

機関番号：12102

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20300207

研究課題名 (和文) 先端的スポーツ流体科学・工学の基盤創生と展開研究

研究課題名 (英文) A fundamental and applied study on fluid science and engineering for sports

研究代表者

浅井 武 (ASAI TAKESHI)

筑波大学・大学院人間総合科学研究科・教授

研究者番号：00167868

研究成果の概要 (和文)：本研究では、先端的スポーツ流体科学・工学の基盤創生と展開研究の一環として、実際にキックされたナックルボールに対して、高速度ビデオカメラと発煙物質を用いて可視化し、渦放出の動態について検討した。その結果、飛翔するボールに働く横力と揚力の周波数と、大規模渦構造における渦振動の周波数に高い相関がみられた ( $r = 0.94, p < 0.01$ )。これらのことから、大規模渦構造における渦振動がナックルボールの不規則な変化を引き起こす大きな原因の一つになっていると考えられた。

研究成果の概要 (英文)：In this study, to analyze the knuckling effect of a soccer ball in actual flight, the characteristics of the unsteady wake structure were experimentally investigated by using high-speed video images and a smoke-generating agent. The experimental data indicate that the frequency of fluctuation of lift and side forces and the frequency of wake oscillation are closely related to each other with a statistically high correlation ( $r = 0.94, p < 0.01$ ). From these results, the present study concludes that the phenomenon of large-scale vortex undulation in the wake is caused by the unsteady characteristics of the lift and side forces acting on a knuckleball, which might be related with the extraordinary instability in the separation of boundary layers.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2009年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
総計	8,000,000	2,400,000	10,400,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・スポーツバイオメカニクス

キーワード：流体, ボール, 空力, 抵抗

## 1. 研究開始当初の背景

(1) オリンピックや世界大会等のトップレベルの国際大会では、全体のパフォーマンスの 1/1000 以下の僅かな差でメダルの色や順位が決定している。これに関連して、従来、あまり取り上げられてこなかったスポーツ技術やスポーツ用具の、流体特性、空力特性に関する問題が、世界的にクローズアップさ

れてきている。

(2) これまで、スポーツ科学、スポーツ工学分野における空力特性などの流体に関する研究は、スキージャンプやゴルフボール等の一部の分野において散発的に行なわれてきた。その原因として、スポーツ技術や運動解析向きの低乱風洞が日本に数少ないこと、実験解析できる研究者がスポーツ関係者に

少ないこと、数値流体解析では計算できる分野が限られていたこと等があげられる。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究では、「スポーツ流体科学・工学」という学際的先端領域の研究開発基盤、手法を、最先端の科学、工学的研究手法を駆使して、理論、実験、数値解析のアプローチから検討、構築する。

(2) 新しい次世代のスポーツボール、スポーツ用具の流体特性、工学特性を検討し、新たなトレーニング法や技術の開発に結び付けようとする。

## 3. 研究の方法

(1) 低速低乱風洞を用いた実験手法により、サッカーボールの基礎的流体特性における抗力特性や揚力不安定性について分析する。

(2) ラージエディシミュレーション (LES) 手法を用いた数値流体解析により、サッカーボールの基礎的流体特性における抗力特性や揚力不安定性について分析する。

(3) 新型バレーボールの基礎的流体特性における抗力特性や飛翔軌跡について、低速低乱風洞やボール射出装置を用いた実験手法により分析する。

(4) ボール流体特性を踏まえた新たなナックルショット技術を、高速ビデオカメラや3次元モーションキャプチャシステムを用いて分析、開発する。

## 4. 研究成果

### (1) サッカーボールの基礎的流体特性

ボールをインパクトした直後の渦動態をみると、インパクト直後に線対称的なドーナツ状の渦リングとその中央からジェット状の噴流が観察された。しかし、その渦構造はすぐさま変形、崩壊し、非対称で歪んだ渦リングの放出に発達していくようであった。歪んだ渦リングが連続的に放出されるが、時間が経過するに従って変形、移動、合体し、不安定な構造を示していた。種子田 (1988) は、 $Re=400000$  における平滑球出発渦に関して剥離流の巻き込みとジェット状の噴流を示しており、サッカーボールでも類似の渦構造が生起していると考えられた。種子田はこの出発渦構造が比較的安定するのに、 $x/d$  ( $x$ : 距離,  $d$ : 球の直径) の指標で 51.4 となることを報告している。しかし、サッカーボールの場合、線対称的な出発渦が崩壊した後、比較的、安定して歪んだ渦リングが放出されている傾向がみられ、サッカーボールの後流渦構造が安定する  $x/d$  は、平滑球より小さいように思われた。

平滑球後流の渦構造について、 $Re=24000$  では、交番型の渦構造がみられ、後流は波長が直径の約 4.5 倍の進行波運動をしていることが報告されている。また、 $Re=600000$  では、後流が互いに逆方向に回転する 2 本の縦渦を形成し、遠い下流まで構造を変えないこと、後流が球の対称軸から外れて存在すること等を示している。 $Re=380000$  におけるサッカーボールの場合、超臨界領域であるにも関わらず、平滑球のような直線的な後流構造ではなく、平滑球の亜臨界領域と超臨界領域の中間的構造を示していると思われた。

ナックルボールの飛翔軌跡より、やや離れた大きな画角での大規模渦構造をみると、後流の歪んだ渦リング放出とは異なる、約 1~3 Hz の大規模な渦構造の振動 (うねり) が観察された (図 1)。これは、平滑球のストローハル数におけるハイモード、及びローモードとは異なる、より低い周波数であると推定され、この大規模構造の振動がナックルボールの不規則な変化を引き起こす大きな原因の一つになっていると考えられた。そして、この大規模構造の振動は、出発渦の形成、変形、崩壊が励起している可能性があり、その点からも、非定常的分析が必要であると考えられる。

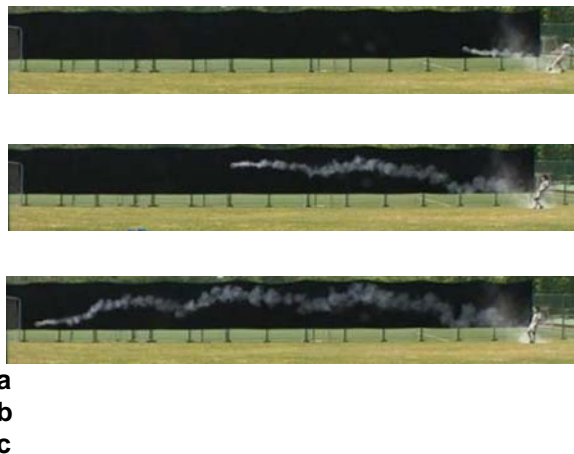
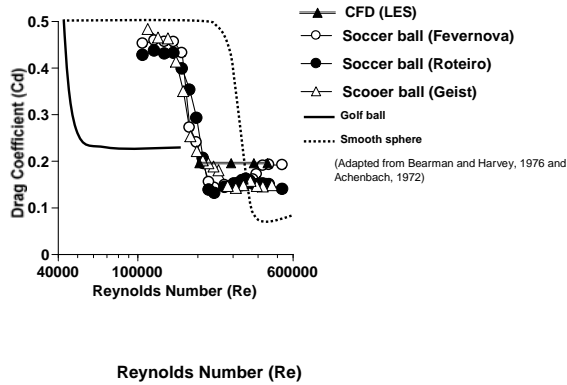


図 1 ナックルショットにおけるラージスケールの渦振動。

### (2) サッカーボールの数値流体解析

本研究の抗力係数、揚力係数の時系列データをみると、計算初期に不安定な時期がみられ、その後、安定する傾向が見られた。また、モーメントは細かく振動しているものの、その値は小さく、ほとんど無視できる範囲と考えられた。したがって、本研究では、計算開始 0.2 秒後から 0.4 秒後までの 0.2 秒間の平均の値を、そのケースの抗力係数とした。

本研究の CFD における抗力係数は、15～30 m/s のいずれのケースにおいても、約 0.19 であるのに対して、風洞実験における 32 枚パネルタイプのボールは、約 0.15 であり、風洞実験値より、やや大きな値を示す傾向がみられた。



また、レイノルズ数の変化に対する CFD の抗力係数の変動は小さく、32 枚パネルタイプボールの風洞実験と同様の変動傾向を示した。CFD における超臨界領域のボール周りの流速分布をみると、境界層の剥離点が前方岐点より約 120 deg. 程度となっており、可視化実験映像と同様の傾向を示した。

CFD における揚力係数をみると、抗力係数の値が安定し始める 0.1 s あたりから、最大 0.1 程度の不規則な変動がみられた。この傾向は全てのケースで見られ、詳細は不明であるが、後流の渦構造と関係があるのではないかと考えられる。CFD における渦構造をボール周りの渦度表示でみると、可視化実験映像と同様に、後流領域の縮小が観察される。全体の印象は類似しているものの、スモールスケールの渦が似ているかどうかは、判断不明である (図 3)。また、ボールからやや離れた地点までの流れの傾向をパスライン表示でみると、ボール直後の渦は観察されるが、やや離れた後方の流れの乱れは少なくなっていた (図 4)。実際の可視化実験映像では、ヘアピン型の渦 (Vortex loop) を含め非対称な渦構造を示す場合が多く、本研究の CFD は、早期に渦が散逸しているように思われた。この原因の詳細は不明であるが、本研究で用いた LES モデルが、エネルギーの逆輸送 (逆カスケード) を表現できない等が、原因の一つになっている可能性がある。これらのことから、本研究における LES 解析は、抗力係数、剥離点のラフな予測に用いることは可能であるが、ボール後流の渦構造、特に離れた場所での予測は、困難であると考えられる。

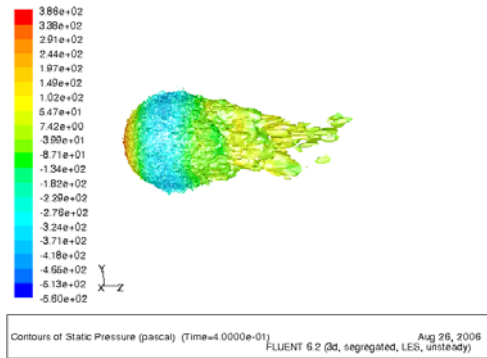


図 3 サッカーボール回りの渦度分布。

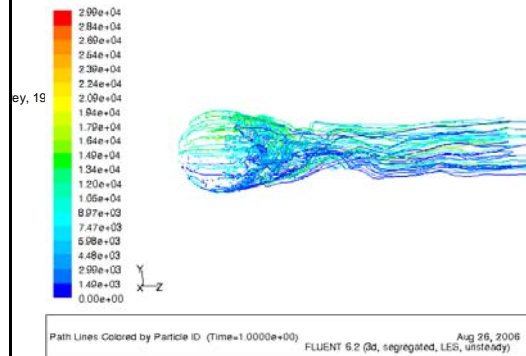


図 4 サッカーボール回りのパスライン。

### (3) 新型バレーボールの基礎的流体特性

従来のバレーボール (molten MTV5SLIT) の臨界レイノルズ数は、約 270,000 であったのに対して、新型バレーボール (honeycomb type: molten V5M5000) の臨界レイノルズ数は、約 220,000 となっていた (図 5)。

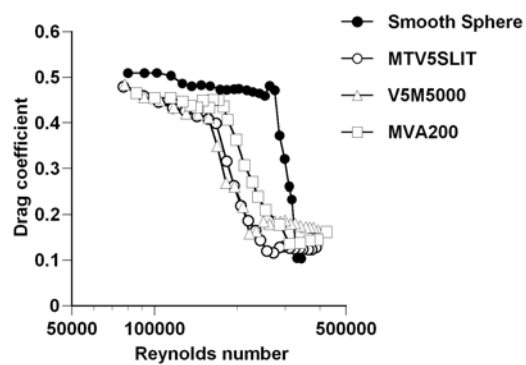


図 5 従来型バレーボールと新型バレーボールの抗力特性。

新型バレーボールの超臨界時における抗力係数は約 0.17 であり、従来型バレーボールの約 0.1 より、大きな値となっていた (図 6)。この原因の一つとして、新型バレーボールのボールパネル表面のハニカム状デザインが、ボールのラフネスを増大させていることが考えられる。新型バレーボールと従来型バレーボールの飛行軌跡における安定性

を、ボール射出装置を用いた着弾点の偏差で検討すると、新型バレーボールの方が従来型バレーボールより、偏差が小さい傾向を示した(図7)。これらのことから、ボール表面のラフネスの増大が、ボール飛翔時の揚力不安定性を減少させる可能性が示唆された。

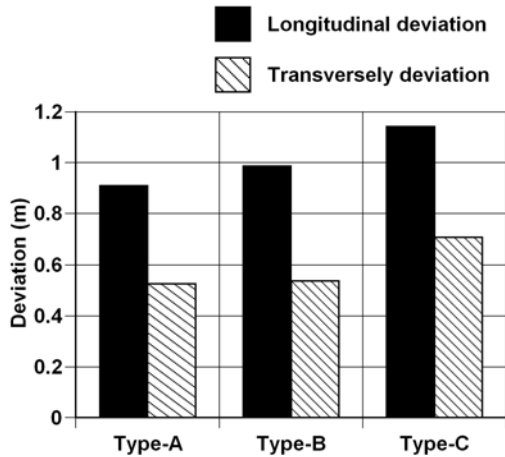


図6 新型バレーボール (Type-A) と従来型バレーボール (Type-B) の飛翔着弾点における偏差の比較.

#### (4) 新たなナックルショット技術の分析

図7は、ボールインパクト時における足首関節の移動軌跡例を頭頂 (top view) と側面 (side view) から示したものである。頭頂図 (a) をみると、Straight shot と Knuckling shot の変位の移動方向は、ややスイングの内側に曲がるものの、ほぼ一致しているのに対して、Curve shot の場合は、大きく外側に移動していることが分かる。また、その際の移動変位は、Straight shot が 0.4 cm、Knuckling shot が 0.06 cm であるのに対して、Curve shot は 5 cm と大きな値を示していた。さらに、側面図 (b) をみると、Knuckling shot と Curve shot は、やや上側に移動しているのに対して、Straight shot は下側に移動していることが分かる。

図8は、ボールインパクト時における足首関節の Lateral velocity (a) と Horizontal velocity (b) 例を示したものである。Lateral velocity (a) では、Curve shot の減速が他の shot と比較して大きくなっていった。また、Horizontal velocity (b) では、Straight shot の減速が他の shot と比較して大きくなっていった。Knuckling shot は、Lateral velocity (a) では Straight shot に近い傾向を示し、Horizontal velocity (b) では、Curve shot に近い傾向を示した。そして、他の被験者も同様の傾向を示した。

これらのことから、Knuckling shot におけるボールインパクト時の足首関節運動は、他の shot より、並進運動を主体とした運動になっ

ていると考えられる。

図9は、Straight shot (a)、Knuckling shot (b)、及び Curve shot (c)における Face vector と Swing vector、及びその迎え角例を示したものである。Knuckling shot の迎え角は、約 4 deg. となっており、Straight shot の約 19 deg. と Curve shot の約 35 deg. より小さな値を示した。この迎え角は、ボールとの接触面において回転方向の力を生み出すことに関係していると考えられる(Asai et al., 2005)。これらのことから、Knuckling shot の迎え角が、他の shot と比較して小さくなっていることは、回転数の少ないボールを生み出す原因の一つになっていると考えられる。

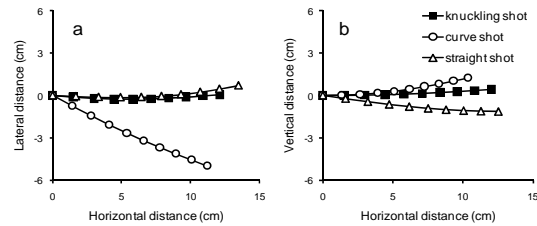


図7 ナックルショット、ストレートショット、カーブショットにおける足関節の移動軌跡.

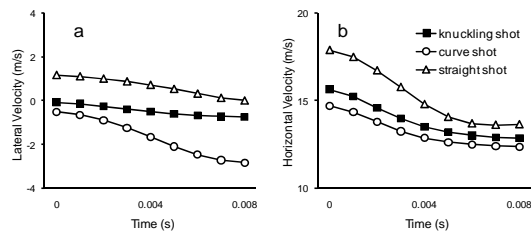


図8 ナックルショット、ストレートショット、カーブショットにおける足関節の速度.

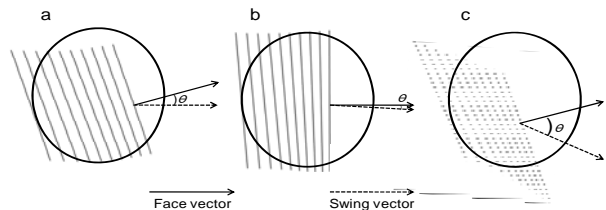


図9 ストレートショット (a)、ナックルショット (b)、カーブショット (c) におけるフェースベクトルとスイングベクトルのなす迎角.

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 29 件)

1) Asai, T. & Kamemoto, K. (2010) Flow structure of knuckling effect in Football, IUTAM Symposium on Bluff Body Wakes and Vortex-induced Vibration (BBVIV-6), *IUTAM*, 31-34. 査読有

2) Leeds, A., Asai, T., Andersen, T. B., Nunome, H. and Sterzing, T. (2010) The biomechanics of kicking in soccer: A review, *Journal of Sports Sciences*, 28(8), 805-817. 査読有

3) Asai, T., Ito, S., Seo, K., Hitotsubashi A. (2010) Aerodynamics of a New Volleyball, *Procedia Engineering*, 8th Conference of the International Sports Engineering Association, Volume 2, Issue 2, Elsevier, pp.2493-2498. 査読有

4) Hong, S., Chung, C., Nakayama, M. and Asai, T. (2010) Unsteady Aerodynamic Force on a Knuckleball in Soccer, *Procedia Engineering*, 8th Conference of the International Sports Engineering Association, Volume 2, Issue 2, Elsevier, pp.2455-2460. 査読有

5) Sakamoto, K., Geisler, G., Nakayama, M. and Asai, T. (2010) Kinematics of the Foot Joint in Female Soccer Players during the Ball Impact Phase of Kicking, *Procedia Engineering*, 8th Conference of the International Sports Engineering Association, Volume 2, Issue 2, Elsevier, pp.2449-2554. 査読有

6) Seo, K., Yorita, D., Shimoyama, K., Nagai H. and Asai, K. (2010) Multi-Objective Exploration of the Launch Condition for a Fluctuating Punted Kick in Rugby on the basis of PSP Measurement, *Procedia Engineering*, 8th Conference of the International Sports Engineering Association, Volume 2, Issue 2, Elsevier, pp.2499-2504. 査読有

7) Shimoyama, K., Seo, K., Nishiwaki, T., Jeong, S. and Obayashi S. (2010) Material Design Optimization for a Sport Shoe Sole by Evolutionary Computation and FEM Analysis, Proceedings of the *2010 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, IEEE Press, pp. 3193-3199. 査読有

8) Seo, K., Kobayashi, O., Murakami, M. and Yorita, D., Nagai H. and Asai K. (2010)

Simulation of the trajectory of a punted rugby ball taking into account the asymmetrical pressure distribution caused by the seams, *Journal of Visualization*, Volume 13, Number 2, Springer Berlin / Heidelberg, pp. 97-105. 査読有

9) 藤井範久, 小山陽平, 阿江通良: ハンマー投ターン局面におけるハンマーヘッド加速技術の研究—ハンマーヘッド加減速パターンの違いに着目して—. 体育学研究, 55(1), 17-32, 2010. 査読有

10) 平山大作, 藤井範久, 小池関也, 阿江通良: 野球投手の投球数の増加による下肢関節の力学的仕事量の変化. 体力科学, 59(2), 225-232, 2010. 査読有

11) 高木斗希夫, 藤井範久, 小池関也, 阿江通良: 無作為投球速度変化状況での野球の打撃動作に関するバイオメカニクス研究. バイオメカニズム学会誌, 34(1), 53-62, 2010. 査読有

12) 高木斗希夫, 藤井範久, 小池関也, 阿江通良: 異なる投球球速に対する野球の打撃動作に関する下肢および体幹部のキネティック的研究. バイオメカニズム学会誌, 34(3), 216-224, 2010. 査読有

13) Ito, S., Asai, T., Seo, K. and Koike, S. (2010) Development and performance of a ball shooting machine, *Procedia Engineering*, 8th Conference of the International Sports Engineering Association, Volume 2, Issue 2, Elsevier, pp.2649-2652. 査読有

14) Asai, T. (2009) Vortex visualization of a low spinning soccer ball, The Impact of Technology on Sports III: (Alam L., Smith, L. V., Subic, A., Fuss, F. K., Ujihashi, S., eds.) Proceedings of the 4<sup>th</sup> Asia Pacific Congress on *Sports Technology*, Honolulu, RMIT, Australia, pp. 195-199. 査読有

15) Suda, S., Asai, T., Kondoh, M., Murakami, M., and Ito, S. (2009) Soccer ball flight dynamics experiment using kicking machine, The Impact of Technology on Sports III: (Alam L., Smith, L. V., Subic, A., Fuss, F. K., Ujihashi, S., eds.) Proceedings of the 4<sup>th</sup> Asia Pacific Congress on *Sports Technology*, Honolulu, RMIT, Australia, pp. 185-189. 査読有

16) Asai, T. and Kamemoto, K., Flow visualization on knuckling effect in Football – Vortex of C. Ronald's FK -, From fast cars to

slow flows over bluff bodies, *Abstract of the workshop in Imperial College London*, London, Imperial College, p. 28. (2009)  
査読有

17) 中山雅雄, 浅井武 (2009) サッカープレーヤーの発達段階および課題の制約としてのプレーエリアの大きさがパス技能に与える影響, 体育学研究, 54 (2), 343-353. 査読有

18) 松倉啓太, 浅井武 (2009) サッカーのゴールキーパーにおけるダイビング動作の到達可能範囲, 体育学研究, 54 (2), 317-326. 査読有

〔学会発表〕 (計 20 件)

1) Asai, T., Ito, S., Seo, K., Hitotsubashi A. (2010) Aerodynamics of a New Volleyball, *Procedia Engineering*, 8th Conference of the International Sports Engineering Association. 2010.7.15,ウィーン,オーストリア

2) Seo, K., Yorita, D., Shimoyama, K., Nagai H. and Asai, K (2010) Multi-Objective Exploration of the Launch Condition for a Fluctuating Punted Kick in Rugby on the basis of PSP Measurement, *Procedia Engineering*, 8th Conference of the International Sports Engineering Association. 2010. 7. 15, ウィーン, オーストリア

3) Hong, S., Chung, C., Nakayama, M. and Asai, T. (2010) Unsteady Aerodynamic Force on a Knuckleball in Soccer, *Procedia Engineering*, 8th Conference of the International Sports Engineering Association. 2010.7.14,ウィーン, オーストリア

4) Sakamoto, K., Geisler, G., Nakayama, M. and Asai, T. (2010) Kinematics of the Foot Joint in Female Soccer Players during the Ball Impact Phase of Kicking, *Procedia Engineering*, 8th Conference of the International Sports Engineering Association. 2010.7.14,ウィーン, オーストリア

5) Asai, T. & Kamemoto, K. (2010) Flow structure of knuckling effect in Football, IUTAM Symposium on Bluff Body Wakes and Vortex-induced Vibration (BBVIV-6), *IUTAM*. 2010.6.24,ロンドン,UK(英国)

〔その他〕  
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者  
浅井 武 (ASAI TAKESHI)  
筑波大学・大学院人間総合科学研究科・教授  
研究者番号：00167868

(2) 研究分担者  
瀬尾和哉 (SEO KAZUYA)  
山形大学・地域教育文化学部・准教授  
研究者番号：60292405

藤井範久 (HUJII NORIHISA)  
筑波大学・大学院人間総合科学研究科・准教授  
研究者番号：10261786

高木英樹 (TAKAGI HIDEKI)  
筑波大学・大学院人間総合科学研究科・准教授  
研究者番号：80226753

小池関也 (KOIKE SEKIYA)  
筑波大学・大学院人間総合科学研究科・准教授  
研究者番号：50272670

藤澤延行 (HUJISAWA NOBUYUKI)  
新潟大学・工学部・教授  
研究者番号：20165369