

2024年度 3月修了 修士論文

テニスにおける打球方向の欺きを意図したストロークの
キネマティクス分析

早稲田大学 大学院スポーツ科学研究科
スポーツ科学専攻 身体運動科学研究領域

5023A066-7

森下 兵悟

研究指導教員： 矢内 利政 教授

目次

1. 緒言	1
2. 方法	4
2.1 対象者	4
2.2 実験試技	4
2.3 データ収集	5
2.4 身体部位の座標系	6
2.5 分析変数	8
2.6 局面定義	11
2.7 統計分析	11
2.8 アンケート調査	12
3. 結果	14
3.1 アンケート調査	14
3.2 関節角度および回転角度	20
3.3 ラケット保持腕位置および非ラケット保持腕位置	23
4. 考察	26
4.1 アンケート調査	26
4.2 対象者全体の傾向 -CC と DL の打ち分け-	27
4.3 対象者全体の傾向 -欺きを意図したストローク-	28
4.4 個人差	28
4.5 総論	33
5. 結論	35
参考文献	36
謝辞	38
付録	39

1. 緒言

エリートレベルのテニスの試合では、打球速度が速いため(Landlingerら, 2012), 選手はわずかな時間で意思決定や動作を行わなければならない。このような時間的制約を軽減するため、熟練者は打球方向を予測している。Shim(2005)は、テニスの熟練者は初心者に比べ、対戦相手のストローク動作から打球方向を予測する能力が高いことを報告している。

熟練者は、対戦相手の動作を観察し、打球方向によって動作特徴の異なる部位に注目することで、予測を行っていると考えられる。Jacksonら(2007)は、身体の一部を隠したビデオクリップの映像から予測させる方法(spatial-occlusion method)を用いて、熟練者が打球方向の予測に使用する部位を調べた。その結果、熟練者は初心者よりも高い予測精度を示したが、ラケット、腕、ボールが見えない場合の予測精度に有意差はなかった。これらの結果から、遠位部位の運動学的情報が打球方向を予測するための重要な手がかりであると結論づけた。道上ら(2002)やLandlingerら(2010)は、フォアハンドストロークについて、クロスコート(対角方向)へ打つ際にはダウンザライン(正面方向)に打つ際に比べて、インパクト時に、グリップエンドに対するラケットヘッドの位置がより前方に位置すること(前方回転位)を報告している。インパクト時のラケット角度は、打球方向を決定する直接的要因の1つである。そのためインパクト時付近で、ラケットや腕といった遠位部位に注目することは、打球方向を予測する上で有効な戦略だと考えられる。

一方でFukuharaら(2017)は、近位部位の情報を用いるほうが遠位部位の情報を用いるよりも、はるかに早く打球方向を予測できると述べている。CGモデルを用いて身体グラフィック情報を操作した研究では、近位部位の情報が豊かなモデルを用いた時ほど、熟練者は正確

な予測を行うことが示された(Fukuharaら, 2007). クロスコートに打つ際とダウンザラインに打つ際の動作について, Landlingerら(2010)は, 腰回旋角度や体幹部捻転角度の最大角変位に違いがあることを報告している. また道上ら(2002)は, フォワードスイング局面の全区間で肩甲帯回旋角度に違いがあることを報告している. 腰および肩甲帯の回旋角度と捻転角度を図1に示す. このような近位部位の動作の差異に注目することで, より早い段階で打球方向を予測することができると考えられる.

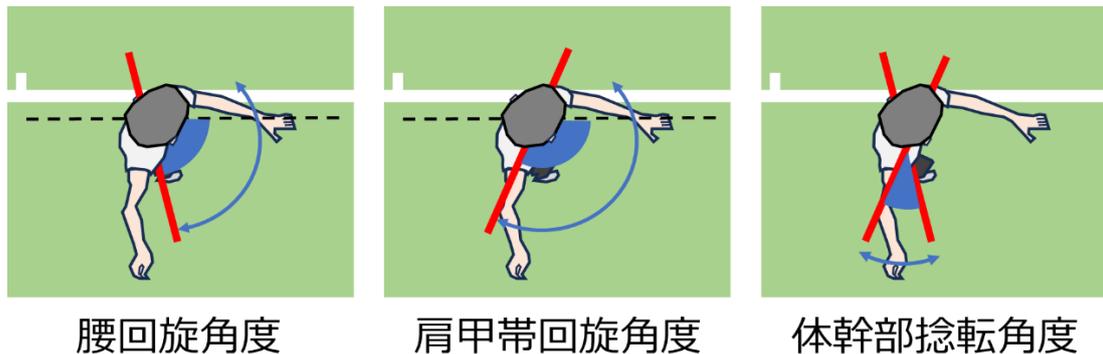


図1.腰および肩甲帯の回旋角度と捻転角度

一方でストロークを行う場合には, 実際の打球方向とは逆の方向(欺き方向)に打つ際の動作を模倣することで, 対戦相手に誤った予測をさせることができると考えられる. Dimicら(2023)は, テニスのストロークにおいて, *"hitters know that by mimicking a genuine movement, and changing their dynamics during execution, they can disguise shots and trigger an incorrect anticipatory movement by the opponent"*と述べている. 例えばクロスコートに打つと見せかけてダウンザラインに打つ場合, 途中までクロスコートへ打つ際の動作を模倣し, インパクト直前に動作を変更してダウンザラインに打つことで, 相手に誤った予測をさせることができると著者は考えたものと推察される. この考えに基づき Dimic

は映像分析を行い、選手の位置関係と、バックスイング時の肩や腰、足の向きから”Initial Stroke Intention (ISI)”を定義し、”ISI”と実際の打球方向が異なるストロークを”Disguised Stroke”と定義した。その結果、”Disguised Stroke”が相手の予測を乱し、自身に有利な状況を作り出すことを示した。しかしこの研究は、著者が目視による試合映像分析に基づいて欺きの有無を判定したものであり、選手に欺きの意図があったかどうかについては判定できない。また欺きを意図したストロークの身体キネマティクスや、打球への影響について調べられた研究は見当たらない。熟練者の欺きを意図したストロークの動作特徴を明らかにすることは、テニス指導の現場に重要な情報をもたらすと考えられる。本研究では打球方向の欺きを意図したストローク動作を解析し、身体の運動学的特徴を明らかにすることを目的とする。本研究では、欺きを意図したストロークでは、欺き方向の動作を模倣するという仮説を立て、実験的手法を用いて検証した。

2. 方法

2.1 対象者

対象者は男性のテニス熟練者 9 名(身長 176.1 ± 4.1 cm, 体重 66.2 ± 6.8 , 年齢 20.4 ± 2.3 , 競技歴 12.4 ± 2.1)で, このうち右利き 8 名, 左利き 1 名であった. 彼らは 9 年以上競技に取り組んでおり, 関東大会出場から全国大会優勝レベルの選手であった.

各対象者には, 実験の目的, 意義, 方法, リスク等について説明し, 同意書に署名してもらった. 実験実施に際して, 早稲田大学の人を対象とする研究に関する倫理委員会の承認を得た(承認番号 2023-488). 対象者は日頃使用しているテニスラケット, シューズ, テニスウェアを使用して実験に参加した.

2.2 実験試技

対象者には十分なウォーミングアップを行わせた後, テニスコートにてフォアハンドストロークを行わせた. 球出しはボールマシーンを用いて, 相手コートのセンターマーク上から対象者の利き腕方向に向けて, 硬式テニスボールを発射した. ボール速度は, 各対象者が普段の試合と同等と判断した速度とした. 対象者には, ボールが発射されたタイミングでセンターマークから利き腕方向に移動し, オープンスタンスでボールを打ち返すよう指示した. この際相手側のシングルスコートの両端から縦横 1m ずつ内側の地点に設置された的を狙わせた.

実験試技は, 1.ダウンザラインへの打球(down the line, 以下「DL」と略す), 2.クロスコートに打つと見せかけたダウンザラインへの打球(disguised down the line, 以下「DDL」と略す), 3.クロスコートへの打球(cross court, 以下「CC」と略す), 4.ダウンザラインに打つと見せか

けたクロスコートへの打球(disguised cross court, 以下「DCC」と略す), の4条件で行わせた. 打球がネットを超え, コート中央を基準に指定した方向へバウンドしたものを成功試技とした. 各対象者について, 成功試技を各条件3試技得られるまで実験を行った. 試技の順序は条件1, 条件2, 条件3, 条件4の順で, 各条件3つの成功試技が得られた後に次の条件を行わせた.

2.3 データ収集

対象者にはウォーミングアップの後, 慣性センサの埋め込まれた専用スーツ(e-skin MEVA, Xenoma社製, 以下「MEVA」と略す)をテニスウェアの上から着用させ, 実験試技を行わせた. ストローク時の動作を100Hzで記録した.

MEVAのグローバル座標系は, ポーズキャリブレーションを行った時点か, アプリケーション上の「Res」ボタンを押した時点での身体の位置や向きにより定義される. 各試技を行う前に, 対象者の肩と腰の左右を結ぶラインがベースラインと平行になるように直立させ, 「Res」ボタンを押した. この際MEVAで定義されるx軸をネット方向, y軸をベースライン左方向とした. 座標変換をほどこすことで, ベースライン右方向をx軸, ネット方向をy軸, 鉛直上方向をz軸となるようにした. また, 分析にはMEVAで算出されたセグメント位置を使用した. 本研究で用いたセグメント位置を表1に示す. インパクト時刻の定義には, 利き手に位置するセンサの加速度データを用いた.

表 1. 標認点の略称一覧表

日本語名称	MEVA での定義・略称
左耳珠点	Left Lateral Head Center (LHLC)
右耳珠点	Right Lateral Head Center (RHLC)
第 2 胸椎	Second Thoracic vertebrae (T2)
第 10 胸椎	Midpoint between left and right scapular apex, near the T10 vertebrae (MAI)
胸骨下端	Xiphoid Process of the sternum. Most inferior region of the sternum (PX)
右上腕骨頭	Right Humerus Greater Tubercle (RHGT)
右上腕骨内側上顆	Right Humerus Medial Epicondyle (RHME)
右上腕骨外側上顆	Right Humerus Lateral Epicondyle (RHLE)
右尺骨茎状突起	Right Ulna Styloid Process (RUSP)
右橈骨茎状突起	Right Radius Styloid Process (RRSP)
右手中心	Right Hand geometric center (Right Hand Center)
左上腕骨内側上顆	Left Humerus Medial Epicondyle (LHME)
左上腕骨外側上顆	Left Humerus Lateral Epicondyle (LHLE)

2.4 身体部位の座標系

本研究では、胸郭、上腕、前腕、手部の各セグメントに、各軸が規格・直交化された右手系の移動座標系を設定した。このとき、静止座標系と移動座標系の相対的な姿勢関係を表わすために、移動座標系を回転行列で表現した。

胸郭については、第 10 胸椎を原点、第 10 胸椎から第 2 胸椎に向かう

単位ベクトルを Y_t とし, 第 10 胸椎から胸骨下端に向かう単位ベクトルを X'_t とした. そして X'_t と Y_t との外積によって得られる方向の単位ベクトルを Z_t とし, Y_t と Z_t との外積によって得られる単位ベクトルを X_t とした. そして, X_t , Y_t , Z_t を軸とする座標系を胸郭座標系と定義した.

上腕については, 右上腕骨外側上顆と右上腕骨内側上顆の midpoint を原点, 右上腕骨外側上顆と右上腕骨内側上顆の midpoint から右上腕骨頭に向かう単位ベクトルを Y_u とし, 右上腕骨内側上顆から右上腕骨外側上顆に向かう単位ベクトルを Z'_u とした. そして Y_u と Z'_u との外積によって得られる方向の単位ベクトルを X_u とし, X_u と Y_u との外積によって得られる単位ベクトルを Z_u とした. そして, X_u , Y_u , Z_u を軸とする座標系を上腕座標系と定義した.

前腕については, 右橈骨茎状突起を原点, 右橈骨茎状突起から右上腕骨外側上顆と右上腕骨内側上顆の midpoint に向かう単位ベクトルを Y_f とし, 右尺骨茎状突起から右橈骨茎状突起に向かう単位ベクトルを Z'_f とした. そして Y_f と Z'_f との外積によって得られる方向の単位ベクトルを X_f とし, X_f と Y_f との外積によって得られる単位ベクトルを Z_f とした. そして, X_f , Y_f , Z_f を軸とする座標系を前腕座標系と定義した.

手部については, 右手中心を原点, 右手中心から右橈骨茎状突起と右尺骨茎状突起の midpoint に向かう単位ベクトルを Y_h とし, 右尺骨茎状突起から右橈骨茎状突起に向かう単位ベクトルを Z'_h とした. そして Y_h と Z'_h との外積によって得られる方向の単位ベクトルを X_h とし, X_h と Y_h との外積によって得られる単位ベクトルを Z_h とした. そして, X_h , Y_h , Z_h を軸とする座標系を手部座標系と定義した.

2.5 分析変数

分析変数は肩関節水平内転角度，肩関節挙上角度，肩関節内旋角度，肘関節屈曲角度，肘関節回内角度，手関節掌屈角度，手関節尺屈角度，胸郭水平回転角度，頭部水平回転角度，ラケット保持腕位置，非ラケット保持腕位置とした(図 2)．算出方法を以下に示す．

胸郭座標系に対する上腕座標系の相対的方位をオイラー角に変換し，これを肩関節角度とした．胸郭座標系と上腕座標系が一致する姿勢を基準姿勢とし， Y_u 軸 $\rightarrow X_u$ 軸 $\rightarrow Y_u$ 軸の回転順序でオイラー角を算出した．第 1 角を肩関節水平内転角度(+：水平内転，-：水平外転)，第 2 角の符号を反転させたものを肩関節挙上角度(+：挙上)，第 3 角を肩関節内旋角度(+：内旋，-：外旋)とした．

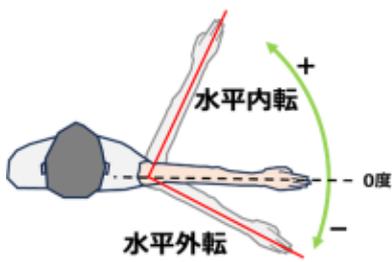
上腕座標系に対する前腕座標系の相対的方位をオイラー角に変換し，これを肘関節角度とした．上腕座標系と前腕座標系が一致する姿勢を基準姿勢とし， Z_f 軸 $\rightarrow X_f$ 軸 $\rightarrow Y_f$ 軸の回転順序でオイラー角を算出した．第 1 角を肘関節屈曲角度(+：屈曲，-：伸展)，第 3 角を肘関節回内角度(+：回内，-：回外)とした．本研究では肘関節を 2 軸性関節としてモデリングした．そのため第 2 角については記載しない．

前腕座標系に対する手部座標系の相対的方位をオイラー角に変換し，これを手関節角度とした．前腕座標系と手部座標系が一致する姿勢を基準姿勢とし， Z_h 軸 $\rightarrow X_h$ 軸 $\rightarrow Y_h$ 軸の回転順序でオイラー角を算出した．第 1 角を手関節掌屈角度(+：掌屈，-：背屈)，第 2 角を手関節尺屈角度(+：尺屈，-：撓屈)とした．手関節は 2 軸性関節であるため，第 3 角については記載しない．

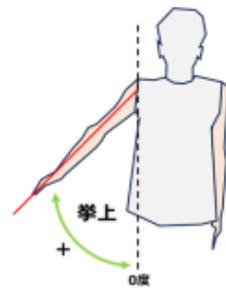
胸郭座標系 Z_t 軸を静止座標系 xy 平面に投影したベクトルと， x 軸とのなす角度を胸郭水平回転角度とした．これは先行研究における肩甲帯

回旋角度に対応する．左耳珠点から右耳珠点へ向かうベクトルを静止座標系 xy 平面に投影したベクトルと， x 軸とのなす角度を頭部水平回転角度とした．

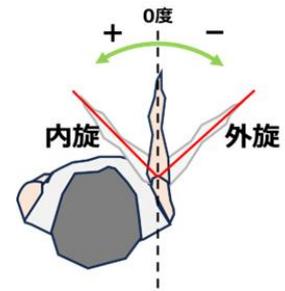
胸郭(第 10 胸椎と胸骨下端の midpoint)を基準とした右肘(右上腕骨外側上顆と右上腕骨内側上顆の midpoint)の位置をラケット保持腕位置とした．胸郭を基準とした左肘(左上腕骨外側上顆と左上腕骨内側上顆の midpoint)の位置を非ラケット保持腕位置とした．



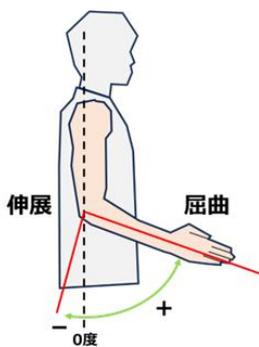
肩関節水平内転角度



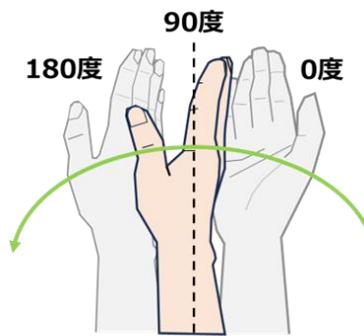
肩関節挙上角度



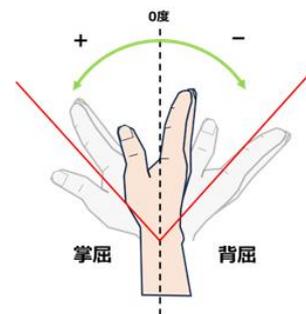
肩関節内旋角度



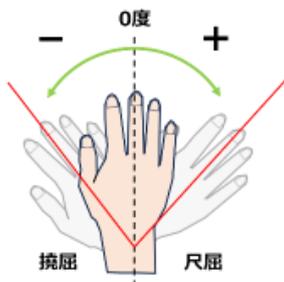
肘関節屈曲角度



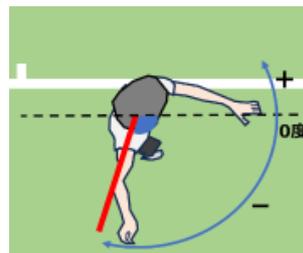
肘関節回内角度



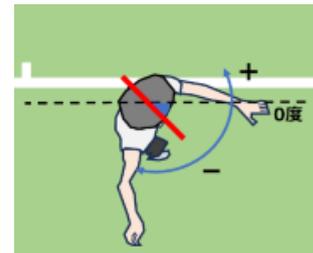
手関節掌屈角度



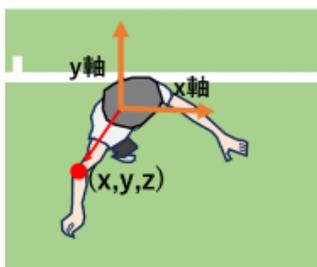
手関節尺屈角度



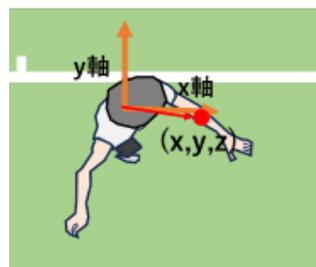
胸郭水平回転角度



頭部水平回転角度



ラケット保持腕位



非ラケット保持腕位置

図 2.分析変数

2.6 局面定義

各関節角度およびアライメント角度は、4つの局面に分けて条件比較をした。局面分けを行うにあたり、インパクト時、右手最後方時、肩最大挙上時の3時点を定義した。本研究ではインパクトによる衝撃の影響で、利き手に位置するセンサに大きな加速度が記録された。そのため、利き手に位置するセンサの合成加速度が最大値を取ったフレームの1フレーム前をインパクト時として定義した。右手最後方時は、第10胸椎に対する右手中心の位置が、グローバル座標系において最も後方に位置した時点とした。肩最大挙上時は、右手最後方時以前で肩挙上角度がピーク値を取った時点とした。

肩最大挙上時の0.2秒前から肩最大挙上時までを「準備局面(0-20%)」、肩最大挙上時から右手最後方時までを「バックスイング局面(20-50%)」、右手最後方時からインパクト時までを「フォワードスイング局面(50-80%)」、インパクト時からインパクト時の0.2秒後までを「フォロースルー局面(80-100%)」とした。局面の時間比率は、各局面の所要時間の平均値に基づき決定した。肘関節角度および手関節角度は、インパクト時の衝撃による影響で大きな計測誤差を含んでいたため、分析区間を0-80%とした。

2.7 統計分析

各対象者の各条件の代表値には、成功試技の平均値を用いた。各時点における各関節角度および胸郭と頭部の水平回転角度を条件間比較するため、Statistical Parametric Mapping (SPM)の反復測定一元配置分散分析を用いて検定を行った。ラケット保持腕位置はスイング開始時(ラケット保持腕が最も左に位置した時点)とインパクト時の2時点で、非ラ

ケット保持腕位置は前方回転開始時(胸郭から非ラケット保持腕へ向かうベクトルとx軸とのなす角度が最小になった時点)とインパクト時の2時点で、x軸、y軸、z軸それぞれの位置座標について、条件間の比較を行った。検定には反復測定一元配置分散分析およびTukey法による多重比較を用いた。有意水準を5%未満とした。

本研究では、統計分析により次の3つの条件を満たした場合、該当する変数およびその区間において動作を模倣したと判定した。「1.DLとCCに有意差があること」、「2.DDLとCCもしくはDCCとDLに有意差がないこと」、「3.DDLとDLもしくはDCCとCCに有意差があること」。条件1と条件2はもともとDLとCCの間に見られた動作特徴の差が、欺きを意図したことによって見られなくなるということの意味する。条件3は打球方向が同じであるにも関わらず、欺きを意図したことによって動作特徴が変化したことを意味する。

2.8 アンケート調査

欺きを意図したストロークの使用状況等について調査するため、対象者にアンケート調査を行った。調査項目はフォアハンドストロークにおける「1. DL/CCの得意不得意」、「2. DDL/DCCの使用頻度」、「3. DDL/DCCの得意不得意」、「4. 欺き局面」、「5. 欺き部位」の5つとした。アンケート用紙を付録に添付する。

1. DLおよびCCの得意不得意について調査した。質問は「サーブやボレー、他のストロークと比較して、ダウンザラインへのストロークは得意ですか?」とした。CCについても同様の質問をした。回答は「得意だ」、「やや得意だ」、「やや苦手だ」、「苦手だ」から1つ選択させた。

2. DDLおよびDCCの使用頻度について調査した。質問は「試合中、ク

ロスコートに打つと見せかけてダウンザラインに打球を放つ技術(以下”欺きダウンザライン”と呼びます)を用いますか?」とした。DCCについても同様の質問をした。回答は「頻繫に用いる」、「時々用いる」、「あまり用いない」、「全く用いない」から1つ選択させた。

3. DDLおよびDCCの得意不得意について調査した。質問は「欺きダウンザラインで相手を欺くことは得意ですか?」とした。DCCについても同様の質問をした。回答は「得意だ」、「やや得意だ」、「やや苦手だ」、「苦手だ」から1つ選択させた。

4. 欺きを行う際の局面について調査した。質問は「あなたの打撃動作を欺きダウンザラインと通常のダウンザラインで比較した場合、動作が大きく異なると思われる”局面”を教えてください。」とした。DCCについても同様の質問をした。回答は「動き始め(スプリットステップ)から軸足接地まで」、「軸足設置からテイクバック完了まで」、「テイクバック完了からインパクトまで」、「インパクトからフォロースルーまで」、から1つ以上選択させた。

5. 欺きを行う際の部位について調査した。質問は「選択した局面について、動作が大きく異なると思われる”部位”を教えてください。」とした。回答は「下半身の向きや動き」、「胴体の向きや動き」、「頭の向きや動き」、「肩関節角度」、「肘関節角度」、「手関節角度」、「ラケットの向き」、「その他」から1つ以上選択させた。

3.結果

3.1 アンケート調査

アンケート調査では，すべての質問について対象者全員から回答を得た．DLとCCの得意不得意の結果を図3に示す．DLおよびCCについては，半数以上が「得意だ」もしくは「やや得意だ」と回答した．CCはDLに比べて「得意だ」と回答する人数が多かった．

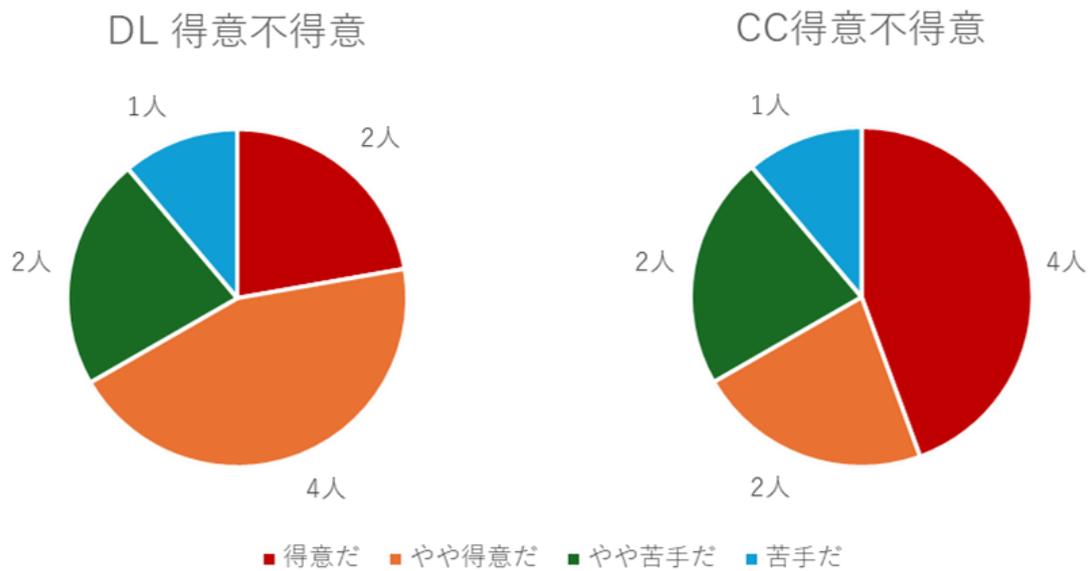


図 3.DL および CC の得意不得意

DDLとDCCの使用頻度，得意不得意の結果を図4，5に示す．DDLおよびDCCについては，半数以上が「時々用いる」と回答した．また，DDLは9人中6人が「やや苦手だ」と回答した一方で，DCCは7人が「得意だ」もしくは「やや得意だ」と回答した．

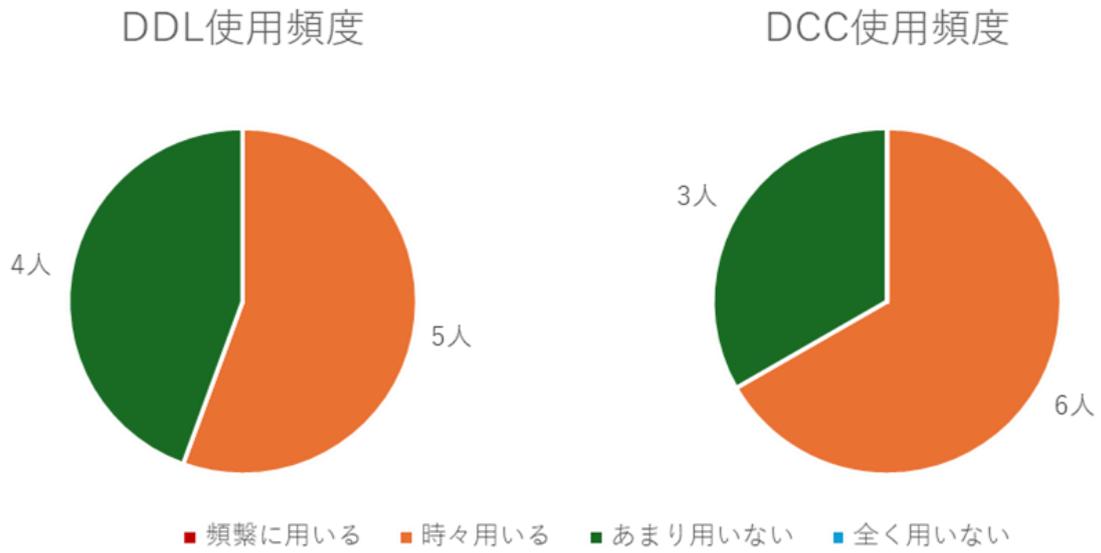


図 4.DDL および DCC の使用頻度

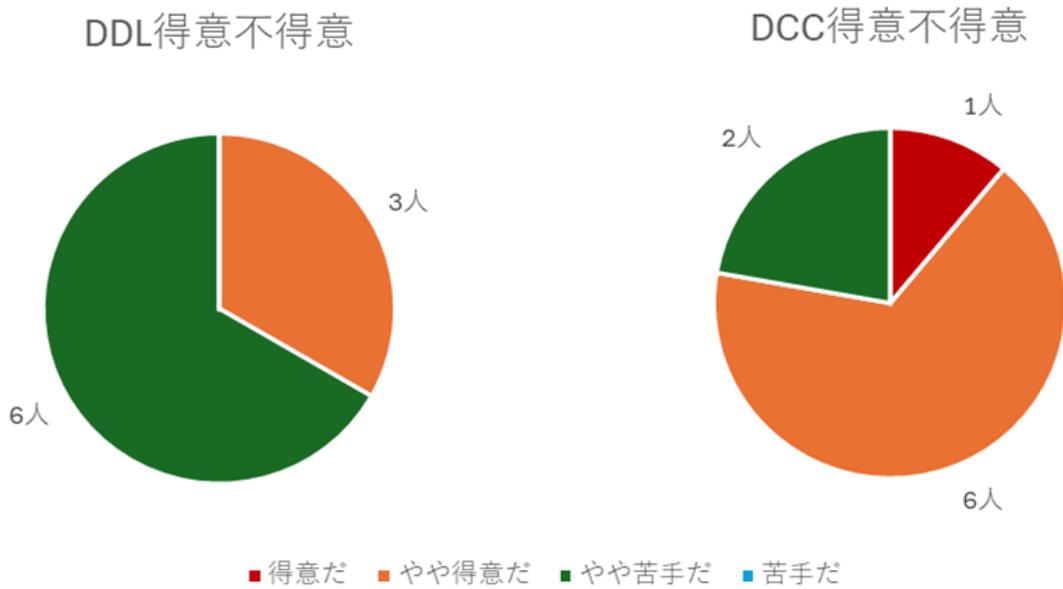


図 5.DDL および DCC の得意不得意

表 2 に各ショットの得意不得意および使用頻度について，各対象者のアンケート回答を示す．DL と CC のどちらとも「得意だ」と回答したの

は 1 人，どちらとも「苦手だと」回答したのは 1 人だった． DL と比べて CC の方がより得意な選択肢を回答したのは 4 人だった． 欺きを意図したストロークについては， 9 人中 8 人が DDL と DCC で同じ使用頻度を回答した． また， DDL と比べて DCC の方がより得意な選択肢を回答したのは 4 人だった．

表 2.各対象者のアンケート回答(得意不得意および使用頻度)

対象者	DL 得意不得意	CC 得意不得意	DDL 使用頻度	DCC 使用頻度	DDL 得意不得意	DCC 得意不得意
A	やや得意だ	得意だ	時々用いる	時々用いる	やや得意だ	やや得意だ
B	得意だ	やや得意だ	時々用いる	時々用いる	やや得意だ	やや得意だ
C	やや得意だ	得意だ	時々用いる	時々用いる	やや苦手だ	やや得意だ
D	苦手だ	苦手だ	あまり用いない	あまり用いない	やや苦手だ	やや苦手だ
E	やや得意だ	やや苦手だ	あまり用いない	あまり用いない	やや苦手だ	やや苦手だ
F	得意だ	得意だ	時々用いる	時々用いる	やや得意だ	やや得意だ
G	やや苦手だ	やや苦手だ	あまり用いない	時々用いる	やや苦手だ	得意だ
H	やや得意だ	得意だ	あまり用いない	あまり用いない	やや苦手だ	やや得意だ
I	やや苦手だ	やや得意だ	時々用いる	時々用いる	やや苦手だ	やや得意だ

DDL と DCC の欺き局面， 欺き部位の結果を図 6， 7 に示す． 欺きを行う際の局面については， DDL と DCC の両方で「軸足設置からテイクバック完了まで」が最も多かった． 欺きを行う際の部位については， DDL では「下半身の向きや動き」と「胴体の向きや動き」が最も多く， DCC では「胴体の向きや動き」が最も多かった． 表 3 に欺き局面および欺き部位について， 各対象者のアンケート回答を示す． 欺き局面と欺き部位の両方で， DDL と DCC の回答が一致した対象者は 4 人であった． 欺き局面に違いのある対象者は 4 人， 欺き部位に違いのある対象者は 4 人だった．

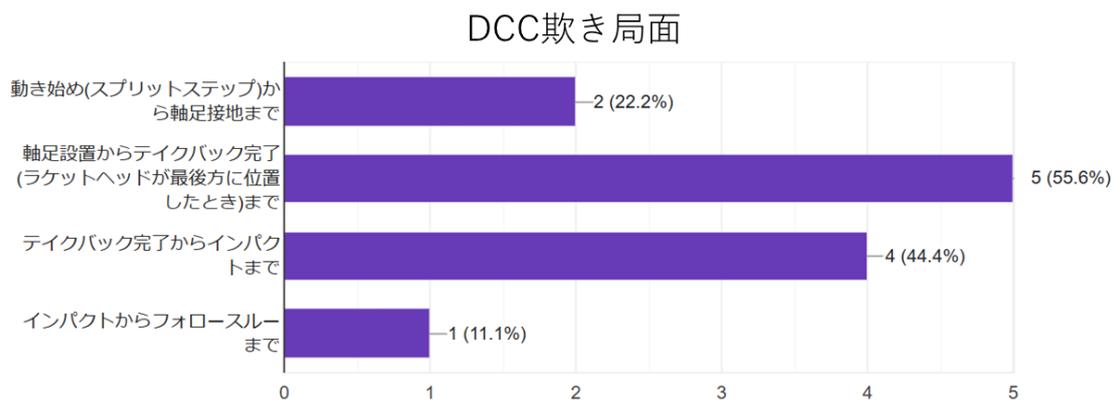
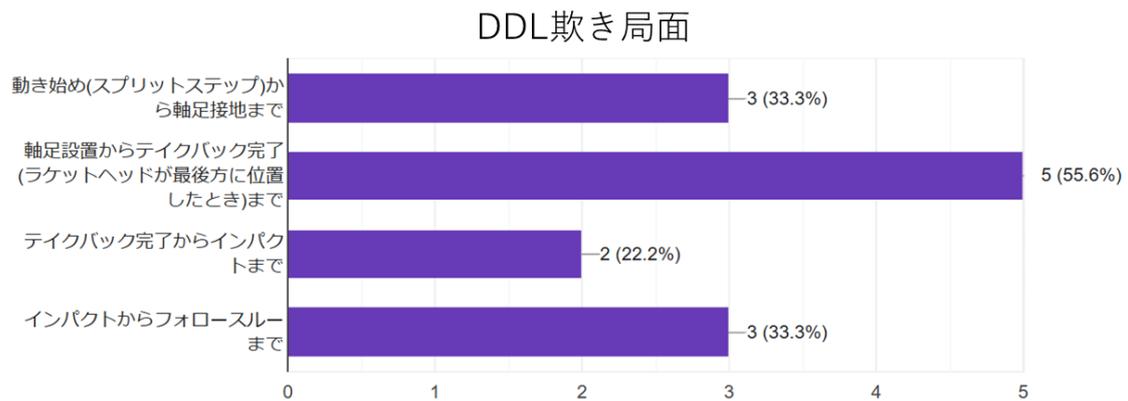


図 6.DDL および DCC の欺き局面

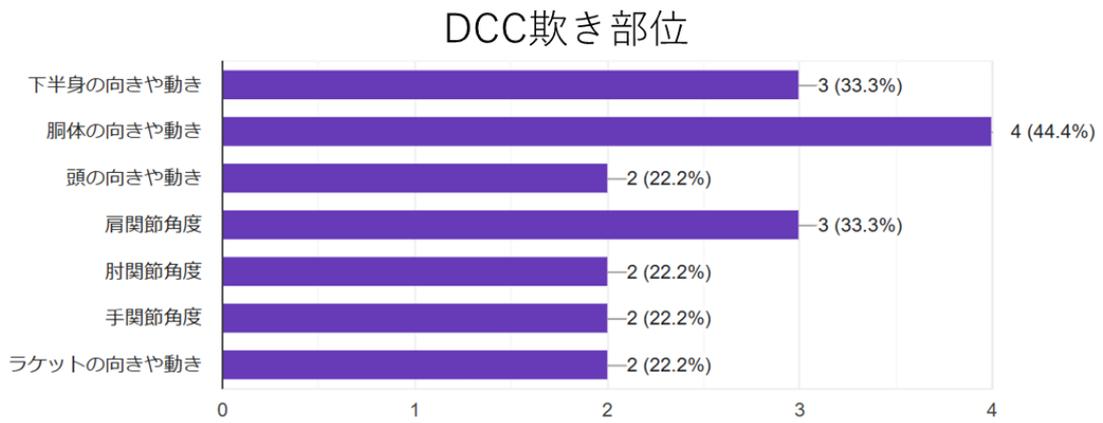
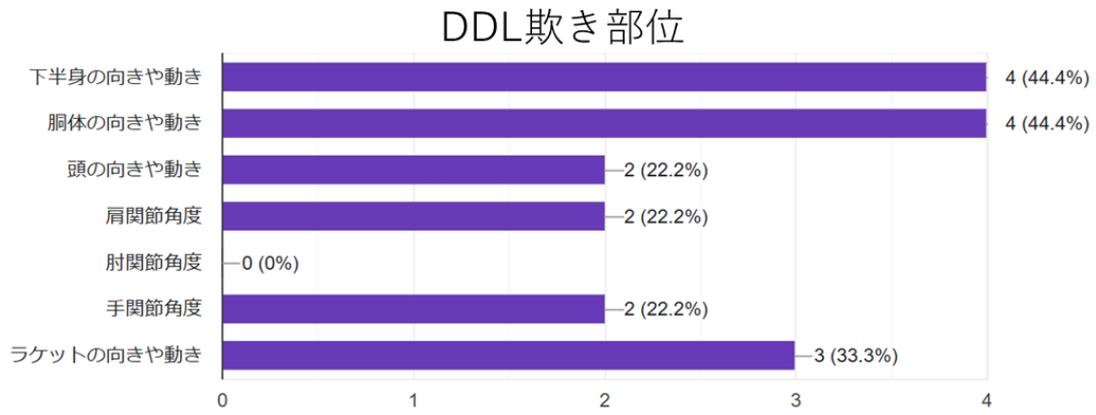


図 7.DDL および DCC の欺き部位

表 3.各対象者のアンケート回答(欺き局面および欺き部位)

対象者	DDL 欺き局面	DDL 欺き部位	DCC 欺き局面	DCC 欺き部位
A	局面 3	肩,ラケット	局面 3	肩,ラケット
B	局面 1, 局面 2	ラケット	局面 1, 局面 2	胴体,ラケット
C	局面 1	下半身,肩	局面 3	肩,手
D	局面 2	胴体	局面 2	胴体
E	局面 4	頭,手	局面 2	頭,肘
F	局面 3	手	局面 3	手
G	局面 2, 局面 4	下半身,胴体	局面 2, 局面 3	下半身,胴体
H	局面 1, 局面 2	下半身,胴体,頭	局面 1, 局面 2	下半身,胴体,頭
I	局面 2, 局面 4	下半身,胴体,ラケット	局面 4	下半身,肩,肘

表 3 は各対象者の欺き局面と欺き部位のアンケート回答を示す。欺き部位について、「動き始めから軸足接地まで」と回答した場合は「局面 1」,「軸足接地からテイクバック完了まで」と回答した場合は「局面 2」,「テイクバック完了からインパクトまで」と回答した場合は「局面 3」,「インパクトからフォロースルーまで」と回答した場合は「局面 4」とした。欺き部位については、対象者が回答した部位を記載した。

3.2 関節角度および回転角度

各関節角度および回転角度について、対象者の平均値を図 8, 9 に示す。胸郭水平回転角度については、準備局面からバックスイング局面では利き腕側を後方へ引くように回転（上から見下ろした際の時計回り回転）し、フォワードスイング局面からフォロースルー局面では逆方向へ回転（上から見下ろした際の反時計回り回転）した。頭部水平回転角度については、準備局面からインパクト直前までは利き腕側を後方へ向ける方向に回転（上から見下ろした際の時計回り回転）し、インパクト直前からフォロースルー局面までは逆方向へ回転した。肩関節角度については、準備局面では水平外転しながら挙上し、バックスイング局面では水平外転しながら下制した。フォワードスイング局面から水平内転を始め、インパクト直前から大きな内旋や挙上をした。肘関節角度については、バックスイング局面からフォワードスイング局面前半では伸展しながら回外し、フォワードスイング局面後半では屈曲しながら回内した。手関節角度については、インパクト直前に背屈から掌屈、撓屈から尺屈の動作が見られた。

SPM による反復測定一元配置分散分析の結果、肩関節挙上角度、胸郭水平回転角度、頭部水平回転角度の一部区間に有意な主効果が認められた。肩関節水平内転角度、肩関節内旋角度、肘関節屈曲角度、肘関節回内角度、手関節屈曲角度、肘関節撓屈角度については、全区間で有意な主効果が認められなかった。肩関節挙上角度は準備局面からフォワードスイング局面前半(0-54%)で有意な主効果が認められた。事後検定の結果、DL がその他条件よりも有意に小さく(DL<CC:0-10%, 32-36%, DL<DDL:3-37%, DL<DCC:0-54%), DDL が DCC よりも有意に小さかった(0-6%)。胸郭水平回転角度は準備局面とフォワードスイング局面後

半，フォロースルー局面(0-12%，72-84%，95-100%)で有意な主効果が認められた．事後検定の結果，インパクト付近において DL がその他条件よりも後方回転位であった(DL<CC:73-77%，81-92%，DL<DDL:75-80%，DL<DCC:64-82%)．頭部水平回転角度はインパクト付近(77-81%)で有意な主効果が認められた．事後検定の結果，すべての区間で有意差は認められなかった．欺きを意図したストロークでの動作の模倣について，インパクト付近の胸郭水平回転角度と，準備局面からバックスイング局面の肩関節挙上角度において，1.DL と CC に有意差がみとめられ，2.DDL と CC に有意差が認められず，3.DDL と DL に有意差が認められた．すなわち，DDL では CC におけるインパクト付近の胸郭水平回転角度と，準備局面からバックスイング局面の肩関節挙上角度を模倣したといえる．

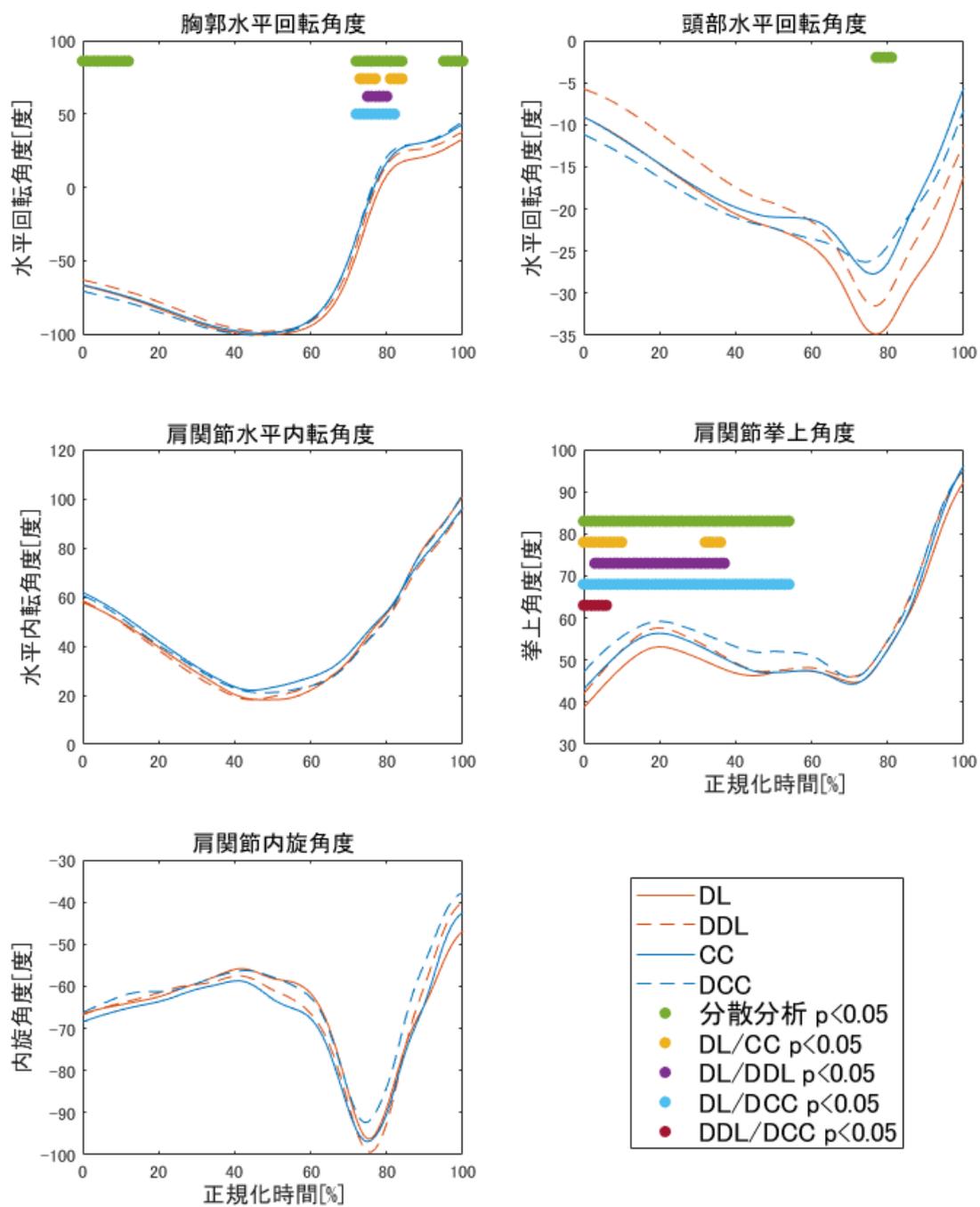


図 8. 回転角度および肩関節角度 (対象者平均)

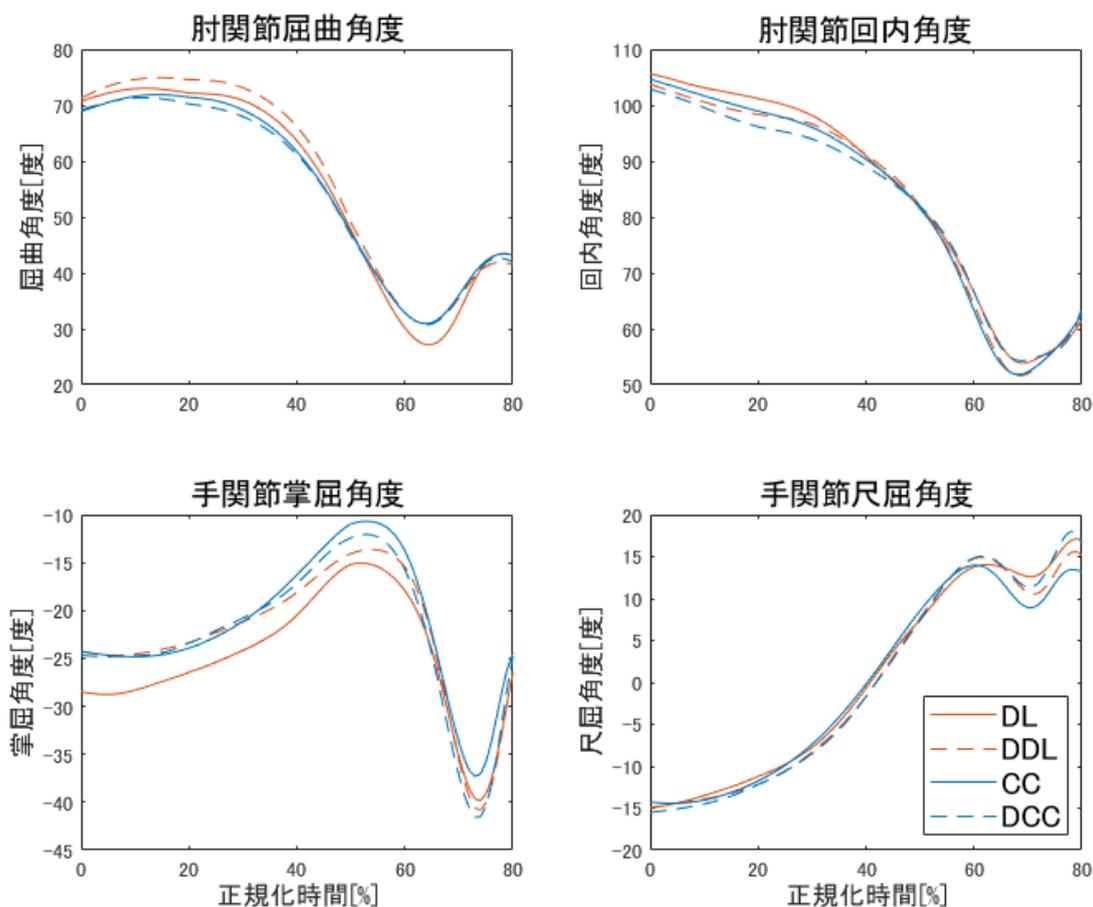


図 9.肘関節および手関節角度(対象者平均)

3.3 ラケット保持腕位置および非ラケット保持腕位置

各条件におけるラケット保持腕位置および非ラケット保持腕位置を表 4, 5 に示す. また, ラケット保持腕のスイング開始からインパクトまでの軌道と, 非ラケット保持腕の前方回転開始からインパクトまでの軌道を図 10 に示す. ラケット保持腕はスイング開始時に胸郭の左後方に位置し, インパクトにかけて右前方へと移動した. 非ラケット保持腕は前方回転時に胸郭の右前方に位置し, インパクトにかけて円を描くような軌道で左側へと移動した.

反復測定一元配置分散分析の結果ラケット保持腕位置は, スイング開

始時に y 方向と z 方向で，インパクト時に x 方向で，条件による有意な主効果が認められた．事後検定の結果，スイング開始時では CC が DL，DDL よりも有意に後方に位置し，DCC が DDL よりも有意に上方に位置した．インパクト時では CC が DL よりも有意に左側に位置した．非ラケット保持腕位置は，前方回転開始時およびインパクト時に全方向で有意な主効果が認められなかった．ラケット保持腕および非ラケット保持腕位置については，欺きを意図したストロークでの動作の模倣と判断される変数は見られなかった．

表 4.ラケット保持腕位置

	スイング開始時			インパクト時		
	x 方向 [cm]	y 方向 [cm]	z 方向 [cm]	x 方向 [cm]	y 方向 [cm]	z 方向 [cm]
DL	-7.8±6.9	-35.3±3.3	-2.6±4.4	27.2±5.6	17.7±7.4	-12.6±2.7
DDL	-6.1±7.1	-36.4±3.2	-3.3±5.2	25.3±7.9	20.2±4.7	-11.8±3.0
CC	-5.2±4.9	-36.8±2.2	-2.7±4.6	22.2±5.3	20.6±8.3	-13.0±2.3
DCC	-5.4±8.2	-37.5±3.3	-1.7±5.2	25.0±6.7	22.3±4.4	-11.6±3.1

*: p<0.05

表 5.非ラケット保持腕位置

	前方回転開始時			インパクト時		
	x 方向 [cm]	y 方向 [cm]	z 方向 [cm]	x 方向 [cm]	y 方向 [cm]	z 方向 [cm]
DL	34.4±6.7	14.4±9.1	8.4±5.6	-29.0±5.0	9.0±12.4	6.9±7.0
DDL	34.9±6.2	16.8±7.4	9.6±5.6	-28.7±3.5	7.2±10.9	6.3±7.1
CC	34.4±5.7	16.3±8.6	8.7±5.1	-28.7±4.3	5.3±9.9	6.5±6.5
DCC	35.1±6.4	14.9±9.1	9.3±5.6	-29.7±5.3	4.4±12.7	5.2±6.7

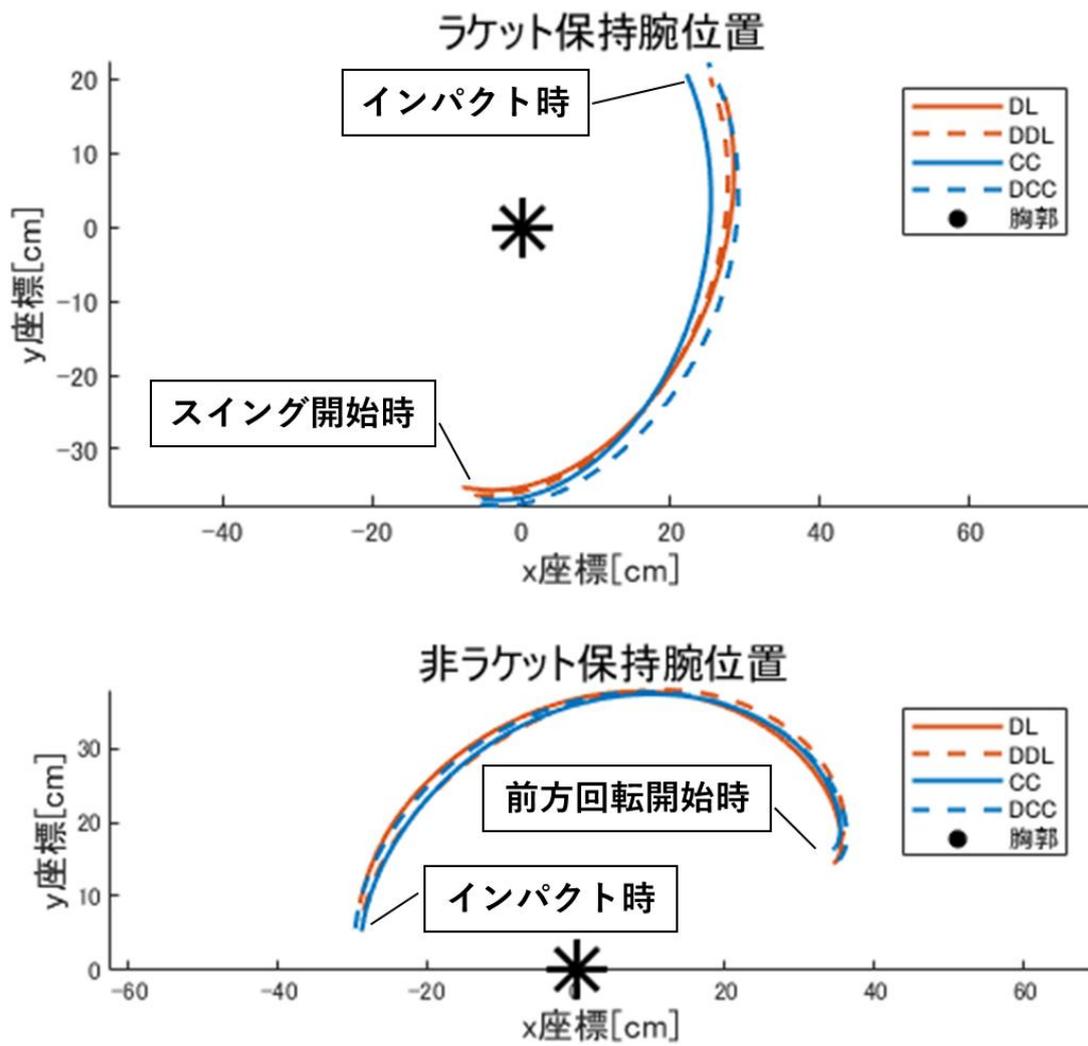


図 10.ラケット保持腕軌道および非ラケット保持腕軌道(対象者平均)

4. 考察

本研究の目的は、打球方向の欺きを意図したストローク動作の運動学的特徴を明らかにすることであった。分析の結果、欺きを意図したストロークにおいて、胸郭や肩関節の欺き方向動作の模倣が見られた。一方で、打球方向を打ち分ける際に動作が変化する身体部位や局面には個人差があり、欺きを意図したストロークの動作にも個人差が見られた。これらの結果は、熟練テニスプレイヤーが打球方向を欺くよう指示された際の、ストローク動作の特徴を表すものである。本研究では、欺きを意図したストロークにおいて、欺き方向の動作を模倣するという仮説が支持された。

4.1 アンケート調査

本研究では、試合における欺きを意図したストロークの使用頻度や、欺きを行う際の局面や部位についての調査するため、アンケート調査を実施した。DDLやDCCの使用状況について、Dimicら(2023)は試合映像から28%を”Disguised Stroke”と判定し、世界トッププレイヤーの”Disguised Stroke”の使用頻度が高いことを主張した。しかし本研究の対象者に「頻繁に用いる」と回答した人はおらず、全員が「時々用いる」もしくは「あまり用いない」と回答した。先行研究と本研究では対象者のレベルに差があるものの、”Disguised Stroke”と判定されたストロークの中で、選手が欺きを意図しなかったストロークも多く含まれていた可能性が考えられる。一方で、「全く用いない」と回答した人がいなかったことから、本研究の対象者全員が、試合中に欺きを意図したストロークを行うことがあるといえる。また、DCCのほうがDDLよりも使用頻度が高く、得意意識のある選手も多かった。これはDLとCCの難易度の

差に起因すると考えられる。CCはDLと比べ打撃可能距離が長く、ネットは中央に向かうほど高さが低くなる。そのため、CCの方がコートに入れることが容易である。本研究のアンケートにおいても、CCの方が「得意だ」と回答した人数が多い。また、欺きを意図したストロークは通常のストロークよりも難易度が高いと考えられる。そのため、打球方向による難易度の差がより大きく反映された可能性が考えられる。

欺き局面については、DDLとDCCの両方で「軸足設置からテイクバック完了まで」と回答した割合が最も大きい。多くの対象者が、この局面で欺きを意図した動作を行っていると考えられる。一方で、すべての局面に1人以上の回答があることから、欺きを意図した動作を行う局面には個人差があるといえる。欺き部位について、DDLでは「下半身の向きや動き」と「胴体の向きや動き」、DCCでは「胴体の向きや動き」と回答した割合が最も大きい。多くの対象者が、下半身や胴体といった近位部位の動作を変えることで、欺こうとしていると考えられる。一方で、DDLの肘関節角度を除きすべての部位に1人以上の回答があることから、欺きを意図した動作を行う部位には個人差があるといえる。

4.2 対象者全体の特徴 -CCとDLの打ち分け-

DLとCCの動作の違いに関して、有意差の認められた項目について述べる。DLはCCと比較して、準備局面とバックスイング局面の肩関節挙上角度が小さく、スイング開始時のラケット保持腕はより前方に位置した。正面方向に打撃するDLは、対角方向に打撃するCCと比べて打撃可能距離が短い。そのためDLはCCよりも、インパクト直後の打球速度や、インパクト直前のネット方向へのラケット速度が小さい(道上, 2002)。本研究の対象者はDLにおいて、肩関節挙上角を小さくし、コン

パクトなバックスイングをすることで、フォワードスイング時におけるネット方向へのラケットの加速区間を短くし、インパクト時のネット方向へのラケット速度を抑えたと考えられる。

また、インパクト前後において、DLはCCと比較して、胸郭水平回転角度が後方回転位を示し、インパクト時のラケット保持腕はより右側に位置した。先行研究では、DLはCCよりも、インパクト時のラケット角度が後方回転位であることや、インパクト時における、ベースライン右方向へのラケット速度が大きいこと(道上, 2002)が示された。本研究の対象者はDLにおいて、インパクト付近の胸郭水平回転角度を後方回転位にすることで、ラケットの後方回転位や、ラケットが内側から外側へ向かう「インサイドアウト」の軌道を作り出したと考えられる。

4.3 対象者全体の特徵 -欺きを意図したストローク-

欺きを意図したストロークに関して、有意差の認められた項目について述べる。DDLはDLと比較して、準備局面とバックスイング局面で肩関節挙上角度が大きく、インパクト付近で胸郭がより前方回転位であった。これはCCと同様の特徴であり、DDLではCCにおける肩関節や胸郭の動作を模倣することで、打球方向を欺いていると考えられる。

一方でDDCは、すべての変数においてCCとの有意差が認められなかった。すなわち、本研究にて分析対象とした部位には、DCCとCCでサンプル全体に共通する差異は見つからなかった。つまりDCCでは、対象者全体の欺き方を特徴づけるような動作は認められなかったといえる。

4.4 個人差

打球方向の打ち分け方や、欺き方には個人差が見られた。本研究では、主に胸郭の動作特徴を基準として、対象者を5つに分類した。各対象者の胸郭水平回転角度を図 11 に示す。

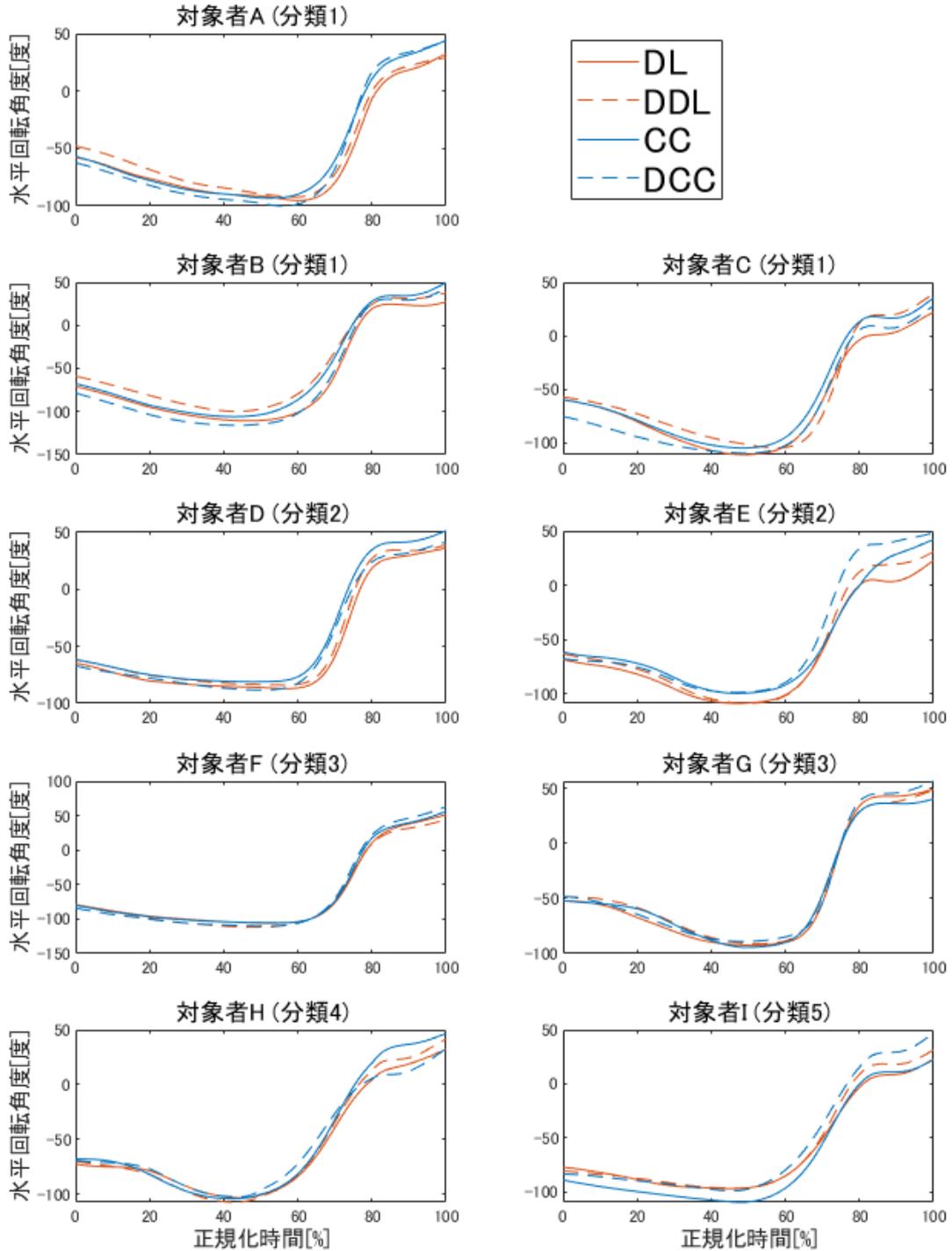


図 11.各対象者の胸郭水平回転角度

分類 1 の対象者(対象者 A, 対象者 B, 対象者 C)は, 胸郭水平回転角度について, 準備局面において DL と CC が同様の値を示し, バックスイング局面やフォワードスイング局面前半からフォロースルー局面の終わりまで, CC が DL よりも前方回転位を示した. 欺きを意図したストロークでは, 準備局面からバックスイング局面にかけて, DDL がより前方回転位を示し, DCC がより後方回転を示した. また, 頭部水平回転角度においても同様の特徴が見られた(図 12). つまりこれらの対象者は打球方向を欺く際に, 胸郭や頭部の, フォワードスイング局面における欺き方向の動作特徴を, 準備局面からバックスイング局面において表現した. これにより相手の予測を欺き方向へと促そうとしたと考えられる.

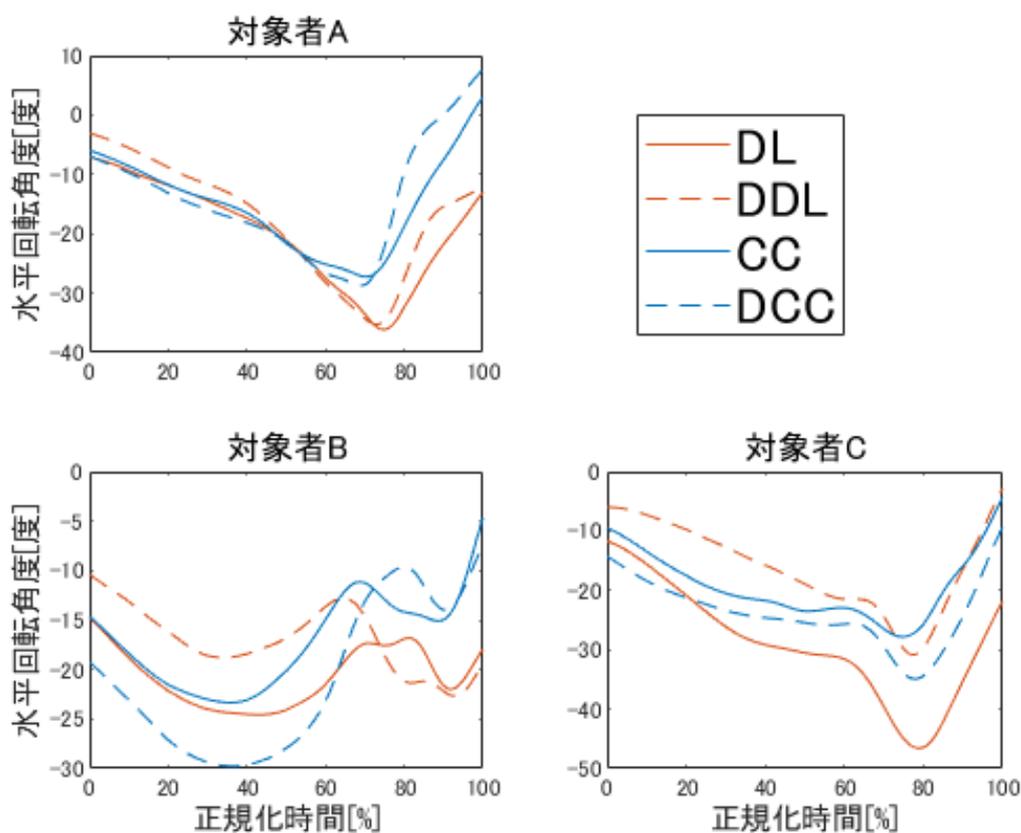


図 12.頭部水平回転角度(対象者 A, B, C)

分類 2 の対象者(対象者 D, 対象者 E)は, 胸郭水平回転角度について, 多くの区間で CC が DL よりも前方回転位を示した. 欺きを意図したストロークでは, 準備局面からバックスイング局面において, DDL が DL よりも前方回転位を示し, DCC が CC よりも後方回転位を示した. 頭部水平回転角度においても同様の特徴が見られた(図 13). すなわち, これらの対象者は打球方向を欺く際に, 準備局面からバックスイング局面にかけて, 胸郭や頭部の, 欺き方向の動作を模倣したといえる.

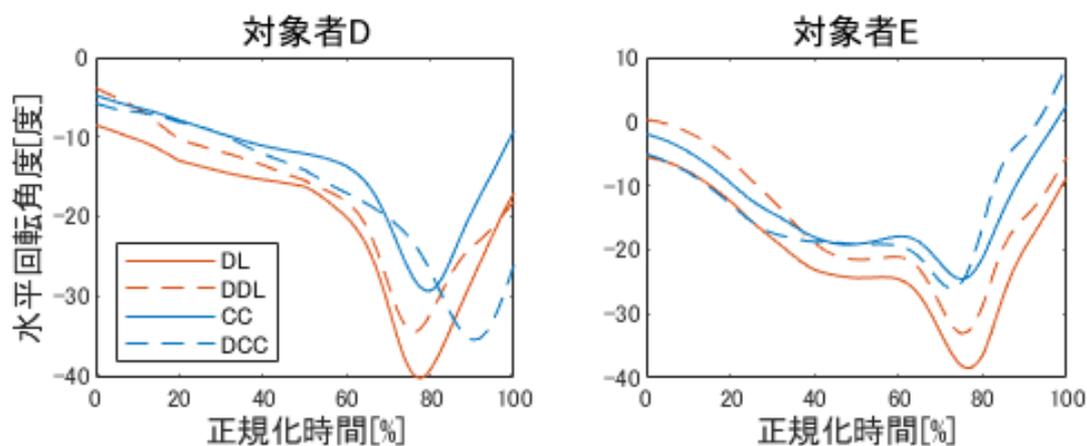


図 13.頭部水平回転角度(対象者 D, E)

分類 3 の対象者(対象者 F, 対象者 G)は, 胸郭水平回転角度について, 多くの区間で DL と CC に大きな差が見られなかった. 一方で, 肩関節水平内転角度については, 多くの区間で CC が DL よりも水平内転位を示した(図 14). これらの対象者は, 胸郭水平回転角度ではなく肩関節水平内転角度を変えることで, インパクト時のラケット角度やスイング軌道を変え, 打球方向を打ち分けたと考えられる. また欺きを意図したストロークでは, 肩関節水平内転角度について, 多くの区間で DDL が DL よりも水平内転位を示し, DCC が CC よりも水平外転位を示した. すなわち, これらの対象者は打球方向を欺く際に, 肩関節の欺き方向の動作

を模倣したといえる。

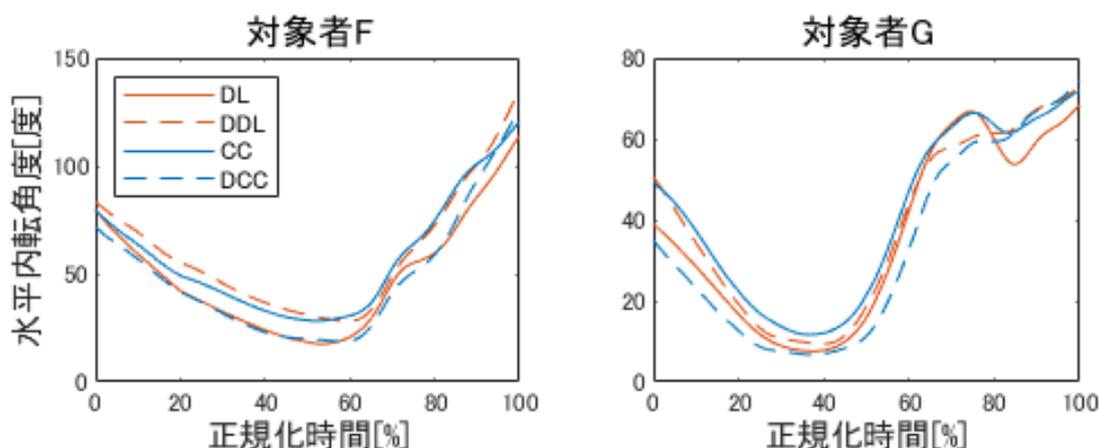


図 14.肩関節水平内転角度(対象者 F, G)

分類 4 の対象者(対象者 H)は、胸郭水平回転角度について、準備局面からフォワードスイング局面前半までは DL と CC が同様の値を示し、フォワードスイング局面後半からフォロースルー局面の終わりまで、CC が DL よりも前方回転位を示した。欺きを意図したストロークでは、フォワードスイング局面後半で、DDL が DL よりも前方回転位を示し、DCC が CC よりも後方回転位を示した。すなわち、この対象者は打球方向を欺く際に、フォワードスイング局面後半で、胸郭の欺き方向の動作を模倣したといえる。

分類 5 の対象者(対象者 I)は、胸郭水平回転角度について、準備局面からフォワードスイング局面前半までは DL が CC よりも前方回転位を示した、フォワードスイング局面後半からフォロースルー局面の終わりまで、DL と CC が同様の値を示した。肩関節水平内転角度については、バックスイング局面からフォワードスイング局面で CC が DL よりも水平内転位を示し、肩関節内旋角度については、すべての区間で CC が DL よりも内旋位を示した(図 15)。この対象者は、肩関節動作を変えること

で、インパクト時のラケット角度やスイング軌道を変え、打球方向を打ち分けたと考えられる。一方で、欺きを意図したストロークでは、動作の模倣と解釈できる変数は見られなかった。

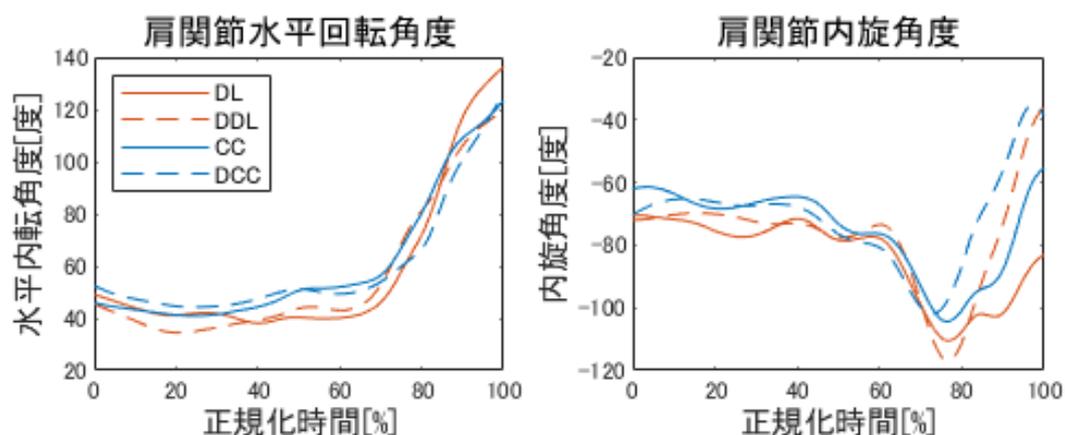


図 15.肩関節水平内転角度および内旋角度(対象者 I)

以上のように、DLとCCの動作の差異には個人差が見られた。そのため欺きを意図したストロークでは、多くの対象者に欺き方向の動作の模倣が見られたものの、模倣を行う局面や部位には個人差が見られた。これらのことから、打球方向を欺くストロークの指導では、各個人の打球方向の打ち分け方について把握し、動作の差異がある局面や部位について、欺き方向の動作を模倣する技術を習得することが望ましいと考えられる。

4.5 総論

打球方向の打ち分けにおいて、インパクト時のラケット角度は重要な要因である。本研究の対象者は主に、インパクト付近の胸郭水平回転角度を変化させることで、インパクト時のラケット角度を変え、打球方向を

打ち分けたと考えられる。一方で、準備局面やバックスイング局面における胸郭水平回転角度については、DL と CC の差が大きな対象者もいれば、差が小さな対象者もいた。さらに、一部の対象者は胸郭水平回転角度を変える代わりに、肩関節水平内転角度を変えることで、打球方向を打ち分けたと考えられる。また、DL と CC では打撃可能距離が異なるため、インパクト時のラケット速度を変える必要がある。本研究の対象者は、準備局面やバックスイング局面における肩関節挙上角度を変え、ラケットの加速区間を変えることで打球方向を打ち分けたと考えられる。これらのことから、本研究の対象者の打球方向を予測する上で、胸郭の動作や肩関節の動作は重要な手がかりとなるといえる。反対に、これらの部位について欺き方向の動作を模倣することで、相手に誤った予測をさせることができると考えられる。実際に本研究の対象者は、胸郭や肩関節について、欺き方向の動作を模倣していた。すなわち、欺きを意図したストロークでは、欺き方向の動作を模倣するという仮説は支持された。

5.結論

本研究の目的は、打球方向の欺きを意図したストローク動作の運動学的特徴を明らかにすることであった。テニス熟練者9名が通常のストロークを行った際と欺きを意図したストロークを行った際の、身体動作を分析した結果、以下の特徴が明らかとなった。

1. 通常のストロークにおいて、胸郭の向きや肩関節動作を変えることで、打球方向を打ち分けること。
2. 欺きを意図したストロークでは、胸郭や肩関節について、欺き方向に打つ際の動作を模倣すること。
3. 打球方向を打ち分ける際に動作が変化する身体部位や局面には個人差があり、欺きを意図したストロークの動作にも個人差が見られること。

参考文献

Dimic M, Furuya R, Kanosue K(2023). Importance of disguising groundstrokes in a match between two top tennis players (Federer and Djokovic). *International Journal of Sports Science&Coaching*, 18(1), 257–269.

Fukuhara K, Ida H, Ogata T, et al (2017). The role of proximal body information on anticipatory judgment in tennis using graphical information richness. *PLOS One*, 12, e0180985.

Jackson RC, Mogan P (2007). Advance visual information, awareness, and anticipation skill. *Journal of Motor Behavior*, 39(5), 341–351.

Landlinger J, Lindinger S, Stöggl T, et al (2010). Kinematic differences of elite and high-performance tennis players in the cross court and down the line forehand. *Sports Biomechanics*, 9, 280–295.

Landlinger J, Stöggl T, Lindinger S, et al (2012). Differences in ball speed and accuracy of tennis groundstrokes between elite and high-performance players. *European Journal of Sport Science*, 12, 301–308.

Shim J, Carlton L, Chow J, et al (2005). The Use of anticipatory visual cues by highly skilled tennis players. *Journal of Motor Behavior*, 37, 164–175.

道上静香, 阿江通良(2002). 世界一流女子テニス選手のフォアハンド・グラウンド・ストロークのキネマティクスの分析. バイオメカニクス研究, 6, 259-269.

謝辞

本研究は指導教員である矢内利政教授のご指導のもと行われました。矢内先生には論理の組み立て方や、科学的なものの見方について多くのことを教えていただきました。これらの教えは研究活動のみならず、就職活動や私生活でも役立てることができたと思います。感謝申し上げます。土屋教授，堀野教授には副査を快く引き受けてくださりました。感謝申し上げます。Dimicさんにはテニスの指導現場の視点から多くのアドバイスを頂きました。感謝申し上げます。快く実験に参加してくださった皆様に感謝申し上げます。バイオメカニクス研究室の皆様には被験者の募集や実験の手伝い，データに関する議論など様々な点でご協力いただきました。感謝申し上げます。

2025年1月 森下 兵悟

付録

アンケート用紙

ご自身のフォアハンドストロークについて、以下の質問にお答えください。

Q1 サーブやボレー，他のストロークと比較して，クロスへのストロークは得意ですか

- 得意だ
- やや得意だ
- やや苦手だ
- 苦手だ

Q2 サーブやボレー，他のストロークと比較して，ダウンザラインへのストロークは得意ですか？

- 得意だ
- やや得意だ
- やや苦手だ
- 苦手だ

Q3 試合中，クロスに打つと見せかけてダウンザラインに打球を放つ技術(以下”欺きダウンザライン”と呼びます)を用いますか？

- 頻繁に用いる
- 時々用いる
- あまり用いない
- 全く用いない →Q7へ

Q4 欺きダウンザラインで相手を欺くことは得意ですか？

- 得意だ
- やや得意だ
- やや苦手だ
- 苦手だ

Q5 あなたの打撃動作を欺きダウンザラインと通常のダウンザラインで比較した場合，動作が大きく異なると思われる”局面”を教えてください。

1. 動き始め(スプリットステップ)から軸足接地まで
2. 軸足設置からテイクバック完了まで
3. テイクバック完了からインパクトまで

4. インパクトからフォロースルーまで

Q6 選択した局面について，動作が大きく異なると思われる”部位”を教えてください。

下半身の向きや動き

胴体の向きや動き

頭の向きや動き

肩関節角度

肘関節角度

手関節角度

ラケットの向き

その他

Q7 試合中，ダウンザラインに打つと見せかけてクロスに打球を放つ技術(以下”欺きクロス”と呼びます)を用いますか？

頻繁に用いる

時々用いる

あまり用いない

全く用いない →質問は以上です。

Q8 欺きクロスで相手を欺くことは得意ですか？

得意だ

やや得意だ

やや苦手だ

苦手だ

Q9 あなたの打撃動作を欺きクロスと通常のクロスで比較した場合，動作が大きく異なると思われる”局面”を教えてください。

1. 動き始め(スプリットステップ)から軸足接地まで

2. 軸足設置からテイクバック完了まで

3. テイクバック完了からインパクトまで

4. インパクトからフォロースルーまで

Q10 選択した局面について，動作が大きく異なると思われる”部位”を教えてください。

下半身の向きや動き

胴体の向きや動き

頭の向きや動き

肩関節角度
肘関節角度
手関節角度
ラケットの向き
その他