

手首で計測した加速度と水中映像による クロール泳のストローク技術の観察

Observation of the stroke technique on freestyle swimming by using the swimmer's wrist acceleration and the underwater videography

仰木裕嗣(OHGI Yuji)
市川浩(ICHIKAWA Hiroshi)
本間正信(HOMMA Masanobu)
宮地力(MIYAJI Chikara)

慶應義塾大学環境情報学部
筑波大学大学院体育科学研究科
神戸商船大学商船学部
国立スポーツ科学センター

〔要旨〕

本研究の目的は、小型加速度センサICを用いてクロール泳中の手首加速度を計測し、手首加速度によるクロール泳のストローク技術評価の可能性を検討するものである。実験ではストロークの水中局面を撮影する2台のカメラから水中映像を取得し、DLT法によって絶対座標系における手先軌道を復元した。加速度波形に現れる特徴を同時刻の手先の位置座標に基づき検討した。その結果、Maglischo⁶⁾の提唱するストローク局面のうち、Entry and Stretch, Downsweep, Insweep, Upsweepの各局面が加速度波形の特徴点から推測できることが明らかになった。また入水時のx軸加速度およびz軸加速度に現れる加速度の絶対値によって入水時の手掌部の向きが推測することも可能であることから、ストローク技能の判定にも用いることができる新たな手法であることが確認された。

◆キーワード：加速度センサIC, 手首加速度, 3次元映像解析, クロール泳, ストローク技術評価

1. 緒言

クロール泳の推進力の大部分は上肢の運動によるものであると考えられていることから¹⁾、これまで多くの研究は上肢の動きの解析に注がれてきた。特に手掌部の動きは重要とされ、様々な手法によって研究が行われてきた。これらを大きく大別すると、1)実験的手法による手掌部の流体力解析、2)数値流体シミュレーション、3)水中映像による3次元映像解析に分類される。

Schleihauf¹⁰⁾、Berger・Groot²⁾は手掌部または手掌部と前腕の物理形状モデルを作成し手掌部が水から受ける流体力を測定し、迎え角に応じた抗力係数および揚力係数の推定値を報告している。清水ほか¹¹⁾は流水プールではなくエアチャンパ内で手掌部モデルの詳細な圧力分布を計測し、より精密な抗力係数・揚力係数を推定している。このような実験研究とは対照的に近年の計算機能力の向上によって数値流体(CFD: Computational Fluid Dynamics)シミュレーションも盛んに行われるようになってきた。

對馬ほか¹²⁾は手掌部のサーフェスモデルの数値流体シミュレーションによってスカーリング動作中の抗力および揚力を推定している。これらの先行研究では、計測およびシミュレーションの対象とされる部位が手掌部または手掌部と前腕部に限られているため上肢全体に作用する流体力を未だ完全に推定できていない。また流体力や抗力係数・揚力係数を同定できたとしても上肢全体の動かし方についての示唆が直接得られるわけではない。従って上肢全体の動きを観察する映像解析は依然、研究手法としての優位性を保っているといえる。Cappaert et al.³⁾はバルセロナオリンピック男子100m自由形において水中ストロークを3次元分析によって解析し、記録上位群では水から受ける流体力のうち推進力成分が必ずしも大きくないことから、記録上位群被験者の水中でのストリームライン姿勢が優れていることを指摘した。Liu et al.^{4,5)}は、クロール泳のストロークを3次元解析し、体幹のローリング動作とストローク軌跡の関係について報告し、更にシ

ミュレーションによって体幹の動きと手先軌道を再現した。こうした一流水泳選手の水中ストローク軌跡を3次元映像解析によって求め、その技能を提示することはコーチ、選手にとっては受け入れやすい情報であると言える。ところがストロークの水中軌道を3次元映像解析によって求めることは多大な時間を要するために、コーチング現場で即座にフィードバックすることは不可能である。従って、選手のスローク技術を観察するための新たな手法が望まれている。そこで、本研究は小型加速度センサICを用いてクロール泳における手首加速度を計測し、同時にストロークの水中3次元映像解析を併用することで、手首加速度からのストローク技術評価の可能性を検証することを目的とした。

2. 方法

2-1. 加速度センサ

加速度センサにはAnalogDevices社の加速度センサIC、ADXL250を用いた。ADXL250は超小型のLSI(W9.0×D10.0×H5.4 mm)であり直交するx軸、y軸の2軸加速度を計測可能である。このADXL250を2個ユニバーサル基盤上に配置した。そのうち1つは基盤平面と垂直に配置し、異なる3軸全ての加速度を計測できるようにした。センサを取り付けた基盤は、腕時計ケース内部に入れた後防水加工を施した(図1)。この加速度センサ内蔵の計測用デバイスを、被験者の右腕手首に装着した。その際、最大限装置全体がずれることのないようきつく締め付けた。なお加速度センサへの電源供給および加速度センサからの信号出力は全て有線で行った。ここで混乱を避けるために、加速度センサの配置とその感度軸に関して説明しておく。図2は被験者の手首に固定された加速度センサデバイスの感度軸を示している。図中の矢印は静止状態の加速度センサをそれぞれの軸方向に動かしたときに得られる加速度の正負の向きを示している。x軸加速度は、右手のひらを鉛直下向きにした状態で左方向に動かした場合に正の加速度を生じる。z軸加速度は右手のひらを下向きにして静止させた状態から鉛直上方向に動かした場合に正の加速度を生じる。y軸加速度は上腕の長軸方向の軸に関する加速度であり、水平面上で静止状態から腕を体幹方向に引き戻す動作によって正の加速度を生じる。回転については肘関節を伸ばした状態で肩関節中心の回転運動を行うと遠心加速度によって正の加速度を出力する。同様に肘関節の屈曲伸張動作による運動でも正の遠心加速度を

生じる。回転運動においては回転の向きに関わらず加速度センサからは正の加速度が観測される。

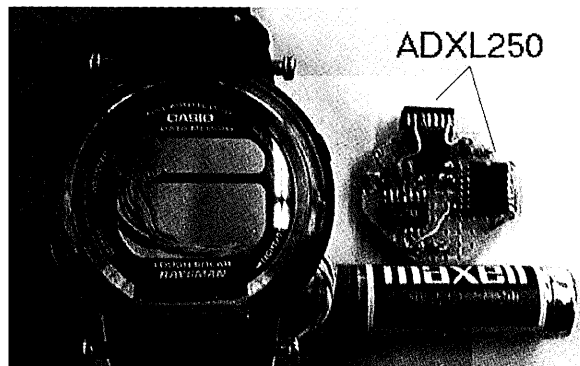


図1 実験用加速度センサデバイス概観

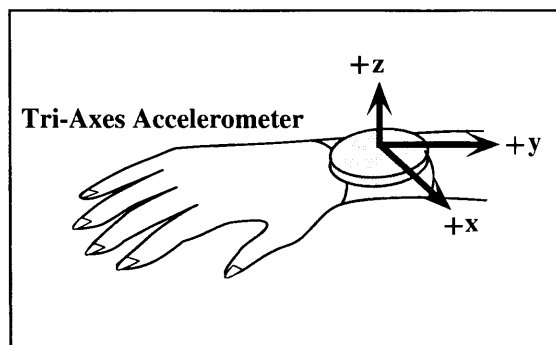


図2 加速度センサデバイスの軸設定

2-2. 水中映像

加速度センサから得られた加速度波形の特徴と水中動作とを対応付けるため、2台のカメラによって被験者の水中動作を撮影した。被験者の進行方向右下からは水中カメラによって、右側面からは水中窓を通して撮影を行った。ビデオカメラからの映像出力はビデオフレームカウンタを通した後にHi8ビデオレコーダーに記録された。ビデオフレームカウンタはNTSCビデオ出力のodd/evenフレームに対応するカウンタを出力する。このフレームカウンタ信号を加速度センサからの出力信号と同時に記録することで加速度信号と映像との同期を行った。アナログデータは全てノートブックコンピュータ上のPCMCIA型A/Dコンバーター(National Instruments, DAQCard700)を用いてA/D変換を行い記録した。得られた加速度信号はバターワース型IIRデジタルフィルタによって遮断周波数6[Hz]にて平滑化を行った。

2-3. 被験者および試技内容

被験者は大学水泳部に所属する競泳部員2名(男1名、女

1名)である。いずれも大学競泳選手権上位に入賞する実力を持った選手であり、水泳技能は十分に高いと考えてよい。泳法はクロール泳とした。泳速度は、被験者の主観的判断により、ミドルスピード(ATスピード程度)およびファーストスピード(全力泳)の2段階とした。

2-4. DLT法による手先軌道復元

2台のカメラによって撮影された画像を元にDLT法によって絶対座標系における手先(中指骨先端部)の3次元軌道を求めた。その際、泡によって手先が水中カメラによって撮影できないフレームが出現する。これを解析対象にすることは望ましくないと考えられるために、画像が不鮮明であった座標データを取り除いたうえでxyz軸各加速度データを多項式に近似し、近似式から元時刻における位置座標を再構成した。この再構成された位置座標を用いて以後解析を行った。この手法の概略を図3に示した。絶対座標系はプールに固定されたものとし、泳者の進行方向をY軸とし鉛直上向きをZ軸とする右手座標系とした。ただし手先軌道を図示する上で理解し易くするために右手エントリ位置を原点とする座標によって図示するものとした。

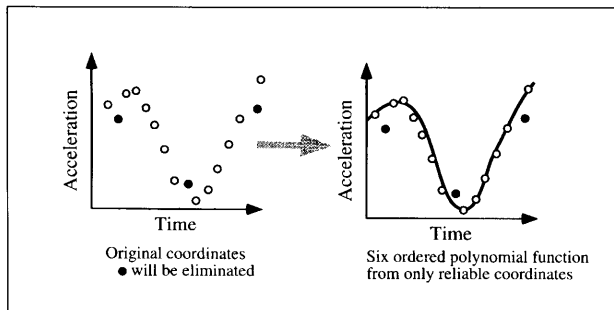


図3 多項式近似法の概念図

3. 結果

3-1. Maglischoによるストローク局面の分類

Maglischo⁶⁾は、クロール泳における腕の水中動作の局面を次のように5つに分類している。Entry and Stretch(エントリとストレッチ局面)、Downsweep and Catch(ダウンスweep局面とキャッチ)、Insweep(インスweep局面)、Upsweep(アップスweep局面)、Release and Recovery(リリースとリカバリ局面)。このうち、エントリおよびリリース、さらにキャッチに関しては、事象の瞬間を説明する言語表現であり他の呼称はストロークの各局面の時間的広がりを説明しているものであると理解される。本研究では、このMaglischoによって説明

されるストロークの局面分けに従って分析を進める。

3-2. 加速度波形

実験において得られた加速度は、x軸、y軸、z軸のいずれも周期的で極めて似た波形の連続であることが分かった。本論文では完全に2台のカメラによって1ストロークが撮影できたストロークの加速度を抽出し、右手Entryから次の右手Entryまでの加速度波形を図示した。図4、図5は被験者Mと被験者Hのミドルスピードおよびファーストスピードにおける手首加速度を示している。図中に示された記号A(時間軸原点)は右手Entry時刻を示し、記号Fは右手Releaseの時刻を示している。他の記号B,C,D,Eに関しては加速度波形によって特徴付けられる時刻を示している。区間AAから、ミドルスピードからファーストスピードへの速度増加に伴って1ストロークに要する時間は減少していることが分かるが、両被験者の加速度波形は速度が変化しても各軸それぞれ似通っていることも図から読み取れる。仰木ほか^{7,8)}は、歪みゲージ型3軸加速度センサを用いて、低速、中速、高速の3段階の泳速度において手首加速度を計測している。その結果1サイクル時間を[0,1]に規格化し各加速度を重ね合わせると、各被験者内で加速度波形は非常に似たものであることを報告している。本実験結果はこれを裏付ける結果であると言える。

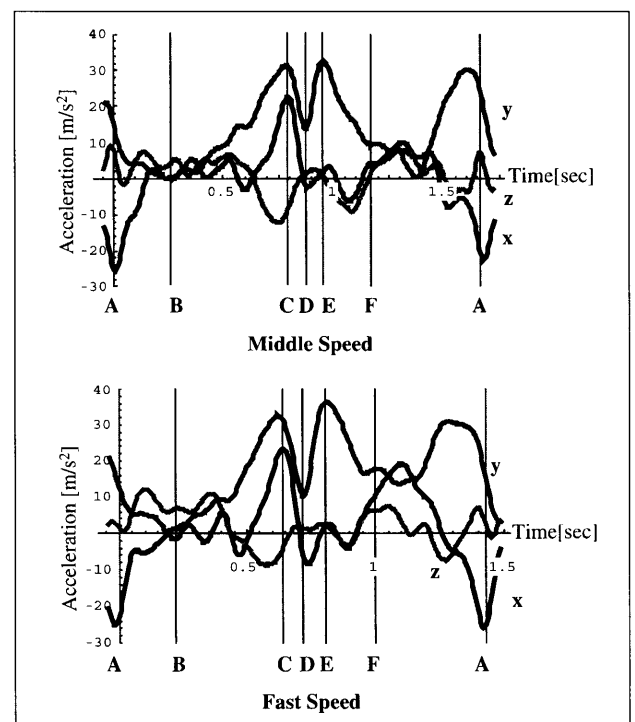


図4 被験者Mの加速度波形(上:ミドルスピード、下:ファーストスピード)

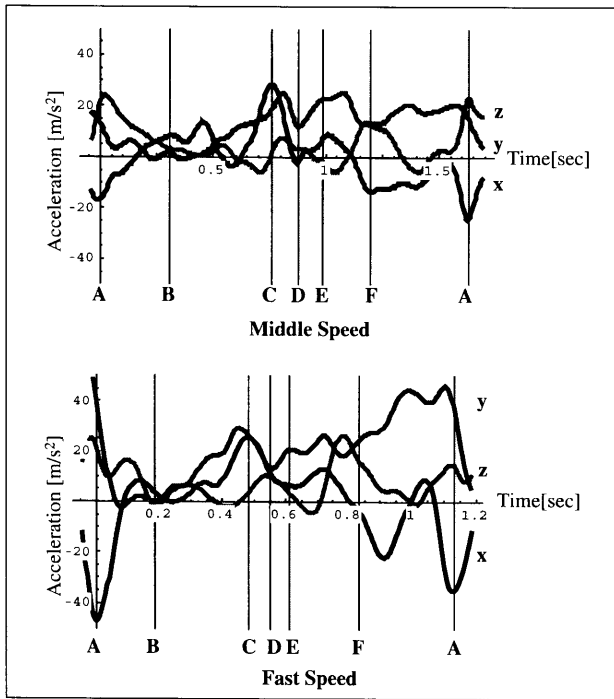


図5 被験者Hの加速度波形 (上:ミドルスピード、下:ファーストスピード)

3-3. 手先軌道

被験者Mおよび被験者Hのミドルスピードおよびファーストスピードにおける手先軌道を図6～図9に示す。先述したように比較を容易にするため右手Entry位置を図の原点としている。図中に示した点は撮影された各フレームに相当する時刻における手先位置座標の3次元表示およびXY面、YZ面、XZ面の各平面に投影した図である。

被験者Mにおいては、ミドルスピード、ファーストスピードでの手先軌道はよく似ている。両速度においてリリース地点がEntry地点の前方にあることから推進効率の高い泳ぎをしていることが推測される。被験者Hの場合、手先はEntry後に泳者の進行方向に向かって移動し、いわゆる「グライド」と呼ばれる動作を行っていることが観察される。ミドルスピードにおいてRelease地点はEntry地点よりも前方に位置しているにも関わらず、全力で泳いだファーストスピードの試技においてはRelease地点がEntry地点の後方にあり、速度増加に伴って推進効率が低下していることが分る。またこのRelease地点がEntry地

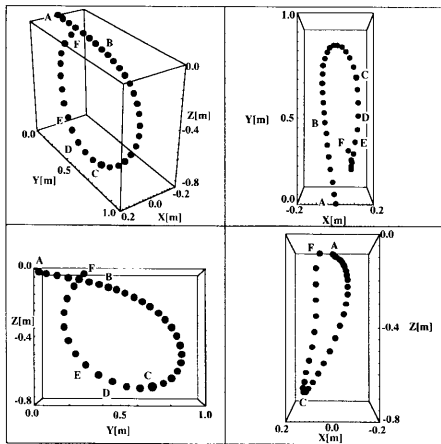


図6 被験者Mの手先軌道 (ミドルスピード)

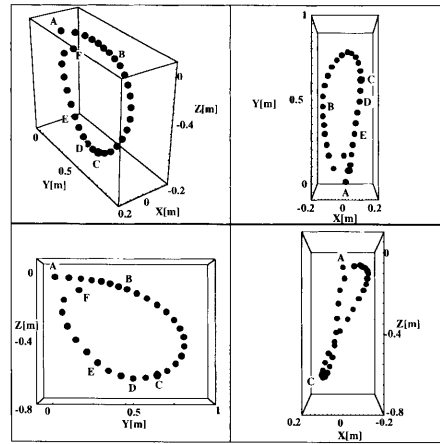


図7 被験者Mの手先軌道 (ファーストスピード)

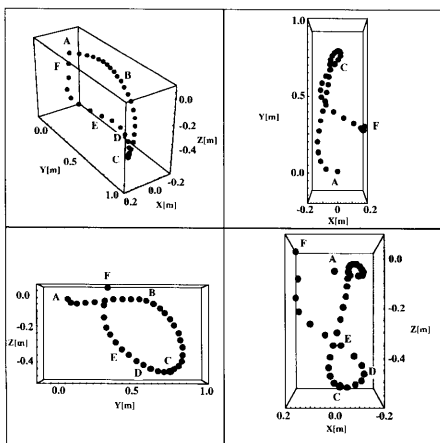


図8 被験者Hの手先軌道 (ミドルスピード)

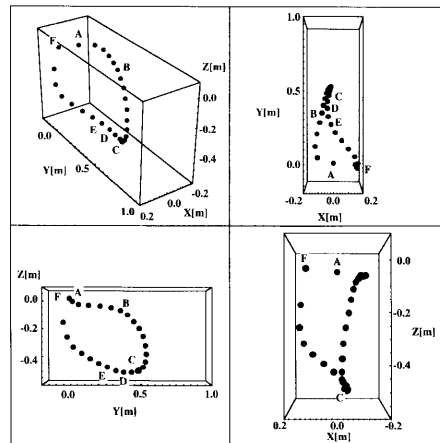


図9 被験者Hの手先軌道 (ファーストスピード)

点から見て右側方に離れていることもこの被験者のストロークの特徴であると言える。これはこの被験者の入水時の手先位置が指導書にあるように肩の延長上ではなく、体幹長軸に近い場所に入水していることが原因である。エントリー後に手先が体幹の中央に向かって移動しその後前方に移動していることから手掌部によって推進力を産み出さない動作を行っていることも推測される。被験者Hでは、ミドルスピードにおいて手先が体幹に向かって移動するInsweepがわずかに行われているものの、ファーストスピードにおいては体幹に向かっての手先の移動はほとんど見られず、体幹から離れてゆく方向への移動が目立つことも特徴である。

4. 考察

4-1. x軸加速度

加速度信号を示した図4、図5において、A点は映像から求めた右手入水の時刻を示している。図からこの瞬間x軸加速度に最小値が生じていることが分かる。これは入水時に手掌部と水面との衝突によって起こる衝撃加速度に起因すると思われる。このx軸加速度は1サイクルで見ると最小値であり、連続する時系列としてみると周期的に出現する極小値である。従ってこの極小値を観測することによって正確にクロール泳のストローク頻度を知ることができる。極小値間の時間幅を τ [sec]とするとストローク頻度は、 $60/\tau$ [回/min]である。競泳レースにおいて過剰なストローク頻度はレース後半に乳酸の蓄積による疲労を招き結果としてパフォーマンスの低下を招く。従って選手およびコーチは、選手個人個人の能力に応じた最適なストローク頻度を知っておく必要がある。加速度信号によって正確なストローク頻度を簡便に把握できることはコーチング現場で有用であろう。

x軸加速度は、その1サイクル区間の中間付近において極大値を生じる。これを図中に記号Cで示した。被験者MのファーストスピードにおいてはRecovery局面においてx軸加速度の極大値を示し、これが1サイクル中最大値であることも観察されたが、他の条件下では水中局面において、この1サイクル区間の中間付近において観察される極大値が1サイクル中の最大値であった。記号Cで示した瞬間、手先は図6～図9上の記号C点に存在する。手先3次元座標からこのx軸加速度極大値を示す時刻Cでは手先は体幹から最も離れた位置付近、且つ水深方向に最も深い位置に存在することが分る。従って体幹へ向かってのかき込み

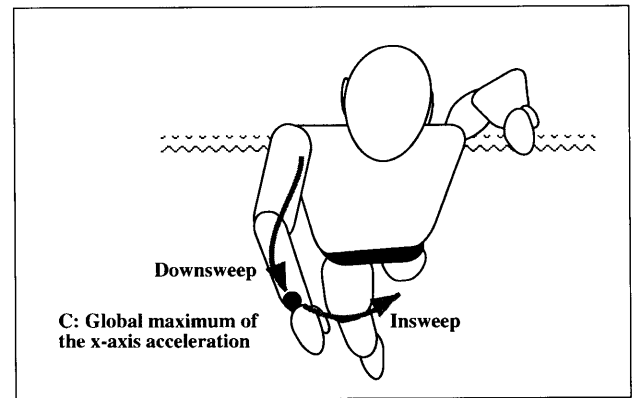


図10 x軸加速度極大値C点の動き

動作、すなわちInsweepの開始時期にあることが推測される。この位置においてx軸加速度の極大値が出現するということは、通常この位置では指先が鉛直下向きに向いていることを考慮すると、動作として図10のような運動方向の転換が推測され、親指を先行させた状態で動きが行われていると考えられる。このようにx軸加速度の極大値は、手先が最深部に到達したMaglischoの分類によるInsweep局面の開始時期をほぼ示しているといえる。

手先が水中より空中へ移行する瞬間、すなわちRelease後被験者Mではx軸加速度は正の値を示した後に負の値を示す。ところが、被験者Hでは負の値を示した後、一度極大値を示し次の入水が行われる。これは両被験者間で全く異なる傾向である。また速度が増加すると両被験者共にこの間のx軸加速度の振幅が増大している所に特徴がある。この原因については水中手先軌道のみを今回実験で撮影したために映像からの示唆は得られないため、推測することが出来なかった。

4-2. y軸加速度

y軸加速度は泳動作中、常に正または0以上の値を取ることが明らかになった。y軸は前腕長軸方向に一致し、上肢の回転運動によって遠心加速度を原因とする正の加速度を出力することから、クロール泳では肩関節回りの回転運動が原因でy軸加速度に正の値が出力されているのではないかと考えられる。

Release後に手先は空中を移動するが、この区間において肩関節回り、肘関節回りには水中局面よりも速い回転運動が生じていると考えられる。実際この区間においてy軸加速度には比較的大きな正の値が生じている。加速度波形を示す一連の図から分るように、Entry後にy軸加速度は徐々に小さくなりほぼ 0m/s^2 となる。これを図中記

号Bで示した。この時刻の手先軌道を観察すると図6～図9中のB点に相当する。Entryを示すA点からB点に至る局面のことをMaglischoはStretchと呼んでいる。泳者から見て手先を前方に伸ばす動作のことである。絶対座標系における手先軌道も進行方向へと移動していることが分かる。このB点を通過した後、手先軌道は水深方向へ移動していく。従って前方に手先を伸ばす動作によって前腕の回転が抑制されることが、y軸加速度が 0m/s^2 に近づく原因であると考えられる。更にx軸加速度に最小値が出現した時刻、すなわちEntryからy軸加速度が 0m/s^2 になるまでの区間がStretch局面であると考えられる。同様に、y軸加速度によって特徴付けられる時刻Bからx軸加速度の項で述べた時刻C (Insweepの開始) までがDownsweep局面であると言える。

x軸加速度が水中において極大値をもつ時刻は手先軌道がほぼ体幹より最も右側方に離れかつ水深方向の最大値を示すことをすでに述べたが、これとほぼ同時にy軸加速度にも極大値が出現する。この極大値が出現したのちy軸加速度は急激に小さくなり極小値をもつ(D点)。この後、y軸加速度は再び極大値を示す (E点)。この極小値が出現する原因を考えてみると、Insweep時には通常体幹のローリングに加えて肩関節の伸展と肘関節の屈曲を伴う動きが行われる。ここで肘関節の屈曲が行われるとするならば手首で観測される遠心加速度の回転半径は短くなる。このことがy軸加速度に極小値を生じさせる原因の一つではないかと考えられる。この極小値が、Insweep開始直後(C点) に生じていることもこの考えを支持するものである。次にE点においてy軸加速度に極大値が生じる原因であるが、Insweep局面において体幹に近付いた後に、手先は肩関節の伸展と肘関節の伸展によって加速しながら水面へと向かい移動する。これはすなわちUpsweepを意味するが、この時肘関節が伸展することは回転半径の増加を生じることから遠心加速度成分による影響を大きく受けていると考えられるy軸加速度に極大値が生じた可能性が考えられる。またこの局面においては選手は自らの手掌部を加速してかくことを指導されているためにUpsweep局面中に遠心加速度の極大値が生じている可能性がある。y軸加速度波形の特徴および手先位置座標からみてD点よりUpsweepが開始されているものとみなしてもよからう。y軸加速度では、Entry後のy軸加速度の0近傍時刻、および極大値/極小値/極大値という一連の波形の変化から、Maglischoの説明する、Stretchおよび、

InsweepからUpsweepの開始までの時刻を知ることが出来る。

4-3. z軸加速度

z軸加速度は手掌部を貫く軸に関する加速度であり、ストローク中、手掌部のもつ速度ベクトルと手掌部のなす角度に大きく影響を受けると考えられる。z軸加速度には、その波形中にx軸加速度とy軸加速度に見られるような明確な極大値、極小値が認められないが、被験者内では速度変動に関わらず極大値と極小値の出現に順序性が認められる。従って個人内では1ストローク中に手掌部の動く方向と手掌部のなす角度、すなわち迎え角の出現に一連の順序性が存在することが示唆される。また水中の1サイクル中に繰り返しz軸加速度に正負の値が生じることはかきの最中に頻りに迎え角を調節していることを示していると考えられる。有効な推進力を手のかきによって生じせしめるためには最適な迎え角を常にとらなければならない。このような調節動作を被験者が行っていたものと考えられる。

x軸加速度の項で述べたようにEntry時にx軸加速度に手掌部と水面との衝突に起因すると考えられる極小値が出現するが、この瞬間z軸加速度には正の加速度が生じていることが分る。しかしながら被験者Mでは絶対値としては小さく $0\sim 10\text{m/s}^2$ であり、被験者Hでは $20\sim 25\text{m/s}^2$ と大きな値を示している違いがある。ここで空中を移動してきた手掌部が水面と衝突する現象を推測すると、迎え角が小さく手掌部がフラットに水面と衝突する場合、z軸加速度は大きくなることが予想される。逆に一流選手の技術として重要視される大きく迎え角を保ち親指入水を行った場合、衝突によって生じる加速度のうちz軸に現れる加速度成分は小さいことが予想される。つまりz軸加速度の大小によって入水時の手掌部と水面とのなす角度の推測ができると考えられる。これを図示したものが図11である。実際に泳ぎの観察からは被験者Hの入水がよりフラットであることも確認できた。親指入水は、それに引き続くStretch、Downsweepにおいて手掌部で揚力による効率的推進を行う上で重要な技術であるとされるため、このように加速度センサにより入水時の手掌部の状態が分ることはコーチングにおいて有用であろう。

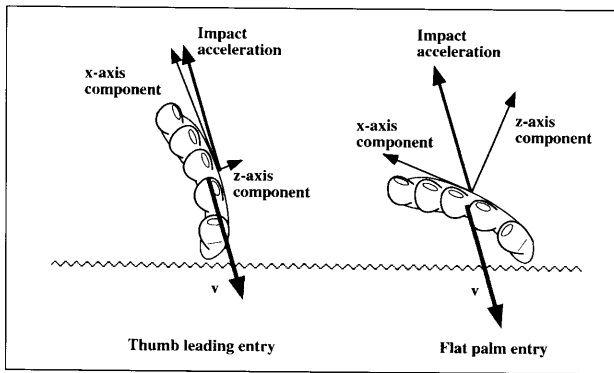


図11 Entry時の手掌部迎え角の違いによる
x軸、z軸加速度成分への影響

5. 結言

手首で観測された加速度波形を水中3次元映像解析による手先軌道の位置座標と比較検討することでMaglischoによって説明されるクロール泳のストローク動作の局面分けが可能であることが示された。以下にこれをまとめた。

x軸加速度最小値：Entry

x軸加速度最小値からy軸0m/s²近傍：Stretch局面

y軸0m/s²近傍からx軸加速度極大値(水中局面におけるx軸加速度最大値)：Downsweep局面

x軸加速度極大値(水中局面におけるx軸加速度最大値)からy軸加速度極小値：InswEEP局面

y軸加速度極小値：Upsweep開始

Releaseに関しては明確な加速度波形の特徴が見られず、水中局面から空中局面への移行を知ることが出来なかった。

加速度センサから得られる信号には重力加速度、並進加速度、遠心加速度などの加速度成分が混在しているため、その値を用いてストローク技術の良否を即座に判断できるわけではない。しかしながら画像を併用してその加速度波形の特徴点を捉えることにより、加速度波形の極大極小値の出現時刻からストローク動作の局面分けを推定できることが分かった。これをトレーニングの場に活かす例は、トレーニングによる疲労の判定などが挙げられよう。例えばトレーニングによる疲労やオーバーペースでのレースにおける疲労は一般的にはストローク頻度の低下を導く。従って1サイクルに要する時間は長くなる。1サイクルに要する時間の中で、一体どの局面が長くなったのかということも加速度波形から判断できる可能性がある。従来このような判定は水中カメラ映像を用いたとしてもほとんど不可能であった。また選手個人のストローク時の加速度波形を蓄積し記録の伸びと加速度波形の変化から、ストローク技術のどの局面に変化を生じた結果記録の向上が認められたのかといった長所の特徴など

も可能であろう。

ストロークの全体像を客観的に把握できる絶対座標系における手先軌道はDLT法を使う性質上、リアルタイムで泳者の動きを分析できるわけではない。これに対して加速度センサから得られる加速度は電気信号であるため、即座に結果を確認することが可能である。従ってコーチング現場における新たなストローク技術評価の可能性の一つとして加速度センサデバイスには期待がもてる。

6. 謝辞

本研究は筑波大学水泳部員の協力の元に行われました。ここに感謝の意を表します。特に被験者として協力してくれた前田裕之君、林まなみさんには深く感謝致します。

【参考文献】

- [1]Adrian, M.J., Singh, M. and Karpovich, P.V. (1966) Energy cost of leg kick, arm stroke and the whole crawl stroke, J of Appl. Physiol. 21 : 1763-1766.
- [2]Berger, A.M. Monique, Groot, de Gert, Hollander, A. P. (1995) Hydrodynamic drag and lift forces on human hand/arm models, J. of Biomech. 28 (2) : 125-133.
- [3]Cappaert J.M., Pease D.L., Troup J.P. (1995) Three-dimensional analysis of the men's 100-m freestyle during the 1992 Olympic Games, J. of Appl. Biomech. 11 : 103-112.
- [4]Liu Q., Hay J. G., Andrews J.G. (1993) Body Roll and Handpath in Freestyle Swimming : An experimental study, J. of Appl. Biomech. 9 : 238-253.
- [5]Liu Q., Hay J.G., Andrews J.G. (1993) Body Roll and Handpath in Freestyle Swimming : A computer simulation study, J. of Appl. Biomech., 9 :227-237.
- [6]Maglischo E.W. (1993) Swimming Even Faster. Mayfield Publishing Company.
- [7]仰木裕嗣, 市川浩, 宮地力 (1998) 加速度信号を用いた身体運動の分析方法に関する研究～第二報：水泳種目判別への応用, 日本機械学会スポーツ工学講演会論文集 : 213-217.
- [8]Ohgi, Y., Ichikawa, H., Miyaji, C. (1999) Characteristics of the forearm acceleration in swimming. Kesikinen, K.L., Komi, P.V., Hollander, A.P., Eds, Biomechanics and Medicine in Swimming VIII : 77-82.
- [9]仰木裕嗣, 市川浩, 宮地力 (1999) 加速度ICを用いた水泳のストローク技術 観察～加速度情報を用いたコーチングの可能性～, 日本機械学会スポーツ工学講演会論文集 : 159-163.
- [10]Schleihauf, R.E. (1979) A hydrodynamic analysis of swimming propulsion, Terauds, J. and Bedingfield, E. W. Eds, Swimming III : 70-109.
- [11]清水幸丸, 高木英樹, 倉島浩章 (2000) 人体手部の流体力学的特性に関する考察 (手部回りの圧力分布測定および流れの可視化) , 日本機械学会論文集B編 66(644) : 1112-1119.
- [12]對馬孝, 浅井武, 井上大介 (1998) 水泳のスクーリングにおける数値流体解析, 日本機械学会スポーツ工学講演会論文集 : 268-271.