

博 士 論 文

水中ドルフィンキックにおける周期音を用いたキック頻度調節が
泳パフォーマンスに及ぼす影響
—大学競泳選手を対象として—

平成 26 年 度

下 門 洋 文

筑 波 大 学

目次

図表番号の一覧	4
Figure 一覧	4
Table 一覧	5
略語の説明	6
用語の定義	8
I. 序論	9
1. 研究背景	9
2. 博士論文目的	18
II. 文献研究	19
1. 水中ドルフィンキックに関する先行研究	19
1) 水中ドルフィンキックとキック頻度	19
2) 推進メカニズム	23
3) 運動学的変数	27
4) 水中ドルフィンキックに関する先行研究まとめ	37
2. 運動学習と身体感覚に関する先行研究	38
1) 運動学習段階	38
2) 泳動作の調節	39
3) 泳者の身体感覚	41
4) 運動学習と身体感覚に関する先行研究まとめ	46
III. 研究課題、仮説、限界	47
1. 研究課題	47
2. 研究の枠組み	49
3. 研究仮説	51
4. 研究の限界	52
IV. 競泳選手が泳技能改善時に重視している身体感覚	54
IV-1 大学競泳選手が泳技能改善時に重視している身体感覚と因子構造 (研究課題 I)	54
1. 背景と目的	54
2. 方法	55
3. 結果	62
4. 考察	68

IV-2 研究課題 I まとめ.....	75
V. 泳者内における UUS 中の泳速度とキック頻度との関係性.....	77
V-1 泳者内における UUS の泳速度がキック頻度を与える影響 (研究課題 II).....	77
1. 背景と目的	77
2. 方法	77
3. 結果	85
4. 考察	87
V-2 研究課題 II まとめ.....	90
VI. 周期音を用いた泳動作調節法の検討 (研究課題 III).....	91
VI-1 最大努力時以下での周期音によるキック頻度調節法の検討 (研究課題 III-1).....	91
1. 背景と目的	91
2. 方法	91
3. 結果	98
4. 考察	100
VI-2 最大努力時以上での周期音によるキック頻度調節法の検討 (研究課題 III-2).....	104
1. 背景と目的	104
2. 方法	104
3. 結果	109
4. 考察	111
VI-3 研究課題 III まとめ.....	116
VII. 周期音を応用した泳動作調節法の検討 (研究課題 IV).....	117
VII-1 周期音によるキック頻度調節の即時的介入効果 (研究課題 IV)	117
1. 背景と目的	117
2. 方法	118
3. 結果	123
4. 考察	129
VII-2 研究課題 IV まとめ.....	134
VIII. 総合討論.....	135
1. 本研究の目的と研究課題	135
2. 本研究結果の統合	136
1) 身体感覚への注意量の比較	136
2) キック頻度と泳速度の関係	136
3. 総合討論	139
1) 泳技能習熟と身体感覚の関連	139
2) UUS におけるキック頻度と泳速度の関係性	140
3) 周期音との同期が泳パフォーマンスに及ぼす影響.....	143

4) 実践現場での応用.....	144
4. 今後の課題.....	147
1) 身体感覚調査.....	147
2) UUS の運動学的変数.....	151
3) 周期音の効果.....	154
IX. 総括	157
参考文献	159
謝辞.....	175

図表番号の一覧

Figure 一覧

Figure 1. The relationship between kick frequency and swimming velocity in human undulatory underwater swimming.	11
Figure 2. Image of tempo trainer usage.	13
Figure 3. The movement of undulatory underwater swimming.	22
Figure 4. Isosurfaces of wake structures identified during undulatory underwater swimming (Cohen et al., 2012).	25
Figure 5. Typical flow visualization around swimmer's foot after kick motion (Hochstein & Blickhan, 2011).	26
Figure 6. Propulsion type of three fishes (Takagi, 2002).	30
Figure 7. Framework of this study.	50
Figure 8. Average point of each kinesthesia in descending order according to point.	63
Figure 9. Swimmer attached with the LED markers.	79
Figure 10. Image of motion capture system. Left side above shows VENUS system cameras, right side above shows a subject swam in circular flume, left side below shows PC monitor when capturing UUS motion, right side below shows the stick figure converted in 2D data.	82
Figure 11. Experimental protocol. Pre is 70% effort swimming (subjective), Sound is synchronizing UUS with the target sound, and Post is representing the kicking frequency without the target sound.	95
Figure 12. Setting of experiment. The swimmers used push off start, and their motion was captured by two cameras from lateral side through underwater window. When Sound trial, the target sound was generated from underwater speaker.	96
Figure 13. Picture of swimmer attached the LED marker.	107
Figure 14. Experiment protocol (Cross-over model). Pre, Miccle, and Post are maximal effort UUS, Synchronize is swimmer synchronize with the target sound, Reproduce is swimmer reproduce their kick frequency to last sound's frequency.	120
Figure 15. Relative mean value (%full points) of kinesthesia in this study only significant difference was observed in three factors.	137
Figure 16. Relationship between kick frequency and swimming velocity. The result	

show in task II is black, task III is circle and square, and task IV is gray respectively.....	138
--	-----

Table 一覽

Table 1. Kinematic values of underwater undulatory swimming in previous study.	33
Table 2. Kinematic values of underwater undulatory swimming in simulation, flutter kick, mono fin swimming studies.	34
Table 3. The list of question items and each abbreviations.....	56
Table 4. Number of participants (female swimmers) and percentage in each Japanese swim grade.	59
Table 5. Age and competitive year of the participants divided by sex, distance type, and swimming style.	60
Table 6. The result of factor loading, communality, cronbach's alpha, each factor name, and Pearson's value of between the factors.....	64
Table 7. The result of student's <i>t</i> -test at somatic sense, time control, and special sense at divided in sex and distance type.....	66
Table 8. The result of ANOVA at somatic sense, time control, and special sense at divided in swimming style.	67
Table 9. The result of kinematics at each velocity and F-value.	86
Table 10. The result of kinematic variable at each trial and F-value, t-value.....	99
Table 11. Actual measurement result and the ratio to pre at each session, t-value, and F-value (including Pre).	110
Table 12. The result of swimming velocity and kick frequency in memory and swimming synchro groupe at Pre, Middle and Post.	124
Table 13. The result and ratio of all variable at Pre, M-Rep, S-Synch, S-Rep, Pre; and F-value, t-value.	126
Table 14. The result of kinesthesia at Pre, M-Rep, S-Synch, S-Rep and Post; F-value, t-value.....	128

略語の説明

変数の略語

A_{toe} : けり幅 (Kick amplitude)

c : 全身波速度 (Whole body wave velocity)

f : キック頻度 (Kick frequency)

L : 身体長 (Body length)

St : ストローハル数 (Strouhal number)

U : 平均水平泳速度 (Average horizontal swimming velocity)

η_F : フルード効率 (Froude efficiency)

λ : 波長 (Wave length)

λ_{BL} : 身体長あたりの波長 (Wave length per body length)

連語の略語

CFD: コンピュータ流体ダイナミクス (Computational Fluid Dynamics)

FINA: 世界水泳連盟 (Federation Internationale de Natation)

M-Rep: 周期音を記憶した後のキック頻度再現試技 (研究課題 IV; Memory-Reproduction)

PIV: 粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry)

Post: 事後試技 (Post trial) (研究課題 III-1、III-2、IV)

Pre: 事前試技 (Pre trial) (研究課題 III-1、III-2、IV)

SL: ストローク長 (Stroke Length)

SR: ストローク頻度 (Stroke Rate)

S-Rep: 周期音と同期した後のキック頻度再現試技 (研究課題 IV; Swimming-Reproduction)

S-Synch: 周期音とキック頻度を同期する試技 (研究課題 IV; Swimming-Synchro)

UUS: 水中ドルフィンキック、水中遊泳運動 (Undulatory Underwater Swimming)

用語の定義

(1) 技術と技能

技術とは技そのものを説明する知識を示し、技能とは運動実施者がその技を能力として身につけている状態を意味する。運動実施者が「わかる」ことができる技は技術、「できる」ようになる技を技能と定義した。

(2) 身体感覚

泳運動中にヒトが知覚する感覚は、体性感覚以外に時間感覚も存在する。本研究では、ヒトが運動中に知覚・認知する感覚を全て身体感覚と定義した。

(3) ドルフィンキックと Undulatory Underwater Swimming

競泳競技では、うねりを伴った水中潜水泳技術は、伏臥位（うつ伏せ姿勢）はドルフィンキック、仰臥位（仰向け姿勢）はバサロキックと一般的に呼んでいる。魚の遊泳運動は Undulatory Underwater Swimming (UUS) と呼ばれ、ヒトのドルフィンキックおよびバサロキック、モノフィン泳、フラッターキックも、この UUS の 1 つとみなすことができる。本研究では、水中生物の遊泳運動にも言及するため、ドルフィンキックを含めた水中でのうねりを伴った推進運動を UUS と定義した。

I. 序論

1. 研究背景

競泳ではクロール、背泳ぎ、平泳ぎ、バタフライの 4 泳法に加え、近年では第 5 の泳法として水中ドルフィンキック (Undewater Undulatory Swimming: 以下 UUS と略す) の重要性が指摘されている (Collard & Oboeuf, 2009)。UUS の特徴は、1) 水面より水中は抵抗が少なく有利、2) リカバリー局面が無い、3) 下肢の太い筋による高い推進力発揮の 3 つが挙げられ (Vorontsov & Rumyantsev, 2000)、水中を泳ぐ方が飛び込みや壁を蹴った後の高い泳速度を維持できるため、水面を泳ぐ他の泳者よりも有利である (Takeda, Ichikawa, Takagi, & Tsubakimoto, 2009)。このため、いかに UUS で速く泳げるかという点が着目され、研究が行われてきた。最初は、魚類の観察研究によってそのヒントを得ようとした。水中生物の UUS は、キック頻度と泳速度が線形関係にあることが分かっており (Webb & Kosteki, 1984)、同様にヒトの UUS もキック頻度が泳速度に最も影響する重要な運動学的変数であることが示されてきた (Arellano, Pardillo, & Gavilán, 2002; Connaboy, Coleman, & Sanders, 2009)。その一方で、この頻度と泳速度の関係性は、生物によっては曲線関係で説明されるという指摘がある (Gillis, 1997)。そこで、ヒトの UUS における頻度と泳速度の関係を見るために、これまで報告されてきた男子競泳選手の全力 UUS 時の結果を報告した先行研究を調査し (Alves, Lopes, Veloso, & Silva, 2006; Arellano et al., 2002; Arellano, Pardillo, & Gavilán, 2003; Atkison, Dickey, Dragunas, & Nolte, 2014; Connaboy et al., 2007; von Loebbecke, Mittal, Fish, & Mark, 2009; Willems, Cornelis, De Deurwaerder, Roelandt, & De Mits, 2014; 小林,

仙石, 高木, 椿本, 2013; 武田, 伊藤, 奥野, 2011)、そのキック頻度と泳速度の関係を Figure 1 に示した。この関係図からは、ヒトの UUS ではキック頻度と泳速度が線形関係にあるとは考えにくい。競泳の 4 泳法では、ストローク頻度の増加に応じて泳速度も増加するが、最大努力時以上の頻度で泳ぐと、それ以上泳速度は増加せず、むしろ泳速度は低下する (Craig & Pendergast, 1979)。UUS では、キック頻度を増加させることで泳速度が向上するものと考えられており (Arellano et al., 2002)、シミュレーション上では、UUS のキック頻度増加によって泳速度が向上することが確認されている (Cohen, Cleary, & Mason, 2012)。しかし、実際の泳者が最大努力時以上のキック頻度で泳ぐことで泳速度が増加するのか、さらにけり幅といった推進力に直接影響すると考えられる他の運動学的変数へ影響するのかは分かっていない。それ以上キック頻度を増加させても泳速度が増加しない極値が存在するものと考えられるが、泳者内においてこの両者の関係性を実測によって調査した研究は皆無である。キック頻度と泳速度の真の関係性は未だに明らかとなっておらず、UUS 研究の重要課題として指摘されている (Connaboy et al., 2009)。

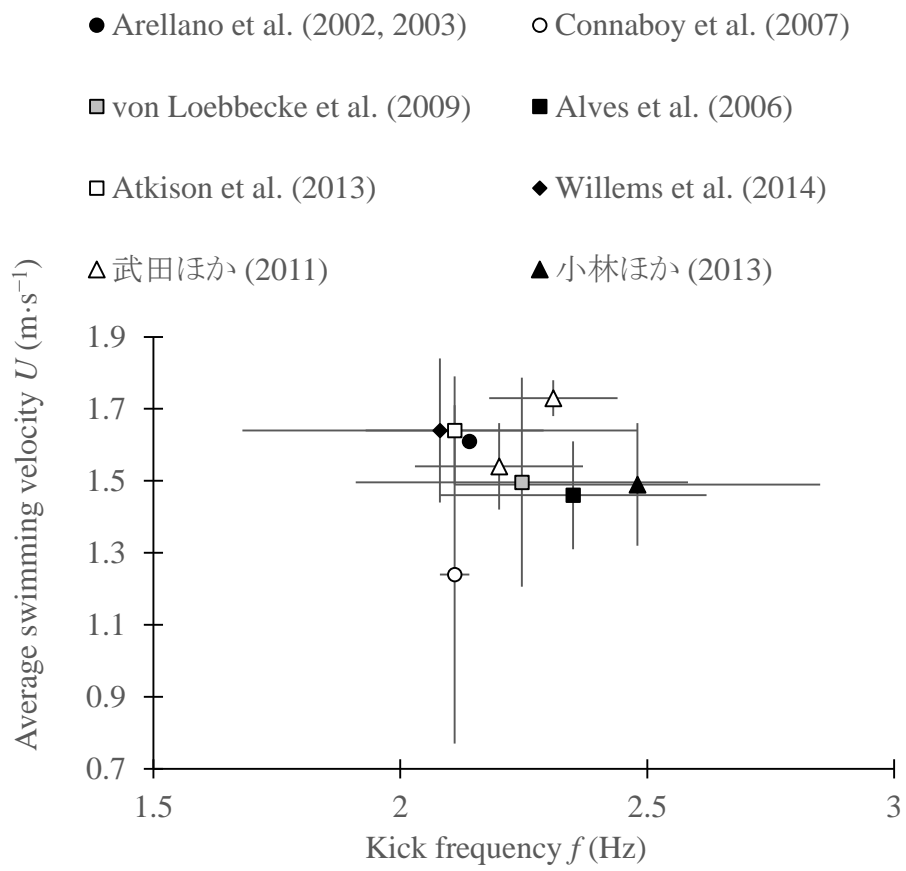


Figure 1. The relationship between kick frequency and swimming velocity in human undulatory underwater swimming.

UUS においてキック頻度と泳速度の関係性を調査するためには、泳者内のキック頻度を意図的に調節できる手法が必要である。近年、泳者のストローク頻度調節用の道具として、周期音を発する Tempo Trainer (FINIS Inc., USA) という商品が普及している (Figure 2)。これは、ストローク 1 周期にかかる時間を機器側で設定すると、一定の時間間隔で機器から周期音が発せられ、それを水泳帽の内部に入れておくことで泳者はその音を聞きながら泳ぐことができ、自己ストロークをその音と同期して泳ぐことで正確な頻度へと調節できる。周期音を用いて検討された結果であれば指導現場へと還元しやすいものと考えられるため、周期音を用いて UUS のキック頻度調節を行うことは理に適っていると考えられる。

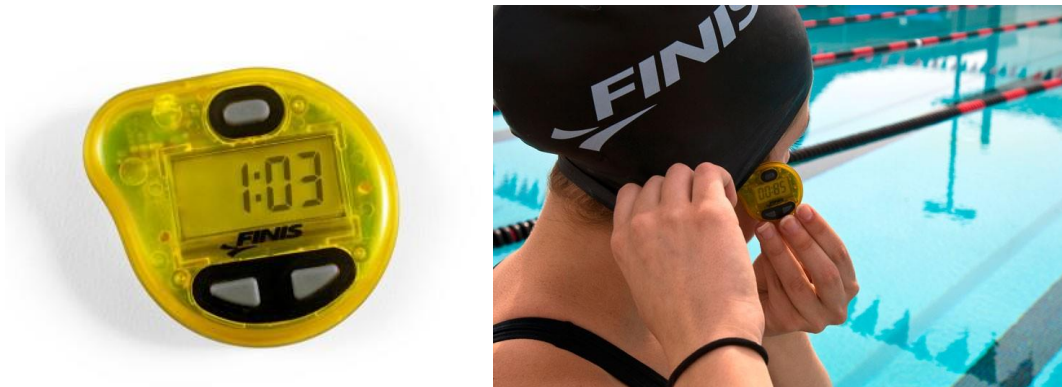


Figure 2. Image of tempo trainer usage.

さらに、周期音を運動で利用することによって、泳者内のリズムを改変できる可能性も指摘されている。周期音とタッピングを同期している最中のヒトの脳活動を計測した報告では、運動制御を司る小脳下部の活動が見られており、周期音との同期はヒトの内部運動リズムが誘い出される可能性が示唆されている (Jäncke, Loose, Lutz, Specht, & Shah, 2000)。さらに、周期音とタッピングの同期を行うことによって、リズム変化の適応が起こる可能性も指摘されている (Repp & Keller, 2004)。これはつまり、周期音によってキック頻度を調節した後の即時的な介入効果として、泳者自身が好んで選択しているキック頻度や他の運動学的変数にまで変化が及ぶ可能性があると考えることができる。周期音の利用は、単に泳者のキック頻度調節を行うためだけでなく、泳者のリズムを改変することに応用可能だと考えられる。

その一方で、周期音を運動で利用することの問題点も指摘されている。認知心理学の研究によれば、周期音と運動の同期中、ヒトは動こうとする意図と音に運動を協調させようとする意図の 2 つが生じるとみなされている (Repp, 2005)。さらに、運動中の学習者が自己運動へと注意を向けるほど運動の自動性、正確性、筋活動量が影響を受け、運動の学習が阻害されると指摘されている (Wulf, 2010)。これは、ヒトの運動学習において学習者内で感覚と運動の統合が必要であるという示唆を支持するものであり (Leonard, 2002; Schmidt & Lee, 1999; 松田と杉原, 1987; 麓, 2006)、運動技能を改善させるためには特定の感覚への注意が必要となってしまう。つまり、キック頻度調節のために、周期音に合わせて泳者が泳ぐことで、泳者の注意が変化し、それによって運動学習が阻害される可能性があるといえる。しかし、水泳において、泳技能の改善と感覚がどのように関

係しているのか、そもそも泳者がどの感覚に注意を向けて泳いでいるかは明らかにされておらず、その評価指標も存在していない。従来の水泳指導では、泳者に手足の動作を十分に理解させ、段階的に「進むこと」へと意識を変化させるよう指導が行われており（日本水泳連盟, 2012）、学習中に泳者の内部で注意の変化が起きているものと予想される。ゆえに、泳者の感覚を定量化する指標を作成し、実際の泳者の感覚を調査することには意義があるといえ、これらの検討によって周期音利用の妥当性を推察することが可能であり、泳法指導にも役立つ可能性がある。

周期音を用いて UUS のキック頻度を調節する上で、他にも事前に検討すべき点がある。UUS では、キック頻度が最も泳速度に影響する運動学的変数であったため、キック頻度の増加にけり幅の減少を加えるべきという指摘がある（Arellano et al., 2003）。シミュレーションによる報告では、泳者前面からの断面積の増加は、泳者に働く抵抗力の増大を招くことが明らかとなっており（Cohen et al., 2012）、UUS 中のけり幅減少が推奨される理由の 1 つだと考えられる。一方、フラッターキック（バタ足）では泳速度増加に応じてキック頻度は増加するが、けり幅は変化しないことが報告されている（Zamparo, Pendergast, Termin, & Minetti, 2002）。UUS において、推進力を得るためには下肢を上下に振幅させる必要であり、一方で抵抗力を減らすためにはその断面積を減少させなければならず、両者のバランスが求められる。しかし、泳速度のみを変化させると泳者はどのような方略で泳動作を変えるのかはこれまで調査されていない。泳者内における UUS の考えられる方略として、泳速度増加に応じてキック頻度は増加する可能性は高いが、けり幅は維持されるのか縮小するのかは不明である。その知見は、泳者内におけるキック頻度と泳速度の関係をさらに深く理解

できるものと考えられる。

UUS は、魚類の推進運動で報告される運動学的変数に着目することで、新たな知見が生まれる可能性も指摘されている。全身をうねらせて泳ぐ魚類は、連結された背骨を伝って頭から尻尾側へと波が移動する様子が観察され、ヒトの UUS もその動きを真似たのが始まりだと考えられている。この「うねり」は泳者の推進力と抵抗力を増減させる要因になるとみなされており (Zamparo et al., 2002)、近年ヒトの UUS でも着目され、その結果が報告され始めてきた (Connaboy et al., 2007, 2009; Hochstein & Blickhan, 2011; Nicolas, Bideau, Colobert, & Berton, 2007; Zamparo et al., 2002)。魚類の推進メカニズムの多くは Lighthill (1975) による、うねりに重点を置いた細長物体理論 (elongated body theory or slender body theory) を基に論じられることが多く、その理論がヒトにも応用され始めてきた。例えば、形態学的な違いから生物間ではうねり様式が異なることが明らかとなっており、Connaboy et al. (2007) はヒトの UUS を魚類と比較した結果、推進効率が良いとされるアジ型に近い準アジ型のうねり様式であったと報告している。泳速度は、推進力と抵抗力の増減によって決定されるため、うねりに着目することはヒトの UUS パフォーマンスへの理解を深めるのに役立つ。

上述内容は以下のようにまとめることができる。UUS において泳者内におけるキック頻度と泳速度の関係性は明らかとなっておらず、周期音を用いて頻度を調節すればこれを明らかにできる可能性がある。また、周期音と運動の同期がヒトのリズム生成に影響する可能性が指摘されているため、周期音による頻度調節の即時的な介入効果が期待される。しかし、周期音を利用することの弊

害として、泳者の感覚が変わり運動学習が阻害される可能性が指摘されている。そのため、その評価指標を確立し、知覚可能な感覚について調査する必要がある。これらの検討を行う上で、対象者には一定以上の技能レベルと、試技内容を理解できる認知力が求められ、大学生以上を対象とすることが望ましい。ゆえに、周期音を利用することによる泳速度への影響、泳者の感覚変化と運動学習への影響、リズム改変への影響、これらを検討していくことによって周期音が泳パフォーマンスへどのように影響するのか考えることができる。

2. 博士論文目的

本博士論文では、以下の 3 つの目的を設定した。大学競泳選手を対象に、1) 泳技能習熟と泳者の身体感覚の関連性を調査する。2) 泳者内における UUS のキック頻度と泳速度の関係性を明らかにする。3) キック頻度調節の介入が直後の UUS の泳動作に及ぼす影響について運動学習の観点を加味して検討する。

II. 文献研究

本博士論文の目的を達成するために、本章では関連する先行研究について調査する。

1. 水中ドルフィンキックに関する先行研究

1) 水中ドルフィンキックとキック頻度

水中ドルフィンキックは、1980 年のモスクワオリンピックで初めて披露されたとみなされている。背泳ぎのレースで、何人かの選手がスタート後に 25 m 付近まで潜水した (Counsilman & Counsilman, 1994)。この潜水泳技術は、競泳のスタートとターン後に行うことで、レースを有利にできる。Vorontsov and Rumyantsev (2000) は、水面で泳ぐより水中ドルフィンキックの方が高い推進力を生むと述べており、その理由として 1) 水面の造波抵抗を受けない、2) 腕のようなリカバリー局面が無い、3) 腕よりも強い力を発揮する下肢筋群を持っていることを挙げている。実際に、ストローク時よりも高い泳速度となることが報告されている (Takeda et al., 2009)。水中ドルフィンキックはその後普及し、多くの選手が利用するようになったが、1999 年には国際水泳連盟 (Federation internationale de natation; FINA) によってルール改正が行われ、潜水可能な泳距離が 15 m までに制限され、いまに至っている (2013 年現在)。一般的な泳者は、ターン時に壁を蹴った後はストリームライン姿勢をとり、壁を蹴った勢いを利用して水中をしばらく進むが、抵抗によって減速が生じるため 5 m 程度離れてから水中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)。この距離を差し引いて考えると、水中ドルフィンキックで泳

ぐことが可能な距離は、長水路プール (50 m) では約 20%、短水路プール (25 m) では約 40% であり、100 分の 1 秒の時間差で勝敗が決定する競泳において水中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。

水中ドルフィンキックは、平泳ぎ以外の泳法で用いられており、その動作は両腕を頭上へ挙上したストリームライン姿勢をとり、両足を同時に振幅させて水中を推進する (Figure 3)。これら泳技術は、全身がムチのようにしなり、うねりを利用して推進している様子から、水中うねり泳 (Undulatory underwater swimming または Underwater undulatory swimming; UUS) と呼ばれている (Connaboy et al., 2009)。競泳では、UUS を伏臥位姿勢で行えばドルフィンキック、仰臥位で行えばバサロキックと一般的に呼んでいる。UUS の研究は、競泳で用いられてきた背景から、いかに速く泳ぐかが着目された。ニジマスの遊泳運動を観察した研究では、魚の全身長 (5.5 cm から 56.0 cm の範囲) に関わらずキック頻度と泳速度は線形関係にあったが、けり幅は泳速度とは独立していた (Webb & Kostecki, 1984)。ヒトの UUS でも同様に、泳速度に最も影響する運動学的変数はキック頻度であることは既に報告されていた (Barthels & Adrian, 1971)。フラッターキックでも、キック頻度は泳速度と関係することが明らかになっている (Zamparo et al., 2002)。これらの結果を理由に、ヒトの UUS においては泳速度増加のためにはキック頻度を増加させるべきという提案がなされるようになった (Arellano et al., 2002, 2003)。シミュレーション上では、ヒトの UUS のキック頻度を増加させると推進力が増加することが確認されている (Cohen et al., 2012)。しかし、これまでのキック頻度と泳速度の関係性は、観察研究によるものであり、泳者間の比較やシミュレーションに

よって導かれた結果で論じられている。真の泳者のキック頻度と泳速度の関係を理解するために、
実測した泳者内でその関係性を調べる必要がある。

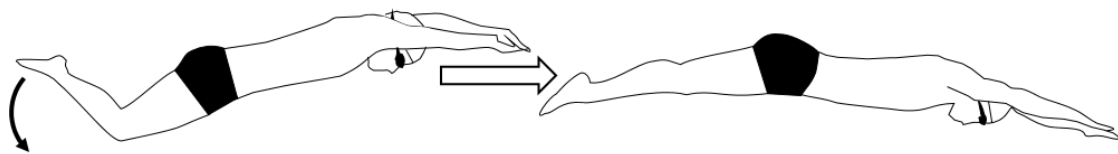


Figure 3. The movement of undulatory underwater swimming.

2) 推進メカニズム

UUS の推進メカニズムを探るために、近年では流体である水から力学的エネルギーをどのように受けてヒトが進んでいるのかが着目されてきた。不可視な水の流れを可視化する技術の 1 つに Particle Image Velocimetry method (以下 PIV 法と略す) がある。これは、流体中に粒子を散りばめ、この粒子が水の流れを追従していると仮定し、レーザーを照射することでこの粒子を撮影し水の流れ場を可視化する。UUS 中の泳者周りの流れ場を可視化した研究では、足部のけり下ろし動作後に、泳者の後方に渦が発生することが確認されている (Hochstein & Blickhan, 2011; Miwa, Matsuuchi, Shintani, Kamata, & Nomura, 2006)。ただし、この渦は流体に何らかの物理的作用が生じた結果を捉えているに過ぎないため、PIV 法のみでは因果関係まで明らかにできない。また、コンピュータ上で流体をシミュレーションする手法 (Computational Fluid Dynamics: 以下 CFD と略す) を用いて、泳者周りの渦を最適化計算によって導き出された結果を見ると (Cohen et al., 2012)、けり下ろし動作後にドーナツ型の渦が発生していることが分かる (Figure 4)。このドーナツ型の渦の中央では、ジェット流と呼ばれる水の質量の移動が起きており、この運動量の反作用を利用して推進力を得ているものと考えられている (Miwa et al., 2006)。また、近年ではけり下ろし動作中に膝の裏側で発生した渦が後方へと流れ、けり上げ動作時に流れてきたその渦の中を下肢が通過し、この流体力を再利用することで推進力を得ている可能性も指摘されている (Hochstein & Blickhan, 2011) (Figure 5)。これは、UUS においてけり上げ動作を素早く行う泳者の方が、泳速度は高いという結果を支持するといえる (Atkison et al., 2014)。一方、UUS の足関節の底屈角度が大きくなる

ほど、泳速度が向上することが、水泳用の人体シミュレーションモデルを用いた研究によって確認されており (杉本ほか, 2008)、実際の泳者を観察した研究でも、足関節の柔軟性だけでなく足首周りの筋力も泳パフォーマンスと相関関係が見られたことから (Willems et al., 2014)、柔軟で強い足首の機能を持つことで水から抗力を受け、それが推進力向上に繋がる可能性が示唆されている。これらのことから、UUS は下肢で流体力のエネルギーを利用して推進している確度は高いといえ、キック頻度と泳速度の関係性を説明する根拠となりうる。しかしながら、ジェット流や渦の再利用、足関節の底屈度といったいくつかの変数が、どの程度泳速度と関係しているのか、その推進メカニズムの全容は現時点では分かっていないといえる。

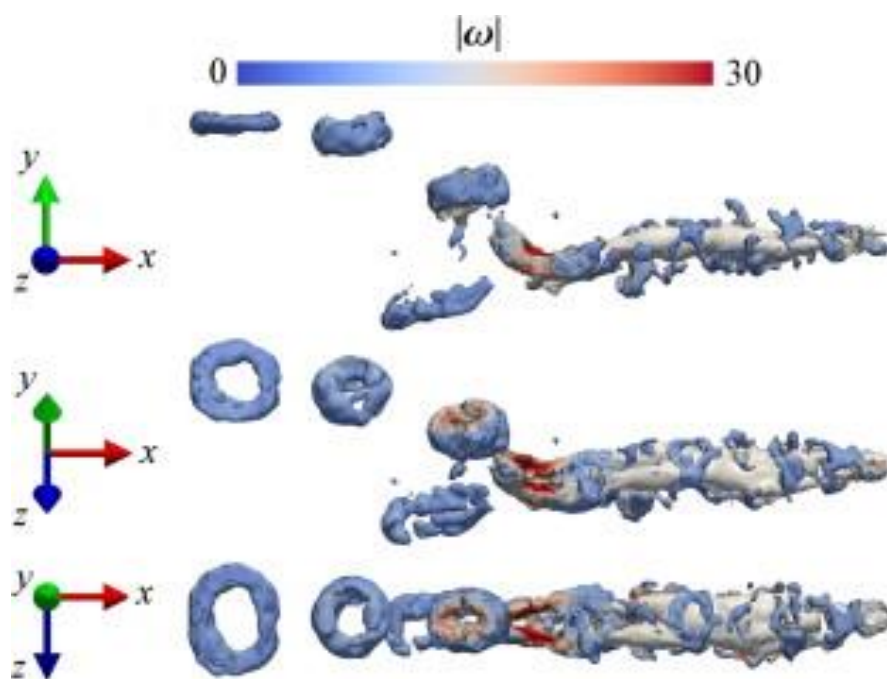


Figure 4. Isosurfaces of wake structures identified during undulatory underwater swimming (Cohen et al., 2012).

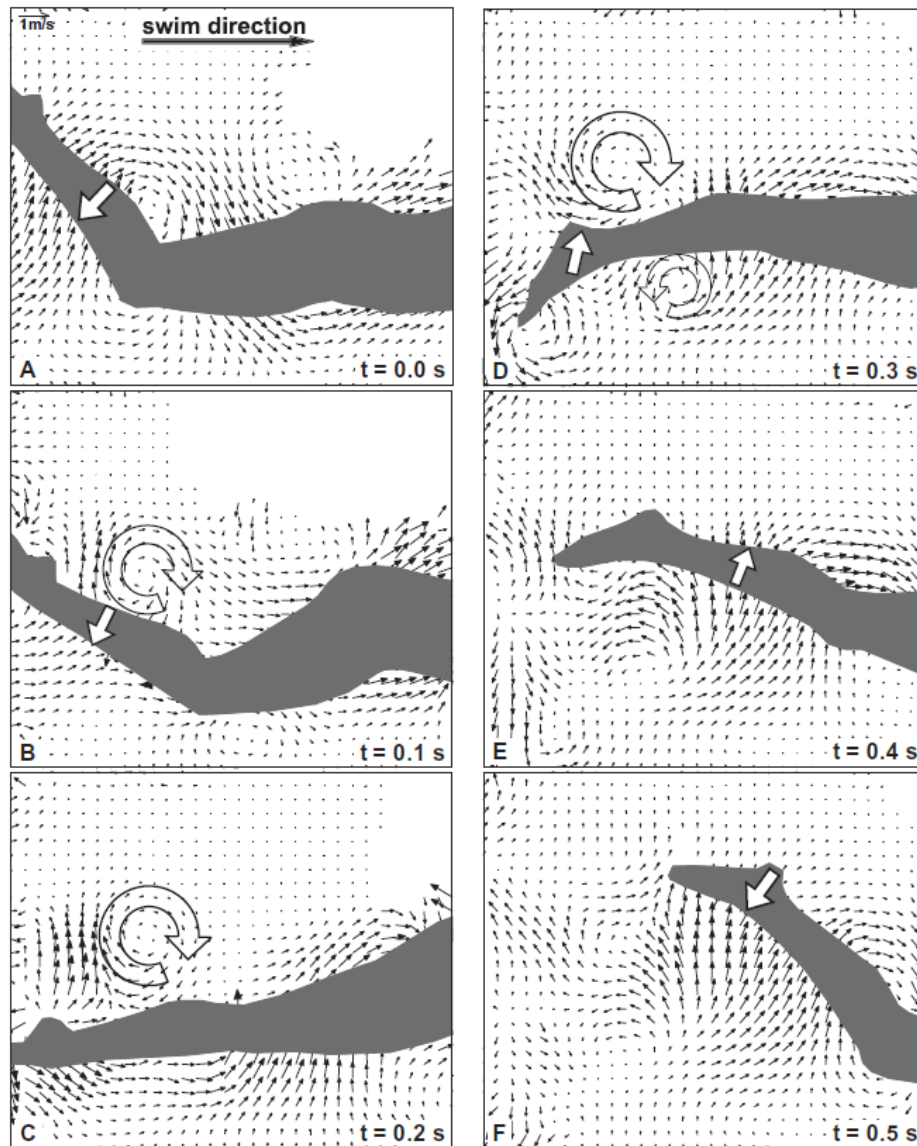


Figure 5. Typical flow visualization around swimmer's foot after kick motion (Hochstein & Blickhan, 2011).

3) 運動学的変数

UUS 研究で用いられる運動学的変数は主に泳速度とキック頻度、けり幅であったが (Connaboy et al., 2009)、近年新たな変数が着目されてきた。魚類の UUS の研究では、泳者の動作とその後方に形成される渦 (逆カルマン渦) との関係から、推進効率を定量化する試みがなされている (Rohr, 2004; G. S. Triantafyllou, Triantafyllou, & Grosenbaugh, 1993; M. S. Triantafyllou, Triantafyllou, & Gopalkrishnan, 1991)。そこでは、生物が有している渦を生成する能力を評価するために、泳者の末端 (尾、足先など) の動作情報と泳速度のみを用いており、振幅 A と周期時間 f 、推進泳速度 (水平泳速度) U の 3 つの変数で算出しており、以下の式で示される。

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

この値はストローハル数 (以下 St と略す) と呼ばれる無次元数である。これは、泳者の末端 (尾や足先) の振幅速度と、推進泳速度の比で示される泳者の推進効率であり、この値が小さいほど効率的な推進運動であるとみなされる。 St は、いうなれば遅い振幅速度で速く泳げれば推進効率が良く、速い振幅速度でもあまり進まなければ推進効率が悪いと解釈する。魚類では、 $St=0.2\sim0.4$ の範囲となり、非常に効率的な推進能力を有している。ヒトの UUS では、 $0.7\sim1.07$ の範囲が報告されており (Atkison et al., 2014; Connaboy et al., 2007)、魚類に比べれば非効率的である。ヒトの場合は下肢関節に解剖学的な制限があることから、イルカのような推進力を獲得することができない (Ungerechts, Daly, & Zhu, 1998)。

ヒトの下肢による水中推進運動は、水中ドルフィンキック以外にもフラッターキック (バタ足) とモ

ノフィン泳がある。近年、これら下肢を中心とした推進運動のエネルギー効率が着目されるようになってきている。いくつかのヒトを対象とした研究では、下肢による推進運動の内的仕事量と機械的効率について、泳速度による違いやフィンの有無、水面と水面下で比較されている (Nicolas et al., 2007; Zamparo et al., 2002; Zamparo, Pendergast, Termin, & Minetti, 2006)。そこでは、ムチのしなりのように連動した下肢の運動は魚類の推進運動と似ていることから、Lighthill (1975) による水棲動物の細長物体理論 (elongated-body theory or slender body theory) が基となって考察されている。

UUS も同様に、全身の関節が連動して振幅するため頭から足先にかけてうねり (undulation) が伝わっていく様子が観察される。このうねりは、泳者の推進力と抵抗力を増減させる要因になるとみなされている (Zamparo et al., 2002)。このため、うねりを基にした推進効率の指標として、全身を伝わるうねりの速度 (波速度 c) と泳速度 U によって算出される推進効率 (Froud Efficiency: フールド効率, 以下 η_F と略す) が近年報告されるようになった (Hochstein & Blickhan, 2011; Nicolas et al., 2007)。この η_F は、泳者の身体から水に対して部分的に利用された力学的エネルギーを反映しており (Zamparo et al., 2002)、つまり水に対して発揮した力がどの程度推進力に貢献したのかを示す値で、効率が良ければ $\eta_F=1$ に近づく。ヒトの UUS でこの値を報告しているものはほとんど見られず、0.66–0.68 の範囲での報告が見られる (Connaboy et al., 2007; Hochstein & Blickhan, 2011)。Connaboy et al. (2009) は、ヒトの UUS 研究では、効率について分析を進めることで最適なパフォーマンスを決定できることを示唆しており、さらに全身の協応性 (inter and intra-limb coordination) が直接的に泳速度を調節しているため、これらの変数について着目するべきだと結

論づけている。

水中を推進している魚は、尾と胸のヒレを用いて水に力を作用させている。魚類の遊泳運動は主に 3 つのうねり様式に分けられる (アレクサンダー & R.M.マクニール, 1992)。身体全身でうねり動作をして推進するウナギ型 (Anguilliform)、身体の後ろ部分でうねり動作をして推進するアジ型 (Carangiform)、尾のみで推進するハコフグ型 (Thunniform) がある (Figure 6)。高木 (2002) は、アジ型のうねり様式はエネルギー消費が少なくすむだけでなく、尾ヒレ全体に渡って揚力を発揮させており、いわゆる揚力型推進であり、小さな駆動力で泳げることから最も推進効率がよいと述べている。前述した波速度 c は、全身を伝わる波の速度であり、波の計算法則に従えばキック頻度で除すると UUS の波長 (λ) が算出できる。この λ と全身長との比によって身体長あたりの波長 (以下 λ_{BL} と略す) が算出でき、泳者のうねり様式を評価できる (Connaboy et al., 2009)。ヒトのうねり様式はウナギ型とアジ型の中間の準アジ型であったと報告されている (Connaboy et al., 2007)。このうねり様式では、上半身の振幅を少なくし可能な限り下半身側を利用して推進するものである。Nakashima (2009) は、シミュレーション手法を用いて効果的なヒトの UUS を検討し、その結果 UUS 中の上半身の振幅を抑えることで、前面抵抗が少なく効率の良い泳ぎになることを報告している。ゆえに、熟練した競泳選手は、自然と効率的な UUS のうねり様式を選択していた可能性が示唆されている。

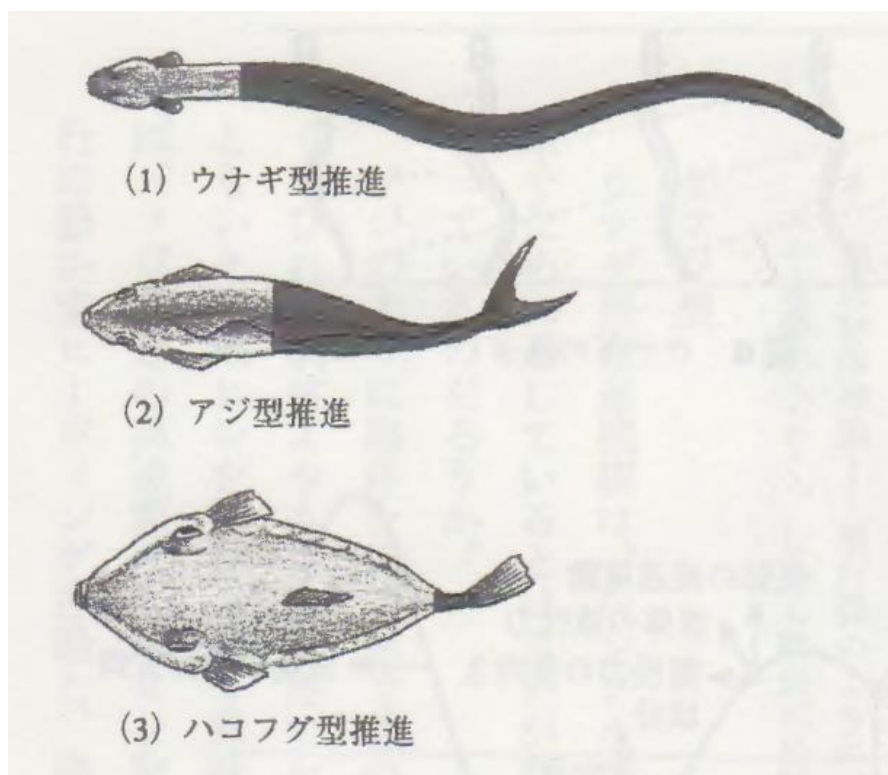


Figure 6. Propulsion type of three fishes (Takagi, 2002).

UUS の運動学的変数 (キネマティクス) の算出に際して、分析方法への配慮も必要である。

UUS は周期的な運動であり、けり上げとけり下ろし動作を繰り返すことで泳者は水中を推進する。

周期運動は、1 周期毎に同じ動作が再現されているように見えるが、関節トルクや筋出力は 1 周期毎に異なり、厳密には全く同じ動きではない。キック 1 周期分を分析対象とした場合、偶然生じた現象を捉えてしまい、誤った解釈を招く可能性がある。このため、UUS のキネマティクスを分析するために、何周期分のデータを平均化し代表値として用いるべきかという反復可能性 (repeatability) について検討された。その研究では、UUS を繰り返すことで同じ疲労や動機、あるいは学習や練習の効果が運動学的変数の変動性に影響するのかを調査し、級内相関係数が 95% となる繰り返し回数は平均で 3.57 周期であったと報告している (Connaboy, Coleman, Moir, & Sanders, 2010)。中でも、主要なキネマティクス (U , f , A , 関節角度) は周期ごとの反復可能性が高く、2 から 3 周期以上周期を加算し、平均しても値が変化しないため、キック 3 周期分の運動学的変数を代表値とすれば、信頼できる値を得られるとしている。これまでの水泳における動作分析は、泡の影響があり手動デジタイズが主流であった。このため、デジタイズ作業の手間もかかるため、UUS では同じ動作を繰り返していると仮定し、キック 1 周期分の分析を行うことが多かった。

近年、機器の発展によって輝度の高い水中 LED マーカーが広く使われるようになり、これにより自動デジタイズが可能となった。UUS の分析も、機器の発展に伴って変える必要がある。

これまでの先行研究から、泳パフォーマンスに対して UUS の重要な変数として、泳速度 U 、キック頻度 f 、けり幅 A 、ストローハル数 (渦の生成能) St 、波速度 (全身を伝わるうねり速度) c 、身

体長あたりの波長（全身の中で振幅している部分の割合） λ_{BL} 、フルード効率（推進効率） η_F があげられる。そこで、これらの変数について着目し、先行研究で報告されている値をまとめて表に示した (Table 1、Table 2)。

Table 1. Kinematic values of underwater undulatory swimming in previous study.

									Mean (SD)
Authors & subject details	Subjects/conditions	Body composition	U (m·s ⁻¹)	f (Hz)	A (m)	St	c (m·s ⁻¹)	λ_{BL}	η_F
Actual swimmer analysis									
Arellano et al. (2002, 2003) Thirty two skilled swimmers	International (n=19; M=12, F=7)	171.7 cm; 60.8 kg	1.61	2.14	0.62	0.79			
	National age-group (n=13; M=7, F=6)	169.2 cm; 58.2 kg	1.15	1.76	0.62	0.95			
Gavilan et al. (2006) Twenty skilled swimmers	International and national (M=10, F=10)		1.63 (0.14)	2.17 (0.32)					
Connaboy et al (2007) Fifteen skilled male swimmers	experience 9.4 ± 3.2 years	181.6 cm; 74.8 kg	1.24 (0.47)	2.11 (0.03)	0.63 (4.21)	1.07*	3.86 (1.25)	0.88 (0.19)	0.66*
Hochstein and Blichan (2011) Two national level female swimmers	High level (n=1)	178 cm; 73 kg; L=2.41	1.22 (0.06)	1.98 (0.10)	0.54 (0.04)	0.85 (0.06)	3.4 (0.19)	0.71*	0.68 (0.02)
	Normal level (n=1)	167 cm; 56.5 kg; L=2.25	1.18 (0.06)	2.13 (0.10)	0.52 (0.03)	0.93 (0.06)	3.57 (0.27)	0.74*	0.67 (0.01)
von Loebbecke et al (2009) Twenty one Olympic swimmers	Female	L=2.16	1.38 (0.12)	2.08 (0.36)	0.49 (0.07)	0.74 (0.15)			
	Male	L=2.39	1.50 (0.29)	2.25 (0.34)	0.56 (0.10)	0.84 (0.15)			
Alves et al (2006) Six junior national level swimmers	Dorsal		1.42 (0.21)	2.3 (0.33)	0.55 (0.08)	0.95 (0.13)			
	Prone	177 cm; 69.3 Kg	1.46 (0.15)	2.35 (0.27)	0.5 (0.06)	0.86 (0.07)			
	Lateral		1.27 (0.11)	2.08 (0.36)	0.59 (0.09)	0.95 (0.08)			
Atkison et al (2013) Fifteen adult male swimmers	experience 11.4 ± 5.6 years	L=2.39	1.64 (0.15)	2.11 (0.18)	0.55 (0.07)	0.71*			
Willems et al (2014) Twenty-six swimmers	National level (M=15, F=11)	174 cm; 61.7 kg	1.64 (0.20)	2.08 (0.40)					
武田ほか (2011) 15名の大学競泳選手の特徴	上位 (n=8)	174.1 cm; 69.6 kg	1.73 (0.05)	2.31 (0.13)	0.55 (0.04)	0.73			
	下位 (n=7)		1.54 (0.12)	2.2 (0.17)	0.57 (0.05)	0.81			
小林ほか (2013) 6名のドルフィンキック中の体幹部の特徴	大学男子競泳選手	175 cm; 70.9 kg	1.49 (0.17)	2.48 (0.37)	0.53 (0.11)	0.86 (0.09)			

* Author calculated

Note: U is average swimming velocity, f is kick frequency, A is kick amplitude, St is strouhal number, c is wave velocity, λ_{BL} is wavelength per body length, η_F is froude efficiency.

Table 2. Kinematic values of underwater undulatory swimming in simulation, flutter kick, mono fin swimming studies.

									Mean (SD)	
Authors & subject details		Subjects/conditions	Body composition	U (m·s ⁻¹)	f (Hz)	A (m)	St	c (m·s ⁻¹)	λ_{BL}	η_F
Simulation analysis										
Lyttle and Keys (2004)		Large A/Slow f		2.16	2.27	0.54	0.57			
An elite national level swimmer		Small A/Fast f		2.13	2.63	0.42	0.52			
Cohen et al (2012)			L=2.35		2.17	0.46				
an elite level male swimmer										
von Loebbecke et al (2009)		Female (n=1)	L=2.30	0.95	1.8	0.64	1.21			
Olympic swimmers		Male (n=1)	L=2.80	1.31	2.4	0.58	1.06			
Flutter kick										
Zamparo et al (2012)		Race Smulation, after	178 cm; 70 kg							0.71 (0.12)
Thirteen swimmers		turn 5-15m								
Zamparo et al (2002)		Flatler kick	179 cm; 71.6 kg	1	1.9 (0.07)	0.36 (0.04)	0.57*			0.61*
Seven elite college swimmers		Fin swimming		1	1.18 (0.15)	0.29 (0.05)	0.42*			0.66*
成田ほか (2012)										
9名の競泳選手の疲労の影響		大学男子競泳選手	175.1 cm; 69.1 kg	1.1 (0.09)	2.4 (0.10)	0.32 (0.03)	0.46			
Mono fin swimming										
Boitel et al (2010)				1.42	0.79					
Eight well trained Mf swimmers (M=4; F=4))										
Nicolas et al (2007)			177 cm;	2.5 (0.10)	2.09 (0.31)	0.55 (0.10)	0.46 (0.11)	4.38 (0.46)	2.12	0.79 (0.03)
Twelve Mf swimmers										
Nicolas et al (2009)		Surface	177 cm; 71 kg; L=2.77	2.36 (0.09)	2.15 (0.24)	0.46 (0.09)	0.42			0.74 (0.04)
Twelve Mf swimmers		Underwater		2.5 (0.10)	2.08 (0.31)	0.55 (0.10)	0.46			0.79 (0.03)
大下ほか (2008)		Expert (n=5)		2.06 (0.04)	1.21 (0.07)					
9名と世界記録との比較		Normal (n=4)		2 (0.05)	1.36 (0.10)					
		World record holder swimmer		2.46	1.52					

* Author calculated

Note: U is average swimming velocity, f is kick frequency, A is kick amplitude, St is strouhal number, c is wave velocity, λ_{BL} is wavelength per body length, η_F is froude efficiency.

例として、男子競泳選手に着目し、先行研究で報告されている f と U の平均値と標準偏差からその関係性を前章で図示している (Figure 1, p11)。標準的な男子競泳選手の場合、 f は 2.0～2.5 Hz、 U は $1.3\sim 1.7\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の範囲となっており、この範囲に男子競泳選手は当てはまるものと推察される。けり幅 A に関しては泳者間での差は小さく、0.5～0.6 m の範囲内に多くの泳者が含まれる。一方、波速度や波長、フルード効率といったうねり動作の特徴を反映する変数についてはほとんど着目されていないことがうかがえる。

UUS 研究の多くは、泳者間の比較による結果を報告している。Connaboy et al. (2009) は 100 編もの UUS 研究を調査し、キック頻度と泳速度の真の関係性を探るためには、実測における泳者内の変化に着目すべきであると結論づけている。例えば、キック頻度が泳速度に最も影響する運動学的変数であったことから、泳者が UUS で高い泳速度を得るためにはキック頻度の増加に加えて、けり幅を減少させた方が良いだろうという推察による提案が見られる (Arellano et al., 2003)。しかし、実際に泳者内においてキック頻度の増減が泳速度、けり幅に影響するのかは不明であり、量反応関係は分かっていない。一方で、ランニングや自転車運動といった別の周期運動では、ヒトが快適だと思っているピッチや頻度は、神経筋骨格システムの要求が最小化されるよう自己組織化されている可能性があると言われている (Martin, Sanderson, & Umberger, 2000)。ゆえに、キック頻度の調節が泳パフォーマンスにとって不利に働く可能性もあるといえる。その観点からも、実測による UUS のキック頻度調節を行うことには意義がある。さらに、全身の協応性が泳速度を直接調節しているため、これまで着目されていない波速度やうねり様式といった運動学的変数について

も分析すべきだと述べられており (Connaboy et al., 2009)、これらの変数についても見ていくことで、UUS パフォーマンスを理解できるといえる。

4) 水中ドルフィンキックに関する先行研究まとめ

先行研究をまとめると以下の通りである。

- (1) 水中ドルフィンキック (UUS) は、キック頻度 (f) が最も泳速度 (U) に影響する運動学的変数であり、両者の関係性が重要視されてきた。しかし、泳者内で f と U の関係が成立するのか検討されてきておらず、両者の真の関係性は不明である。
- (2) UUS はムチのしなりのようなうねりを伴った下肢のキック動作を行うことで足部に流体力が働き、熟練した泳者はそれを推進力として利用することで水中を推進している。
- (3) UUS の泳パフォーマンスを分析する指標として、振幅速度と泳速度の比で示されるストローク数 (St)、全身の波速度 (c) と泳速度との比で示されるフルード効率 (η_F)、うねり様式を示す身体長あたりの波長 (λ_{BL}) を用いることに意義がある。

2. 運動学習と身体感覚に関する先行研究

1) 運動学習段階

心理学では、運動学習には 3 つの段階があると考えられている (麓, 2006)。まず第 1 段階として、学習しようとする運動がどのようなものか、言語的に理解し、認知的に情報を処理して動きそのものに注意を向ける。第 2 段階へ進むと、どのような動きをするのかという問題から、知覚と運動の統合が進み、その動きをどのように遂行するのかという問題へ移行する。動作は巧みに精確になり安定化が進み、動作フォームが変化していく。最後の第 3 段階では熟練の域に達し、この段階では誤りが著しく減り、高い水準の動きが自動化される。自然に動作が行える分、戦術あるいは競争相手などへ注意を向けることが可能となる。Fitts and Posner (1967) は、それぞれ認知段階 (cognitive stage)、統合段階 (associative stage)、自動化段階 (autonomous stage) と呼び、運動学習の各段階でヒトの中枢に変化が起きていると考えられている。

運動学習の 3 つの段階は、神経科学的に証明されてきている。脳画像法によれば、初期認知段階では言語中枢（主に前頭葉・側頭葉・頭頂葉）が活動することがわかっている (Jenkins, Brooks, Nixon, Frackowiak, & Passingham, 1994)。ヒトは運動学習の初期段階で、指導者に指示された内容を思い出しながら自分に言い聞かすよう運動を実行し、この段階では言語情報を処理しているようである。また、ブロードマンの 2 野（体性感覚の一部）は学習の初期段階で活動するが、一連の動きが一旦学習されると活動は低下する (Asanuma & Keller, 1991)。脳は自分の運動によって生じた感覚情報を利用しているが、これは運動スキル学習の初期段階において感覚野の

神経活動が上昇していることから神経科学的に示唆されている (Seitz & Roland, 1992)。運動の中間段階になると、様々な運動戦略が試され、成功したか失敗したかによってその作戦を採用するか否かを判断しており、運動の結果を比較する。この段階では皮質運動連合野と感覚運動連合野が選択的に刺激されており (Grafton et al., 1992)、運動と感覚の統合が起きているようである。学習中に頭頂連合野の活動が低下することが明らかになっており (Seitz & Roland, 1992)、これは運動学習中に受ける求心性の放電は変わらなくとも、中枢神経系内の感覚入力への統合には変化が起きていると考えられている (Leonard, 2002)。つまり、学習の段階によってある特定の感覚信号を選択的に知覚している可能性があるということである。さらに上達すると、過度の精神集中は不要で、意識せずに適応し・調整し・反応することができる。この段階では大脳基底核などの他の部位に活動がみられ (Jenkins et al., 1994)、運動は既に自動化されているようで、他の箇所には注意を向けられる。神経科学分野でも求心性の感覚入力的重要性が心理学と共通して述べられている。

2) 泳動作の調節

水泳における運動学習に視点を移すと、水泳の指導書によれば (日本水泳連盟, 2012)、技術トレーニングやスプリントトレーニングという項目において泳フォーム改善方法が紹介されている。1 つはドリル練習と呼ばれており、泳者は片手泳ぎなどでゆっくりと泳ぎ、自己の泳フォームを調節していく。もう 1 つは、パドルやチューブなどの道具を用いた物理的な制限を泳者に課すことで負荷をかけ、副次的な効果として泳フォーム改善を狙うものである。しかしながら、指導書内では泳技

能改善に関する記述は少ない。このような方法論の検討の多くは指導現場で実際に行われていると考えられるものの、泳動作の質的な変化が起きたとしてもその評価が難しく、科学的な実証報告がほとんど見られないのが現状だと考えられる。

一方、泳者のストローク頻度調節方法として、Tempo Trainer (Figure 2, p13) が既に用いられている。ヒトは、一定間隔の光や音の刺激に合わせて運動することができ、これは感覚運動同期 (Sensorymotor synchronization; 以下 SMS) と呼ばれている (Repp & Su, 2013; Repp, 2005)。ヒトの聴覚は視覚に比べて時間分解能が高いことや、脳領域では聴覚野は視覚野よりも運動野や体性感覚野の位置が近いことから、聴覚刺激による SMS が容易だと考えられており (Repp, 2005)、周期音を利用した頻度調節法は理に適っているといえる。SMS を調査した研究の多くは、正確なリズムが求められる運動に着目しており、タッピングや楽器の演奏を対象とした研究が多く見受けられる。近年、三浦のグループはヒトのダンス能力について調査しており (Miura, Kudo, & Nakazawa, 2013; Miura, Kudo, Ohtsuki, Kanehisa, & Nakazawa, 2013; Miura, Kudo, Ohtsuki, & Kanehisa, 2011)、非ダンサーであっても、周期音の頻度を変えることで 60 から 220 bpm (1 分間に 220 回) の範囲で、ヒトは膝を屈伸させたリズム運動が行えることを示した。また、逆位相 (音刺激間で屈曲する) の動作は、速い頻度になると自然と元の位相状態に戻るため (引き込み現象)、音と運動の同期には合わせやすい動作のタイミングがあるものと考えられている。他のダイナミックな全身運動に対しても周期音は用いられており、歩行や走行 (Martin et al., 2000)、自転車運動 (Bernard et al., 2003)、さらに泳運動でも用いられている (Alberty, Potdevin, Dekerle, Pelayo, & Sidney, 2011; Thompson,

MacLaren, Lees, & Atkinson, 2002; Vercruyssen et al., 2012)。頻度調節に周期音が広く用いられており、この方法によって検討された結果であれば現場へと還元しやすいものと考えられる。

3) 泳者の身体感覚

Poulton (1957) はスキルを環境の予測という観点から 2 つに分類し、環境が絶えず変化し続け、不安定で予測不可能な環境で実行するスキルをオープンスキル (バレーボール、サッカー、バスケット、格闘技など)、環境の変化が少なく予測が可能な環境で実行するスキルをクローズドスキル (体操や水泳、陸上、アーチェリーなど) とした。パフォーマンス向上のためには、スキル特性に応じた練習が必要であり、オープンスキルは時々刻々と変化する事態で先を見越した反応を選択し、さらにその状況に応じた動きができるような能力を身につけられるよう練習し、クローズドスキルは運動を習慣化させ運動パターンやリズムの形成を目指すとしている (松田 & 杉原, 1987)。実際の水泳指導でも、泳者に手足の動作を十分に理解させた後に段階的に進むことへと意識を変化させるよう指導が行われている (日本水泳連盟, 2012)。前述した運動学習の段階にあるように、指導の各段階で泳者が向ける身体感覚への注意は変化しており、さらに競泳選手にもなれば既に自動化段階にあり、向けている注意も別の箇所へ移行しているものと推察される。宮下 (1970) は、泳者が発揮した力を水に対して伝える泳技術、いわゆる「水に対する勘」が競泳選手には備わっていると述べている。この競泳選手の優れた泳技術が自動化されたものなのか、あるいは随意的に注意を向ける必要があるのか具体的な明示はこれまで見られないものの、泳者が向けるべき注意は

いくつか提言されている。泳者は主に手部で推進力を発揮しているとみなされていることから、水の流れを掌でとらえる触覚が重要だという指摘 (Counsilman, 1968)、さらに理論上は水の抵抗を減らし効率的に泳げれば泳タイム短縮につながるため、身体位置が重要だという指摘 (日本水泳連盟, 2012)、またバタフライ泳の習得にタイミングを理解させることで技能習得が促進したことからリズム感が重要だという指摘 (Wang & Hart, 2005)、ストリームライン姿勢を崩さないように関節角度が重要という指摘 (Elipot et al., 2009) などがある。しかし、実際の泳者がどこに注意を向けて泳いでいるのか調査された報告は皆無である。

近年、泳パフォーマンスと関連すると考えられる新たな観点として、ローリングのリズム (Sanders & Psycharakis, 2009)、呼吸と腕の協応性 (Seifert, Chollet, & Allard, 2005)、ストロークのリズム (Hellard et al., 2008) が報告されている。これらの報告を見れば自動化段階にある泳者であっても、泳動作の周期性やタイミングに対して注意を向けて泳いでいる可能性がある。大杉ほか (2007) は、競泳パフォーマンスに関与する技術関連要因の因子構造を検討した結果、リズム関連因子が分化したことを報告している。これは、リズムやタイミングといった泳動作は、泳パフォーマンスを構成する要素の 1 つであると泳者が自覚していることとなる。ゆえに、リズムやタイミングへの注意が泳パフォーマンスと関連している可能性もあるといえる。

認知心理学的研究によれば、周期音と運動を同期させると、ヒトは音を聞くという意図と、運動を同期させようとする意図を持つこととなり (Repp, 2005)、通常の運動時とは情報処理の過程が異なると考えられている。自動化段階にある泳者に対して、周期音を聞かせて泳がせることで、ある箇所

へと向いていた注意が周期音を呈示することで、泳者の意図が変わり、普段から向けている身体感覚への注意も変わる可能性がある。また、Wulf (2010) は、指導者からの教示によって学習者の注意の向け方が変わるだけでなく、その注意と運動学習が関連することを指摘している。彼らは、学習者の注意を自己の筋感覚や関節角度などの固有感覚に向ける内的焦点（インターナルフォーカス）群と、投げたボールの着地点や運動が環境に対して与える影響などに注意を向ける外的焦点（エクスターナルフォーカス）群に分類し、注意の違いによる学習効果を様々な運動種目で比較した。例えばスキーシュミレーターを用いた研究では（Wulf, Höß, & Prinz, 1998）、運動学習後にはエクスターナルフォーカス群の方がパフォーマンスは向上し、学習の保持効果も見られたことから、注意を外的焦点にすると練習効果が高いと結論づけた。この研究以外にも、ゴルフでのパッティング練習効果、バスケットボールのフリースロー、ダーツ、アメリカンフットボールのプレースキック、サッカーのインステップキック、テニスのサーブ、垂直跳びなど、多種目でエクスターナルフォーカスの効果があったと報告している（Wulf, 2012）。エクスターナルフォーカスの特徴として、1) 運動頻度調節の増加（McNevin, Shea, & Wulf, 2003）、2) 注意要求量の軽減（Wulf, McNevin, & Shea, 2001）、3) 筋活動の低下による運動の効率化（Vance, Wulf, Töllner, McNevin, & Mercer, 2004; Zachry, Wulf, Mercer, & Bezodis, 2005）が報告されている。また、熟練者でもエクスターナルフォーカスによって運動の正確性が高まるなど、パフォーマンス向上の可能性が示されている（Wulf, 2010）。一方で、インターナルフォーカスは熟練者であっても運動の正確性や安定性を低下させる可能性があること、またエクスターナルフォーカスに関しても、あまりにもエクスターナルフォ

ーカスの指示が多いと情報量に圧倒されてパフォーマンスが低下すること、技能レベルに応じた課題でなければむしろ不利益をもたらすこと、などの両方で留意点があると彼らは述べている。ゆえに、頻度調節に周期音を用いることで、泳者が感覚へ向ける注意が変わる可能性があり、これがインターナルフォーカスに当てはまる場合には泳者の運動学習を阻害し、泳者にとって不利になるといえる。

前述した通り、リズムやタイミング、協応性が泳パフォーマンスと関連している可能性が指摘されており (Sanders & Psycharakis, 2009; Seifert, Leblanc, Chollet, & Delignières, 2010; Wang & Hart, 2005)、泳者は普段からそれらに注意を向けて泳いでいる可能性も考えられる。周期音と運動を同期させると、ヒトは音と運動を協調させようと意図するため (Repp, 2005)、周期音を利用するとヒトの注意が変わると考えられている。しかし、水泳で周期音を用いれば、泳者は音とのタイミングを合わせ、一定のリズムで泳ごうと注意を向けるはずである。ゆえに、泳者が普段からタイミング等に注意を向けて泳いでいるならば、周期音に合わせて泳ぐことは泳者の感覚に合ったものと思われる。また、水泳において周期音の利用が有効であると思われる報告もある。初心者レベルの大学生を対象に、バタフライの泳動作を音に変えて授業前に聞かせてから水泳授業を受講した群と、通常の授業のみを受講した群の泳技能習熟度を追跡調査した研究では、音の情報提示を受けていた群の方が泳技能向上は著しかった (Wang & Hart, 2005)。これは、音で提示された泳動作の情報が学習者に対して泳ぎのタイミングを理解しやすくさせたため、泳ぎの感覚に近いことで泳技能学習に有効であったと考察されている。つまり、音情報自体には泳動作のタイミング理解を助ける働

きがある。さらに、周期音によるストロークやキック頻度調節自体に介入効果がある可能性も指摘されている。ヒトが聴覚刺激あるいは視覚刺激に合わせてタッピングする際の脳活動を計測した研究によれば (Jäncke et al., 2000)、視覚刺激に比べて聴覚刺激の方がタッピング中に運動制御を司る小脳や視床下部の活動が顕著に増加し、タッピングの周期性も正確であったため、周期音と運動との同期はヒトの内部運動リズムを誘い出すと結論づけている。さらに、周期音と運動の同期によってリズム変化への適応が起こる可能性も示唆されている (Repp & Keller, 2004)。これは、ヒトの中枢には時間を生成する内部時計 (time keeper) が存在し、それが影響を受けて時間のスピードが変化する可能性や (小野田, 2004)、タッピングや打楽器による接触が身体へと求心性フィードバックを与え、それが周期間隔の誤差を減らす学習の強力な要素になっていると考えられている (Madison, Karampela, Ullén, & Holm, 2013)。ゆえに、周期音との同期後に、ヒトが自然に刻むリズムが変わる可能性はあると思われる。周期音とキック頻度を同期することで泳者の感覚が変化するか、さらに感覚変化がリズムを変えることに繋がるのかを調べることは、指導現場にとって有益な情報となりうる。このため、周期音によって頻度調節を行うことの応用例を示すことができれば、周期音を利用する意味について包括的に考察することが可能となる。

4) 運動学習と身体感覚に関する先行研究まとめ

先行研究をまとめると以下の通りである。

- (1) 運動学習の進行は認知段階、統合段階、自動化段階の 3 段階に分類され、学習が進むに
れて運動は自動化されていく。学習の段階によってある特定の感覚信号を選択的に知覚して
いる可能性がある。
- (2) 水泳はクローズドスキルに分類され、自己の身体運動を習慣化させ運動パターンやリズムの
形成を目指す。近年、泳動作のリズムやタイミングが泳パフォーマンスに関連している可能性
が指摘されており、熟練した泳者はそこに注意を向けて泳いでいる可能性がある。
- (3) 周期音と運動を同期することで頻度の調節が可能である。ただし、周期音と運動の同期によっ
て実施者が向ける感覚への注意が変わる可能性がある。
- (4) 学習者が向ける注意の箇所によって運動学習効果が変わるため、注意を向けるべき箇所が
重要となる。また、注意の向け方によっては熟練者でも技能を改善できる。
- (5) 周期音はリズムやタイミング理解を助け、さらに周期音と運動を同期させることで自己内部リズ
ムを引き出し、ヒトのリズム変化の適応が起こる可能性があり、周期音を利用することによる即
時的な介入効果が期待できる。

III.研究課題、仮説、限界

1. 研究課題

本博士論文では競泳選手の UUS (水中ドルフィンキック) を対象に、周期音を用いて泳者のキック頻度を調節する。これを検討するために先行研究を調べた結果、以下の問題点が浮かび上がった。

- 1) UUS において、実際の泳者内でキック頻度と泳速度の関係性は明らかとなっていない。

さらに、近年 UUS のパフォーマンスに関与する運動学的変数が報告されているが、これらについても報告が少なく、泳者内におけるキック頻度との関係性は不明である。
- 2) UUS 中の泳者のキック頻度調節を行う際に周期音利用が適しているが、泳者が感覚へ向ける注意が変わり運動学習を阻害することが指摘されている。しかし、運動学習と泳者が注意を向ける感覚の関係は明らかとなっておらず、その評価指標も存在しない。
- 3) 周期音と運動の同期による即時的な介入効果として、ヒトの感覚とリズム変化が起こる可能性が指摘されているにも関わらず、水泳において周期音を利用した実践的・応用的な検証がなされていない。

そこで本博士論文では、まず上記 2) の問題点を解決することとし、以下の 4 つの研究課題を設定した。

[研究課題 I]

競泳選手が泳技能改善時に重視している身体感覚を調査する。

[研究課題 II]

泳者内における UUS 中の泳速度調節がキック頻度、さらに他の運動学的変数に与える影響について調査する。

[研究課題 III]

周期音を用いて UUS のキック頻度を調節し、これが他の運動学的変数に影響するのか調査する。研究課題 III では、以下の課題に分けて検討する。

1) 研究課題 III-1

最大努力時以下のキック頻度での周期音によるキック頻度調節法の検討

2) 研究課題 III-2

最大努力時以上のキック頻度での周期音によるキック頻度調節法の検討

[研究課題 IV]

周期音を用いて UUS のキック頻度を調節し、その即時的なリズム改変効果について運動学的変数と運動学習の観点から調査する。

2. 研究の枠組み

本研究課題の枠組みについて **Figure 7** に示した。本研究では、水泳における周期音利用の有意性について、泳パフォーマンスに与える影響を中心に検討していく。UUS を対象として周期音を用いてキック頻度を調節するが、それに先立ち、運動学習研究として質問紙調査による周期音利用の妥当性を確認する。さらにバイオメカニクス研究として回流水槽を利用して UUS の泳速度増加方略の確認を行う。これらの結果を踏まえ、周期音を活用して泳者のキック頻度を調節し、泳速度や他の運動学的変数へ与える影響について、最大努力時以下および最大努力時以上のキック頻度で検討していく。この周期音を用いた方法についての実用性を想定し、即時的な介入効果について、運動学習の観点から踏まえて調査する。

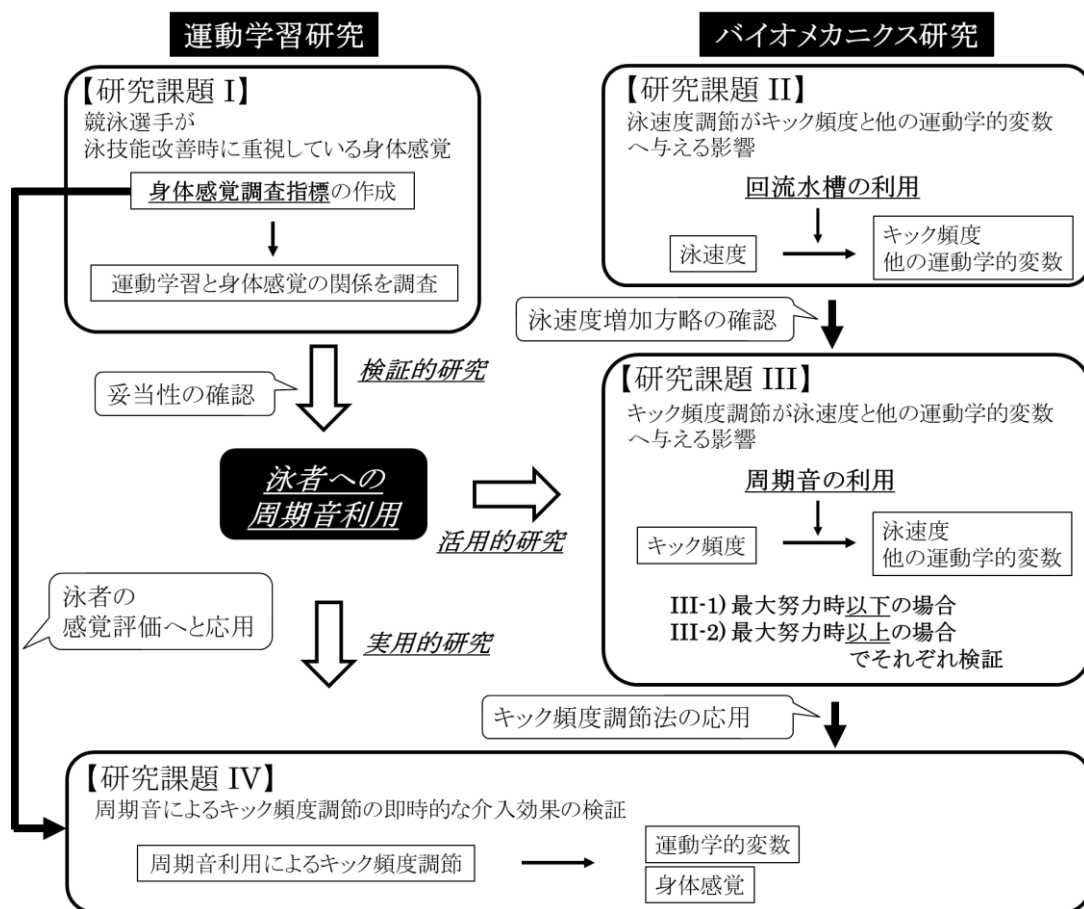


Figure 7. Framework of this study.

3. 研究仮説

- 1) 泳技能改善時の泳者は、リズムやタイミング、協応性への注意を重視している。
- 2) UUS では、キック頻度と泳速度は関連するが、最大努力時以上のキック頻度で泳いても泳速度はそれ以上増加しない。
- 3) 周期音による頻度調節後には、即時的な介入効果として泳者のキック頻度の変化が見られる。

4. 研究の限界

1) 注意と泳パフォーマンスの関係

本博士論文では、泳者が泳技能改善時に重視している身体感覚を調査し、泳者がその感覚に注意を向けて泳ぐことで、泳技能改善に影響すると仮定している。しかし、この両者の因果関係は、熟練した泳者がこの関係性を認識し、重視していると回答しただけであり、実際のパフォーマンスを分析した実証実験に基づくものではない。ゆえに、これは本博士論文の限界といえる。この関係を明らかにするためには、泳者の身体感覚への注意と泳パフォーマンスを縦断的に追跡し続けなければならない、労力と時間を要するといえる。また、直接的な介入実験を行うための科学的根拠が乏しいのが実情であり、泳者にとって微細な感覚の変化が泳パフォーマンスに影響する恐れがある限り、熟練した競泳選手を対象として行うことは難しいと考える。

2) 泳運動への発展性

本博士論文は UUS を対象とし、周期音を用いてキック頻度を調節する。聴覚刺激と周期運動の同期は、上肢に比べて下肢の方が合わせにくいと考えられており (Repp, 2005)、周期音によって UUS のキック頻度調節が可能であるならば、上肢で推進する通常の 4 泳法でも応用できるものと仮定している。これは、演繹的であり本博士論文の限界だといえる。しかしながら、周期音を発生させる商品が既に普及し、先行研究でも上肢との同期が可能であることは示されていることから、本研究の方法論は上肢での応用可能性は高いと考えられる。

3) 初心者への応用

本博士論文は熟練者を対象者としており、ある程度の泳技能を有した泳者を対象とした場合の結果を想定している。ゆえに、初心者の泳技能向上に有効かどうかは検討しておらず、これも本博士論文の限界である。

IV. 競泳選手が泳技能改善時に重視している身体感覚

IV-1 大学競泳選手が泳技能改善時に重視している身体感覚と因子構造 (研究課題I)

1. 背景と目的

キック頻度調節のために周期音を用いるのが妥当だと考えられる一方で、ヒトは周期音と運動の同期中に注意が変化し (Repp, 2005)、さらに注意の箇所が変わることで運動学習に影響するといわれている (Wulf, 2010)。音を提示されることで、泳者は自己のリズムに注意が向く可能性があるといわれているものの (Wang & Hart, 2005)、従来から泳者はリズムやタイミングに注意を向けている可能性が指摘されている (Hellard et al., 2008; Sanders & Psycharakis, 2009; Seifert, Leblanc, et al., 2010)。しかし、泳者がどの身体感覚に注意を向けて泳いでいるのか、運動学習と感覚への注意が関連しているのかは明らかとなっていない。そこで、大学競泳選手が泳技能改善時に重要と考えている身体感覚を調査し、泳技能を改善するうえで主要な身体感覚を明らかにすることを主要な目的とした。加えて、注意を向けている身体感覚について、パフォーマンスレベルとの関係性、さらに性別、泳距離タイプ別、泳法別という属性による違いがあるか明らかにすることとした。

2. 方法

1) 質問紙の作成と事前調査

泳者が泳技能改善時に重視している身体感覚を調査する質問項目を作成するために、本研究課題では事前調査を 2 回行った。初めに、全国大会出場経験のある競泳選手 4 名と水泳指導者 3 名による聞き取り調査および自由記述式の回答によって、質問紙作成に必要な水泳独自の身体感覚に関する情報を収集した後、日本水泳連盟が作成した水泳指導書を参考に質問項目を作成し、泳者が理解しやすいような質問内容となっているかどうか検討した。次に水泳指導の専門家 6 名によって質問内容の妥当性について検討し、大杉ほか (2007) が作成した競泳パフォーマンスに影響する泳技能に関する質問項目を参考に本研究課題用の 17 の質問項目を作成した。さらに指導現場での利用を想定し、泳者への負担や回答の信頼性向上に配慮し、最終的に 15 の質問項目を精選した。なお質問紙の形式は、辻と有馬 (1987) によるアンケート調査法に則って作成した。

上述の過程を経て作成した質問項目を用いて、県大会出場から全国大会入賞レベルの選手が在籍する T 大学競泳選手 40 名を対象に予備調査を行い、記述内容が分かりにくい質問項目がないか検討し、修正を加えた。同様の手順で 2 回目の予備調査を行い、明らかな天井効果と床下効果が見られたもの、質問内容が重複している可能性が高いもの 3 項目を除外し、最終的に 12 の質問項目を決定した。なお本調査に用いた質問項目を Table 3 に示す。

Table 3. The list of question items and each abbreviations.

No.	質問項目 (Question)	略称 (Abbreviation)
	【問】泳フォームを改善しなければいけない時、 重要に考えている身体感覚は？ Q. When you had to improve your swimming form, how did you give attention to your kinesthetic ? You concentrated your attention on...	
1	<u>タイミングをうまく合わせるように意識して泳いでいると思う</u> (timing of the movements)	タイミング (Timing)
2	<u>水が肌の上を流れてくような、水が周りで流れていく感覚を意識して泳いでいると思う</u> (tactile of flowing water around your body)	水流感覚 (Water flow)
3	<u>手は外側をかいてキックの位置は高くなど、身体の位置を意識して泳いでいると思う</u> (positioning of your limbs, ex) your elbow position too high or low)	身体位置 (Body position)
4	<u>手の動きを目で追ったり、プール底のラインの流れ方など、何か見えているものを目で追うように意識して泳いでいると思う</u> (seeing of visible object, ex) your stroke trajectory drawn correct or not)	視覚 (Vision)
5	<u>腹筋や背筋など、体幹をどのように使っているか意識して泳いでいると思う</u> (muscles of near trunk how you use)	体幹 (Trunk)
6	<u>一定のリズムにうまく合わせるように意識して泳いでいると思う</u> (rhythm of the movements)	リズム (Rhythm)
7	<u>キックの音など、水中で聞こえる音に意識して泳いでいると思う</u> (sound caused by your movement, ex) kick sound, sweep sound)	聴覚 (Auditory)
8	<u>ゆっくりかいて速くリカバリーするなど、手足の動く速度の変化に意識して泳いでいると思う</u> (velocity changes of your limbs)	手足速度 (Limb velocity)
9	<u>ヒザを曲げすぎないようになど、手足の関節の角度に意識して泳いでいると思う</u> (angle changes of your limbs)	関節角度 (Joint angle)
10	<u>手や足で水を押すような、水をとらえる抵抗を意識して泳いでいると思う</u> (stroke catch caused by water drag)	水の抵抗 (Catching)
11	<u>1かき何秒かかっているかなど、動きに対する時間に意識して泳いでいると思う</u> (time duration for the movement)	動作時間 (Duration)
12	<u>無駄な力を使わず楽に泳げるように、運動の効率に意識して泳いでいると思う</u> (economy of the movement for comfortabl)	運動効率 (Economy)

2) 対象者

調査対象として、2008 年度の日本学生選手権水泳競技大会に出場し、指導者が在籍している大学を選定した。このうち、調査の同意が得られた全国 14 大学に所属する大学競泳選手を対象者とし、総勢 475 名の対象者へ 2009 年 3 月に質問紙を郵送した。質問紙の調査項目は、対象者の基本情報に関する質問と、泳技能改善時に意識している身体感覚への質問によって構成した。このうち 375 名分が回収され、九州地区で 2 校、中国地区で 1 校、近畿地区で 2 校、中部地区で 3 校、関東地区で 5 校の計 13 の大学水泳部より回答を得た。内訳として国立大学は 3 校、私立大学は 10 校であり、日本学生選手権水泳競技大会にて競技成績の優れた団体に与えられるシード権を持つ大学 5 校が含まれていた。2009 年、各ブロックで行われた学生選手権に参加した大学競泳選手は 3411 名（男子 2312 名、女子 1099 名）であり（スポーツクリエイティブエージェンシー, online)、競技に参加している日本国内の大学競泳選手を母集団とすると、約 1 割のサンプルサイズであった。泳者が意識している身体感覚に関する質問項目への回答が未回答のものを除外した結果、有効回答者数は 296 名であり有効回収率は 62.3% であった。なお、本研究課題では因子分析を行うことから、基本情報が未回答であっても、因子抽出に必要な項目へ回答しているものは全て分析対象に含めた。基本情報より、性別は男子が 180 名、女子が 115 名、無記入が 1 名であった。記入された対象者のベストタイムから、日本水泳連盟が定める 2009 年度資格級に照らし合わせて 219 名分の資格級を決定し、これを対象者のパフォーマンスレベルを表す指標とした。なおベストタイム無記入者は 77 名であった。各資格級で性

別の判明している人数を Table 4 に示した。2009 年度日本学生選手権に参加した学生数は 1468 名 (男子 922 名、女子 546 名) であった (スポーツクリエイティブエージェンシー, online)。

資格級の 10 級が日本学生選手権の標準記録として設けられており、本研究課題の回答者 107 名が日本学生選手権に参加できる資格を持っていた。対象者全体の資格級の平均値と標準偏差は 9.19 ± 1.35 級であり、男子は 8.93 ± 1.33 級、女子は 9.69 ± 1.25 級であった。得意な泳距離を短距離種目か長距離種目か回答してもらった結果、泳距離タイプ別では、長距離型が 115 名、短距離型が 168 名、無記入は 13 名であった。専門とする泳種目に回答してもらった結果、自由形が 118 名、背泳ぎが 31 名、平泳ぎが 60 名、バタフライが 48 名、個人メドレーが 38 名、無記入が 1 名であった。本研究課題では泳法の違いによって意識している身体感覚の差を調べるため、全ての泳法が含まれる個人メドレーは分析に含めず、4 種目 (自由形、背泳ぎ、平泳ぎ、バタフライ) の回答者を分析対象とした。対象者の属性ごとの基本情報を Table 5 に示す。

対象者は、各質問項目の内容について泳フォーム改善時に重要と考えている身体感覚の程度を 7 段階評価「1:全くそう思わない、2:そう思わない、3:あまりそう思わない、4:どちらともいえない、5:少しそう思う、6:そう思う、7:とてもそう思う」のいずれかに回答した。調査は各大学競泳部の責任者から選手に主旨を説明した上で行われ、配布・回収された。また、質問紙には研究主旨、目的、方法、得られた情報の扱いなどに関する解説を記載し、研究主旨の同意を得たうえで回答してもらった。

Table 4. Number of participants (female swimmers) and percentage in each Japanese swim grade.

Class	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Total
No. of Participants (Female)	1	3	6 (2)	11 (2)	36 (9)	55 (9)	83 (39)	21 (11)	2 (2)	1 (1)	219 (75)
Percentage	0.5	1.4	2.7	5.0	16.4	25.1	37.9	9.6	0.9	0.5	100.0
Female percentage			2.7	2.7	12.0	12.0	52.0	14.7	2.7	1.3	100.0

Note : Class is identified by using Japan Swimming Federation's qualification at 2009

Table 5. Age and competitive year of the participants divided by sex, distance type, and swimming style.

		Mean (SD)	
	Group	Age	Competitive year
	All	19.7 (1.1)	10.6 (2.6)
Sex	Male (n=180)	19.7 (1.1)	10.3 (2.5)
	Female (n=115)	19.7 (1.0)	11.0 (2.7)
Distance type	Short (n=168)	19.7 (1.1)	10.4 (2.9)
	Long (n=115)	19.6 (1.1)	10.7 (2.3)
Swimming style	Free (n=118)	19.5 (1.1)	10.1 (2.8)
	Back (n=31)	19.7 (1.0)	11.1 (2.5)
	Breast (n=60)	19.9 (1.1)	10.4 (2.6)
	Butterfly (n=48)	20.0 (1.2)	11.4 (2.5)

3) 分析手順

統計分析は、統計解析ソフトウェア IBM SPSS statistics 19.0 for windows を用いて行った。泳技改善に關与する身体感覚の因子構造を検討するために、主因子法、Promax 基準による斜交回転を用いた因子分析を施した。共通性と因子負荷量を考慮しながら質問項目を取捨選択し、因子を決定した。因子負荷量は .40 以上とし、因子間の相関係数を算出した。調査項目の信頼性を検討するために、Cronbach の α 係数を算出した。決定した各因子の項目得点の合計点を算出し、下位尺度得点とした。また、12 の質問項目間の差の検定には、繰り返しのある一元配置分散分析 (ANOVA) および Sidak 法を用いて事後検定を行った。分散分析にて Mauchly 球面性検定を行い、球面性が仮定できなかった場合には Greenhouse-Geisser の ϵ を利用して修正された自由度を採用した。因子間の関係性は、因子を構成する下位尺度得点を用いて Pearson の相関係数によって評価した。また、パフォーマンスレベルと身体感覚との関係性についても、対象者の資格級と各因子の下位尺度得点との Pearson の相関係数によって評価した。各因子における性差及び泳距離タイプ差を検討するために、因子を構成する下位尺度得点について対応のない t 検定を用いて比較を行った。さらに、泳法間の差の検討では繰り返しのない一元配置の分散分析 (ANOVA) および Tukey 法を用いて比較を行った。なお、本研究課題の有意水準は 5% とした。

3. 結果

Figure 8 に各質問項目の平均得点と標準偏差を示した。質問項目得点の全体平均は 5.03 ± 1.53 であり、大学競泳選手は全般的に身体感覚を重視している傾向が見られた。全体平均値以上の項目は、「タイミング」、「身体位置」、「水の抵抗」、「運動効率」、「リズム」、「体幹」の 6 項目であった。最も高い得点を示したのは「タイミング」に関する質問項目であり、最も低い得点を示したのは「聴覚」に関する質問項目であった。12 の質問項目への分散分析の結果、質問項目に単純主効果が認められた ($F(9.34, 2755.96) = 163.26, p < .05$)。事後検定については、質問項目間の多くで有意差が認められており ($p < .05$)、図が繁雑とならぬよう項目間で有意差が認められなかったもののみを Figure 8 内に示した。全質問項目の平均値以上であった 6 項目の内、「タイミング」は有意に他の項目より得点が高かった。Table 6 に、因子分析の結果から得た因子パターン行列および各因子を構成する質問項目における Cronbach の α 係数、解釈された因子名、因子間の相関行列を示した。因子分析の結果、質問項目と因子の解釈妥当性を検討し、「水流感覚」「体幹」「手足速度」「動作時間」の 4 項目を除外したところ、固有値が 1.0 以上の因子が 3 因子抽出された。第 1 因子は、「水の抵抗」、「関節角度」、「身体位置」、「運動効率」の 4 項目が高い因子負荷量を示していたことから、「体性感覚因子」と解釈した。第 2 因子は「タイミング」「リズム」の 2 項目が高い因子負荷量を示していたことから「時間調節因子」と解釈した。第 3 因子は「視覚」「聴覚」が高い因子負荷量を示していたことから「特殊感覚因子」と解釈した。

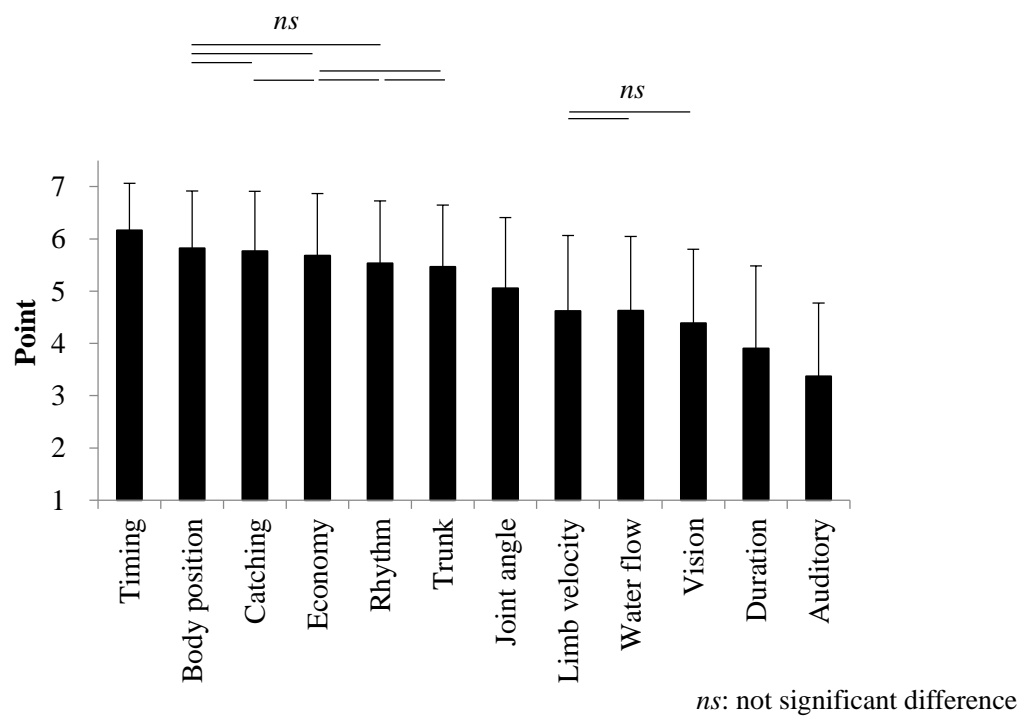


Figure 8. Average point of each kinesthesia in descending order according to point.

Table 6. The result of factor loading, communality, cronbach's alpha, each factor name, and Pearson's value of between the factors.

		Factor			Communality	Cronbach's alpha	Named factor
No.	Item	F1	F2	F3			
10	Catching	.79	-.09	-.09	.53	.68	Somatic sence
9	Joint angle	.64	-.03	.02	.41		
3	Body position	.47	.16	.15	.39		
12	Economy	.41	.11	-.07	.19		
1	Timing	-.01	.83	-.05	.67	.57	Time control
6	Rhythm	.04	.45	.08	.25		
4	Vision	.04	-.04	.71	.51	.51	Special sence
7	Auditory	-.10	.05	.52	.25		
Factor correlation matrix							
		F1	F2				
	F2	.41					
	F3	.38	.27				

Note: The analysis used principal factor analysis with promax rotation. The item of Trunk, Limb velocity, Water flow, and Duration were eliminated in the process of factor analysis. Factor loadings value of more than .40 are showed in bold.

因子分析によって得られた 3 因子を構成する質問項目の得点を回答者ごとに合計し、因子の下位尺度得点を算出した。各因子の得点は、体性感覚で 22.32 ± 3.41 点、時間調節で 11.69 ± 1.76 点、特殊感覚で 7.75 ± 2.32 点であった。

因子得点とパフォーマンスレベルとの関係をみるために、資格級と因子得点間で相関分析を行った結果、体性感覚との相関係数は $r = .00$ ($p = .95$)、時間調節との相関係数は $r = .04$ ($p = .58$)、特殊感覚との相関係数は $r = -.08$ ($p = .26$) であり、3 因子全てにパフォーマンスレベルとの相関関係は見られなかった。

因子得点について性別、泳距離タイプ別の違いをみるために、各群に分類して比較した結果を Table 7 に示した。各因子で性別間に有意差は認められなかった。時間調節では、泳距離タイプ間に有意差が認められた ($p < .05$)。

Table 8 に泳法別の下位尺度得点の平均値と標準偏差を示した。各因子の分散分析の結果、体性感覚で泳法間に有意差が認められた ($p < .05$)。多重比較を行った結果、体性感覚で自由形と平泳ぎの泳法間に下位尺度得点の有意差が認められた ($p < .05$)。

Table 7. The result of student's t -test at somatic sence, time control, and special sence at divided in sex and distance type.

Factor	Sex			Distance type		
	Male	Female	t -value	Short	Long	t -value
Somatic sence	22.6 (3.4)	21.9 (3.5)	1.61	22.2 (3.3)	22.5 (3.7)	.60
Time control	11.7 (1.9)	11.7 (1.5)	.01	11.4 (1.86)	12.1 (1.57)	2.99*
Special sence	7.7 (2.3)	7.8 (2.4)	.51	7.6 (2.4)	8.1 (2.2)	1.89

* $p < .05$

Table 8. The result of ANOVA at somatic sence, time control, and special sence at divided in swimming style.

Factor	Swimming Style				<i>F</i> -value
	Free	Back	Breast	Butterfly	
Somatic sence	21.6 ^a (3.9)	22.8 (2.5)	23.1 ^a (3.2)	22.9 (2.6)	3.48*
Time control	11.6 (2.0)	11.7 (1.7)	11.9 (1.5)	11.9 (1.6)	.57
Special sence	7.7 (2.5)	8.0 (2.4)	7.6 (2.3)	7.8 (2.0)	.02

^a significant difference between Free and Breast, * $p < .05$

4. 考察

1) 質問項目の信頼性と妥当性

本研究課題では因子分析を行い、質問項目の信頼性は Cronbach の α 係数によって検討した。この値は .70 や .80 以上あれば内的整合性が高く、信頼性が高いと判断できる (小塩, 2004)。本研究課題ではそれよりもやや低い値であった (Table 6)。大杉ほか (2007) は、競泳パフォーマンスに關与する技術要因について質問紙調査を行い、因子分析によって 42 の質問項目から 7 因子を抽出し、信頼性係数は .70 以上であった。因子分析は、因子を構成する質問項目数が少なければ α 係数が低くなるという特徴がある (小塩, 2004)。質問紙調査は、項目数が多いすぎると回答者が負担を感じ、有効回収率が下がる傾向があるため (辻と有馬, 1987)、本研究課題では指導現場での使用を想定して質問項目数を減らした。その結果として、3 因子に対する質問項目数が少なくなったことが信頼性係数を低くした一因といえる。

本研究課題で行った調査の結果、タイミングの項目は平均値と標準偏差の合計が 7 点以上となる天井効果傾向が見られた。タイミングは泳技能改善のために泳者が注意を向けるべき重要な感覚の 1 つだと考えられる。しかし、泳動作におけるタイミングを考えると、クロール泳では呼吸と上肢動作のタイミングや手足のタイミングがあり、レベルによる違いや (Seifert, Leblanc, et al., 2010)、平泳ぎでは四肢間の協応性があるなど (Chollet, Seifert, Leblanc, Boulesteix, & Carter, 2004)、タイミングで表現される要素が多くある。ゆえに、泳者の属性が変わることで、重視している泳技能の内容が変わり、質問項目の信頼性と妥当性が低くなっている可能性がある。本研究課題では大学競

泳選手を対象としており、詳細な状況は指定せずに、泳技能改善時に共通して重視している身体感覚を調査した。このため、運動学習と注意を向けている身体感覚との関係性は、巨視的に見た推察だといえる。しかし、国内の大学競泳選手を母集団とすると本研究課題で得たサンプルサイズは約 1 割に及び、得られた結果の意義は高いと考えられる。

2) 泳技能改善時の身体感覚

因子分析の結果、3 因子が抽出された。先に第 1 因子と第 3 因子について考察する。体性感覚は、触覚、温度感覚、痛覚などの皮膚感覚、そして筋や腱、関節など運動器官に起こる深部感覚に分かれる (岩村, 2001)。第 1 因子を構成する 4 項目の内容は、主にヒトの体性感覚に関するものであり、第 1 因子を「体性感覚因子」と解釈した。また、ヒトの視覚と聴覚は特殊感覚と呼ばれていることから (岩村, 2001)、第 3 因子は構成される 2 項目から「特殊感覚因子」と解釈した。一方、第 2 因子の因子負荷量が高かった 2 つの質問項目は「タイミング」と「リズム」であり、これらの項目は時系列に関する内容で、泳技能改善のために泳者が意識的に動作時間を調節している様子がイメージできる。ヒトが時間を知覚し、調節する神経機構が脳内に存在すると考えられており (小野田, 2004)、第 2 因子は「時間調節因子」と解釈した。

運動技能は、変化しやすい環境で行う球技などのオープンスキルと、変化の少ない環境で行う体操などのクローズドスキルに分けられる (Schmidt & Lee, 1999)。オープンスキルになるほど、環境の変化を把握する必要があり、クローズドスキルになるほど自己の運動に集中すると考えられて

いる。本研究課題で特殊感覚因子を構成する項目の得点が低かったのは、水泳がよりクローズドスキルに近い運動技能であるという特徴を反映したものだと考えられる。また、泳中の泳者にとって特殊感覚は泳動作に必要なかどうか調べた研究によれば (Cicciarella, 1982)、競泳選手が目隠しをした状態で泳ぐと、複雑な泳動作になるほど泳タイムが低下することを報告している。これは、視覚情報が泳動作の実行には必要であることを示している。その一方で、視覚障害者の泳動作は健常者とほとんど変わらないという報告や (Daly, Malone, Burkett, Gabrys, & Satkunskiene, 2009)、視覚障害の程度によって泳動作にそれほど大きな違いはないという報告があり (Malone, Sanders, Schiltz, & Steadward, 2001)、視覚情報が遮断された状態が長く続いても、水を捕らえる感覚やリズムを保つ感覚だけでもヒトは泳げることが示唆されている。つまり、泳者は視覚情報がない状態でも適応することは可能だが、急に遮断されると泳ぎにくくなるといえる。視覚に関する調査が見られる一方で、泳中の聴覚が泳動作に必要なかどうかを調査した研究は見られない。本研究課題の結果では特殊感覚得点が低くなっていたが、視覚や聴覚の情報は不要であるとは断定できず、視覚からの情報は若干必要だが、聴覚からの情報は重要性が低いことが示唆された。

体性感覚因子と時間調節因子を構成する質問項目は、全体の平均値以上であったことから (Figure 8)、この 2 つの因子は、泳技能改善時に泳者が特に重要視する感覚とみなすことができる。はじめに体性感覚について考察する。水泳は、水中で水平姿勢を保持したまま行う全身運動であり、自己運動を目認することはほとんどできない。泳者が泳技能を改善する場合、泳中は自己動作を確認しにくい体性感覚に頼らざるをえず、体性感覚の変化から自己の泳動作を捉えよ

うとするはずである。体性感覚因子を構成する質問項目は「水の抵抗」、「関節角度」、「身体位置」、「運動効率」と全てが 5 点以上であることから、本研究課題ではこれら 4 つが、泳技能改善時に大学競泳選手が意識を向ける主要な体性感覚であることが示唆された。これらの結果は、泳中は触覚を意識すべきだという報告や (Counsilman, 1968)、身体の角度調節を意識すべきだという報告 (Elipot et al., 2009) を支持する結果であり、従来から提唱されてきた泳者が意識すべき体性感覚と合致し、競泳選手が重要に考えている体性感覚の実態を捉えることができたといえる。

時間調節因子を構成する下位の質問項目は「タイミング」と「リズム」であり、高い得点を示していた。熟練した泳者ほど四肢の協応性を調節できることが報告されている (Seifert et al., 2005; Seifert, Leblanc, et al., 2010)。水泳は泳者が四肢を周期的に動かす運動であり、泳者には常に運動のリズムと動作間の協応性を保つことが求められるといえる。本研究課題の対象者の競泳歴は 10.55 ± 2.61 年であり (Table 5)、熟練した泳者の集団とみなすことができ、これが時間調節因子の下位尺度得点が高い理由だと考えられる。また、大杉ほか (2007) は大学競泳選手の競泳パフォーマンスに関する技術関連要因を因子分析によって調査した結果、競泳パフォーマンスに関する技術関連要因は水泳技能因子と泳動作のリズム技能因子、他 5 因子に分化したと報告しており、本研究課題において時系列に関する時間調節因子が抽出された結果と一致する。泳中に時系列の情報を処理しているという認識があるのは、熟練した競泳選手に共通したものであるといえる。また、時間調節因子を構成する項目の得点で、特に「タイミング」は最も高い得点を示したことから、速く泳ぐ技能を獲得しようとする泳者が重要に考える感覚の 1 つである可能性が示唆され

た。

以上のことから、泳技能改善時の身体感覚の特徴として、大学競泳選手は体性感覚を頼りに時間調節を行い、若干の視覚情報を利用している可能性が示唆された。興味深いことに、ヒトの上肢の周期運動中の学習効果を調査した研究では、視覚情報はたまに与える方が運動学習には効果的であることが明らかとなっている (Ikegami, Hirashima, Osu, & Nozaki, 2012)。つまり、泳技能改善のために、泳者は体性感覚と泳動作のタイミングに注意を向けながら泳いでおり、正しく自分が推進しているかどうかをたまに視認する程度で良いと感じているものと思われる。また、Wulf (2010) は、熟練者になるほど運動の自動化が行われ、運動の意識がより高次レベルの効果 (エクスターナルフォーカス) に注意を向けると述べている。本研究課題では、泳技能改善時という特定の場面において大学競泳選手が重要に考えている身体感覚を調査しており、質問項目の多くは、より身体運動の制御自体 (インターナルフォーカス) に関連するものであった。Wulf (2010) は、熟練者がインターナルフォーカスすると運動が制限されるため、パフォーマンスが低くなることを報告しているが、泳技能改善時の大学競泳選手はインターナルフォーカスを重視していることが示された。水泳は道具を使用せず自己の身体を制御し、水の抵抗を利用して推進するため、必然的に意識がインターナルフォーカスされるものと思われる。

3) 属性による違い

本研究課題の結果から、パフォーマンスレベルと 3 因子の下位尺度得点には相関関係は見ら

れなかった。また、性別においても、その差が認められなかった (Table 7)。本研究課題の対象者の資格級の平均は 9.19 ± 1.35 級であり、最も資格級の低い対象者は 4 級であった (Table 4)。

日本水泳連盟が定めた 2009 年度資格級 4 級は、男子自由形 100m の標準泳タイムが 1 分 3 秒であり、比較的高いパフォーマンスレベルであったとみなすことができる。また、対象者の競技歴も 10 年以上あり、経験年数から考えても熟練者とみなせる。大杉ほか (2007) は、心理的指標を用いて大学競泳選手の競泳パフォーマンスに関与する技術関連要因を調べた結果、性差および競技力差は見られなかったことを報告している。また、彼らはこの結果に対し、大学競泳選手が実際に獲得している技能水準に差があったとしても、競泳パフォーマンスに関与する技術関連要因を重要視する認識は性や競技力を問わず差が無いことを指摘している。このため、大学競泳選手という集団の特徴として、競泳パフォーマンスに対する技術への重要性の認識は、性別とパフォーマンスレベル別に見ても差がなく、さらに本研究課題によって実際の泳技能の改善時において重視する程度にも差が無いことが示唆された。

長距離型の方が短距離型よりも時間調節因子の下位尺度得点が有意に高い値を示した (Table 7)。長距離型の選手にとっては、長い距離をより速い泳速で泳ぎきるためのエネルギー産生を持続することが重要な課題であるため (マグリシオ, 1999)、泳技能改善時には運動効率を考慮した泳技能習得が必要といえる。自由形では、ストローク頻度の増加に伴って泳者の疲労度も増加するという因果関係にあるため (Barbosa et al., 2010)、長距離型の泳者は泳速度を保つために一定のテンポで泳ぎ続ける必要があり、泳中はストローク頻度の調節への意識が強まるものと推

察される。

泳法別では、自由形と平泳ぎの体性感覚の得点に有意な差が認められた (Table 8)。平泳ぎは他の 3 泳法と異なり、足底部で水を押し出す動作によって推進力を得ている。角川ほか (2012) は、平泳ぎ下肢動作中の足部にかかる圧力分布から流体力を推定した結果より、平泳ぎの下肢動作では泳者が足部の角度や動作自体を調節している可能性があることを示唆している。よって、自由形に比べて平泳ぎの下肢動作には体性感覚の情報を処理する量が多いため、泳技能改善時の体性感觉得点が高いものと推察される。

IV-2 研究課題 I まとめ

研究課題 I の目的は、大学競泳選手が泳技能改善時に重要と考えている身体感覚を調査し、泳技能を改善するうえで主要な身体感覚を明らかにすること、さらに意識している泳中の身体感覚とパフォーマンスレベルとの関係性、加えて性別、泳距離タイプ別、泳法別という属性の違いが、意識している泳中の身体感覚の違いをもたらすか否かを明らかにすることであった。その結果、大学競泳選手が泳技能改善時に重要と考えている身体感覚は、体性感覚因子、時間調節因子、特殊感覚因子の 3 因子構造であることが明らかとなった。特に重視している身体感覚は「タイミング」「リズム」の時間調節と、「水の抵抗」「関節角度」「身体位置」「運動効率」の体性感覚で、その一方で「聴覚」「視覚」の特殊感覚は重要性が低いことが明らかとなった。3 因子の下位尺度得点とパフォーマンスレベルに関係性は見られず、性別でも差が認められなかったことから、大学競泳選手以上では、パフォーマンスレベルや性に関係なく、重視する身体感覚の程度に差は無いことが示唆された。長距離タイプの方が短距離タイプに比べて時間調節の下位尺度得点が有意に高かったことから、長距離タイプの泳者ほどリズムやタイミングを重視していることが明らかとなった。泳法別では、平泳ぎの方が自由形に比べて体性感覚の下位尺度得点が有意に高かったことから、平泳ぎの泳者は体性感覚を重視していることが明らかとなった。

認知心理学分野の研究によれば、ヒトは知覚された感覚情報を「何を (What)」 「いつ (When)」 行ったのか 2 つの異なる経路で処理し、最終的にこれらの情報は統合されると考えられている (Fujisaki & Nishida, 2010)。これらの経路を基に泳者内で感覚情報処理を考えると、体性感覚は

what 経路、時間調節は when 経路で処理されているものと予想される。つまり、泳技能改善時の泳者は体性感覚と時間調節を重視しており、この統合作業へと注意を向けているものと思われる。その一方で、周期音と運動を同期した際に、ヒトは動こうとする意志と運動を音に協応させようとする意志が存在し、注意状態が変わると言われている (Repp, 2005)。この状態を上記の経路を基に考えれば、動こうとする what 経路と、運動を音と合わせようとする when 経路に注意が向いている状態と解釈することもできる。インターナルフォーカスによって運動学習が阻害されることが明らかとなっているが (Wulf, 2010)、周期音によって泳者が向けている身体感覚への注意状態の変化は、むしろ水泳における運動学習に適しているのではないと思われる。また、周期音を発する商品が既に普及していること (Figure 2, p13)、さらに水泳において周期音と同期する実践事例も報告されており (Alberty et al., 2011; Boitel et al., 2010; Vercruyssen et al., 2012)、周期音利用が泳者に悪影響を及ぼすという報告は皆無である。よって、本研究で周期音を用いることは泳者の感覚情報処理過程から察するに、理に適っており、本方法は泳者の運動学習を阻害しないものと考えられる。

V. 泳者内における UUS 中の泳速度とキック頻度との関係性

(研究課題 II)

V-1 泳者内における UUS の泳速度がキック頻度に与える影響 (研究課題 II)

1. 背景と目的

これまでは、泳者間の比較によって、UUS における f と U の関係性が明らかとなっており (Arellano et al., 2002; Connaboy et al., 2009)、 f が高い泳者ほど U が高いことが分かっている。このため、泳者内で f を増加させれば U が増加するものと仮定されているが実証は未だされていない。しかし、泳者内におけるこの f と U の関係性を理解するために、その可逆性について確認しておく必要がある。本研究課題では、泳速度を直接調節できる回流水槽を用いて漸増泳速度泳による UUS の動作分析を行い、泳者内において U が f へ与える影響、さらにそれ以外の運動学的変数に与える影響について調査し、泳速度増加時に泳者が選択する標準的な方略について明らかにする。

2. 方法

1) 対象者

対象者は全国大会出場レベルの男子大学競泳選手 9 名 (年齢 20.7 ± 1.6 歳、身長 $1.74 \pm 0.08\text{m}$ 、体重 $68.0 \pm 6.8\text{kg}$) であった。いずれの対象者も日常的に高強度の競泳トレーニングを行っており、高いパフォーマンスレベルを有していた。泳者には身体 7 点 (第 5 中足骨、足首、

膝、大転子、肋骨下端、肩、手首) に LED マーカーを貼り付け、ケーブルは泳動作を制限しないよう配慮して身体へ貼りつけ、ケーブルの先にある電池ボックスは腰ベルトに収納し固定した (Figure 9)。全ての対象者に事前に研究の目的、方法、予測される危険性などを十分説明し、参加の同意を得た。

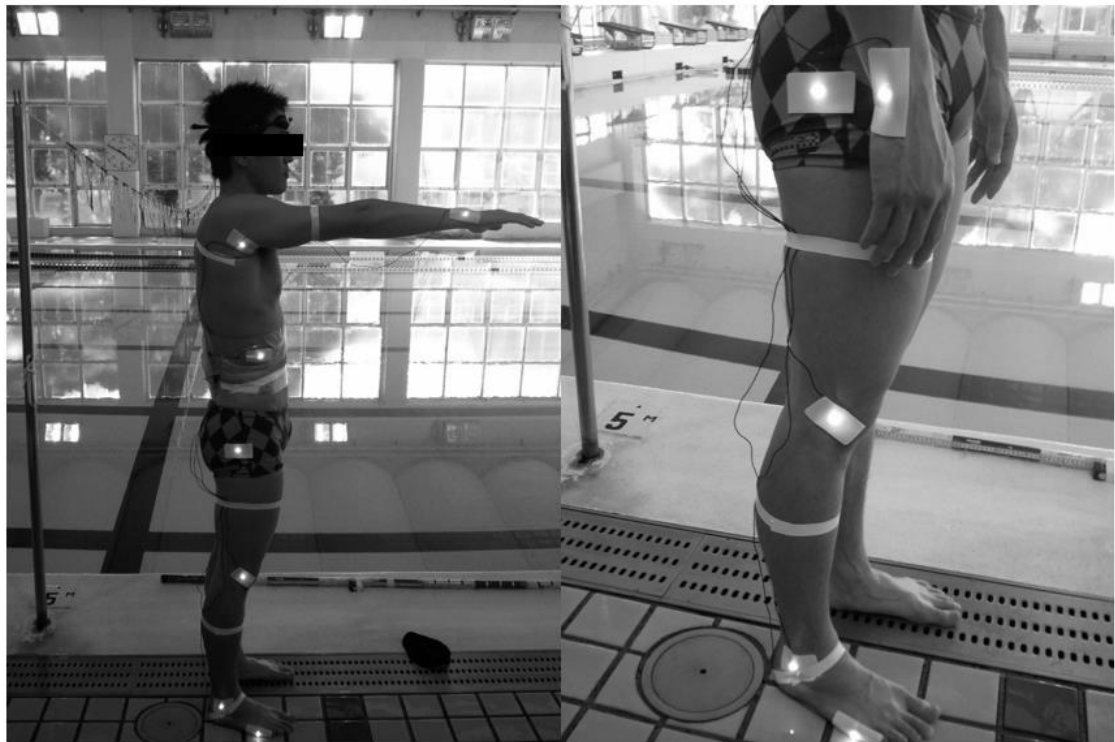


Figure 9. Swimmer attached with the LED markers.

2) 測定試技

事前試技として、T大学屋内プールにおいて、泳者は最大努力の UUS を行い、7.5m～15mの区間を撮影し、泳者ごとの水平泳速度を算出した。この時、壁を蹴ってスタートしてもらい、撮影した区間は壁を蹴った影響が消失し、自己推進によって得られた泳速度のみで泳いている (Arellano et al., 2002)。蹴りおろし位置の最下点ピークから次の蹴りおろしピークまでを 1 周期とし、キック 3 周期分の平均水平泳速度を各泳者の 100% 泳速度とした。泳者らの平均泳速度は $1.61 \pm 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (最小 $1.37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、最大 $1.91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) であった。

T 大学屋内回流水槽 (Igarashi Industrial Works Co. Ltd., Japan) にて、事前に算出した全力泳時の泳速度から 70%、80%、90%、95%の 4 段階で泳速度を泳者毎に設定し、漸増泳速度 UUS で泳んでもらった。対象者の安全を考慮し、100% の泳速度の試技は実施しなかった。泳者らは、一定泳速度に保たれた回流水槽内を UUS で泳ぎ、同じ位置に留まり続けるように指示を受けた。試技は UUS のキック 15 周期分程度を計測し、約 10 秒ほど撮影した。試技間で 2 分程度の休息時間を設けた。

3) 分析手順

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、UUS 中の泳動作を計測した。検者が回流水槽内の流速を確認し、一定速度になった後に泳者は泳ぎだした。UUS を開始した直後は泳者が計測部内での自己位置を調節するため、試技開始直後の数周期分のキックは分析から除

外した。計測された座標データは Pixel Runner for Venus3D (Nobby Tech.Ltd) を使用して PC (Lenovo Thinkpad T530) 内に csv 形式で保存された。計測の様子を図に示す (Figure 10)。得られた座標データは、数値解析ソフトウェア MATLAB (Mathworks, USA) を用いて分析された。データのノイズを除去するために Butterworth のローパスフィルター (6Hz) を用いて平滑化された。

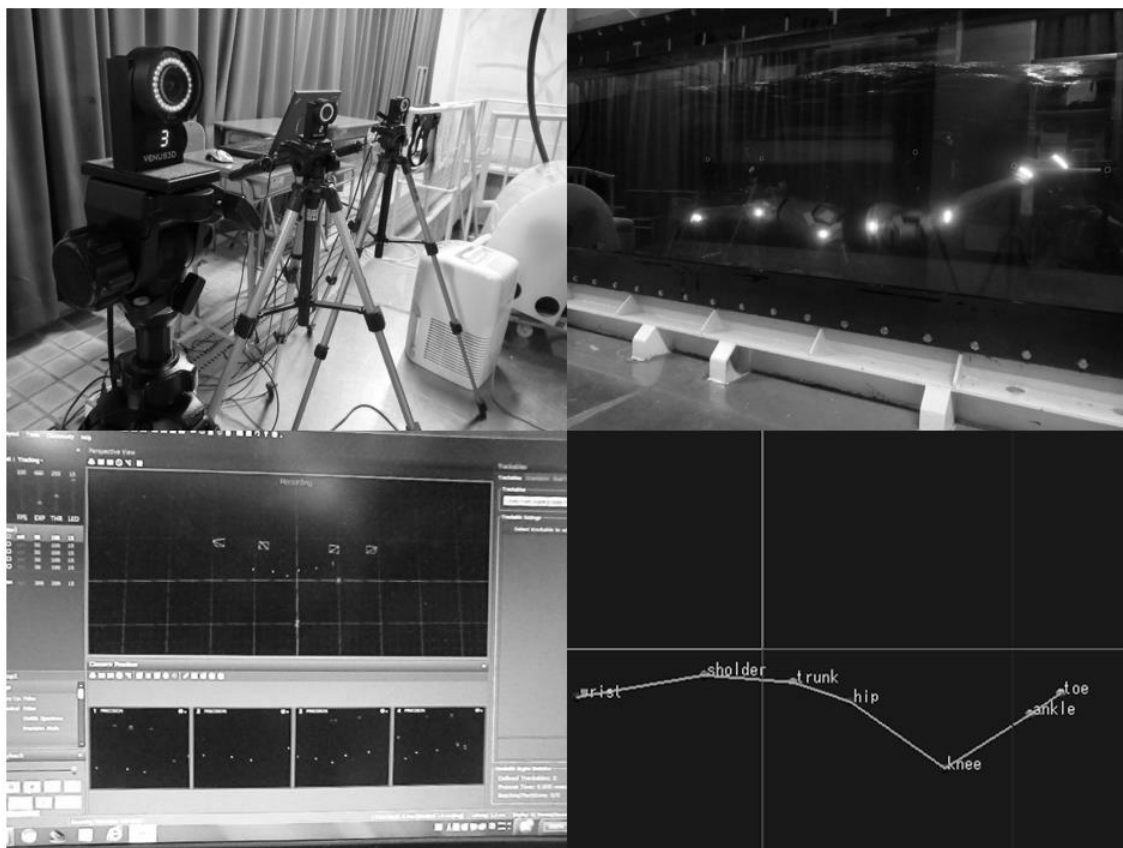


Figure 10. Image of motion capture system. Left side above shows VENUS system cameras, right side above shows a subject swam in circular flume, left side below shows PC monitor when capturing UUS motion, right side below shows the stick figure converted in 2D data.

4) 変数

本研究では、UUS 中の泳者の下肢動作からキック周期を決定した。けり下ろし後の最下点ピークから次の最下点ピークまでを 1 周期と定義し、約 15 周期を計測し、その内 5 周期を分析に使用した。また、キック周期の安定性を泳者の足先の座標値から、けり幅 A_{toe} とキック頻度 f を算出した。ストローハル数 St は以下の式を用いて算出した。

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

Zamparo, Pendergast, Termin, and Minetti (2002) は、細長い魚のうねり動作の効率算出方法を用いて (Lighthill, 1975)、フラッターキック中の下肢の波速度 c と平均泳速度 U からフルード効率 η_F を算出している。 η_F は以下の式を用いて算出された。

$$\eta_F = (c + U) / 2 \cdot c \quad (2)$$

U は平均泳速度で c は波速度を示す。波速度は、体軸に沿って表れるいくつかの最大値の時間ズレの回帰式によって計算される (Zamparo et al., 2002)。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。つまり、 η_F は 0.5 から 1.0 の範囲となり、 $\eta_F = 1$ ($U = c$) は全てのパワーが推進力となり、その値が $\eta_F < 1$ ($c > U$) となると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)。この c を f で除することで、UUS の波長 λ を得ることができる。Connaboy et al. (2007) は、波動理論を応用し以下の式を用いて波長を計算した。

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

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

c は波速度を示し、 f はキック頻度を示す。 λ から身体長 BL を除することで λ_{BL} を算出している。

この BL の値は、座標データより泳者毎のセグメント長を算出し、これを加算して算出した。 λ_{BL} は身体長と波長の比率であり、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)。本研究では、泳速度は回流水槽で予め設定されているため、それ以外の f 、 A_{toe} 、 c 、 η_F 、 λ_{BL} を分析対象の変数とした。

5) 統計解析

本研究課題では、全ての変数の結果と平均値、標準偏差を示した。泳速度間の有意差検定では繰り返しのある一元配置の分散分析 (ANOVA) を用い、post-hoc test では Bonferroni 法を用いて泳速度の違いによる差を分析した。有意水準は 5% とした。統計分析は SPSS for windows 19.0 を用いて行った。

3. 結果

分散分析の結果、 f と c において泳速度の違いによる主効果が認められた (Table 9)。一方、他の変数 A_{toe} と St 、 η_F 、 λ_{BL} では主効果は認められなかった。post-hoc test の結果 f は 70%V と 80%V の間以外の全ての泳速度間で有意差が認められた ($p < .05$)。 c は 90%V と 95%V の間以外の全ての泳速度間で有意差が認められた ($p < .05$)。

Table 9. The result of kinematics at each velocity and F-value.

Variable	70% V	80% V	90% V	95% V	<i>F</i> -value
Kick frequency f (Hz)	1.47 \pm 0.25	1.63 \pm 0.28	1.88 \pm 0.26	2.13 \pm 0.41	40.48 *
Kick amplitude A_{toe} (m)	0.59 \pm 0.07	0.60 \pm 0.09	0.59 \pm 0.04	0.57 \pm 0.07	1.22
Strouhal number St	0.75 \pm 0.07	0.73 \pm 0.09	0.75 \pm 0.08	0.76 \pm 0.10	2.52
Whole body wave velocity c (m·s ⁻¹)	2.65 \pm 0.48	2.90 \pm 0.51	3.15 \pm 0.60	3.51 \pm 0.38	24.19 *
Froude Efficiency η_F	0.72 \pm 0.04	0.73 \pm 0.04	0.75 \pm 0.07	0.73 \pm 0.03	1.81
Wavelength per body length λ_{BL}	0.82 \pm 0.05	0.82 \pm 0.04	0.78 \pm 0.05	0.79 \pm 0.05	1.47

* $p < .05$

note : Velocity of maximal effort UUS was used for reference in the trial.

4. 考察

本研究課題では、回流水槽において漸増泳速度泳による UUS の動作分析を行い、泳者内において U が f へ与える影響、さらにそれ以外の運動学的変数に与える影響について調査することを目的とした。その結果、 U の増加に応じて、泳者は f と c を増加させていた (Table 9)。一方で、それ以外の運動学変数に変化は認められなかった。

本研究課題の結果により、泳者内において U の増加に伴い f も増加することが明らかとなった。水面を泳ぐ 4 泳法においても、SR の増加に伴って泳者内の泳速度が増加することは古くから報告されており (Craig & Pendergast, 1979)、水中を泳ぐ UUS でも同様の方略を取ることが確認された。また、興味深いことに、 A_{toe} はどの泳速度でも変化しなかった。UUS の推進力は、泳者の足部が水から物理的作用を受けることで得られることが分かっている (Hochstein & Blickhan, 2011; Miwa et al., 2006)。一方、UUS におけるけり幅の増大は、前面からの断面積を増大させ抵抗が増大すると言われている (Cohen et al., 2012)。本研究課題の結果は、泳者は推進力を得るために f を増加させつつ A_{toe} を維持しており、それに伴って全身で受ける前面抵抗も増加していたものと考えられる。泳者は U の増加に応じて下肢の動作範囲を変えず (A_{toe} が一定)、動作速度を変える (f の増加) という方略を取ったと考えられる。水中で動く物体は、速度の 2 乗に比例して抵抗が増える。したがって、泳者が推進力を得るために f を増加させる方略を取ることには理に適っている。ただし、水に作用させる範囲を一定にすることが UUS では必要のようである。当然、泳速度の増大に応じて泳者が受ける前面抵抗も増大しているはずで、それを減らすためにも A_{toe} を

縮小した方が良いと思われるが、そのような方略は取られないことが明らかとなった。水泳のメカニクスでは、古くから泳者は推進力を増大させつつ、抵抗力を減らすべきだと考えられてきた（宮下，1970）。しかし、UUS で泳速度を増大させる際には、泳者は推進力を増大させる方略を優先的に選択する可能性が示唆された。

St は泳速度の影響を受けていなかった。 St は泳者の渦生成能を示す指標だと考えられており（G. S. Triantafyllou et al., 1993）、本研究課題の結果では泳速度増大による影響はを受けていなかった。泳者は U の増加に際して、渦の生成能を維持していた可能性がある。 A_{toc} が一定であったことの理由の 1 つとして、渦生成能を落とさないためだと考えられる。渦の生成能は渦の発射速度と渦同士の距離で導かれると述べられている（Nicolas et al., 2007）。つまり、泳速度増大に応じて、泳者の周りの水の流れと渦の生成状態が相対的に見れば変わっていなかったものと推察される。しかし、これらの理論は魚類の推進運動の観察によって導かれたものであり、実際のヒトの UUS で St と渦生成能との関係は不明である。

上記以外に、 c は有意な主効果が認められ、 η_F 、 λ_{BL} の 2 変数についても泳速度増加による影響を受けていなかった。全身を伝わる波というのは、推進中の泳者の身体ポイントは上下に振幅し、頭から下肢にかけてそのポイントの極値が移動していく速度である（Zamparo et al., 2002）。 f の増加は周期時間が短くなることを意味しており、他の身体ポイントも連動して振幅が速くなったために、 c も増加したと思われる。これはつまり、泳速度増加のためには下肢のみではなく、全身の振幅の周期時間を短くする必要があることを示している。水中ドルフィンキックが「うねり泳」といわれるよ

うに、泳速度増大させるためには全身の連動が重要であることが示唆された。さらに、 η_F は泳者の出力したパワーがどれだけ推進に利用されたのかを示す推進効率の指標とみなされており (Zamparo et al., 2002)、 λ_{BL} は主に泳者のうねり様式を示し、泳者の全身体の中でうねりが生じる身体ポイントがどの辺りかを判断するのに利用されている (Connaboy et al., 2007)。ゆえに、泳速度を増大させる際に、泳者内では推進効率もうねり様式も変化させない方略を選択することが示唆された。

V-2 研究課題 II まとめ

研究課題 II では、泳速度を直接調節できる回流水槽を用いて漸増泳速度泳による UUS の動作分析を行い、泳者内において U が f へ与える影響、さらにそれ以外の運動学的変数に与える影響について調査し、泳速度増加時に泳者が選択する標準的な方略について明らかにすることであった。その結果をまとめると、泳者は U の増加に応じて A_{toe} を維持したまま f を増加させ、泳者内で U と f が関連していることが明らかとなった。また、 U の増加に応じて St は影響を受けず、渦を生成する能力は維持されている可能性が推察された。泳者は c を増大させ、下肢のみではなく全身の振幅を素早く連動させる様子が観察された。 η_F 、 λ_{BL} は変化せず、推進効率とうねり様式を変化させずに泳速度増加の方略を取ることが示唆された。これらのことから、泳者が泳速度を増加させる際の方略が明らかとなった。

VI. 周期音を用いた泳動作調節法の検討 (研究課題 III)

VI-1 最大努力時以下での周期音によるキック頻度調節法の検討 (研究課題 III-1)

1. 背景と目的

研究課題 II の結果から、UUS において泳者内で泳速度 U にキック頻度 f が関与していることが明らかとなった。これにより、泳者内で f を増大させることで U が増大すると考えることができる。本研究課題では、泳者の f を調節するために周期音を使用する。周期音に合わせて泳ぐというこれまでに無い手法を確認することからも、最大努力時以下の f で泳ぐ方が望ましい。周期音と運動を同期させると、泳者の注意が変わると言われていることから (Repp, 2005)、音の有無による違いについても検討する必要がある。また、集団を対象とした場合に周期音の使用によって個人差が生じるのかという点について検討することで、その結果は指導現場へと還元できる。そこで本研究課題では、最大努力時以下の UUS 中の泳者に対して周期音を呈示し、 f 調節方法の違いを検討する。さらに、 f の増加が泳速度と他の運動学的変数に与える影響について検討する。

2. 方法

1) 対象者

対象者は、国内大会出場レベルの 8 名の大学競泳選手 (男子 6 名: 身長 1.81 ± 0.07 m, 体重 73.2 ± 4.1 kg; 女子 2 名: 身長 1.62 ± 0.04 m, 体重 59.5 ± 2.1 kg) であった。平均年齢は

21.7±3.9 歳で、全員が 10 年以上の競技経験を有していた。研究課題 II と同様に、泳者は動作分析用に身体の右側 7 点（第 5 中足骨、足首、膝、大転子、肋骨下端、肩、手首）に、人体には無害であるビニルテープで関節ポイントにマーキングを施した。泳者らには研究の趣旨を十分に説明し、その参加同意を得た。

2) 測定試技

周期音の設定

本研究課題は周期音によって泳者の f を最大努力時以下で増加させる。研究課題 II と同様の事前調査として、屋内プールにおける泳者の最大努力時の泳動作を側方から水中ビデオ撮影し分析し、泳者ごとに f を算出した。その結果、泳者の f は 2.43～1.73Hz の範囲であった。そこで本研究課題では、全泳者の最大努力度の範囲に至らない 1.67Hz (1 周期 0.6 秒、100bpm) に目標周期時間を設定した。全泳者は、最大下 UUS 中にこの f を目指して泳ぐ。事前に、全ての泳者に主観的努力度 70% 程度の UUS で泳いでもらい、その時の f よりも今回設定した値が高いことを確認した。

周期音と運動の同期を調査した研究によれば (Repp & Su, 2013; Repp, 2005)、抑揚のついたメロディー的に音高変化する音の方が、音と運動の同期が容易であると考えられている。ゆえに、本研究では単調なビーブ音ではなく、ドルフィンキックを音で表現することとし、その周期音は UUS 中の泳者の足先の座標値の変化から作成された。まず事前に、回流水槽において $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ の泳速度で熟練した泳者の UUS をビデオカメラ (Sony 社製, 60Hz) で撮影し、足先の垂直方向の

変位を動作解析ソフトウェア (Frame-DIAS 2 version 3, DKH Inc., Japan) を用いて 2D-DLT 法にて抽出した。キック 1 周期分 (0.6 秒、36 フレーム) の空間座標データを抽出し、これを数列解析ソフト Mathematica (Wolfram, USA) を用いて 300–900 Hz の周波数 (低い「A」から 1 オクターブ高い「A」までの音高範囲) で変位の値を音高に変換し、数周期分が連続するように 1 つの音楽ファイル形式で保存した。この音は通常のメトロノーム音に比べて音高が変わる抑揚のついた周期性のある音である。本研究課題では、これをターゲットする周期音として定めた。この周期音を用いて、1) 水中スピーカーから音を発生させて泳者が音にあわせて泳ぎ、その周期時間を記憶し、2) その後音を除外した状態でその周期音の f を再現した UUS で泳ぐ、という手順で泳者の f を調節することとした。本研究課題では、この音をターゲット音と定義した。

試技手順

試技は伏臥位の UUS で行った。泳者は壁をけって造波抵抗が除外できるとされる水深 0.5～0.7 m を維持したまま (Lyttle, Blanksby, Elliott, & Lloyd, 2000)、15 m を通過するまで泳いだ。泳者は全部で 3 つの UUS で泳いだ。最初の試技では、主観的努力度を 70% で泳ぐよう指示し、 f や A_{toe} 、 U などは泳者が自由に選択した (pre trial: Pre)。泳者はターゲット音が何を意味しているのか説明され、泳者から共通認識を得た後、第 2 の試技として泳者はターゲット音と UUS の f を最大限同期させ、休憩を取りながらこれを 10 回繰り返した (sound trial: Sound)。この時、泳者はターゲット音のリズムと UUS のリズムのみを一致させ、それ以外の指示はせず自由に UUS し、

f を同期させそのリズムを記憶することに専念した。そして第 3 の試技は音無しの状態で行われた。Sound の後に 5 分間の十分な休憩をとり、泳者はターゲット音のリズムの記憶を頼りに、設定された頻度を出来る限り再現させ、UUS で泳いだ (post trial: Post)。なおこの時、けり幅や泳速度などは任意とした。本研究課題の実験プロトコルを Figure 11 に示した。

3) 分析手順

試技は全て屋内プールにて行われた (50 m × 7 lanes, 1.35–3.8 m depth, 28°C)。水中窓を介した 2 つのビデオカメラ (TK-C1381 Victor Inc., Japan) で UUS 中の泳者を、7.5~15.0 m の区間を側面から撮影した。撮影した映像は、全て DVmini テープに保存された。この区間は、壁をけて得た推進力が泳者に働く影響が消失し、自己推進によって得られた泳速度のみで泳いている (Arellano et al., 2002)。Figure 12 に実験設定の概要を示した。

撮影した映像は PC に取り込まれ、動作分析ソフトウェア FrameDIAS II を用いて分析し、座標データは 2D-DLT 法によって空間座標に変換された。座標データのノイズを除去するために Butterworth のローパスフィルター (6Hz) を用いて平滑化された。

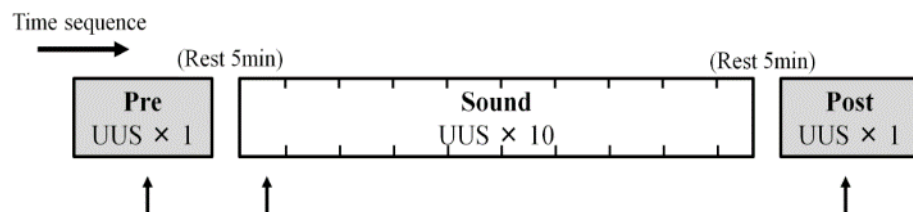


Figure 11. Experimental protocol. Pre is 70% effort swimming (subjective), Sound is synchronizing UUS with the target sound, and Post is representing the kicking frequency without the target sound.

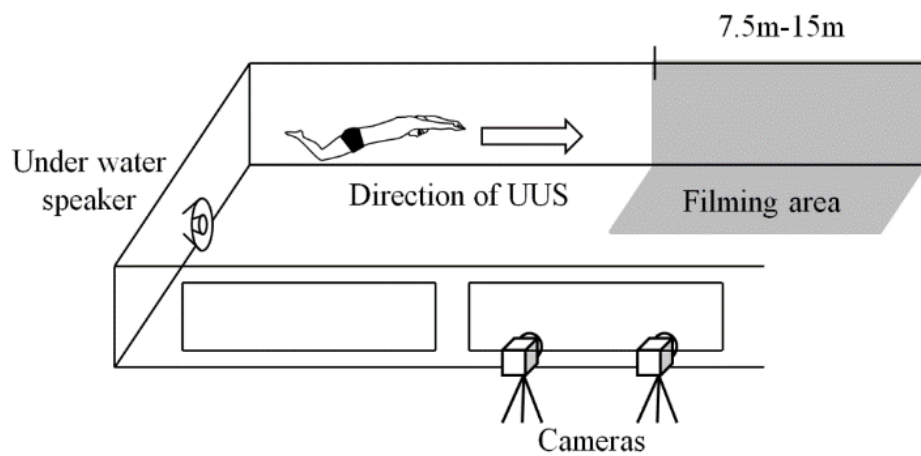


Figure 12. Setting of experiment. The swimmers used push off start, and their motion was captured by two cameras from lateral side through underwater window. When Sound trial, the target sound was generated from underwater speaker.

4) 変数

本研究課題では、研究課題 II と同じ運動学的変数に加え、泳速度 U を分析した。なお、本研究課題ではキック 3 周期分を分析対象とした。泳者の足先の座標値から、けり幅 A_{toe} とキック頻度 f を算出した。全身の平均泳速度 U は、1 周期中の腰部マーカの水平方向への移動距離と時間から求めた。ストローハル数 St は研究課題 II と同様、以下の式を用いて算出した。

$$St = f \cdot A_{\text{toe}} \cdot U^{-1} \quad (1)$$

Zamparo, Pendergast, Termin, and Minetti (2002) に従い、全身の波速度 c を算出した。この c と平均泳速度 U から以下の式を用いてフルード効率 η_F を算出した。

$$\eta_F = (c + U) / 2 \cdot c \quad (2)$$

U は平均泳速度で c は波速度を示す。この c を f で除することで、UUS の波長 λ と全身長あたりの波長 λ_{BL} を得ることができる。

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

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

c は波速度を示し、 f はキック頻度を示す。 λ から身体長 BL を除することで λ_{BL} を算出している。

5) 統計解析

本研究課題では、全ての運動学的変数の平均値と標準偏差で示した。全ての変数の正規性を確認した後、Sound では周期音が提示された初回時の反応を見るために、10 回行った内の第 1

回目の泳動作を分析した。Pre と Sound、Post の結果について、繰り返しのある一元配置分散分析を行った (ANOVA)。post-hoc test では Bonferroni 法を用いて試技間の差を比較した。また、 f の変化と周期音除外時の影響を調べるために、Pre と Post で繰り返しのある t 検定を用いて比較した。統計的有意水準は 5% とした。統計分析は SPSS for windows 19.0 を用いて行った。

3. 結果

各試技における運動学的変数の結果を Table 10 に示した。Pre と初回の Sound、Post において f と A_{toe} 、 c で有意な主効果が認められた ($p < .05$)。また、 t 検定の結果、 f と A_{toe} 、 U 、 c において有意差が認められた ($p < .05$)。

Table 10. The result of kinematic variable at each trial and F-value, t-value.

Variable	Pre	Sound 1st	Post	F-value (ANOVA)	t-value (Pre vs. Post)
Kick frequency f (Hz)	$1.34 \pm 0.15^{a,b}$	1.62 ± 0.10^a	1.66 ± 0.09^b	24.72*	-6.24*
Kick amplitude A_{toe} (m)	0.68 ± 0.09^a	0.62 ± 0.08^a	0.59 ± 0.07	7.88*	2.86*
Swimming velocity U (m·s ⁻¹)	1.25 ± 0.09	1.27 ± 0.09	1.30 ± 0.09	2.51	-2.41*
Strouhal number St	0.73 ± 0.07^a	0.80 ± 0.08^a	0.76 ± 0.09	2.15	-1.02
Whole body wave velocity c (m·s ⁻¹)	2.44 ± 0.60^b	2.94 ± 0.36	3.24 ± 0.42^b	8.52*	-4.44*
Froude efficiency η_F	0.78 ± 0.13	0.72 ± 0.03	0.70 ± 0.02	2.28	1.80
Wavelength per body length λ_{BL}	0.87 ± 0.22	0.86 ± 0.11	0.91 ± 0.07	0.35	-0.62

* $p < .05$

Note : significant difference between a) Pre and Sound, b) Pre and Post in ANOVA

4. 考察

本研究課題は、最大努力時以下の UUS 中の泳者に対して周期音を呈示し、 f 調節方法の違いを検討した。さらに、 f の増加が泳速度と他の運動学的変数に与える影響について検討した。その結果、泳者はターゲット音による f を正確に再現しており、UUS 中であろうとも音を判別し、泳動作を調節できた。また、音を除外後 5 分経過しても、泳者は同じ f を再現することができた。音と同期中と除外後の泳動作を比較すると、その泳動作に違いは見られなかった。一方、 f が増加することで、 A_{toe} は減少し、 U 、 c が有意に増加していた。

1) キック頻度の調節と記憶による再現

本研究課題では、最大努力時以下であるものの、周期音を用いることで泳者の f を調節できることが明らかとなった。音を用いて運動リズムを調節する方法は既に広く用いられており、歩行や走行 (Martin et al., 2000)、自転車運動 (Bernard et al., 2003)、泳運動 (Alberty et al., 2011; Thompson et al., 2002; Vercruyssen et al., 2012) で報告が見られ、周期音による頻度調節は信頼性が高いといえる。音と運動の同期中にヒトの内部で意識の変化が生じるものと考えられており (Repp, 2005)、本研究課題では音と運動の同期中と、その音を除外してリズムを再現した時で比較した。UUS においては、その 2 試技を比較したところ泳動作にほとんど違いは見られず (Table 10)、泳者内で意識の変化が生じたとしても、音との同期中および音除外後では泳動作に差は無いことが示唆された。さらに、本研究課題では、ターゲット音と UUS を同期することによる学習効

果が全く無い状態での泳者の反応を見るために、第 1 回目の Sound の試技を分析対象としていた。その Sound と Post で泳動作にほとんど差が見られないことは、泳者はターゲット音に即座に順応できることを示唆している。

一方、Sound と Post を比較すると、Post 時の方がターゲット音の f により近づいているだけでなく、7 つの運動学的変数中の 5 つの変数の標準偏差の値が小さくなっており、これはつまり音除外後の方が泳者間の差が少なくなったことを反映している。つまり、音を聞きながら泳がせるよりも、音を除外した時の方が多くの泳者に対して正確な調節が実行できた可能性がある。もしも泳者にとって最適な f が存在すれば、その f へと導く手段として有効だと考えられる。しかし、実践の場を想定すると、音除外後の効果が Sound で UUS を 10 回繰り返したことに起因していれば、それ自体が手間とを感じる泳者や指導者は多いと思われる。また、周期音利用による f 調節の介入効果は、最大努力時の UUS にまで及んでいることが望ましい。とはいえ、周期音を用いた研究では、音と同期中はその周期性を正確に調節できることが多く示されているものの、水泳においてその音を除外した際の運動学的変数を細かく調査した研究は見られない。実際の指導現場を想定すれば、常に音を聞きながら泳ぐよりも、音を除外して泳者がその周期性を再現できた方が本来の泳運動に近い状態だといえる。ゆえに、本研究課題の意義はあるものと考ええる。

2) 頻度増加の影響

本研究では、音に合わせて泳ぐことで泳者の意識が変化すると仮定していることから、音を除外

した状態が本来の泳動作に近いものと考え、通常の状態 (Pre) と音は除外して f が増加した状態 (Post) の泳動作を t 検定で比較した。その結果、 f の増加に応じて U は有意に増加していた (Table 10)。研究課題 II でも、泳者内で U と f が関係していることは既に示している。この結果と合わせて、最大努力時以下の UUS では、泳者内の f と U が関係していることが明らかとなった。

その一方で、 A_{toe} は有意に減少していた。研究課題 II では、 U 増加のためには A_{toe} を維持したまま f を増加させる方略が観察されている。本研究課題では、泳者は f のみを変更するよう指示を与え、その他の変数については泳者が自由に選択して良い状態であった。これはつまり、 A_{toe} を維持するように指示を加えていれば、 U の増加の程度は大きくなっていたものと予想される。言い換えれば、 f のみを調節する指示を与えれば、泳者はその代償として A_{toe} を小さくする方略を取る可能性が示唆された。

f の増加に応じて c が有意に増加していた。これは研究課題 II と同様の結果であった。フラッターキックを観察した研究でも f の増加に応じて c は増加しており (Zamparo et al., 2002)、下肢による推進運動では f と c は線形関係にある可能性が非常に高い。 c は全身の波速度で、全身の関節ポイントが連動していく速さでもあり、この全身の協応性が直接泳速度に影響するとみなされており (Zamparo, Vicentini, Scattolini, Rigamonti, & Bonifazi, 2012)、 f と同様に泳パフォーマンスを左右する重要な運動学的変数だといえる。初心者と熟練者のドルフィンキックの協応性を比較した研究によれば (下門ほか, 2010)、熟練者は各関節間で位相がずれており、ムチのしなりのよ

うないいわゆる滑らかさが見られるものの、初心者は膝関節と股関節が同時に屈伸運動をしており、ぎこちない動作となっておりほとんど推進しない。このことから、頭から下肢にかけて連動していくうねりが直接推進力に影響しているという仮説は支持されたといえる。

Post で St 、 η_F 、 λ_{BL} は有意な変化は認められなかった。 St は渦の生成能 (Rohr, 2004)、 η_F は推進効率を反映すると考えられている (Nicolas et al., 2007; Zamparo et al., 2002)。この 2 つの変数は泳者の推進能力を、 λ_{BL} はうねり様式を示しており (Connaboy et al., 2007)、これらは f の増加によって影響を受けない可能性がある。研究課題 II でも同様の結果であったことから、最大努力時以下では、泳者内でこの能力が保持されているものと推察される。

VI-2 最大努力時以上での周期音によるキック頻度調節法の検討 (研究課題III-2)

1. 背景と目的

研究課題 II と III-1 では、最大努力時以下で UUS 中の泳者の f と U が関連していることが明らかとなった。先行研究では、4 泳法においてストローク頻度 SR を最大努力時以上まで増加させると泳速度が減少していた (Craig & Pendergast, 1979)。UUS でも同様の結果が見られるのか報告した例は見られない。また、泳パフォーマンス向上のために、泳者は泳速度を維持したまま SR を減少させるべきだと考えられてきた (Alberty et al., 2011)。泳速度を保持したまま f を減少できれば現場にとって有益な情報を提供でき、周期音の活用方法を提示できる。研究課題 III-1 では、初めて周期音と UUS を同期しても、10 回の試技反復後でも泳動作に違いは見られなかったことから、音と同期した際の試技のみで f の違いを検討する。そこで本研究課題では、UUS 中の泳者が最大努力時以上で f を調節した際に、他の変数が影響を受けるのか調査することを目的とした。

2. 方法

1) 対象者

全国大会出場レベルの男子大学競泳選手 10 名 (年齢 21.3 ± 0.9 歳; 体重 71.3 ± 4.8 kg; 身長 (L) 175.5 ± 5.4 cm; ストリームライン姿勢時の手先から足先までの全身長 (BL) 225.1 ± 7.6

cm) を対象者とした。全ての対象者は 10 年以上の競技経験を有していた。対象者からは研究内容の同意を得た。また、本実験は学内の倫理委員会承認を得た。

2) 測定試技

試技は T 大学屋内プールにて行った (50 m × 7 レーン, 水深 1.35–1.80 m, 水温 28°C)。泳者は仰臥位の UUS で水深 0.5 m 以下を維持して泳いだ。12 点の身体ポイント (手、手首、肘、肩峰、足先、踵、外果、膝、大転子、耳珠点、胸骨上縁、肋骨下端) に LED マーカーを貼り付けた (Figure 13)。また、頭頂は UUS 中に手で隠れるため、事前に耳珠点からの距離を実測し、推定した。日本人アスリートを対象とした身体部分慣性係数 (BSP) を使用し (Ae, Tang, & Yokoi, 1992)、身体重心位置を計算した。泳動作は 2 台のハイスピードカメラを使用し、水中窓を介して側方から 100 Hz で撮影した。

泳者は 400 m のウォーミングアップ後、試技に慣れるために事前練習を行った。その後 15 m を越えるまで最大努力 UUS で泳いだ (Pre)。この時撮影した映像は、プールサイドで即座に動作分析ソフト (Tracker, open source physics) を用いて第 5 中足骨のみデジタイズを行い、Matlab (Mathworks, USA) を用いて泳者ごとに f を算出した。この f の値を 100%F (100% kick Frequency) として、85%、90%、95%、105%、110%、115% の f を計算し、周期音 (研究課題 III-1 で作成した周期音と同様) を作成した。泳者らは周期時間の異なる周期音をランダムに聞きながら UUS のキック周期を同期させ、異なる頻度レベルで泳いだ (85%F、90%F、95%F、105%F、

110%F、115%F)。なお、泳者にはどの試技でも泳速度を最大化するよう指示した。試技間には 5 分以上の休息を行った。その後、疲労の影響が無いか確認するために再度最大努力時の UUS で再度泳いだ (Post)。



Figure 13. Picture of swimmer attached the LED marker.

3) 分析手順

撮影した映像は PC に保存し、ソフトウェアを用いてデジタイズし (Tracker, open source physics)、2D-DLT 法を用いて 2 次元座標を得た。MATLAB (Mathworks, USA) を用いて、遮断周波数 6 Hz のバターワースのローパスフィルターによって座標データは平滑化された。空間座標を得たあと、カメラの切り替わりの瞬間で質点が急激に移動する瞬間が見られた。これは、水中窓を介した撮影では、画面端にいくほど光軸の歪みが大きくなる、いわゆる収差によって発生する。そこで、画面の切り替わりの瞬間の前後 10 フレーム (0.02 秒) 分の空間座標に変換されたデータに対して、再度 6 Hz の Butterworth ローパスフィルターを用い、平滑化した。

研究課題 II と III-1 と同様の変数を算出した。なお、本研究課題ではキック 3 周期分を分析対象とした。泳者の足先の座標値から、けり幅 A_{toe} とキック頻度 f を算出した。全身の平均泳速度 U は、1 周期中の重心位置の水平方向への移動距離と時間から求めた。ストローハル数 St はこれまでの研究課題と同様、以下の式を用いて算出した。

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

Zamparo, Pendergast, Termin, and Minetti (2002) に従い、全身の波速度 c を算出した。この c と平均泳速度 U から以下の式を用いてフルード効率 η_F を算出した。

$$\eta_F = (c + U) / 2 \cdot c \quad (2)$$

U は平均泳速度で c は波速度を示す。この c を f で除することで、UUS の波長 λ と全身長あたりの波長 λ_{BL} を得ることができる。

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

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

c は波速度を示し、 f はキック頻度を示す。 λ から身体長 BL を除することで λ_{BL} を算出している。

使用した変数は、研究課題 III-1 と同様の変数、キック頻度 f 、けり幅 A_{toe} 、泳速度 U 、ストロー

ハル数 St 、波速度 c 、フルード効率 η_F 、身体長あたりの波長 λ_{BL} を観察対象の変数とした。

4) 統計解析

Pre と Post では、疲労の影響が無いか繰り返しのある t 検定を用いて比較した。繰り返しのあ
る 1 元配置分散分析 (ANOVA) を用いて Pre を含んだ 7 試技間の差を比較し (85%F、
90%F、95%F、Pre、105%F、110%F、115%F)、その後の検定では Sidak 法を用いて Pre と差が
認められた試技について調査した。統計的有意水準は 5% 未満とした。統計分析は SPSS 19.0
for Windows を用いた。

3. 結果

Table 11 に全ての試技の結果を示した。 f の違いによる有意な主効果は、 A_{toe} 、 U 、 c 、 η_F 、 λ_{BL}
で認められた ($p < .05$)。Pre と Post 間において U に有意差は認められなかったが、 c 、 η_F にお
いて有意差が認められた ($p < .05$)。

Table 11. Actual measurement result and the ratio to pre at each session, t-value, and F-value (including Pre).

Variable	85% F	90% F	95% F	100% F (Pre)	105% F	110% F	115% F	Post	<i>t</i> -value	<i>F</i> -value
Actual value										
Kick frequency f (Hz)	$1.83 \pm 0.13^\dagger$	$1.93 \pm 0.16^\dagger$	$2.00 \pm 0.16^\dagger$	2.26 ± 0.16	2.31 ± 0.20	2.33 ± 0.18	$2.46 \pm 0.21^\dagger$	2.28 ± 0.15	-1.19	119.86 *
Kick amplitude A_{toe} (m)	$0.55 \pm 0.07^\dagger$	$0.54 \pm 0.06^\dagger$	0.51 ± 0.06	0.50 ± 0.05	0.47 ± 0.06	0.47 ± 0.06	$0.44 \pm 0.06^\dagger$	0.49 ± 0.06	2.00	28.88 *
Swimming velocity U ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$1.48 \pm 0.09^\dagger$	$1.49 \pm 0.11^\dagger$	1.50 ± 0.09	1.60 ± 0.12	1.53 ± 0.11	1.58 ± 0.13	1.55 ± 0.14	1.58 ± 0.10	1.01	9.45 *
Strouhal number St ($f \cdot A_{\text{toe}} \cdot U^{-1}$)	0.70 ± 0.09	0.69 ± 0.07	0.69 ± 0.07	0.70 ± 0.06	0.70 ± 0.07	0.69 ± 0.06	0.70 ± 0.07	0.70 ± 0.08	0.11	0.37
Wave velocity c ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$3.08 \pm 0.09^\dagger$	3.18 ± 0.14	3.21 ± 0.14	3.40 ± 0.16	3.52 ± 0.12	3.59 ± 0.19	$3.68 \pm 0.14^\dagger$	3.50 ± 0.19	-2.30 *	39.04 *
Froude efficiency η_F	0.74 ± 0.02	0.74 ± 0.02	0.74 ± 0.02	0.74 ± 0.01	$0.72 \pm 0.02^\dagger$	$0.72 \pm 0.02^\dagger$	$0.71 \pm 0.02^\dagger$	0.73 ± 0.02	2.62 *	18.41 *
Wave length per body length λ_{BL}	0.86 ± 0.01	$0.87 \pm 0.01^\dagger$	0.87 ± 0.02	0.88 ± 0.02	0.87 ± 0.01	0.87 ± 0.01	0.88 ± 0.01	0.87 ± 0.01	1.68	6.83 *
The ratio of value to Pre (%)										
Kick frequency	83.5 ± 3.1	87.6 ± 3.2	91.3 ± 5.3		104.9 ± 3.9	106.2 ± 5.2	111.8 ± 4.9	101.4 ± 3.5		
Kick amplitude	111.2 ± 5.6	108.1 ± 6.0	103.2 ± 5.1		93.3 ± 5.2	94.5 ± 7.0	89.2 ± 6.4	97.8 ± 3.5		
Swimming velocity	92.3 ± 4.9	93.4 ± 4.5	94.0 ± 4.6		95.7 ± 3.4	98.6 ± 5.0	97.0 ± 5.4	98.8 ± 4.3		
Strouhal number	99.4 ± 5.3	98.9 ± 4.9	98.0 ± 3.4		100.3 ± 4.7	99.2 ± 7.2	100.0 ± 6.9	99.7 ± 5.6		
Wave velocity	90.9 ± 5.0	93.8 ± 5.2	94.7 ± 4.8		103.6 ± 5.8	105.8 ± 6.3	108.3 ± 4.4	103.0 ± 4.2		
Froude efficiency	100.6 ± 1.7	100.0 ± 1.4	99.8 ± 1.1		97.6 ± 1.5	97.7 ± 1.3	96.6 ± 1.3	98.7 ± 1.5		
Wave length per body length	98.4 ± 1.3	98.7 ± 1.0	98.9 ± 1.3		99.4 ± 0.8	99.4 ± 1.1	99.8 ± 0.6	99.6 ± 0.8		

[†]significant differences from Pre, * $p < .05$

Note: t-test is comparison between Pre vs. Post, ANOVA is conducted within 85%F to 115%F including Pre.

4. 考察

本研究課題では、UUS 中の泳者が最大努力時以上で f を調節した際に、他の変数が影響を受けるのか調査することを目的とした。その結果、最大努力時以上の f であっても、周期音で呈示された f を再現できることが確認できた。また、 f を増加させた際には U の増加は認められず、さらに f を減少させた際には U を保持するよう指示を与えていたものの、 U は減少した。推進効率では、 St は f の違いによる影響を受けず、 η_F は f を増加させた時のみ減少し、非効率的な値となっていた。また、 f 減少時には λ_{BL} が減少しており、効率的なうねり様式が観察された。

1) キック頻度の調節

研究課題 III-1 では、最大努力時以下の UUS において周期音を用いることで泳者の f 調節が可能であることを示し、本研究課題によって最大努力時以上の f でも調節できることが確認された。UUS 研究を総説した研究では (Connaboy et al., 2009)、UUS の泳パフォーマンスに最も影響を与える運動学的変数は f であると結論づけられているものの、泳者内で最大努力時以上の f へと調節した際の泳動作への影響を調査した研究は皆無であった。また、この泳者の f を自在に調節できれば様々な研究に役立つと考えられる。例えば、UUS と似たような推進様式であるモノフィン泳では、 f を増減させた際の泳者のエネルギー効率について検討しており (Boitel et al., 2010)、泳者によって効率のよい最適な f が存在することを示唆した。さらに、Konstantaki and Winter (2009) は、男性競泳選手に対してキックトレーニングを課した際の介入効果について報告しており、

6 週間のキックトレーニングで 200 m キック泳の泳タイムが平均で 6% 短縮したことを報告しており、キックの練習によって効率と下肢持久力が向上することを示唆した。UUS で f を自由に調節することで、泳者にとって最適な f を見つける手助けとなることや、 f を調節するトレーニングにより泳効率や筋持久力への影響を検討できる。

2) UUS 中の泳者内におけるキック頻度と泳速度の関係

過去の報告では、4 泳法において泳者内で SR を調節した際の泳速度への影響が報告されている (Craig & Pendergast, 1979)。最大努力時以上の SR で泳ぐと、どの泳法でも泳速度の低下が認められたと報告されているが、本研究課題の結果では、 f の増加による U の有意な低下は認められなかった。もし、泳者が最大努力時以上の f で泳ごうとすれば、それは泳者への内的仕事量の増大を求めることを意味する (Zamparo et al., 2002)。その時の泳者は、最大努力時以上の大きなトルクパワーを生成しなければならないが、泳者のトルクパワーが足りずに A_{toe} を小さくしなければならなかったと思われる。それにも関わらず U が減少していない結果は、下肢を小さく速く振幅させたとしても、泳者が推進に利用している総合的な水の質量の移動は最大努力時 (100% F) と変わらず、 f を増加させてもほぼ一定であった可能性がある。また先行研究では、報告されている平均値から推察するに、125% 程度まで SR を増加させており、逆 U 字の関係を示している (Craig & Pendergast, 1979)。このため、UUS においても、115% 以上の f まで増加せれば、泳者の U は減少していくものと予想される。また、興味深い結果として、平均値で結果に

は反映されていないものの、個別に見ると 3 名の泳者は f 増加時に U も増加していた (+1% ~4.6%)。モノフィン泳ではあるものの、泳者によって f の最適値が存在する可能性も示唆されている (Boitel et al., 2010)。必ずしも、全ての泳者が最大努力時に最大パフォーマンスが発揮される f を選択しているとは限らないといえる。

一方、 f の減少によって U の有意な線形的な減少が認められた。これは、Arellano et al. (2002) による f と U の線形関係を支持するものであった。本研究課題では、泳者に f の減少時でも U を最大に保つよう指示している。泳者は f の減少に応じて A_{toe} を増大させようとする反応がみられ、これは 1 回のキック動作での推進する距離を増やそうとしていたものと考えられる。泳者が効率良く泳ぐためには、 U を保持したまま 1 回のキック動作で進む距離を増やす必要がある (Zamparo et al., 2006)。UUS では、 A_{toe} の増大は前面からの断面積を増加させ、泳者に働く抵抗力を増大させることが明らかとなっている (Cohen et al., 2012)。このため、 f の減少によって泳者の U の低下を招いたのは、抵抗力の増大によるものだと考えられる。研究課題 III-1 でも、最大努力時以下で、泳者が f を増加させた際に A_{toe} の減少が認められており、 f のみの調節では A_{toe} を縮小させてしまう方略を選択することが危惧された。本研究課題の結果と合わせて考えると、 f に応じて泳者は A_{toe} も変化させようとする可能性が高いといえ、 f 減少時においてはその反応が U を減少させる一因であったものと考えられる。

以上のことから、先行研究で報告されている泳者内における f と U の線形関係は、最大努力時の f を超えない範囲で認められたといえる。UUS の研究では、シミュレーションではなく実際の

泳者内での両変数の関係を明らかにすることが求められていたことから (Connaboy et al., 2009)、この結果は意義があるといえる。

3) キック頻度と推進効率の関係

f の減少時に St と η_F の値は変化していなかった。この結果は、研究課題 II と III-1 と同様であり、最大努力時以下の範囲では、 f を変えても推進効率は影響を受けない可能性が高い。一方、 f 増加時に η_F のみ減少していた。泳者の出力パワーが推進に用いられない現象は Slip と表現され (Connaboy et al., 2009)、最大努力時以上の f の状態は、推進力を生み出す能力が犠牲となっているといえる。また、本研究全体では、周期音と同期している最中は泳者の注意が変わるものと想定している。最大努力時以上の f では、泳者が普段利用する範囲を越えたキック周期で泳ぐ必要があるため、向けていた注意も変わった可能性も考えられる。その影響が η_F に現れたのではないと思われる。

4) うねりへの影響

研究課題 II と III-1 の結果から、 f と c は線形関係にあるものと考えられる。本研究課題の結果も、 c は f に応じて変化していた (Table 11)。泳者が f を調節するためには、全身の関節ポイントが頭から下肢へかけて連動していく速度も同時に調節しているといえ、これは泳者が f を調節する際にとる方略を表している。しかしながら、 η_F は c と U の比率によって計算され (式

2)、 η_F の値が最大努力時以上で減少していることから、 f と c の線形的な関係は最大努力時以上で崩れたものと考えられる。これは、頭頂から下肢にかけて連動していくうねりの速度に見合った U を獲得できなかったものと推察される。UUS で推進力を得るためには、生成する渦に依存するという仮説や (Hochstein & Blickhan, 2011)、対称的な上下の振幅動作によるものという仮説 (Atkison et al., 2014)、最終的に水からの流体力が働く足関節の柔軟性に左右されるという仮説 (Willems et al., 2014; 杉本 et al., 2008) などがあるが、現時点で考えられるのはこれらに影響が及び推進力が得られなかったものと考えられる。

λ_{BL} はうねり様式を示す指標である (Connaboy et al., 2007)。ヒトの UUS の場合、0.5~1.0 の間の値となり、これは準アジ型 (Sub-carangiform mode) と呼ばれるうねり様式と似ており、推進方向に対して泳者の後方部分、つまり下半身のみが振動して推進している (Connaboy et al., 2009)。水泳人体シミュレーションモデルを使用した報告では、この様式の UUS は上肢が前方から受ける水の分離を防ぎ、抵抗の増大を抑える役割があることを示唆している (Nakashima, 2009)。本研究課題では、 λ_{BL} は f を減少させた試技において有意な低下が見られ、さらに、 η_F も一定であり推進効率は下がっていなかった。この結果から、 f の減少時、つまり最大努力時以下の f ではより効率的な泳動作になっているといえる。しかしながら、研究課題 III-1 では泳者の f のみを直接調節し、本研究課題では f に加えて U を最大化するよう指示を与えており、両者が混在したことによってこの λ_{BL} の減少が生じた可能性は否定できない。

VI-3 研究課題 III まとめ

研究課題 III では、周期音を用いて泳者内の f を直接調節し、音同期中と音除外後の再現度の違いを比較し、さらに最大努力時以下と以上へと f を変えた際に他の運動学的変数へ及ぼす影響を調査した。その結果、泳者は目標とする f を初回から再現できており、周期音同期に即時順応が可能であることが示された。また周期音同期中も音除外後も泳動作に差は見られなかった。さらに、音除外後の方が多くの泳者が目標とする f に近づく傾向が観察され、 f を再現するという目的を達成する信頼性が高まる可能性が示唆された。

f の増加および減少に応じて U も増減する様子が観察され、最大努力度以下であれば、泳者内で f と U の関係性が成立することが明らかとなった。その一方で、たとえ泳速度を保持するように指示を出していたとしても、 f を調節する際に泳者は A_{toe} を変えて泳ごうとすることが示唆された。頭から下肢にかけて振幅が連動していく速度 c は f と線形関係にあるが、最大努力時以上の f 時において推進効率を示す η_F が減少しており、 f と c の線形関係が崩れ、泳者の推進力生成能が低下する可能性が示唆された。 St は最大努力時以下および以上の f であっても値は変わっておらず、泳者内の渦生成能は f 調節時も保持される。興味深い結果として、最大努力時以下に f を調節し、泳速度を最大下するよう泳者に指示を与えると、泳者の λ_{BL} が有意に減少し、効率的なうねり様式が観察された。

VII. 周期音を応用した泳動作調節法の検討 (研究課題 IV)

VII-1 周期音によるキック頻度調節の即時的介入効果 (研究課題 IV)

1. 背景と目的

これまでの結果をみると本研究課題 I の結果から、泳技能改善時の泳者は体性感覚と時間調節に注意を向けて泳いでおり、周期音同期によって泳者内の注意変化が生じたとしても、むしろ運動学習には有益なものであると仮定した。研究課題 II と III の結果から、泳者内においてキック頻度 f と泳速度 U の関係性は、最大努力時以下で成立することが明らかとなり、 f 減少時の方が効率的なうねり様式が観察された。研究課題 III の結果より、周期音によって泳者の f を直接調節することが可能であることが示され、さらに音同期中も音除外後も泳動作に違いは無い可能性が示唆された。しかしながら、これまでの研究課題で得られた結果から、周期音同期中および音除外後に泳者が抱く身体感覚は本当に変わっているのか、周期音利用時における f の調節方法として泳速度最大化という指示は影響したのか、さらに実践の場を想定すると音同期を 10 回も繰り返す手間を減らすことはできないのか、といった疑問が生まれた。また、先行研究ではヒトは音と運動を同期することで内部リズムが引き起こされることが指摘されており (Jäncke et al., 2000)、周期音による頻度調節の即時的な介入効果が生じる可能性もある。例えば、周期音を 1 度聞くだけでその f が再現できれば泳者への負担は少なく、 f 調節の介入効果が泳動作や身体感覚の変化にまで及べば具体的な効用を指導現場へ示すことができる。周期音の実用性を想定すれば、これらの

問題を解決する意義はあるといえる。本研究課題では、実践の指導現場を想定し、周期音を用いた f 再現方法の違いについて比較検討する。また、周期音同期中および同期後の泳動作と身体感覚に及ぼす影響について検討する。

2. 方法

1) 対象者

国内大会出場レベルの 11 名の男子大学競泳選手 (身長 1.73 ± 0.07 m, 体重 69.5 ± 8.4 kg) が本研究に参加した。平均年齢は 21.2 ± 2.0 歳で、全員が 10 年以上の競技経験を有していた。泳者は 2 群に分けられた。一方のグループは ($n=5$)、プールサイドで周期音を聞くのみで周期時間を記憶し、直後にその f を再現した UUS を行う (Memory group: 以下 M 群)。他方のグループは ($n=6$)、これまでと同様に周期音と f を同期し、音を除外して再度同じ f を再現した UUS を行う (Swimming Synchronization group: 以下 SS 群) に分けた。事前に泳者らの最大努力時の U を計測し、統計的にも群間差が無く、等質の集団であることを確認した。泳者からは研究への参加同意を得た。

2) 測定試技

実験試技は伏臥位の UUS とし、泳者は壁をけて $0.5 \sim 0.7$ m の水深を維持したまま 15 m を通過するまで UUS で泳いだ。試技の前に、泳者には 10 分程度のウォーミングアップを各自で

行ってもらった。最初に、泳者らは最大努力の UUS で泳いだ (Pre)。続いて、M 群はプールサイドにてスピーカーから発せられた周期音を聞き、そのリズムを UUS の f として再現して泳いだ (M-Rep)。SS 群は周期音と UUS の f を同期させ (S-Synch)、その後周期音を除外してキック頻度を再現した f で UUS を行った (S-Rep)。研究課題 III-2 の結果より、最大努力時よりも低い f であれば効率的なうねり様式が観察されるものと予想され、本研究課題において周期音の f は泳者が実現可能である 1.43 Hz (1 周期 0.7 秒) に設定した。これらの試技後、泳者らは最大努力の UUS で再度泳いだ (Middle)。試技数の違いによって UUS で泳ぐ回数が両群で異なるため、カウンターバランスを取るため他方の群の試技を行わせ (クロスオーバー)、最大努力 UUS で再度泳いだ (Post)。実験プロトコルを図に示す (Figure 14)。

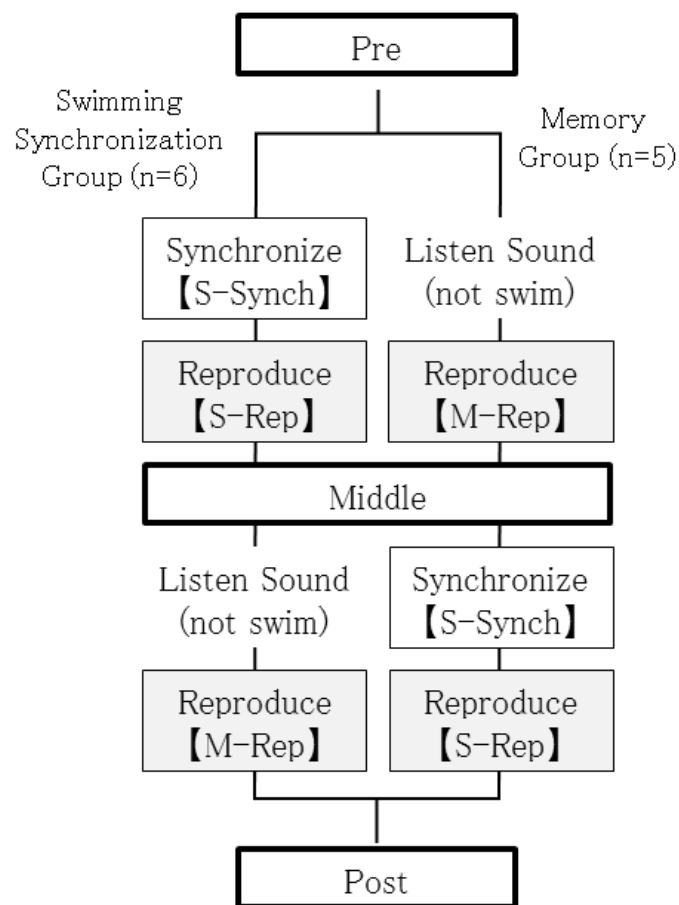


Figure 14. Experiment protocol (Cross-over model). Pre, Middle, and Post are maximal effort UUS, Synchronize is swimmer synchronize with the target sound, Reproduce is swimmer reproduce their kick frequency to last sound's frequency.

3) 分析手順

試技は全て屋内プールにて行われた (50 m × 7 lanes, 1.35–3.8 m depth, 28°C)。水中窓を介した 2 つのビデオカメラで、UUS 中の泳者を 7.5—15.0m の区間で側面から撮影した。泳者には、研究課題 III-1 の試技と同様に、身体 7 点 (第 5 中足骨、足首、膝、大転子、肋骨下端、肩、手首) に LED を貼り付け、ケーブルは泳動作を制限しないよう配慮した。実験は屋内プールで行い、研究課題 III-1 と同様にカメラセッティングをした。カメラはハイスピードカメラ (High speed 1394 Camera, DKH Inc., Japan) を使用した。露光時間は 1/500 秒、サンプリング周波数は 100 Hz に設定した。動作解析ソフトウェア (Frame-DIAS 2 version 3, DKH Inc.) で撮影した映像を取り込み、UUS 中の泳者の 7 点の身体座標をデジタイズし、2D-DLT 法を用いて座標データを得た。座標データは Butterworth の 6 Hz のローパスフィルターを用いて平滑化した。周期音は、水中スピーカー (MT-70 Toyo Onkyo Corp., Japan) より水面下で発生された。音の開始と同時にランプを点灯させ、それをカメラに映し込むことで音と映像は同期された。

研究課題 I で使用したアンケートを使用して、泳者が泳中に抱く身体感覚について試技毎に調査した。質問内容を、「〇〇を意識して泳いでいると思う」から「〇〇を意識したと思う」へと記述の変更を行い、回答を「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」の 6 段階とし、注意の程度について回答してもらった (Table 3, p56)。

本研究課題でも、これまでと同様の運動学的変数を算出した。なお、本研究課題ではキック 3

周期分を分析対象とした。泳者の足先の座標値から、けり幅 A_{toe} とキック頻度 f を算出した。全身の平均泳速度 U は、1 周期中の重心位置の水平方向への移動距離と時間から求めた。ストローク数 St はこれまでの研究課題と同様、以下の式を用いて算出した。

$$St = f \cdot A_{\text{toe}} \cdot U^{-1} \quad (1)$$

Zamparo, Pendergast, Termin, and Minetti (2002) に従い、全身の波速度 c を算出した。この c と平均泳速度 U から以下の式を用いてフルード効率 η_F を算出した。

$$\eta_F = (c + U) / 2 \cdot c \quad (2)$$

U は平均泳速度で c は波速度を示す。この c を f で除することで、UUS の波長 λ と全身長あたりの波長 λ_{BL} を得ることができる。

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

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

c は波速度を示し、 f はキック頻度を示す。 λ から身体長 BL を除することで λ_{BL} を算出している。

使用した変数は、研究課題 III-1 と同様の変数、キック頻度 f 、けり幅 A_{toe} 、泳速度 U 、ストローク数 St 、波速度 c 、フルード効率 η_F 、身体長あたりの波長 λ_{BL} を観察対象の変数とした。

4) 統計解析

本研究では、全ての結果は平均値と標準偏差で示した。群交差による順序の相殺効果を確認するために、Pre と Middle と Post において、 f と U について 2 群×3 試技で繰り返しのある

2 元配置の分散分析 (two way-ANOVA) を行った。頻度調節方法の違いを比較するために、全対象者の Pre、M-Rep、S-Synch、S-Rep の 4 試技について全ての変数で繰り返しのある一元配置の分散分析 (ANOVA) を行った。周期音を用いて f を調節する効果を検証するために、全対象者の Pre と Post について全ての変数で繰り返しのある t 検定を用いて分析を行った。統計解析は、IBM SPSS statistics 19.0 for Windows を用い、統計学的有意水準は 5% 未満とした。

3. 結果

Pre と Middle、Post における f と U の結果を Table 12 に示した。交互作用、試技間、群間で統計的な有意差は認められなかった。

Table 12. The result of swimming velocity and kick frequency in memory and swimming synchro groupe at Pre, Middle and Post.

Variable	Pre	Middle	Post	<i>F</i> -value		
				Interaction	Trial	Group
Swimming velocity <i>U</i> (m·s⁻¹)						
Memory	1.52 ± 0.20	1.51 ± 0.15	1.52 ± 0.24	0.49	0.75	1.11
Swimming Synchro	1.44 ± 0.10	1.42 ± 0.11	1.43 ± 0.10			
Kick frequency <i>f</i> (Hz)						
Memory	1.96 ± 0.19	2.01 ± 0.26	2.01 ± 0.27	0.85	0.40	0.76
Swimming Synchro	2.01 ± 0.12	2.03 ± 0.15	2.04 ± 0.16			

Pre、M-Rep、S-Synch、S-Rep、Post における全ての運動学的変数の結果を Table 13 に示した。Pre と比較して周期音によって f が調節されている 3 試技 (M-Rep, S-Synch, S-Rep) の f は有意に減少しており ($p < .05$)、泳者は示された目標頻度 (1.43 Hz) に、どの方法でも f を近づける様子が見られた。また、 f において周期音利用法の違いによる差は認められず、特に S-Synch 時には、 f の標準偏差は 0.03 と泳者間のバラツキが最小となっていた。Pre と頻度調節を行っている試技を含めて一元配置の分散分析を行った結果、 A_{toe} と U 、 c 、 η_F 、 λ_{BL} において試技の違いによる主効果が認められ ($p < .05$)、Pre 時から有意に変化していた。 λ_{BL} は有意に増加し非効率的なうねり様式となり、 η_F は増加し効率的な泳動作となっていた。

周期音による頻度調節を受けた前後で運動学的変数に差が見られるか比較した結果、Pre と Post において η_F が有意に減少しており、非効率的になっていた。一方、 c に有意差は認められなかった。

Table 13. The result and ratio of all variable at Pre, M-Rep, S-Synch, S-Rep, Post; and F-value, t-value.

Variable	Pre	M-Rep	S-Synch	S-Rep	Post	F-value	t-value
Actual value							
Kick frequency f (Hz)	1.98±0.15	1.38±0.09 [†]	1.41±0.03 [†]	1.40±0.10 [†]	2.02±0.21	86.47	−1.34
Kick amplitude A_{toe} (m)	0.54±0.04	0.64±0.07 [†]	0.62±0.06 [†]	0.63±0.06 [†]	0.53±0.06	27.35*	1.16
Swimming velocity U (m·s ^{−1})	1.45±0.12	1.27±0.10 [†]	1.22±0.08 [†]	1.21±0.07 [†]	1.52±0.16	24.33*	0.70
Strouhal number St ($f \cdot A_{toe} \cdot U^{-1}$)	0.73±0.06	0.68±0.06	0.72±0.05	0.71±0.05	0.72±0.08	2.58	−0.96
Wave velocity c (m·s ^{−1})	3.60±0.21	2.72±0.14 [†]	2.82±0.15 [†]	2.69±0.25 [†]	3.82±0.53	74.92*	−1.60
Froude efficiency η_F	0.71±0.02	0.73±0.01 [†]	0.72±0.01 [†]	0.73±0.02 [†]	0.70±0.02 [†]	11.14*	2.38*
Wave length per body length λ_{BL}	0.82±0.03	0.90±0.05 [†]	0.90±0.03 [†]	0.90±0.05 [†]	0.84±0.04	48.63*	−1.58
The ratio of value to Pre (%)							
Kick frequency f	—	69.0±8.1	71.0±7.5	71.6±7.0	101.8±4.9		
Kick amplitude A_{toe}	—	118.8±11.2	115.9±5.3	116.4±6.1	98.1±5.2		
Swimming velocity U	—	85.5±7.7	81.9±7.4	82.3±6.4	99.4±3.6		
Strouhal number St	—	97.5±10.6	101.8±10.7	97.1±5.8	101.4±4.7		
Wave velocity c	—	76.4±10.1	75.5±9.9	74.7±7.4	103.4±7.0		
Froude efficiency η_F	—	103.1±2.4	102.1±2.2	102.5±1.7	98.4±2.2		
Wave length per body length λ_{BL}	—	108.7±4.4	108±4.7	108.6±3.3	101.1±2.4		

[†]significant differences from Pre, * $p < .05$

身体感覚調査の結果を Table 14 に示した。タイミング、リズム、その 2 つを下位尺度とする時間調節因子の得点はどの試技でも有意に増加していた ($p < .05$)。また聴覚および特殊感覚因子の得点は S-Synch で有意に増加していた ($p < .05$)。

Pre と Post では、水流感覚が有意に増加していた ($p < .05$)。一方、時間調節因子は、有意ではないものの得点が増加する傾向が見られた ($p = .07$)。

Table 14. The result of kinesthesia at Pre, M-Rep, S-Synch, S-Rep and Post; F-value, t-value.

Variable	Pre	M-Rep	S-Synch	S-Rep	Post	<i>F</i> -value	<i>t</i> -value
Timing	1.56±1.13	4.89±1.05 [†]	5.00±1.12 [†]	3.89±1.69 [†]	1.73±1.42	23.00*	−1.94
Water flow	2.33±1.32	2.56±1.13	2.44±1.01	2.44±1.01	3.00±1.00 [†]	0.14	−2.28*
Body position	2.22±0.67	2.11±0.60	2.22±1.09	2.11±1.05	2.36±0.92	0.12	0.00
Vision	1.33±0.50	1.11±0.33	1.11±0.33	1.22±0.67	1.18±0.60	1.26	0.56
Trunk	3.56±0.53	3.67±0.87	2.89±0.93	3.22±0.97	4.00±0.45	2.76	−1.94
Rhythm	2.67±1.12	3.77±1.09 [†]	4.22±1.20 [†]	4.00±1.32 [†]	2.82±1.25	5.72*	−1.61
Auditory	1.00±0.00	1.33±1.00	4.44±1.33 [†]	1.67±1.66	1.18±0.60	26.71*	−1.00
Limb velocity	2.44±0.53	2.89±1.27	3.22±1.48	2.89±1.27	3.18±1.40	1.29	−1.47
Joint angle	2.00±1.32	2.11±0.78	1.89±0.93	2.00±0.71	2.18±0.98	0.17	0.00
Catching	3.00±1.41	3.22±1.30	2.78±1.48	2.89±1.17	3.27±1.10	1.07	−0.43
Economy	2.44±1.24	2.78±1.20	2.89±1.05	2.56±1.01	2.45±1.21	0.64	0.00
Factors							
Somatic sence	9.67±4.12	10.22±3.42	9.78±3.38	9.56±2.96	10.27±3.61	0.41	−0.22
Time control	4.22±1.39	8.56±1.81 [†]	9.22±2.33 [†]	8.00±3.04 [†]	4.55±2.30 ^a	25.34*	−2.03
Special sence	2.33±0.50	2.44±1.01	5.56±1.33 [†]	2.89±1.69	2.36±0.81	22.71*	−0.36

[†]significant differences from Pre, ^a*p* = .07 (from Pre), **p* < .05

4. 考察

本研究課題では、実践の指導現場を想定し、周期音を用いて UUS 中の泳者の f 調節を行い、周期音と UUS を同期する方法の違いについて比較検討すること、さらに周期音利用の即時的な介入効果が泳動作と身体感覚に見られるかを検証することであった。その結果、周期音同期時とその直後に f を再現する時、プールサイドで周期音を聞いて f を再現する時の 3 方法を比較すると、 f を再現する程度に差は無かった。周期音を用いて f を調節することで、その前後で推進効率が低下し、水流感と時間調節へと注意向ける傾向が見られた。

1) 周期音による頻度調節法の違い

本研究課題では対象者を 2 群に分け、クロスオーバーモデルによって順序効果が相殺されるように実施した。本研究で着目してきた主要な運動学的変数である U と f について群間と試技間で二元配置の分散分析を行った結果、群間および試技間で差は認められなかった (Table 12)。この結果により、本研究課題の結果では試技順の影響、疲労や学習の影響はないものと仮定した。M-Rep と S-Synch、S-Rep における f は目標値に近づいており (Table 13)、泳者は指示された f を再現できていたといえる。研究課題 III-1 で周期音との同期を 10 回繰り返した直後に、音を除外しても f を再現できることが示されており、本研究課題の結果により 1 回その音を聞くだけで泳者は f を再現できることが示された。

一方で、再現度の個人差を反映すると考えられる f の標準偏差は、S-Synch の方が低くなって

いた。研究課題 III-1 では、音除外時の方が標準偏差は小さくなっていたが、今回は相反する結果であった。変動係数で示すと、S-Synch で 2% 程度、他の研究課題の結果では 5~7% 程度であった。音楽の能力は音を知覚する能力と運動技能によって成り立つ (Palmer, 1997)。研究課題間で異なる結果であったのは、各泳者の知覚する能力に差があった可能性も考えられる。とはいえ、音を聞いて再現するだけでも 6% 程度であり、信頼性は高いと考えられる。現時点では UUS の最適な f 値が存在する可能性が示唆されているのみであり、それが明らかになれば信頼性の高い方法を検討する意義があると思われる。

研究課題 III-2 の結果とは異なり、 f の減少に応じて λ_{BL} は有意な減少は認められなかった。本研究課題では、泳者に対して U を最大化するよう支持は与えておらず、泳者の f のみを調節した。このため、研究課題 III-2 で f 減少時に効率的なうねり様式が観察された要因として、 U を最大化することの相互作用であった可能性が考えられる。このため、効率的なうねり様式を泳者が学習するためには、 f 減少と同時に U を最大化する必要性が示唆された。ただし、本研究課題では各泳者の 70 % 程度まで f を減少させており、研究課題 III-2 では 90% 時に有意に λ_{BL} が減少していたため、 f を統一して再検討する必要があるといえる。

身体感覚の結果を見ると (Table 14)、M-Rep、S-Synch、S-Rep のどの試技でもタイミングとリズムへの注意が Pre 時よりも高まっており、時間調節因子の得点も増加していた。また、S-Synch 時には聴覚の得点が Pre 時よりも増加しており、泳者は音を聞き取ろうと注意を向けて泳いでいたといえる。この結果から、周期音と同期中の泳者の身体感覚への注意は変化するという仮説は支持

された。研究課題 I で泳技能改善時の泳者が重視していたのは時間調節と体性感覚であり、本研究課題の因子を見ると時間調節の得点のみが増加していた。Wulf (2010) によれば、学習者が注意を向ける感覚の箇所が多すぎると、運動学習は阻害されることを指摘している。ゆえに、周期音を用いて泳者の f を調節することは、時間調節への注意のみを高め、運動学習には有効だと考えられ、さらにその効果は調節方法による違いは生じないことが示唆された。

2) 周期音による頻度調節の介入効果

Pre-Post 間で比較した結果、運動学的変数は η_F のみが有意に低下していた (Table 13)。研究課題 III-2 でも同様にこの値が減少しており、非効率的になっていた。 η_F は、 U と c の比率で算出され、 U の値が変化していなかったことから、 f を変える試技を繰り返すことでうねりの状態が変化していた可能性が考えられる。 η_F 以外の値に即時的な介入効果が見られなかったのは、泳者が熟練者であり、泳技能や筋出力といった能力はすでに習熟しているため、数回の泳試技では効果は得られなかったと考えられる。

Post 時に、水流感覚への注意量が有意に増加しており ($p < .05$)、さらに時間調節への注意量が増加する傾向がみられた ($p = .07$)。これらは周期音を使用した f 調節の即時的な介入効果であるといえる。近年の水泳研究では、熟練した泳者はストロークや呼吸といった泳者内の周期リズムや (Hellard et al., 2008; Sanders & Psycharakis, 2009)、上肢と下肢のタイミング (Figueiredo, Seifert, Vilas-Boas, & Fernandes, 2012; Seifert, Leblanc, et al., 2010) は特徴的であることが指摘さ

れており、これらの泳者は時間調節へと注意を向けているものと予想される。本研究課題 I の結果で示した通り、時間調節は熟練した泳者が泳技能改善時に最も重視する身体感覚の 1 つであり、この身体感覚へ注意を向けることと泳パフォーマンスが関与している可能性が考えられる。また、学習者が向ける焦点箇所を変えることで技能習得の学習効果は変わることが報告され、興味深いことにそれは熟練者でも同様の効果があることが示唆されている (Wulf, 2010)。本研究課題において、周期音による f の調節は泳者の注意状態を変える介入効果があることが明らかとなり、これを継続することで泳技能が改善する可能性がある。今後は、身体感覚の変化が泳パフォーマンスに関与するか、介入効果を検討する必要があるといえる。

一方で、Post 時に水流感への注意のみ有意に増加していた。UUS 中の泳者は、全身をうねらせ、最終的に足部に流体力が働くことで推進力を獲得し、前方へと推進している。この時、優れた泳者は水の前面抵抗を全身で受けつつも、その値が最小化されるよう姿勢制御していると考えられている (Nakashima, 2009)。この全身で受ける抵抗というのは、皮膚の上を水が流れることで知覚しているものと考えられ、本研究課題の結果は、その抵抗値を最小化しようとする意識が反映されたのではないかと想像される。一方、視覚障害の泳動作を分析した研究によれば (Malone et al., 2001)、健常者と視覚障害者の泳動作にほとんど差が無かったことから、ヒトは水を捕らえる感覚やリズムを保つ感覚があれば通常の泳動作が行えることが示唆されている。水流感への注意量が増加したの理由として、周期音との同期によって、泳者は UUS を実行するのに必要な感覚のみに意識が集中したのではないかと考えられる。

VII-2 研究課題 IV まとめ

本研究課題では、実践の指導現場を想定し、周期音を用いた f 再現方法の違いについて比較検討し、周期音同期中および同期後の泳動作と身体感覚に及ぼす影響について検討した。その結果、1 回周期音と UUS を同期するだけで、音を除外しても f を再現することが可能であった。さらに、周期音をプールサイドで 1 度聞くだけでも f を再現でき、その再現の程度に違いは見られなかった。周期音と同期して泳いでいる時の方が f の標準偏差が小さくなっており、個人差が少なく、より多くの泳者が正確に f を再現できていた。どの試技でも f 減少時に λ_{BL} は変化しておらず、効率的なうねり様式を獲得するために U を最大化する必要性が示唆された。また、周期音を用いたどの試技でも、泳者は時間調節への注意が有意に高まっており、運動学習には有効な状態となっていた。

周期音による f 調節後、運動学的変数は η_F のみ有意に減少し、推進効率が低下していた。また泳者の身体感覚では、水流感覚と時間調節への注意量が高まる傾向が見られた。この注意状態は、UUS のパフォーマンスを高める可能性が高く、継続的に観察する意義は高い。

VIII. 総合討論

1. 本研究の目的と研究課題

本研究では、大学競泳選手を対象に、1) 泳技能習熟と泳者の身体感覚の関連性を調査し、2) 泳者内における UUS のキック頻度と泳速度の関係性を明らかにし、3) キック頻度調節の介入が直後の UUS の泳動作に及ぼす影響について運動学習の観点を加味して検討することを目的とした。

この目的を達成するために、次の 4 つの研究課題を設け、調査と測定を行った。まず、競泳選手が泳技能改善時に重視している身体感覚を調査し、周期音利用の妥当性を検討した (研究課題 I)。次に、泳者内における UUS のキック頻度と泳速度の関係を調べるために、回流水槽にて泳速度がキック頻度と他の運動学的変数に与える影響を調査した (研究課題 II)。これらの結果をもとに、周期音を用いて最大努力時以下で UUS 中の泳者のキック頻度を調節し、他の運動学的変数への影響を調査した (研究課題 III-1)。同じような方法で、最大努力時以上のキック頻度へと調節し、運動学的変数への影響を調査した (研究課題 III-2)。これらの結果から、最終的に指導現場への還元を想定し、周期音を用いて UUS のキック頻度を調節し、その即時的なリズム改変効果について運動学的変数と運動学習の観点から調査した (研究課題 IV)。

2. 本研究結果の統合

1) 身体感覚への注意量の比較

研究課題 I では、泳者が抱く身体感覚調査用紙を作成し、研究課題 IV で活用した。ここで、両課題時の因子得点の結果を比較し、Figure 15 に示した。試技間で比較するために、各委因子の満点の値との比率で相対値化した。なお、書面の都合上有意差が認められた結果のみを図に示している。

2) キック頻度と泳速度の関係

本研究では、泳者内における UUS の f と U の関係性について検討してきた。この関係を総合的に判断するために、研究課題 II と III、IV で得られた泳者の f と U のデータについて、最大努力時を 100% と見立て、その関係性を図に示した (Figure 16)。 f と U の関係性を近似曲線で示すために、最小二乗法により 2 次元の多項式を当てはめた。この時の決定係数 (R^2) は .576 であった。

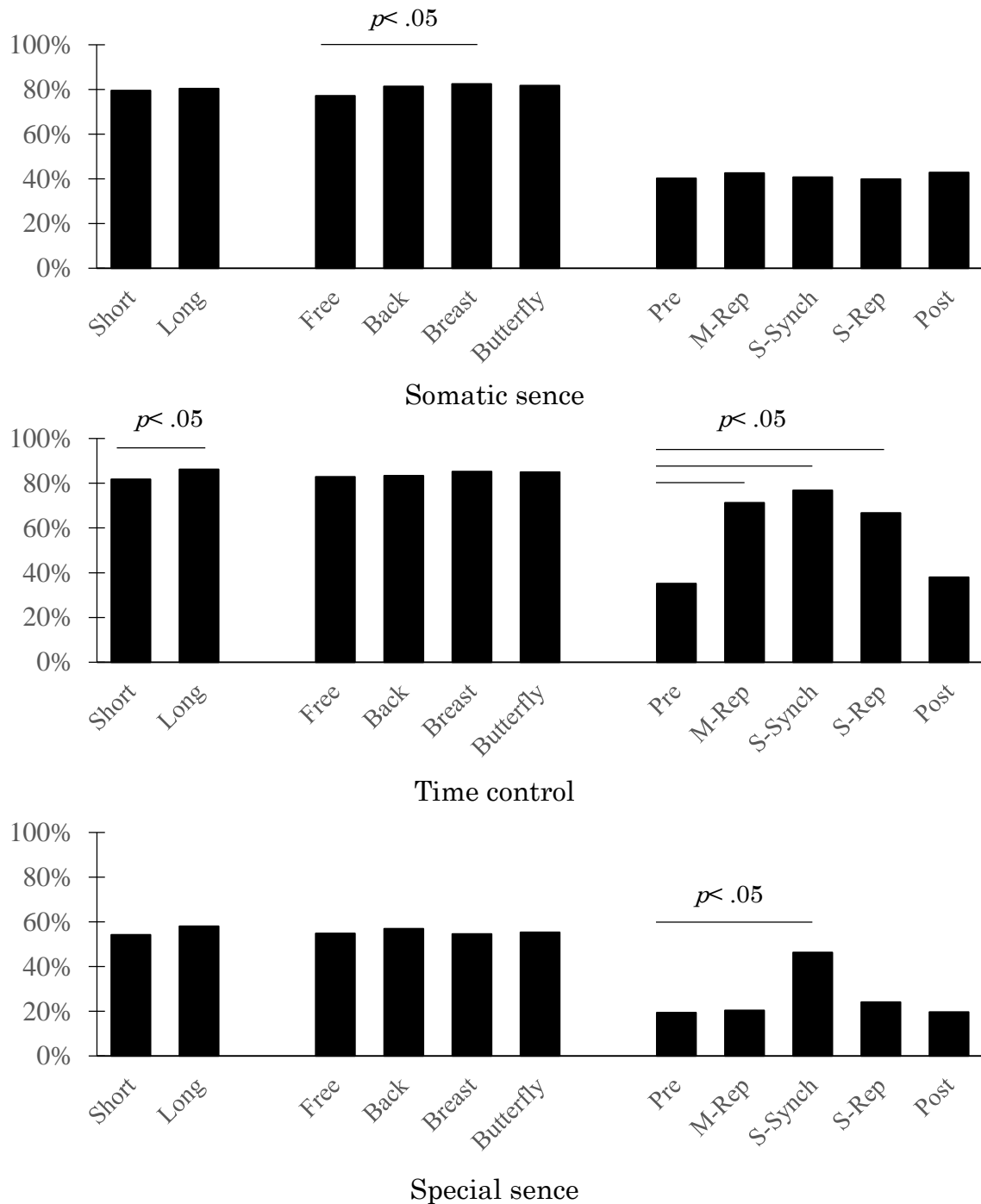


Figure 15. Relative mean value (%full points) of kinesthesia in this study only significant difference was observed in three factors.

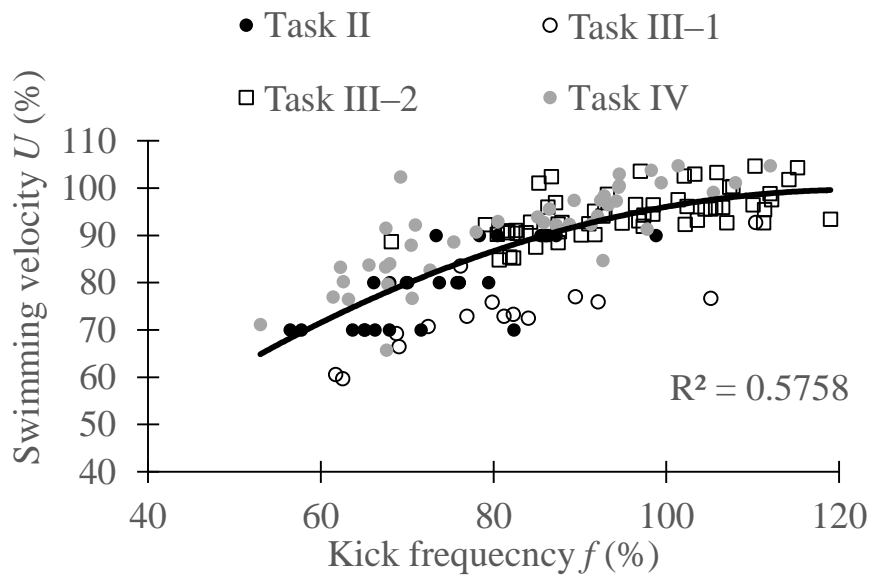


Figure 16. Relationship between kick frequency and swimming velocity. The result show in task II is black, task III is circle and squire, and task IV is gray respectively.

3. 総合討論

1) 泳技能習熟と身体感覚の関連

本研究では、周期音を用いて泳動作を調節していく前に、周期音と運動の同期によって身体感覚が変化する可能性が指摘されていること (Repp, 2005)、さらに学習者の注意が変化すると運動学習が阻害される可能性が指摘されていたため (Wulf, 2010)、水泳における運動学習と身体感覚の関係性を調査した (研究課題 I)。従来の運動学習研究では、運動の正確性や種目に応じた得点、タイムなどを長期にわたって観察し、学習者のパフォーマンス曲線をもって評価する (松田 & 杉原, 1987)。しかしながら、本研究ではその労力を鑑み、大規模集団の調査手法に準じ (辻 & 有馬, 1987)、質問紙調査を行った。全体の傾向を見るために、「泳フォームを改善する時」という表現に留めて、泳技能改善時の具体的な状況の指示はしなかった。その結果、競泳選手は泳技能改善時に体性感覚と時間調節へ注意を向けていると感じており、パフォーマンスレベルや泳法や性によって大きな差は見られなかった。このことから、泳技能習熟とこれらの身体感覚は関連している可能性は高い。ただし、この結果から因果関係を特定できたとはいえず、従来の運動学習研究に則った実験手法を行うことでその関係は明らかにできると考えられる。

近年、競泳のパフォーマンス要因として、四肢間の協応性や (Chollet et al., 2004; Leblanc, Seifert, Tourny-Chollet, & Chollet, 2007; Seifert et al., 2005; Seifert & Chollet, 2009)、リズム (Sanders & Psycharakis, 2009)、ストローク周期時間の変動性 (Hellard et al., 2008) などが泳パフォーマンスに関与していることが示唆されている。ヒトが運動中にどこに注意を向けているかによって

筋活動量が影響を受けることが明らかとなっており (Vance et al., 2004)、泳者内部の意識が観察された結果として反映されている可能性は高く、先行研究の泳者らはリズムやタイミングを調節して泳いでいるものと推察される。ヒトの脳内には内部時計の役割を果たす *time keeper* と呼ばれる箇所があると考えられている (小野田, 2004)。周期音と運動の同期中、ヒトの脳内の特定の箇所で活動が見られることも分かっており (Repp, 2005)、*time keeper* の情報も利用している可能性が指摘されている。仮に周期音と運動の同期により、時間を調節しようとする意識が働いているとすれば、水泳の運動学習にとっては有益だと考えられる。研究課題 IV の結果から、周期音と同期中あるいは音除外後の f 再現中は、時間調節への注意量増加が見られる (Figure 15)。本研究では、泳者の身体感覚への注意が泳技能改善に影響するものと仮定しており、この内的な泳者の変化を定量化できたことに意義があると考ええる。

2) UUS におけるキック頻度と泳速度の関係性

本博士論文では水中ドルフィンキック (Undulatory underwater swimming: UUS) を対象に、キック頻度 f と泳速度 U の関係が泳者内で成立するのか調査した。まず、回流水槽実験によって、 U 増加に応じて f が増加したことを確認した (研究課題 II)。屋内プール実験によって、周期音を用いて泳者の f を最大努力時以下で調節した結果、 f の増加に応じて U が増加し (研究課題 III-1)、 f の減少に応じて U が減少した (研究課題 III-2)。このことから、最大努力時以下では f と U が関係することが両変数を直接調節することで明らかとなった。これまで、UUS におけ

るパラメータ研究はシミュレーション上のみで行われていた (Cohen et al., 2012; Lyttle et al., 2000; Nakashima, 2009; von Loebbecke, Mittal, Fish, et al., 2009; von Loebbecke, Mittal, Mark, & Hahn, 2009)。実際の泳者内で変数の影響、特に f 調節の影響を調査することが UUS 研究の大きな課題であったことから (Connaboy et al., 2009)、本研究結果の意義は高いといえる。

UUS の泳パフォーマンスを向上させるためには A_{toe} を減少させると同時に f を増加させるトレーニングを行うべきだと提案されていた (Arellano et al., 2003)。しかし、最大努力時以下ではあるものの、泳者は A_{toe} を維持したまま f を増加させることで U を増加させる方略を選択していた (研究課題 II)。つまり、UUS で U 増加させるためには A_{toe} を維持したまま f を増加させることが有効だと思われる。また、実際に泳者は最大努力時以上に f を増加させることは可能だが、 A_{toe} を減少させることによって f を増加させようとしてしまい、 U が増加していなかった (研究課題 III-2)。このため、最大努力時以上の f では、 A_{toe} を維持するだけのトルクパワーが伴っていない場合が多く、 U はそれ以上増加しないというのが現実だといえる。ゆえに、UUS における f と U の関係性は、4 泳法で示された結果と類似しており (Craig & Pendergast, 1979)、最大努力時以下までは線形関係であるが、それ以上ではその関係性が保持されないことが明らかとなった。

本研究で得られた結果を相対化し、全てプロットした図を見ると (Figure 16)、これ以上 f を増加させても U が増加しない閾値が潜在しているように見える。UUS パフォーマンス向上を目指す上で、この泳者内でみられる f と U の関係性の要因を明らかにする必要がある。その 1 つの可能性として、ヒトが持つ自己組織化能力があげられる。ランニングでは、同じ走速度で運動実施者

のピッチのみを変化させると、ピッチとエネルギー需要量の関係性は U 字曲線になると報告されており (Martin et al., 2000)、ヒトは最も経済的で最適な頻度を自然に選択している可能性が示唆されている。彼らは、ヒトの周期運動では神経筋活動システムへの依存度を最小化するように組織化されているものと推察している。UUS においても、泳者が習熟していく過程で、U が最大化されるような効率的な f や A_{toe} が自然に選択されていったものと考えることができる。つまり、泳者内に潜在する神経筋活動システムへの負担が大きくなりすぎないように反映された結果が f と U の頭打ちを説明する一因ではないかと推察される。

興味深いことに、何人かの泳者は最大努力時以上に f を増加させると、若干 U も増加していた (Figure 16)。UUS の推進力を最大化するためには、効率を犠牲にする必要があると指摘されている (Connaboy et al., 2009)。水泳における効率は、出力パワーと推進力の比からなる推進効率や、消費エネルギーに対する運動量の比からなるエネルギー効率など、入出力の比で示される (Zamparo et al., 2002)。最大努力時に、推進力を最大化するために効率を犠牲にしているものと考えられるが、効率を完全に犠牲にできていない泳者がいた場合には、 f 増加によって U が増加することは考えられる。例えば、長距離型の泳者ほど長い距離を浪費しないよう普段から効率を重視しているものと推察される。UUS は、長水路の場合レース全体の 20% 程度で用いることができるものの、無酸素状態の UUS を多く行うよりもストローク局面を多くすることが、より長距離を泳ぐ泳者にとっては戦術的に有効だと思われる。そのような泳者ほど、普段から UUS では効率を重視しているのではないかと推察される。

3) 周期音との同期が泳パフォーマンスに及ぼす影響

研究課題 IV において、UUS 中の泳者の f を調節し、その直後の最大努力時の運動学的変数と泳者の身体感覚への影響を調査した。運動学的変数は η_F のみが有意に減少しており、推進効率が影響を受けていた。研究課題 III-2 でも同様の結果が見られ、 f を調節した前後では η_F は影響を受けることが明らかとなった。この η_F は、全身がうねっている生物の頭から下肢にかけて伝わっていく波速度 c を全身の出力パワーと見立て、それがどれだけ推進力に利用されているかを示す推進効率である (Nicolas et al., 2007; Zamparo et al., 2002)。研究課題 III-2 と研究課題 IV では、ともに Post で U は変化していないものの c の増加傾向が見られている (Table 11、Table 13)。つまり、全身のうねりが影響を受けて、 η_F が変化している可能性が高い。さらに、Pre-Post 間での試技の繰り返し回数を見ると、研究課題 III-2 の方が多く試技を行っており、 c に有意差が生じている。本研究では試技を繰り返すことによって U の値が減少しておらず、疲労の影響は無いものと仮定しているが、 c に関しては何らかの影響を受けるといえる。ゆえに、周期音との同期によって、特に f 減少後には泳者の c が影響を受ける可能性が示唆された。

周期音と UUS の同期後に、泳者の時間調節と水流感に変化が生じていた (研究課題 IV)。タッピングを対象に、ヒトの感覚と運動の同期について調査した研究によれば (Repp & Su, 2013; Repp, 2005)、ヒトは自己運動によって発生した何らかの内部事象 (指が触れるのを感じる、衝突音

が発生し聴覚でその音を聞くなど)と目標とする外部事象(メトロノーム音)との時間誤差を縮めるようオンラインで修正を続けており、それによって一定リズムを保っている。ただし、一定時間経過し周期時間を記憶した後は、外部事象を予測して運動を続けると考えられている。本研究では周期音との同期中は特殊感覚、特に聴覚への注意量が増加しており、音除外時は時間調節への注意量が増加していた (Figure 15)。ゆえに、周期音との同期を調査した先行研究の状態となっており、周期音と同期中の泳者の身体感覚を確認することができたことに意義があるといえる。

研究課題 I の結果から、身体感覚への注意が泳技能改善に関与している可能性が示唆された。近年では、タイミングやリズムといった時間関連の泳動作が泳パフォーマンスの重要な要素である可能性が報告されてきた (Hellard et al., 2008; Leblanc et al., 2007; Sanders & Psycharakis, 2009; Seifert, Leblanc, et al., 2010)。これらの先行研究から、研究課題 IV において周期音利用後に時間調節への注意量増加傾向が見られた結果は (Table 14)、泳パフォーマンス向上に必要な状態に泳者を導くことができたといえる。先行研究から周期音使用による運動学習阻害が懸念されたが、本研究で得られてきた結果を総合的にみると、水泳にとっては周期音を用いることは妥当であると考えられる。

4) 実践現場での応用

200m 平泳ぎのレースでは一定ペースの方が身体ストレスは少なく、レースペースとして望ましいという報告があることから、周期音を用いて平泳ぎ中の泳者のストローク頻度を調節し、一定ペー

スにできたこと、さらにそのような戦略が疲労軽減に貢献するだろうと報告されている (Thompson, MacLaren, Lees, & Atkinson, 2003; Thompson et al., 2002)。本研究結果によって、周期音と同期している間は聴覚に対する注意が高まることが明らかとなり、周期音を聞いて頻度を記憶するだけで十分に f の再現が可能であることが分かった (研究課題 IV)。ゆえに、先行研究のようなレースペース調節においても周期音を記憶するだけで泳者が頻度を再現できる可能性が高く、実際のレースでも利用することが可能だと思われる。

先行研究の記述では、UUS において f を増加させると同時に A_{toe} を減少させることで U が増加するだろうと推察されていたが (Arellano et al., 2003)、本研究によって U を増加させるためには f の増加に加えて A_{toe} の維持が必要であることが示唆された (研究課題 II、III-2)。UUS において U を増加させるためには、泳者は最大努力時以上まで f を増加させることが可能であり、 U も減少しないことから (研究課題 III-2)、まずはトレーニングにて高い f の状態に慣れる必要があると考える。その f で泳げるようになった後に、縮小した A_{toe} を増大させるために素早いキック動作中でも高いトルクパワーを発揮できるようトレーニングすることが有効だと思われる。

うねり様式を示す λ_{BL} に着目すると、研究課題 III-2 の結果では、 U を維持しようとしたまま f を減少させると (90%F)、有意に λ_{BL} が減少していた。しかしながら、研究課題 IV において f のみを減少させると (70%F)、 λ_{BL} は有意に増加していた。このことから、 f 減少と U 最大化の相乗効果として λ_{BL} が減少することが考えられる。ヒトの UUS では、 λ_{BL} の値が低くなるほど身体の後ろ側を利用したうねり様式になり、効率的であると考えられている (Connaboy et al., 2007;

Nakashima, 2009)。ゆえに、指導現場では f を減少させ、 U を最大化することで効率的なうねり様式を身につけられると考えられる。

4. 今後の課題

1) 身体感覚調査

研究課題 I では、質問紙調査によって泳技能改善時に何に注意を向けていたのかを思い出し法によって調べ、体性感覚と時間調節へ注意を向けていたことが明らかとなったが、因果関係までは明らかにできなかった。体育科学において、アスリートを対象にした研究を行うことの限界にサンプルサイズの問題があると考えられる。科学的に現象を捉えるためには、統計的手法が必須であり、そのためには一定数以上の対象者が必要となる。しかし、トップレベルの泳者を対象とするほど人数に限りがある。さらにパフォーマンスへの影響を調査する介入実験では、パフォーマンスが低下する危険性がある限り、倫理的配慮として実験を行うことはできない。泳者が身体感覚へ注意を向けることで泳パフォーマンスが影響を受けるのか、その因果関係にまで踏み込むためには介入研究が確実だと考えるが、いまだ課題が存在するといえる。ゆえに、本研究課題 I は後ろ向きコホート研究であり、次のステップとして、上述した問題に触れることのない前向きコホート研究を行う必要があるだろう。このようなエビデンスを集めていくことで、将来的に介入研究も行えるものと思われる。

質問紙調査の質を高める取り組みも求められる。信頼性を高めるために、研究課題 I の質問項目を増やす必要がある。研究課題 I の信頼性検証では α 係数を用いており、これは質問項目数が少ないと値が低くなる (小塩, 2004)。ゆえに、質問項目数を増やすための検討が求められる。本研究課題では競泳経験者や指導者、水泳指導の専門家らによって水泳で必要と考えられる身体感覚を十分に議論し、事前調査を行った上で質問項目を決定した。しかし、ここに質問項目の

真の妥当性としての限界が存在すると考えられる。動作分析や、生理学的指標を用いることで客観的に水泳の現象を分析する研究は数多く存在するが (Elipot et al., 2009; Pelayo, Alberty, Sidney, Potdevin, & Dekerle, 2007; Seifert, Leblanc, et al., 2010; Seifert, Toussaint, Alberty, Schnitzler, & Chollet, 2010; マグリシオ, 1999)、泳者が知覚している身体感覚に関する研究はほとんど見当たらず、聞き取り調査や自由記述式調査を行い泳者の主観に頼る形になることから、泳者間で変動する可能性も考えられる。つまり、本研究課題にて、競泳経験者や指導者らではカバーできなかった水泳独自の身体感覚が残されている可能性もある。ヒトの運動感覚は、四肢の動きの感覚、四肢の位置の感覚、筋の力の感覚、努力感、重さの感覚などがある (岩村, 2001)。詳細な泳者の身体感覚を調査するためには、これら生理学的知見に基づいた詳細な質問項目を検討し、含める必要があるだろう。

本研究課題で用いた間隔的尺度の基準関連妥当性の検証を行うことでさらに信頼のある評価法となりうる。ヒトの体性感覚や特殊感覚に対する意識の測定は、機能的核磁気共鳴装置 (fMRI) や、陽電子放射型断層撮像法 (PET) などを用いることで日常的な陸上での簡易運動中であれば脳活動を記録し、身体感覚を議論することが可能だが (内藤, 2004)、全身運動や水中環境での計測は技術的にもいまだ難しいといえる。さらに、運動中の時間調節への意識については、生理学や心理学、神経科学といった分野で研究が行われ、その存在が明らかとなっているものの、脳内における情報処理過程は解明されていない (小野田, 2004)。水中という特殊環境で運動するヒト特有の身体感覚を理解するには、現時点では泳者が自覚できる身体感覚をさらに調査し、加えて神

経科学や生理学分野で明らかとなっている身体感覚に関する知見と照らし合わせて、ヒトの泳動作中の情報処理過程を推察し、評価法としての妥当性を検証していくべきだといえる。

一方で、本研究課題で抽出された因子が今後の研究に貢献できる可能性もある。因子分析の高次的な統計手法として、検証的因子分析がある。これは、あらかじめ因子と質問項目との構造を仮定し、その構造が妥当か検証する分析方法である（松尾と中村，2002）。例えば、自由形では上肢によって主な推進力を生みだすのに対し、平泳ぎでは下肢が主な推進力となるため、質問項目を再検討する際には、体性感覚因子を構成する質問項目として、上肢と下肢に細分化した質問項目の追加が必要である。また、自由形や背泳ぎは、上肢の協応性によって泳パフォーマンスが影響を受けるため（Seifert, Leblanc, et al., 2010）、時間調節因子に関わると考えられる上肢の協応性に関する質問項目を追加する必要があるといえる。さらに、検証的因子分析だけでなく、多変量解析の一つである共分散構造分析を用いることで、観測変数と因子との関係性を示すことも可能である。Barbosa et al. (2010) は、泳技能と生理応答の変数を用いてその関連性をパス図でモデル化しているが、ここに泳者の身体感覚の因子を変数として加えられる可能性もある。これは、将来的に競泳パフォーマンスのメカニズムをより詳細に説明することにもつながる。本研究課題で得た因子によって、水泳の泳技能を構成する構造をあらかじめ仮定した質問項目を追加し、検討することが可能で、今後の発展に貢献できると考えられる。

この質問紙の質を高めることで、教育的な観点で活用できる可能性もある。現在の学校教育現場では、教師が体育授業で児童・生徒の学習過程を評価するために、外観から観察可能な技能レ

ベルと形成的授業評価を用いて評価しており（文部科学省，2008）、学習者の泳技能に対する内的な変化を評価する方法は確立されていない。麓（2006）は、運動の指導では、学習者の身体の使い方や動きという側面とともに知覚的側面への考慮が必要であると述べている。これは、泳法指導の現場で泳者の身体感覚を捉える指標というものの存在によって、おおいに指導者の泳者理解を深めることができるため、その必要性は高いといえる。しかしながら、本研究課題で用いた質問紙を一般化するためには、大きな課題として泳者の身体感覚を捉える評価法としての信頼性、妥当性を検討していく必要があることはすでに述べた。具体的には、質問項目数を増やすことと、他分野の知見と照らし合わせて質問項目を検討することがあげられる。さらに今後重要なのは、目的とする泳動作に必要な身体感覚を特定することだといえる。例えば、上肢による推進力は、水の抵抗を掌で受け、後方へと押し出すことで前方へ進むが、この時の泳者の意識は水のかき方に集中すべきか、あるいは水の抵抗、関節角度、体幹など他の身体感覚に意識を向けるべきかを明確にするべきである。反対に、ある身体感覚の意識が高まることで、むしろ目的の泳動作を達成するために不必要な筋活動が高まり、運動を抑制してしまう可能性もある。学習者の技能レベルによって、自己の身体感覚への注意を変化させることで運動学習が促進されることが明らかとなっていることから（Wulf, 2010）、目的とする動作と自覚している身体感覚との関係性を明確にすることで、指導現場への有効な評価法として提案することができるだろう。

本研究課題の対象者は大学競泳選手であり、パフォーマンスレベルによって身体感覚を重視する程度に違いは見られなかった。Schmidt and Lee (1999) によると、初心者の運動学習段階は認

知段階と呼ばれ、運動が遅く、非効率的で常に認知的活動が必要な状態とみなされている。一方で熟練者は自動化段階と呼ばれ、運動は正確、効率的であり認知活動をまったく必要としない状態とみなされている。よって、本研究課題の大学競泳選手は技能が習熟した集団で、重視する身体感覚に差が見られなかったが、さらに広いパフォーマンスレベルの対象者を調査することで、重視する身体感覚の程度に違いが見られる可能性が高いといえる。質問紙を一般化するためには、パフォーマンスレベルによる違いも検討する必要があるといえ、熟練者と初心者でどのように身体感覚への意識が異なるか、また初心者から熟練者に習熟していく過程でどのように身体感覚への意識が変化していくのかを調べる必要がある。また、泳者の属性によって泳技能が異なることから (Pelayo et al., 2007)、泳者の属性によって意識している身体感覚にも違いがある可能性が高いといえる。指導現場では、泳者の属性に合わせて指導を行っており (日本水泳連盟, 2012)、属性の違いを質問紙によって明らかにすることは、指導者にとって有益な情報となりうる。これらの課題を解決していくことで、ヒトが泳技能を習得する過程を理解するのに役立つものと考えられる。

2) UUS の運動学的変数

最大努力時以上の f で泳ぐと U が増加した泳者が何名か見られ、これは効率を犠牲にしないよう重視していると考えられる泳者であり、 f の増加によって U が増加する場合があるものと考察した。しかし、UUS の効率を検討するためには、どの指標を用いるか考える必要がある。例えば、消費エネルギーと機械的エネルギーの比によって機械的効率が示されるが、UUS は水中で止息

したまま行う運動であり、従来行われている呼気ガス分析によるエネルギー量の推定が妥当とは思えない。また、筋の活動積分値とエネルギー消費量が関連していることが報告されており (Henriksson & Bonde-Petersen, 1974)、筋活動によってエネルギー量の相対変化を推定することは可能であるが、エネルギーと出力の関係から効率を見るためには自己推進時抵抗や流体力の計測も求められる。本研究で扱った、渦生成能を示すストローハル数 St と推進効率を示すフルード効率 η_F は、ともに効率を推定するものであるが、ヒトの UUS での報告が少ないため、これらの値の変化が何を示すのかという十分なエビデンスが確立していない。ゆえに、今後の課題として、UUS の効率の指標について考える必要がある。

Lighthill (1975) は、魚類の推進力を数理的に解明するために、脊椎が連結している点に着目した。頭部から尻尾にかけてうねりが伝わっていく力の伝達様式を計算し、全身の波速度 c と流体における推進効率の計算式 η_F を報告した。魚類との比較が可能であることから、この式をヒトの UUS に当てはめ、いくつかその値が報告されているものの (Connaboy et al., 2007; Nicolas et al., 2007; Zamparo et al., 2012)、魚類の場合は多関節の脊椎でうねるだけでなく、ヒレを有しており形態学的に全く異なる。先行研究に従って本研究でも算出しているが、これらの指標をヒトの UUS で用いることの妥当性が十分議論されていないように思われる。イルカとヒトの動きを比較した研究では、両者間で足関節に形態学上の大きな違いがあり、ヒトが魚類と同じ推進力を得ることは難しいと結論づけられている (Ungerechts et al., 1998)。現在では Lighthill (1975) による細長物体理論を用いることで、生物間で比較できるというメリットはあるものの、ヒトの形態に合わせた新たな

UUS の力学モデルを作成することも視野に入れるべきだと思われる。泳者の下肢による推進運動のメカニクスが明らかとなれば、各関節に働くトルクなどを予測でき、傷害の予防にもつながるだろう。

これまで泳者の足先ポイントを用いて、キック周期の速さを f によって評価してきた。本研究の結果では、 f と波速度 c は線形関係にあることが示されてきた（研究課題 III-1、III-2、IV）。

UUS をレビューした先行研究によれば（Connaboy et al., 2009）、水棲生物の研究の多くが f と U の関係に着目されており、それに関連付けるためにヒトでも同様の変数が着目されていた。しかしながら、ヒトと魚類を比較するには限度があると考えられている（Connaboy et al., 2007; Ungerechts et al., 1998; von Loebbecke, Mittal, Fish, et al., 2009）。近年のヒトの UUS 研究では、全身のうねりが推進力に直接影響する可能性が指摘されている（Hochstein & Blickhan, 2011; Nicolas et al., 2007; Zamparo et al., 2002）。 f という変数は、全身の関節点の上下に振幅している中で足先 1 点のみを見ているに過ぎない。つまり、 f の結果は c に起因しており、推進力に直接働く c に着目する方が UUS パフォーマンスを理解するために必要なのではないかとと思われる。足先は末端で分析が容易という特徴はあるものの、UUS において推進力と関係する動作特徴を見出すためには、全身の関節点の分析が望まれる。

本研究では、先行研究に従い St や c 、 η_F 、 λ_{BL} を算出してきたが、これらの値の変化が推進メカニズムとどのように関連しているのか、現時点では情報がほとんど無いため推測するしかないといえる。近年、泳者の推進メカニズム解明に、PIV 法が用いられるようになり、ヒトにも応用されてき

ている (Hochstein & Blickhan, 2011; Matsuuchi et al., 2009; Miwa et al., 2006; Takagi, Nakashima, Ozaki, & Matsuuchi, 2013)。これは、水中に粒子を混入させ、それを撮影することで流体を可視化する技術である。本研究では泳者内の f を直接調節したが、 St や η_F , λ_{BL} といった運動学的変数の違いと流体の状態を観察する必要がある。さらに、近年では回流水槽内で泳者をワイヤーで牽引し自己推進時抵抗を計測する手法や (成田ほか, 2013)、圧力センサーを用いて足部流体力を計測する手法 (角川ほか, 2012) が確立しており、これらも同時に計測することで、本研究で用いた運動学的変数が推進メカニズムとどのように関連しているのかが明らかにできると思われる。

3) 周期音の効果

研究課題 IV の結果から、実践現場での応用としてレース前に周期音を聞くことでレースペース調節が可能だと考察した。しかしながら、周期音をどのタイミングで聞くべきか、どれぐらいの量を聞くべきかといった保持効果の課題が残っているといえる。研究課題 III-1 と研究課題 IV の結果では、5 分間の休息を取って f が再現できていた。レースを想定すると、レース開始 5 分前はすでに泳ぐコースの前で準備している段階だと思われ、周期音を聞くことができない可能性もある。ゆえに、レースを想定した周期音による f 保持効果の検討が求められる。

周期音による f の標準偏差をみると、研究課題 III-1 では、音除外後の方が小さくなり、研究課題 IV では音同期中の方が小さくなっていた。本研究では、周期音同期中と周期音除外後で f 再現の信頼性はどちらが高いのかは決定的な結果は得られなかった。研究課題の結果ごとに値

が異なるものの、個人間のバラツキは 2%～7% 程度であった。本研究により周期音の効果として、多くの泳者に対して f を正確に再現させることが可能であるが、周期音と同期する必要があるのか、聞くだけで良いのかという明確な答えは示せなかった。今後、泳者の特性に合った最適な f 値の存在が明らかとなれば、どちらの方が正確に f を再現させるかを検証する意味があると思われる。

研究課題 IV の結果から、周期音との同期後に水流感覚が増加していた。この質問項目は「水が肌の上を流れてくような、水が周りで流れていく感覚を意識した」という記述であり、それに対して意識したと回答した泳者が多く見られた。本研究課題 I の因子分析の結果では、体性感覚因子の下位尺度には水流感含まれず、他の項目との相関関係は見られなかった。周期音同期後、有意に増加する独自の感覚の可能性があるものの、水流感覚が UUS の泳動作にどう影響するのかは本研究では明らかにできなかった。前述した通り、熟練した泳者に対して感覚の変化が泳パフォーマンスへ及ぼす影響を調査するためには課題があるため、研究手法から検討していく必要があるだろう。

また、対象者を変えた検討も重要だといえる。ヒトは、初心者の頃にぎこちない動きであっても、練習を繰り返すことで習熟していき、熟練者になると滑らかで巧みな動きになっていく。運動学習では、その変化していく過程を明らかにすることに主眼が置かれる。本研究は大学競泳選手のみを対象としていたが、技能レベルが高い熟練者であった。今後は異なるレベルの対象者について周期音利用の効果について検討していくことで、縦横断的に学習の推移について考察できると思わ

れる。また時間はかかるが、対象者の経年変化について追跡することで、因果関係まで考察できるといえる。運動学習は実験室レベルの運動を扱ったものが多く、実際の競技パフォーマンスを対象とするのは体育科学において価値のある研究だと思われるが、いまだ報告が少ない。

IX. 総括

本研究では、大学競泳選手を対象に、泳技能習熟と泳者の身体感覚の関連性を調査し、泳者内における水中ドルフィンキック (UUS) のキック頻度 f と泳速度 U の関係性を明らかにし、 f 調節の介入が直後の UUS の泳動作に及ぼす影響について運動学習の観点を加味して検討することを目的とした。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 競泳選手が泳技能改善時に抱く身体感覚は、体性感覚（身体位置、身体角度、水の抵抗感、効率）、時間調節（タイミング、リズム）、特殊感覚（視覚、聴覚）の 3 つであり、主に体性感覚と時間調節を重視していると感じていた。
- 2) UUS は、泳者内で f と U が線形関係になっているが、最大努力時の f の値を越えると、両者の関係性は崩れることが明らかとなった。また、泳者によっては最大努力時以上の f で泳ぐと U が増加し、さらに推進力が生成される可能性が示唆された。
- 3) 泳者の f を調節する方法は、周期音と UUS を同期する方法と音を聞いて周期を記憶する方法では、 f を再現する程度に差は無かった。UUS に限らず、大学競泳選手のストローク頻度を調節する際に、周期音を泳ぐ直前に聞くだけで頻度調節ができる。

- 4) 周期音を用いて UUS の f を調節し、その直後に最大努力 UUS を行くと、UUS のフルード効率 η_F に影響を与える。さらに、泳者は水流感覚（泳者の周りで水が流れていく感覚）と時間調節（泳動作のタイミングやリズム）への注意量が増加する傾向が見られた。このため、周期音利用によって運動学習時に泳者が注意を向けている身体感覚の状態に近づく。
- 5) UUS において f を減少させる際に泳者に対して U を最大化するよう指示を与えることで、より効率的なうねり様式になることが明らかとなった。周期音利用によって、泳者が効率的な UUS を獲得できる可能性が示唆された。

以上のことから、大学競泳選手に対する周期音を用いたキック頻度調節方法は、運動学習の観点から見ても妥当であり、UUS の f を調節することが可能なだけでなく、バイオメカニクスのにも運動学習的にも泳パフォーマンス向上に有益であることが示された。

参考文献

- Ae, M., Tang, H., & Yokoi, T. (1992). Estimation of inertia properties of the body segments in Japanese athletes. *Biomechanism*, 11, 23–33.
- Alberty, M., Potdevin, F. P., Dekerle, J., Pelayo, P. P., & Sidney, M. C. (2011). Effect of stroke rate reduction on swimming technique during paced exercise. *Journal of Strength and Conditioning Research* / National Strength & Conditioning Association, 25(2), 392–7.
doi:10.1519/JSC.0b013e3181b94a51
- アレクサンダー, & R.M.マクニール. (1992). 生物と運動: バイオメカニックスの探求. (東昭 編). 東京: 日経サイエンス社(日本経済新聞出版社).
- Alves, F., Lopes, P., Veloso, A., & Silva, A. M. (2006). Influence of body position on dolphin kick kinematics. In H. Schwameder, G. Strutzenberger, V. Fastenbauer, S. Lindinger, & E. Müller (Eds.), *XXIV International Symposium on Biomechanics in Sports*. Salzburg, Austria.
- Arellano, R., Pardillo, S., & 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*. Caceras, Spain: Universidad de Extremadura.
- Arellano, R., Pardillo, S., & Gavilán, A. (2003). Usefulness of strouhal number in evaluating human

underwater undulatory swimming. In J.-C. Chatard (Ed.), *Biomechanics and medicine in swimming IX* (pp. 33–38). Saint-Étienne: de l'Université de Saint-Étienne.

Asanuma, H., & Keller, A. (1991). Neuronal mechanisms of motor learning in mammals. *Neuroreport*, 2(5), 217–24.

Atkison, R. R., Dickey, J. P., Dragunas, A., & Nolte, V. (2014). Importance of sagittal kick symmetry for underwater dolphin kick performance. *Human Movement Science*. doi:10.1016/j.humov.2013.08.013

Barbosa, T. M., Bragada, J., Reis, V., Marinho, D., Carvalho, C., & Silva, A. (2010). Energetics and biomechanics as determining factors of swimming performance: updating the state of the art. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 13(2), 262–269.

Barthels, K. M., & Adrian, M. J. (1971). Variability in the dolphin kick under four conditions. In L. Lewillie & J. P. Clarys (Eds.), *First international symposium on biomechanics in swimming, water-polo and diving* (pp. 105–118). Bruxelles: Universite libre de Bruxelles.

Bernard, T., Vercruyssen, F., Grego, F., Hausswirth, C., Lepers, R., Vallier, J. M., & Brisswalter, J. (2003). Effect of cycling cadence on subsequent 3 km running performance in well trained triathletes. *British Journal of Sports Medicine*, 37(2), 154–8; discussion 159.

Boitel, G., Vercruyssen, F., Alberty, M., Nesi, X., Bourdon, L., & Brisswalter, J. (2010, August). Kick frequency affects the energy cost of aquatic locomotion in elite monofin swimmers. *European*

Journal of Applied Physiology. doi:10.1007/s00421-010-1450-6

Chollet, D., Seifert, L., Leblanc, H., Boulesteix, L., & Carter, M. (2004). Evaluation of arm-leg coordination in flat breaststroke. *International Journal of Sports Medicine*, 25(7), 486.

Cicciarella, C. F. (1982). Effects of loss of visual feedback on performance of two swimming strokes. / Les effets de l'absence du feedback visuel sur la performance de deux styles de nage. *Perceptual & Motor Skills*, 55(3), 735–738.

Cohen, R. C. Z., Cleary, P. W., & Mason, B. R. (2012). Simulations of dolphin kick swimming using smoothed particle hydrodynamics. *Human Movement Science*, 31(3), 604–19. doi:10.1016/j.humov.2011.06.008

Collard, L., & Oboeuf, A. (2009). Comparison of expert and nonexpert swimmers' opinions about the value, potency, and activity of four standard swimming strokes and underwater undulatory swimming. *Perceptual and Motor Skills*, 108(2), 491–498.

Connaboy, C., Coleman, S., McCabe, C., Naemi, R., Psycharakis, S., & Sanders, R. (2007). Tadpole, trout or tuna : The equivalence of animal and human aquatic undulatory locomotion. In 25 International Symposium on Biomechanics in Sports.

Connaboy, C., Coleman, S., Moir, G., & Sanders, R. (2010). Measures of Reliability in the Kinematics of Maximal Undulatory Underwater Swimming. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 42(4), 762–70. doi:10.1249/MSS.0b013e3181badc68

- Connaboy, C., Coleman, S., & Sanders, R. H. (2009). Hydrodynamics of undulatory underwater swimming: a review. *Sports Biomechanics / International Society of Biomechanics in Sports*, 8(4), 360–380.
- Counsilman, J. E. (1968). *The Science of Swimming* (p. 480). NJ: Prentice-Hall.
- Counsilman, J. E., & Counsilman, B. E. (1994). *The new science of swimming* (2nd ed.). NJ: Prentice Hall.
- Craig, A. B., & Pendergast, D. R. (1979). Relationships of stroke rate, distance per stroke, and velocity in competitive swimming. *Medicine and Science in Sports*, 11(3), 278–283.
- Daly, D., Malone, A. L., Burkett, B., Gabrys, T., & Satkunskiene, D. (2009). IS SIGHT THE MAIN DETERRENT TO RACE PERFORMANCE IN VISUALLY IMPAIRED COMPETITIVE SWIMMERS? *Physical Education and Sport*, 7(1), 1–15.
- Elipot, M., Hellard, P., Taar, R., Boissire, E., Rey, J. L., Lecat, S., & Houel, N. (2009). Analysis of swimmers' velocity during the underwater gliding motion following grab start. *Journal of Biomechanics*, 42(9), 1367–1370.
- Figueiredo, P., Seifert, L., Vilas-Boas, J. P., & Fernandes, R. J. (2012). Individual profiles of spatio-temporal coordination in high intensity swimming. *Human Movement Science*, 31(5), 1200–12. doi:10.1016/j.humov.2012.01.006
- Fitts, P. M., & Posner, M. I. (1967). *Human Performance*. (E. L. Walker, Ed.) Basic Concepts in

Psychology (p. 162). Brooks/Cole.

Fujisaki, W., & Nishida, S. (2010). A common perceptual temporal limit of binding synchronous inputs across different sensory attributes and modalities. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 277(1692), 2281–2290.

麓信義. (2006). 運動行動の学習と制御—動作制御へのインターディシプリナリー・アプローチ. 東京: 杏林書院.

Gillis, G. (1997). Anguilliform locomotion in an elongate salamander (*Siren intermedia*): effects of speed on axial undulatory movements. *The Journal of Experimental Biology*, 200(Pt 4), 767–84.

Grafton, S. T., Mazziotta, J. C., Presty, S., Friston, K. J., Frackowiak, R. S., & Phelps, M. E. (1992). Functional anatomy of human procedural learning determined with regional cerebral blood flow and PET. *Journal of Neuroscience*, 12(7), 2542–2548.

Hellard, P., Dekerle, J., Avalos, M., Caudal, N., Knopp, M., & Hauswirth, C. (2008). Kinematic measures and stroke rate variability in elite female 200-m swimmers in the four swimming techniques: Athens 2004 Olympic semi-finalists and French National 2004 Championship semi-finalists. *Journal of Sports Sciences*, 26(1), 35–46.

Henriksson, J., & Bonde-Petersen, F. (1974). Integrated electromyography of quadriceps femoris muscle at different exercise intensities. *Journal of Applied Physiology*, 36(2), 218–220.

Hochstein, S., & Blickhan, R. (2011). Vortex re-capturing and kinematics in human underwater undulatory swimming. *Human Movement Science*, 30(5), 998–1007.

Ikegami, T., Hirashima, M., Osu, R., & Nozaki, D. (2012). Intermittent Visual Feedback Can Boost Motor Learning of Rhythmic Movements: Evidence for Error Feedback Beyond Cycles. *Journal of Neuroscience*, January 11, 32(2), 653-657.

岩村吉晃. (2001). タッチ. 東京: 医学書院.

Jäncke, L., Loose, R., Lutz, K., Specht, K., & Shah, N. J. (2000, September). Cortical activations during paced finger-tapping applying visual and auditory pacing stimuli. *Brain Research. Cognitive Brain Research*.

Jenkins, I. H., Brooks, D. J., Nixon, P. D., Frackowiak, R. S., & Passingham, R. E. (1994). Motor sequence learning: a study with positron emission tomography. *Journal of Neuroscience*, 14(6), 3775–3790.

小林啓介., 仙石泰雄., 高木英樹., 椿本昇三. (2013). 水中ドルフィンキック泳中の体幹動作と筋活動における特徴-大学競泳選手を対象として-. 日本水泳・水中運動学会 2013 年次大会 論文集 (pp. 92-97).

Konstantaki, M., & Winter, E. M. (2009). The Effectiveness of a Leg-Kicking Training Program on Performance and Physiological Measures of Competitive Swimmers. *International Journal of Sports Science and Coaching*. doi:10.1260/174795407780367140

Leblanc, H., Seifert, L., Tourny-Chollet, C., & Chollet, D. (2007). Intra-cyclic Distance per Stroke Phase, Velocity Fluctuations and Acceleration Time Ratio of a Breaststroker's Hip: A Comparison between Elite and Nonelite Swimmers at Different Race Paces. *International Journal of Sports Medicine*, 28(2), 140–147.

Leonard, C. T. (2002). ヒトの動きの神経科学. (松村道一, 森谷敏夫, 小田伸午 監訳). 東京: 市村出版.

Lighthill, J. (1975). *Mathematical Biofluidynamics*. Society for Industrial and Applied Mathematics.

Lyttle, A. D., Blanksby, B., Elliott, B. C., & Lloyd, D. G. (2000, October). Net forces during tethered simulation of underwater streamlined gliding and kicking techniques of the freestyle turn. *Journal of Sports Sciences*. doi:10.1080/026404100419856

Madison, G., Karampela, O., Ullén, F., & Holm, L. (2013, May). Effects of practice on variability in an isochronous serial interval production task: asymptotical levels of tapping variability after training are similar to those of musicians. *Acta Psychologica*. doi:10.1016/j.actpsy.2013.02.010

マグリシオ E. W. (1999). スイミング・イーブン・ファースター. (野村武男 & 田口正公 編). 東京: ベースボール・マガジン社.

Malone, L. A., Sanders, R. H., Schiltz, J. H., & Steadward, R. D. (2001). Effects of visual impairment on stroke parameters in Paralympic swimmers. *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 33(12), 2098.

Martin, P. E., Sanderson, D. J., & Umberger, B. R. (2000). Factors affecting preferred rates of movement in cyclic activities. In V. M. Zatsiorsky (Ed.), *Biomechanics in sport: Performance enhancement and injury prevention* (pp. 142–160). Blackwell Science.

松田岩男, 杉原隆. (1987). *運動心理学入門*, 新版. 東京: 壮光社.

松尾太加志, 中村知靖. (2002). *誰も教えてくれなかった因子分析—数式が絶対に出てこない因子分析入門* [単行本]. 東京: 北大路書房.

Matsuuchi, K., Miwa, T., Nomura, T., Sakakibara, J., Shintani, H., & Ungerechts, B. E. (2009). Unsteady flow field around a human hand and propulsive force in swimming. *Journal of Biomechanics*, 42(1), 42–7. doi:10.1016/j.jbiomech.2008.10.009

McNevin, N. H., Shea, C. H., & Wulf, G. (2003). Increasing the distance of an external focus of attention enhances learning. *Psychological Research* (Vol. 67, pp. 22–29).

Miura, A., Kudo, K., & Nakazawa, K. (2013, June 7). Action-perception coordination dynamics of whole-body rhythmic movement in stance: A comparison study of street dancers and non-dancers. *Neuroscience Letters*. doi:10.1016/j.neulet.2013.04.005

Miura, A., Kudo, K., Ohtsuki, T., & Kanehisa, H. (2011). Coordination modes in sensorimotor synchronization of whole-body movement: A study of street dancers and non-dancers. *Human Movement Science*, 30(6), 1260–1271.

Miura, A., Kudo, K., Ohtsuki, T., Kanehisa, H., & Nakazawa, K. (2013). Relationship between muscle

cocontraction and proficiency in whole-body sensorimotor synchronization: a comparison study of street dancers and nondancers. *Motor Control*, 17(1), 18–33.

Miwa, T., Matsuuchi, K., Shintani, H., Kamata, E., & Nomura, T. (2006). Unsteady flow measurement of dolphin kicking wake in sagittal plane using 2C-PIV. In J. P. Vilas-Boas, F. Alves, & A. Marques (Eds.), *Proceedings of the Xth Congress of Biomechanics and Medicine in Swimming* (pp. 66–68). Portuguese: Portuguese Journal of Sports Sciences.

宮下充正. (1970). 水泳の科学: キネシオロジーと指導への応用. 東京: 杏林書院.

文部科学省. (2008). 小学校学習指導要領解説 体育編〈平成 20 年 8 月〉 [大型本]. 栃木: 東洋館出版社.

Nakashima, M. (2009). Simulation Analysis of the Effect of Trunk Undulation on Swimming Performance in Underwater Dolphin Kick of Human. *Journal of Biomechanical Science and Engineering*, 4(1), 94–104. doi:10.1299/jbse.4.94

内藤栄一. (2004). 運動習熟のメカニズム. *臨床スポーツ医学 = The Journal of Clinical Sports Medicine*, 21(9), 1057–1065.

成田建造, 仙石泰雄, 高木英樹, 椿本昇三. (2013). クロール泳における下肢の利用が泳ぎの効率に及ぼす影響. 奥野景介 編, *日本水泳・水中運動学会 2013 年次大会論文集* (pp. 58–59). 埼玉: 日本水泳・水中運動学会.

日本水泳連盟. (2012). 水泳指導教本. 東京: 大修館書店.

- Nicolas, G., Bideau, B., Colobert, B., & Berton, E. (2007, June). How are Strouhal number, drag, and efficiency adjusted in high level underwater monofin-swimming? *Human Movement Science*. doi:10.1016/j.humov.2007.03.002
- 小野田慶一. (2004). 時間知覚の神経生理学的基盤 (特集:行動科学の前線から). *行動科学*, 43(2), 79-88.
- 大杉貴康, 出村慎一, 佐藤進. (2007). 競泳パフォーマンスに関与する技術関連要因の因子構造およびその構成因子の性差および競技力差の検討. *教育医学*, 52(4), 203-211.
- 小塩真司. (2004). SPSS と Amos による心理・調査データ解析—因子分析・共分散構造分析まで [単行本]. 東京: 東京図書.
- Palmer, C. (1997). Music performance. *Annual Review of Psychology*, 48, 115–138.
- Pelayo, P., Alberty, M., Sidney, M., Potdevin, F., & Dekerle, J. (2007). Aerobic potential, stroke parameters, and coordination in swimming front-crawl performance. *International Journal of Sports Physiology and Performance*, 2(4), 347–359.
- Poulton, E. C. (1957). On prediction in skilled movements. *Psychological Bulletin*, 54(6), 467–478. doi:10.1037/h0045515
- Repp, B. H. (2005). Sensorimotor synchronization: a review of the tapping literature. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12(6), 969–992.
- Repp, B. H., & Keller, P. E. (2004). Adaptation to tempo changes in sensorimotor synchronization:

- effects of intention, attention, and awareness. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology. A, Human Experimental Psychology*, 57(3), 499–521.
- Repp, B. H., & Su, Y.-H. (2013). Sensorimotor synchronization: a review of recent research (2006–2012). *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(3), 403–52. doi:10.3758/s13423-012-0371-2
- Rohr, J. J. (2004). Strouhal numbers and optimization of swimming by odontocete cetaceans. *Journal of Experimental Biology*, 207(10), 1633–1642. doi:10.1242/jeb.00948
- Sanders, R. H., & Psycharakis, S. G. (2009). Rolling rhythms in front crawl swimming with six-beat kick. *Journal of Biomechanics*, 42(3), 273–279.
- Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (1999). *Motor control and learning: a behavioral emphasis*. 3rd ed. Champaign, Ill.; United States: Human Kinetics.
- Seifert, L., & Chollet, D. (2009). Modelling spatial–temporal and coordinative parameters in swimming. *Journal of Science and Medicine in Sport*, 12(4), 495–499.
- Seifert, L., Chollet, D., & Allard, P. (2005). Arm coordination symmetry and breathing effect in front crawl. *Human Movement Science*, 24(2), 234.
- Seifert, L., Leblanc, H., Chollet, D., & Delignières, D. (2010, February). Inter-limb coordination in swimming: effect of speed and skill level. *Human Movement Science*. doi:10.1016/j.humov.2009.05.003
- Seifert, L., Toussaint, H. M., Alberty, M., Schnitzler, C., & Chollet, D. (2010). Arm coordination,

power, and swim efficiency in national and regional front crawl swimmers. *Human Movement Science*, 29(3), 426–439.

Seitz, R. J., & Roland, P. E. (1992). Learning of Sequential Finger Movements in Man: A Combined Kinematic and Positron Emission Tomography (PET) Study. *European Journal of Neuroscience*, 4(2), 154–165.

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 (pp. 78-81). 新潟: 新高速印刷株式会社.

スポーツクリエイティブエージェンシー. (online). 日本水泳連盟公認スイムレコードどっとこむ: 2009 年度競技結果: 学生(委): 学生選手権水泳競技大会: 正式結果. Retrieved from <http://www.swim-record.com/taikai/09/48.html>

杉本誠二, 中島求, 市川浩, 三輪飛寛, 武田剛, 野村武男. (2008). シミュレーション解析による水中ドルフィンキック時の足関節底屈角度の増加がパフォーマンスに与える影響. *体育学研究*, 53(1), 51-60.

高木英樹. (2002). 人はどこまで速く泳げるのか. 東京: 岩波書店.

Takagi, H., Nakashima, M., Ozaki, T., & Matsuuchi, K. (2013). Unsteady hydrodynamic forces acting on a robotic hand and its flow field. *Journal of Biomechanics*, 46(11), 1825–32. doi:10.1016/j.jbiomech.2013.05.006

Takeda, T., Ichikawa, H., Takagi, H., & 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.

武田剛, 伊藤秀兵, 奥野景介. (2011). 大学男子競泳選手における水中ドルフィンキックのキネマ

ティクスの特徴. *日本水泳・水中運動学会 2011 年次大会論文集* (pp. 76-79). 日本水泳・

水中運動学会.

Thompson, K. G., MacLaren, D. P., Lees, a, & Atkinson, G. (2003, January). The effect of even,

positive and negative pacing on metabolic, kinematic and temporal variables during breaststroke

swimming. *European Journal of Applied Physiology*. doi:10.1007/s00421-002-0715-0

Thompson, K. G., MacLaren, D. P. M., Lees, A., & Atkinson, G. (2002). Accuracy of pacing during

breaststroke swimming using a novel pacing device, the Aquapacer. *Journal of Sports Sciences*,

20(7), 537–546.

Triantafyllou, G. S., Triantafyllou, M. S., & Grosenbaugh, M. A. (1993). Optimal thrust development

in oscillating foils with application to fish propulsion. *Journal of Fluids and Structures*, 7(2),

205–224. doi:10.1006/jfls.1993.1012

Triantafyllou, M. S., Triantafyllou, G. S., & Gopalkrishnan, R. (1991). Wake mechanics for thrust

generation in oscillating foils. *Physics Of Fluids A Fluid Dynamics*, 3(12), 2835.

doi:10.1063/1.858173

辻新六, 有馬昌宏. (1987). アンケート調査の方法—実践ノウハウとパソコン支援. 東京: 朝倉書

店.

角川隆明, 高木英樹, 仙石泰雄, 椿本昇三. (2012). 平泳ぎ泳パフォーマンスと圧力分布から推定した足部流体力との関係. 体育学研究, 57(2), 515 - 525.

doi:<http://dx.doi.org/10.5432/jjpehss.12003>

Ungerechts, B. E., Daly, D., & Zhu, J. P. (1998). What dolphins tell us about hydrodynamics. Journal of Swimming Research, 13, 1–7. Retrieved from <http://articles.sirc.ca/search.cfm?id=S-166923>

Vance, J., Wulf, G., Töllner, T., McNevin, N., & Mercer, J. (2004). EMG activity as a function of the performer's focus of attention. Journal of Motor Behavior, 36(4), 450–459.

Vercruyssen, F., Boitel, G., Alberty, M., Nesi, X., Bourdon, L., & Brisswalter, J. (2012). Influence of kick frequency on metabolic efficiency and performance at a severe intensity in international monofin-swimmers. Journal of Sports Sciences. doi:10.1080/02640414.2012.690072

Von Loebbecke, A., Mittal, R., Fish, F., & Mark, R. (2009). A comparison of the kinematics of the dolphin kick in humans and cetaceans. Human Movement Science, 28(1), 99–112. doi:10.1016/j.humov.2008.07.005

Von Loebbecke, A., Mittal, R., Mark, R., & Hahn, J. (2009). A computational method for analysis of underwater dolphin kick hydrodynamics in human swimming. Sports Biomechanics / International Society of Biomechanics in Sports, 8(1), 60–77.

Vorontsov, A. R., & Rumyantsev, V. A. (2000). Propulsive Forces in Swimming. In V. M. Zatsiorsky

(Ed.), *Biomechanics in Sport: Performance Enhancement and Injury Prevention* (pp. 205–231).

Oxford: Blackwell Science Ltd.

Wang, L., & Hart, M. A. (2005). Influence of Auditory Modeling on Learning a Swimming Skill.

Perceptual & Motor Skills, 100(3), 640–648.

Webb, P. W., & Kostecki, P. T. (1984). The effect of size and swimming speed on locomotor kinematics

of rainbow trout. *Journal of Experimental Biology*, 109, 77–95.

Willems, T. M., Cornelis, J. A. M., De Deurwaerder, L. E. P., Roelandt, F., & De Mits, S. (2014). The

effect of ankle muscle strength and flexibility on dolphin kick performance in competitive

swimmers. *Human Movement Science*, 36C, 167–176. doi:10.1016/j.humov.2014.05.004

Wulf, G. (2010). 注意と運動学習—動きを変える意識の使い方. (福永哲夫, 水藤健, 沼尾拓 編).

東京: 市村出版.

Wulf, G. (2012). Attentional focus and motor learning: a review of 15 years. *International Review of*

Sport and Exercise Psychology, 1–28. doi:10.1080/1750984X.2012.723728

Wulf, G., Höß, M., & Prinz, W. (1998). Instructions for Motor Learning: Differential Effects of Internal

Versus External Focus of Attention. *Journal of Motor Behavior*, 30(2), 169–179.

doi:10.1080/00222899809601334

Wulf, G., McNevin, N., & Shea, C. H. (2001). The automaticity of complex motor skill learning as a

function of attentional focus. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 54(4), 1143–1154.

- Zachry, T., Wulf, G., Mercer, J., & Bezodis, N. (2005). Increased movement accuracy and reduced EMG activity as the result of adopting an external focus of attention. *Brain Research Bulletin*, 67(4), 304–309.
- Zamparo, P., Pendergast, D. R., Termin, B., & Minetti, A. E. (2002). How fins affect the economy and efficiency of human swimming. *Journal of Experimental Biology*, 205(Pt 17), 2665–2676.
- Zamparo, P., Pendergast, D., Termin, A., & Minetti, A. (2006). Economy and efficiency of swimming at the surface with fins of different size and stiffness. *European Journal of Applied Physiology*, 96(4), 459–470.
- Zamparo, P., Vicentini, M., Scattolini, A., Rigamonti, M., & Bonifazi, M. (2012, October). The contribution of underwater kicking efficiency in determining “turning performance” in front crawl swimming. *The Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*.

謝辞

本研究の完成に至るまでには、多くの方々にご指導、ご支援、ならびにご協力を頂きました。この場を借りて謝辞を申し上げます。

まず、師である高木英樹先生からは研究遂行に関わること、それ以外でも多くのことをご指導いただきました。また中込四郎先生と仙石泰雄先生、システム情報工学研究科の松田昭博先生、体育心理学の吉田茂先生には研究に関して多くの助言をいただきました。心より感謝申し上げます。

さらに、博士論文の執筆にあたっていくつもの実験に協力していただいた筑波大学水泳部の選手およびスタッフの皆様にも感謝申し上げます。また、アンケート調査でご協力いただいた鹿屋体育大学、日本大学、大阪教育大学、福岡大学、国土館大学、東海大学、早稲田大学、日本女子体育大学、国際武道大学、新潟大学、岡山大学、中京大学、新潟医療福祉大学、びわこ成蹊スポーツ大学の水泳部の選手並びにスタッフの皆様に感謝申し上げます。

水泳研究室の野村武男先生、椿本昇三先生、本間三和子先生からは多くの叱咤激励をいただきました。時に厳しく時に優しく、しっかりやりなさいと笑顔で見守り、支えていただけたことで研究を続けることができました。ここにお礼申し上げます。

博士論文を進めるにあたり壁に当たることもありましたが、その時には研究室の OB・OG、後輩を含めた仲間達に何度も救われました。支えとなり、力を分け与えてもらわなければ一人では決して成し得なかったと思います。頼もしい仲間達にも感謝申し上げます。

故郷の沖縄から、筑波大学への進学さらに博士論文に挑戦するきっかけを与えていただいた琉球大学の三輪一義先生、そしてサポートしてくれた家族、先祖にも感謝いたします。

2015 年 2 月

下門 洋文