屋内プールおよび回流水槽におけるドルフィンキック泳の キネマティクスと競泳泳者が抱く身体感覚

下門 洋文¹⁾ 仙石 泰雄²⁾ 椿本 昇三²⁾ 高木 英樹²⁾

Hirofumi Shimojo¹, Yasuo Sengoku², Shozo Tsubakimoto² and Hideki Takagi²: Kinematics and kinesthesia of competitive swimmers during dolphin kick swimming in an indoor pool and a water flume. Japan J. Phys. Educ. Hlth. Sport Sci. 59: 237-249, June, 2014

Abstract : This study clarified the differences between swimming performance in a water flume and in a pool by comparing kinematics and kinesthesia during dolphin kick swimming in both conditions. Seven national-level male college swimmers (age 20.4 ± 1.5 years, height 1.73 ± 0.06 m, weight 68.1 ± 6.0 kg) swam using prone dolphin kicks in a water flume channel and in an indoor pool. The target speed was set at 95% of maximum effort. In the pool, we controlled swimming speed by using metronome sounds to change the swimmers' kicking frequency gradually. For data collection, seven anatomical landmarks were marked on the swimmers' bodies using active LED lights. We obtained kinematic data on the swimmers' motion using two-dimensional direct linear transformation (2D-DLT) and investigated their kinesthesia by administering a questionnaire. Although swimming speed ($p = .73$) and kicking frequency ($p = .45$) showed no significant difference under both conditions, kicking amplitude was significantly greater in the flume ($33.09 \pm 2.80\% @ \text{height}$) than in the pool ($30.45 \pm 2.01\% @ \text{height}$, $p < .05$). The kinesthesia questionnaires revealed that the swimmers paid more attention to somatic sense (pool: 9.71 ± 3.50 points, flume: 12.29 ± 3.35 points, $p < .05$) and vision (pool: 1.14 ± 0.38 points, flume: 2.14 ± 1.21 points, $p = .06$) in the flume than in the pool. These results suggest that swimmers adapt their motion and kinesthetic awareness purposefully because the water flume presents different conditions. Researchers and coaches should be aware of these differences when they use the water flume.

Key words : swimming performance, questionnaire, undulatory swimming

キーワード : 泳パフォーマンス, アンケート, うねり泳

1. 緒 言

現在、ヒトの周期的な運動を解析するのに、トレッドミルと回流水槽がある。トレッドミルは、運動実施者が同じ位置に留まったまま床のベルトのみが相対的に移動するため、走・歩行動作といった有酸素運動が屋内の少ないスペースで行える。水泳でも、同じ様式の回流水槽での泳運動が

ある (Fig. 1)。この回流水槽はインペラによって水槽内に水の流れを発生させ、水が相対的に移動することによって観測部にいる泳者は同じ位置に留まったまま泳運動を継続できる。観測部では深さに関わらず流速が一定であることを前提とするが、流体である水の物理特性上、壁面近辺や空気と触れる水面近くの浅い場所では流速が変化する。そのため観測部での流速を均一にするために、表面加速装置が設置されており、水面付近の

1) 筑波大学大学院人間総合科学研究科
〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1
2) 筑波大学体育系
〒305-8574 茨城県つくば市天王台 1-1-1
連絡先 下門洋文

1. Graduate School of Comprehensive Human Sciences,
University of Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574, Japan
2. Faculty of Health and Sport Sciences, University of
Tsukuba
1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8574, Japan
Corresponding author sashimimasayo0727@gmail.com

Fig. 1 Water flume channel.

流速を調節している．回流水槽では流速を厳密に設定でき，長時間の泳運動も可能なため様々な分析が可能となる．例えば，静水中を泳ぐ対象者の呼気ガスを分析するには，対象者に合わせて機器を移動させなければならないが，回流水槽ではその手間がかからず，技術的な問題を解決してくれる．このような利便性を活かし，これまで様々な水泳選手のパフォーマンスが解明され，競技力向上に役立つ情報が提供されてきた（Wakayoshi et al., 1992; Wilson et al., 1999; Xu-hong et al., 2006）．

トレッドミルと回流水槽での運動は，実際のグラウンドとプールにおける周期運動が再現されているという前提で行われている．しかし，グラウンドとトレッドミルの走動作を比較した研究では離地時の床反力と膝のキネマティクスに差が見られており，これは一定速度で移動するベルトによって足部が離地時に十分な床反力を得られない可能性が唆されている（Riley et al., 2008）．このような情報は，スポーツ科学や医療の分野などにおいてトレッドミル上でのヒトの歩行・走行動作を分析する際に配慮すべき観点を与えることとなる．一方，回流水槽とプールにおける同様の比較は，2例の報告のみであり，クロール泳（Wilson et al., 1999）と平泳ぎ（Xu-hong et al., 2006）におけるストロークパラメーターが比較され，両環境ではストロークの特徴に差は無いと報告されている．しかしながら，静水と流水の中でヒトの泳動作が全く同じ動きを再現しているかは不明であり，これまで屋内プールと回流水槽での詳細なキネマティクスを比較した報告は見られない．両

環境間における泳動作の相違に関する情報は，今後水泳選手の泳パフォーマンスを回流水槽で分析する際に留意すべき点として有用な情報である．

本研究では両環境下で比較する泳法として水中ドルフィンキックを取り上げた．水中ドルフィンキックは造波抵抗を受けないことや，リカバリー動作が無いこと，大腿の強いパワーで推進力を得られるなどの利点があり（Vorontsov and Rumyantsev, 2000），水面を泳ぐよりも有利であると考えられている．実際に，潜水局面の方が水面でのストローク局面よりも高い泳速度となる（Takeda et al., 2009）．そのため，現在の競泳ルールではスタートおよびターン後の潜水泳は壁から15 mまでに制限されている．スタートおよびターン後，泳者はスタート台や壁を押し出すことによって得た高い推進力を損失せぬようグライド姿勢を保持し，その後は5 mを越えてからドルフィンキックを開始する方が効率的だと考えられている（Elipot et al., 2009; Takeda et al., 2009）．ゆえに，泳者は10 m程度をドルフィンキックで泳ぐことができ，一般的なレースが行われる長水路プール（50 m）では20%，短水路プール（25 m）では40%を潜水泳に充てることができる．この割合を見ると，100分の1秒で勝敗が決定する競泳において，ドルフィンキックは無視することのできない重要な泳技術だといえる．これまで，高い泳速度を発揮する泳者ほどドルフィンキックのキック頻度が高く，けり幅は泳速度の低い泳者らとほとんど変わらないことが明らかとなっている（Arellano et al., 2002）．また，ドルフィンキックは全身にうねりを伴った遊泳運動であり，水中を推進する動物と比較した報告も見られる（Connaboy et al., 2007; Ungerechts et al., 1998; Von Loebbecke et al., 2009a）．しかし，これまでの分析で用いられた変数は，関節点の振幅やキック頻度，泳速度，推進効率といった一般的なキネマティクスの変動を取り扱うのみであり，ドルフィンキックの特徴であるムチのしなりのような「うねり」に着目した変数は用いられていない．Connaboy et al. (2009) は，水中生物を含めた水中うねり動作の推進流体力に関連する100編

の先行研究を総説し、ヒトのドルフィンキックの泳技術を明らかにするためには、うねり動作の様式や協応性に関連した変数を調べなければならないと結論づけている。一方、運動指導やコーチングの立場に立った場合、観測された客観的指標以外に、泳者自身が抱く内省が役立つことがある。例えば、客観的に良いと判断された動作が、実施者にとって負担となることもあり、逆もまたあり得る。そのため、両環境下におかれた泳者の身体感覚の変化について調査することは意義がある。近年では競泳選手の身体感覚を調査する質問紙が開発されており（下門ほか、2012）、これを用いれば、動作分析による客観的指標だけでなく、泳者に内在する主観的指標を調査することができる。回流水槽における泳者自身の身体感覚への注意を同時に調査することは、どのように泳者の内省が変化するかという知識を得ることができ、指導にも役立てられる可能性がある。本研究は、回流水槽と屋内プールでのドルフィンキック泳について、うねりに着目した客観的指標と、質問紙による主観的指標を用いて評価し、その違いを明らかにする。

2. 方 法

2.1 対象者

全国大会出場レベルの男子大学競泳選手7名（ 20.4 ± 1.5 year, 1.73 ± 0.06 m, 68.1 ± 6.0 kg）を対象者とした。対象者は平泳ぎ以外を専門種目としており、ドルフィンキックで泳ぐことに慣れている。対象者から研究への同意を得た。

2.2 実験設定

本研究は、屋内プールと回流水槽にて同一対象者のドルフィンキック泳を比較する観察研究である。本実験を行う前に、屋内プールにて対象者の最大努力時のドルフィンキック平均泳速度を算出した。対象者は壁を蹴ってスタートし、最大努力のドルフィンキックで泳ぎ、7.5–15.0 mの区間を側面からビデオカメラ（TK-C1381 Victor Inc., Tokyo, Japan）を用いて60 Hzで撮影した。

キック1周期における大転子の移動距離から平均泳速度を算出した。その泳速度から算出した95%の値を本研究の設定速度として用いた。

屋内プールでのデータ収集

実験はT大学屋内プールにて2012年12月に行った。水深は1.3 mから1.8 mであり推進方向へ進むにつれて傾斜によって深くなる。泳者は十分なウォーミングアップを行い、試技では壁を蹴ってスタートし、0.5 mの深さを保持したまま泳ぐように指示をした。ドルフィンキックのキック頻度と泳速度は線形関係にあるため（Cohen et al., 2012）、対象者のキック頻度を変化させることで泳速度を意図的に調節した。対象者は、泳ぐ前に特定のメトロノーム音を聞いて一定のリズムを記憶した。その後すぐに、そのリズムのキック周期となるようドルフィンキックで再現しながら泳いだ。リズムは、漸増的に3段階に分け（低め：1.43 Hz, 高め：2.00 Hz, 対象者の最大努力時と同じ：2.00 Hz以上）、その試技の中から平均泳速度が最も95%泳速度に近い試技を分析対象とした。

対象者の動作を分析するために、手首、肩、肋骨下端、腰、膝、足首、第5中足骨（足先）の7点にLEDマーカーを貼り付けた（Fig. 2）。屋内プールでの分析では、プール地下の水中窓を介し、2つのビデオカメラ（High speed 1394 Camera, DKH Inc., Japan）で、ドルフィンキック中の対

Fig. 2 a) Define of the joints, b) typical model of swimmer attached LED markers, c) definition of kicking phase.

象者について7.5—15.0 mの区間を側面から撮影した。カメラから泳者までの距離は11 mであった。サンプリング周波数は100 Hzであった。得られた映像から、動作解析ソフトウェアFrame-DIASII (DKH Inc.)を用い、2D-DLT法によって2次元座標を得た。キャリブレーションオブジェクトの分析点の実測値と算出値の標準誤差は9.33 mmであった。座標データはButterworthのローパスフィルター（遮断周波数6 Hz）を用いて平滑化した。

回流水槽でのデータ収集

実験はT大学屋内回流水槽（Igarashi Industrial Works Co. Ltd., Japan）にて2013年2月に行った。対象者は十分なウォーミングアップを行った後、安全を考慮しながら、最大努力時の95%の泳速度でドルフィンキックで泳いだ。回流水槽の水深は1.2 mであり、対象者には可能な限り水槽内の0.5 mの水深で、同じ位置で泳ぐよう指示をした。

対象者の身体7点の関節点（屋内プールの試技と同じ位置）にLEDマーカーを貼り付け、水中モーションキャプチャシステムを回流水槽側面に設置し、ドルフィンキック中の泳動作を5台のモーションカメラ（VENUS3D-100A, Nobby Tech. Ltd., Japan）で記録した。収録前に、端点間距離が350 mmの3マーカー較正器を画角内で振り、ダイナミックキャリブレーションを行った。データ収録ソフトウェア（Tracking Tools, Nobby Tech. Ltd.）に組み込まれた独自のアルゴリズムによって、画角内の標準誤差が最小化されるよう計算が行われ、標準誤差が0.2 mm以下となった時点でキャリブレーション作業を完了した。カメラから泳者までの距離は1.5 mであった。得られたモーションデータは動作解析ソフトウェア（Pixel Runner for Venus3D, Nobby Tech. Ltd.）を用いて2次元座標データを解析した。サンプリング周波数は100 Hzとし、得られた座標データは屋内プールと同様にButterworthのローパスフィルター（遮断周波数6 Hz）を用いて平滑化した。

対象者のスケジュールに合わせ、レース直前や

重要なトレーニング期を避けて2試技を行った。最も長い対象者で2試技間に3ヶ月の期間があった。対象者へのLEDマーカーの貼り付けは、同一検者が同じ位置に貼り付けるよう配慮した。回流水槽と屋内プールの水温は両環境とも28度であった。

2.3 変数

ドルフィンキックは周期運動であるものの、周期毎に常に同じ動作を行っているとは限らない。ドルフィンキックのキネマティクスを抽出する際には、3周期以上の平均値を代表値として分析すれば信頼性が高いと報告されている（Connaboy et al., 2010）。このことから、本研究では3周期を分析対象とした。以下に示す変数は全て3周期分を取り出し、その平均値を被験者の代表値として用いた。なお、全ての変数の略語は本文末に注記する。

1) 局面分け

足先の垂直位置の最低点から次に最低点へ至るまでを1周期とした。本研究ではこの1周期を3つの局面に分けた（Fig. 2）。足先垂直位置が最低点にある瞬間から、けり上げ動作によって足先位置が垂直方向へ移動し、途中で水平方向へと移動する瞬間までを第1けり上げ局面とした（以下 Up_1 と略す^{注1)}）。足先が水平方向側へ移動を開始した瞬間から足先垂直位置が最高点に至る瞬間までを第2けり上げ局面とした（以下 Up_2 と略す^{注2)}）。この Up_1 と Up_2 の切り替わりは、まず足先の軌跡上にある速度ベクトルを算出し、これを水平成分と垂直成分に分け、けり上げ動作中に垂直成分よりも水平成分が大きくなった時点を切り替え点とした。足先垂直位置の最高点から最低点に至る瞬間までをけり下ろし局面とした（以下 Dw と略す^{注3)}）。本研究では、相対時間を調べるために1周期に各局面が占める割合（%）を算出した。

2) 運動学的変数

各関節点の振幅（以下 $A_{point\ name}$ と略す、なお $point\ name$ は各関節点を表している^{注4)}）をそれぞれ1周期中の垂直位置の最大値と最小値の差より算

出し、被験者の身長で除することで標準化した。被験者の足先の座標値から、けり幅 (A ^{注5)}) とキック頻度 (以下 f と略す^{注6)}) を算出した。 f は 1 周期分のキック動作に要する時間から求めた。全身の平均泳速度 (以下 U と略す^{注7)}) は、1 周期分の腰の水平方向への移動距離を時間微分することで求めた。回流水槽では、水に対して泳者が相対的に水平方向へ移動しているため、画面上では同じ位置に留まっている。そこで、水平方向を x 座標、垂直方向を y 座標とし、設定した泳速度から 1 コマごとの絶対移動距離を算出し、全ての身体ポイントの x 座標に積算していくことで固定座標系に変換し、平均泳速度を算出した。ストローハル数 (以下 St と略す^{注8)}) は以下の式を用いて算出した。

$$St = A \cdot f \cdot U^{-1} \quad (1)$$

St は身長で標準化していない A を、 U と f の比で標準化して記述される無次元数である。 St は、値が低いほど推進効率が良く、尾びれを持った魚では $St = 0.2 - 0.4$ (Rohr, 2004)、モノフィンで泳いだヒトで $St = 0.4 - 0.6$ (Nicolas et al., 2007) 程度であるとされている。Zamparo et al. (2002) は、細長い魚のうねり動作の効率算出方法 (Lighthill, 1975) を用いて、フラッターキック中の下肢の波速度 (以下 c と略す^{注9)}) と U からフルード効率 (以下 η_F と略す^{注10)}) を算出している。魚において、関節の屈曲が頭から尾にかけて波のように伝わっていく様は、ヒトのバタフライ泳 (Ungerechts et al., 1998) やモノフィン泳 (Nicolas et al., 2007) で報告されている。フルード効率は以下の式を用いて算出された。

$$\eta_F = (c + U) \cdot 2c^{-1} \quad (2)$$

U は平均泳速度で、 c は全身波速度を示す。波速度は、基本的には 2 次元座標の値を基にしており (Zamparo et al., 2002)、関節点が上下に振動し、体軸に沿って表れるそれらの最大値の時間ズレの回帰式によって計算される。身体ポイント間の距離を、上下に動く各ポイントの波の最高点に達した時間差で割ることで、その波速度は求め

られる。全身の波速度 (c) は、各身体ポイントにおいて波の最大値が出現した時間と、手首から足先にかけて身体ポイント間の長さを積算していった距離との 2 変数間の傾きによって得られる (Hochstein and Blickhan, 2011)。もし U が c よりも高ければ ($U > c$)、その波は身体を減速させる。よって、 η_F は 0.5 から 1.0 の範囲となり、 $\eta_F = 1$ ($U = c$) の場合は、全てのパワーが推進力となり、その値が $\eta_F < 1$ ($c > U$) となる場合には部分的にパワーが失われていることを意味する (Nicolas et al., 2007)。全身波速度を頻度で除することで、ドルフィンキックの波長 (以下 λ と略す^{注11)}) を得ることができる。Connaboy et al. (2007) は、以下の式を用いて波長を算出した。

$$\lambda = c \cdot f^{-1} \quad (3)$$

$$\lambda_{BL} = \lambda \cdot BL^{-1} \quad (4)$$

c は全身波速度を示し、 f はキック頻度を示す。波長 (λ) から全身長 (以下 BL と略す^{注12)}) を除することで身体長あたりの波長 (以下 λ_{BL} と略す^{注13)}) を算出している。 λ_{BL} は、ウナギ型やアジ型といったうねり動作の様式を示す (Connaboy et al., 2007)。

身体 5 関節点の角度から (Fig. 2)、最大値 (以下 $\theta_{joint name max}$ と略す、なお $joint name$ は各関節部位を表している^{注14)}) と最小値 (以下 $\theta_{joint name min}$ と略す^{注15)}) の角度を算出し、最大伸展、最大屈曲時の角度とした。キック 1 周期中の関節角度の最大値と最小値の差から、関節可動範囲 (以下 $ROM_{joint name}$ と略す^{注16)}) を算出した。さらに、角速度の最大値 (以下 $\omega_{joint name max}$ と略す^{注17)}) と最小値 (以下 $\omega_{joint name min}$ と略す^{注18)}) を算出した。

3) Continuous relative phase

ドルフィンキックはムチのしなりのように全身の関節が連動し、協応する。これら関節間の角度の協応関係を調べるために、各関節の位相角度から Continuous relative phase (以下 CRP と略す) を次の手順で算出した (Seifert et al., 2010)。まず、5 関節点の角度 (以下 $\theta_{joint name norm}$ と略す^{注19)}) と角速度 (以下 $\omega_{joint name norm}$ と略す^{注20)})

は以下の式を用いて値を標準化した。

$$\begin{aligned} \theta_{\text{joint name norm}} &= 2\theta \cdot (\theta_{\text{joint name max}} - \theta_{\text{joint name min}})^{-1} \\ &\quad - (\theta_{\text{joint name max}} + \theta_{\text{joint name min}}) \\ &\quad \times (\theta_{\text{joint name max}} - \theta_{\text{joint name min}})^{-1} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \omega_{\text{joint name norm}} &= 2\omega \cdot (\omega_{\text{joint name max}} - \omega_{\text{joint name min}})^{-1} \\ &\quad - (\omega_{\text{joint name max}} + \omega_{\text{joint name min}}) \\ &\quad \times (\omega_{\text{joint name max}} - \omega_{\text{joint name min}})^{-1} \end{aligned} \quad (6)$$

$\theta_{\text{joint name norm}}$ と $\omega_{\text{joint name norm}}$ はともに -1 から 1 の範囲となる。これを x 軸 ($\theta_{\text{joint name norm}}$) と y 軸 ($\omega_{\text{joint name norm}}$) の 2 軸上にプロットすると、標準化された関節の屈伸運動を座標空間内で示することができる。この角度と角速度の関係は、位相角度 (以下 $\Phi_{\text{joint name}}$ と略す^{注21)}) で示される (Seifert et al., 2010)。以下の式を用いて $\Phi_{\text{joint name}}$ を算出した。

$$\Phi_{\text{joint name}} = \tan^{-1} \cdot (\omega_{\text{joint name norm}} \cdot \theta_{\text{joint name norm}}^{-1}) \quad (7)$$

この $\Phi_{\text{joint name}}$ によって関節の運動状態を示すことができ、例えば $\Phi_{\text{knee}} = 0^\circ$ の時は $\theta_{\text{knee norm}} = 1$ で膝が最大伸展位の状態を示しており、 $\Phi_{\text{knee}} = 270^\circ$ の時は $\omega_{\text{knee norm}} = -1$ で膝が屈曲運動中であり、角速度が最低値となった状態を示している。これを用い、ある瞬間における 2 関節間の $\Phi_{\text{joint name}}$ の差によって同相か逆相か評価できる。2 関節間の位相差 CRP は、以下の式を用いた。

$$CRP_{A-B} = \Phi_A - \Phi_B \quad (8)$$

CRP_{A-B} は、 A と B の 2 関節間の位相差を評価する。例えば、膝と腰の 2 関節の位相関係を示したい場合、 $CRP_{\text{hip-knee}} = 0^\circ$ であれば 2 関節は同時に屈伸運動をする同相関係であり、 $CRP_{\text{hip-knee}} = \pm 180^\circ$ であれば屈伸運動が 2 関節間で逆転している逆相関係だといえる。 CRP の範囲は $-30^\circ < CRP < 30^\circ$ を同相とし、 $150^\circ < CRP < 180^\circ$ および $-180^\circ < CRP < -150^\circ$ を逆相とみなした。隣接する 2 関節間で、1 周期中の CRP の平均値を算出した^{注22)}。

4) 迎え角

足部の迎え角 (AoA) は、足首と第 5 中足骨

を結ぶセグメントと足先の軌跡との内積によって算出した (Connaboy et al., 2009; Connaboy et al., 2010)。 AoA のピーク値は、キック 1 周期中に Up_1 と Dw の 2 局面で出現する。本研究では、けり上げ (以下 AoA_{up} と略す^{注23)}) とけり下ろし局面 (以下 AoA_{dw} と略す^{注24)}) でそれぞれ算出した。

2.4 身体感覚への注意

下門ほか (2012) は、大学競泳選手の身体感覚調査用紙を作成しており、本研究ではこの質問紙を使用して泳者の内的な感覚を調査した。これは泳中に、泳者が何に対して意識を向けていたかを調査するもので、12 の質問項目から構成され、3 因子 (体性感覚、時間調節、特殊感覚) に分類される。本研究ではこの質問項目から 11 項目を用いて、泳者の主観的な身体感覚への意識の程度を 6 段階評価 (1: 特に意識していない, 2: 意識した気がする, 3: やや意識した, 4: 意識した, 5: とても意識した, 6: 非常に強く意識した) で試技直後に回答してもらい、注意の変化を調査した。

2.5 統計解析

本研究の結果は全て平均値と標準偏差で示す。変数は全て対応のある t 検定を用いて試技間と比較を行った。統計処理は SPSS for windows 21.0 を用いた。なお、統計的有意水準は 5% 未満とした。

3. 結 果

平均泳速度は、回流水槽では $1.54 \pm 0.17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、屋内プールでは $1.56 \pm 0.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ であり両試技間に有意な差は認められず ($p = .73$)、各被験者の泳速度の差分は、回流水槽を基準とした場合平均 $101.7 \pm 8.9\%$ で、ほぼ同じ泳速度で泳いていたといえる。

各局面が周期時間に占める割合について試技間で比較した結果を Table 1 に示した。どの局面も試技間で差は認められなかった。

運動学的変数について試技間での比較結果を

Table 2 に示した．キック頻度に関しては，両試技間で有意差は認められず ($p = .45$)，ほぼ同等のキック頻度と泳速度で泳いでいた．一方， A_{rib} ， A_{toe} ， St には有意差が認められた．回流水槽でのドルフィンキックは，肋骨下端と足先の振幅が大きくなっているにも関わらず， St は増加しており屋内プールと比較すると非効率的な泳動作となっていた．

関節角度の最大および最小値，関節角度範囲，角速度の最大値および最小値の試技間での比較結果を Table 3 に示した．関節角度の最大値は， $\theta_{hip\ max}$ と $\theta_{knee\ max}$ の 2 つに有意差が認められた ($p < .05$)．関節角度範囲は， ROM_{hip} と ROM_{knee} の 2 つに有意差が認められた ($p < .05$)．角速度の最大値では， $\omega_{ankle\ max}$ に有意差が認められた

($p < .05$)．なお，この $\omega_{ankle\ max}$ の出現は足先の垂直位置が最高点に達する直前であった．

関節間の協応性を試技間で比較した結果を Table 4 に示した．隣り合う関節同士での協応性に有意差は認められなかった．キック 1 周期中の CRP の典型例を Fig. 3 に示した．肋骨下端と腰の屈伸運動は同相 ($CRP_{rib-hip} \approx 0^\circ$) に近く，膝と足首は逆相 ($CRP_{knee-ankle} \approx \pm 180^\circ$) に近い値で推移していた．

迎え角は，けり上げ局面での最大値は回流水槽で $51.27 \pm 5.45^\circ$ ，屋内プールで $45.54 \pm 4.36^\circ$ となり，有意差が認められた ($p < .05$)．けり下ろし局面での最大値は回流水槽で $59.51 \pm 6.31^\circ$ ，屋内プールで $55.68 \pm 8.03^\circ$ となり，有意差は認められなかった．けり上げ局面において迎え角が最大値を示した瞬間の足部の様子を Fig. 4 に示した．

身体感覚への注意の結果を Table 5 に示した．3 因子の中では，体性感覚と特殊感覚の得点に有意差が認められた ($p < .05$)．下位尺度得点は，回流水槽の試技で身体位置や関節角度の得点有意に高かった ($p < .05$)．また，視覚についても回流水槽で得点が高くなる傾向がみられた ($p = .06$)．

Table 1 The comparison and the result of ratio of each phase in both condition

Variable	Pool	Flume	<i>t</i> -value
First upward phase (% cycle)	35.79 ± 2.34	36.77 ± 1.69	0.84
Second upward phase (% cycle)	18.96 ± 2.73	17.61 ± 2.69	-1.14
Downward phase (% cycle)	45.27 ± 2.36	45.60 ± 2.39	0.34

Table 2 The comparison of kinematic variables in both condition

Variable	Pool	Flume	<i>t</i> -value
Amplitude <i>A</i> (%height)			
Wrist A_{wrist}	3.61 ± 2.05	3.87 ± 1.73	0.41
Shoulder $A_{shoulder}$	3.32 ± 0.90	3.60 ± 0.62	0.82
Rib A_{rib}	2.93 ± 0.50	4.33 ± 1.18	3.12*
Hip A_{hip}	6.05 ± 1.03	7.15 ± 1.18	2.34
Knee A_{knee}	14.48 ± 1.20	15.46 ± 2.30	1.65
Ankle A_{ankle}	24.17 ± 1.26	25.60 ± 2.53	1.85
Toe A_{toe}	30.45 ± 2.01	33.09 ± 2.80	3.15*
Kick frequency <i>f</i> (Hz)	2.05 ± 0.23	2.12 ± 0.44	0.45
Strouhal number <i>St</i>	0.69 ± 0.06	0.78 ± 0.05	3.31*
Whole body wave velocity <i>c</i> (m · s ⁻¹)	3.64 ± 0.52	3.86 ± 0.58	0.91
Froude efficiency η_F	0.71 ± 0.02	0.70 ± 0.01	-1.41
Whole body wave length λ (m)	1.78 ± 0.12	1.86 ± 0.12	1.08
Whole body wave length per body length λ_{BL} (%)	80.25 ± 5.61	83.86 ± 6.49	1.08

* $p < .05$

Table 3 The comparison of joint angle, range of motion, and angular velocity in both condition

Variable	Pool	Flume	<i>t</i> -value
Angle (°)			
Shoulder maximal angle $\theta_{\text{shoulder max}}$	175.26 ± 8.33	175.55 ± 2.57	0.10
Shoulder minimum angle $\theta_{\text{shoulder min}}$	153.19 ± 6.73	153.03 ± 5.44	-0.04
Rib maximal angle $\theta_{\text{rib max}}$	206.14 ± 10.20	201.40 ± 5.78	-1.20
Rib minimum angle $\theta_{\text{rib min}}$	184.83 ± 7.48	179.06 ± 7.75	-1.67
Hip maximal angle $\theta_{\text{hip max}}$	179.26 ± 10.67	189.62 ± 10.05	2.64*
Hip minimum angle $\theta_{\text{hip min}}$	138.22 ± 10.03	143.32 ± 11.34	1.31
Knee maximal angle $\theta_{\text{knee max}}$	186.20 ± 4.59	190.80 ± 5.13	3.35*
Knee minimum angle $\theta_{\text{knee min}}$	107.02 ± 8.04	106.87 ± 10.32	-0.09
Ankle maximal angle $\theta_{\text{ankle max}}$	200.78 ± 9.66	202.64 ± 11.68	0.51
Ankle minimum angle $\theta_{\text{ankle min}}$	145.44 ± 9.59	148.09 ± 7.94	0.90
Range of motion (°)			
Shoulder ROM_{shoulder}	18.15 ± 3.49	19.62 ± 5.82	0.88
Rib ROM_{rib}	17.02 ± 3.37	19.59 ± 3.89	1.73
Hip ROM_{hip}	36.48 ± 2.77	43.03 ± 3.21	3.39*
Knee ROM_{knee}	73.50 ± 7.33	80.94 ± 7.82	5.42*
Ankle ROM_{ankle}	47.31 ± 9.92	48.78 ± 6.83	0.58
Angular velocity (°·s ⁻¹)			
Shoulder maximal angular velocity $\omega_{\text{shoulder max}}$	121.32 ± 32.96	135.54 ± 54.76	1.04
Shoulder minimum angular velocity $\omega_{\text{shoulder min}}$	-147.17 ± 28.85	-166.63 ± 62.68	-0.91
Rib maximal angular velocity $\omega_{\text{rib max}}$	164.95 ± 28.74	183.29 ± 36.12	1.83
Rib minimum angular velocity $\omega_{\text{rib min}}$	-136.98 ± 22.88	-151.23 ± 13.31	-1.28
Hip maximal angular velocity $\omega_{\text{hip max}}$	256.49 ± 18.01	288.17 ± 70.60	1.36
Hip minimum angular velocity $\omega_{\text{hip min}}$	-306.87 ± 32.77	-335.54 ± 44.80	-1.21
Knee maximal angular velocity $\omega_{\text{knee max}}$	562.81 ± 61.20	588.95 ± 96.88	0.81
Knee minimum angular velocity $\omega_{\text{knee min}}$	-550.32 ± 102.76	-647.35 ± 114.28	-2.40
Ankle maximal angular velocity $\omega_{\text{ankle max}}$	504.74 ± 129.14	637.70 ± 126.15	3.81*
Ankle minimum angular velocity $\omega_{\text{ankle min}}$	-558.29 ± 88.42	-571.62 ± 138.79	-0.52

p* < .05Table 4** The comparison of coordination in both condition

Variable	Pool	Flume	<i>t</i> -value
Knee-ankle coordination $CRP_{\text{knee-ankle}}$ (°)	139.90 ± 13.94	132.88 ± 9.40	-1.88
Hip-knee coordination $CRP_{\text{hip-knee}}$ (°)	98.84 ± 9.39	96.69 ± 10.91	-0.59
Rib-hip coordination $CRP_{\text{rib-hip}}$ (°)	-74.48 ± 15.21	-75.87 ± 17.17	-0.31
Shoulder-rib coordination $CRP_{\text{shoulder-rib}}$ (°)	-49.63 ± 15.51	-47.48 ± 18.42	0.33

4. 考 察

本研究は、回流水槽と屋内プールでのドルフィンキック泳の泳動作と身体感覚への注意を比較することが目的であった。45の変数中8変数で有

意差が認められた。差が認められた変数を総合的に判断すると、本研究によって屋内プールと比較して、回流水槽内でのドルフィンキック泳は振幅の大きな動作となっていたことが明らかとなった。

屋内プールに比べて回流水槽では、 A_{rib} と A_{toe} は有意に大きく、 St の値も高かった (Table 2)。

Fig. 3 The typical CRP during a whole kick cycle at each joint pair, a) shoulder and rib, b) rib and hip, c) hip and knee, d) knee and ankle.

Fig. 4 Stick images when the angle of attack reached the maximal value in the water flume (upper) and indoor pool (lower). The path of toe indicating seven frame in backward and forward when angle of attack arrival.

ドルフィンキック中のけり幅の増大は前面から見た投影面積の増大を招き、抵抗力も増加させる (Cohen et al., 2012). また、 St は値が大きいほど非効率的であり (Rohr, 2004), 回流水槽でのドルフィンキックは推進効率が低下していたと言える. その一方で f と U に試技間で有意差は認められなかった. この結果は, 回流水槽では屋内プールと近いテンポと移動速度で泳者がドルフィンキックで泳いでいたとしても, 非効率的な泳ぎになっていたことを示している. 特に $\theta_{hip\ max}$, $\theta_{knee\ max}$, ROM_{hip} , ROM_{knee} において有意差が認められ (Table 3), 膝と腰の可動範囲が増大していた. このような差異が生じた理由として, 屋内プールと回流水槽における視覚からの入力情報の

Table 5 The comparison of kinesthesia in both condition

Variable	Pool	Flume	<i>t</i> -value
Factor			
Somatic sence	9.71 ± 3.50	12.29 ± 3.35	-3.17*
Time control	3.57 ± 1.27	4.71 ± 1.98	-1.43
Special sence	2.14 ± 0.38	3.29 ± 1.11	-2.83*
Sub-scale			
Timing	1.14 ± 0.38	1.57 ± 1.13	-0.89
Water flow	2.14 ± 1.21	2.86 ± 0.90	-1.51
Body posi.	2.14 ± 0.69	3.29 ± 1.50	-2.49*
Vision	1.14 ± 0.38	2.14 ± 1.21	-2.29†
Trunk	3.71 ± 0.49	3.43 ± 1.40	0.68
Rhythm	2.43 ± 1.13	3.14 ± 1.21	-1.18
Auditory	1.00 ± 0.00	1.14 ± 0.38	-1.00
Limb vel.	2.43 ± 0.79	3.00 ± 1.15	-1.55
Joint angle	2.14 ± 0.90	2.86 ± 0.90	-2.50*
Catching	2.71 ± 0.95	3.71 ± 1.11	-2.05
Economy	2.71 ± 1.38	2.43 ± 0.79	0.79

* $p < .05$, † $p = .06$

違いが考えられる. 屋内プールでは, たとえ加減速していても, 視覚情報からそれを知覚することはほとんどない. 一方, 回流水槽ではある定点を見ながら泳ぐことが多いので, 推進局面では前進し, 非推進局面では後退することを認識しやすい. そもそも回流水槽内で泳者は一定の場所に留まることを要求されているので, 泳者は推進局面で前進しすぎないように何らかの方法で動作を調整せざるをえない. その調整のための動作としてけり幅を増加させ, あえてブレーキをかけているのではないと思われる.

これを裏付けるように, 泳者の感覚に対する注意の変化では, 回流水槽では体性感覚と視覚の得点が高くなっていた (Table 5). 対象者は体の位置や関節角度に注意を向け, さらに外部環境へ注意を向けて泳いでいた可能性がある. 通常の練習を屋内プールで行う大学競泳選手は, 泳中に時間調節 (タイミングとリズム) と体性感覚へ注意を向ける程度が高いことが報告されている (下門ほか, 2012). 本研究では, 一定の深さおよび観測部の中央位置に留まるよう対象者へ指示を出しており, その課題達成のためには視覚情報を得な

がら自己の位置を調節する必要があった。それが体性感覚と視覚への注意の得点に反映されたものと考えられ、熟練した泳者は回流水槽内では屋内プールとは異なった注意の向け方をしながら泳いでいたといえる。ヒトを1つのシステムと見立てると、ヒトは入力された求心性の感覚情報を運動実行のために利用していると考えられている (Schmidt and Lee, 1999)。例えば屋内プールにおいて、泳者が水に対して力を伝えて十分な推進力を獲得していれば、泳者の視界では屋内プール底のタイル等が流れている様子が映り、この時に発揮した力の感覚と視覚情報がフィードバックされる。普段の泳者は、フィードバックされるこれらの情報を予測と比較、修正を繰り返すことによって、自己の運動を正しく遂行し、自己と変化する環境との関係を判断している。その一方で、回流水槽は水と泳者との物理的な相対関係は屋内プールと変わらないものの、泳者は同じ位置に留まる必要があり、視覚からの入力情報は異なる。前述したように、けり幅の増大がブレイキの役割を担っているものと考え、泳者は推進力の発揮に加えて抵抗力の大小についても体性感覚からの求心性情報に焦点を当てなければ調節できない。このことが、回流水槽における泳者のけり幅を増大させる要因であるものと推察される。自己の位置を維持するという不慣れな状況は、泳者の視覚に対する依存度を高め、より多くの体性感覚と視覚のフィードバックを予測と比較、修正のために利用しているものと思われる。今後は、課題を変えることと、さらに泳者の感覚利用法を探るための実験系を考え、回流水槽内でどのように泳者の運動や感覚に変化が生じているのか調査する必要があるだろう。

一方、 $\omega_{ankle\ max}$ においても有意差が認められた (Table 3)。これは、けり上げからけり下ろし動作への移行区間において、テンポを変えずにけり幅が増大したために、足首の底屈が素速く行われ、結果的に足部に大きな底屈方向にモーメントが作用した結果と考えられる。また、けり上げ局面での AoA が有意に高く (Fig. 4)、足部の迎え角が増大する様子が見られた。この動作によっ

て、足関節へ作用する流体力を増大させている可能性が示唆された。

c , η_F , λ , λ_{BL} には試技間で有意差は認められず (Table 2)、加えて CRP も同様の結果であった (Table 4)。ヒトのドルフィンキックは、ムチのしなりのように行うべきと考えられており (Ungerechts et al., 1998)、手先から足先にかけて振幅が身体を伝わり、各関節が連動することで全身のうねり動作が形成される。このうねり動作は、末端である足部で水を押し出すことで最終的に推進力を獲得する (Hochstein and Blickhan, 2011)。うねり動作にはいくつかの様式があり、一般的にはうなぎ型やアジ型、ハコフグ型に分類され (高木, 2001)、ヒトはうなぎ型とアジ型の中間である準アジ型に近いと報告されている (Connaboy et al., 2007)。本研究の結果から、この全身のうねり動作は回流水槽と屋内プールでは大きな違いは見られないことが明らかとなった。

局面における両環境間での差は見られなかった (Table 1)。その一方で、この局面の値を詳細に見ることとし、本研究の対象者の平均泳速度が Arellano et al. (2002) の報告している国際大会出場レベルの泳者 ($1.58\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) と近い値であったために、この先行研究と比較した。両試技とも、各局面の割合は Dw が先行研究と同程度 (44%) であるにも関わらず、先行研究では Up_1 は 26.1%、 Up_2 は 29.9% であり、本研究の結果とは約 10% 異なっていた (Table 1)。この局面分けは、先行研究では足先の軌跡が垂直方向から水平歩行へと変わり、膝が曲がり始める瞬間であるという記述は見られるものの (Arellano et al., 2002)、他には詳細な方法を記載していない。本研究では、おそらくけり下ろし動作の反動によるものと思われるが、けり上げ動作の開始直後に膝を屈曲している泳者がみられ、膝が屈曲する瞬間については泳者間のばらつきが見られた。このため、著者らは Up_1 と Up_2 の切り替え点として膝の屈曲の瞬間では判別せず、足先の軌跡上における速度ベクトルで局面を分けることとした (Fig. 2)。ドルフィンキックの研究ではこの 3 局面に分けず、けり上げとけり下ろしの 2 局面に

分けて分析している研究も見られ (Atkison et al., 2014), 局面分けの判断は分析する研究者に依存しており, 本研究でも局面の割合が先行研究と異なる結果になったものと考えられる. ドルフィンキックは, リカバリー局面が無いため動作を全て推進力に用いることができると考えられているが (Vorontsov and Rumyantsev, 2000), Up_1 および Up_2 では減速する瞬間が存在する (Arelano et al., 2002; Cohen et al., 2012; Von Loebbecke et al., 2009b). 特に Up_2 は膝を屈曲する動作中であり, 推進方向に抗って減速を招く動作といえ, 局面分けの定義が定まらなければ減速の程度を定量化する際の比較検討が難しくなるだろう. 近年では, けり上げ時の足先の最高速度が高い泳者ほどドルフィンキックの泳速度も高いという報告が見られることから (Atkison et al., 2014), どの局面でその最高速度が達成されているかを知る上でも, ドルフィンキックにおける局面は明確に分けられるべきであろう. 今後は, けり上げ, けり下ろし動作の局面分けを議論する必要がある.

熟練者と初心者のドルフィンキック中の $CRP_{hip-knee}$ を調査した報告では, 初心者の方が $CRP_{hip-knee} \approx 0^\circ$ で同相に近かった (下門ほか, 2010). また, 平泳ぎの上肢と下肢の協応性を調査した研究でも, 初心者ほど $CRP_{upper-lower} \approx 0^\circ$ に近いことが報告されており (Seifert et al., 2010), 平泳ぎの非熟練者は四肢を同時に屈伸する. このようなことから, 水泳の技術を習熟する過程では関節間の協応性に位相ずれが生じる可能性が示唆されている. ムチのしなりのような連動動作は (Ungerechts et al., 1998), 関節間の位相ずれによるものであり, 技能レベルを反映する指標の 1 つになりうる. 本研究の結果では, 関節間での位相ずれが見られており, このような熟練した泳者が異なる環境下で泳いたとしても, この協応性に変化が見られないことが明らかとなった.

本研究の課題として, 試技間に最大で 3 ヶ月の期間が開いたことでトレーニングの効果が結果に反映された可能性が挙げられる. しかし, 対象者は 3 ヶ月間十分なトレーニングを積んでお

り, それにも関わらず回流水槽では推進効率が非効率になっている点は興味深い結果だと思われる. また, 試技間で水深を統一できなかったことは (回流水槽: 1.2 m, 屋内プール: 1.3—1.8 m) 本研究の限界である. 屋内プールに比べて回流水槽での対象者が視覚への意識の得点が高くなったという結果は, 水深が影響している可能性もある. さらに, 両試技で撮影方法が異なるため, 方法の違いが結果に反映された可能性も考えられ, これも本研究の限界である. しかしながら, Connaboy et al. (2009) は魚も含めた水中うねり動作を総論し, その結論として新たな変数を用いてヒトのドルフィンキックを分析するべきだと述べており, 本研究で用いた変数は, これまでのドルフィンキックの研究で同時に報告されていないため, パフォーマンスを解明するための発展につながるといえる. 今後はドルフィンキックのみならず, モノフィン泳やフラッターキックといった水中うねり泳のパフォーマンスを比較検討するのに役立つものと思われる.

5. ま と め

本研究は, 屋内プールと回流水槽でのドルフィンキック泳について, そのキネマティクスと, 身体感覚への注意の違いを明らかにすることを目的とした. その結果, 屋内プールよりも回流水槽の方が, ドルフィンキック中の泳者の腰と膝の関節可動範囲が広がり, けり幅が増大した. 同時に, 回流水槽内での泳者は, 体性感覚と視覚へ注意を向ける傾向が見られ, 同じ位置に留まり続けようと泳動作を適応させている可能性が示唆された. また, うねりに着目したキネマティクスおよびうねりの様式, 協応性は, 両環境間で差は認められなかった. 以上の結果から, 今後回流水槽で泳動作分析を行う際には, これらの点に配慮した分析ならびにトレーニングを行うべきであろう.

付記

本研究は, 平成 24—26 年度科学研究費基盤研究 (B) 『水中におけるヒトのロコモーションの

仕組み—水中動作解析システムの構築と応用—
(研究課題番号：24300215)』の研究助成による
研究成果の一部である。

注

本研究で使用した記号，略語を以下に示す。

- 注 1) Up_1 第 1 けり上げ局面 (%) : Fig. 2
 注 2) Up_2 第 2 けり上げ局面 (%) : Fig. 2
 注 3) Dw けり下ろし局面 (%) : Fig. 2
 注 4) $A_{point\ name}$ 被験者の身長で除した各関節点の
振幅 (%)
 注 5) A 足先のけり幅 (m)
 注 6) f キック頻度 (Hz)
 注 7) U キック 1 周期中の平均泳速度 (m
·s⁻¹)
 注 8) St ストローハル数
 注 9) c 全身波速度 (m·s⁻¹)
 注 10) η_F フルード効率
 注 11) λ 波長 (m)
 注 12) BL 身体長。ストリームライン姿勢時
の手先から足先までの長さ (m)
 注 13) λ_{BL} 身体長あたりの波長 (%)
 注 14) $\theta_{joint\ name\ max}$ 各関節の最大角度 (°)
 注 15) $\theta_{joint\ name\ min}$ 各関節の最小角度 (°)
 注 16) $ROM_{joint\ name}$ 各関節の可動範囲 (°)
 注 17) $\omega_{joint\ name\ max}$ 各関節の最大角速度 (°·s⁻¹)
 注 18) $\omega_{joint\ name\ min}$ 各関節の最小角速度 (°·s⁻¹)
 注 19) $\theta_{joint\ name\ norm}$ 標準化された各関節角度
 注 20) $\omega_{joint\ name\ norm}$ 標準化された各関節角速度
 注 21) $\Phi_{joint\ name}$ 各関節の位相角度 (°)
 注 22) CPR_{A-B} 関節 A と 関節 B の位相角度差
(°)
 注 23) AoA_{up} けり上げ局面における迎え角
(AoA) の最大値 (°)
 注 24) AoA_{dw} けり下ろし局面における AoA の
最大値 (°)

文 献

- Arellano, R., Pardillo, S., and Gavilán, A. (2002) Underwater undulatory swimming: kinematic characteristics, vortex generation and application during the start, turn and swimming strokes. In E. K. Gianikellis (Ed.), Proceedings of the XXth International Symposium on Biomechanics in Sports.
- Atkison, R.R., Dickey, J.P., Dragunas, A., and Nolte, V.

- (2014) Importance of sagittal kick symmetry for underwater dolphin kick performance. Human Movement Science.
- Cohen, R.C.Z., Cleary, P.W., and Mason, B.R. (2012) Simulations of dolphin kick swimming using smoothed particle hydrodynamics. Human Movement Science, 31(3): 1–6.
- Connaboy, C., Coleman, S., McCabe, C., Naemi, R., Psycharakis, S., and Sanders, R. (2007) Tadpole, trout or tuna: The equivalence of animal and human aquatic undulatory locomotion. In H.-J. Menzel, M.H. Chagas (Eds.), Proceedings of the XXVth International Symposium on Biomechanics in Sports.
- Connaboy, C., Coleman, S., and Sanders, R.H. (2009) Hydrodynamics of undulatory underwater swimming: a review. Sports Biomechanics, 8(4): 360–380.
- Connaboy, C., Coleman, S., Moir, G., and Sanders, R. (2010) Measures of reliability in the kinematics of maximal undulatory underwater swimming. Medicine and Science in Sports and Exercise, 42(4): 762–770.
- Elipot, M., Hellard, P., Taar, R., Boissire, E., Rey, J.L., Lecat, S., and Houel, N. (2009) Analysis of swimmers' velocity during the underwater gliding motion following grab start. Journal of Biomechanics, 42(9): 1367–1370.
- Hochstein, S. and Blickhan, R. (2011) Vortex re-capturing and kinematics in human underwater undulatory swimming. Human Movement Science, 30(5): 998–1007.
- Lighthill, J. (1975) Mathematical biofluidynamics. Society for Industrial and Applied Mathematics: Philadelphia PA.
- Nicolas, G., Bideau, B., Colobert, B., and Berton, E. (2007) How are Strouhal number, drag, and efficiency adjusted in high level underwater monofin-swimming? Human Movement Science, 26(3): 426–442.
- Riley, P.O., Dicharry, J., Franz, J., Della Croce, U., Wilder, R.P., and Kerrigan, D.C. (2008) A kinematics and kinetic comparison of overground and treadmill running. Medicine and Science in Sports and Exercise, 40(6): 1093–1100.
- Rohr, J.J. (2004) Strouhal numbers and optimization of swimming by odontocete cetaceans. Journal of Experimental Biology, 207(10): 1633–1642.
- Schmidt, R.A. and Lee, T.D. (1999) Motor control and learning: a behavioral emphasis. 3rd ed. Champaign, Ill.; United States: Human Kinetics.

- Seifert, L., Leblanc, H., Chollet, D., and Delignieres, D. (2010) Inter-limb coordination in swimming: effect of speed and skill level. *Human Movement Science*, 29 (1): 103–113.
- 下門洋文・安藤邦彬・椿本昇三・高木英樹 (2010) 状態空間から見るドルフィンキックの滑らかさの評価. 2010年日本水泳・水中運動学会年次大会事務局編, 日本水泳・水中運動学会2010年次大会論文集. 新高速印刷株式会社: 新潟, pp. 78–81.
- 下門洋文・仙石泰雄・椿本昇三・高木英樹 (2012) 大学競泳選手が泳技能改善時に重視している身体感覚. *体育学研究*, 57(1): 201–213.
- 高木英樹 (2001) 抵抗を制する者, 勝負を制す. *水泳水中運動科学*, 4: 5–10.
- Takeda, T., Ichikawa, H., Takagi, H., and Tsubakimoto, S. (2009) Do differences in initial speed persist to the stroke phase in front-crawl swimming? *Journal of Sports Sciences*, 27(13): 1449–1454.
- Ungerechts, B.E., Daly, D., and Zhu, J.P. (1998) What dolphins tell us about hydrodynamics. *Journal of Swimming Research*, 13: 1–7.
- Von Loebbecke, A., Mittal, R., Fish, F., and Mark, R. (2009a) A comparison of the kinematics of the dolphin kick in humans and cetaceans. *Human Movement Science*, 28(1): 99–112.
- Von Loebbecke, A., Mittal, R., Mark, R., and Hahn, J. (2009b) A computational method for analysis of underwater dolphin kick hydrodynamics in human swimming. *Sports Biomechanics*, 8(1): 60–77.
- Vorontsov, A.R. and Romyantsev, V.A. (2000) Propulsive forces in swimming. In V. M. Zatsiorsky (Ed.), *Biomechanics in Sport: Performance Enhancement and Injury Prevention*. Blackwell Science Ltd: Oxford, pp. 205–231.
- Wakayoshi, K., Ikuta, K., Yoshida, T., Udo, M., Moritani, T., Mutoh, Y., and Miyashita, M. (1992) Determination and validity of critical velocity as an index of swimming performance in the competitive swimmer. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 64(2): 153–157.
- Wilson, B., Takagi, H., and Davide, P. (1999) Technique comparison of pool and flume swimming. In J.-C. Chatard (Ed.), *Biomechanics and Medicine in Swimming*. Université de Saint-Etienne: France, pp. 181–184.
- Xu-hong, L., Hong-hui, Y., Wei-dong, Y., Xin-hao, X., and Sen-xing, C. (2006) Comparison of some biomechanic parameters of breaststroke swimmers in flume and swimming pool. In H. Schwameder, G. Strutzenberger, V. Fastenbauer, S. Lindinger, and Müller E. (Eds.), *The proceedings of XXIVth international symposium on biomechanics in sports*. Salzburg, Austria, pp. 254–257.
- Zamparo, P., Pendergast, D.R., Termin, B., and Minetti, A.E. (2002) How fins affect the economy and efficiency of human swimming. *Journal of Experimental Biology*, 205(17): 2665–2676.

(平成25年12月17日受付)
(平成26年4月7日受理)

Advance Publication by J-STAGE
Published online 2014/4/24