

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月20日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21300228

研究課題名（和文） 水泳における新推進理論の確立に向けて～準定常理論からの脱却

研究課題名（英文） A New Development of Propulsive Force Generation in Swimming: Breakthrough from Quasi-Steady Theory

## 研究代表者

松内 一雄 (MATSUUCHI KAZUO)

筑波大学・大学院システム情報系

研究者番号：70111367

## 研究成果の概要（和文）：

水泳の推進力の評価を流れが定常であるとのこれまでの理論から脱却し、非定常性の重要性を正しく把握するために時間的に変化する流れ場を計測した。そのために PIV(粒子画像速度計測)をこの流れ場に適用した。力の時間変化の源を探るため、動作分析との同時計測が可能な計測法を開発した。実験は実際の泳者を対象としたものと、データの再現性と力計測の容易な風洞を用いたモデルによるものも行ない、非定常力の発生が渦の生成と移動によることが明らかになった。

## 研究成果の概要（英文）：

To know the effect of unsteadiness on the estimation of propulsive force, we measured the time varying flow fields around a hand. PIV (Particle Imaging Velocimetry) covering a wide range of flow fields was developed to the measurements. The visualization technique combined with motion analysis was applied to obtain an understanding of the mechanism of force generation. It was found that the generation and shedding of vortices play an important role in the generation.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	5,600,000	1,680,000	7,280,000
年度			
年度			
総計	7,900,000	2,370,000	10,270,000

研究分野：流体力学

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学、スポーツ科学

キーワード：水泳、推進力、準定常理論、PIV、渦、運動量

## 1. 研究開始当初の背景

これまで水泳における推進力の推定は唯一準定常理論に基づきなされてきた。この研究の目的は、この理論の持つ矛盾を最新の実験技術を用いて証明し、非定常理論に基づき新しい推進理論を構築することである。

水泳における推進力発生の解明に向け実に多くの努力が払われてきた。これらの研究の理論的に基礎になるのが「流れは時間的に変化しない—しかも大きな変化ではない」という仮定であった。この仮定のもとに成立しているのが準定常理論と呼ばれる時間的に

変化しない流れを前提とする理論である。この理論によれば、推進力を最大に発揮するのは手や足の速さであり、速度の二乗に比例した力が働く。この理論によれば、筋力をつけ手の掻きや足の蹴りの速度を上げることで速く泳げるはずである。しかし、泳者の手や足の運動は単純ではない。熟達した泳者はかなり複雑に手を変化させており、流れが時間的に変化しないと考えるのはかなり無理がある。さらに手のひらの角度の変化は急激でむしろ非定常な流れを強制的に作り出しているように見える。

## 2. 研究の目的

非定常性の重要性については航空分野、昆虫鳥など生物の飛翔の問題で指摘されている。この非定常性に渦の発生、移動が決定的な役割を演じていることが明らかになっている。

非定常理論の見地からは、昆虫等が行っているように、渦の生成と放出を利用していると考えられる。「トップスイマーは渦を効果的に作り出し、これによる運動量の変化で推進力を得ている」と考えられる。渦を効果的に制御するためには手のひらの角度も含め複雑に手を動かす必要がある。この操作は特定の局面で行っており、この局面での速度は必ずしも大きくはない。

このように力の働く局面は、流れが定常か非定常かによってまったく変わってくる。われわれの目標は手による渦の発生と放出といった現象を流れの可視化によって確認し、実際に大きな力が生み出されているのはどの局面かを明確にすることである。

非定常性の役割が明確になるとこれまでの定常理論を基礎にしたコーチングにも大きなインパクトを与える可能性が大きい。

## 3. 研究の方法

目的は一つであるが、これを達成するために実験を大きく二つに分けて遂行する。主となるのは流水プールを用いた泳者を対象とする実験(I)であり、もう一つはこれを補完するための風洞実験(II)である。

非定常流れ場を見る洗練された手段はPIV(粒子画像流速測定法)と呼ばれているレーザーを用いた方法である。一平面の二次元データから速度成分を計測する2CPIVと一平面の速度3成分を求める3CPIVの2つの計測方法を流水プールと風洞実験の両方で用いる。

## 4. 研究成果

まず、プールを使った実験(I)について報告する。被験者を筑波大学水泳部の現役選手9名にお願いした。実験に用いたプールは回流式の水槽で観測者に対しては静止を保

つように指示し実験を行なった(図1)。座標系は図のように流れ方向をx-軸とする右手系である。次に下から見た被験者を図2に示す。この水平面(x-y平面)で注目している領域を矩形で囲っており、高速度カメラで手の運動を捉えることができる。レーザーはこの面に垂直に当てた。

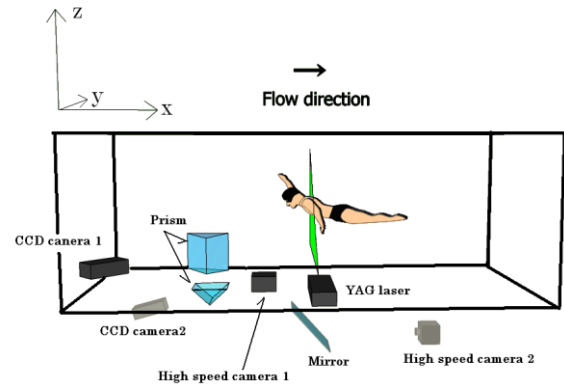


図1 実験装置の概略

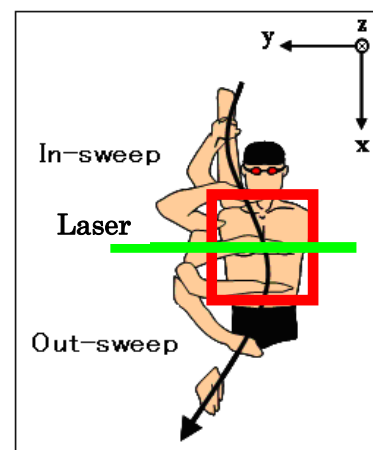
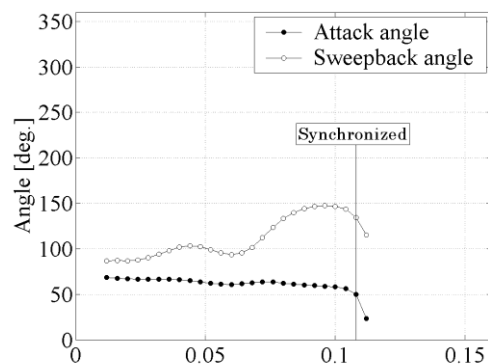
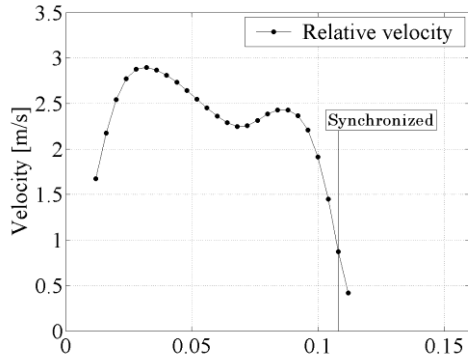


図2 ストロークと測定範囲

ストローク中の手の軌跡から9人の被験者のストロークをS字プルとストレートプルに分けることができた。

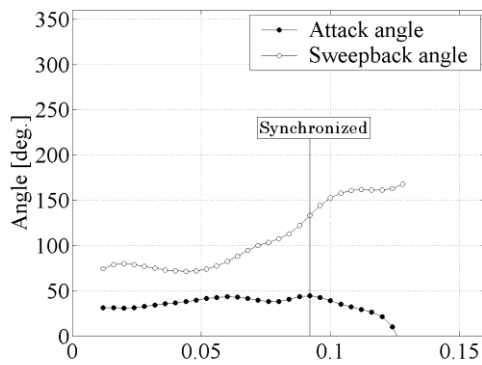


(a) 迎え角と流入角

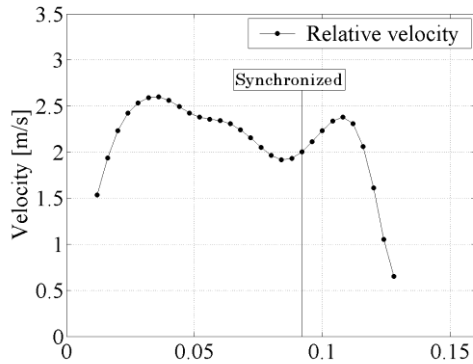


(b) 相対速度

図3 手のひらの変化(ストレートプルの場合、被験者2、流速 1.2 [m/s])



(a) 迎え角と流入角



(b) 相対速度

図4 手のひらの変化(S字プルの場合、被験者9、流速 1.2 [m/s])

手のひらが水に対してどのような運動するかを見るために、手のひらに当たる水の向き(迎え角、流入角)、水に対する手の速度の変化をストレートプルとS字プルに対して、それぞれ、図3、4に示す。撮影領域内に手部が入った時刻を  $t=0$  [s]として 0.008 [s] 毎の変化が示されている。高速度カメラによる動作分析の結果である。両プルの比較から基本的には大きな違いは見つけることができなかった。共通していることはこの測定範

囲で迎え角がほぼ一定であること、流入角は増加傾向にあることが分かる。さらに、相対速度については2つのピークを持つことが分かった。

次に流れ場の変化であるが、同期条件とPIVのレーザー発振の制約から 0.068 [s]がデータ取得間隔となる。このPIVによるデータ取得のタイミングは前図にも記されている。

レーザーは  $y-z$  平面に平行に照射しこの平面で速度3成分を計測した(3CPIV)。カラーバーは速度の  $x$  成分を示している。ただし、主流速度は考慮していない。両図から流れの巻き込みとその先に  $x$ -軸方向の流れが誘起されているのが分かる。これらは、レーザー面を手が通り過ぎてからの速度場でこれらの時刻におけるおおよその手の位置を楕円で示す。

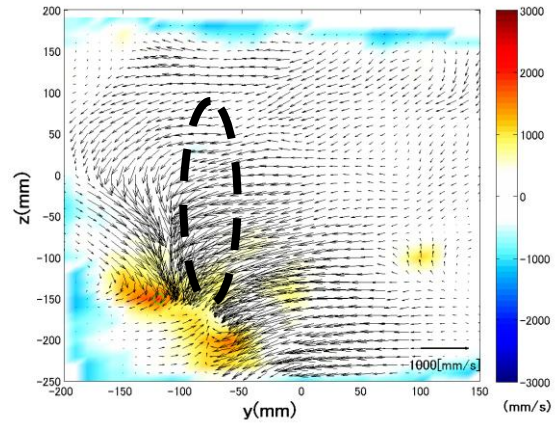


図5  $y-z$  平面における速度ベクトルと主流方向速度成分(条件は図3に対応)

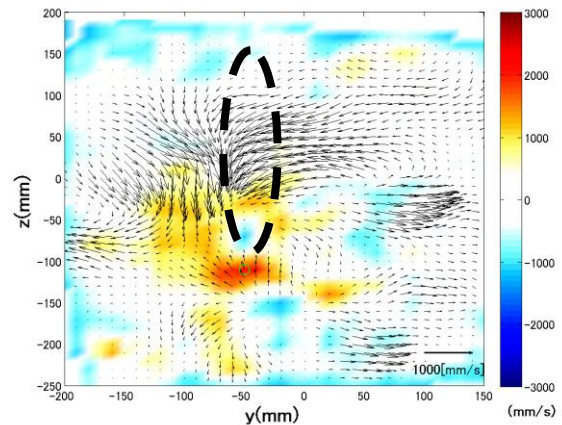


図6  $y-z$  平面における速度ベクトルと主流方向速度成分(条件は図4に対応)

以上をまとめる。

- 3CPIV と動作分析の同期システムを用いることにより、クロール泳者の3次元的な手部動作と流れ場の様子を時間的に対

応付けることができた。

- ・ 複数の被験者を採用することによりクロール泳者の手部動作と流れ場の共通した傾向を把握することができた。

さらに手部動作と流れ場についてまとめる。手部については

- (1) 手部の流水に対する相対速度は2つのピークを持つ
- (2) 迎角は遷移過程でほぼ変化しない
- (3) 流入角は大きく変化させている

流れ場については

- (1) 手部後流に強いジェット流の発生が確認された
- (2) ジェット流の位置に向かって撮影平面内の周囲流体の流れ込みがみられた

となる。

次に風洞実験 (II) の結果について述べる。模型は手のひらを単純化した円盤翼を用いる。二種類の実験を行った。一つは非定常の効果が最も単純な形で現れる通常 Wagner 問題と呼ばれているもので迎角をゼロから急激に有限の大きさに変える時に起こる力の変化を見るもの (IIa) で、他の一つは周期運動による渦の生成と離脱が力の変化に及ぼす影響を見たものである (IIb)。

まず、Wagner 効果 (IIa) について述べる。揚力係数  $C_L$  の実験結果を図 7 に示す。横軸は無次元時間である。実線が動的に迎角  $\alpha$  を変化させた場合であり、破線が静的に変化させた場合である。  $T^*$  は無次元の立ち上がり時間であり、この値が小さいほど非定常効果は大きくなる。

図から分かるように静的な変化に比べてはるかに揚力係数は大きくなっており失速角を越えてもすぐには小さくならない特徴を持つ。

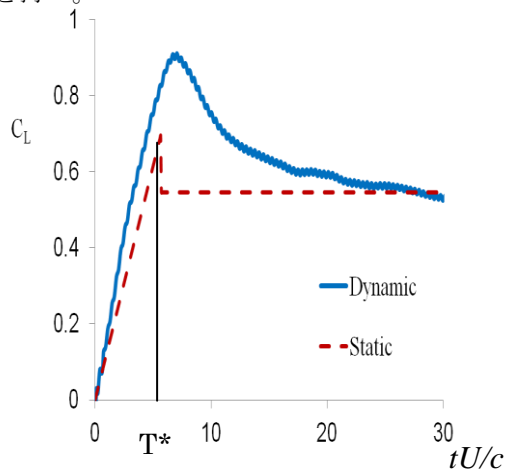


図 7 迎え角の時間変化 ( $\alpha=36$  [deg],  $Re=3.0 \times 10^4$ ,  $T^*=5.1$ )

次に、3CPIV によって測定した渦度の  $y$  方向成分の 3 次元分布を図 8 に示す。渦度は  $\pm 10$  の等値面を描いている。この図から分かるのははく離が側面から起こり、はく離が翼中央に達するまでには時間がかかっていることが分かる。

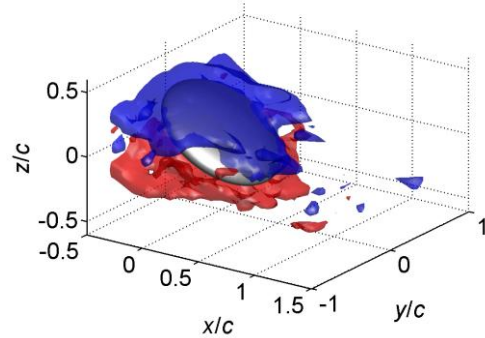


図 8 渦度  $\omega_y$  の 3 次元構造 ( $tU_0/c=6.96$ )

以上の結果をまとめると以下のようなになる。

- (1) 流体力測定の結果から  $T^*$  を小さくすることで、失速遅れや最大揚力係数の上昇、失速後の揚力のなだらかな低下が起こる。
- (2) 2CPIV の結果から、翼上面の流れの剥離が遅れ、この剥離はスパン方向から翼中心に向かって進む。この剥離の様子の違いが失速後の揚力のなだらかな低下の原因である。
- (3) 複数断面でのステレオ PIV の結果から、翼周りの三次元渦構造を可視化した。  $\omega_y$  の結果から、より実際に近い剥離の様子が捕らえられた。

次に翼の周期振動 (IIB) の結果を述べる。図 9 に抗力 (抗力係数  $c_D$ ) の時間変化を変動の一周期について描いてある。

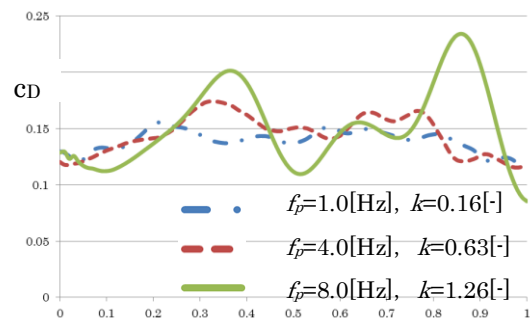


図 9 抗力の 1 変動周期にわたる変化 (1 周期)

が1になるように規格化)

この図で  $k$  は無次元周波数と呼ばれている無次元量であり、この値が大きいほど非定常の度合いが強い。この図から分かるように一番無次元周波数が小さい場合を除き、1周期に2つのピークを持っていること、及び、無次元周波数が大きくなるほど抗力係数は大きく変動していることが分かる。

次に、前の図で無次元周波数が一番大きな場合における  $t' = 0.48$  の時刻での3次元渦構造を図10に示す。無次元の渦度が15の場合の等値面で描いてある。渦の形を見やすくするために渦の概形を実線で示している。この図から分かるように翼形の中央でははく離していないが、両端ではく離している。

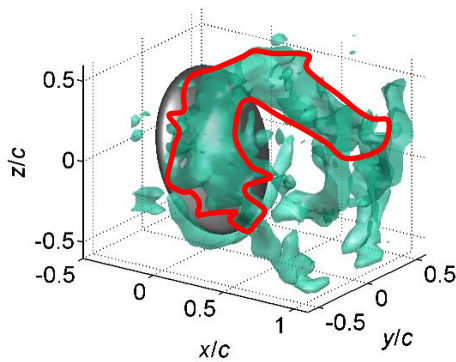


図10 はく離渦の3次元構造

三次元振動翼を対象として、ピッチング運動により発生する非定常抗力の計測、および、2CPIV・ステレオ PIV による流れ場の可視化を行った結果、以下のような知見を得た。

まとめると、

(1) ロードセルによる非定常抗力の計測  
無次元周波数の値が高くなるほど、抗力のピーク値及び変動が大きくなる。

(2) 2CPIV による  $x$ - $z$  平面の可視化計測  
無次元周波数の値の違いにより、生成される渦の強さ、放出タイミングなどが変わる。

となる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① 三輪飛寛、鎌田依利、松内一雄、榊原潤、野村武男、PIV による水泳スカーリング動作時手部周り流れ場の可視化— 推進メカニズムの解明に向けて、可視化情報

学会論文集、Vol. 31、No. 8(2011年8月) p. 33-41、査読有

- ② H. Hasegawa, J. Watanabe, and K. Matsuuchi, Effect of 3-Dimensional Airfoil Shape on Unsteady Fluid Force in Pitching Motion, Journal of Fluid Science and Technology, Vol. 5, No. 2, 2010, p. 270-280、査読有
- ③ 高木英樹、尾崎尚、中島求、松内一雄、ロボットアームを用いた水泳動作時の力と流れ場に関する分析、筑波大学体育科学系紀要 33 巻, 2010, 243-247、査読無
- ④ 長谷川裕晃、三瀬陽、松内一雄、泳者の手を模擬した三次元振動翼における渦の生成とその挙動、ながれ、29 巻、5 号、2010, p. 373-382、査読有

[学会発表] (計 17 件)

- ① Y. Ubukata, H. Hasegawa, and K. Matsuuchi, Stereo PIV measurements of the vortical field around three-dimensional airfoil oscillating at high reduced frequency, Flucome 2011, 2011年11月7日、National Taiwan Ocean University, Keelung (Taiwan)
- ② K. Kimoto and K. Matsuuchi, Flow visualization around a hand in flat scull, Flucome 2011, 2011年11月7日、National Taiwan Ocean University, Keelung (Taiwan)
- ③ T. Shimakawa, H. Hasegawa, and K. Matsuuchi, Stereo PIV measurements of the vortical field around three-dimensional airfoil oscillating at high reduced frequency, Flucome 2011, 2011年11月6日、National Taiwan Ocean University, Keelung (Taiwan)
- ④ 今村尚人、松内一雄、ヒレ型振動翼後流の三次元渦構造の可視化、2011年8月26日、茨城大学、日立キャンパス(茨城県)
- ⑤ N. Imamura and K. Matsuuchi, Visualization of the Three-dimensional Vortex Structure in the Wake of an Oscillating Wing of a Fin Type, 9th International Symposium on Particle Image Velocimetry, 2011年7月22日、Kobe University, Kobe (Japan)
- ⑥ K. Matsuuchi, Some remarks on the active drag in swimming: An approach using simplified model, 16th Annual Congress of the ECSS, 2011年7月9日、Liverpool (UK)
- ⑦ 松内一雄、渦の運動に伴う非定常流体力の発生、2011年3月5日、第48期総会・講演会、信州大学(長野県)
- ⑧ 島川達也、長谷川裕晃、松内一雄、3次

- 元翼の急激な迎角変化に非定常流体特性、2010年10月31日、第88期流体工学部門講演会、山形大学工学部(山形県)
- ⑨ 三輪飛寛、松内一雄、榊原潤、高木英樹、水泳スカーリング動作の推進メカニズムに関する一考察、2010年10月8日、可視化情報学会全国講演会、霧島市国分シビックセンター(鹿児島県)
- ⑩ 加藤拓馬、松内一雄、PIVと動作分析法の同期システムによるクロール泳者の手部動作と流れ場の相関評価、2010年8月27日(金)、日本機械学会関東支部第18回茨城講演会、茨城大学水戸キャンパス(茨城県)
- ⑪ T. Miwa, S. Shimada, H. Ichikawa, H. Takagi, K. Matsuuchi, J. Sakakibara, and S. Tsubakimoto, Characteristics of Pressure Distribution and Flow Patterns around the Hand during Sculling Motion, XIth International Symposium of Biomechanics and Medicine in Swimming, June 19, 2010, Oslo (Norway)
- ⑫ 三瀬陽、長谷川裕晃、松内一雄、3次元振動翼による渦の生成メカニズム(推進力における非定常流体力の解明)、第87期流体工学部門講演会、2009年11月8日、名古屋工業大学(愛知県)
- ⑬ 尾崎尚、高木英樹、中島求、松内一雄、ロボットアームによるクロール時の力と流れ場の解析、第87期流体工学部門講演会、2009年11月7日、名古屋工業大学(愛知県)
- ⑭ 中川健一、長谷川裕晃、三瀬陽、松内一雄、三次元振動翼後方での渦の挙動の可視化、日本機械学会茨城講演会、2009年8月25日、筑波大学筑波キャンパス(茨城県)
- ⑮ 三瀬陽、長谷川裕晃、松内一雄、泳者の手を模擬した円盤翼からの放出渦の動的挙動、日本機械学会茨城講演会、2009年8月25日、筑波大学筑波キャンパス(茨城県)
- ⑯ K. Matsuuchi, A simulation of time delay between acceleration and added force, XXIIInd Congress of International Society of Biomechanics, 5-9 July 2009, Cape Town (South Africa)
- ⑰ T. Ozaki, K. Matsuuchi, H. Takagi, M. Nakashima, Propulsive force acting on a robot arm and its flow field, XXIIInd Congress of International Society of Biomechanics, 5-9 July 2009, Cape Town (South Africa)

[図書] (計3件)

- ① Kazuo Matsuuchi and Yuki Muramatsu, Investigation of the Unsteady Mechanism in the Generation of Propulsive Force While Swimming Using a Synchronized Flow Visualization and Motion Analysis System, Biomechanics in Application, Chap.17, InTech Book, 2011, pp.389-408
- ② Kazuo Matsuuchi, Toward a Better Understanding on the Role of Unsteadiness in Swimming Propulsion - by Means of PIV, Biomechanics and Medicine in Swimming XI - Supplement, 2010, S6-S11
- ③ 松内一雄、渦の形成とPIV法を用いたクロール泳中の渦の可視化、水泳パフォーマンスの最新理論、2009、筑波大学出版会、総ページ数6

[その他]

大学院招待講義

松内一雄、水泳のバイオメカニクス～水泳における推進のメカニズムは理解できているのか?、第1回情報科学研究科セミナー、2011年5月10日、北陸先端科学技術大学院、石川県

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

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

### (2) 研究分担者

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

榊原 潤 (SAKAKIBARA JUN)  
筑波大学・大学院システム情報系・准教授  
研究者番号：10292533

長谷川 裕晃 (HASEGAWA HIROAKI)  
秋田大学・工学資源学部・准教授  
研究者番号：90344770