

アーチェリーの矢羽根形状がシャフトの回転および振動特性に及ぼす影響に関する実験的研究*

Experimental study on the effect of archery arrow vane shape on shaft rotation and vibration characteristics

平野 孝典 Takanori HIRANO**

Abstract

Archery has many competitors around the world, and new materials are used for the parts of bows as technology develops in recent years. There are increasing number of unexplained areas of archery performance due to the diversification of new materials. One of them is the arrow feather (vane). Vane is roughly divided into rotary and non-rotary types. Since the rotary type is mainly the drag type, the arrow speed decreases. But if a lift type rotary vane can be developed, it is considered that a vane with better performance can be achieved because the rotational force can be obtained with lower drag. If we can clarify the characteristics and common points of vane that lead to higher scores, we can expect to develop new vanes. In wind tunnel experiments, using a jig with an arrow model, measurement and analysis were performed on the rotational performance and convergence performance of the arrow model at a uniform flow velocity of 20 m/s (1/3 of the actual arrow speed). To evaluate the performance of vane, the rotational performance was evaluated by the number of revolutions for each of the non-converging motion (at rest) and the converging motion (vibration), and the convergence performance was evaluated by the time until convergence of vibration of arrow shaft. In the performance evaluation of off-the-shelf products, it became clear that rotary vanes can be further classified into those with top pitches and those that do not, and those with many users worldwide do not have top pitches.

Keywords: Archery, Vane, Arrow, Wind tunnel experiment, Oscillation, Rotation, Texture

1. はじめに

オリンピック競技に指定され早150年もの歴史を持つアーチェリーであるが、競技に用いられる弓具等も時代の流れと共に進化し続けてきた⁽¹⁾。弓本体も木、マグネシウム、ジュラルミンを経てカーボンが登場し、矢ですら木、竹、アルミ、カーボンと来て現在はアルミニウムとカーボンの複合材料が主流になっている。多くのアマチュア競技者が数多くの製品の本質に迫るのは非常に困難である。

ヴェイン（矢羽根）は、弓具の中でも点数に結びつく大きな要因の一つであるが、最良のヴェインとは何かという質問の答えは明確ではない。弓具本体の性能評価では、競技者本人の感覚も大きな要素となってくるため、自身に適した選択を行うことは比較的困難ではないが、矢においてはその限りではない。これは、矢そのものが性能を発揮するのは弓から離別した後であるため、感覚で判断するのはほぼ不可能であるからである。的面での矢の集合率、分散の形状やパターン（以下グルーピング）を基に判断する手法が主流ではあるが、アマチュアでは、道具の選択ミスによる要素より分散に及ぼすヒューマンエラーの要素が遥かに大きくなってしまう。

アーチェリーの矢に関する研究では、安藤ら⁽²⁾、宮崎⁽³⁾、松本ら⁽⁴⁾、オルティスら⁽⁵⁾、長谷川ら⁽⁶⁾の研究報告があるが、これらは矢（シャフト）の振動に関する内容が主であり、矢羽根の影響や矢の回転については言及されていない。そのため、実際に矢が飛翔している場合に生じる矢の振動だけでなく、シャフトの回転も含めた研究が必要であると考えられる。矢の回転はヴェインによって生じるので、その特性を把握する

ことが重要である。

アーチェリーのヴェインの特徴は大きく三つあげられる。①風見鶏効果による早期の姿勢安定化、②ジャイロ効果による外乱への対抗及びパドックスの抑制、及び③立ち上がりの回転力の保持（前半の空気抵抗による回転力が後半の回転数を維持）である。矢は高回転である程外乱の影響を受けにくい、回転力はヴェインの空力抵抗で生じるので、回転数を高める程抵抗が増加して推進力が低下することになり、そのバランスが重要である。オリンピック競技である70mは回転式ヴェインが主流であるが、冬季に多く行われるインドア競技では、18mの短距離であるため、非回転式ヴェインも多く用いられている。

本研究では70mで用いられるヴェインを対象とし、世界中でプロ、アマ問わず愛用されている種々のヴェインの特徴を解析し、今後の製品開発における性能評価の指標とすること、また、これらのデータを基により高性能のヴェインの開発を目指すことを最終の目的としている。実際の矢は回転しながら振れ回り運動をするが、本報では研究の第一段階として、数種類のヴェイン（市販の非回転式と回転式ヴェイン及び、非回転式ヴェインの表面に粗さを付加した自作ヴェイン）について、矢が軸周りに回転しながら平面内で振動する場合について風洞実験を行い、各ヴェインの特性・特徴の把握と考察を行った。自作ヴェインについては、抗力で回転する現在のヴェインは飛翔速度を低下させる要因となるため、振動が収まっても揚力で回転し抗力による抵抗を抑える揚力型ヴェインの可能性を調べるために実験対象とした。

* 原稿受付 令和元年11月12日

**

2. 実験装置及び実験方法

ここでは実験装置及び実験方法について説明する。

2.1 風洞および試験装置

Fig. 1に風洞写真を示す。この風洞は75kW直流モータにより、測定部風速を0m/s～90m/sの範囲で設定可能である。吹出し口は幅1,600mm×高さ200mmの矩形断面で、出口上流500mmは平行部となっている。風速の設定には風洞吹出し口に設置した熱線式微風速計を用いた。実験装置はFig. 1に示す風洞吹出し口内の平行部に設けた吹出し口内部中央の丸穴位置に設置した。

Fig. 2に実験装置写真を、Fig. 3に設計図を示す。実験時は矢模型を風洞出口中心に設置した。Fig. 4に装置土台の軸受けに挿入する矢模型支持部詳細を示す。Fig. 4の図中に示す座標系の原点は鉛直支持軸と水平支持軸の交点である。矢模型支持部は $\phi 3$ mm、長さ145mmの鉛直支持軸（図中のz軸方向）及び、120グレーン（約7.8g_r）のポイント（矢尻）及び $\phi 2$ mm、長さ94mmの水平支持軸（図中のx軸方向であり主流方向をz軸回りの角度0°とする）で構成されている。水平支持軸の先端部10mmを $\phi 1$ mmに削り、長さ26mmのポイントを取り付けた。鉛直支持軸下部は台座上部のベアリングで支持されており、鉛直支持軸上部に固定された矢模型はz軸回りにxy水平面内で角振動が可能となっている。また、ポイントに接合された水平支持軸両端付近にマイクロベアリングが固定されており、 $\phi 4.6$ mm、長さ295mmのシャフト（シャシ）がシャフトの軸（x軸）回りに回転できる構造となっている。なお、鉛直支持軸は矢模型のほぼ重心位置で支持しており、ベアリングによる摩擦も非常に小さく軸のねじり剛性も高いので、z軸回りの振動における摩擦によるモーメントでの励振については考慮していない。シャフトはアーチェリー競技で使用されているEaston社製のA/C/Eを使用し、長さを295mmに加工し、水平支持軸をシャフトに挿入してマイクロベアリングに止めねじで固定した。実際の矢の振動はおよそ90Hzの1次モードのたわみ振動⁽²⁾であるが、本

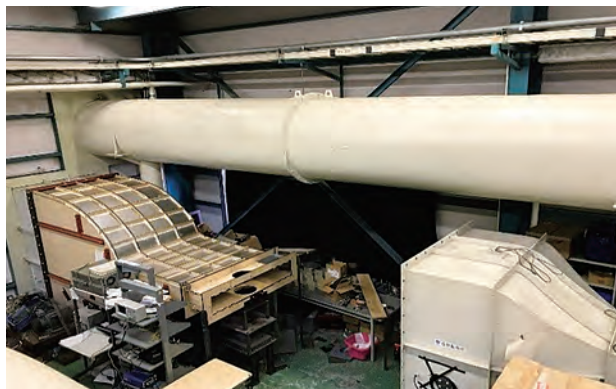


Fig. 1 Wind tunnel

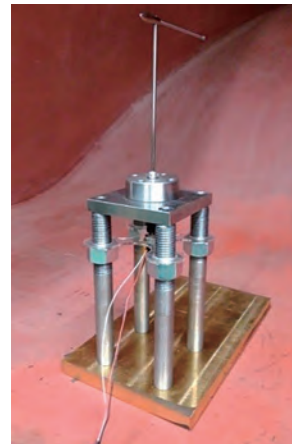


Fig. 2 Experimental equipment

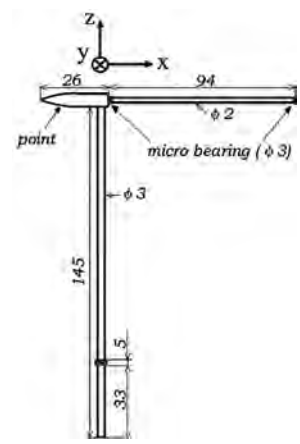


Fig. 4 Detail view

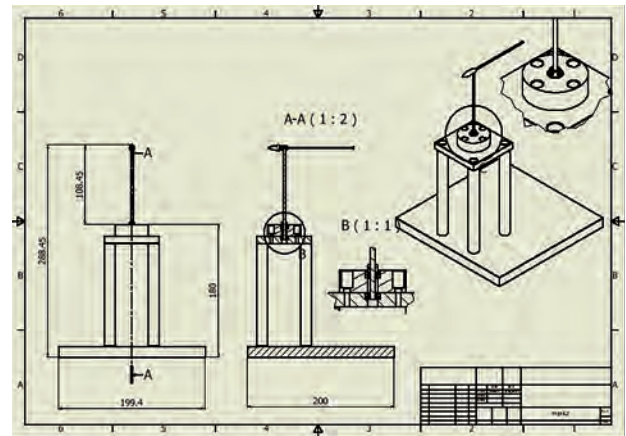


Fig. 3 Experimental equipment diagram

研究ではシャフト長さは約1/3であり実際の振動を模擬するものではないが、回転と振動の関係を調べるには有意であると考えられる。

2.2 測定方法および実験条件

Fig. 5に計測システムを示す。矢のシャフト回転数はシャフト先端部に貼付された白色テープとシャフトの黒色部分に当てたホワイトスポットセンサ（キーエンス社製LR-W500）の出力電圧（パルス状電圧）により計測した。シャフトの角振動は、支持ロッド下端に取り付けたポテンショメータ（緑測器製QP-2HC）の出力電圧により計測した。

本実験で対象とするヴェインは40種類（既製品8種、2種類の形状のヴェインにそれぞれ16パターンの異なるテクスチャを施したものの計32種）である。代表的なヴェインの写真をFig. 6 (a)～(c)に示す。また、表1に供試ヴェインの名称と詳細を示す。自作ヴェインのテクスチャパターンは格子、ハニカム、波、横スリット、縦スリット、ドット、テクスチャ無しの7種類とし、一つのパターンにつき2～3種類の縮尺で実験を行った。

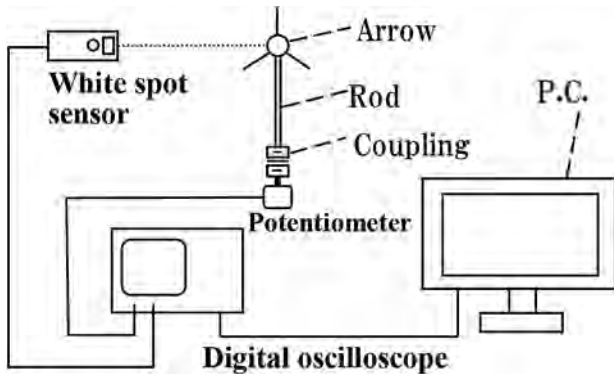


Fig. 5 Measurement system

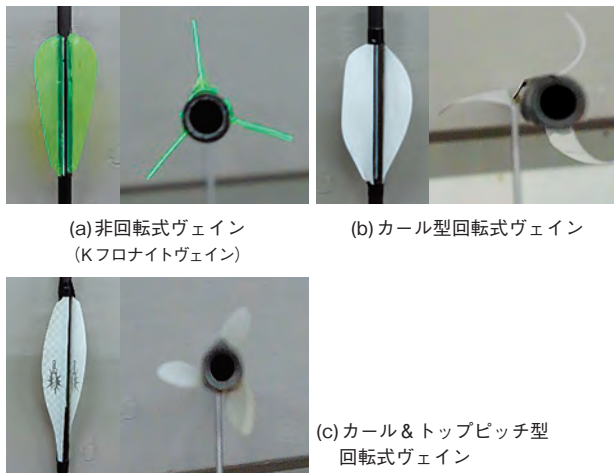


Fig. 6 Photographs of typical vane

- (a) Non-rotation vane
(b) Curl type rotation vane
(c) Curl & top-pitch type rotation vane

Table 1 Test vanes

既製品ヴェイン	xs ヴェイン, スピンウィング Spider ヴェイン, GAS PRO ERI ヴェイン, K フロナイト EP16, フレックスヴェイン
自作ヴェイン	2種類の形状 (丸形, 角形) のヴェインに16 パターンの異なるテクスチャを施した試作 ヴェイン: 計32種 テクスチャパターン: 格子, ハニカム, 波, 横スリット, 縦スリット, ドット, 無し: 計 7種類 (1つのパターンにつき3種類の縮尺)

実験は一樣流速20m/s (実際の矢速の1/3) で矢模型の回転性能及び収束性能を測定する。回転性能については、非収束時 (静定時) と収束運動時 (振動時) それぞれの回転数 (rev/sec) を計測する。収束性能については初期角度 30° 付近で矢模型をリリースし、角度 $0^\circ \pm 5\%$ に静定するまでの時間を計測する。非回転式ヴェインについては回転数の測定は行わず、

収束性能のみを測定する。計測データは一旦デジタルオシロスコープに保存された後、USB メモリーを介してパソコンに保存される。

3. 実験結果及び考察

ここでは実験で得られた各ヴェインの回転数と振動のデータを示し、考察した結果について述べる。

3.1 回転式ヴェインの分類及び性能評価

既製品のヴェインは大きく回転式と非回転式に分けられるが、本実験により回転式ヴェインにはカール (曲げ) によってのみ回転するものと、カール及びトップピッチ (流れに対する角度) により回転するものに分類されることが確認できた。

3.1.1 カール及びトップピッチ型

性能評価の例としてxs ヴェインの回転数と振動角変位の時間履歴を Fig. 7 (収束運動時) と Fig. 8 (非収束運動時) に示す。横軸は時間、左縦軸はポテンシオメータ出力電圧 (振動角変位を表し2Vは角度 0° を、4Vは 36° に相当)、右縦軸はシャフト回転数を示す。図中の赤線は振動角変位、青線はシャフト回転数である。Fig. 7を見ると、時刻0.3s付近でリリース直後に角振動を始めた矢は、減衰振動しながら1.5s以降は角度 0° (左縦軸の2V) に収束している。シャフトの回転

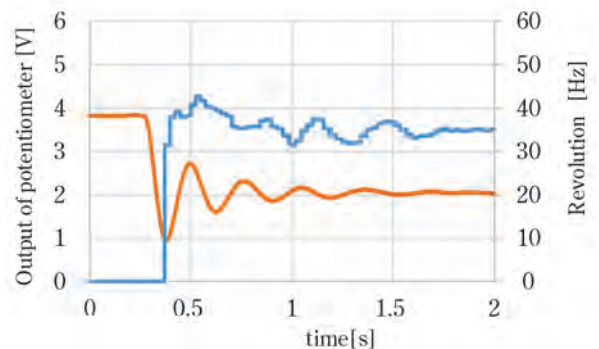


Fig. 7 Rotation speed and angular displacement of xs vane (at convergence)

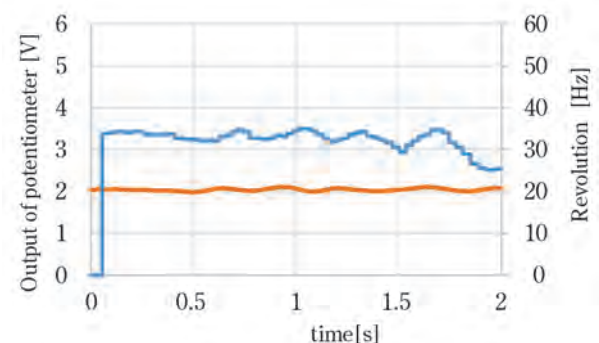


Fig. 8 Rotation speed and angular displacement of xs vane (at non-convergence)

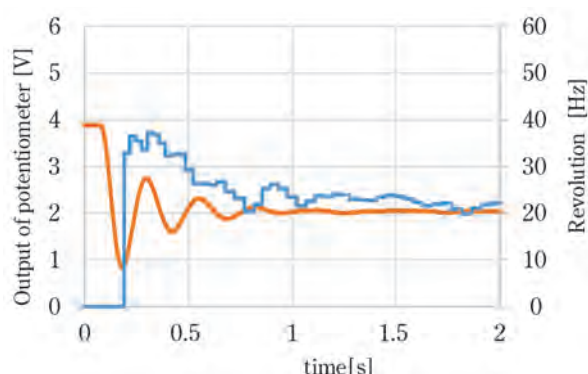


Fig. 9 Rotation speed and angular displacement of Spinwing (at convergence)

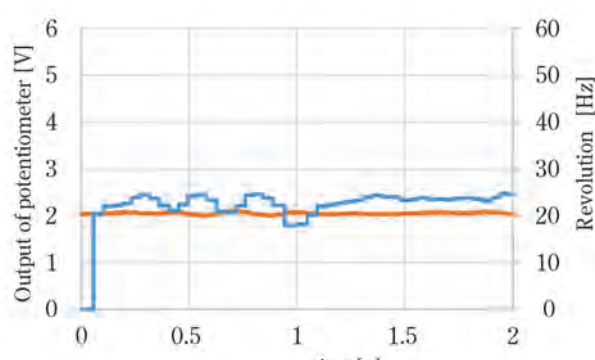


Fig. 10 Rotation speed and angular displacement of Spinwing (at non-convergence)

は0.4s付近から急速に大きくなっている。これは、矢の振動により生じる横風を受けてシャフトが急速に回転を始めることを意味している。Fig. 7より収束運動時の瞬間最高回転数が42.74rev/secであることが分かる。これはヴェインが持つカールにより、収束運動中に受けた横風により生じた回転力によるものである。以下これをカール効果と呼ぶ。その後時間が経過しても回転数は35rev/secのまま一定となっている。これはトップピッチによる回転力維持と考えられる。それに対しFig. 8の非収束運動時（初期角度0°）では、矢の角度は0°のままで振動していないにもかかわらず急速に回転を始め、最高回転数は34.97rev/secである。収束運動時と非収束運動時で7.77rev/secの差は見られたが、最高回転数の18.2%程度であり、振動が収束した後の回転数の低下が小さいことから、xsヴェインはカール及びトップピッチ型の回転式ヴェインに分類することができる。収束時間は1.283sであり、既製品のヴェインの中では平均的な値である。

3.1.2 カール型

カール型回転式ヴェインの一例として、スピンウィングの回転数と角振動変位の時間履歴をFig. 9（収束運動時）とFig. 10（非収束時）に示す。収束運動時の瞬間最高回転数が37.31rev/secであり、非収束運動時の最高回転数は24.75rev/sec

である。収束運動時と非収束運動時では12.56rev/secの回転数の差が見られ、これは最高回転数の33.7%に及ぶ、つまり振動収束後の回転数の低下が大きいことからカール型の回転式ヴェインに分類できる。収束時間は0.934sである。トップピッチを有さないヴェインにおいては、収束後角度が0°になるため、回転数が大きく下がる特徴があることが分かった。

3.2 自作ヴェイン

自作ヴェインにおいては上述の既製品のヴェインに見られるようなカール及びトップピッチは付加せず、表面テクスチャのみを施した。16種の異なるテクスチャを施した丸形と角形の2種類の形状のヴェイン（計32種類）を用いて試験を行った結果、全く収束しない物、全く回転しない物もあったが、25種類は回転、収束する結果となった。図には示さないが、テクスチャの効果については明確な差異があるとはいえない結果であった。原因としてはテクスチャの加工をレーザー加工機で行った際、テクスチャパターンによっては熱が集中し、ヴェインの裏面にも凹凸が生成されたことが挙げられる。しかしながら、中には回転数上昇に繋がった物もあることから、今後テクスチャ加工したヴェインにカールを施し性能を調べる予定である。

3.3 ヴェイン形状と回転数・振動抑制の総合的判定

回転数の高いヴェイン程収束性能も高くなると予想していたが、実際は却って回転数が高いヴェインは収束が遅い傾向にある事が分かった。この理由については不明である。回転数と振動の収束時間との関係をFig. 11に示す。図より、現在世界的に最も多く使用されているスピンウィングは、既製品のヴェインの中では回転数が低い部類に入るが、収束時間はかなり短いことが分かった。このことは、高性能ヴェイン、換言すれば使いやすいヴェインに求められる条件は、回転性能より収束性能にあることを示唆するものと考えられる。

また、本研究で作製した表面テクスチャを有する試作ヴェインは、Fig. 11に見られるように、その殆どが既製品ヴェインより高い収束性能を見せたが、これはヴェインの面積が既製品より大きく、振動に対して減衰力が増加したことにも起因すると推察され、飛翔時の飛行速度低下に繋がる可能性が高いと考えられる。今後、同一面積での比較実験が必要と考えている。

4. 結論

本研究では、既製品ヴェインの性能評価及び新型ヴェインの開発を主たる目的として、既製品と自作の数種類のヴェインについて、矢の回転性能と振動収束性能に及ぼす効果を風洞実験により調べた。今回は、カールの有無とヴェインに施したテクスチャに関する評価を行い、以下の結論を得た。

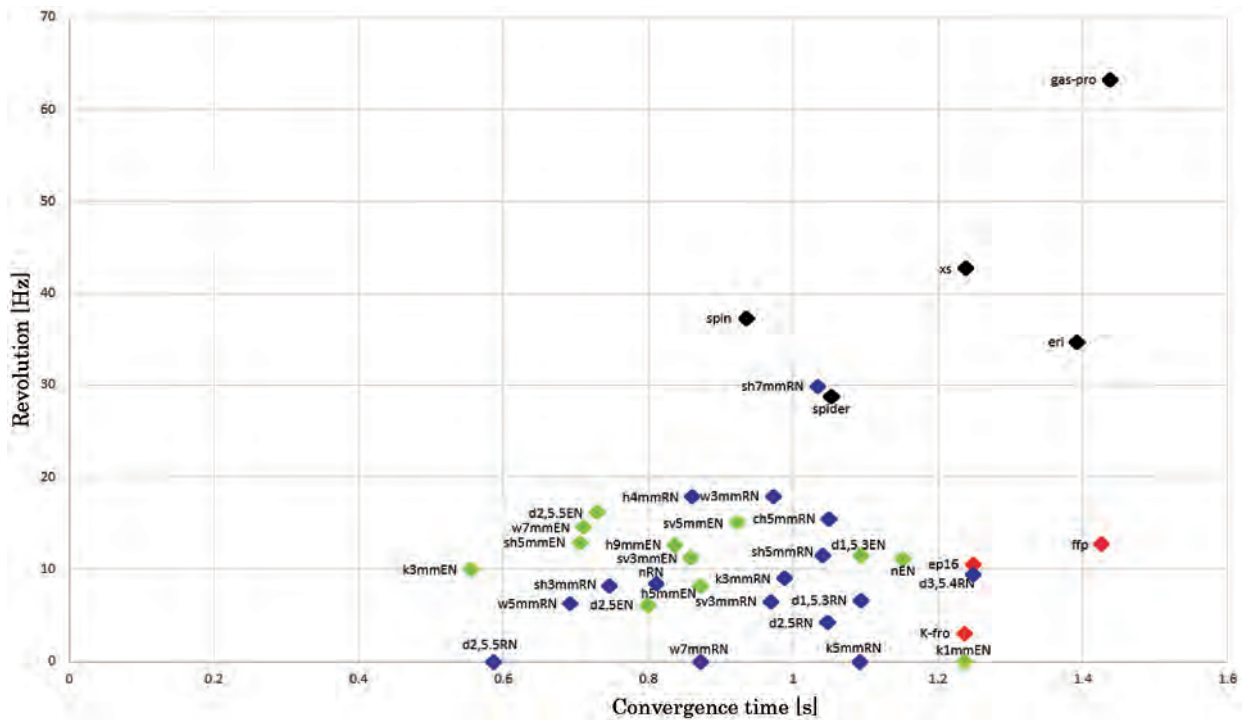


Fig. 11 Relationship between rotation speed and convergence time of arrow

- (1) 回転式のヴェインはトップピッチを有するものとならないものに分類でき、現在世界的にユーザーの多いヴェインはトップピッチを有さないカール式ヴェインであることが分かった。
- (2) 現在世界的に多く使用されているスピンウィングは、既製品ヴェインの中では回転数が低い部類に入るが、収束時間はかなり短いことから、高性能ヴェイン（使いやすいヴェイン）に求められる条件は、回転性能より収束性能にあることを示唆していると考えられる。
- (3) 有効面積が大きいヴェイン程、収束性能が高くなる傾向が見られる。
抗力で回転する現在のヴェインは飛翔速度を低下させる要因となるため、振動が収まっても揚力で回転し抗力による抵抗を抑える揚力型ヴェインの可能性として、表面テクスチャを施したヴェインについて調べた結果は以下の通りである。
- (4) ヴェイン表面にテクスチャを施したカールの無いヴェインでは、テクスチャのパターンによっては矢の回転数が増加する場合もある。しかし今回の実験では、テクスチャによる回転数増加の理由は必ずしも明白ではなく、テクスチャを施す有効性については不明である。
- (5) 今回の試作ヴェインはカールを付加するまでに至らなかったため、今後の研究では、本実験で回転性能及び収束性能が向上したテクスチャを施したヴェインに対しては更

にカールを付加し、回転式ヴェインとしての性能にテクスチャがどのような影響を及ぼすか検討する必要がある。

参考文献

- (1) 亀井孝, arechery.com. 弓の素材のこと (<https://www.a-rchery.com/bowl117.htm>)
- (2) 安藤龍, 他3名, アーチェリー矢の空力特性—たわみ振動の及ぼす影響—, 日本機械学会2014年度年次大会, J0520102, 2014
- (3) 宮寄武, アーチェリー矢の流体力学最前線, 日本機械学会2015年度年次大会, W231001, 2015
- (4) 松本樹昌, 他4名, アーチェリー矢の飛翔姿勢と乱流遷移, 日本機械学会2016年度年次大会, J2340101, 2016
- (5) フリオ・オルティス, 他2名, 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—, 日本機械学会2018年度年次大会, J2340203, 2018
- (6) 長谷川俊成, 他4名, 矢の側面境界層の線形安定性解析, 2018