

令和 3 年 4 月 22 日現在

機関番号：12612
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2018～2020
課題番号：18K03943
研究課題名(和文)アーチェリー矢の空力特性 -飛翔姿勢と乱流遷移-

研究課題名(英文) Aerodynamics of an archery arrow

研究代表者

宮崎 武 (Miyazaki, Takeshi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：50142097

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：アーチェリー矢の空力特性を風洞実験、飛翔実験そして数値計算によって調べた。アーチェリー競技は矢側面の境界層流れが乱流遷移する速度領域で行われている。そのため、鏃を流線形にしたリ、打ち出し時における矢の回転角速度を制御することで、境界層流れを層流化して空気抵抗を減らすことができる。一方、背景風の影響を受ける野外では境界層流れの乱流化が避けられず、的ずれを減らすためには重い矢を高速で放つ必要がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、アーチェリー矢の空力特性を風洞実験、飛翔実験によって調べ、アーチェリー競技が矢のシャフト側面の境界層流れの乱流遷移領域で行われていることを指摘し、鏃・シャフト・矢羽の選択や初期角速度の設定によって、矢側面の境界層流れの乱流遷移過程を制御することが競技力の向上につながることを示唆している。また、2種類の実験によって得られた矢の空力特性を用いて、矢の飛翔軌道・飛翔姿勢を数値計算して、野外競技における背景風の影響を調べている。これらの結果は、アーチェリー矢の飛翔に伴う流体現象についての独創的な研究成果であり、流体力学ばかりでなくスポーツ工学分野における貢献が顕著である。

研究成果の概要(英文)：The aerodynamic properties of archery arrows were studied experimentally and numerically. From the wind tunnel experiments with Magnetic Suspension and Balance System (MSBS), the drag (CD), pitching moment (CM) and lift (CL) coefficients were obtained. In the free-flight experiments, the instantaneous drag exerted on the arrow was measured using an acceleration sensor, from which the instantaneous state of the arrow's boundary layer was inferred. Both turbulent-laminar and laminar-turbulent transitions were found if the bulge points were attached to the arrows. In contrast, the boundary layer remained laminar for the streamlined points. The trajectory and attitude of the archery arrows were computed numerically under the influence of background wind conditions. Arrows with larger mass and larger velocity showed less deviated trajectories. The boundary layer was found to remain laminar by keeping an angle of attack close to zero, which would reduce the wind drift by about 45%.

研究分野：流体力学

キーワード：アーチェリー矢 空力特性 風洞実験 飛翔実験 数値計算 乱流遷移 飛翔姿勢 背景風の影響

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

スポーツは流体中で競技され、多かれ少なかれ流体からの影響を受ける。なかでも射撃やアーチェリーのような標的競技では命中精度に対する要求が高く、競技の勝敗は流体力学的な要因に支配される。アーチェリー矢の飛翔(約60m/sec)にともなうレイノルズ数(Re 数)は工学的流れと比較すると低く($Re < 2.0 \times 10^4$)、矢側面の境界層流れにおいて層流状態と乱流状態が混在する遷移領域で競技される。乱流遷移領域での矢の空力特性は、鏃・シャフト・矢羽の形状や背景風に対して敏感に依存することが想定されるため、競技力向上のためにも詳細な研究が求められている。

2. 研究の目的

本研究ではアーチェリー矢側面境界層における乱流遷移現象を解明し、その知見に基づいて乱流遷移の制御法を提案して、矢の飛翔性能の改良と命中精度の向上に資する。流体力学的な観点からは、主に矢の飛翔姿勢(迎角)と乱流遷移の関係に注目する。非定常的な飛翔状態にある矢側面の境界層流れの乱流遷移過程を解明することは、その制御を通して競技力の向上に資するばかりでなく、様々な細長い軸対称飛翔体が非定常運動する際の乱流遷移現象に対する基礎的知見をもたらすことも期待される。

3. 研究の方法

(1) 実験的手法: 2種類の支持干渉のない実験(磁力支持天秤装置(MSBS)付き風洞実験と屋内アーチェリー場での飛翔実験)によって矢の空力特性を精密に測定する。MSBS風洞実験では、矢のシャフト内部にネオジウム磁石を挿入して、風洞周辺に配置された10個の電磁石で発生させた磁力で重力を打ち消す。風洞内に風を吹かせて、矢に働く空気力と釣り合うように電磁石に流す電流値を制御して、その電流値から矢に働く抗力・揚力・ピッチングモーメントを逆算する。

江戸川区の屋内アーチェリー場での飛翔実験では、高速度ビデオカメラ4台によって矢の飛翔軌道と発射初期条件を撮影する。カメラ1と2の映像から初期条件を読み取り、カメラ3と4の映像から速度減衰率を算出して抗力係数(平均値)を求める。さらに、加速度センサによってもたらされる減速率の時間変動を解析して、抗力係数の瞬時値を推計する。

これらの実験から得られた空力係数を反映した剛体の運動方程式を数値計算して、矢の飛翔姿勢の時間変化を推定する。飛翔中の矢の迎角と抗力係数との相関を調べ、風洞実験結果と比較することで、飛翔姿勢の乱流遷移への影響を検討する。

(2) 理論的手法: 直接数値計算によって、軸対称な矢側面境界層流れを求めて、平行流近似に基づいてその線形安定性を調べる。周回方向波数・軸方向波数ごとにスペクトル分解して不安定モードの成長率を求め、実験結果との対応を検討する。また、迎角がついた矢の側面境界層流れを模擬するために、軸対称流に周回方向波数1の固有モードを重ねた基本流を用意する。平行流近似に基づいて、BiGlobal線形安定性解析(二次不安定解析)を実行して、矢の迎角が境界層流れの安定性に及ぼす影響を解明する。

4. 研究成果

(1) 実験結果: MSBS風洞実験と飛翔実験から得られた抗力係数($A/C/E$ シャフト、競技用鏃、スピニング矢羽の組合せ)の Re 数依存性を図1に示す。黒い実線は円柱側面(鏃と矢羽なし)における層流境界層の理論値を表す。矢を気流に平行に設置した風洞実験(図1の)では、測定されたレイノルズ数全域で層流境界層が実現される。黒い実線との差は主に矢羽に働く空気抵抗である。迎角を 0.75° つける(図1の+)と、 Re 数 1.1×10^4 以上で境界層が乱流化して、抗力係数が増加する。飛翔実験の結果()は複雑で、 Re 数 1.1×10^4 以下では層流値で風洞実験結果とほぼ一致するが、 Re 数 $1.3 \sim 1.8 \times 10^4$ では乱流値(2.6程度)と層流値(1.5程度)の間に分布して分散が増大する。 Re 数 1.9×10^4 以上では乱流値となる。したがって Re 数 $1.3 \sim 1.8 \times 10^4$ が乱流遷移領域である。

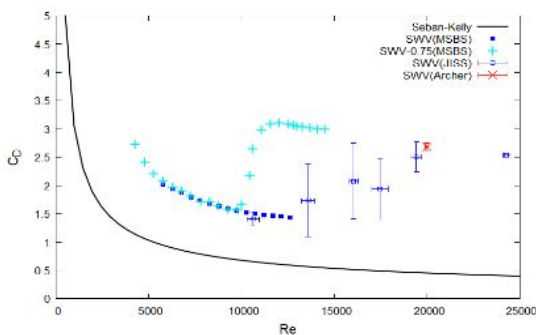


図1 C_D の Re 数依存性: A/C/E 矢

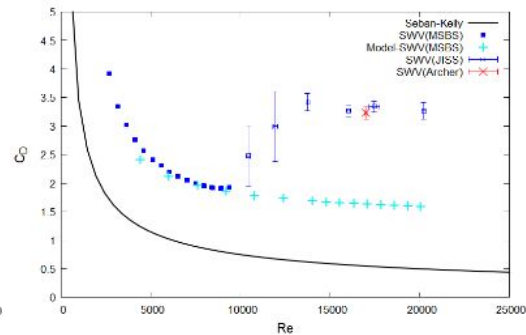


図2 C_D の Re 数依存性: X10 矢

X10シャフトの矢とそのモデル矢(1.65倍)に迎角をつけない風洞実験(図2の , +)では全ての Re 数で層流値が得られる(図2)。一方、X10矢の飛翔実験()では、 Re 数1.0

~ 1.3×10^4 で層流値 (2 程度) と乱流値 (3.2 程度) が混在して、 1.4×10^4 以上で乱流値となる。X10 矢の乱流遷移領域は A/C/E 矢のものよりも低 Re 数になる。風洞実験で計測された C_D が層流値となるのに対して、飛翔実験での C_D が乱流値となるのは飛翔中の矢に迎角がつくことが原因と考えられる。MSBS 風洞実験で抗力係数の迎角依存性を調べると、図 3 に示すように迎角が 1° 以上つくると乱流値となる。X10 矢の抗力係数 C_D が大きいのは細長比が大きいためである。

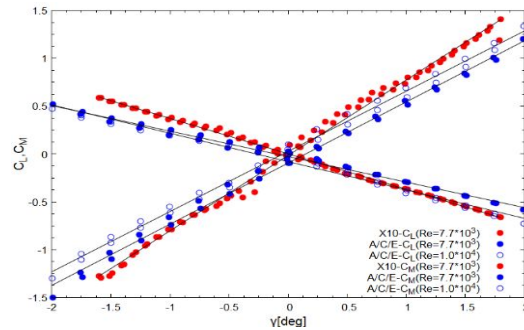
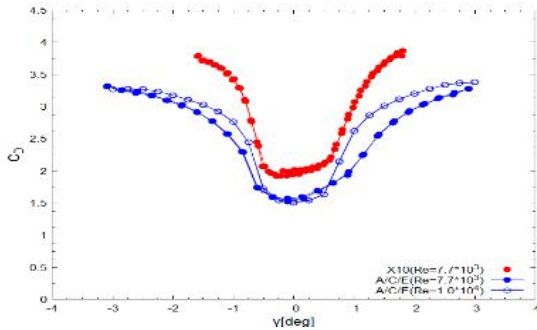


図 3 C_D の迎角依存性 : A/C/E 矢, X10 矢 図 4 C_L, C_M の迎角依存性 : A/C/E 矢, X10 矢

迎角のついた矢には揚力とピッチングモーメントが働く (図 4)。両係数 C_L, C_M ともほぼ迎角に比例し、その傾きは揚力係数 C_L では正で、ピッチングモーメント係数 C_M では負となる。 C_M の傾きが負であることは迎角を減らす方向にピッチングモーメントが働き、飛翔姿勢を安定化することを意味する。

一方、スピンウィング矢羽の替わりにストレイト矢羽をつけた A/C/E 矢に加速度センサを挿入して飛翔実験を行うと、図 5 のような瞬間的な矢の減速加速度が計測される。減速率 (縦軸) は重力加速度 G で規格化されている。矢の初速は、上から 60.0m/sec、53.9m/sec、53.0m/sec、48.7m/sec、そして 37.6m/sec である。初速が大きいほど減速率も大きい。53.9m/sec と 53.0m/sec はほぼ同じ初速で発射されているが、前者は乱流値であるのに対して、後者は層流値と乱流値が混在している。層流値と乱流値が混在する場合には、減速率が 2 値化して、両者を飛び移ることが特徴的である。これは、矢側面の境界層流れ全域が「層流から乱流へ」、そして「乱流から層流へ」速やかに遷移していることを示唆する。的前の高速度カメラ映像から解析した矢速を基準にして、減速率を時間積分して瞬間的な矢速を算出し、矢速と減速率の関係から抗力係数 C_D の瞬間値を求めることができる。その Re 数依存性を図 6 に示す。飛翔中の矢は減速するので、5 つの測定で Re 数領域 $1.35 \sim 2.1 \times 10^4$ を調べたことになる。低い Re 数領域でのピンクの記号は MSBS 風洞実験の測定結果である。気流に平行な矢 \circ では層流値 1.6 程度であり、 0.75° 迎角をつけた場合 \diamond には乱流遷移が見られる。加速度センサから得られた結果と MSBS 風洞実験結果との整合性が確認できる。また、高速度ビデオカメラ映像から求めた C_D (■、●、●) は時間平均値を与えている。

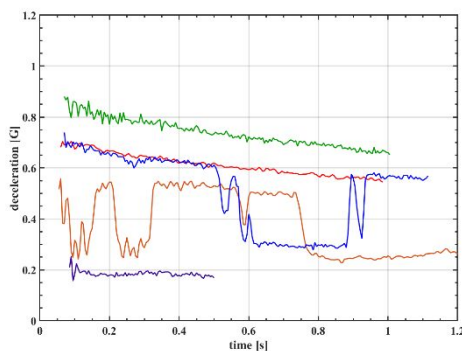


図 5 減速率の時間変化

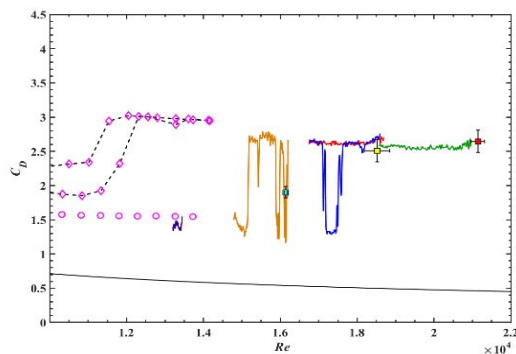


図 6 C_D の Re 数依存性 : A/C/E 矢, ストレイト矢羽

アーチェリー競技は野外で行われ、風速 3m/sec 以上になると優勝者の得点が著しく低下する。矢の空力特性の実験値を剛体運動の運動方程式に代入して、数値計算によって背景風の影響を推定した。風速 3m/sec の一様な横風では、図 7 に示すような横ずれが算出された。横ずれが大きい方から、齋藤選手の A/C/E 矢 (-)、田畑選手の X10 矢 (-)、そして層流が保たれると仮定した A/C/E 矢 (-) と X10 矢 (-) の結果を示している。抗力係数が乱流値である競技者の場合では、70m 先の的ずれは X10 矢が A/C/E 矢に比べて 10cm 程度小さくなる。多くの競技者が X10 矢を選ぶのはこのためである。一方で、仮に乱流遷移が起きないように矢を放つことができるならば、X10 矢でも A/C/E 矢でも的ずれが半減される。矢側面における境界層流れの乱流遷移をいかに制御するかが勝敗の鍵を握っているよう

ある。

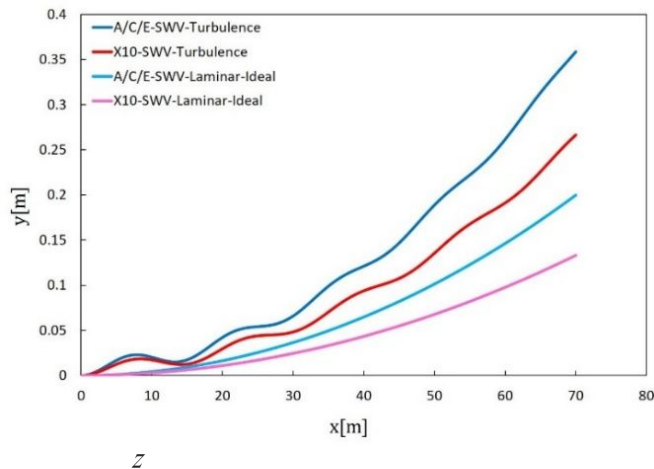


図7 横風 3m/sec を受ける矢の飛翔軌道 (A/C/E 矢, X10 矢)

(2) 理論結果：競技用鏃と流線形鏃について軸対称境界層流れを渦度 流れ関数法で直接数値計算して求め、平行流近似に基づいて線形安定性解析を行った。 Re 数を $1.0 \times 10^4 \sim 2.0 \times 10^4$ 、スピンパラメータ (無次元回転数 SP) を $0 \sim 0.025$ の範囲で変化させた。調べたパラメータ領域では周回方向波数 $m=0 \sim 2$ のモードが不安定化する可能性がある。図8 ($SP=0.015$: 左 $Re=1.0 \times 10^4$ 、右 $Re=2.0 \times 10^4$) に示すように、 Re 数の増加に伴って不安定性の発生する軸方向領域と不安定性の増幅率が増大する。また、図9 (左 $m=\pm 1$ 、右 $m=\pm 2$) で示すように、 SP の増加とともに、 $m>0$ モードの増幅率が増大する。しかし、 $e^{\lambda z}$ 法で評価すると、 $Re=2.0 \times 10^4$ 、 $SP=0.025$ の場合でも乱流遷移引き起こすほど増幅率は大きくないことが分かった。

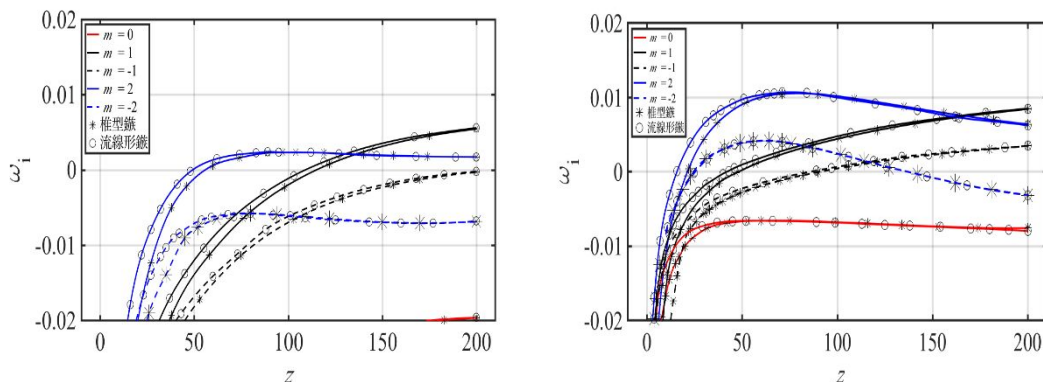


図8 軸対称流の線形不安定性増幅率 (左 $Re=1.0 \times 10^4$ 、右 $Re=2.0 \times 10^4$)

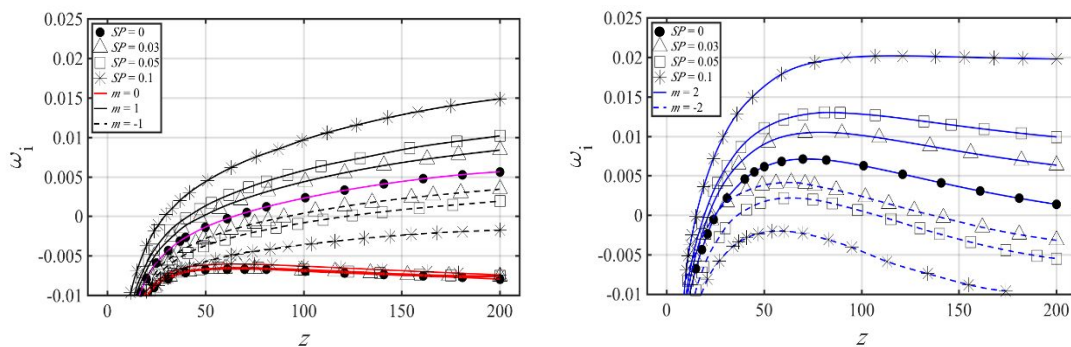


図9 回転軸対称流の線形不安定性増幅率 ($Re=2.0 \times 10^4$, $SP=0.025$, 左 $m=\pm 1$, 右 $m=\pm 2$)

そこで、流線形鏃の矢に迎角がついた場合 ($Re=2.0 \times 10^4$, $SP=0$) を想定して、 $m=1$ の攪乱を軸対称境界層流れに重ね合わせた基本流を用意して、その二次不安定性解析を行った。図10に示すように、矢の上流側で不安定性の増幅率が増大し、迎角のついた矢の側面境界層流れが鏃付近から乱流遷移する可能性を示した。

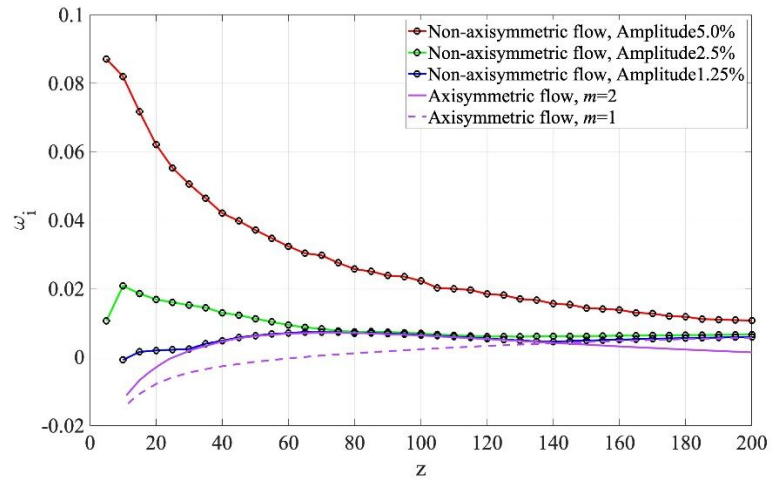


図 10 二次線形不安定性の増幅率 (流線形鏝, $Re = 2.0 \times 10^4$, $SP = 0$)

参考文献

宮寄 武 : 「卓球とアーチェリーにおける流体力学」, ながれ (日本流体力学会誌) **39**, 138-144 (2020)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 J. Ortiz, A. Serino, T. Hasegawa, T. Onoguchi, T. Maemukai, T. Miyazaki, H. Sugiura	4. 巻 on line
2. 論文標題 Experimental and computational study of archery arrows fletched with straight vanes	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 13th Conference of the International Sports Engineering Association	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 S. Hara, H. Mamori, T. Miyazaki	4. 巻 85-108622
2. 論文標題 Influence of Curvature on Drag Reduction by Opposition Control in Turbulent Flow Along a Thin Cylinder	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Fluid Flow	6. 最初と最後の頁 1-15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 宮崎武	4. 巻 39
2. 論文標題 卓球とアーチェリーにおける流体力学	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ながれ（日本流体力学学会誌）	6. 最初と最後の頁 138-144
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 J. Ortiz, M. Ando, T. Miyazaki	4. 巻 7
2. 論文標題 Numerical Simulation of Wind Drift of Arrows on the Olympic Venue for Tokyo 2020	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Athens Journal of Sports	6. 最初と最後の頁 1-20
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.30958/ajspo	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 宮寄武、守裕也	4. 巻 38
2. 論文標題 身近なながれの制御	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ながれ（日本流体力学会誌）	6. 最初と最後の頁 443-448
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ortiz Julio, Anodo Masato, Murayama Kentaro, Miyazaki Takeshi, Sugiura Hiroki	4. 巻 22
2. 論文標題 Computation of the trajectory and attitude of arrows subject to background wind	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sports Engineering	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s12283-019-0302-9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 前迎博紀、Ortiz Julio、芹野厚志、宮寄武
2. 発表標題 アーチェリー矢の境界層流れにおける層流-乱流、乱流-層流遷移：加速度センサを用いた飛翔実験
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤一希、小野口貴仁、守裕也、宮寄武
2. 発表標題 矢の側面境界層の2次不安定性
3. 学会等名 日本流体力学会年会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 芹野厚志、Ortiz Julio、宮寄武、杉浦裕樹
2. 発表標題 加速度センサを用いたアーチェリー矢の飛翔実験
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 池田智彦、芹野厚志、中野裕太、宮寄武、高橋直也、岩津玲麿
2. 発表標題 先端形状が矢側面の境界層に与える影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩津玲麿、中野裕太、高橋直也、宮寄武
2. 発表標題 鏃を装着したアーチェリー用ベアシャフトをすぎる流れの数値計算
3. 学会等名 日本流体力学会年会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 安藤雅人、Ortiz Julio、宮寄武、杉浦裕樹
2. 発表標題 アーチェリー矢の飛翔軌道と飛翔姿勢に対する背景風の影響：A/C/E矢とX10矢の比較
3. 学会等名 日本流体力学会年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Ortiz Julio、安藤雅人、宮寄武
2. 発表標題 アーチェリー矢の飛翔軌道と飛翔姿勢～背景風による影響の推定～
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 長谷川俊成、芹野厚志、宮寄武、高橋直也、岩津玲磨
2. 発表標題 矢の側面境界層の線形不安定性解析
3. 学会等名 日本機械学会2018年度年次大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高橋 直也 (Takahashi Naoya) (40313423)	東京電機大学・工学部・教授 (32657)	
研究分担者	杉浦 裕樹 (Sugiura Hiroki) (90358664)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主任研究開発員 (82645)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------