

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 11 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21300226

研究課題名（和文） 「水をつかむ」コツを探る－水泳における推力発揮メカニズムの多角的解析－

研究課題名（英文） Multiple analysis of the mechanism to develop propulsion in human swimming

研究代表者

高木 英樹（TAKAGI HIDEKI）

筑波大学・体育系・教授

研究者番号：80226753

研究成果の概要（和文）：本研究プロジェクトでは、水泳における推進メカニズムを三次元動作分析法、粒子画像流速測定法や圧力分布計測法および人型アームロボットを用いた流体力計測などの方法論を用いて多角的に解析することを目的とした。分析の結果、一流のスイマーは手部の迎角、軌跡、速度などを巧みに変化させ、手部周りの渦をコントロールすることによって、大きな非定常揚力を発揮させることで、推進力増大を図っていることが明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：The aim of this research project was to analyze the mechanism of propulsion in human swimming from many directions, i.e. three dimensional movement analysis, Particle Image Velocimetry, measurement of the pressure distribution, measurement of hydrodynamic force by robot arm. As results, it was revealed that an elite swimmer try to produce more propulsion by controlling the angle of attack, trajectory and velocity of a hand so that the swimmer's hand exert unsteady lift force by releasing a vortex.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,300,000	990,000	4,290,000
2010年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2011年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	7,600,000	2,280,000	9,880,000

研究分野：複合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・スポーツ科学

キーワード：スポーツバイオメカニクス

1. 研究開始当初の背景

水泳運動に関する流体力学的な研究は、これまで数多く報告されているが、その多くは、流れが定常（主流方向や流速が一定で、流速分布も均一）であると仮定して分析した例が多い。しかしながら、実際の泳者は、手部の移動方向や速度、あるいは迎角を時々刻々と変化させている。よって流れは非定常となり、手部周りの流れは複雑な振る舞いを示していると考えられる。このような非定常下にあ

る流体は、定常状態とは異なる力学的特性を示すことが、昆虫などの研究結果から明らかになっている。

たとえば、非定常下における揚力（ダイナミックリフト）は、定常状態の2倍に達することが報告されており、もしトップスイマーが、このダイナミックリフトを利用していたら、これまでのストローク理論に大きな変革をもたらす事になる。しかし従前の研究方法では、詳細な分析は困難であった。

そこで新たな方法で非定常下における泳者の推進力発揮メカニズムを解明するために、泳者手部に圧力センサーを装着し、直接手部周りの圧力分布計測を行い、推進力の推定が試みられた。さらに泳者の手部周りの流れを可視化することによって、渦の強さやジェット流の運動量を定量し、推進力発生の機序を明らかにする研究も行われている。また人間型の水泳ロボットを作成し、回流水槽内で水泳動作を行わせて、発揮された流体力や関節間トルクを計測する取り組みもされてきた。このような一連の研究によって、非定常下の推進メカニズムは徐々に解明されてきたが、トップスイマーの「水をつかむ」コツを明らかにするためには、これらの知見を統合する必要がある。

2. 研究の目的

水泳運動における人体周りの流れ場や流体力を最新の流体力学的手法を用いて多角的に分析することで、これまで困難とされてきた「水をつかむ」コツを明らかにし、最適最速の泳技術を探求すること目的とする。

3. 研究の方法

中島が開発した水泳ロボット（図1）を用いた。



図1 ロボットアームの全容

本ロボットは、胴体、上腕、前腕、手部から構成され、各関節は次のような自由度を持ち、肩関節3自由度、肘関節2自由度、手関節2自由度、ほぼスイマーと同様の動作を再現することが可能である。本ロボットの動きは極めて再現性が高く、さらに各身体部に働く力や各関節に作用するトルク等が実測可能である。このロボットを用いて、トップスイマーの動作を再現させ、各部位および関節に生じる力やトルクを実測するとともに、手部表面の圧力分布と手部周りの流れ場の可視化を同時に行った。

水泳運動中の流れ場の計測には流れに非接触で瞬時の速度分布が得られるPIV (Particle Image Velocimetry) を用いた。PIVを行うために流水プール中には粒径50 μm のトレーサー粒子を混入し、流速を0.06m/sと設定した。さらにシート状にした

YAGレーザーを側方から照射することで、トレーサー粒子によるレーザーの散乱光をCCDカメラで撮影した（図2参照）。得られた粒子画像から粒子の移動量を計算することで、泳動作中における手周りの速度分布を70ms間隔ごとに取得した。

また手部に小型圧力センサー(PS-05 KC, Kyowa)8個を埋め込み、手部表面の圧力変化の計測を行った。

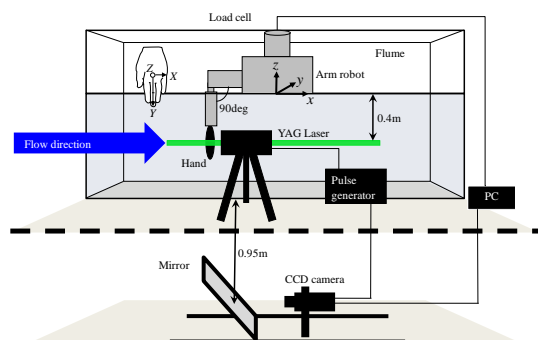


図2 実験装置の概要

4. 研究成果

本研究成果を総括すると、スイマーの泳動作を再現させた場合、推進力の最大値は、プル動作方向が遷移した時に計測された。また、プル動作方向の遷移に伴い、横方向の加速度はピーク値を計測した。Stroke SとStroke SIにおいて手部への流入方向は親指方向から小指方向に変化し、迎え角は90°に向かって上昇し、流入方向の変化と同時に減少に転じていた。また、流れ場からは推進力の最大値を計測時には渦の放出や手背面への渦の回り込みが確認され、放出された渦と手部との間には流れが誘起されていた。2次元プル動作においては、プル動作開始直後に大きな非定常流体力のピークを計測した。肩を中心に円弧を描くプル動作を行ったにもかかわらず、プル動作前半の方がプル動作後半よりも大きな非定常流体力を発生した。また、流れ場からは推進力の最大値を計測時には渦の放出や手背面への渦の回り込みが確認され、放出された渦と手部との間には流れが誘起されていた。この渦の回り込みが発生される要因として、渦を放出渦することで誘起される流れにより手背面側に引き寄せられたと考えられる。プル動作中盤や後半ではプル動作開始直後に発生した渦の回り込みは確認されず、手部の親指と小指側から発生した渦が手部後流にかけて存在し、手背面に向かう流れが誘起されていた。これらのことから、ストローク方向の変化や手部への流入角の変化、加速運動を行うことにより、渦を流体中に放出させることで大きな非定常流体力を発生させていることが分かった。

また圧力分布計測から、プル動作中は手掌側の圧力が上昇し、手背側の圧力が減少し、

特に手部側面の圧力が低下していた。プル動作前半と後半で比較をしたところ、プル動作前半に後半よりも大きな圧力の上昇及び低下があり、特に渦の放出や手背面に渦の巻き込みが確認された試技においては、渦の巻き込みが生じる手部側面の前縁側の圧力が大きく低下していることが分かった。この渦の放出と手背面への渦の巻き込みによる圧力変動により、プル動作開始直後に見られた大きな非定常流体力が発生したと考えられる。また、圧力センサーによる流体力の推定では準定常解析では表すことのできなかったプル動作開始直後に発生した非定常流体力のピークを表すことができ、手部の形状に対して8個という圧力センサーによる推定からも、非定常流体力の推移の特徴を捉えることができた。手部側面の圧力による影響では、手部側面を考慮に入れることにより、合力は大きくなるものの全体的な変化に大きな違いはないものの、揚力と抗力の成分で見ると、揚力が大きくなり、抗力が小さくなる傾向にあった。そのため、試技により手部側面で発生する流体力の大きさや流体力の成分として違いはあるものの、手部側面の圧力値を考慮に入れる必要があることが分かった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

- ① Tsuyoshi TAKEDA, Hideki TAKAGI and Shozo TSUBAKIMOTO: Effect of inclination and position of new swimming starting block's back plate on track-start performance. *Sports Biomechanics*, 査読有, 1, 2011, 1-12
- ② 三輪飛寛, 市川浩, 松内一雄, 高木英樹, 榊原潤, 椿本昇三: 回流水槽における泳動作と実際泳動作時の比較-PIV法による手部周り流れ場可視化結果と手部動作の関係から-. 日本水泳水中運動学会2011年次大会論文集, 査読有, 2011, 48-51
- ③ Nakashima, M., Kiuchi, H., Maeda, S., Kamiya, S., Nakajima, K. and Takagi, H.: Advanced Biomechanical Simulations in Swimming Enabled by Extensions of Swimming Human Simulation Model "SWUM". *Biomechanics and Medicine in Swimming XI*, 査読有, 2010, 132-137
- ④ Ichikawa, H., Miwa, T., Takeda, T., Takagi, H. and Tsubakimoto, S.: Comparison of Front Crawl Swimming Drag between Elite and Non-Elite Swimmers Using Pressure Measurement and Motion Analysis.

Biomechanics and Medicine in Swimming XI, 査読有, 2010, 100-102

- ⑤ 尾崎尚, 高木英樹, 中島求, 松内一雄: ロボットアームによるクロール時の力と流れ場の解析. 日本機械学会関東支部第15期総会講演会講演論文集, 査読無, 2009, 379-380
- ⑥ 尾崎尚, 高木英樹, 中島求, 松内一雄: ロボットアームによるクロール時の力と流れ場の解析(泳動作中に生じる手部周りの圧力場). 日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集, 査読無, 2009, 515-516

[学会発表] (計2件)

- ① 角川隆明, 仙石泰雄, 高木英樹, 椿本昇三: 平泳ぎキック動作による推進力発揮に関する流体力学的考察. 2011年日本水泳・水中運動学会年次大会, 2011/10/15, 日本大学(東京)
- ② Takashi Ozaki, Hideki Takagi, Motomu Nakashima and Kazuo Matsuuchi: Propulsive Force Acting on a Robot Arm and Its Flow Field. XXII Congress of the International Society of Biomechanics, 2009/7/1, Cape Town, South Africa

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高木 英樹 (TAKAGI HIDEKI)
筑波大学・体育系・教授
研究者番号: 80226753

(2) 研究分担者

松内 一雄 (MATSUUCHI KAZUO)
筑波大学・システム情報系・教授
研究者番号: 70111367

(3) 研究分担者

中島 求 (NAKASHIMA MOTOMU)
東京工業大学・情報理工学(系)・准教授
研究者番号: 20272669