

2010 年度 修士論文

**全力 200m クロール泳が
肩関節位置感覚再現性に及ぼす影響**

The effect of maximal 200-m front crawl
on the repeatability of shoulder joint position sense

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 コーチング科学研究領域
5009A036-7

栗田 康弘

Yasuhiro Kurita

研究指導教員： 奥野 景介 准教授

目次

	[頁]
第1章 緒言	・・・ 1
1-1 はじめに	・・・ 2
1-2 先行研究小史	・・・ 5
1-2-1 ストローク頻度, ストローク長, 泳速度の関係	・・・ 5
1-2-2 200m 自由形	・・・ 7
1-2-3 ヒトの身体運動制御	・・・ 8
1-2-4 筋疲労と位置覚	・・・ 10
1-3 研究目的	・・・ 11
第2章 研究方法	・・・ 12
2-1 被験者	・・・ 13
2-2 実験機材	・・・ 13
2-3 身体セグメントにおけるベクトルの設定	・・・ 13
2-4 上肢と体幹のなす角度の測定	・・・ 14
2-5 実験手順	・・・ 15
2-6 データ解析および統計処理	・・・ 16
第3章 実験結果	・・・ 17
3-1 全力泳: 200 m クロール泳記録	・・・ 18
3-2 泳運動課題前後での位置覚の変化	・・・ 19
3-2 水平位における位置覚再現性の比較	・・・ 20
3-3 中間位における位置覚再現性の比較	・・・ 21
3-4 垂直位における位置覚再現性の比較	・・・ 22
第4章 考察	・・・ 23
4-1 位置覚測定の妥当性	・・・ 24
4-2 運動後の位置覚再現性の変化	・・・ 24
4-3 位置覚変化が泳運動に及ぼす影響	・・・ 26
4-4 今後の課題及び展望	・・・ 27
4-5 結論	・・・ 28
謝辞	・・・ 29
参考文献	・・・ 30

図および表一覧

	[頁]
第2章	
図 1-1 位置覚測定模式図	・・・15
図 1-2 実験の流れ	・・・16
第3章	
表 1 全力泳: 200 m クロール泳記録	・・・18
図 2-1 基準肢と測定肢の差の絶対値評価	・・・19
図 2-2 水平位における位置覚再現性	・・・20
図 2-3 中間位における位置覚再現性	・・・21
図 2-4 垂直位における位置覚再現性	・・・22

第 1 章 緒言

1-1 はじめに

競泳の競技規則は 1957 年に大きく改正され、競技会での個人種目は自由形、背泳ぎ、平泳ぎ、バタフライの 4 泳法、およびこれら 4 泳法をバタフライ、背泳ぎ、平泳ぎ、クロールの順で連続して泳ぐ個人メドレーが実施されるようになった (国際水泳連盟)。この改正から現在に至るまで、各種目の世界記録および日本記録は、継続的に向上している。この要因として、Miller (1975) は、規則の改正だけでなく、水泳場の増加、参加者の増大、水着の改善、効率の良いトレーニング方法の開発等を挙げている。また、宮下 (1978) は、記録には選手の泳力が反映されていると考え、泳力を体力と技術の要素に分類し、選手のポテンシャルとトレーニングが競技力向上に継続的な記録の短縮の要因であると説明している (宮下 1978)。さらに宮下 (1978) は、トレーニングはコーチの指導力およびスポーツ科学の成果によって改善、進歩するとも主張している。これは、選手の技術や体力を客観的に評価するという科学的なアプローチが、競泳の記録短縮に貢献するという提言として捉えることができよう。

日本国内では、競泳に対する科学的な取り組みの一つとして、主要大会におけるレース分析が 20 年以上行われてきた。そして、競泳のレースが進行すると泳速度が低下していくことが一般的な認識として確立されている (生田ら 1998)。この現象は、レース進行に伴う筋疲労によってストローク動作中に発揮されるパワーが低下すること、およびそれに伴う 1 ストロークでの前進距離が漸減することによって説明されている (Toussaint et al. 2006)。さらに、生田ら (2010) は、レース進行を模した試技において、序盤から終盤にかけて動員される筋群の活動量が変化することを報告した。これらのことから、レースの進行によって筋疲労が生じてストローク動作中の発揮パワー低下と動員筋群の筋活動パターンが変化することは、泳速度の低下の一要因であると考えられる。

一方、運動制御の観点から捉えると、競泳で行う身体運動はフィードバック制御およびフィードフォワード制御によるシステム (Kawato et al. 1987) としてモデルすることができる。このモデルでは、これまでの経験や予測に基づいた随意指令による運動遂行を、運動の結果と初期設定の誤差を入力情報として利用して修正するという制御システムでヒトの身体運動を表している (Kawato et al. 1987)。健全なヒトでは、感覚器官から得られる様々な情報を基に運動の修正が行われる。そして、この情報には視覚によるものと体性感覚によるものがある。この体性感覚とは、触覚や痛覚等を感知する皮膚感覚と、筋の長さや張力を知覚する深部感覚があり、これらのうち運動を行う際には主に深部感覚が貢献していると考えられている (Rothwell et al. 1982)。

深部感覚の一種である位置覚は、空間上での身体各部の位置や各部間の位置関係を知覚する感覚である。この位置覚による情報を利用することで、ヒトは持続的な視覚情報がなくても正確な運動や、手足の協応を必要とする複雑な運動課題を行うことが可能となる (Latash 2002)。つまり、特に視覚情報が利用できない環境条件下におけるヒトの身体運動制御モデルにおいて、位置覚は極めて重要なフィードバック情報となり得ると考えられる。そして、競泳レース中は選手が自身の腕や脚の動きを目視しながら運動する場面がほとんどないため、位置覚を主なフィードバック情報として利用していることが推察される。

覚醒状態のヒトにおける位置覚を測定する方法としては、四肢を一定の肢位におき同側肢や対側肢で模倣もしくは再現させて判断する方法が一般的である。そして、このような方法で測定される位置覚は通常時でもおよそ 3°から 8°程度の誤差があることが報告されている (矢澤ら 2008)。また、筋疲労が起これば、位置覚の受容器である筋紡錘や腱の長さ変化に対する感度が低下し、位置覚の誤差が増大することが近年に報告された (Allen et al. 2010)。つまり、視覚情報を利用できない条件下で筋疲労状態に陥った場合、位置覚情報の精度低下により目的運動を正確に行えない可能性が考えられる。

これらの位置覚の特徴および上記した競泳レース進行に伴う疲労の発生を総合すると、レースの進行とともに泳速度が低下する生理学的要因は、これまでに報告されてきた筋疲労による発揮パワーの低下 (Toussaint et al. 2006) および筋群の活動パターンの変化 (生田ら 2010) だけではなく、位置覚の低下も含まれていると思われる。しかしながら、これまでに全力泳が位置覚の再現性に及ぼす影響を検討した報告はなく、全力泳後に位置覚が変化するか、また、その変化はどの程度なのかは不明である。

そこで本研究は、全力泳に伴う泳速度低下に関する新たな要因として考えられる位置覚再現性に着目し、激運動を想定した全力 200m クロール泳の前後で、クロールの上肢運動で最も動作範囲が大きく貢献度が高い肩関節の位置覚変化について検討することを目的とした。

1-2 先行研究小史

1-2-1 ストローク頻度, ストローク長, 泳速度の関係

レース競技である競泳の勝敗は, 泳記録により決定する. そして, より良い記録を樹立するためには, 高い泳速度 (swimming velocity: SV) を出来る限り長く発揮し続けることが求められる.

SVは, ストローク頻度 (単位時間当たりのストローク回数, stroke rate: SR) とストローク長 (1ストロークで前進する距離, stroke length: SL) の積で求められる (Craig et al. 1979). 日本では, 1987年より日本水泳連盟医・科学委員会によってレース分析が行われており, 主に日本選手権などの大規模な大会で撮影されたレース映像から選手のSV, SRおよびSLが算出され, データ開示されている. この取り組みによって, 競泳のレース進行に伴い, SVが減少する際には, SRが増加し, SLが低下することが明らかにされた (生田ら 1998).

Aujouannet et al. (2006) は, 高強度の泳テスト前後で上腕の等尺性筋力を測定し, 泳テスト後は肩関節周辺の筋群の筋力がテスト前より有意に低下したと報告している. したがって, 高強度泳運動は, 要求された力発揮が不可能な状態である筋疲労状態を引き起こし, 泳パフォーマンスが低下すると考えられる. また, Toussaint et al. (2006) は, 筋疲労によってストローク動作中に発揮されるパワーの低下を報告した. そして, レース進行に伴うSR増加について, Suito et al. (2008) は, 筋疲労によって, ストローク中の手部速度と肩関節外転角速度が低下するため, 泳者はレース後半では肩関節の内旋を増加させ, SVの低下を補っていると説明している. 一方, 生田ら (2010) は, 高強度の泳運動を続けると腕の回転速度が低下し, SVが低下することを報告している.

上記に加え, 生田ら (2010) は, レース後半では発揮筋力が低下していない筋も動員し, 筋活動コーディネーションを変化させることでSVの低下を防いでいるとしている. つまり, 泳運動によって生じる筋疲労に伴う泳パフォーマンス低下を抑えるために, 泳

者は戦略的なSRの増加や, 筋活動パターンを変化させていると考えられる.

1-2-2 200m 自由形

現時点において国際水泳連盟で認められている泳法は4種目ある。これらのうち、最も速く泳げる泳法は自由形種目で最も頻繁に泳がれるクロール泳である。競泳の種目は50 m から1500 m まで幅広くあるが、中でも100 m と200 m は4種目全てに設置されている種目であり、競泳競技において最も多くの選手が参加する距離といえる。

国内主要大会や国際大会に出場する選手では、100 m 種目はおよそ50–60 秒程度、200 m 種目は100–130 秒程度でレースを終える。競技に要する時間から推定すると、これらの距離では無酸素性エネルギー供給量の値が競技記録と大きく関連していると考えられている (Wakayoshi et al 1993)。また、荻田 (1999) は、泳運動中の無酸素性エネルギー供給量を酸素需要量と酸素摂取量の差である最大酸素借を用い測定し、120–130 秒の運動で最高値を示すことを明らかにした。上述した通り、この運動時間は競泳競技では200mの距離に相当する。さらに、荻田 (1999) は、200 m の全力泳後に血中乳酸値が最大になることを報告している。これらのことから、200 m 種目は身体への負荷が高い競技距離であると考えられる。

1-2-3 ヒトの身体運動制御

ヒトが運動を行う際は筋の収縮が必要不可欠である。このことは、水中で行われる運動である競泳においても例外ではない。筋活動に関与する神経指令は中枢神経系の運動指令により惹起され、その指令が脊髄の α 運動ニューロンを介して筋へと伝達され筋が収縮する。この筋収縮によって生じた張力が腱を介して骨に伝わり、ヒトの関節運動が起こる。そして、運動中は目標とする軌道を予め想定し、その軌道上を筋骨格系が動くように指令が出されると考えられている (Hollerbach 1992)。しかし、目標軌道と実際の軌道では、少なからずずれが生じてしまうため、ヒトは視覚や体性感覚をフィードバック情報として利用し、そのずれを修正していると考えられている (川人 1996)。すなわち、ヒトは目標軌道と実際の軌道のずれを逐次フィードバックしながら、修正を加え、できるだけそれらの誤差を小さくするように運動を行っているということである。

運動制御の際、ヒトはフィードバック情報の大部分を視覚に依存している (川人 1996)。しかし運動中は、当然ながら視野範囲外でも四肢を動かす場面がある。その際に重要な貢献を果たすのが体性感覚の一つである位置覚である。位置覚とは、健常なヒトが有している感覚であり、空間上での身体各部の位置や各部間の位置関係を知覚するための感覚である (Latash 2002)。これによりヒトは、持続的な視覚情報がなくてもある程度正確な運動を行うことができ、手足の協応を必要とする複雑な運動課題を行うことが可能である (Latash 2002)。位置覚のメカニズムは複雑であるが、基礎となるのは関節、筋および腱にある深部受容器からの情報である (Latash 2002)。位置覚は、主に筋受容器の影響を受け (Gandevia 1985)、その代表的な受容器は筋の筋紡錘、関節囊のルフィニ終末、関節靭帯のゴルジ終末、腱のゴルジ腱器官などである (田崎ら 1989)。これらの受容器が検知する情報としては、ルフィニ終末は関節の位置および運動の速度と方向、ゴルジ終末は関節の位置、筋紡錘は筋の長さとその伸長速度、ゴルジ腱器官は筋の張力などである。体肢の運動に伴って関節周囲の皮膚が動き、その機械的受容器が活

動するので、ある程度、皮膚の受容器も位置覚の形成に寄与と考えられている (Macefield et al. 1990). このように、位置覚は複数の感覚系が並列的に情報を処理することで成り立つ複合的な感覚である. そして、視覚情報が使えない条件では、ヒトは位置覚を主なフィードバック情報として利用することで身体運動を制御していると考えられる.

1-2-4 筋疲労と位置覚

一般に位置覚は平常時でも数度程度の誤差があると言われている。矢澤ら (2008) は肩関節の位置覚を外転 30°, 60°, 90°の3つの角度で測定したところ、全ての角度において3°から8°の誤差が生じたと報告している。そして、近年, Allen et al. (2010) によって、肘関節および膝関節に関与する位置覚には、運動前と比して、等張性運動後には4°から6°程度の誤差が増大することが明らかにされた。また Givoni et al. (2007) は、膝関節の位置覚を短縮性収縮運動と伸張性収縮運動の前後で測定し、双方の運動後は運動前より3°から4°程度、改悪したと報告した。これらの報告は、筋疲労によって位置覚の精度が低下することを示唆している。したがって、これらを併せて考えると、レースの進行とともに疲労が起こると推定される競泳においても、疲労による発揮パワーの低下 (Toussaint et al. 2006) や筋活動パターンの変化 (Suito et al. 1998) だけでなく、泳者の目的運動に重要な役割を果たす位置覚が変化する可能性が挙げられる。

1-3 研究目的

先述したように、競泳では、レースの進行に伴って疲労が起こり、位置覚が変化する可能性が考えられる。しかしながら、全力泳が位置覚に及ぼす影響を検討した報告はこれまでになく、全力泳後に位置覚の再現性が変化するのか、また、その変化ほどの程度なのかは不明なままである。

クロール泳運動では全体の推進力の7割以上が上肢のストローク動作によって発揮され (Deschodt et al. 1999), そのうち最も貢献度が高い関節は肩関節である (生田 2010).

そこで本研究の目的は、筋疲労を生じさせるための激運動として全力 200m クロール泳を運動課題とし、クロールの上肢運動で最も動作範囲が大きく貢献度が高い肩関節を対象として、肩関節位置覚が運動課題前後でどのように変化するかを検討し、明らかにすることとした。

第 2 章 実験方法

2-1 被験者

被験者は心身ともに健康かつ競泳のトレーニングを十分に積んだ肩関節に重篤な障害の既往歴を持たない男子大学生・大学院生 10 名 (mean \pm SD: 22.0 \pm 1.6 yrs, 175.4 \pm 6.5 cm, 69.7 \pm 6.9 kg) とした。本実験に先立って、各被験者に対し実験の説明をし、被験者として自主的に参加することの同意を得た。なお、本研究は早稲田大学人を対象とする研究倫理委員会の承認を得ている。

2-2 実験機材

本研究の測定は、3次元磁気式位置計測システム (Liberty Latus, Polhemus社製, USA) を用いて行った。このシステムは、被験者に貼付したマーカーが隠れることによるデータ欠損がなく、簡易な実験設定で高精度の位置座標および向きを得ることができる (誤差: 位置; 0.76 mm, 誤差角度; 0.15°)。

2-3 身体セグメントにおけるベクトルの設定

本実験で用いるシステムによる肩関節位置覚を測定するために、体幹部および両前腕部にベクトルを設定した。被験者に座位姿勢を取らせ、背もたれに背中が付くよう深く腰掛けてもらった。トランスミッターによって生じる磁場が金属の影響を受けないように木製の椅子を使用した。

被験者には橈尺関節を回外させ掌を正面に向け、肘関節屈曲 90°の姿勢を取らせた。また磁気センサを、被験者の左右前腕部 (前腕遠位部後面) 及び体幹 (胸骨体) に貼付し、両面接着テープとサージカルテープを用いて被験者に固定した。この姿勢において、身体部位のキャリブレーションとして、被験者に貼付した各センサの位置座標と向きおよび左右前腕における 4 ヶ所の骨特徴点 (橈骨遠位端, 尺骨遠位端, 上腕骨外側上顆, 上腕骨内側上顆) と体幹における 4 ヶ所の骨特徴点 (胸骨上縁, 剣状突起, C7, T8) の計

12 点の位置座標を計測した。キャリブレーションによって得られたセンサと骨特徴点の相対的位置から、上腕骨外側上顆-上腕骨内側上顆の midpoint から橈骨遠位端-尺骨遠位端の midpoint に向かうベクトルを各前腕部ベクトルとし、T8-剣状突起の midpoint から C7-胸骨上縁の midpoint に向かうベクトルを体幹部ベクトルとして設定した。

2-4 上肢と体幹のなす角度の測定

図 1-1 に本測定姿勢の模式図を示す。まず、両腕を解剖学的基準位にし、そこから肘関節を完全に伸展させ、掌を前額面前方に向けたまま、実験者が左上肢（以下：基準肢）を外転方向に挙上させた。その後、被験者に右上肢（以下：測定肢）の肘関節が完全伸展の状態、体幹部の長軸に対して基準肢と前額面上で線対称と思う位置まで測定肢を挙上してもらった。この時、被験者にはなるべく前額面上を挙上してもらうように注意喚起した。被験者に挙上姿勢で測定肢を約 3 秒間保持させ、その際のセンサの向きを 1 秒程度記録した。計測中は、アイマスクを用いて被験者の視覚を遮断した。キャリブレーションによって得られたセンサと骨特徴点の相対的位置および計測されたセンサの向きから、左右前腕部ベクトルと体幹部ベクトルの向きを算出した。その後、ベクトルの内積の定義を用いて、3 次元空間内における左前腕部ベクトル-体幹部ベクトル、および右前腕部ベクトル-体幹部ベクトルのなす角の角度を求めた。本研究では、これら体幹に対する左右前腕の角度の差を肩関節の位置覚と定義した。

基準肢の角度は、鈴木ら（2006）の先行研究を参考に、水平位（およそ外転 90°）、中間位（およそ外転 135°）および垂直位（およそ外転 180°）の 3 つの課題を設定し、各テスト角度で 3 回ずつ、計 9 回試技を行った。試技順はランダムに行った。

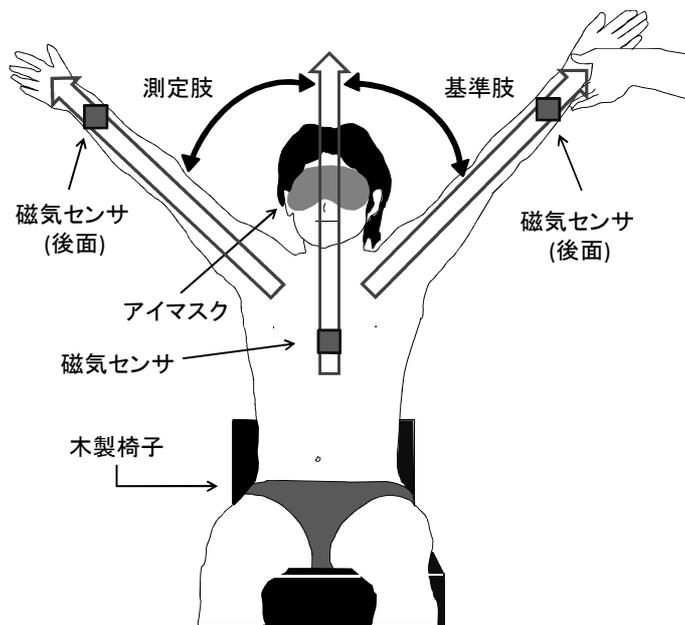


図 1-1 位置覚測定模式図

2-5 実験手順

本研究は、早稲田大学所沢キャンパス内屋内プール短水路 (水深 1.3m) で行った。実験プロトコルは図 1-2 に示した。ウォーミングアップは、測定開始前に 60 分程度行わせた。その後、センサおよび前腕部と体幹部の相対的位置取得のためのキャリブレーションを行い、位置覚の測定を行った (Pre-Test, 以下 Pre)。そして運動課題は、被験者が全力で行えるための十分な休息をはさんだ後、全力 200 m クロール泳を行った。この運動課題はスタート台上から開始させた。泳記録は、被験者がスタートの合図から 200 m を泳ぎきるまでとし、ストップウォッチ (SVAS003, SEIKO 製) で 1/100 秒まで手動で計測した。この運動課題に際して、水着の種類は特に指定しなかった。泳課題後は即座にプールサイドにて位置覚の測定を行い、その後キャリブレーションを行った (Post-Test, 以下 Post)。この手順で得られたデータを以下 Fatigue とする。

また異なる日に、Control として泳課題で要する時間と同等の 2 分程度の安静状態を Pre-Post 間に設け、位置覚を測定した。

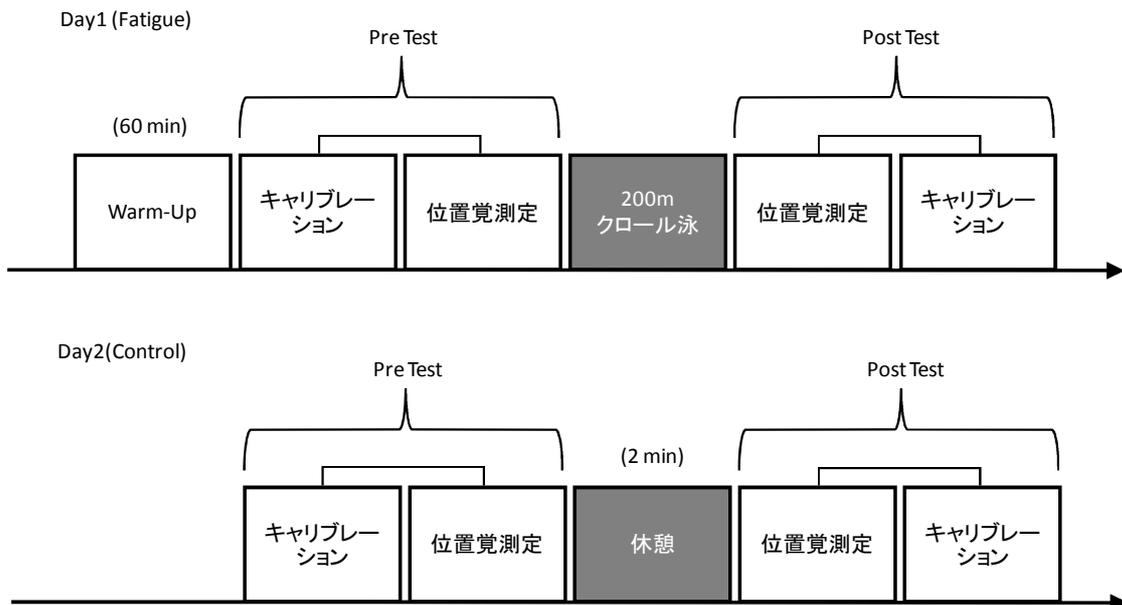


図 1-2 実験の流れ

2-6 データ解析および統計処理

本研究は、Control および Fatigue の各条件において、テスト角度毎 (水平位、中間位、垂直位) に対応のある t 検定を用いることで、Pre に対する Post の位置覚変化を評価した。また、Control 条件と Fatigue 条件における Pre-Post 間の差について対応のある t 検定を用いて比較した。すべての検定における有意水準は 5%とした。

第 3 章 実験結果

3-1 全力泳: 200 m クロール泳記録

全力での 200 m クロール泳記録を表 1 に示した. 本研究の被験者は, 日本選手権決勝進出レベルからサークル活動レベルが参加しているため, 泳記録の幅が大きくなっている.

表 1 全力泳: 200 m クロール泳記録

Subject	Time (s)
Sub 1	122.68
Sub 2	126.70
Sub 3	145.77
Sub 4	121.88
Sub 5	117.79
Sub 6	120.33
Sub 7	124.84
Sub 8	114.00
Sub 9	117.28
Sub 10	113.54
Mean	122.48
SD	9.26

3-2 泳課題前後での位置覚の変化

図 2-1 は、各測定肢位における基準肢と測定肢の差の絶対値の平均値を比較したものである。全ての肢位において、Control に比べ Fatigue が基準肢と測定肢の角度差が大きくなっていたが、有意な差は見られなかった。

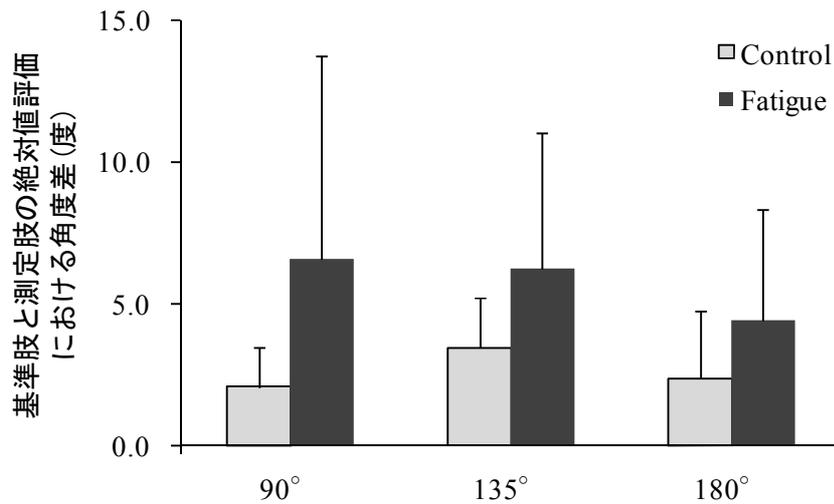


図 2-1 基準肢と測定肢の角度差の絶対値評価
灰色が Control, 黒が Fatigue を表している。標準偏差は縦方向の線分で示した。

3-3 水平位における位置覚再現性の比較

図 2-2 に水平位における位置覚を示す. Control では Pre-Post 間で変化が顕著に見られないのに対し, Fatigue では大幅に過大, 過小評価する被験者がいた. しかし各 Pre-Post 間に統計的に有意な差は見られなかった (Control: $P = 0.33$, Fatigue: $P = 0.74$).

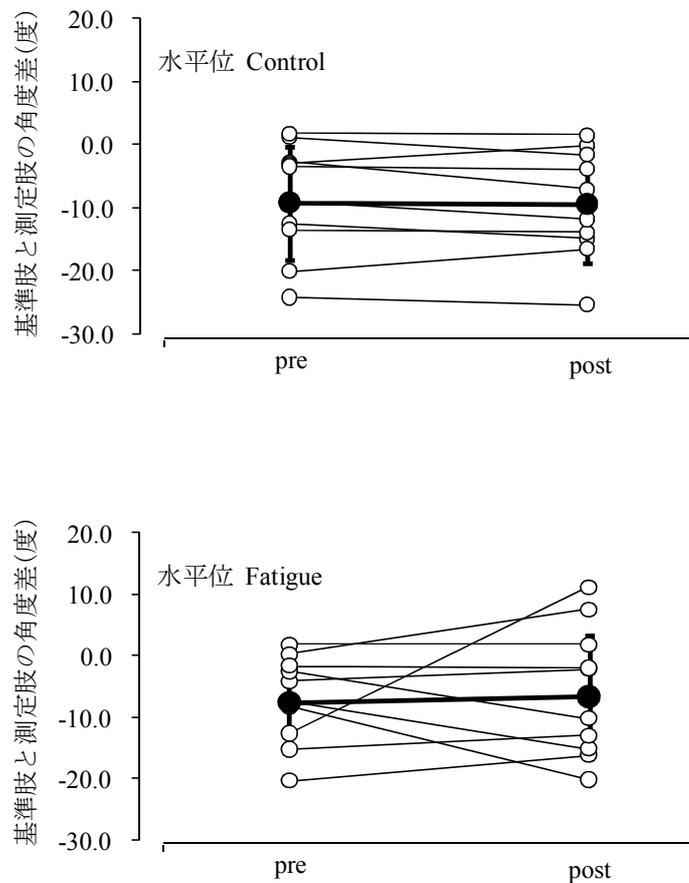


図 2-2 水平位における位置覚再現性 (上段; Control 下段; Fatigue)
被験者毎の結果を白い円で, 平均値を黒い円で示し, 標準偏差は縦方向の線分で示した. グラフの縦軸の角度差は, 正の数が基準肢に対し測定肢が過小評価 (内転), 負の数が基準肢に対し測定肢が過大評価 (外転)を表している.

3-4 中間位における位置覚再現性の比較

図 2-3 に中間位における位置覚再現性を示した (上段:Control, 下段:Fatigue). 水平位同様, Control では Pre-Post 間で変化がさほど見られないのに対し, Fatigue では大幅に過大, 過小評価する被験者がいた. しかし中間位でも各 Pre-Post 間に有意な差は見られなかった (Control: $P = 0.56$, Fatigue: $P = 0.14$).

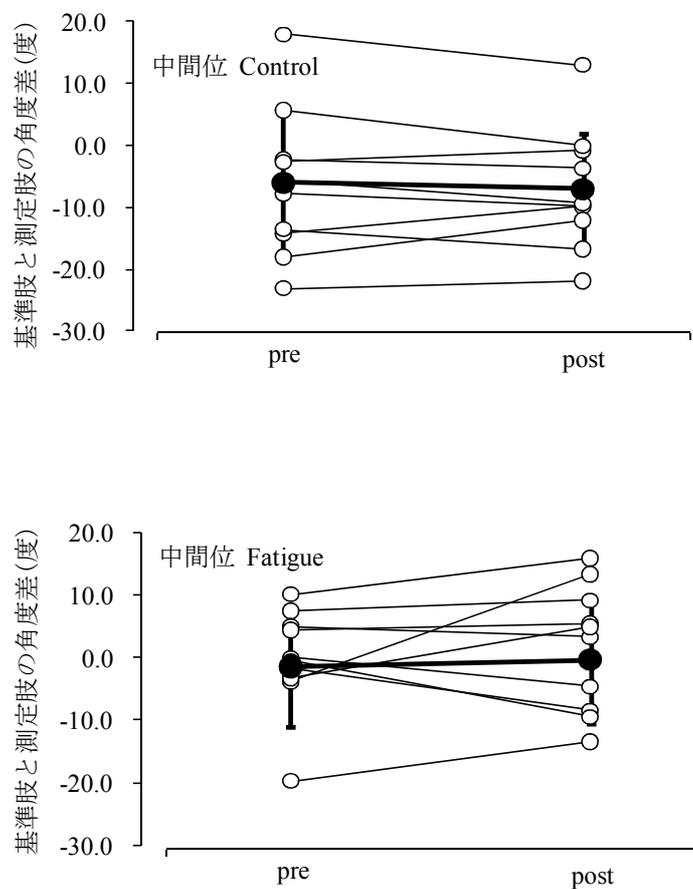


図 2-3 中間位における位置覚再現性 (上段; Control 下段; Fatigue)
被験者毎の結果を白い円で, 平均値を黒い円で示し, 標準偏差は縦方向の線分で示した. グラフの縦軸の角度差は, 正の数が基準肢に対し測定肢が過小評価 (内転), 負の数が基準肢に対し測定肢が過大評価 (外転)を表している.

3-5 垂直位における位置覚再現性の比較

図 2-4 に垂直位における位置覚再現性を示した (上段:Control, 下段:Fatigue). 垂直位では Control は水平位, 中間位同様さほど変化は見られない. しかし, Fatigue では post で一様に値が増加し, 過小評価の傾向を示した. Fatigue のみ, 統計的に有意な増加が見られた. (Control P = 0.72, Fatigue P = 0.03)

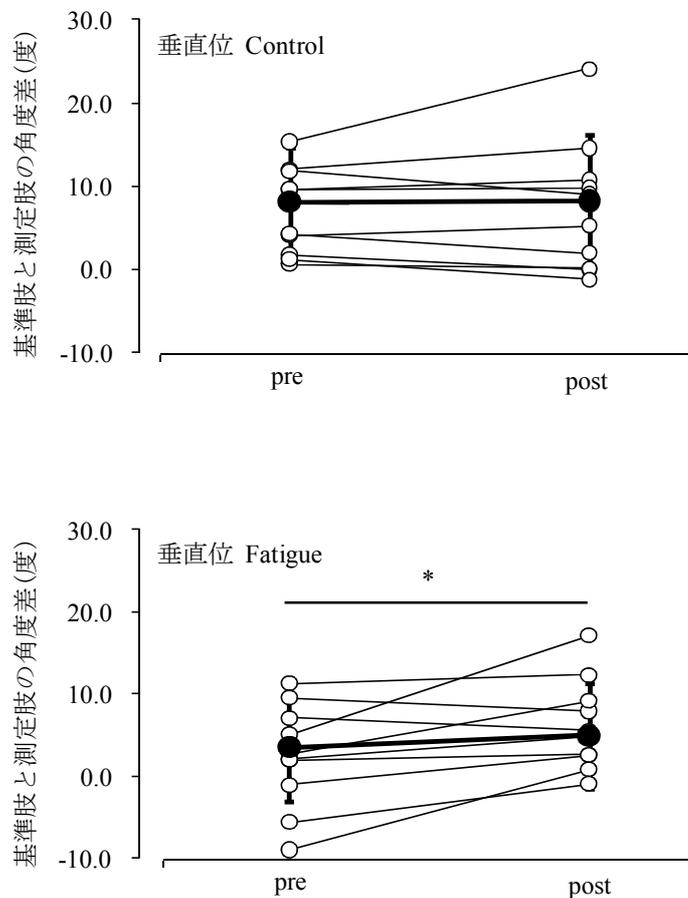


図 2-4 垂直位における位置覚再現性 (上段; Control 下段; Fatigue)
被験者毎の結果を白い円で, 平均値を黒い円で示し, 標準偏差は
縦方向の線分で示した. グラフの縦軸の角度差は, 正の数が基準
肢に対し測定肢が過小評価 (内転), 負の数が基準肢に対し測定
肢が過大評価 (外転)を表している. *: P < 0.05

第4章 考察

本研究は、全力 200m クロール泳の前後に、肩関節位置覚がどのように変化するかを、3つの肩関節外転角度課題を設定し検討した。その結果、1) 泳運動後に垂直位において有意な過小傾向が見られること、および2) 中間位、水平位においては泳運動後に位置覚が再現できていない被験者が多く見られたが、その変化は一様ではなかったことが明らかとなった。これらの現象の要因について、以下に考察する。

4-1 位置覚測定の妥当性

本研究では、泳課題を行わないControl条件におけるPreの誤差は、水平位で -7.61° 、中間位で -1.48° 、垂直位で 3.56° であった。安静座位姿勢における肘関節の位置覚を測定すると、 10° 程度の誤差が観られるという報告 (Sharpe and Miles 1993, 杉原ら 1998) と比した場合、本研究の測定値の方が低い値を示している。この理由として、遠位関節と近位関節周りの筋における筋紡錘の数が影響していると考えられる。一般に遠位より近位の関節の方が、位置覚に影響を及ぼす筋紡錘の数が多く、より小さい角度の変化を感じることができるが知られている (Schmidt and Thews 1994)。したがって、肘関節よりも近位の関節である肩関節を対象とした本研究における位置覚の方が、低い値を示したと推察できる。

4-2 運動後の位置覚再現性の変化

本研究では、泳運動後の位置覚再現性において、垂直位では有意な過小傾向が見られた。また水平位、中間位においても、一様の変化ではなかったものの、再現性が低下していることが確認された。

この結果の要因の一つとして、位置覚のメカニズムに関与する筋紡錘の活動が低下したことが考えられる。筋における最も貢献度の高い固有感覚受容器が筋紡錘であり、これは筋の長さおよび筋の収縮の度合いに反応する (杉ら 2009)。通常の随意筋の収縮

では、錘外筋を支配する α 運動ニューロンと筋紡錘を支配する γ 運動ニューロンが同時に興奮する (α - γ 連関) (Granit 1970). そのため筋力が低下すると、錘外筋を支配している α 運動ニューロンの活動が少なくなると同時に、 γ 運動ニューロンのニューロン活動も小さくなってしまふことが知られている (伊藤 1989). そして、 γ 運動ニューロンの興奮が低下すると、筋紡錘の発火活動が小さくなり、筋紡錘の働きである筋の長さおよび筋の収縮速度の測定機能が低下する (昇ら 2005). したがって、筋疲労に伴うこれらの感覚器の精度低下が、位置覚の再現性低下を引き起こしたと考えられる.

一方、肩関節の外転角度の違いにおける位置覚の変化については、泳運動後に垂直位のみ一様の内転傾向が見られ、中間位および水平位においては、変化は一様ではなかった. このことに関して、測定位の変化に伴う肩関節外転運動時のモーメントアーム (支点から筋の力発揮方向へ引いた垂線の長さ) が影響を及ぼしていた可能性が考えられる. 運動に関係する関節の角度が変化すると、筋長やモーメントアームも変化し、筋長に応じた筋張力とモーメントアームが組み合わされて実際の筋出力が得られる (山田ら 1997). そして、肩関節外転時のモーメントアームは、筋長が最も長くなる 90° で最も大きくなり、さらに挙上するにつれ、モーメントアームは小さくなっていく (上田ら 2009). モーメントアームが大きくなれば、支点にかかる負荷は大きくなる (山田ら 1997) ため、垂直位は水平位と中間位よりも肩関節周りにかかる負荷 (モーメント) が小さくなる. したがって、垂直位を取るために必要な発揮筋張力は水平位や垂直位のそれよりも低いため、肩関節屈筋群の筋活動が低かったと考えられる. そして α - γ 連関 (Granit 1970) を考慮すると、垂直位では肩関節外転筋群の α 運動ニューロンと γ 運動ニューロンの活動が低かったと推測される. 加えて、筋長が短くなると筋紡錘の発射頻度が低下する (杉ら 2009) ため、肩関節外転運動のモーメントアームと肩関節外転筋群の筋長が最も短くなる垂直位では、筋疲労由来の筋紡錘の感度低下が顕著に現れ、位置覚に一様の変化が生じたと考えられる.

本研究の方法では、筋疲労は基準肢においても生じる。このため、基準肢の肩関節外転筋群の筋紡錘においても筋疲労由来の感度低下が起こっていると想定される。つまり、基準肢の肩関節外転筋群における筋紡錘の感度低下によって基準肢の位置を誤認識することが測定肢の位置覚に影響を及ぼしていた可能性がある。この場合、測定肢の位置覚には測定姿勢によらず一様の変化が現れることになる。しかしながら、本実験では垂直位以外の測定姿勢において全力泳後に一様の位置覚変化が現れなかった。したがって、基準肢よりも測定肢の筋紡錘の感度変化の方が本実験結果の主要因であったと思われる。

4-3 位置覚変化が泳運動に及ぼす影響

クロール泳におけるストローク動作はエントリー、ダウンスweep、キャッチ、インスweep、アップスweep、リカバリーの局面に細分化することができる (Maglischo 2003)。本研究における垂直位のポジションは、ストローク動作に置き換えると、水中へ掌が入り、腕を下方に動かし始める、エントリーからダウンスweep局面に相当する。本研究では、垂直位において、泳運動後に一様に過小評価、つまり内転方向への変化が観察された。すなわち、クロール泳でのエントリー局面において、疲労が発生するレース後半では、レース前半と比して泳者の想定よりも外側に入水している可能性が考えられる。

また、クロール泳は、推進力を得るために体幹部を捻る動作を利用するため、本研究の水平位および中間位は、ストローク動作中に置き換えると、腕に力を入れ、後方に押し出すインスweep局面に類似している。この2条件においては、被験者毎に個人差が見られ、一様な変化は見られなかった。すなわち、筋疲労が発生するとレース前半のストロークの軌跡を再現することはできないが、個人毎にストロークの軌跡が違うことが推察できる。

上記のように、位置覚の観点からレース後半のストローク動作に対して提言を行ったが、本研究は泳運動後にプールサイドにて位置覚を測定しているため、水中は陸上よりも関節角度認識の誤差が大きくなるという報告 (鈴木ら 2006) を踏まえると、実際の泳動作中は、本研究の測定値よりもさらに大きな誤差が生じている可能性も考えられる。

4-4 今後の課題及び展望

本研究の測定は、3次元磁気式位置計測システムを用いて行った。このシステムのメリットとして、1つのデータから空間座標でのデータを得られることが挙げられる。本研究のデータ解析の際には、前額面上での平面座標での変化のみを解析したが、このデータから矢状面および水平面上での差異も検討することが可能である。したがって、今後は、本研究のデータを用いて、3次元で解析する必要があるだろう。それが検証されれば、泳動作特有の筋疲労後のストローク動作の変化において、さらに深く言及することが可能であり、競技力向上の一助となるであろう。

本研究の位置覚の測定では、上肢を一定の肢位に保持し、対側肢をその角度に模倣させる方法で行った。しかし、その角度を設定する角速度に関しては、一定ではなかった。杉原ら (2004) は、膝関節の位置覚を角速度 $10^{\circ}/s$ および $70^{\circ}/s$ で測定し、その結果、角速度 $70^{\circ}/s$ の方が位置覚を誤認しやすいと報告した。もし、角速度を一定にコントロールすることができれば、より正確に位置覚を測定できると考えられる。

また泳運動後に位置覚を測定した際に、複数の被験者から「座位では上肢の挙上がきつかった」という内省報告が聞かれた。そのことが、測定肢の角度に過度の異常をきたした可能性も考えられる。実験の際にとらせた姿勢については、重力の影響も考慮し、より泳動作の姿勢に則した腹臥位にて行うべきであったとも考えられる。このことに関しても、さらなる研究が必要である。

さらに、金田ら (2010) は、水中環境での肘関節の位置覚評価は、陸上環境と比較して有意に過小評価すると報告している。また、水中環境では空気中のおよそ 800 倍の密度があるため、水中では陸上に比し、皮膚からの情報も位置覚に大きく影響していると考察している。すなわち、水中では水の物理的な影響によって関節角度の調整戦略が異なっていることを示している。今後、水中環境での位置覚メカニズムに関する詳細な検討をすることも、泳動作に効果的な提案をすることができるであろう。

4-5 結論

本研究は、全力 200m クロール泳の前後に、肩関節位置覚がどのように変化するかを、3 つの肩関節外転角度課題を設定し検討した。

その結果、泳運動後は全ての設定角度において、再現性が低下していることが確認された。泳運動後の変化の傾向は、垂直位においては一様に内転の傾向が見られ、中間位および水平位においては、変化は一様ではないことが明らかとなった。

謝辞

本研究を行うにあたり、学部在籍時から6年間に渡り、指導をしてくださった指導教員の奥野景介准教授に心から謝意を表します。さらに、助言ならびに指導をして頂いた副査の金岡恒治准教授、矢内利政教授に心より御礼申し上げます。

また、研究計画の相談や幾度に渡る添削を快く引き受けてくださった人間科学研究科の植松梓さんなしではこの論文は完成しませんでした。さらに、データ解析に尽力してくださった人間科学研究科の井上恒さんにも多大なご助力を賜りました。両名に厚く御礼申し上げます。

そして、研究を行うにあたり、予備実験、本実験と何度も協力してもらい、執筆にあたっては常に互いを鼓舞し合い共に論文を完成させた、奥野研究室の大学院生にも深く感謝の意を表します。

最後に、いつも温かく見守ってくださり、大学院に進学することも快く了承してくださった、家族に深く感謝の意を表します。

2010年1月11日

栗田康弘

参考文献

Allen TJ, Leung M, Proske U (2010) The effect of fatigue from exercise on human limb position sense. *Journal of Physiology* 588: 1369-1377

Aujouannet YA, Bonifazi M, Hintzy F, Vuillerme N, Rouard AH (2006) Effects of a high-intensity swim test on kinematic parameters in high-level athletes. *Applied Physiology Nutrition and Metabolism* 31: 150-158

Craig Jr. AB and Pendergast DR (1979) Relationships of stroke rate, distance per stroke, and velocity in competitive swimming. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 11: 278-283

Deschodt JV, Arsac LM, Rouard AH (1999) Relative contribution of arms and legs in humans to propulsion in 25-m sprint front-crawl swimming. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 80: 192-199

Federation Internationale De Natation (FINA) Swimming Rules.

http://www.fina.org/H2O/index.php?option=com_content&view=category&id=82:swimming-rules&Itemid=184&layout=default (Accessed 10th December 2010)

Gandevia SC (1985) Illusory movements produced by electrical stimulation of low-threshold muscle afferents from the hand. *Brain* 108: 965-981

Givoni NJ, Pham T, Allen TJ, Proske U (2007) The effect of quadriceps muscle fatigue on position matching at the knee. *Journal of Physiology* 584: 111-119

Granit R (1970) The basis of motor control. London, Academic Press

Hollerbach JM (1982) Computers, brains and the control of movement. *Trends in Neurosciences* 5: 189-192

生田泰志, 奥野景介, 松井健, 寺田晶裕, 小堀優子, 若吉浩二, 野村照夫 (1998) 自由形短距離種目における泳速度, ストローク頻度およびストローク長の関係. 日本体育学会大会号, 49: 478

生田泰志, 松田有司, 山田陽介, 来田宣幸, 小田伸午 (2010) クロール泳における泳速度, ストローク頻度およびストローク長の変化と筋活動の関係. 体力科学, 59: 427-438

伊藤文雄 (1989) 筋感覚からみた運動制御. 名古屋大学出版会, 愛知: pp17-161

金田晃一, 速水達也, 仰木裕嗣, 椿本昇三 (2010) 肘関節屈曲動作を用いた大学男子競泳選手の水中での関節位置覚. 2010年度日本水泳・水中運動学会抄録集: pp108-109

Kawato M, Furukawa K, Suzuki R (1987) A hierarchical neural network model for control and learning of voluntary movement. *Biological Cybernetics* 57: 169-185

川人光男 (1996) 脳の計算理論. 産業図書, 東京: pp75-190

Latash ML (2002) 運動神経生理学講義. 大修館書店, 東京: pp213-227

Macefield G, Gandevia SC, Burke D (1990) Perceptual responses to microstimulation of single afferents innervating joints, muscles and skin of the human hand. *Journal of Physiology* 429: 113-129

Maglischo EW (2003) *Swimming Fastest*. Illinois, Human Kinetics: pp95-145

松井健, 寺田晶裕, 立貞栄司, 本部洋介, 生田泰志, 若吉浩二, 野村照夫 (1998) 競泳レースにおける 5m 毎の泳速度とストローク変数の変化-日本選手権 200m 自由形種目における泳力別比較. スポーツ方法学研究 11: 87-93

Miller DI (1975) Biomechanics of swimming. *Exercise and Sport Sciences Reviews* (Edited by Wilmore JH and Keogh JF): 219-248

宮下充正 (1978) どうして競泳記録は急激に更新されるのか—水泳記録を規定する因子. 体育の科学 28: 559-563

昇寛, 丸山仁司, 高橋直子 (2005) 膝関節固有トルクと膝関節トルクの関係についての一考察. 理学療法科学 20: 43-48

荻田太 (1999) 水泳中の無酸素性エネルギー供給動態. 水泳水中運動科学 2: 47-56

Rothwell JC, Traub MM, Day BL, Obeso JA, Thomas PK, Marsden CD (1982) Manual motor performance in a deafferented man. *Brain* 105: 515-542

Schmidt RF, Thews G, 佐藤昭夫訳 (1994) スタンダード人体生理学. シュプリンガー・フェアラー東京, 東京: pp208

Sharpe MH, Miles TS (1993) Position Sense at the elbow after fatiguing contractions. *Experimental Brain Research* 94: 179-182

杉原敏道, 有馬慶美, 平林弦大, 郷貴大, 小川恵一 (1998) 筋活動が位置覚に与える影響. 理学療法学 25 (学会特別号): 538

杉原敏道, 郷貴大, 高橋玲子, 三島誠一, 武田貴好, 有馬慶美 (2004) 角度設定する際の角速度の相違による膝関節位置覚への影響. *理学療法科学* 19: 75-79

杉晴夫編著, 宮崎俊一, 岡戸晴生, 石井邦雄, 金子章道, 栗原敏, 三枝木泰丈, 中山貢一, 吉岡利忠, 明間立雄共著 (2009) 人体機能生理学 改訂第 5 版. 南江堂, 東京: pp89-169

Suito H, Ikegami Y, Nunome H, Sano S, Shinkai H, Tsujimoto N (2008) The effect of fatigue on the underwater arm stroke motion in the 100-m front crawl. *Journal of Applied Biomechanics* 24: 316-324

鈴木淳也, 駒形大介, 野口智博 (2006) 水中における身体の位置感覚と動作能力に関する研究. *桜門体育学研究* 41: 45-54

田崎京二, 小川哲郎 (1989) 新生理科学大系 第 9 巻 感覚の生理学. 医学書院, 東京: pp308-309

Toussaint HM, Carol A, Kranenborg H, Truijens MJ (2006) Effect of fatigue on stroking characteristics in an arms-only 100-m front-crawl race. *Medicine and Science in Sports and Exercise* 38: 1635-1642

上田泰之, 浦辺幸夫, 山中悠紀, 宮里幸, 野村真嗣 (2009) 上肢挙上運動時の負荷が肩甲骨および体幹の運動に及ぼす影響. *理学療法科学* 24: 323-328

Wakayoshi K, Yoshida T, Udo M, Harada T, Moritani T, Mutoh Y, Miyashita M (1993) Does Critical swimming velocity represent exercise intensity at maximal lactate steady state? *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology* 66: 90-95

若吉浩二 (1997) 水泳の競技力の評価とその指導への応用. 東京大学 博士論文

山田茂, 福永哲夫編著 (1997) 骨格筋—運動による機能と形態の変化—. ナップ, 東京: pp1-28

矢澤浩成, 戸田香, 對馬明, 宮本靖義, 細川厚子, 富永敬三, 戸田秀彦, 飯田博己, 加藤貴志 (2008) 肩関節位置覚と身体イメージによる位置認識能力の検討. 理学療法学 35: 770