A10 アーチェリー矢の空力特性 -JAXA's 60cm MSBS 実験-

Aerodynamic Properties of an Archery Arrow - JAXA's 60cm MSBS Experiments -

○小森 雄太 (電通大院), 向山 桂太 (電通大院), 宮崎 武 (電通大院)

東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, E-mail: Komori@miyazaki.mce.uec.ac.jp, miyazaki@mce.uec.ac.jp

杉浦 裕樹 (JAXA), 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

Yuta KOMORI, Keita MUKAIYAMA, Takeshi MIYAZAKI (UEC)

1-5-1 Chofugaoka Chofu, Tokyo, Japan

Hiroki SUGIURA (JAXA)

7-44-1, Higashimachi, Jindaiji, Chofu, Tokyo, Japan

We performed wind-tunnel experiments with two Archery arrows (X10, A/C/E) without mechanical support on JAXA's Magnetic Suspension & Balance System. We measured the relation between Reynolds number and drag coefficient, as well as we checked the relation between drag coefficient, lift coefficient and pitching-moment coefficient with the angle of attack. We found that the vanes impose a lift force and increase the orientational stability. In the available range of Reynolds ($0.3 \times 10^4 < Re < 2.5 \times 10^4$), the boundary layer on the arrow shaft remained laminar. We compared these results with experiments of arrows in free flight which we recorded with two high-speed video cameras. We also compared the results of X10's aerodynamic properties with A/C/E's.

1. 緒言

弓矢は狩猟の道具として 23 年以上前に開発され、今日では弓道・オリンピック競技のアーチェリーといったスポーツ用具として幅広い世代に親しまれている。これまで、競技者の動作や発射装置に関する研究は行われて来たが、矢の空力特性についての研究は少なく、Sawada⁽¹⁾ による矢羽のない矢 (鉄なしと円錐鏃) に関する風洞実験、和弓の矢の空力特性、クロスボウ矢の先端形状と空力特性の関係の解明⁽²⁾ に見られる程度である。飛翔中の矢は矢羽の影響により矢軸周りに回転するばかりでなく、たわみ振動するため、とても複雑な運動をしていることがその理由である。たわみ振動に目をつぶり、矢が剛体運動をすると仮定しても、矢のように非常に細長い物体の空力特性を風洞実験で測定する際には、固定支持具の存在が測定精度を大きく劣化させることが懸念される。また、飛翔中の矢は重心の進行に対して矢軸が傾いて飛翔している可能性がある。この場合には周回方向に波数 1 の攪乱が発生し、境界層に導入される。矢の側面が層流状態にあるか乱流状態にあるかは、流体力学的な観点からも興味深い問題である。

本研究では、アーチェリー矢を実験対象とし、JAXA の磁力支持天秤装置 (以降 MSBS と呼ぶ) を用いて、固定支持部のない風洞実験を行う。アスペクト比の異なるアーチェリー矢のシャフトを 2 種類 (X10, A/C/E)、鏃を 2 種類 (椎型、流線形) を用いて空力特性に及ぼす影響を調べる。「X10」の矢に関しては実際の射手が放つ矢の速度領域で測定を行うために、模型矢で実験を行う。

2. 無次元量の定義

本研究では以下の無次元量を使用して解析を行う。

2.1 マッハ数: M

流体の圧縮性の尺度となる無次元量であり、次式で定義される。

$$M = \frac{U}{a} \quad (1)$$

ただし、 U は流速 [m/s], a は音速 [m/s] である。

一般に $M < 0.3$ の流れでは、非圧縮性流体として取り扱うことが出来る。矢の速度は 60[m/s] 程度であり、マッハ数が 0.2 程度

となる。本研究では、圧縮性の影響は考慮しない。

2.2 レイノルズ数: Re 数

物体回りの流速をレイノルズ数を用いて、無次元化する。レイノルズ数は以下の式で定義する。

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (2)$$

ここで、 V は矢の速度 [m/s], d は矢の平均直径 [m], ν は空気動粘性係数 [m²/s] である。

2.3 抗力係数: C_D

抗力係数 C_D は以下の式で定義する。

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_D \quad (3)$$

ここで、 F_{drag} は抗力 [N], ρ は空気密度 [kg/m³], S は矢の断面積 [m²] である。また、飛翔実験においては速度減衰率 D [1/m] から、以下の式で C_D を求めた。

$$C_D = \frac{mD}{\rho S} \quad (4)$$

m は矢の質量 [kg] である。

2.4 揚力係数: C_L

揚力係数 C_L は以下の式で定義する。

$$F_{lift} = \frac{1}{2} \rho V^2 S C_L \quad (5)$$

ここで、 F_{lift} は揚力 [N] である。

2.5 縦揺れ (ピッチング) モーメント係数: C_m

縦揺れモーメント係数 C_m は以下の式で定義する。

$$M = \frac{1}{2} \rho V^2 S L C_m \quad (6)$$

ここで、 M は縦揺れモーメント [N・m], L は矢の全長 [m] である。

3. 実験装置及び模型

3.1 MSBS 風洞

JAXA の MSBS 風洞は循環式の低速風洞 (最大風速 45[m/s], 風速 30[m/s] での変動率 0.06 %) である。Fig1 の様に 0~9 のコ

イルを配置し、各コイルから生じる磁気力を制御することで、模型の支持を行う。通風時に測定物体を支持するために必要な電流値を測定することで、物体に働く空気力を求めることができる。

Fig. 1 コイル配置

Fig. 2 実験風景

3.2 矢

アーチェリー競技で使用されている矢、「X10」、「A/C/E」(Fig3)を用いた実験を行った。この2種類の実際の矢の直径は中心付近が最も太い樽型(パレル)形状になっている。しかし、今回風洞実験で用いた「X10」の模型(Fig4)は寸胴であり、樽型形状になっていない。矢の仕様をTable1に示した。実物の1.5倍のX10の模型を用いる。磁力支持するために、矢の内部にNd磁石を挿入した。

Fig. 3 アーチェリー矢(上: X10, 下: A/C/E)

Fig. 4 X10の模型

Table. 1 矢の仕様

シャフト	全長[m]	直径(平均)[m]	アスペクト比
X10	6.26×10^{-1}	4.82×10^{-3}	1.26×10^2
X10(模型)	1.00	7.98×10^{-3}	1.26×10^2
A/C/E	6.26×10^{-1}	5.24×10^{-3}	1.16×10^2

3.2.1 鏃

実験で使用する鏃2種類(椎型, 流線形)をFig5, 6に示す。実際の競技で使用するX10とA/C/Eの鏃形状はわずかに異なる。

Fig. 5 椎型

Fig. 6 流線形

Table. 2 鏃の仕様

矢の種類	鏃形状	全長[m]	重量[kg]
X10(模型)	椎型	1.91×10^{-2}	1.49×10^{-3}
X10(模型)	流線形	2.18×10^{-2}	1.36×10^{-3}
A/C/E	椎型	1.07×10^{-2}	2.01×10^{-3}
A/C/E	流線形	1.90×10^{-2}	2.49×10^{-3}

3.2.2 矢羽

本研究では、アーチェリー競技において広く使用されている、SPIN-WING-VANE(Range-O-Matic Archery Company社: Fig7下)の矢羽を用いた。X10の模型にはこの矢羽の模型を用いた(Fig7上)。各矢羽の仕様をTable3に示す。

3.3 飛翔実験

圧縮空気をを用いた発射装置による飛翔実験を行う。アーチェリー矢を発射し、高速ビデオカメラを2台用いて撮影し、その映像から速度減衰率Dを求め、(4)式によって抗力係数 C_D を算出

Fig. 7 矢羽(上: X10(模型)用, 下: A/C/E用)

Table. 3 矢羽の仕様

矢の種類	全長[m]	重量(3枚)[kg]
X10(模型)	6.59×10^{-2}	0.14×10^{-3}
A/C/E	4.45×10^{-2}	0.93×10^{-3}

する。算出方法の詳細は「ながれ2010」⁽²⁾を参照されたい。この飛翔実験は、国立スポーツ科学センター(JISS)の屋内競技場で測定を行った。

4. 実験結果

4.1 回転数-速度の関係

風洞実験および飛翔実験における回転数と速度の関係をそれぞれFig8, 9に示す。

Fig. 8 回転数-速度(X10)

Fig. 9 回転数-速度(A/C/E)

Fig8, 9より、回転数と速度は比例関係であること、回転数は先端形状の違いに依存しないことが分かる。X10を用いた場合、風洞実験と飛翔実験を比べると、風洞実験では矢の回転数が極端に低い結果となった。風洞実験では、矢の内部に挿入した磁石の軸対称性が悪く、矢が回転した時に矢の回転を妨げる向きにトルクが働いたことで、回転数が低くなったと考えられる。あるいは矢羽形状の問題が考えられる。今回実験で用いたアーチェリーの矢羽はカール形状という複雑な形状をしているため、模型用の矢羽ではその形状を再現しきれなかった可能性がある。A/C/Eを用いた場合、風洞実験および飛翔実験の回転数に差は見られなかった。よって、風洞実験では矢の飛翔状態を再現できたと言える。

4.2 矢の縦3分力特性

MSBSを用いた風洞実験では、矢の迎角 θ を気流に対して $-3^\circ \leq \theta \leq 3^\circ$ の間で変えて、縦3分力(抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L 、縦揺れモーメント係数 C_m)の測定を行った。Fig10~12に測定結果を示し、 Re 数領域が近い値において、X10とA/C/Eの比較を行った。また、Fig10~12は、X10およびA/C/Eの回転状態のデータである。

Fig10でX10とA/C/Eの抗力係数 C_D を比較すると、Fig10から迎角への依存性に大きな違いはない。両者とも矢の迎角が $\pm 0.5^\circ$ になると、境界層が層流から乱流に遷移する傾向が見られた。

次にFig11より、揚力は迎角と比例関係であることがわかる。また、アスペクト比の違いによる揚力係数 C_L への影響はほとんど見られなかった。揚力は主として矢羽の影響によるものと考えられる。

縦揺れモーメント係数 C_m は迎角と比例関係であり、これは矢の姿勢を示している。両者とも矢に迎角をつけた場合、矢の姿勢を気流に対して平行にもどす方向にトルクが働いている。両者を比較すると、X10の方が迎角に対する傾きは小さいことが分かる。このことから、アスペクト比の小さいA/C/Eのほうが姿勢安定度は大きいと言える。

Fig. 10 迎角と C_D

Fig. 11 迎角と C_L

Fig. 12 迎角と C_m

4.3 C_D の Re 数依存性

4.3.1 X10を用いた実験結果

X10を用いた風洞実験における、迎角 0° の C_D と Re 数依存性および飛行実験の結果をFig13に示す。

1. 風洞実験結果

X10の矢羽なしの状態でのデータを見ると、椎型鏃、流線形鏃ともに $Re \approx 1.8 \times 10^4$ まではほぼ同じ値となり、 Re 数の増加に伴い抗力係数 C_D が低減している。また、円柱の層流状態における抗力係数の理論値とほぼ一致していることから、境界層の状態は層流である。しかし、流線形鏃では $Re \approx 2.0 \times 10^4$ において C_D 値が大きく変化しているため、境界層が乱流遷移したと考えられる。流線形鏃が椎型鏃より先に遷移してしまったのは、鏃表面の粗

Fig. 13 C_D の Re 数依存性 (X10)

度の影響の可能性がある。

矢羽が有り、矢が回転しているデータでは、矢羽無しの状態の時と同様に、椎型と流線形の鏃でほぼ同じ値をとり、 $Re \approx 1.5 \times 10^4$ で C_D に大きな変化が見られる。この Re 数で、境界層が乱流に遷移したと考えられる。矢羽無しの時よりも、 Re 数が約25パーセント低いところで遷移している。また、層流および乱流状態での矢羽なしの時の測定結果と比較すると、 C_D は0.5ほど増加している。矢羽有りでは、 $1.0 \times 10^4 \leq Re \leq 1.5 \times 10^4$ において C_D が徐々に増加し、 $Re \approx 1.5 \times 10^4$ において C_D に大きな変化が見られ、回転してない場合、 $Re \approx 1.8 \times 10^4$ で C_D に大きな変化が見られ、回転してる時よりも高い Re 数まで境界層は層流状態であった。これは矢が回転しないことによって、境界層の遷移する位置が変化したと考えられる。

2. 飛行実験との比較

X10の矢における飛行実験との比較を行う。 $Re = 1.2 \sim 1.3 \times 10^4$ での C_D は、飛行実験の方が風洞実験より2.0程大きい。これは発射実験において、矢の姿勢制御が不十分であり、矢に迎角がついてしまったと考えられる。矢がたわみ振動する実際の射手による矢の C_D は、風洞実験での測定値より0.5大きい。これはたわみ振動の影響により矢の姿勢が不安定になったためだと考えられる。

4.3.2 アスペクト比の違う矢の比較

A/C/Eに対しても同様の実験を行いX10と比較を行った。Fig14には矢羽が無い時、Fig15にはA/C/E矢に矢羽がついている時の C_D の Re 数依存性を示した。円柱の層流状態における抗力係数の理論値において、X10とA/C/Eを比較すると、 C_D はX10の方が大きい。しかし、矢羽無し状態で $1.1 \times 10^4 < Re < 1.3 \times 10^4$ の Re 数領域を比較すると、 C_D に差は見られない。これは、A/C/E(樽型形状)の平均断面積を抗力の無次元化に用いたためであろう。A/C/E矢の矢羽有りの状態で、測定した Re 数領域 ($0.3 \times 10^4 < Re < 1.5 \times 10^4$) では、鏃形状に関わらず境界層は層流であった。

Fig. 14 C_D の Re 数依存性 (矢羽無し) Fig. 15 C_D の Re 数依存性 (A/C/E)

5. 結言

本研究では、アーチェリー矢である X10 矢の模型に対して、JAXA の MSBS 風洞実験を行った。また、アスペクト比が違う A/C/E 矢に対しても同様の実験を行い、両者を比較した。

- 回転数と速度の関係を調べた。速度が増加すると、回転数も比例して増加することが確認できた。A/C/E の矢を用いた風洞実験では実際の矢の飛行状態を再現することができた。しかし、X10 の矢を用いた風洞実験では、矢の回転数が飛行実験と比べて極端に違うことから、実際の飛行を再現するために今後検討する必要がある。
- アスペクト比の違う矢の縦 3 分力の比較を行った。アスペクト比の違いは、抗力と縦揺れモーメントに影響を及ぼすが、揚力には影響を及ぼさないことが分かった。
- X10(模型) における抗力係数 C_D の Re 数依存性を測定した。矢羽無しの場合、椎型鏝は乱流遷移せず、流線形鏝では乱流遷移が見られた。矢羽有りの場合、先端形状の違いによらず層流から乱流に遷移し、矢が回転している時は矢羽無しの時より Re 数が 25 パーセント低いところで遷移した。矢が回転していない時は Re 数が 10 パーセント低いところで乱流に遷移し、回転することで境界層の遷移する位置が変わった。
- アスペクト比の違う矢についての抗力係数 C_D の Re 数依存性の比較した。円柱の層流状態における抗力係数の理

論値では、アスペクト比の違いは見られるが、風洞実験の Re 数領域では大きな違いが見られなかった。

参考文献

- (1) Sawada, H.: Experimental Study of Aerodynamic Performance of Arrows with JAXA's 60cm Magnetic Suspension and Balance System, Theoretical and Applied Mechanics Japan, Vol.56, 2007, pp.237-242
- (2) 鈴木 一史: 矢の空力特性 - 境界層遷移に対する先端形状の影響 -, 日本流体力学会誌「ながれ」29(4) (2010) 289-292
- (3) 澤田 秀夫 & 国益 徹也: 低速風洞用 60cm 磁力支持装置の開発, 日本航空宇宙学会論文集, 50(508) (2002) 188-195
- (4) 須田 信一 & 澤田 秀夫: 風洞用磁力支持天秤装置, 日本設計工学会誌, 41(5) (2006) 235-241