

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 29 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24240084

研究課題名(和文) スポーツ流体工学の基盤構築と流体基準データの策定

研究課題名(英文) Foundation building for sports fluid engineering and development of standard fluid data

研究代表者

浅井 武 (ASAI, Takeshi)

筑波大学・体育系・教授

研究者番号：00167868

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、スポーツ領域に適合した定常、及び非定常の計測法と可視化法を開発し、それらを統合した「スポーツ流体工学」の基礎を構築した。その結果、六角形と五角形の計32枚パネルで構成された一般的サッカーボールの臨界レイノルズ数は、約200000であることが明らかになった。また、スキージャンプにおける揚力は、迎角約35度で約230N程度であることが示された。これらは、スポーツ流体基準データの一つになると考えられた。

研究成果の概要(英文)：In this study, steady-state and unsteady-state measurement and visualization methods were developed and integrated to establish the foundation for "sports fluid engineering." The critical Reynolds number of a typical football with 32 panels made from pentagonal and hexagonal pieces was found to be approximately 200,000. The lift during a ski jump with an attack angle of approximately 35° was found to be 230 N. We consider these results to be useful and representative of sports fluid data.

研究分野：スポーツテクノロジー

キーワード：ボール 空力 流体 スポーツ 抗力 揚力 基準 可視化

1. 研究開始当初の背景

スポーツ用具における低抵抗ウェア（含むスイムウェア）や生体表面等の流体特性を検討する場合、微小な圧力差や流れ場を検出する必要があるが、人体全身や自転車等のシステム全体の流体特性と同時に計測することは、現実的に極めて困難である。したがって、スポーツにおけるローカルレベルとグローバルレベルの両方を測定、可視化、統合するマルチスケールによる計測、可視化技術の研究・開発も不可欠となっている。

さらに、今後、世界的に多くの大学や研究機関でスポーツ流体科学・工学に関する研究・開発が実施されると予想されるが、現時点では、異なる実験設備や計測システムでのデータを比較検討することが極めて困難であり、それぞれのシステムや計測値の妥当性や信頼性を検討し、データや知見の共有化を図るための、人体やスポーツ用具に関するスタンダードともいえるべき「スポーツ流体基準計測方法」と「スポーツ流体基準データ」の策定が求められていた。

2. 研究の目的

本研究では、スポーツ領域に適合した定常、及び非定常の計測法と可視化法を開発し、それらを統合した「スポーツ流体工学」の基礎構築する。また、その開発した技術をスポーツボールやスポーツ選手に適用することにより、それらの基礎的空力特性を明らかにする。さらに、それぞれのシステムや計測値の妥当性や信頼性を検討し、データや知見の共有化を図るための、人体やスポーツ用具に関するスタンダードともいえるべき「スポーツ流体基準計測方法」と「スポーツ流体基準データ」を示す。

3. 研究の方法

(1)風洞実験は筑波大学内にある回流型低速低乱風洞（San Technologies Co., LTD）を使用した（図 1-1）。最大風速は、55m/s、吹き出しサイズは 1.5m×1.5m、風速分布は±0.5%以内、乱れ度は0.1%以下である。この風洞にサッカーボールを取り付け、実験を行った。また、サッカーボールに働く力は、スティング型6分力検出器（LMC-61256, Nissho Electric Works）により測定した。本実験では、計測した空気力から抗力係数（ C_D ）を求めた。

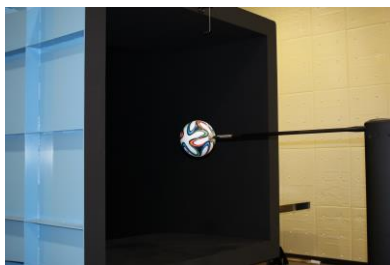


Fig. 1-1 Setup of wind tunnel test.

(2)キックロボットによる飛翔軌跡実験は

筑波大学の室内研究棟（SPEC）で行った。キックロボットの前方 25 m にサッカーゴールをセットし、ゴール中央をめがけて、無回転のボールでキックさせた（図 1-2）。サッカーゴール正面 25 m の地点にボールを静止してキックロボットにプレースし、キックロボットの左側 50cm から準高速ビデオカメラ（300 fps）を設置し、各試技を撮影した。また、キックロボットで打ち上げるボールの初期条件としては、初速度 30m/s のホールスピードでボールの回転数は無回転系（1 回以内）で設定し、継続的に反復して撮影を実施した。各々のサッカーボールにおいて各 20 回を実施した。実際に飛翔したボールがゴールネットに当たるボールを弾着ポイントとして分析した。

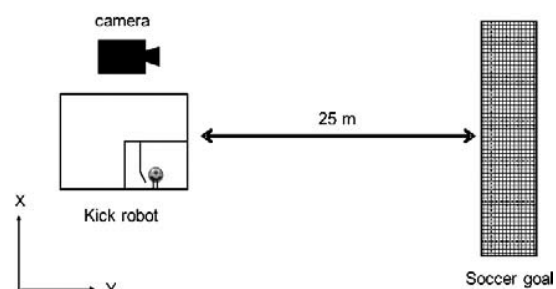


Fig. 1-2 Setup of the experiment using kick-robot.

(3)本研究では、スポーツ競技における人体モデルを対象に、実験流体解析と数値流体解析を用いて空力特性を分析すると共に、その競技における人体の基礎的基準データを示した。実験流体解析では、サッカーボールの空力解析同様、風洞に競技スポーツ選手モデルをセットし、空力特性を分析した（図 1-3）。また、数値流体解析では、競技選手モデルをレーザースキャナーで作成し、ソルバーに格子ボルツマン手法を用いて、LES 解析を実施し、その空力特性を検討した（図 1-4）。それらを統合し、スキージャンプ選手の空力基準データを示した。

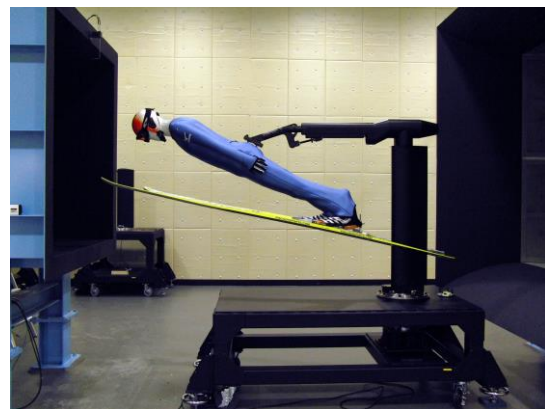


Fig. 1-3 Setup of the experiment using ski-jumper model.

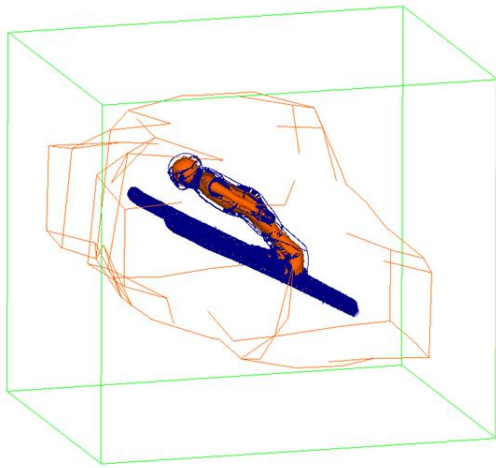


Fig. 1-4 CFD analysis model for ski-jumper.

4. 研究成果

(1) サッカーボールの空力特性と基準データ

図 2-1 はジャブラニとブラズーカボールに対するボールの抗力の特性曲線を示したものである。中間スピード区間 (A 区間; 10 m/s ~ 25 m/s) ではジャブラニの方がブラズーカより大きな抗力 (抵抗) が見られた。しかし、シュートのような早いスピード区間 (B 区間; 25 m/s ~ 35 m/s) ではブラズーカの方が大きな抗力値を示した。これは、中間スピードではジャブラニが早く飛翔し、早いスピードではブラズーカが相対的に早く飛翔する可能性が考えられる。また、超臨界の抗力係数は 2 つボール共に約 0.16 を示したが、超臨界に到達するスピードはブラズーカの方が早い事が分かった。従って、ボールの種類によってボールに働く抗力が変わると考えられる。

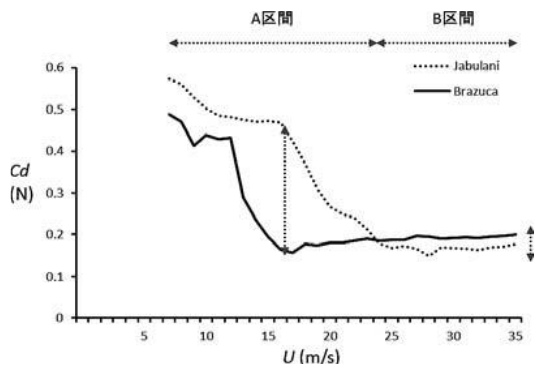


Fig. 2-1 Drag coefficient (C_D) of the Jabulani and Brazuca.

図 3 は、ボールの位置変化による空力係数を比較したグラフである。2006 年ワールドカップの公式球と 2010 年、2014 年の 3 つのサッカーボールにおける各パネルフェイスを $\pm 45^\circ$ 及び $\pm 90^\circ$ 向きを変えて固定し風速 7m/s から 35m/s までの抗力を検討した。まず、2006 年の公式球であるチームガイスト 2 における超臨界の抗力係数は、パネルフェイスが 90° の時が約 0.14 として最も低い値を示し、パネ

ルフェイスが -90° の場合が約 0.18 として最も高い値を示した。また、ジャブラニにおける超臨界の抗力係数では、パネルフェイスが -90° の時が約 0.11 として最も低い値を示し、パネルフェイスが 90° の場合が約 0.16 として最も高い値を示した。ジャブラニの場合、パネルの形が同一であってもパネルの角度 (位置) によってボールに加える抗力が変わる傾向が見られた。しかし、ブラズーカではパネルの角度を -45° (0.16) から 45° (0.16) $^\circ$ まで変化して見ても大きな差は見られなかった。従って、ブラズーカボールはジャブラニボールに比べて、パネル向きの影響が少ないと考えられ、比較的に飛翔軌道の安定性が考えられる。

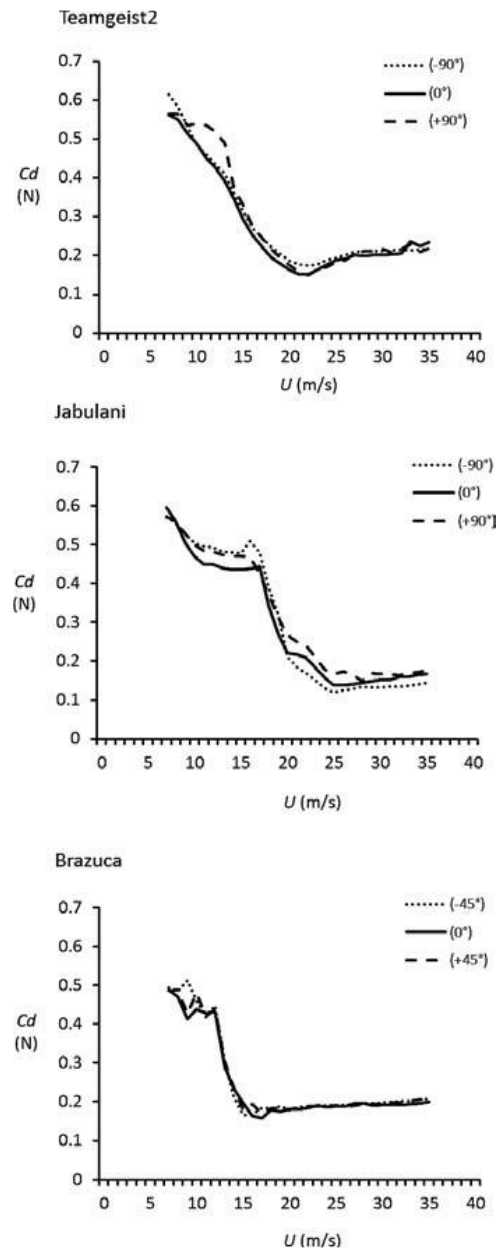


Fig. 3 Drag coefficient (C_D) of the Teamgeist2 and Jabulani (-90° , 0° , 90°), Brazuca (-45° , 0° , 45°).

図 4 は、3つのサッカーボールの揚力と横力の関係を風速 25m/s で 9 秒間測定したグラフである。風速が 25m/s の時では、ブラズーカボールはチームガイスト 2 及びジャブラニボールに比べて、不規則な力の変化が小さいのが分かる (図 5)。従って、今回のブラズーカボールは前回のワールドカップ公式球より、安定して飛翔する可能性が高いと考えられる。

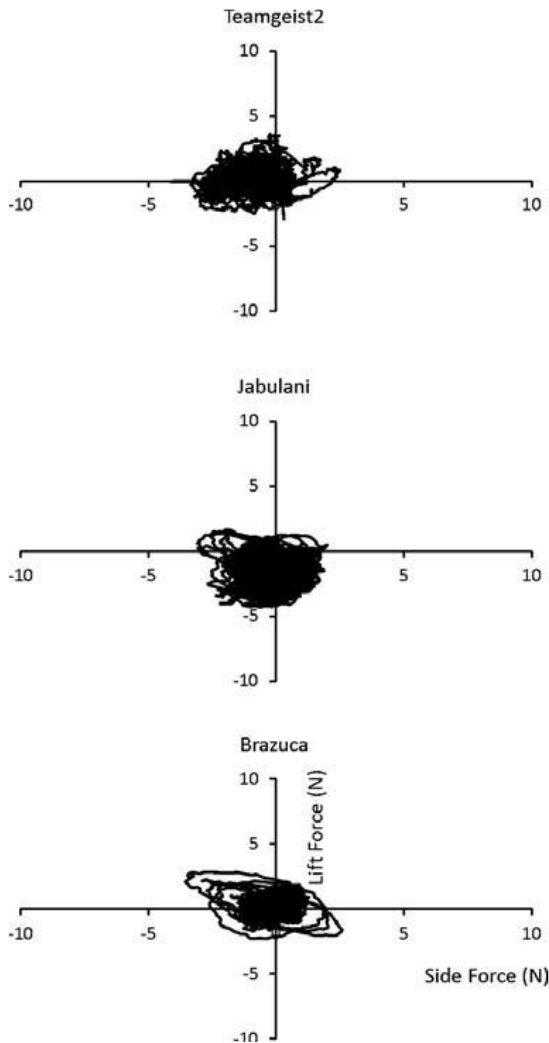


Fig. 4 Scatter plots of the side and lift forces of the balls.

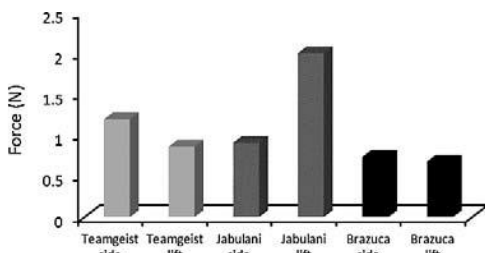


Fig. 5 RMS of the respective forces for 25 m/s.

図 6 は、実際にキックロボットを用いてボールを打ち出し、25m 離れたゴールネットにボールが当たったポイント (着弾点) を示したものである。打ち出すボールの初速度は 30m/s でボール回転数は 1 回以内で設定し各サッカーボールを 20 回ずつ計測した。着弾点を比較してみるとブラズーカの方が他のボールに比べて安定していることが分かった。

図 7 は、各々のサッカーボールにおける着弾点を標準偏差で示したグラフである。着弾点の上下方向に関しては、ジャブラニが約 43cm であり、ブラズーカが約 40cm の結果が示して 2 つボールの差を見られなかった。しかし、左右方向においてはジャブラニが約 52cm に比べ、ブラズーカは約 24cm の結果を示して大きな差が見られた。これらの結果から、ブラズーカボールの飛翔軌道 (着弾点) はジャブラニより安定していると考えられる。

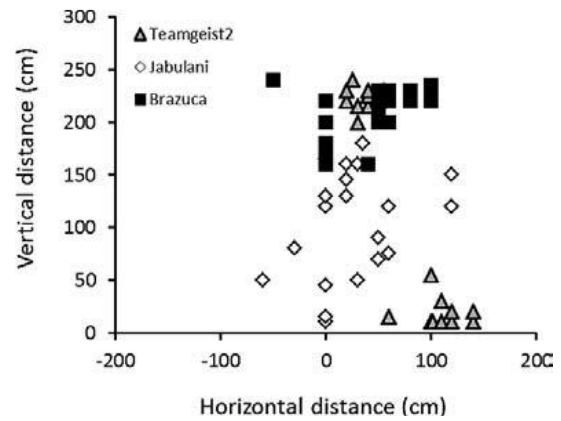


Fig. 6 Impact points of the Teamgeist2 and Jabulani, Brazuca.

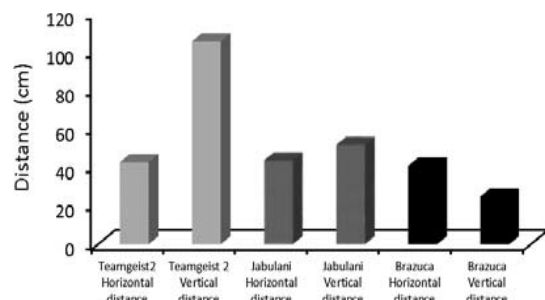


Fig. 7 SDs of the Impact points.

(2)競技スポーツ選手の空力特性と基準データ

本実験では、スポーツにおける人体空力特性の基礎データ作成の一貫として、スキージャンプ競技における空力解析を行った。スキージャンプの風洞実験における抗力面積、揚力面積と流速の関係では、流速が増大するに従って、抗力面積が増加する傾向を示した。また、揚力面積も流速が増大するに従って、増加する傾向を示した(図 8-1, 8-2)。抗力、揚力と流速の関係では、迎角が増大するに従って、抗力が増加する傾向を示した。揚力は迎角が増大するに従って増加するが、約 35 度付近で低下していた。これは、失速現象の一つであると考えられる(図 9-1, 9-2)。

また、数値流体解析(CFD)を用いて、人体各部位の抗力、揚力配分を算出した(図 10)。CFD の計算精度は、風洞実験値と比較して、妥当な許容誤差範囲内と考えられた。最も抗力が大きかった部位は、スキー板で、約 55 N であった。次に大きな抗力部位は、脚部で約 30N を示した。一方、最も揚力が大きかった部位は、抗力と同様にスキー板で、約 80N であったが、次に揚力が大きい部位は、体幹であり、約 60N を示した。

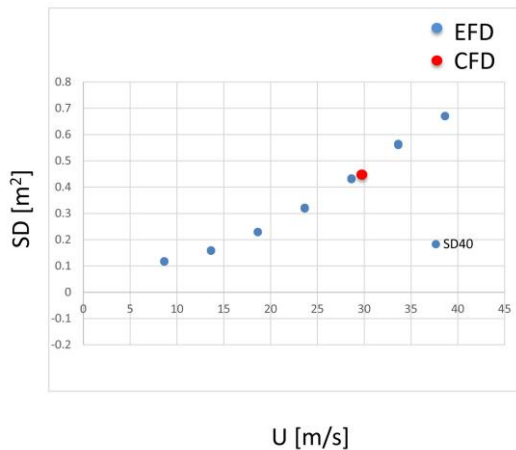


図 8-1 スキージャンプにおける流速と抗力面積の関係。

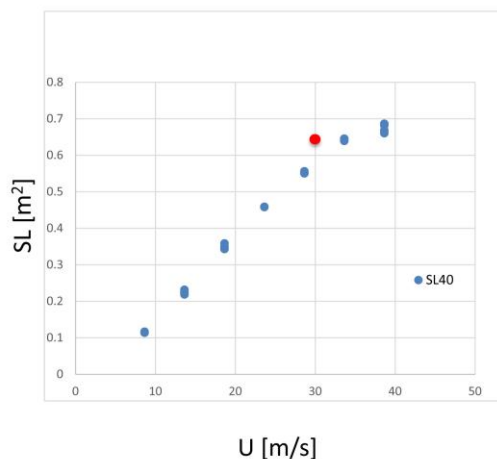


図 8-2 スキージャンプにおける流速と揚力面積の関係。

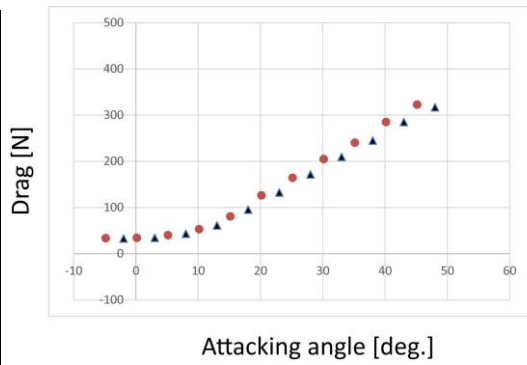


図 9-1 スキージャンプにおける迎角と抗力の関係。

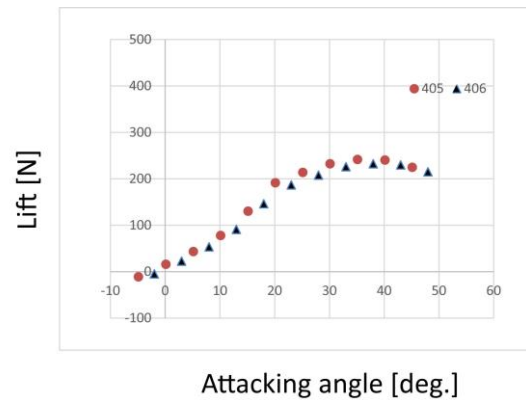


図 9-2 スキージャンプにおける迎角と揚力の関係。

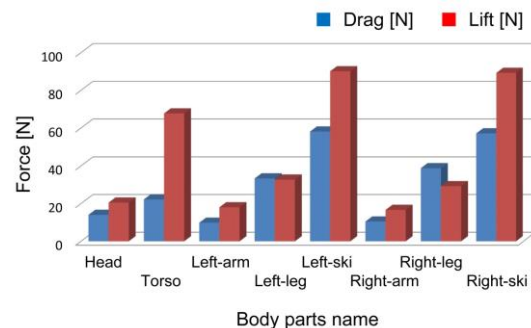


図 10 スキージャンプにおける各部位の抗力分布。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

①Hong, S. and Asai, T. (2014) Effect of panel shape of soccer ball on its flight characteristics, *Scientific Reports*, 査読有, 4: 5068, 1-7. DOI: 10.1038/srep05068

②Goff, J. E., Asai, T., Hong, S. (2014) A Comparison of Jabulani and Brazuca Non-Spin Aerodynamics, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: J Sports Engineering and Technology*, 査読有, IMechE,

23, 1-7.

DOI: 10.1177/1754337114526173

③ Takagi, H., Nakashima, M., Ozaki, T., and Matsuuchi, K. (2014) Unsteady hydrodynamic forces acting on a robotic arm and its flow field: Application to the crawl stroke. *Journal of Biomechanics*, 査読有, 47: 1401-1408. doi:10.1016/j.jbiomech.2014.01.046 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiomech.2014.01.046>

④ Asai, T. and Seo, K. (2013) Aerodynamic drag of modern soccer balls, *SpringerPlus*, 査読有 2:171. doi:10.1186/2193-1801-2-171

⑤ Hideki Takagi, Motomu Nakashima, Takashi Ozaki, and Kazuo Matsuuchi (2013) Unsteady hydrodynamic forces acting on a robotic hand and its flow field. *Journal of Biomechanics*, 査読有, 46 (11): 1825-1832. doi:10.1016/j.jbiomech.2013.05.006 <http://dx.doi.org/10.1016/j.jbiomech.2013.05.006>

[学会発表] (計 10 件)

- ① Sasaki, R., Hong, S., Sakamoto, K., Nakayama, M. & Asai, T. The friction force between the soccer ball and the goalkeeper glove material, The conference of the International Sports Engineering Association, 16th July 2014, Sheffield (UK).
- ② Hong, S., Sakamoto, K., Washida, Y., Nakayama, M. & Asai, T. The influence of panel orientation on the aerodynamics of soccer balls, The conference of the International Sports Engineering Association, 16th July 2014, Sheffield (UK).
- ③ Matsukura, K., Asai, T. & Sakamoto, K. Characteristics of movement and force exerted by soccer goalkeepers during diving motion, The conference of the International Sports Engineering Association, 15th July 2014, Sheffield (UK).
- ④ Sakamoto, K., Sasaki R., Hong, S., Matsukura, K. & Asai, T. Comparison of kicking speed between female and male soccer players, The conference of the International Sports Engineering Association, 15th July 2014, Sheffield (UK).

⑤ Koizumi, A., Hong, S., Sakamoto, K., Sasaki, R. & Asai, T. A study of impact force on modern soccer balls, The conference of the International Sports Engineering Association, 15th July 2014, Sheffield (UK).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

浅井 武 (ASAI, Takeshi)

筑波大学・体育系・教授

研究者番号：00167868

(2) 研究分担者

本間 三和子 (HONMA, Miwako)

筑波大学・体育系・教授

研究者番号：80241800

高木 英樹 (TAKAGI, Hideki)

筑波大学・体育系・教授

研究者番号：80226753

藤井 範久 (FUJII, Norihisa)

筑波大学・体育系・教授

研究者番号：10261786

小池 関也 (KOIKE, Sekiya)

筑波大学・体育系・准教授

研究者番号：50272670