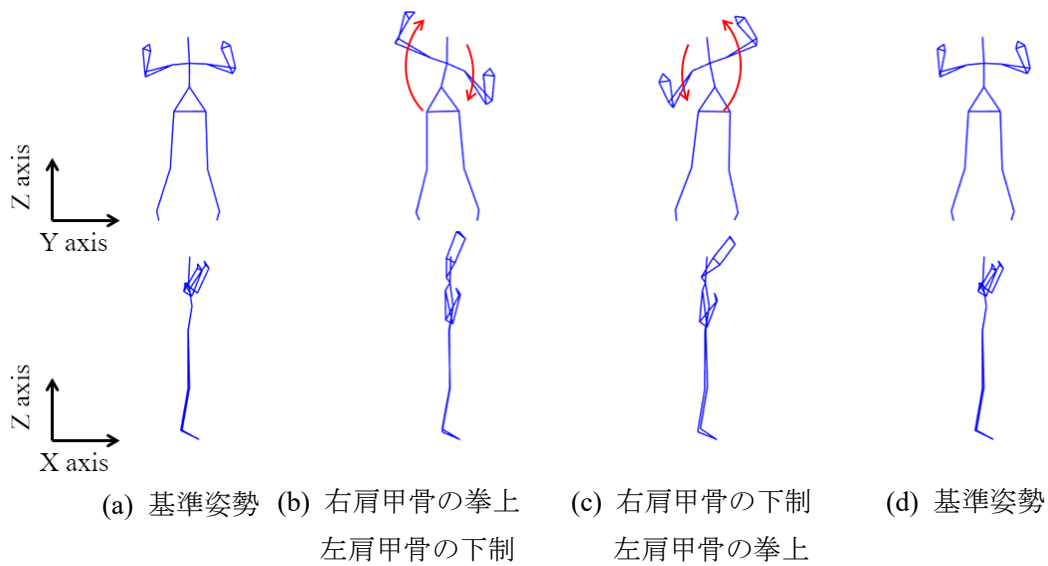


図 7.11 インストラクタの EX No.3 の第 1 モードが示す動作

7.6 被験者のスイングエクササイズへの特異値分解と模範動作との比較

7.5 節と同様に、特異値分解によって被験者のスイングエクササイズから協調動作を抽出する⁽⁷⁰⁾。抽出した協調動作をインストラクタと比較することで、各被験者のスイングエクササイズを評価する。式(3.59)、式(3.60)によって特異値分解を行い、式(5.2)によって各モードの寄与率を算出した⁽²⁹⁾。全被験者におけるモードの寄与率を算出した結果を表 7.4 に示す。表 7.4 において、被験者番号 1~5 におけるスイングエクササイズは、インストラクタの指導前の計測結果を示す。

表 7.4 全被験者のスイングエクササイズモード寄与率算出結果

No.	Exercise Type	Mode1 [%]	Mode2 [%]	Mode3 [%]	Mode4 [%]	Mode5 [%]	Mode6 [%]
1	EX No.2	66.7	15.3	7.5	5.9	2.5	1.4
2	EX No.2	70.4	24.8	4.8	0.0	0.0	0.0
3	EX No.1	70.6	23.0	5.0	1.0	0.2	0.1
4	EX No.2	81.0	18.2	0.4	0.1	0.1	0.1
5	EX No.3	86.2	13.6	0.1	0.1	0.0	0.0
6	EX No.1	85.0	11.6	3.1	0.2	0.2	0.0
	EX No.2	56.1	35.3	4.6	3.4	0.3	0.1
	EX No.3	77.8	14.7	6.3	1.1	0.1	0.0
7	EX No.1	95.9	3.0	0.8	0.2	0.1	0.0
	EX No.2	58.3	41.3	0.4	0.0	0.0	0.0
	EX No.3	93.1	6.8	0.0	0.0	0.0	0.0

表 7.4 より、それぞれの被験者において累積寄与率が 99 %を超えるモードについて確認した。その結果、被験者番号 1 (EX No.2) では第 6 モード、被験者番号 2 (EX No.2) では第 3 モード、被験者番号 3 (EX No.1) では第 4 モード、被験者番号 4 (EX No.2) では第 2 モード、被験者番号 5 (EX No.3) は第 2 モード、被験者番号 6 における EX No.1 は第 3 モード、EX No.2 では第 4 モード、EX No.3 では第 4 モード、被験者番号 7 における EX No.1 では第 3 モード、EX No.2 では第 2 モード、EX No.3 では第 2 モードとなることがわかる。表 7.3 と比較した結果、被験者番号 1, 3, 5, 被験者番号 6 の EX No.2, EX No.3, 被験者番号 7 の EX No.3 のスイングエクササイズにおいて、インストラクタの累積寄与率が 99 %を超えるモードの数と異なることがわかった。累積寄与率が 99 %を超えるモードの数の違いと動作の違いを確認するため、各モードが示す協調動作を比較した。以下、各被験者について詳細を確認する。

被験者番号 1 とインストラクタの EX No.2 における第 1, 第 2 モードの示す協調動作を比較した結果を図 7.12, 図 7.13 に示す。図 7.12, 図 7.13 において、青色で示す結果は被験者番号 1 の協調動作を示し、赤色で示す結果はインストラクタの協調動作を示す。また、比較のため、被験者、インストラクタの基準姿勢時における腰の中心位置が絶対座標系の Z 軸上 ($X=0, Y=0$) になるように平行移動を行っている。図 7.12 より、被験者番号 1 の第 1 モードの協調動作は、右肘の外転、内転動作を示し、左手側の動作や下半身の左右方向の動作を示さないことがわかる。次に、図 7.13 より、第 2 モードの協調動作は頭部、胸部を含む上体の前後方向の動作を示し、腕の外転、内転動作や胸の前後方向の動作を示さないことがわかる。この結果より、被験者番号 1 の EX No.2 の動作は、右肘の外転、内転動作と、上体の前後方向の協調動作から構成されることがわかる。

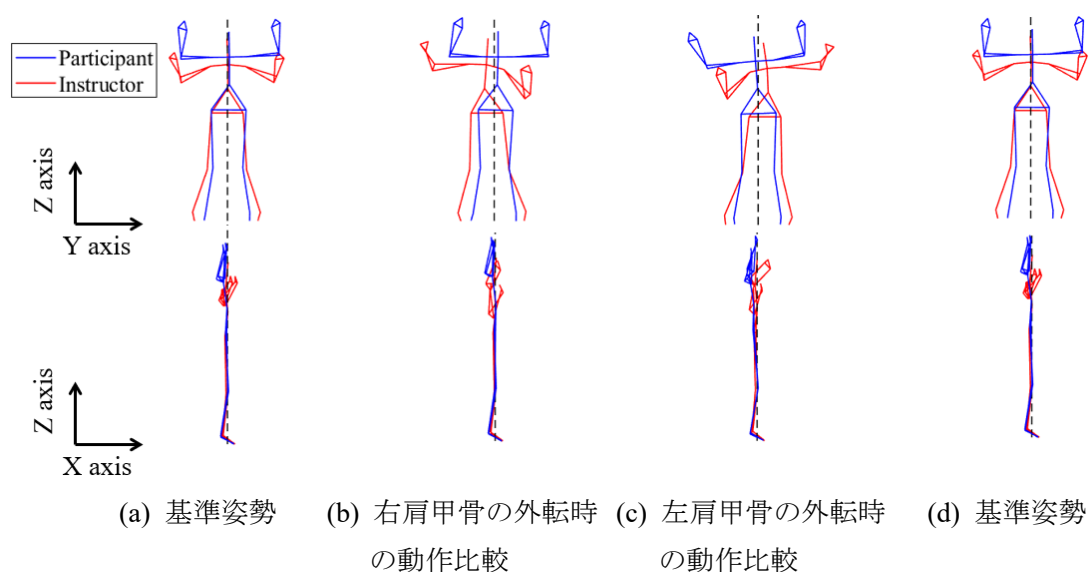


図 7.12 特異値分解によって得られた第 1 モードの比較 (被験者番号 1 EX No.2)

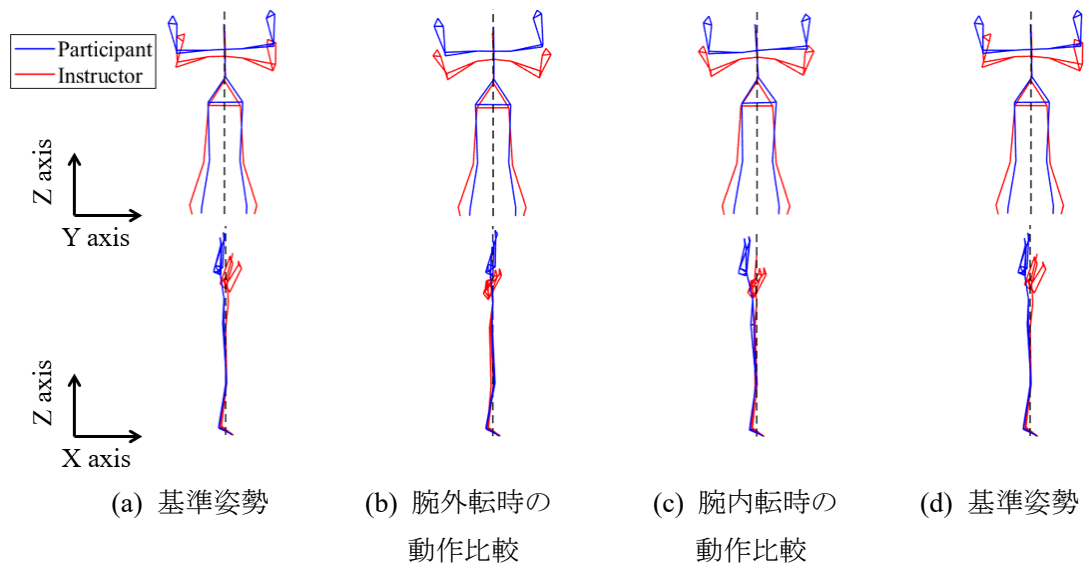


図 7.13 特異値分解によって得られた第 2 モードの比較 (被験者番号 1 EX No.2)

被験者番号 2 とインストラクタの EX No.2 における第 1, 第 2 モードの示す協調動作を比較した結果を図 7.14, 図 7.15 に示す. 図 7.14, 図 7.15 において, 青色で示す結果は被験者番号 2 の協調動作を示し, 赤色で示す結果はインストラクタによる協調動作を示す. また, 比較のため, 被験者, インストラクタの基準姿勢時における腰の中心位置が絶対座標系の Z 軸上 ($X=0, Y=0$) になるように平行移動を行っている. 図 7.14 より, 被験者番号 2 の第 1 モードの協調動作は肩甲骨の外転, 内転動作の動作を示し, 下半身の左右方向の動作を示さないことがわかる. また, 図 7.15 より, 第 2 モードの協調動作は頭部, 胸部, 肩の左右方向の動作を示し, 腕の外転, 内転動作と胸の前後方向の動作を示さないことがわかる. この結果より, 被験者番号 2 の EX No.2 の動作は, 肩甲骨の外転, 内転動作を示す協調動作と, 頭部, 胸部, 肩の左右方向の動作を示す協調動作から構成されることがわかる.

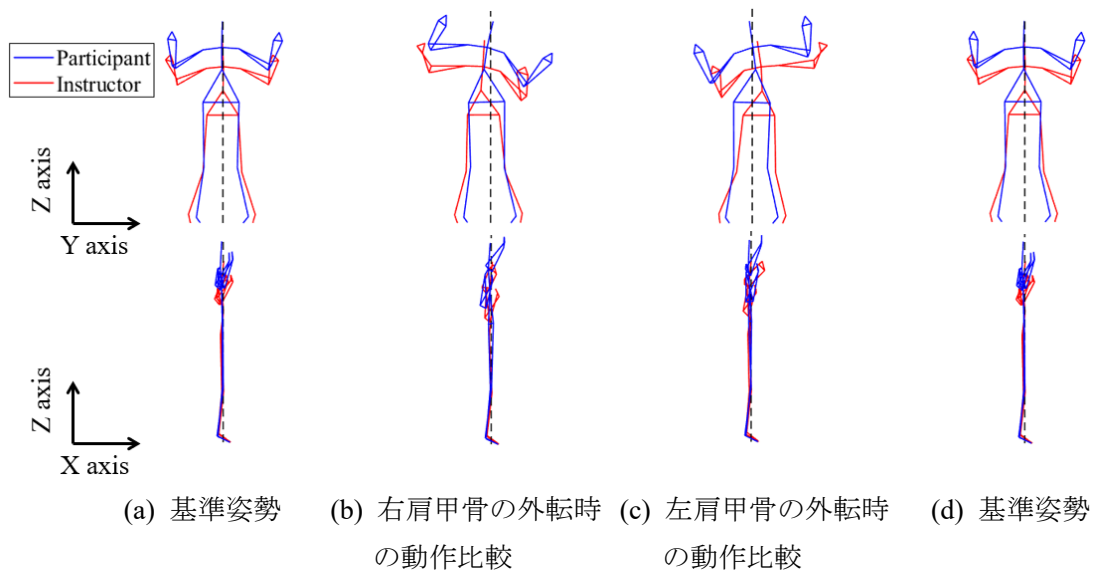


図 7.14 特異値分解によって得られた第 1 モードの比較 (被験者番号 2 EX No.2)

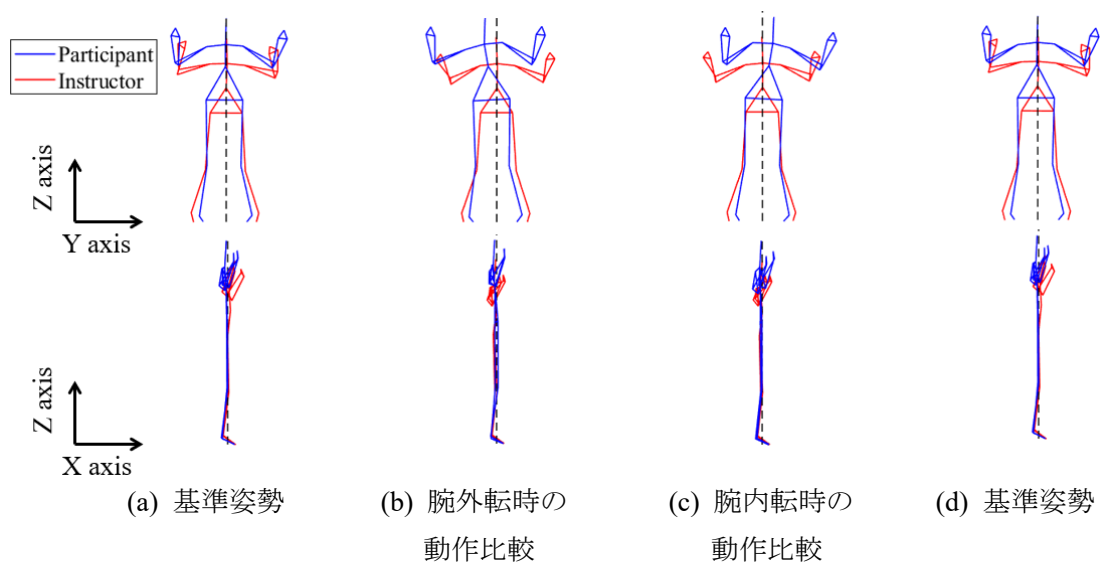


図 7.15 特異値分解によって得られた第 2 モードの比較 (被験者番号 2 EX No.2)

被験者番号 3 とインストラクタの EXNo.1 における第 1, 第 2, 第 3 モードの示す協調挙動を比較した結果を図 7.16～図 7.18 に示す. 図 7.16～図 7.18 において, 青色で示す結果は被験者番号 3 の協調動作を示し, 赤色で示す結果はインストラクタによる協調動作を示す. また, 比較のため, 被験者, インストラクタの基準姿勢時における腰の中心位置が絶対座標系の Z 軸上 ($X=0, Y=0$) になるように平行移動を行っている. 図 7.16 より, 被験者番号 3 の第 1 モードが示す協調動作では, 手首の内旋, 外旋動作を示し, 肘の内旋, 外旋動作や胸の前後方向の動作を示さないことがわかる. 次に, 図 7.17 より, 第 2 モードの協調動作は,

肘の外旋, 内旋動作のみ示し, 肩と肘の前後方向の動作を示さないことがわかる. また, 図 7.18 より, 第 3 モードの協調動作は, 肘の外旋, 内旋動作と腕の前後方向の動作が連動することがわかる. この結果より, 被験者番号 3 の EX No.1 については, 肘の内旋, 外旋動作, 手首の内旋, 外旋動作を示す協調動作, 肘の外旋, 内旋動作を示す協調動作, 腕の前後方向の動作が連動する協調動作により構成される動作であることがわかる.

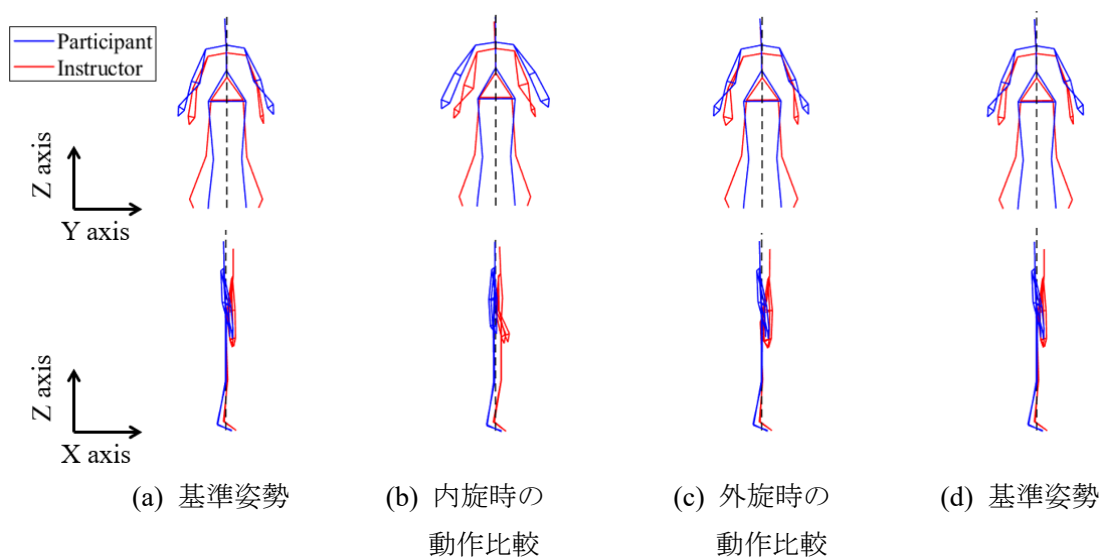


図 7.16 特異値分解によって得られた第 1 モードの比較 (被験者番号 3 EX No.1)

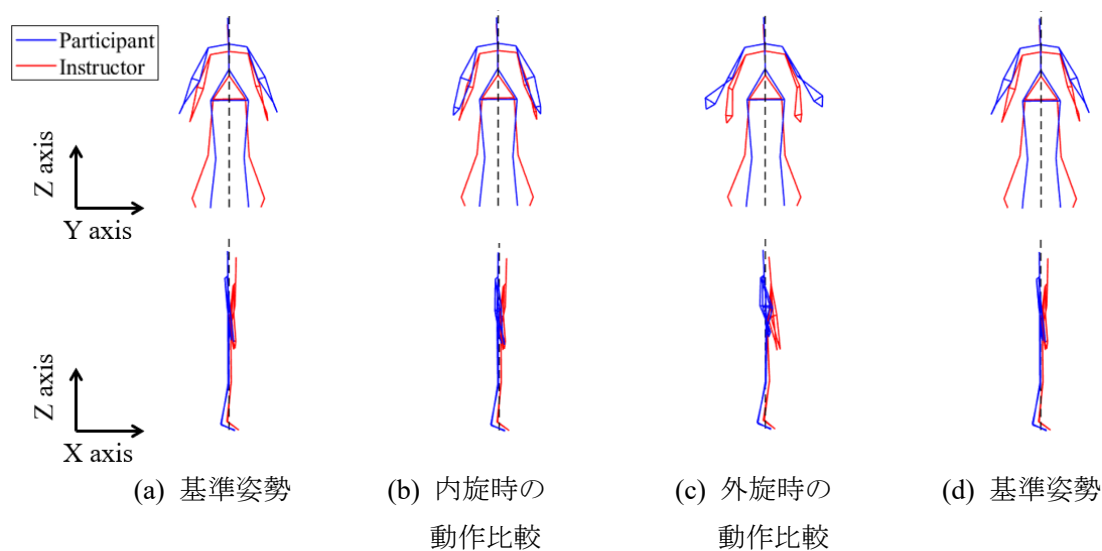


図 7.17 特異値分解によって得られた第 2 モードの比較 (被験者番号 3 EX No.1)

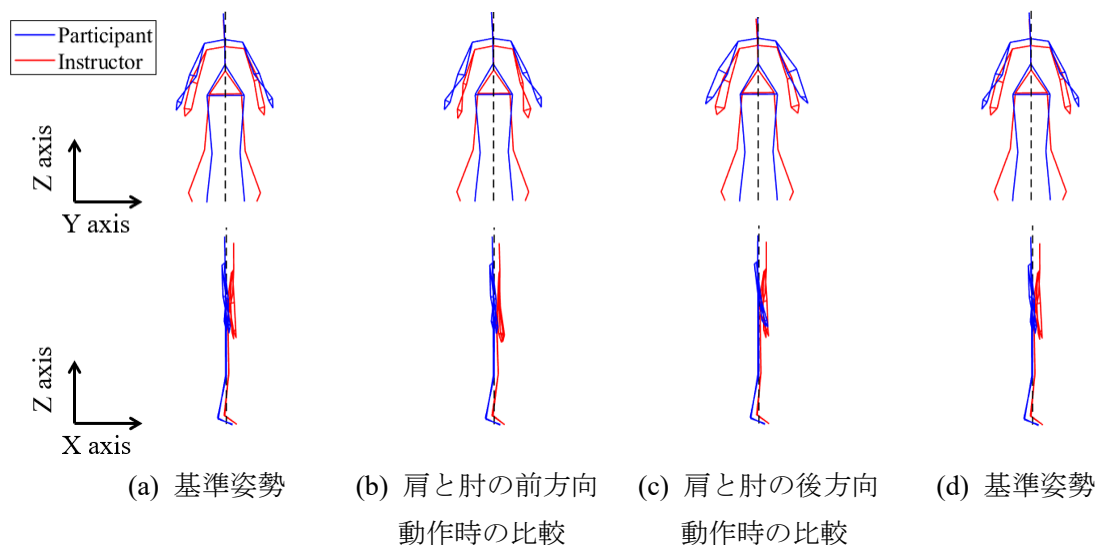


図 7.18 特異値分解によって得られた第 3 モードの比較 (被験者番号 3 EX No.1)

被験者番号 4 とインストラクタの EX No.2 における第 1, 第 2 モードの示す協調動作を比較した結果を図 7.19, 図 7.20 に示す. 図 7.19, 図 7.20 において, 青色で示す結果は被験者番号 4 の協調動作を示し, 赤色で示す結果はインストラクタによる協調動作を示す. また, 比較のため, 被験者, インストラクタの基準姿勢時における腰の中心位置が絶対座標系の Z 軸上 ($X=0, Y=0$) になるように平行移動を行っている. 図 7.19 より, 被験者番号 4 の第 1 モードの協調動作は, 肩甲骨の外転, 内転動作を示し, 被験者番号 2 と同様, 下半身の左右方向の動作を示さないことがわかる. 次に, 図 7.20 より, 第 2 モードの協調動作は, 腕の外転, 内転動作と胸の前後方向の動作が連動し, 模範動作と同様の動作を示すことがわかった. この結果より, 被験者番号 4 の EX No.2 の動作は, 肩甲骨の外転, 内転を示す協調動作, 腕の外転, 内転動作と胸の前後方向の動作が連動する協調動作から構成される動作であることがわかる.

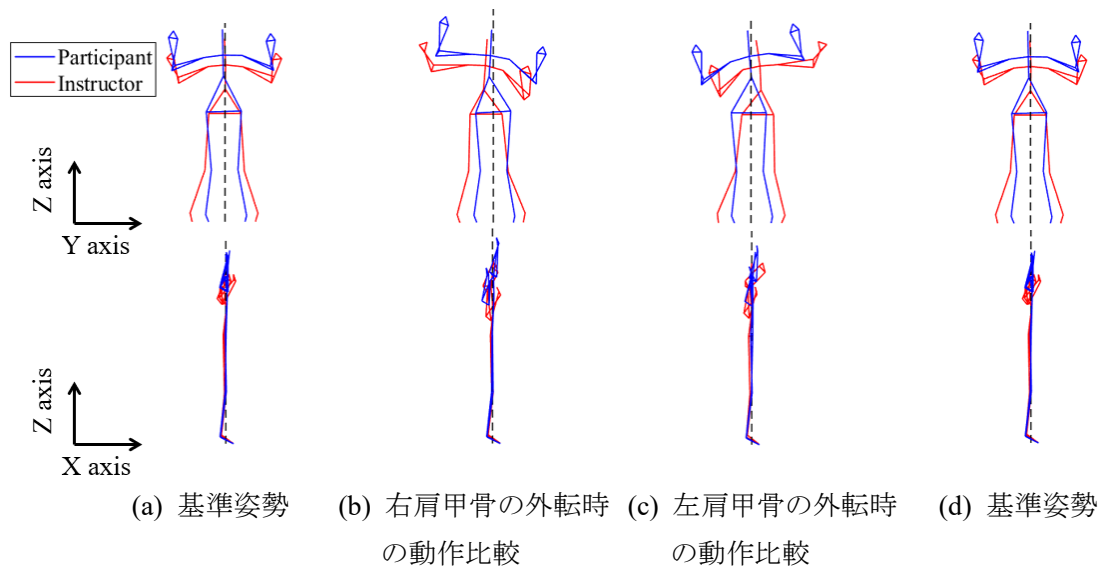


図 7.19 特異値分解によって得られた第 1 モードの比較 (被験者番号 4 EX No.2)

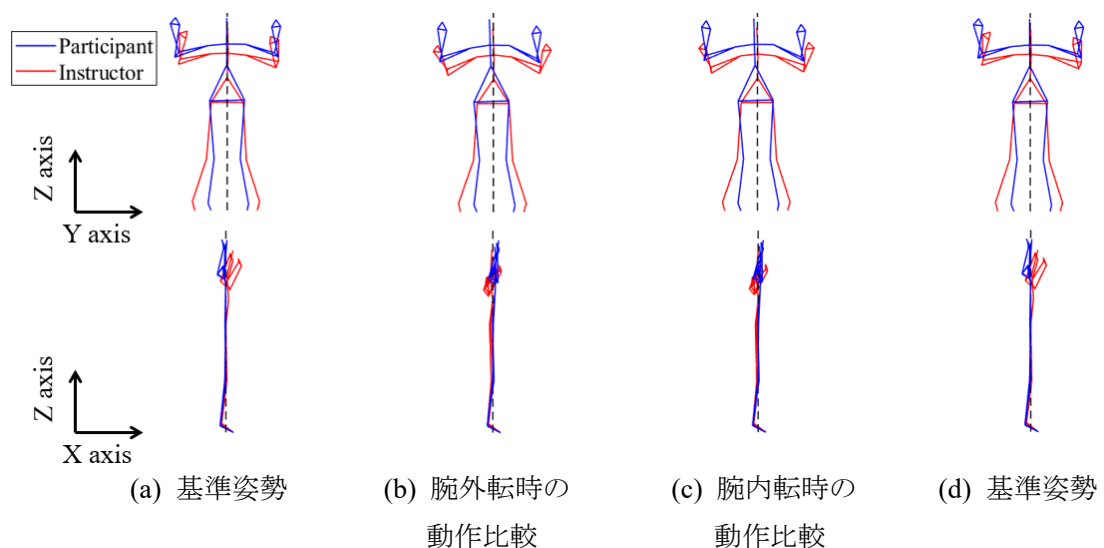


図 7.20 特異値分解によって得られた第 2 モードの比較 (被験者番号 4 EX No.2)

被験者番号 5 とインストラクタの EX No.3 における第 1 モードの示す協調動作を比較した結果を図 7.21 に示す。図 7.21 において、青色で示す結果は被験者番号 5 の協調動作を示し、赤色で示す結果はインストラクタによる協調動作を示す。また、比較のため、被験者、インストラクタの基準姿勢時における腰の中心位置が絶対座標系の Z 軸上 ($X=0, Y=0$) になるように平行移動を行っている。図 7.21 より、被験者番号 5 の第 1 モードの協調動作は、肩甲骨の拳上、下制動作を示し、他の被験者と同様に下半身の左右方向の動作を示さないことがわかる。この結果より、被験者番号 5 の EX No.3 の動作は肩甲骨の拳上、下制動作のみの協調動作から構成されることがわかる。

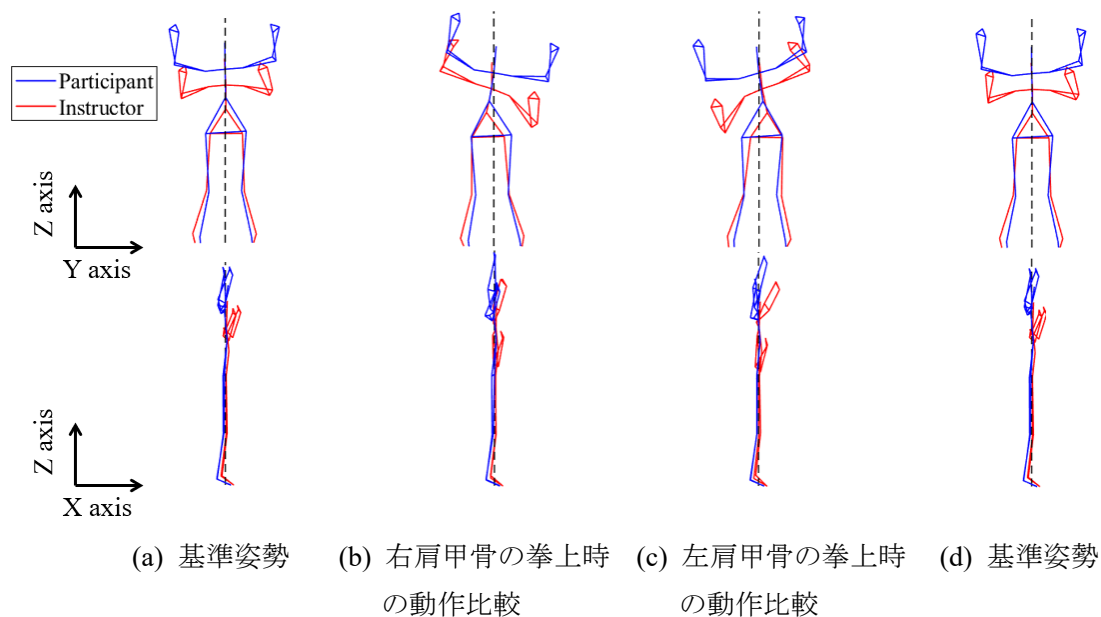


図 7.21 特異値分解によって得られた第 2 モードの比較 (被験者番号 5 EX No.3)

次に、上級者である被験者番号 6, 7 について確認を行う。他被験者と同様、特異値分解によって得られる協調動作を模範動作と比較した結果、被験者番号 6 における EX No.1, EX No.3, 被験者番号 7 の全スイングエクササイズは、模範動作と同様の動作を示すことがわかった。一方で、被験者番号 6 の EX No.2 では差が見られたため、詳細を確認した。被験者番号 6 とインストラクタの EX No.2 における第 1, 第 2 モードの協調動作を比較した結果を図 7.22, 図 7.23 に示す。図 7.22, 図 7.23 において、青色で示す結果は被験者番号 6 の協調動作を示し、赤色で示す結果はインストラクタによる協調動作を示す。また、比較のため、被験者、インストラクタの基準姿勢時における腰の中心位置が絶対座標系の Z 軸上 ($X=0$, $Y=0$) になるように平行移動を行っている。図 7.22 より、被験者番号 6 の第 1 モードの協調動作は、腕の上下方向の動作を示し、肩甲骨の外転、内転動作と下半身の左右方向の動作の連動を示さないことがわかる。また、図 7.23 より、第 2 モードの協調動作は、頭部、胸部が右側に傾く動作を示し、腕の外転、内転動作と胸の前後方向の動作の連動を示さないことがわかる。この結果より、被験者番号 6 の EX No.2 については、模範動作とは別の動作を示し、腕の上下動作を示す協調動作と上体を右に傾ける動作を示す協調動作から構成されることがわかる。

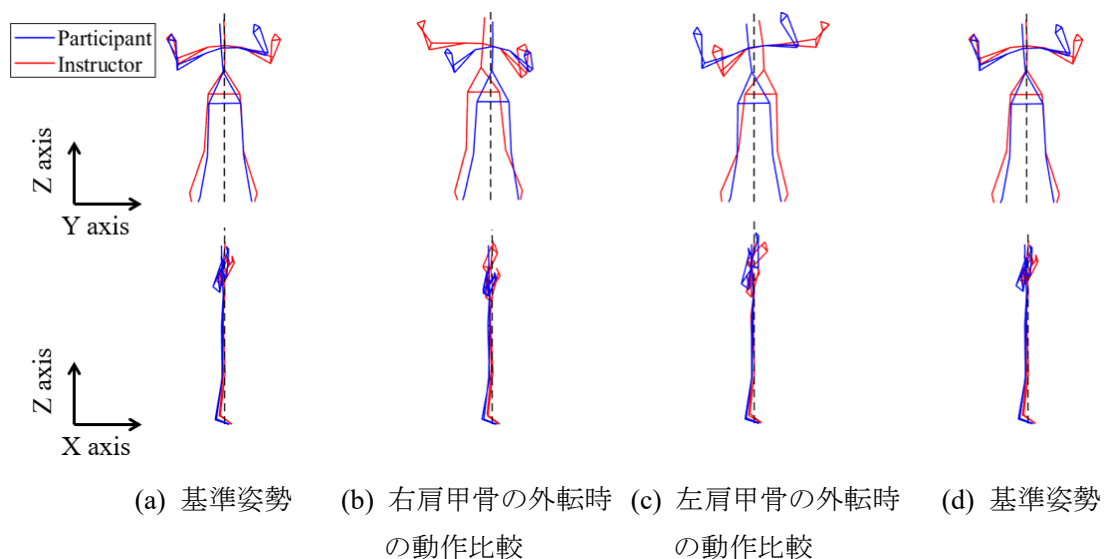


図 7.22 特異値分解によって得られた第 1 モードの比較 (被験者番号 6 EX No.2)

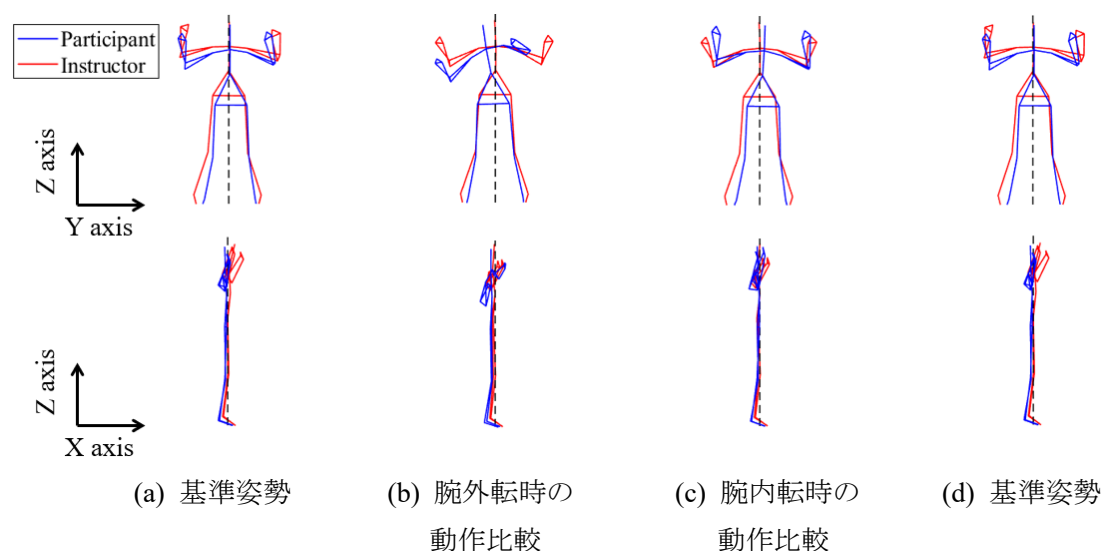


図 7.23 特異値分解によって得られた第 2 モードの比較 (被験者番号 6 EX No.2)

以上の結果より、特異値分解によって、スイングエクササイズから協調動作を抽出することで、被験者のスイングエクササイズを詳細に評価できることがわかった。また、初級者、中級者における EX No.2, EX No.3 から抽出した第 1 モードの協調動作は、上半身の動作のみを示し、下半身の左右方向の動作との連動を示さないことがわかった。

7.7 インストラクタの指導によるスイングエクササイズの改善確認

7.6 節の取り組みにより、特異値分解によって、スイングエクササイズの模範動作から抽出した協調動作と比較した結果、初級者、中級者は下半身の動作との連動を示さず、上半身

の動作のみ示すことがわかった。そこで、本節では、インストラクタの指導によって見られる協調動作の差を確認する⁽⁷⁰⁾。インストラクタによる指導は、7.2 節に記載したスイングエクササイズの詳細説明とスイングエクササイズによって期待されるゴルフスイング動作の改善に関する説明を口頭によって行った。また、効果の確認については、式(3.60)により得られる位置情報を表す右特異ベクトル $\mathbf{V}_{(n)}$ (以下、 $\mathbf{V}_{(n)}$ を空間ベクトルと定義する)を用いる。

$\mathbf{V}_{(n)}$ は基準となる姿勢に対し、第 n モードにおける動作の方向を示すベクトルであり、7.3 節で定義した人体モデル節点の自由度を持ち、全成分におけるノルムが 1 となるように正規化されている。そのため、 $\mathbf{V}_{(n)}$ において、人体モデルの各部位の X 軸成分、Y 軸成分、Z 軸成分を二乗平方和することで、第 n モードにおける各部位の動作の大きさをインストラクタと被験者間で評価することができる。空間ベクトルを各部位の成分で二乗平方和した結果を空間ベクトルのノルムと定義する。一例として、図 7.10(a)に示した被験者番号 2 とインストラクタの EX No.2 における第 1 モードの協調動作を空間ベクトルのノルムを用いて比較した結果を図 7.24 に示す。図 7.24 において、横軸は表 7.2 の身体各部位を示し、(L)は左半身側を示し、(R)は右半身側の部位を示す。縦軸は空間ベクトルのノルムの値であり、身体各部位の動作の大きさを示す。また、青色で示す結果は被験者番号 2 の結果を示し、赤色で示す結果はインストラクタの結果を示す。図 7.24 より、図 7.10(a)同様、被験者番号 2 における West(L), West(R), Knee(L), Knee(R)のノルムの値がインストラクタに対し小さくなっており、下半身(腰, 膝)の動作が少ないことがわかる

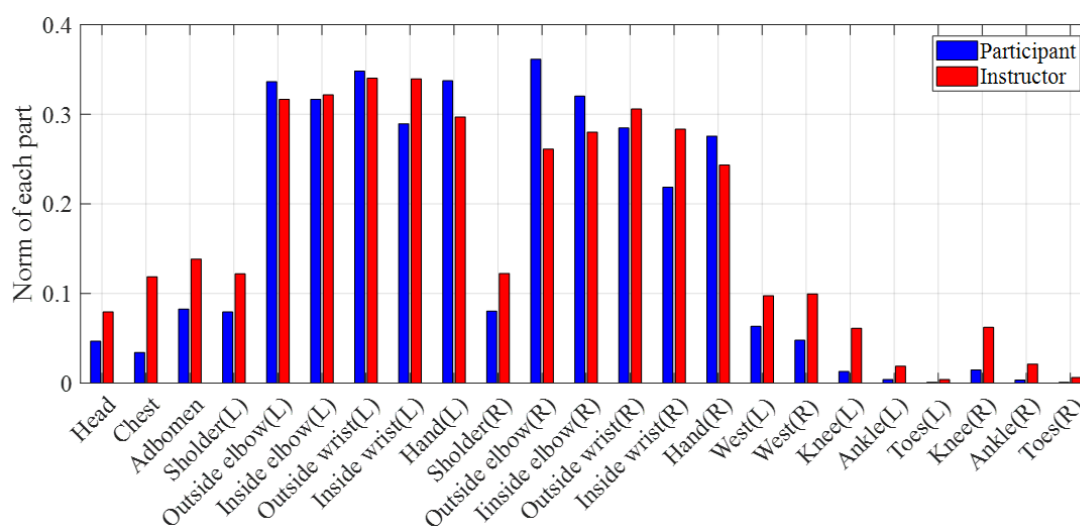


図 7.24 空間ベクトルにより EX No.2 の第 1 モードの挙動を比較した結果 (被験者番号 2)

空間ベクトルのノルムを用いて、インストラクタの指導による協調動作の差を確認する。図 7.9, 図 7.11 に示す EX No.2, EX No.3 の模範動作より、下半身の左右方向の動作は第 1 モードの協調動作で確認できるため、各被験者の第 1 モードの協調動作を比較する。被験者

番号 1, 2, 4, 5 の指導前後とインストラクタにおける第 1 モードの協調動作を空間ベクトルのノルムを用いて比較した結果をそれぞれ図 7.25～図 7.28 に示す。図 7.25～図 7.28 において、青線で示す結果は指導前の被験者、緑線で示す結果は指導後の被験者の結果、赤線で示す結果はインストラクタの結果を示す。図 7.25～図 7.28 より、全被験者において、West(L), West(R), Knee(L), Knee(R)の空間ベクトルのノルムが増加し、指導によって下半身の動作が増加することがわかる。これら空間ベクトルのノルムの一致度を評価するために、被験者とインストラクタの空間ベクトルのノルム間におけるコサイン類似度を算出する。全被験者でのコサイン類似度の算出結果を表 7.5 に示す。表 7.5 より、被験者番号 1, 2, 4, 5 の全被験者において、指導により第 1 モードのコサイン類似度が増加していることがわかった。

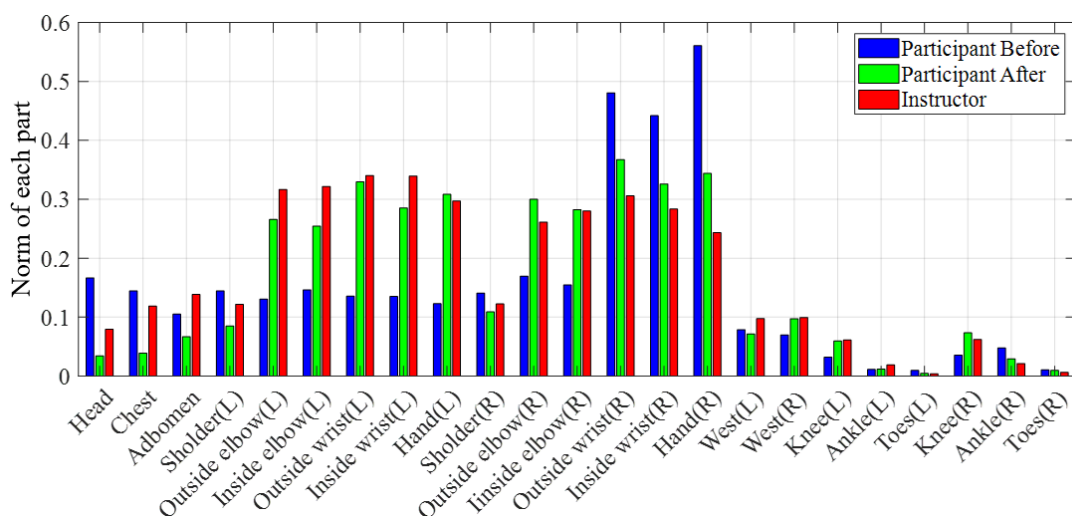


図 7.25 指導前後の空間ベクトルの比較 (被験者番号 1)

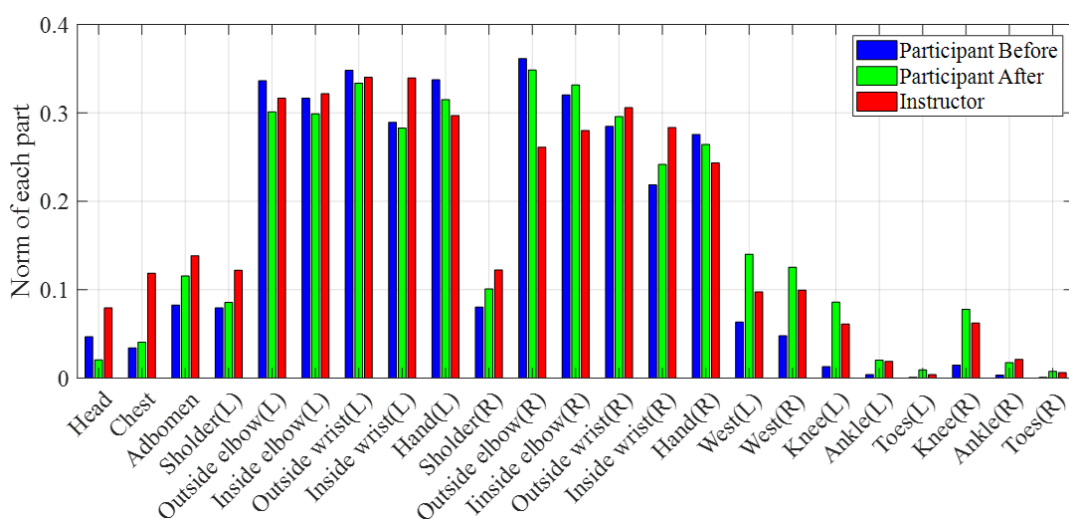


図 7.26 指導前後の空間ベクトルの比較 (被験者番号 2)

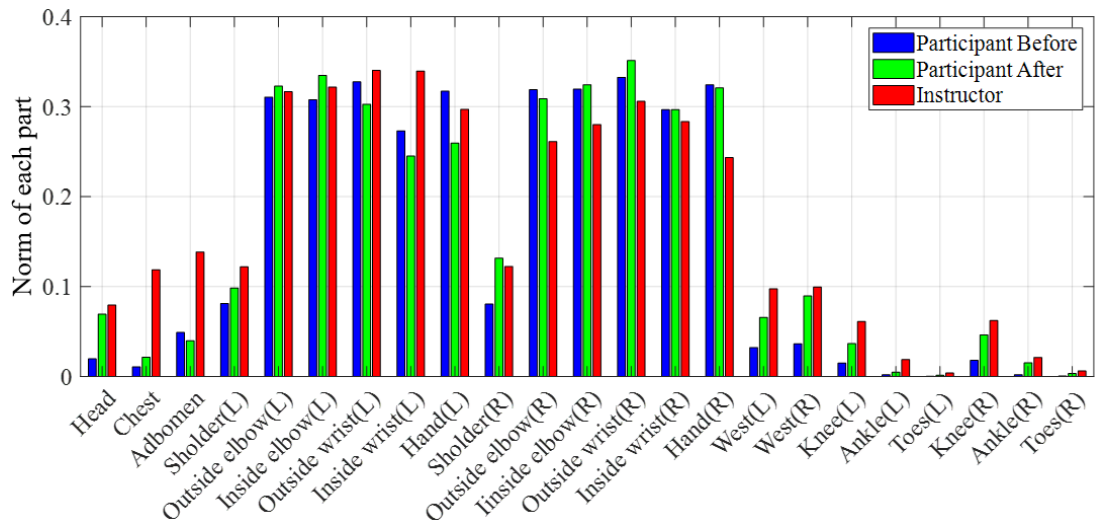


図 7.27 指導前後の空間ベクトルの比較 (被験者番号 4)

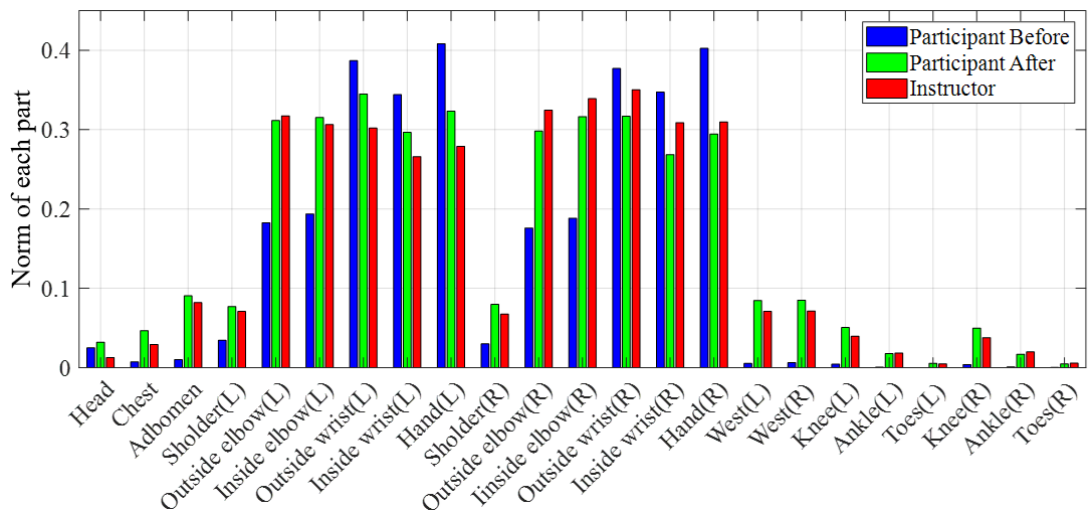


図 7.28 指導前後の空間ベクトルの比較 (被験者番号 5)

表 7.5 第 1 モードの空間ベクトルコサイン類似度算出結果

No.	Exercise Type	Before	After
1	EX No.2	0.813	0.980
2	EX No.2	0.977	0.983
4	EX No.2	0.971	0.976
5	EX No.3	0.932	0.995

次に、EX No.1 を行った被験者番号 3 におけるスイングエクササイズについて確認する。図 7.24 同様、被験者番号 3 における指導前後とインストラクタにおける第 1 モードの協調動作を空間ベクトルのノルムを用いて比較した結果を図 7.29 に示す。図 7.29 において、青

線で示す結果は指導前の被験者、緑線で示す結果は指導後の被験者、赤線で示す結果はインストラクタの結果を示す。図 7.29 より、Head, Chest の空間ベクトルのノルムが増加し、大腿の内旋, 外旋動作による頭部, 胸部の前後方向の動作との連動を示すことがわかる。次に、被験者とインストラクタの空間ベクトルのノルム値におけるコサイン類似度を算出した。算出した結果を表 7.6 に示す。表 7.6 より、指導後のコサイン類似度が指導前に比べやや低下していることがわかる。図 7.29 より詳細を確認した結果、頭部, 胸部の空間ベクトルのノルムは改善しているものの、左右の Hand の空間ベクトルのノルム値が大きく増加していることがわかった。そこで、被験者番号 3 における指導前後の第 1 モードにおける協調動作の比較を行った。比較を行った結果を図 7.30 に示す。

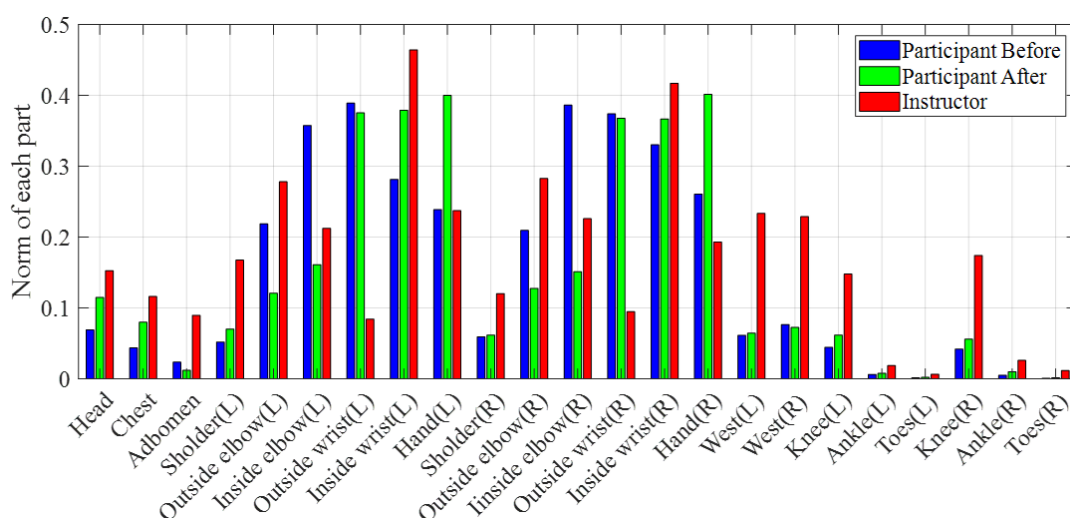


図 7.29 指導前後の空間ベクトルの比較 (被験者番号 3)

表 7.6 第 1 モードの空間ベクトルコサイン類似度算出結果

No.	Exercise Type	Before	After
3	EX No.1	0.806	0.803

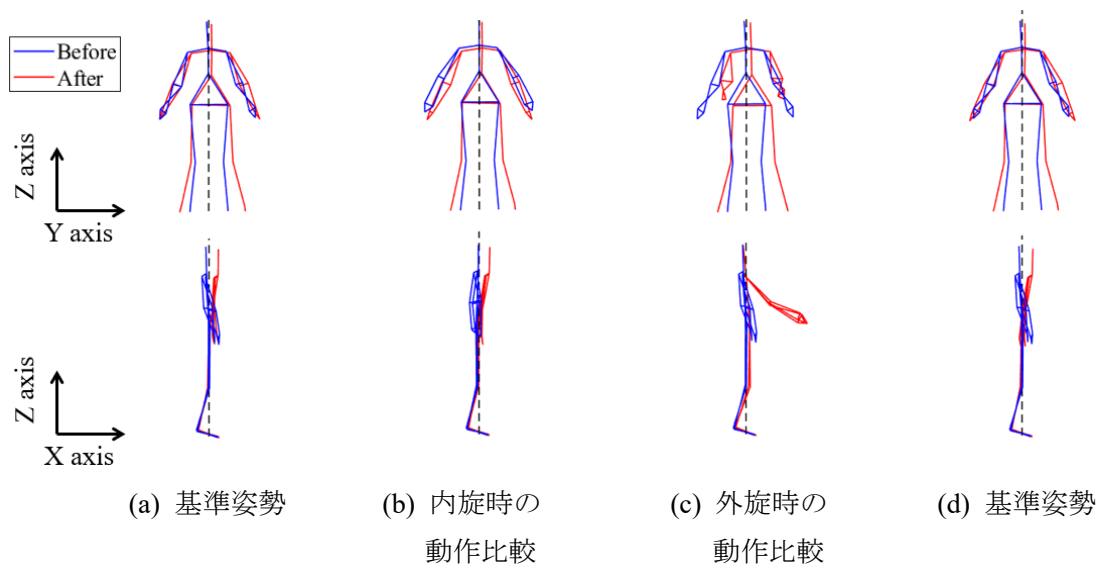


図 7.30 指導前後の第 1 モードにおける協調動作の比較結果（被験者番号 3）

図 7.30 において、青線で示す結果は指導前の被験者、赤線で示す結果は指導後の被験者の結果を示す。図 7.30 より、指導前後の第 1 モードにおける協調動作を比較した結果、(b) に示す内旋時において、頭部、胸部が前方向への動作を示すが、(c) に示す外旋時において、腕が前方向への動作を示すことがわかった。腕の前方向への動作は外旋動作を意識しているために発生するため、指導によってスイングエクササイズが改善したと考えられるが、腕の前方向の動作が増加したことによってコサイン類似度が低下したと考えられる。

以上の結果より、インストラクタの指導による協調動作の差を空間ベクトルのノルムを用いることで定量的に評価し、スイングエクササイズを改善できることがわかった。一方、本実験ではインストラクタが口頭によって指導を行ったため、被験者 3 に示す通り動作の改善によって異なる部位の動作が大きくなる可能性があることがわかった。この結果より、スイングエクササイズを計測後、特異値分解によって空間ベクトルのノルムを算出し被験者に提示することでさらに具体的な指導が可能になると考えられる。本研究では第 1 モードの協調動作の差について確認を行ったが、本手法によって各モードの協調動作の空間ベクトルのノルムを提示し、一致度の低い身体部位を提示する等の具体的な指導を行うことで、被験者が短期間でスイングエクササイズを習得できると考えられる。

7.8 スイングエクササイズが初級者と中級者のゴルフスイング動作に与える影響について

7.7 節では、インストラクタの指導により、特異値分解によって抽出した協調動作の空間ベクトルのノルムのコサイン類似度が増加し、スイングエクササイズが改善することを示した。この結果より、ゴルフスイング動作を習得していない初級者、中級者が適切に模範動作を再現できたと考えられる。そこで本節では、スイングエクササイズが初級者、中級者のゴルフスイング動作に与える影響について明らかにする⁽⁷⁰⁾。ゴルフスイング動作への影響

を明らかにするために、松本らの先行研究を参考に、特異値分解によりゴルフスイング動作から得られる協調動作⁽²⁹⁾を用いる。図 7.4 に示す人体モデルを用いて全被験者のゴルフスイング動作に特異値分解を行い、先行研究と同様にゴルフスイングから 5 つのモードにおける協調動作を抽出した⁽²⁹⁾。抽出した各モードが示す協調動作を確認した結果を表 7.7 に示す。表 7.7 より、第 1 モードの協調動作では Top, Finish における腕の上下動作と腰と膝の回転動作が連動し、第 2 モードの協調動作ではバックスイング、フォロースイングにおける腕の左右動作と腰と膝の回転動作が連動し、第 3 モードの協調動作ではバックスイングでの踏み込み動作、フォロースイングにおける蹴り上げ動作と肘の伸展動作が連動し、第 4 モードの協調動作ではダウンスイングとフォロースイングにおける腕の回転動作と膝の左右動作が連動し、第 5 モードの協調動作ではダウンスイングとフォロースイングにおける肩と腰の左右動作が連動することがわかる。

表 7.7 ゴルフスイングから抽出した協調動作

Mode No.	Extracted cooperative movements
First mode	Vertical arm movement and hip rotation at the top and finish
Second mode	Lateral arm action on back swing and follow swing
Third mode	Stepping and elbow flexion in the back swing and ground kicking and elbow extension in the follower swing
Fourth mode	Arm rotation and lateral knee action on down swing and follow swing
Fifth mode	Lateral shoulder and hip action on down swing and follow swing

各モードにおける協調動作の空間ベクトルを用いて、スイングエクササイズが初級者、中級者のゴルフスイング動作へ与える影響を確認する。各モードにおける協調動作の空間ベクトルを応答変数、実験条件（スイングエクササイズ前後の 2 水準）、試行数（5 水準）、空間ベクトルの自由度（69 自由度）を因子とする三元配置分散分析を行った。分散分析は Matlab2021a (The MathWorks マサチューセッツ州) の `anovan` 関数を用いた。以下、特に記載が無い場合は、三元配置分散は Matlab を用いて行う。分散分析を行った結果、p 値（帰無仮説：スイングエクササイズ前後で空間ベクトルに差がない）が 0.05 未満を示した場合、実験条件と空間ベクトルを因子とする多重比較検定を行った。被験者番号 1~5 の 5 名に対して各モードにおける 3 元配置分散分析、多重比較検定を行った結果を表 7.8~表 7.12 に示す。表 7.8~表 7.12 より、「-」は p 値が 0.05 以上を示した結果を表しており、「X」、「Y」、「Z」は空間ベクトルの各部位において差が見られた成分を示している。以下、各被験者における空間ベクトルに差が見られるモードについて確認する。

まず、EXNo.2 を行った被験者番号 1 について確認する。表 7.8 より、被験者番号 1 は主に第 3 モードの協調動作の空間ベクトルにおいて差を確認することができる。この空間ベクトルの差を協調動作の比較により確認する。比較を行うため、式(3.61)において、 $[R_0]$ で

示す基準姿勢を 1 試行分に合わせ、全試行における第 3 モードの協調動作を復元した。スイングエクササイズ前後で第 3 モードの協調動作を比較した結果を図 7.31 に示す。図 7.31 において、青線で示す結果はスイングエクササイズ前の第 3 モードの協調動作、赤線で示す結果はスイングエクササイズ後の第 3 モードの協調動作を示す。

表 7.8 多重比較検定結果（被験者番号 1）

Body part	First mode	Second mode	Third mode	Fourth mode	Fifth mode
Head	-	-	-	-	-
chest	-	-	Y	-	-
abdomen	-	-	Y	-	-
Left shoulder	-	-	Y	-	-
Outside left elbow	Y	-	X	-	-
Inside left elbow	-	-	X	-	-
Outside left wrist	Y	Y, Z	X	Y	X
Inside left wrist	Y	Y	X	-	-
Lefthand	Y	Y, Z	X	-	-
Right shoulder	-	-	-	-	-
Outside right elbow	X	Y	-	Z	-
Inside right elbow	-	-	Y	Y	-
Outside right wrist	X, Y	Y, Z	X	-	Y
Inside right wrist	X, Y	Y, Z	-	-	Y
Righthand	X, Y	Y, Z	-	-	Y
Left West	-	-	Y	-	-
Right West	-	-	X, Y	X	-
Left knee	-	-	Y	-	-
Left ankle	-	-	-	-	-
Left Toes	-	-	-	-	-
Right knee	-	-	Y	Y	-
Right ankle	-	-	-	X	-
Right Toes	-	-	-	-	-

表 7.8, 図 7.31 より、第 3 モードの協調動作において、Top から Down 9 にかけて胸部、腹部、左肩の Y 軸方向の動作、左肘、左手首、左手の X 軸方向の動作、右内肘の Y 軸方向の動作、右外手首の X 軸方向の動作、左腰の Y 軸方向の動作、右腰の X 軸、Y 軸方向の動

作，両膝の Y 軸方向の動作が増加し，Down 9 から Impact にかけて左腕全体の X 軸方向の動作が増加していることがわかる．この結果より，被験者番号 1 では，EX No.2 の改善により，Top から Down 9 において上体と膝の左右方向への動作が増加するスイングに改善しており，7.2.2 節に示す EX No.2 に期待する効果が得られることがわかった．

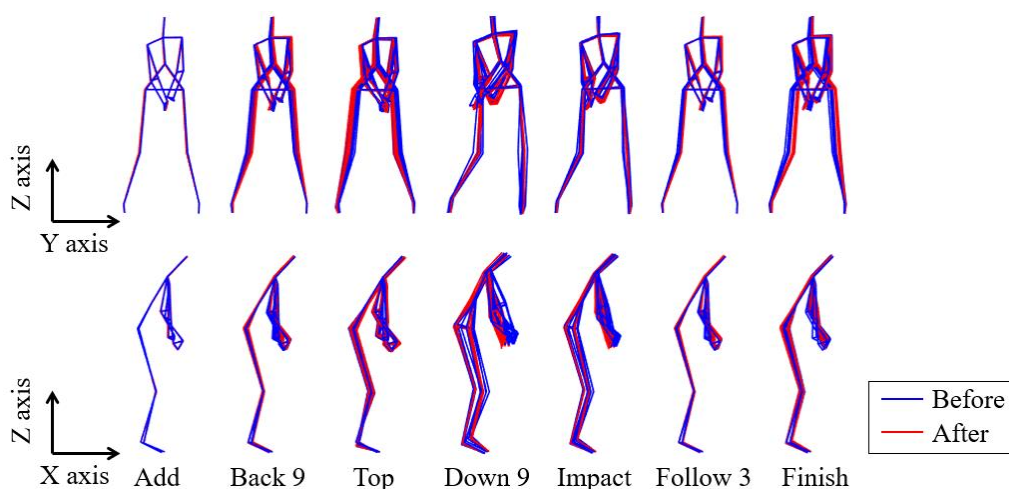


図 7.31 第 3 モードの挙動比較結果（被験者番号 1）

EX No.2 を行った被験者番号 2 について確認する．表 7.9 より，被験者番号 2 は主に第 1 モード，第 2 モードの協調動作の空間ベクトルにおいて差を確認することができる．この空間ベクトルの差を第 1 モード，第 2 モードの協調動作の比較により確認する．比較を行うため，式(3.61)において， $[R_0]$ で示す基準姿勢を 1 試行分に合わせ，全試行における第 1 モード，第 2 モードの協調動作を復元した．スイングエクササイズ前後で第 1 モード，第 2 モードの協調動作を比較した結果を図 7.32，図 7.33 に示す．図 7.32，図 7.33 において，青線で示す結果はスイングエクササイズ前における第 1 モード，第 2 モードの協調動作，赤線で示す結果はスイングエクササイズ後の第 1 モード，第 2 モードの協調動作を示す．

表 7.9 多重比較検定結果（被験者番号 2）

Body part	First mode	Second mode	Third mode	Fourth mode	Fifth mode
Head	-	-	-	-	-
chest	-	-	-	-	-
abdomen	Z	-	-	-	-
Left shoulder	Y, Z	-	-	-	-
Outside left elbow	X, Y	Y	-	-	-
Inside left elbow	X, Y	Y	-	-	-
Outside left wrist	X, Y	Y	-	-	-
Inside left wrist	X, Y	Y	-	-	-
Lefthand	X, Y	Y	-	X	-
Right shoulder	X		X	-	-
Outside right elbow	X	X, Y	X	-	Y, Z
Inside right elbow	X	Y	X	-	Y, Z
Outside right wrist	X, Y	Y	-	-	-
Inside right wrist	X, Y	Y	-	-	-
Righthand	X, Y	Y	-	X	-
Left West	-	-	-	X	-
Right West	X	-	X, Y	-	-
Left knee	Z	-	-	-	-
Left ankle	-	-	-	-	-
Left Toes	-	-	-	-	-
Right knee	-	-	Y	-	-
Right ankle	-	-	-	-	-
Right Toes	-	-	-	-	-

表 7.9, 図 7.32 より, 第 1 モードでは, Back 9~Top, Follow 3~Finish にかけて腹部の Z 軸方向の動作, 左肩の Y 軸, Z 軸方向の動作, 左手の X 軸, Y 軸方向の動作, 右手, 右肘の X 軸方向の動作, 右手首, 右手の X 軸, Y 軸方向の動作, 右腰の X 軸方向の動作, 左膝の Z 軸方向の動作が増加していることがわかる. 次に, 表 7.9, 図 7.33 より, 第 2 モードでは, Back 9~Finish にかけて左肘, 左手首, 左手, 右肘, 右手首, 右手の Y 軸方向の動作が増加していることがわかる. この結果より, 被験者番号 2 では, EX No.2 の改善によって, Top, Finish において, 左膝の左右動作が増え, Back 9~Finish にかけて腕の左右動作が増加するゴルフスイングに改善しており, 7.2.2 節に示す EX No.2 に期待する効果が得られるこ

とがわかった。

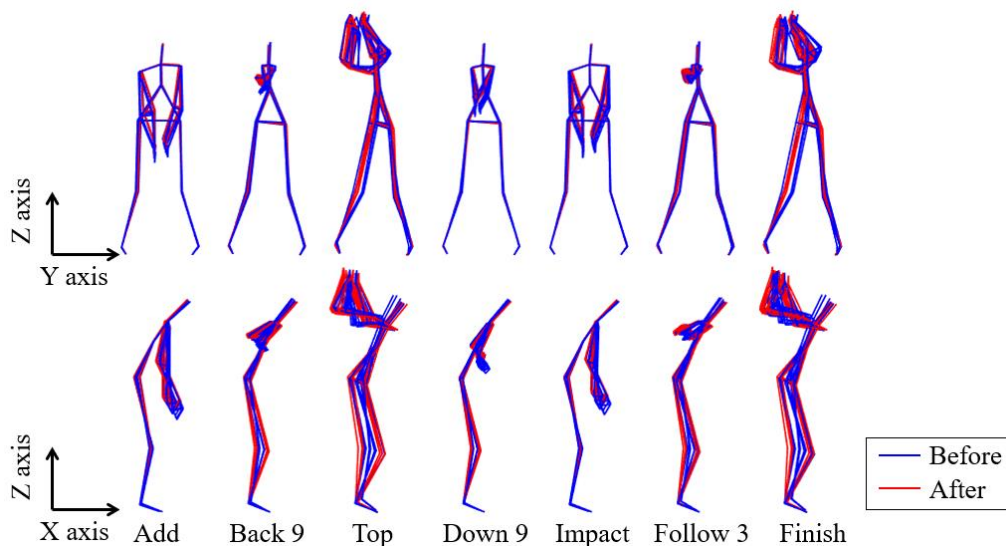


図 7.32 第 1 モードの挙動比較結果 (被験者番号 2)

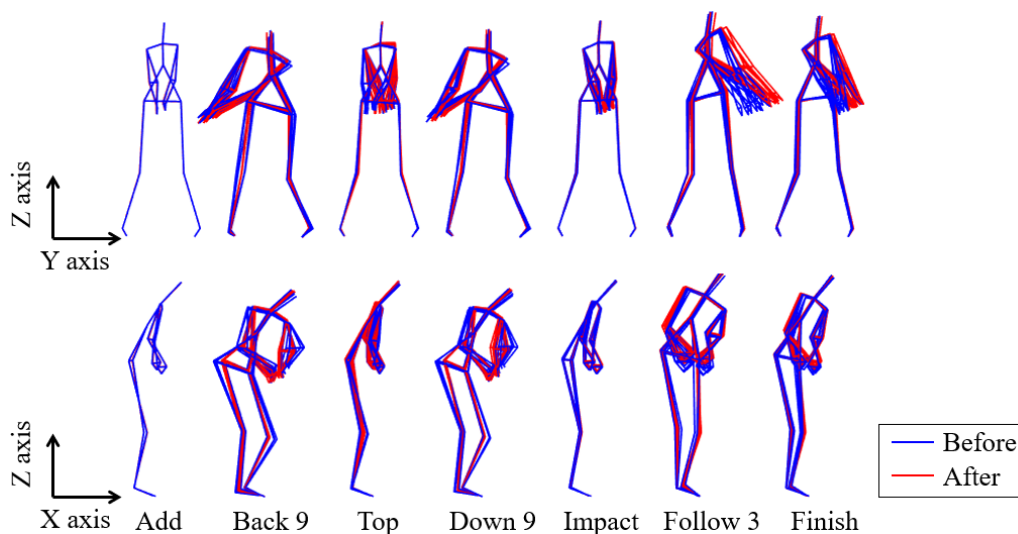


図 7.33 第 3 モードの挙動比較結果 (被験者番号 2)

EX No.1 を行った被験者番号 3 について確認する. 表 7.10 より, 被験者番号 3 は主に第 2 モード, 第 3 モードの協調動作の空間ベクトルにおいて差を確認することができる. この空間ベクトルの差を第 2 モード, 第 3 モードの協調動作の比較により確認する. 比較を行うため, 式(3.61)において, $[R_0]$ で示す基準姿勢を 1 試行分に合わせ, 全試行における第 2 モード, 第 3 モードの協調動作を復元した. スイングエクササイズ前後で第 2 モード, 第 3 モードの協調動作を比較した結果を図 7.34, 図 7.35 に示す. 図 7.34, 図 7.35 において, 青線で示す結果はスイングエクササイズ前の第 1 モード, 第 2 モードの協調動作, 赤線で示す

結果はスイングエクササイズ後の第1モード, 第2モードの協調動作を示す.

表 7.10 多重比較検定結果 (被験者番号 3)

Body part	First mode	Second mode	Third mode	Fourth mode	Fifth mode
Head	-	-	-	-	
chest	-	-	-	-	Y
abdomen	-	-	-	-	
Left shoulder	-	-	-	-	Y
Outside left elbow	-	Y	X	X	-
Inside left elbow	-	Y	-	-	-
Outside left wrist	Y	YZ	X	-	-
Inside left wrist	-	YZ	X	-	-
Lefthand	Y	YZ	X	-	-
Right shoulder	-	-	-	-	-
Outside right elbow	-	Y	-	-	-
Inside right elbow	-	Y	-	-	-
Outside right wrist	-	YZ	X	-	-
Inside right wrist	-	YZ	X	Y	-
Righthand	Z	YZ	X	Y	-
Left West	-	-	Y	-	-
Right West	-	-	-	-	-
Left knee	-	-	Y	-	-
Left ankle	-	-	-	-	-
Left Toes	-	-	-	-	-
Right knee	-	Y	XY	-	-
Right ankle	-	-	-	-	-
Right Toes	-	-	-	-	-

表 7.10, 図 7.34 より, 第2モードでは, Back 9, Impact~Finish にかけて左肘の Y 軸方向の動作, 左手首, 左手の Y 軸, Z 軸方向の動作, 右肘の Y 軸方向の動作, 右手首, 右手の Y 軸, Z 軸方向の動作, 右膝の Z 軸方向の動作が増加していることがわかる. 次に, 表 7.10, 図 7.35 より, 第3モードでは Down 9~Impact にかけて左手首, 左手の X 軸方向の動作, 右手首, 右手の X 軸方向の動作, 左腰の Y 軸方向の動作, 左膝の Y 軸方向の動作, 右膝の X 軸方向の動作, Y 軸方向の動作が増加していることがわかる. この結果より, 被験者番号 3

では、EX No.1 の改善によって、Impact～Finish にかけて左腕の左右動作が増加したゴルフスイングとなり、さらに Down 9～Impact にかけて膝の左右動作が増加するゴルフスイングに改善しており、7.2.1 節に示す EX No.1 に期待する効果が得られることがわかった。

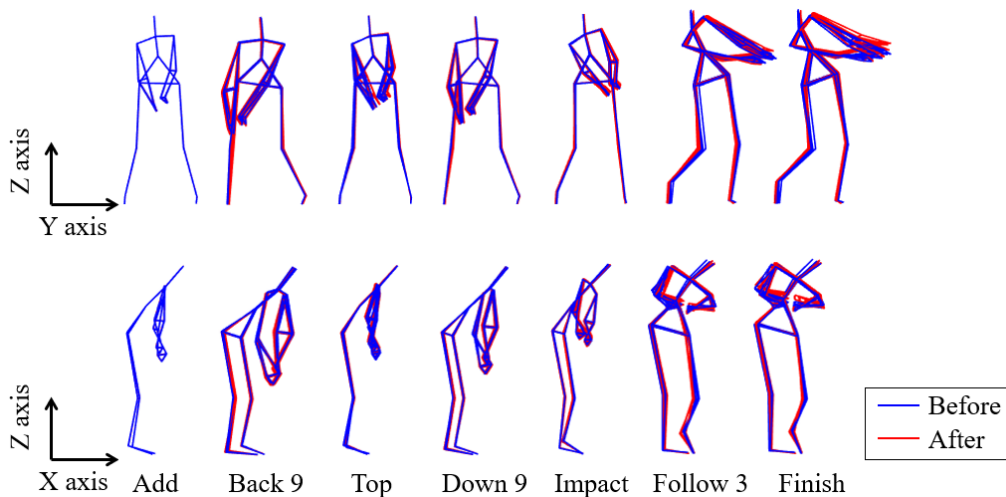


図 7.34 第 2 モードの挙動比較結果 (被験者番号 3)

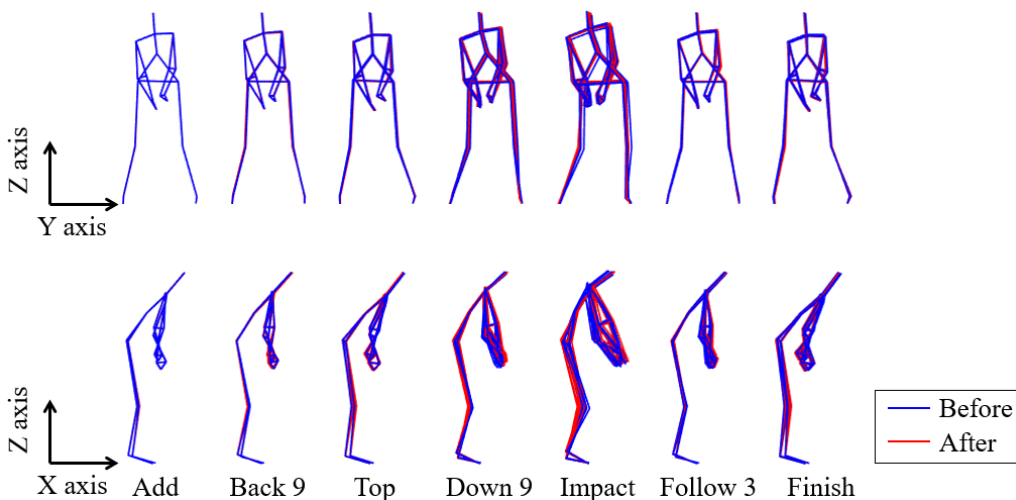


図 7.35 第 3 モードの挙動比較結果 (被験者番号 3)

EX No.2 を行った被験者番号 4 について確認する。表 7.11 より、被験者番号 4 は主に第 1 モード、第 3 モードの協調動作の空間ベクトルにおいて差を確認することができる。この空間ベクトルの差を第 1 モード、第 3 モードの協調動作の比較により確認する。比較を行うため、式(3.61)において、 $[R_0]$ で示す基準姿勢を 1 試行分に合わせ、全試行における第 1 モード、第 3 モードの協調動作を復元した。スイングエクササイズ前後で第 1 モード、第 3 モードの協調動作を比較した結果を図 7.36、図 7.37 に示す。図 7.36、図 7.37 において、青線

で示す結果はスイングエクササイズ前の第 1 モード，第 3 モードの協調動作，赤線で示す結果はスイングエクササイズ後の第 1 モード，第 3 モードの協調動作を示す。

表 7.11 多重比較検定結果（被験者番号 4）

Body part	First mode	Second mode	Third mode	Fourth mode	Fifth mode
Head	-	-	-	-	
chest	-	-	-	-	Y
abdomen	-	-	-	-	
Left shoulder	-	-	-	-	Y
Outside left elbow	-	Y	X	X	-
Inside left elbow	-	Y	-	-	-
Outside left wrist	Y	Y, Z	X	-	-
Inside left wrist	-	Y, Z	X	-	-
Lefthand	Y	Y, Z	X	-	-
Right shoulder	-	-	-	-	-
Outside right elbow	-	Y	-	-	-
Inside right elbow	-	Y	-	-	-
Outside right wrist	-	Y, Z	X	-	-
Inside right wrist	-	Y, Z	X	Y	-
Righthand	Z	Y, Z	X	Y	-
Left West	-	-	Y	-	-
Right West	-	-	-	-	-
Left knee	-	-	Y	-	-
Left ankle	-	-	-	-	-
Left Toes	-	-	-	-	-
Right knee	-	Y	X, Y	-	-
Right ankle	-	-	-	-	-
Right Toes	-	-	-	-	-

表 7.11, 図 7.36 より，試行間の差が多くみられるが，第 1 モードでは，Follow 3 から Finish における左肩の Y 軸方向の動作，左肘，左手首，左手の X 軸，Y 軸方向の動作，右肩，右肘の X 軸方向の動作，右手首，右手の X 軸，Y 軸方向の動作が増加していることがわかる。次に，表 7.11, 図 7.37 より，第 3 モードでは，Top～Follow 3 にかけて頭部の Y 軸，Z 軸方向の動作，胸部，腹部の Y 軸方向の動作，左手首，左手の X 軸方向の動作，右肩，右肘の

X 軸，Z 軸方向の動作，右手首，右手の X 軸方向の動作が増加し，右腰の X 軸，Y 軸方向の動作，左膝，右膝の Y 軸方向の動作，右足首の X 軸，Y 軸方向の動作が減少していることがわかる．この結果より，被験者番号 4 では，EX No.2 の改善によって Follow 3～Finish にかけて腕の左右動作が増加し，Top～Follow 3 にかけて膝の過度な左右動作が抑えられるゴルフスイングに改善しており，7.2.2 節に示す EX No.2 に期待する効果が得られることがわかった．

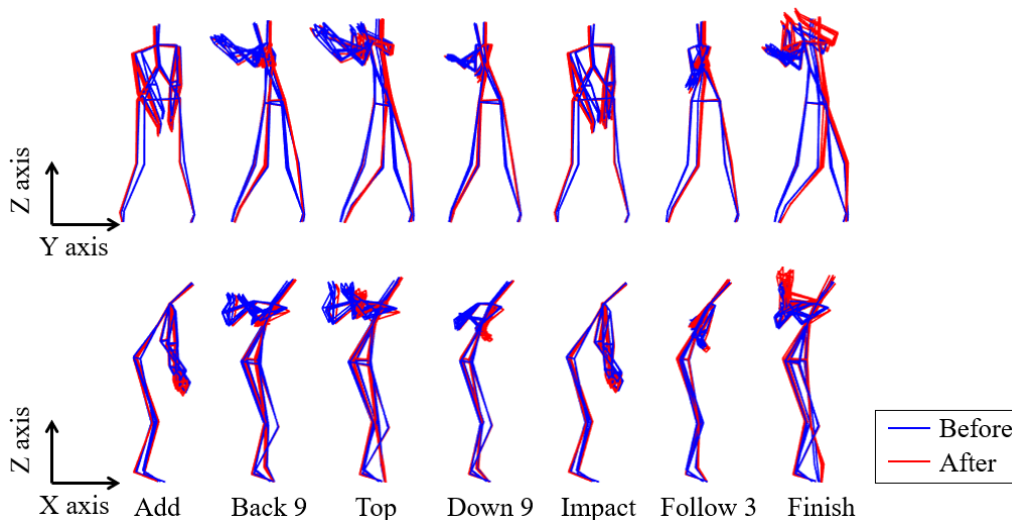


図 7.36 第 1 モードの挙動比較結果（被験者番号 4）

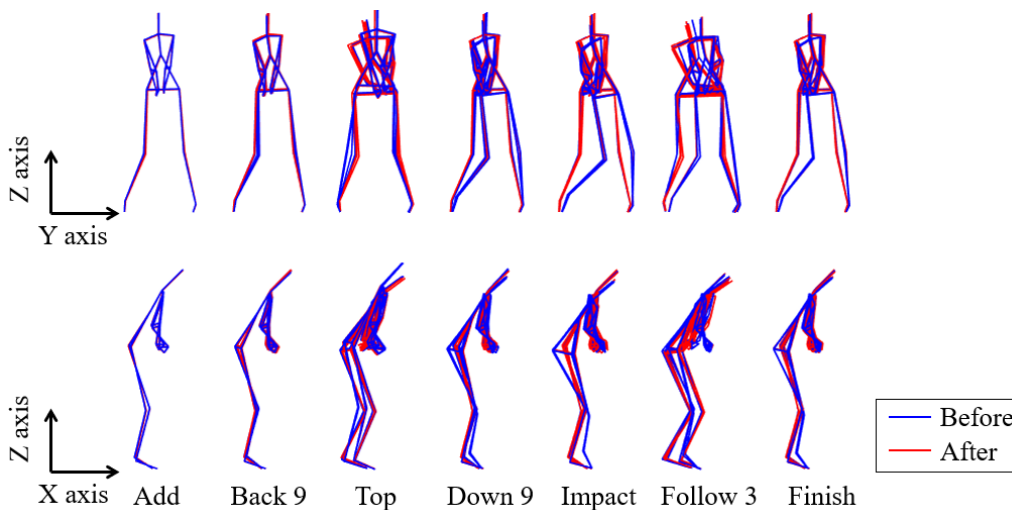


図 7.37 第 3 モードの挙動比較結果（被験者番号 4）

EX No.3 を行った被験者番号 5 について確認する．表 7.12 より，被験者番号 5 は主に第 1 モード，第 4 モードの協調動作の空間ベクトルにおいて差を確認することができる．この空間ベクトルの差を第 1 モード，第 4 モードの協調動作の比較により確認する．比較を行う

ため、式(3.61)において、 $[R_0]$ で示す基準姿勢を1試行分に合わせ、全試行における第1モード、第4モードの協調動作を復元した。スイングエクササイズ前後で第1モード、第4モードの協調動作を比較した結果を図7.38、図7.39に示す。図7.38、図7.39において、青線で示す結果はスイングエクササイズ前の第1モード、第4モードの協調動作、赤線で示す結果はスイングエクササイズ後の第1モード、第4モードの協調動作を示す。

表 7.12 多重比較検定結果 (被験者番号 5)

Body part	First mode	Second mode	Third mode	Fourth mode	Fifth mode
Head	Z	-	-	X, Y	-
chest	Z	-	-	X, Y	-
abdomen	Z	-	-	X, Y	-
Left shoulder	Y, Z	-	-	X, Y	-
Outside left elbow	X, Y	-	-	X, Y, Z	-
Inside left elbow	X, Y	-	-	X, Z	-
Outside left wrist	X, Y	Y	-	Z	-
Inside left wrist	X, Y	Y	-	X, Y, Z	-
Lefthand	X, Y	Y	-	Y, Z	-
Right shoulder	X	Y	-	Y, Z	-
Outside right elbow	X	Y	-	Z	-
Inside right elbow	X, Y	-	-	-	-
Outside right wrist	X, Y	Y	-	X	-
Inside right wrist	X, Y	Y	-	X, Y	Y
Righthand	X, Y	Y	-	X, Y	Y
Left West	Y, Z	-	-	X, Y	-
Right West	X	-	-	Z	-
Left knee	Z	-	-	X, Y	-
Left ankle	-	-	-	X	-
Left Toes	-	-	-	-	-
Right knee	-	-	-	X, Z	-
Right ankle	-	-	-	-	-
Right Toes	-	-	-	-	-

表 7.12, 図 7.38 より, 第1モードでは, Back 9~Top, Follow 3~Finish にかけて頭部, 胸部, 腹部の Z 軸方向の動作が減少し, 左肩の Y 軸, Z 軸方向の動作, 左肘, 左手首, 左手

の X 軸, Y 軸方向の動作, 右肩, 右肘外側の X 軸方向の動作, 右肘内側, 右手首, 右手の X 軸, Y 軸方向の動作, 左腰の Y 軸, Z 軸方向の動作, 右腰の X 軸方向の動作, 左膝の Z 軸方向の動作が増加していることがわかる. 次に, 表 7.12, 図 7.39 より, 第 4 モードでは, Top, Impact~Follow 3 にかけて頭部, 胸部, 腹部, 左肩の X 軸, Y 軸方向の動作, 左肘外側の X 軸, Y 軸, Z 軸方向の動作, 左肘内側の X 軸, Z 軸方向の動作, 左手首外側の Z 軸方向の動作, 左手首内側の X 軸, Y 軸, Z 軸方向, 左手, 右肩の Y 軸, Z 軸方向, 右肘外側の Z 軸方向, 右手首外側の X 軸方向の動作, 右手首内側, 右手, 左腰の X 軸, Y 軸方向の動作, 右腰の Z 軸方向の動作, 左膝の X 軸, Y 軸方向の動作, 左足首の X 軸方向の動作, 右膝の X 軸, Z 軸方向の動作が増加していることがわかる. この結果より, 被験者番号 5 では, EXNo.3 の改善により, Top, Finish において, 上体の動きが抑えられ腕の動作が増加するゴルフスイングとなり, さらに, Top, Impact~Follow 3 にかけて腕の左右動作, 腰の回転動作, 左右の膝の動作が増加するゴルフスイングに改善しており, 7.2.2 節に示す EX No.2 に期待する効果が得られることがわかった.

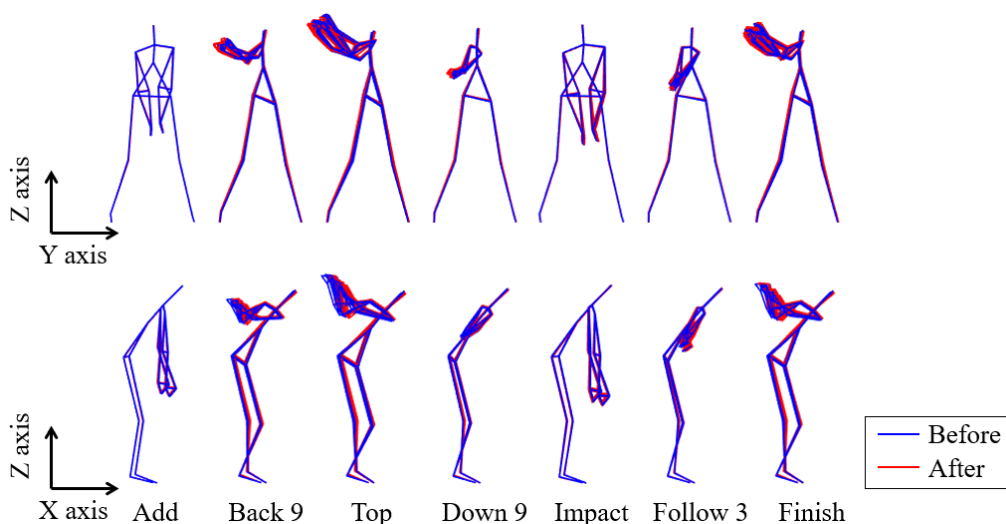


図 7.38 第 1 モードの挙動比較結果 (被験者番号 5)

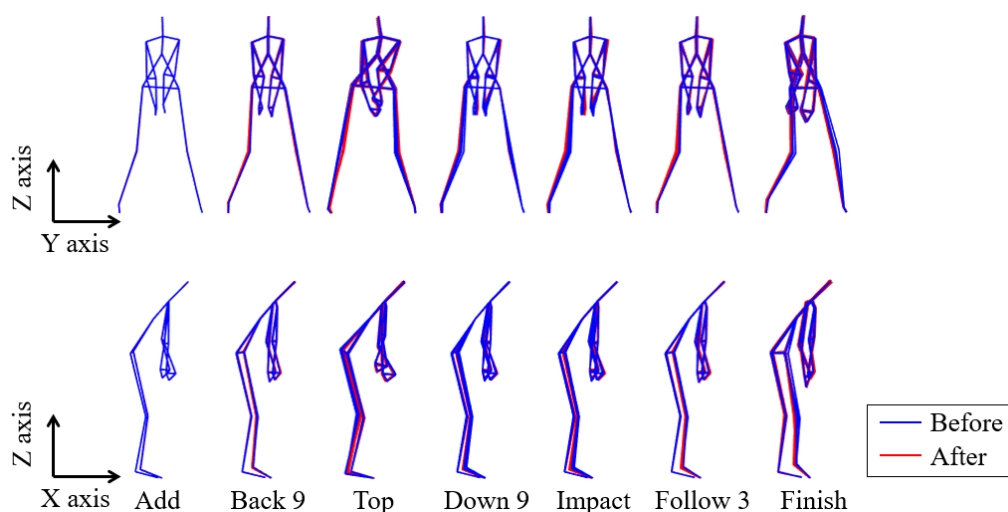


図 7.39 第 4 モードの挙動比較結果 (被験者番号 5)

以上の確認結果より，スイングエクササイズの改善がゴルフスイング動作に与えた結果を表 7.13 にまとめた．表 7.13 より，被験者により，変化の詳細は異なるものの，スイングエクササイズの改善によって，ゴルフスイング動作が改善したことが示された．

表 7.13 スイングエクササイズの改善により改善したゴルフスイング動作の抽出結果

Participants No.	Exercise No.	Improvement of swinging motion details
1	EX No.2	<ul style="list-style-type: none"> • Left to right movement of the body from Top to Down 9 • Left arm closer to body
2	EX No.2	<ul style="list-style-type: none"> • Left knee flexion and increased hip rotation • Increased arm movement from Back 9 to Finish
3	EX No.1	<ul style="list-style-type: none"> • Right knee extension and increased arm movement from Impact to Finish • Increased knee motion and hand flexion/ extension during stepping motion from Down 9 to Impact
4	EX No.2	<ul style="list-style-type: none"> • Increased arm movements from Follow 3 to Finish • Decrease in excessive left-right behavior during stepping and extension movements and increase in head, chest, abdominal wrist, and hand movements from Top to Follow 3
5	EX No.3	<ul style="list-style-type: none"> • Increased arm movement due to lower upper body and greater rotation of hips • Increase in lateral movement of upper body, rotation of hips, and extension of knees from Top, Impact to Follow 3

7.9 スイングエクササイズが上級者のゴルフスイング動作に与える影響について

7.7 節では、初級者、中級者を対象として、スイングエクササイズがゴルフスイング動作に与える影響について確認した。本節では、上級者を対象に、3 種のスイングエクササイズがゴルフスイング動作に与える影響について確認する。7.7 節同様に、各モードの協調動作における空間ベクトルの差の抽出に向け、各モードの協調動作における空間ベクトルを応答変数、実験条件（スイングエクササイズ前後の 2 水準）、試行数（5 水準）、空間ベクトルの自由度（69 自由度）を因子とする三元配置分散分析を行った。分散分析を行った結果、 p 値（帰無仮説：スイングエクササイズ前後で空間ベクトルに差がない）が 0.05 未満を示した場合、実験条件と空間ベクトルを因子とする多重比較検定を行った。各モードにおいて 3 元配置分散分析、多重比較検定を行った結果を表 7.14、表 7.15 に示す。表 7.14、表 7.15 より、「-」は p 値が 0.05 以上を示した結果を表しており、「X」、「Y」、「Z」は空間ベクトルの部位において差が見られた成分を示している。以下、各被験者における空間ベクトルに差が見られるモードについて確認する。

表 7.14 多重比較検定結果 (被験者番号 6)

Body part	First mode	Second mode	Third mode	Fourth mode	Fifth mode
Head	Y, Z	-	-	-	-
chest	Y, Z	-	-	-	-
abdomen	Z	-	-	-	-
Left shoulder	Y, Z	-	-	-	-
Outside left elbow	Y	Y	-	X, Z	-
Inside left elbow	Y	Y	-	X	-
Outside left wrist	X, Y	Y, Z	X	-	-
Inside left wrist	X, Y	Y, Z	-	-	-
Lefthand	X, Y	Y, Z	X	-	-
Right shoulder	X	-	-	-	-
Outside right elbow	X	Y	-	-	X
Inside right elbow	X, Y	Y	-	-	X
Outside right wrist	X, Y	Y, Z	-	-	-
Inside right wrist	X, Y	Y, Z	-	Y	-
Righthand	X, Y	Y, Z	-	Y	Y
Left West	Y, Z	-	-	-	-
Right West	-	-	X, Y	-	-
Left knee	Y, Z	-	-	-	-
Left ankle	-	-	-	X	-
Left Toes	-	-	-	-	-
Right knee	-	-	-	X, Z	-
Right ankle	-	-	-	-	-
Right Toes	-	-	-	-	-

表 7.14 より, 被験者番号 6 は主に第 1 モード, 第 2 モードの協調動作の空間ベクトルにおいて差を確認することができる. 図 7.18~図 7.22 と同様, この空間ベクトルの差を第 1 モード, 第 2 モードの協調動作の比較により確認する. 比較を行うため, 式(3.61)において, $[R_0]$ で示す基準姿勢を 1 試行分に合わせ, 全試行における第 1 モード, 第 2 モードの協調動作を復元した. スイングエクササイズ前後で第 1 モード, 第 2 モードの協調動作を比較した結果を図 7.40, 図 7.41 に示す. 図 7.40, 図 7.41 において, 青線で示す結果はスイングエクササイズ前の第 1 モード, 第 2 モードの協調動作, 赤線で示す結果はスイングエクササイズ後の第 1 モード, 第 2 モードの協調動作を示す.

表 7.14, 図 7.40 より, 第 1 モードでは, Top, Finish において, 頭部, 胸部の Y 軸, Z 軸方向の動作, 腹部の Z 軸方向の動作, 左肩の Y 軸, Z 軸方向の動作, 左肘の Y 軸方向の動作, 左手首, 左手の X 軸, Y 軸方向の動作, 右肩, 右肘外側の X 軸方向の動作, 右肘内側, 右手首, 右手の X 軸, Y 軸方向の動作, 左腰, 左膝の Y 軸, Z 軸方向の動作が増加していることがわかる. 次に, 表 7.14, 図 7.41 より, 第 2 モードでは, Back 9, Follow 3 において, 左肘の Y 軸方向の動作, 左手首, 左手の Y 軸, Z 軸方向の動作, 右肘の Y 軸方向の動作, 右手首, 右手の Y 軸, Z 軸方向の動作が増加していることがわかる. この結果より, 被験者番号 6 では, スイングエクササイズを行うことによって, Top, Finish において上体が高く, 左腰の回転が増加することで腕の位置が改善し, さらに, Back 9, Follow 3 において腕の左右動作が増加するゴルフスイングに改善することがわかった.

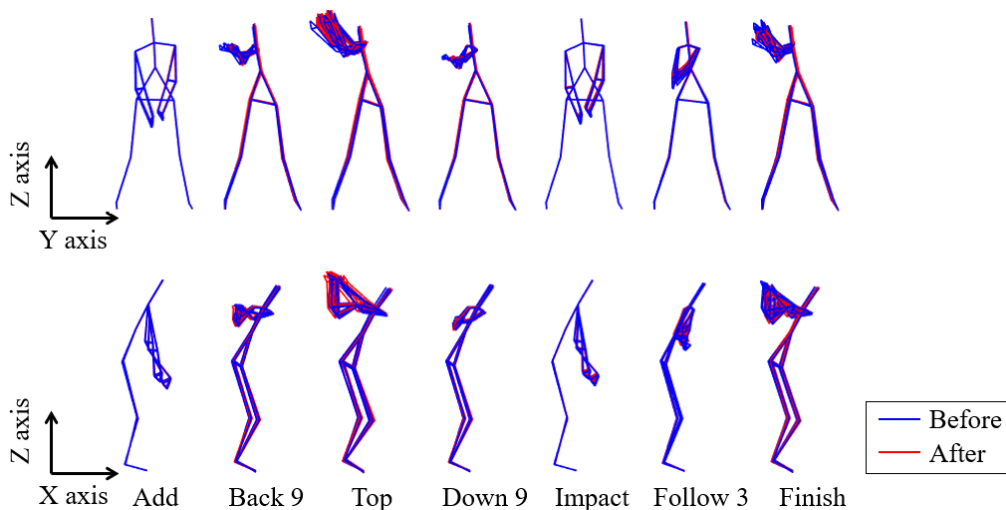


図 7.40 第 1 モードの挙動比較結果 (被験者番号 6)

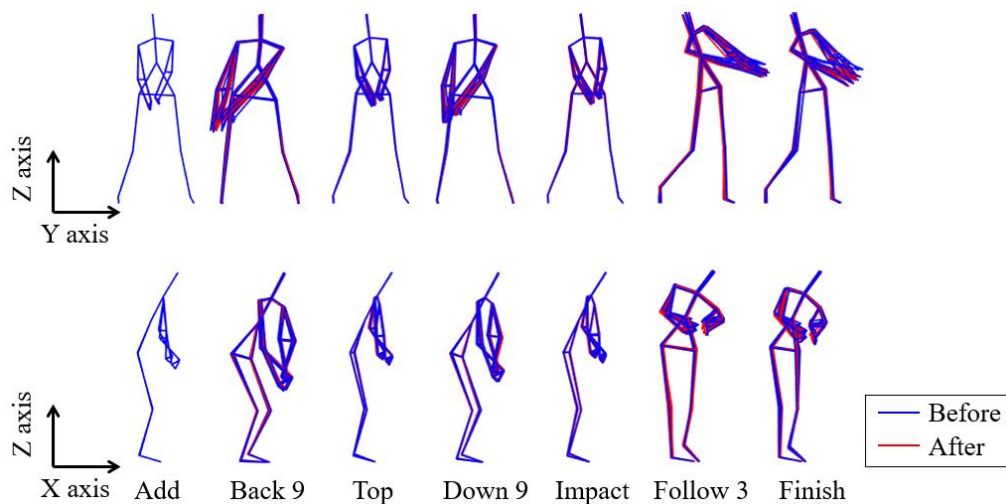


図 7.41 第 2 モードの挙動比較結果 (被験者番号 6)

表 7.15 多重比較検定結果 (被験者番号 7)

Body part	First mode	Second mode	Third mode	Fourth mode	Fifth mode
Head	X, Y	-	-	Z	Y
chest	X, Y	-	-	-	Y
abdomen	Y	-	-	-	Y
Left shoulder	Y	-	-	-	Y
Outside left elbow	X, Y	-	-	-	Y
Inside left elbow	X, Y	-	-	-	Y
Outside left wrist	X, Y	-	-	-	Y
Inside left wrist	X, Y	-	-	Y	Y
Lefthand	X, Y	Y	X	-	Z
Right shoulder	X	-	-	X, Z	Y
Outside right elbow	X	-	-	X, Z	-
Inside right elbow	X, Y	-	Y	X, Z	-
Outside right wrist	X, Y	Y	-	-	-
Inside right wrist	X, Y	Y	-	X	-
Righthand	X, Y	Y	-	X	-
Left West	Y	-	-	-	Y
Right West	-	-	X	-	-
Left knee	Z	-	-	-	-
Left ankle	-	-	-	-	-
Left Toes	-	-	-	-	-
Right knee	-	-	Y	-	-
Right ankle	-	-	-	-	-
Right Toes	-	-	-	-	-

表 7.15 より, 被験者番号 7 は主に第 1 モード, 第 5 モードの協調動作の空間ベクトルにおいて差を確認することができる. この空間ベクトルの差を第 1 モード, 第 5 モードの協調動作の比較により確認する. 比較を行うため, 式(3.61)において, $[R_0]$ で示す基準姿勢を 1 試行分に合わせ, 全試行における第 1 モード, 第 5 モードの協調動作を復元した. スイングエクササイズ前後で第 1 モード, 第 5 モードの協調動作を比較した結果を図 7.42, 図 7.43 に示す. 図 7.42, 図 7.43 において, 青線で示す結果はスイングエクササイズ前の第 1 モード, 第 5 モードの協調動作, 赤線で示す結果はスイングエクササイズ後の第 1 モード, 第 5 モードの協調動作を示す.

表 7.15, 図 7.42 より, 第 1 モードでは, Top, Finish にかけて頭部, 胸部の X 軸, Y 軸方向の動作, 腹部, 左肩の Y 軸方向の動作, 左肘, 左手首, 左手の X 軸, Y 軸方向の動作, 右肩, 右肘外側の X 軸方向の動作, 右肘内側, 左手首, 左手の X 軸, Y 軸方向の動作, 左腰の Y 軸方向の動作, 左膝の Z 軸方向における動作が増加していることがわかる. 次に, 表 7.15, 図 7.43 より, 第 5 モードでは, Down 9, Follow 3~Finish にかけて, 頭部, 胸部, 腹部, 左肩, 左肘, 左手首の Y 軸方向の動作, 左手の Z 軸方向の動作, 右肩, 左腰の Y 軸方向の動作が増加していることがわかる. この結果より, 被験者番号 7 では, スイングエクササイズを行うことで, Top, Finish において, 上体の前後, 左右方向の挙動と腰の左右方向の動作が増加することで腕の位置が改善し, さらに, Down 9, Follow 3~Finish にかけて 上体, 腕, 腰の左右動作が増加するゴルフスイングに改善することがわかった.

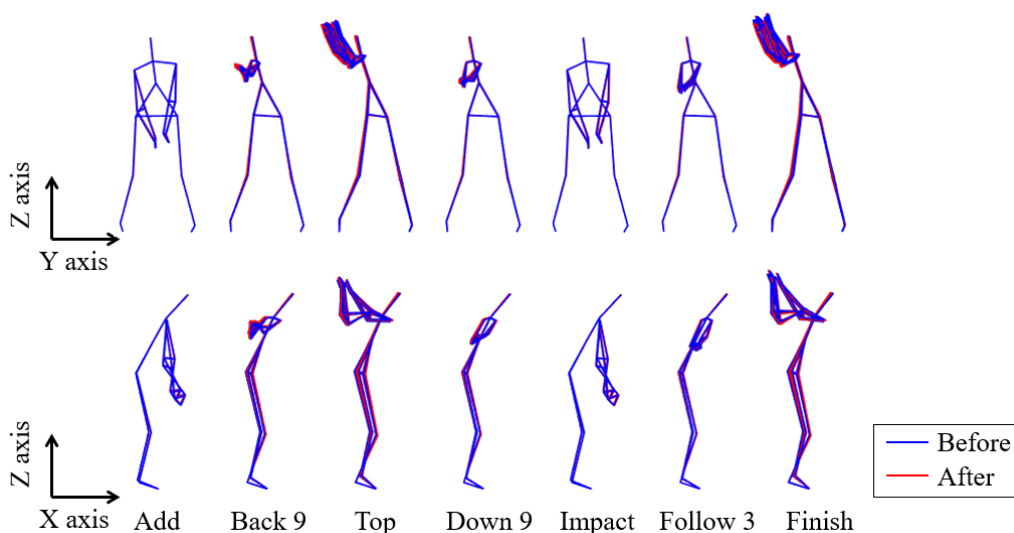


図 7.42 第 1 モードの挙動比較結果 (被験者番号 7)

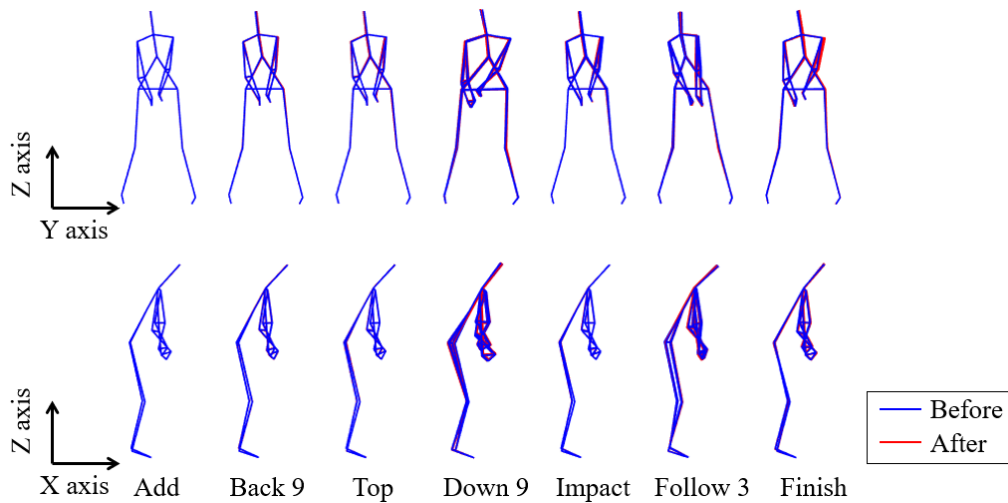


図 7.43 第 5 モードの挙動比較結果（被験者番号 7）

この結果より，上級者においてもスイングエクササイズによってゴルフスイング動作が改善することがわかった．また，被験者番号 6，被験者番号 7 に共通して第 1 モードに差が見られており，特にゴルフクラブの振り上げ動作時の上体の姿勢が改善することがわかる．そのため，上級者においてもスイングエクササイズを行うことが重要であることが示された．

以上の取り組みにより，初級者，中級者はゴルフスイング動作と関連するスイングエクササイズを理解し，適切にスイングエクササイズを再現することでゴルフスイング動作が改善することがわかった．また，ゴルフスイング動作との関連を理解できている上級者においても，ゴルフスイング動作前にスイングエクササイズを行うことでゴルフスイング動作が改善することがわかった．つまり，ゴルフスイング動作を習得していない初級者，中級者においては，適切なスイングエクササイズを習得することが短期間でのゴルフスイング動作の習得を可能にすると考えられる．

7.10 結論

本章では，ゴルフスイング動作に関連する基本動作であるスイングエクササイズに着目し，スイングエクササイズの改善がゴルフスイング動作に与える影響について検証を行い，以下結論を得た．

- (1) スイングエクササイズ，ゴルフスイング動作を評価するために，身体各部位の計測自由度を減らした人体モデルを構築した．
- (2) インストラクタにおけるスイングエクササイズの模範動作を特異値分解し，スイングエクササイズより協調動作を抽出した．模範動作から抽出した協調動作と被験者のスイングエクササイズから抽出した協調動作を比較した結果，初級者，中級者は上半身の動作のみ示し，下半身の動作は示さず，模範動作を適切に再現できていないことが

わかった。

- (3) 模範動作から抽出した協調動作と被験者のスイングエクササイズから抽出した協調動作の一致度を評価するために、特異値分解によって得られる右特異ベクトルの各部位の X 軸成分, Y 軸成分, Z 軸成分を二乗平方和することで空間ベクトルのノルムを算出した。
- (4) インストラクタの指導によるスイングエクササイズの差を空間ベクトルのノルムを用いて評価した。インストラクタの指導によって、下半身の空間ベクトルのノルムが増加しており、指導後のスイングエクササイズでは下半身の動作が増加することがわかった。
- (5) インストラクタの指導前後のスイングエクササイズと模範動作の一致度を評価するために空間ベクトルのノルムに対してコサイン類似度を算出した。5 名中 4 名の被験者において、インストラクタの指導によってコサイン類似度が増加したことがわかった。
- (6) コサイン類似度が増加しなかった 1 名の被験者は、スイングエクササイズは改善を示すものの、改善の意識が強く、他の部位の動作が増加することがわかった。
- (7) インストラクタの指導によって、ゴルフスイング動作を習得していない初級者、中級者がスイングエクササイズを適切に再現できることがわかった。
- (8) スイングエクササイズがゴルフスイング動作へ与える影響を調査するために、特異値分解によって被験者のゴルフスイング動作から 5 つの協調動作を抽出した。
- (9) スイングエクササイズが初級者、中級者のゴルフスイング動作から抽出した協調動作に与える影響を調査した。スイングエクササイズの効果によってゴルフスイング動作が改善されることがわかった。
- (10) スイングエクササイズが上級者のゴルフスイング動作から抽出した協調動作に与える影響を調査した。ゴルフクラブの振り上げ動作時における上体の姿勢が改善することがわかった。
- (11) ゴルフスイング動作を習得していない初級者、中級者はスイングエクササイズを先に習得することが短期間でのゴルフスイング動作習得を可能にすることがわかった。また、ゴルフスイング動作を習得している上級者であっても、ゴルフスイング動作の前にスイングエクササイズを行うことで、ゴルフスイング動画が改善することがわかった。

第8章 結論

本論文では、ゴルフプレーヤーにとって最適なゴルフクラブの提案手法を構築することを目的として、ゴルフクラブの設計値の変化がゴルフスイング動作やゴルフクラブのシャフト変形挙動に与える影響を明らかにした。そして、ゴルフスイング動作の短期間での習得方法を提案する事を目的として、スイングエクササイズの評価方法やゴルフスイング動作へ与える影響を明らかにした。その結果を章ごとにまとめる。

第2章では、本研究を行うための動作計測実験方法や、実験条件について示した。また、計測したデータから、第3章以降に用いるデータの算出方法について示した。

第3章では、本研究にて使用するシミュレーションモデルとして、ゴルフスイング動作からプレーヤーが発揮したトルクを算出する力学モデル、ゴルフスイング動作中のシャフトの変形挙動を算出する弾性モデルを構築した。また、本研究で使用する解析手法として、短時間フーリエ変換、ウェーブレット変換、特異値分解の理論について示した。

第4章では、シャフト質量の変化が発揮トルクに与える影響について論じた。プレーヤーが発揮したトルクに短時間フーリエ変換を行い、時間一周波数変化について確認した。その結果、1~7 Hzにおける腕重心まわりのトルクのX軸成分でダウンスイング動作を始動させ、Impact付近では全周波数における腕重心まわりのトルク、クラブ重心まわりのトルクで腕とゴルフクラブを加速させることがわかった。また、ゴルフクラブの設計値であるシャフトの質量に着目し、質量の増加が被験者の発揮するトルクに与える影響を確認した。その結果、半数以上の被験者において最大発揮タイミングが早くなり、過半数の被験者でトルクの最大発揮量が増加することがわかった。また、最適なクラブ質量の提案に向け、トルクの各成分の変化傾向とシャフト先端速度の変化傾向を比較した。その結果、クラブ重心まわりトルクにおいて、1 Hz~19 Hzの周波数領域のX軸成分、21 Hz~39 Hzの周波数領域のY軸成分はシャフト先端速度の変化傾向と逆の傾向を示し、1 Hz~19 Hzの周波数領域のY軸成分、Z軸成分はシャフト先端速度の変化傾向と同様の傾向を示すことがわかった。この結果より、シャフト先端速度の変化に寄与するトルクの成分を特定することができた。

第5章では、シャフトのキックポイントの変化とシャフト変形挙動の関係について論じた。4章同様、ゴルフクラブの設計値であるシャフトのキックポイントに着目し、キックポイントの変化が発揮するトルクに与える影響について短時間フーリエ変換を行い確認した。その結果、一部の被験者において最大発揮タイミングが変化し、大半の被験者でトルクの最大発揮量が増加することがわかったが、傾向は被験者によって異なり、また、フィーリング評価結果との共通点は見られなかった。この結果から、キックポイントの変化はゴルフスィ

ング動作に影響を与えるが、被験者によって変化傾向が異なり、それぞれでゴルフスイング動作を変化させていることが示された。ゴルフスイング動作の変化によって、被験者はシャフトの変形挙動を制御していると考えられる。そこで、シャフトの変形挙動をシミュレーションモデルで再現し、キックポイントの変化がシャフトの変形挙動に与える影響について確認した。シャフトの変形挙動に短時間フーリエ変換を行った結果、最大変形が発生するタイミングは変化せず、**High-kick-point** シャフトの変形量が増加することがわかった。次に、シャフトの変形挙動に特異値分解を行い、主要な変形挙動を抽出した。その結果、シャフトの変形挙動は二つのモードで構成され、被験者によって主要な変形挙動の向きが異なることがわかった。キックポイントの変化が主要な変形挙動に与える影響について確認した結果、各モードの振幅と、第1モードの変形挙動と **Toe up/down** 方向の負方向となす角度が変化することがわかった。さらに、**High-kick-point** のシャフトを好む被験者は、第1モードにおいて **Toe up/down** 方向の変形寄与が高く、**Low-kick-point** のシャフトをスイングした際に第1モードの振幅が減少する共通点が得られた。この結果より、**Toe up/down** 方向の変形寄与と第1モードの振幅が被験者のフィーリング評価に影響を与え、これらを確認することで被験者が好むキックポイントを提示できる可能性を示すことができた。

第6章では、シャフトの変形挙動の差とゴルフスイング動作の関係について論じた。5章の結果より、第1モードの変形において **Toe up/down** 方向の変形寄与が高い被験者と高くない被験者のゴルフスイング動作の違いをスイング平面とスイング平面に対するグリップの姿勢を用いて確認した。その結果、スイング平面が立つ状態でゴルフスイングを行う被験者は、第1モードの変形において **Toe up/down** 方向の変形寄与が高くなる傾向が得られた。また、スイング平面が立つ状態でゴルフスイングを行う被験者であっても、スイングの方向が **Lead/Lag** 方向を示す場合は **Lead/Lag** 方向の変形寄与が高くなり、**Toe up/down** 方向の変形寄与が低くなることがわかった。また、**Impact** 付近のシャフト変形挙動がゴルフボールの軌道に影響を与えるため、**Impact** 付近のシャフト変形挙動に着目し、同一のゴルフスイング動作計測結果からキックポイント違いのシャフト変形挙動を推定し比較を行った。その結果、**Impact** 付近の変形量が **High-kick-point** シャフトで増加する被験者と **Low-kick-point** シャフトで増加する被験者を得た。これら被験者間における共通点を抽出するため、ゴルフスイング動作中の加速度、角速度、角加速度波形に短時間フーリエ変換を行った。その結果、低周波成分が主となり高周波成分が瞬時に含まれる波形において、短時間フーリエ変換では周波数の時間変化を適切に抽出できず、ウェーブレット変換を用いることが望ましいことがわかった。ウェーブレット変換を行った結果を用いて被験者間における共通点を抽出した結果、**Impact** 付近の変形量が **High-kick-point** シャフトで増加する被験者は 2 Hz~5 Hz の低周波の加速度を多く使う傾向があり、**Low-kick-point** の変形量が多くなる被験者は 6 Hz~8 Hz の加速度の Y 軸成分に加え、広い周波数範囲における角速度、角加速度を多く使う傾向があることがわかった。この結果より、**Impact** 付近の変形量を確認することで、よりゴルフス

イングに適したシャフトを提案できる可能性を示すことができた。

第 7 章では、ゴルフスイング動作に関連する基本動作であるスイングエクササイズがゴルフスイング動作に与える影響について論じた。インストラクタの模範動作と初級者、中級者の動作より特異値分解によって協調動作を抽出し、それぞれ比較を行った。その結果、初級者、中級者は上半身のみの動作を示し、適切にスイングエクササイズを再現できていないことがわかった。次に、模範動作から抽出した協調動作と被験者から抽出した協調動作との一致度をコサイン類似度によって評価する手法を構築した。インストラクタの指導によってコサイン類似度が増加しており、スイングエクササイズを適切に再現したことを確認した。さらに、スイングエクササイズが初級者、中級者、上級者のゴルフスイング動作に与える影響を確認するため、特異値分解によってゴルフスイング動作から協調動作を抽出し、スイングエクササイズ前後の協調動作を比較した。その結果、初級者、中級者でスイングエクササイズに期待する効果通りにゴルフスイング動作が改善した。また、上級者ではスイングエクササイズによってゴルフスイング動作中の上体の姿勢が改善することがわかった。この結果より、ゴルフスイング動作を習得していない被験者は、ゴルフスイング動作に関連する基本動作であるスイングエクササイズを適切に再現できておらず、スイングエクササイズを先に習得することでゴルフスイング動作を短期間で習得できる可能性が示された。また、ゴルフスイング動作を習得している被験者は、スイングエクササイズ動作によってゴルフスイング動作前にスイングエクササイズを行うことでゴルフスイング動作が改善する可能性が示された。

以上の研究成果により、ゴルフクラブの設計値がゴルフスイング動作やシャフトの変形挙動に与える影響について明らかにし、ゴルフスイング動作の違いがシャフト先端挙動に与える影響について明らかにすることができた。さらに、ゴルフスイング動作の習得に向けた手法として、関連する基本動作の習得の必要性を示すことができた。これらの技術は、プレーヤに最適なゴルフクラブの提案を行うことや、ゴルフスイング動作習得に向けた重要な要素となる。一方、質量とキックポイントを同時に変化させた場合におけるゴルフスイング動作やシャフト先端挙動への影響調査や、スイングエクササイズをから抽出した協調動作を全モードで一致させた場合の効果については明らかにしきれなかった。今後はそれら影響や効果の確認を行うことで、最適なゴルフクラブの提案手法やゴルフスイングの習得方法の構築を行うため引き続き研究を進めていく。

参考文献

- (1) 岩壺卓三, 中川紀寿, 赤尾正勝, 富永一郎, 山口 哲男, “ゴルフクラブヘッドの最適設計”, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 56, No.524(1990), pp. 1053-1059
- (2) 岩壺卓三, 河村庄造, 古市一志, 山口哲男, “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”, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 67, No. 656(2001), pp. 922-928
- (3) 岩壺卓三, 河村庄造, 宮本和佳, 山口哲男, “ゴルフボールとクラブヘッドの衝突および衝突後の飛球の解析”, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 3, No. 616(1997), pp. 4239-4245
- (4) 植田尚良, “スイング動作時の打球感評価に関する研究”, 日本人間工学会関西支部大会講演論文集 (日本人間工学会・関西支部大会講演論文集), No.1(2009), pp. 91-92
- (5) S. MacKenzie, L. Champoux and E. Henrikson, “Influence of Grip Mass on Driving Performance”, Proceedings, Vol. 49, No. 1 (2020), p. 81
- (6) S. MacKenzie and E. J. Springs, “Understanding the mechanisms of shaft deflection in the golf swing”, Sports Engineering, Vol. 12, No. 2 (2010), pp. 69-75
- (7) 佐藤文宣, 蘆田浩規, 鳴尾丈司, “スイング中のゴルフクラブシャフトのしなりに関する考察”, 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 65, No. 630(1992), pp.140-147
- (8) K. Ohta, Y. Ohgi, K. Shibuya, “Dealing with stiffness: shaft dynamics in the golf swing”, Procedia Engineering, Vol. 72(2014), pp. 298-303
- (9) S. MacKenzie and E. J. Springs “Understanding the role of shaft stiffness in the golf swing”, Sports Engineering, Vol. 12, No. 1 (2009), pp. 13-19
- (10) N. Furukawa, N. Tsujiuchi, A. Ito, K. Masumoto, M. Ueda, K. Okazaki, “The influence of the Grip Head Rotation during a Golf Swing”, Proceedings 2018, Vol. 2, No. 6(2018), p.241
- (11) W. McNally, J. McPhee and E. Henrikson, “The Golf Shaft’s Influence on Clubhead-Ball Impact Dynamics”, Proceedings 2018, Vol. 2, No. 6(2018), p.245
- (12) D. Johnson and J. McPhee, “Predictive dynamic simulation of the golf swing, including golfer biomechanics and distributed flexibility in the shaft”, Proceeding Engineering, Vol. 72 (2014), pp. 799-804
- (13) 大屋敷由香, 富永潤, 弘元修司, “ゴルフスイングの動力学モデルに関する研究 (第一報: 2 リンクマルチボディによるモデル化)”, シンポジウム: スポーツ・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集, Vol. 53, No. 10(2010), pp. 325-328
- (14) 大屋敷由香, 富永潤, 大倉健, 弘元修司, “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)”, シンポジウム: スポーツ・ヒューマン・ダイナミクス講演論文集, Vol. 39, No. 12(2012), pp. 287-292
- (15) M. Ueda, H. Negoro, Y. Kurihara, K. Watanabe, “Measurement of Angular Motion in Golf Swing by a Local Sensor at the Grip End of a Golf Club”, IEEE Transactions on Human-Machine

Systems, Vol. 43, No. 4(2013), pp.298-404

- (16) 君塚渉, 大貫正秀, “カメラ1台によるゴルフクラブヘッドの3次元姿勢計測:ヘッド設計値に対するインパクト時の姿勢を計測する方法(映像分析, 推定, 構造)”, 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(USB), Vol.21, No.15(2015)
- (17) 太田憲, 仰木裕嗣, 渋谷和宏, “二重振子モデルによるゴルフスイングの数理解析”, シンポジウム:スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス2011講演論文集, Vol. 17, No.11(2011), pp.447-452
- (18) 太田憲, 仰木裕嗣, 渋谷和宏, “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”, シンポジウム:スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス2012講演論文集, Vol. 39, No.12(2012), pp.293-298
- (19) 井上喜雄, 劉涛, 芝田京子, 園部元康, ゴルフスイングにおけるリストターンの動力学解析(モード解析によるメカニズム検討), 日本機械学会論文集, Vol. 851, No. 83(2017), p.17
- (20) 小池関也, “シャフトの変形を考慮したゴルフスイングの動力学的分析手法の定式化”, Dynamics and Design Conference 2012 USB 論文集, Vol.12, No.12(2012)
- (21) 君塚渉, 大貫正秀, 井上喜雄, “ゴルフクラブの振り易さの指標に関する研究”, シンポジウム:スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2017講演論文集(USB), Vol.43, No.17(2017)
- (22) 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.834, No.82(2016), p.15-00294
- (23) 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:スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2015講演論文集(USB), Vol.21, No.21(2021)
- (24) 永岡修一, “科学が明かすゴルフ上達のメカニズム”, 永岡書店(2014), pp. 152-159
- (25) 大貫正秀, 白井良明, 島田伸敬, 植田勝彦, “ゴルフスイング自動診断システムの開発”, シンポジウム:スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス2010講演論文集, Vol.53, No. 10(2010), pp. 333-337
- (26) K. Philip, H. Aoife, M. Kieran and N. E. O'Connor, “A Virtual Coaching Environment for Improving Golf Swing Technique”, SMVC'10 (2020), pp.51-56
- (27) Z. Cao, T. Simon, S. Wei, Y. Sheikh, “Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields”, 2017 10th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics(2017)
- (28) 池上洋介, 櫻井彬光, 山田文香, 古賀大貴, 中村仁彦, “ビデオモーションキャプチャによるゴルフスイング動作の計測と解析”, シンポジウム:スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス2019講演論文集(USB), Vol. 306, No.19(2019)

- (29) 松本賢太, 辻内伸好, 伊藤彰人, 大島裕子, 植田勝彦, 岡崎弘祐, “クラブ設計を目的とした特異値分解によるゴルフスイングの動作分析”, 日本設計工学会, Vol.6 No. 53(2018), pp. 447-462
- (30) 柴田翔平, 島名孝次, 角淳之介, 蔭山雅洋, 藤井雅文, 鈴木智晴, “動力学シナジーに基づく野球・投球動作における上肢によるボール回転数制御メカニズムの検討”, シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2021 講演論文集, Vol. 15 No. 21(2021)
- (31) S. M. Lephart, J. M. Smoliga, J. B. Myers, T. C. Sell and Y. Tsai, “An eight-week golf-specific exercise program improves physical characteristics, swing mechanics, and golf performance in recreational golfers”, *Journal of Strength and Conditioning Research*, Vol.21, No.3(2007), pp.860-869
- (32) M. H. Olivier, S. A. Horan, K. A. Evans, J. W. Keogh, “The effect of a seven-week exercise program on golf swing performance and musculoskeletal measures”, *International Journal of Sports Science & Coaching*, Vol. 11, No.4(2016), pp.610-618
- (33) K. Matsumoto, N. Tsujiuti, A. Ito, H. Kobayashi, M. Ueda, K. Okazaki, “Analysis of Golf Swings Varying Skill Level Using Singular Value Decomposition”, *ISEA 2022 – The Engineering of Sport 14*(2022)
- (34) 岡崎弘祐, 辻内伸好, 伊藤彰人, 杉本翔, 植田勝彦, 中村佑斗, “スイング中のトルクの振動解析結果と力学モデルによるスイング推定手法の開発”, *Dynamics and Design Conference 2020 講演論文集*, Vol. 11, No. 20(2020)
- (35) 小泉孝之, 辻内伸好, 岡崎弘祐, 植田勝彦, 植田尚良, “スポーツ打具使用時の動作解析に関する研究”, シンポジウム: スポーツ・アンド・ヒューマン・ダイナミクス 2010 講演論文集, Vol. 53, No.10(2010), pp. 72-76
- (36) 岡崎弘祐, 辻内伸好, 伊藤彰人, 杉本翔, 植田勝彦, 中村佑斗, “スイングによる調子が異なるシャフトでの変形挙動の差の分類”, シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2020 講演論文集, Vol. 15, No. 20(2020)
- (37) A. C. Severin, S. G. Barnes, S. A. Tackett, C. L. Barnes and E. M. Mannen, “The required number of trials for biomechanical analysis of a golf swing”, *Sports Biomechanics*, Vol.20, No.2(2021), pp. 238-246
- (38) 矢田部学, “クォータニオン便利計算ノート”, *MSS 技報*, Vol. 18(2007)
- (39) 宍戸幹夫, “MATLAB によるクォータニオン数値計算”, *MSS 技報*, Vol. 19(2008)
- (40) 岩壺卓三, 松久寛, 井上喜雄, 宇津野秀夫, 河村庄造, 神吉博, 小泉孝之, 塩幡宏規, 辻内伸好, 中川紀壽, “振動工学の基礎”, 森北出版(2008), pp.130-134
- (41) 小松敬治, “機械構造振動学 MATLAB による有限要素法と応答解析”, 森北出版(2009), pp.38-39
- (42) K. Matsumoto, N. Tsujiuchi, T. Koizumi, A. Ito, M. Ueda and K. Okazaki, “Dynamic analysis

- for golf swing using of mode synthetics method for suggesting an optimal club”, In Proceedings of the 2nd International Congress on Sports Sciences Research and Technology Support, pp. 27-33
- (43) 松本賢太, 辻内伸好, 小泉孝之, 伊藤彰人, 植田勝彦, 岡崎弘祐, “ゴルフアーの把持を考慮した有限要素モデルによるゴルフスイング挙動解析”, 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 講演論文集 (USB), Vol. 40, No.14(2014)
- (44) 松本賢太, 辻内伸好, 小泉孝之, 伊藤彰人, 植田勝彦, 岡崎弘祐, “ゴルフアーの運動特性を考慮したゴルフクラブの力学解析”, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2015 講演論文集, No.15(2015)
- (45) K. Matsumoto, N. Tsujiuchi, T. Koizumi, A. Ito, M. Ueda and K. Okazaki, “Analysis of shaft movement using FEM model considering inertia effect of club head”, Procedia Engineering, VoL.112(2015), pp. 10-15
- (46) 松本賢太, 辻内伸好, 小泉孝之, 伊藤彰人, 植田勝彦, 岡崎弘祐, “クラブヘッドの慣性がシャフト挙動に及ぼす影響”, シンポジウム : スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2015 講演論文集 (USB), Vol.21, No.15(2015)
- (47) K. Matsumoto, N. Tsujiuchi, T. Koizumi, A. Ito, M. Ueda and K. Okazaki, “Influence of a Golf Club’s Inertia on Shaft Movement During the Golfer’s Swing”, Procedia Engineering, VoL.147(2016), pp. 360-365
- (48) K. Matsumoto, N. Tsujiuchi, A. Ito, M. Ueda, K. Okazaki, T. Seita, “Effect of inertia for shaft movement by a golf swing”, ACMD2016, (2016)
- (49) 松本賢太, 辻内伸好, 伊藤彰人, 清田大貴, 植田勝彦, 岡崎弘祐, “3次元 FEM モデルによるゴルフスイング時のクラブヘッドの姿勢推定”, シンポジウム : スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2016 講演論文集 (USB), Vol. 40, No.16 (2016)
- (50) 古川和樹, 辻内伸好, 伊藤彰人, 松本賢太, 植田勝彦, 岡崎弘祐, “グリップ並進加速度により生じるヘッド重心の運動を考慮したヘッドの姿勢推定”, シンポジウム : スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2017 講演論文集 (USB), Vol. 43, No.17(2017)
- (51) 岡崎弘祐, 辻内伸好, 伊藤彰人, 伊藤康介, 植田勝彦, “キックポイントが異なるシャフトのスイング中における変形挙動の差の抽出”, シンポジウム : スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2021 講演論文集, Vol.15, No.21(2021)
- (52) S. M. Nesbit and R. McGinnis, “Kinematic analyses of the golf swing hub path and its role in golfer/club kinetic transfers”, Journal of Sports Science and Machine, No.8(2009), pp.235-246
- (53) 伊藤幸司, 佐藤文宣, 金子靖仙, 島名孝次, “バットの慣性特性がバットスイングに及ぼす影響”, シンポジウム : スポーツ工学シンポジウム講演論文集, Vol.22, No.01(2001), pp. 49-53
- (54) F.Policastro. M. Prenassi, S. Marceglia, “Knee kinematic during the golf swing: a cross-sectional analysis between groups of different handicap”, Journal of Physical Education and Sport, Vol, 1,

No.22(2022) pp. 250-255

- (55) 馬杉正男, “信号解析 信号処理とデータ分析の基礎”, 森北出版株式会社(2019), pp.56-64
- (56) 山田道夫, 萬代武史, 芦野隆一, “応用のためのウェーブレット”, 共立出版株式会社(2016), pp.34-38
- (57) 馬杉正男, “信号解析 信号処理とデータ分析の基礎”, 森北出版株式会社(2019), pp.82-86
- (58) 伊藤康介, 辻内伸好, 伊藤彰人, 植田勝彦, 岡崎弘祐, “統計的手法を用いたシャフト質量変化がスイング挙動へ与える影響の評価”, シンポジウム：スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2021 講演論文集, Vol.31, No.22(2022)
- (59) 岡崎弘祐, 辻内伸好, 伊藤彰人, 伊藤康介, 植田勝彦, 中村佑斗, “ゴルフクラブ特性がスイング中の発揮トルクのスペクトル変動に与える影響について”, Dynamics and Design Conference 2021 講演論文集, Vol. 23, No. 21(2021)
- (60) K. Okazaki, N. Tsujiuchi, A. Ito, M. Ueda, Y. Nakamura, “Study on fluctuation in the spectrums of torque data during golf swing due to the mass difference of golf club shafts”, The 19th Asia Pacific Vibration Conference (2022)
- (61) DUNLOP GOLFING WORLD ホームページ, “クラブフィッティング”, <https://sports.dunlop.co.jp/golf/service/clubfitting/fif.html> (2022年8月2日参照)
- (62) K. Okazaki, N. Tsujiuchi, A. Ito, K. Ito, M. Ueda, “EXTRACTION OF DIFFERENCES IN DEFORMATION BEHAVIOR OF SHAFTS WITH DIFFERENT KICK POINTS”, ISEA 2022 – The Engineering of Sport 14(2022)
- (63) S. J. MacKenzie and D. E. Boucher, “The influence of golf shaft stiffness on grip and clubhead kinematics”, Journal of Sports Sciences, Vol. 35, No.2(2017), pp.105-111.
- (64) K. M. Jones, N. F. Betzler, E. S. Wallace and S. R. Otto, “Differences in shaft strain patterns during golf drives due to stiffness and swing effects”, Sports Engineering Vol.22 No.14(2019)
- (65) A. Morrison, D. McGrath, E. Wallace, “Changes in Club Head Trajectory and Planarity Throughout the Golf Swing”, Procedia Engineering Vol.72 (2014), pp.144-149
- (66) S. C. Olhede and A. T. Walden, “Generalized Morse wavelets”, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 50, No. 7(2002), pp. 2661-2670
- (67) Betzler, N. F., Monk, S. A., Wallace, E. S., and Otto, S. R., Effects of Golf Shaft Stiffness on Strain, Clubhead Presentation and Wrist Kinematics, Sports Biomechanics, Vol. 11, No. 2 (2012), pp. 223-238
- (68) ダンロップゴルフスクール ホームページ, “3.ダンロップゴルフエクササイズ”, <https://sports.dunlop.co.jp/golfschool/service/element.html> (2022年8月23日参照)
- (69) 岡崎弘祐, 辻内伸好, 伊藤彰人, 伊藤康介, 植田勝彦, “シャフトの変形挙動に変化を与えるスイング中の動作の抽出に向けた取り組み”, シンポジウム：スポーツ工学・ヒ

ューマンダイナミクス 2022 講演論文集, Vol.31, No.22(2022)

- (70) 岡崎弘祐, 辻内伸好, 伊藤彰人, 伊藤康介, 植田勝彦, “ゴルフスイングに関連する基本動作の改善がスイング動作に与える影響の調査”, シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2022 講演論文集, Vol.31, No.22(2022)

謝辞

本論文は、同志社大学 機械力学研究室と住友ゴム工業株式会社で実施した共同研究の成果の一部となります。本共同研究に関わって頂いた全ての方に感謝致します。

同志社大学 機械力学研究室 教授 辻内 伸好先生には博士課程後期課程への入学のきっかけを頂いただけでなく、振動分野に関する深い知見に基づいたアドバイスに加え、論文の書き方の基本についてご指導頂きました。研究課題に対して、学術的なアプローチの重要性に気付く事ができ、博士課程での3年間は今後の研究者としてとても大切な経験になり、引き続き学術的な観点をもって研究を進めたいと考えています。ここに深甚なる感謝の意を表します。

同志社大学 機械力学研究室 教授 伊藤 彰人先生には力学における深い知見に基づいたアドバイスに加え、学術論文について不足している点や曖昧な表現へ関するご指導を多数頂きました。入学当時は論文の書き方がわからずに苦勞致しましたが、継続したご指導をいただくことで博士論文を執筆することができました。ここに深甚なる感謝の意を表します。

同志社大学 生産システムデザイン研究室 教授 青山 栄一先生には本論文の審査に加え、プレーヤのゴルフクラブ制御という観点で非常に参考になるご指摘を頂きました。ご助言、ご指摘をいただくことで博士論文を完成させることができました。ここに深甚なる感謝の意を表します。

同志社大学 機械力学研究室 講師 大島 裕子先生には本論文における統計処理についてご指導頂き、解析を補助頂きました。統計処理に関して、少しではありますが自分でも理解ができ、必要な処理方法を選択できるようになりました。ここに厚く感謝の意を表します。

東京理科大学 助教 松本 賢太先生には、同志社大学の時より解析モデルや新たな技術構築に多数のご協力を頂きました。また、博士後期課程の先輩として様々な助言を頂きました。博士後期課程に入学し、色々とわからないことばかりでしたが、細かな相談に対して多数のご助言を頂き、心強く非常に助かりました。ここに厚く御礼申し上げます。

研究室の大先輩であり、職場での上司にあたる住友ゴム工業株式会社 研究開発本部 研究第二部 植田 勝彦氏には、研究者としての多大なるご助言に加え、私が研究を行える環境を整えて頂きました。社会人として博士課程後期に進む上で、社内で後押しを下された

方であり、時には私の頑固な意見についても納得いくまで議論して頂きました。氏のサポートが無ければ業務を行いながら博士課程の研究を行うことができなかつたと思います。今後、得られた成果を技術者としてアウトプットしていくことで還元していきます。ここに厚く御礼申し上げます。

住友ゴム工業株式会社 研究開発本部 研究第二部 中村 佑斗氏, 南家 健太氏, 永野 祐樹氏には, 新たな解析ロジック構築時の議論や解析プログラムの作成補助, 延べ十数回, 計 300 名を超える様々なゴルフスイング計測実験に協力頂きました。また, 時には同僚としてお酒を交えながらフィッティングの目標やあるべき姿など深い話に付き合い頂き, 3 年間の活動の支えとすることができました。とても頼りになるメンバーであり, 皆の協力無しには本研究を実施できなかつたと感じています。ここに深く感謝いたします。

住友ゴム工業株式会社 研究開発本部 研究第二部 平 和樹氏 (2021 年 12 月逝去) には, 第 7 章を実施するにあたり, 事前検討として複雑で解釈が困難なデータ解析を補助頂きました。解析した結果から気付きを得ることで, 第 7 章を構築することができました。ここに深く感謝いたします。

ダンロップスポーツマーケティング株式会社 クラブドクターの皆様には, 販売現場の現状について右も左もわからない新人時代より, フィッティングの基本的な考え方や, お客様が求める内容について丁寧にご助言, 議論頂きました。技術者目線無く, プレーヤやお客様目線での議論は新鮮で, 第 4 章~第 6 章で研究を行う上での新たな気付きを多数いただきました。ここに深く感謝いたします。

ダンロップゴルフスクールのインストラクタである, 三野 博隆氏には, 7 章を執筆する上でのデータ提供や, スイングエクササイズに関するご指導や, 各エクササイズが持つ意味の説明, また, 得られた解析結果に関するご助言を頂きました。ここに深く感謝いたします。

共にデータ解析や研究活動を行ってきた, 本学大学院博士課程前記修了生, 杉本翔氏, ならびに本学大学院生 伊藤康介氏, 本学学生 石川 周氏に深く感謝致します。なかなか難しいテーマにも関わらず, 様々は観点から解析頂きました。得られた結果について深い議論を行うことで, 私自身研究を通じてとても勉強になりました。今後のさらなる活躍をお祈りいたします。

また, 本学機械力学研究室に在籍する修士および学部生諸氏, ならびに先輩諸氏には, 多大なるご支援に対し深く感謝いたします。今後のさらなる活躍をお祈りいたします。

最後に、妻・子供に感謝いたします。COVID-19 蔓延下において入学し、毎日一人で部屋にこもり、時間があれば休日も関係なく研究という生活をする上で、肉体だけでなく精神的にとっても辛い時期もありましたが、妻の支えのおかげで研究活動が続けることができました。また、意味がわからないながらも「博士」という言葉に目を輝かせ、すごいと言ってくれた子供の言葉で諦めずに継続できました。入学してからの家族の支えにとっても感謝しています。今後は、研究に割いていた時間を家族のためにたくさん使いたいと思います。

2022年11月18日

岡崎 弘祐