

# トビウオの滑空能力の対する地面効果の影響に関する研究

076816 吉田 智  
指導教員 染矢 聡 准教授

It is known that Flying fish perform long-range flight in the air in order to escape from predators such as tuna and swordfish. During the unsteady flight, ground effect enabled the flying fish execute to flight for the maximum range and longest time. In this study, quantitative estimations of the flying fish gliding performance were investigated, in order to grasp a basic characteristic around the flying fish fin in ground effect. The streamwise velocity profiles around the airfoil model were measured by Dynamic PIV in an open loop wind tunnel. It was found that decreasing the height of the airfoil model produced an increase in the velocity difference occurred in the top and bottom of the airfoil model.

Key words: Flying fish, Ground effect, WIG, PIV, Wind tunnel

## 1 緒言

トビウオの滑空性能は非常に優れたものであり、海面上を長距離に渡って滑空することは広く知られている。生物学上の分類で魚類に属するトビウオは沿岸部に多く生息し、マグロやシイラなどの補食動物から逃れるため、海面付近で、最大飛距離は 400m、飛行速度は 55km/h にもおよぶ飛行能力を発揮する。他の魚類にはない特徴を持つトビウオは学術的な興味深さからも、種々の研究がなされており、特に航空力学の分野では翼型の最適化や航空機の高効率化を図るために、取り上げられてきた<sup>1,2)</sup>。

このトビウオは海面上を滑空する際に、地面効果と呼ばれる現象を利用してその滑空性能を向上させている。この地面効果とは、地面の近くで作用する翼が、拘束のない自由空間で作用する場合より大きな揚力を発生する現象を言い、現在では地面効果を考慮した海上高速輸送システムの開発・研究も行われている<sup>3)</sup>。しかし、地面効果の影響を受ける翼周りの流れ場については十分な研究がなされておらず、特に翼後流の特性についてはほとんど報告例がない。

そこで、本研究では、海面上で優れた滑空能力を発揮するトビウオに着目し、その胸鰭および腹鰭周りの流れ場を高速 PIV によって定量的に評価し、トビウオの滑空能力に対する地面効果の影響を把握することを目的とする。

## 2 実験

### 2.1 実験装置および実験方法

本研究では滑空するトビウオ周囲の流れ場を模擬するために吸い込み式低騒音風洞を用い、試験部に翼型を設置して実験を行った。PIV 解析を行う際の照明装置として高繰り返しパルスレーザー Pegasus-PIV (New Wave Research Inc.) を使用した。527nm のパルス光 (10mJ@2kHz) を円筒レンズでシート光に整え、試験部に照射した。風洞内部にはトレーサ粒子としてラスキンノズルで生成したオイルミストを充填させ、この反射光を高速カメラ FASTCAM-APX(RS 250K/250KC) (Photron Co., Ltd) にて撮影した。また、高速カメラとパルスレーザー装置はパルスジェネレータによって同期しており、

カメラ撮影速度およびパルスレーザーの発振周波数は共に 5kHz である。取得画像は各フレームの前後にパルス光を照射するフレームストラドリングを用いて撮影され、二枚の画像間隔は  $\Delta t = 30\mu\text{s}$  である。

実現象において、地面効果は固定された地面 (海面) と静止した流体の間を、翼のみが所定の速度で飛行する形で発生する。そのため、風洞実験では下壁面は流れに対して相対的に停止するよう、流れと同じ速度で平行に移動しなければならない。そこで、本研究ではノズル下部に独自の境界層除去装置を設置した。同種の実験では境界層除去装置として、風洞と同流速で可動するムービングベルトが用いられた例があるが<sup>4)</sup>、この装置は高速駆動が難しく、トビウオ滑空時のレイノルズ数 (約  $10^5$ ) を達成するには、筐体が非常に大きくなり、風洞構造の複雑化を避けることも難しい。

そこで、本研究では、比較的小型で、かつ境界層を除去し地面効果特性を厳密に評価できる境界層除去装置として、高速で回転する円盤装置を用いた。ここで、実験装置内に回転円盤を設置した際の測定部の概観を Fig. 1 に示す。図に示すように、回転円盤装置は円盤の中心線とノズル末端が一致するように設置されており、円盤の直径は 200mm である。本研究では、この円盤を高速で回転させることで、ある半径での周速度を風洞の流入流速と一致させ、発生する境界層を除去した。また、図に示すように、実験で使用される翼型は長さ  $L=315\text{mm}$ 、高さ  $H=75\text{mm}$ 、幅  $B=150\text{mm}$  の一様流速度場に置かれている。なお、本実験では座標原点  $O$  をノズルの中心にとり、流れ方向に  $x$  軸、水平方向に  $y$  軸、これらに直交する方向に  $z$  軸をとる。

本研究では、回転円盤装置で移動壁を模擬し、壁面上に発生する境界層をできるだけ薄くするように工夫したが、円盤上流で剥離が発生するなど、円盤の設置自体によって

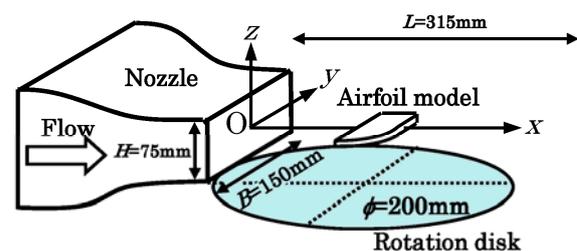


Fig. 1 Schematic of test section

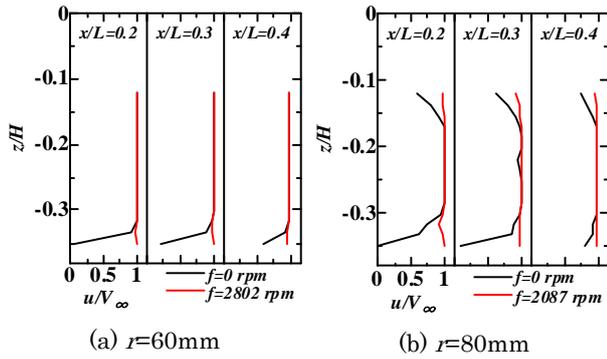


Fig. 2 Velocity profiles at each downstream location

流動状況が変化する場合もある。そこで、回転円盤を設置することで測定部に発生する境界層が除去されているかについて PIV 法による検証を行った。PIV 解析により得られた流れ方向速度  $u$  の  $z$  方向への変化を Fig. 2 に示す。ここで、Fig. 2 (a)は円盤の半径位置が  $r=60\text{mm}$  の場合、(b)は  $r=80\text{mm}$  の場合をそれぞれ示している。図に示すように、円盤が静止している場合 (図中黒線)、各下流位置での流れ方向速度  $u$  は  $z/H=-0.3$  以下で流入流速に対する変化が大きくなっており、固定壁による流れの剥離が発生していることが明確にわかる。また、半径位置が  $r=80\text{mm}$  の場合は  $z/H=-0.15$  付近においても流入流速に対する速度の減少が生じている。これは測定面が円盤外縁に近づくことで周囲からの巻き込み量が増加し、他断面から流入した流体がその断面の流動状況を変化させているためであると考えられる。一方、風洞の流速と同程度の回転数で円盤を回転させた場合 (図中赤線)、円盤近傍での主流速度に対する変化量は極めて小さいことがわかる。また、円盤を回転させ流れの剥離を抑制させた結果、半径位置が大きくなっていても周囲からの巻き込みによる影響は低減されており、境界層を除去していることがわかる。

## 2.2 試験体

本研究では、PIV 試験で用いる試験体として、実際のトビウオの胸鰭を模擬した 3 次元翼型を作製した。3 次元翼型の骨格構造には竹、骨格間の薄膜にはセルロースを用いた。本研究で用いた風洞装置は測定部の大きさに限りがあるため、実際のトビウオと同じ大きさをもつ翼型から遠く離れた下流を計測することは不可能である。すなわち、胸鰭と腹鰭の相互関係を調査することが出来ない。そこで本研究では、翼型の大きさを 1/2 サイズにスケールダウンし、さらに形状を簡略化させた 2 次元タンデム翼 (胸鰭、および腹鰭) も試験に用いた。

## 3 実験結果及び考察

### 3.1 3 次元翼型

(a) 3 次元翼の流体力特性 今回作製した 3 次元翼型に発生する流体力を調査するために、素子に圧力センサを用いた JR3 (JR3, Inc.) を使用し、翼型に作用する流れ方向の力 ( $F_x$ ) と鉛直方向の力 ( $F_z$ ) を測定した。ここで、測定の際は翼本体がもつ特性を把握するために、地面効果の影響は考慮しておらず、移動地面体となる回転円盤は翼下面に設置されていない。

3 次元翼型の翼弦長 ( $c=89\text{mm}$ ) を代表寸法とする際のレイノルズ数が  $Re=10.0 \times 10^4$  の場合、3 次元翼に作用する揚力係数は  $Cl=0.4$  程度であった。ここで、Kawachi<sup>(6)</sup> が行ったトビウオの滑空性能に関する計算結果によると、揚力係数は水平滑空時で  $0.8 \sim 1.4$  程度である。しかし、これらの結果は 1 つの翼型だけの評価ではなく、胸鰭および腹鰭の 2 対を含めたトビウオ本体の性能を評価している。そのため、今回作製した翼型は十分な揚力を発生させていると考えられる。

(b) 3 次元翼周りの速度場 実験結果の一例として、PIV 計測により得られた 1.2 秒間の時間平均速度分布を Fig. 3 に示す。この際の翼弦長  $c$  を代表寸法とするレイノルズ数は  $Re=9.44 \times 10^4$  であり実際のトビウオ滑空時と同等である。ここで、Fig. 3 は移動地面体となる回転円盤から翼型までの距離が  $h/c=0.16$  の場合を示している。ここで、移動地面体に用いられている回転円盤は、測定断面における  $x$  方向速度成分が風洞の流入流速  $V_\infty=16.4\text{m/s}$  と同速度になるように制御され、本実験における回転数は  $f=2614\text{rpm}$  であった。また、可視化断面は翼型の中央部である。図中に記載している黒の破線は  $z$  軸の原点であり、翼型の中心となっている。

Figure 3 に示すように、流体は翼型の上流からほぼ一様に流れ込んでおり、翼型の上部では翼前縁部で剥離した流体が翼型に沿って流れていることがわかる。また、翼型の下部では、移動地面体により、下壁面における境界層の発達を抑えている。さらに、翼型のごく近傍でも流れ方向に流体が流れており、これは翼下部でより顕著に確認された。紙面の都合上、図示しないが、 $h/c=0.36$  以上では  $z/c=-0.1$  以下の翼下部での速度が遅くなっており、特に  $x/c=0.7$ ,  $z/c=-0.1$  付近での速度はより遅くなっていることが確認された。この速度減少は翼型の凹凸面による影響で、トビウオの胸鰭がもつ形状が流れ構造に影響を与えているためであると考えられる。しかし、翼型近傍の流れ場の傾向はどの地面距離においても同様であることから、翼型の上流部では、地面距離は流れに影響を与えていないと考えられる。

そこで、胸鰭翼型の下流部である  $x/c=1.2$  以降の流動状況について詳しく検討した。Figure 4 は流れ方向速度  $u$  の  $z$  方向への変化を示している。この図において、○印は翼型と地面の距離が  $h/c=0.16$  の場合、×印は  $h/c=0.46$  の場合の速度情報をそれぞれ示している。図に示すように、翼型から遠く離れた  $x/c=1.8$  の下流位置では、両者の速度分布はほぼ一致しており、地面からの距離は流れに影響を与えていないことがわかる。その位置より  $x/c=0.2$  (実寸で  $17.8\text{mm}$ ) 上流である  $x/c=1.6$  の位置では、地面からの距離が離れた  $h/c=0.46$  の場合に速度が小さくなっていることが確認できる。ここで、特に翼型に近い  $z/c=-0.05$  から  $-0.1$  の位置では両者に変化がないが、 $z/c=-0.1$  以降では両者の差が大きくなっており、地面距離が流れに影響を与えていると考えられる。さらに、上流域である  $x/c=1.4$  の位置でもこの傾向は同様に確認することができ、翼型から

地面までの距離が長い場合( $h/c=0.46$ )は、その距離が短い場合( $h/c=0.16$ )に比べ、翼の下部で速度が減少していることがわかる。また、翼型の後縁部から  $x/c=0.2$  (実寸で 17.8mm) 離れた  $x/c=1.2$  の位置では、 $h/c=0.46$  の場合に速度が小さくなっているだけでなく、その分布形状も大きく異なっている。これは、図に示す○印と×印での両者の違いは地面からの距離だけであることから、地面効果が翼型後方の流れ構造に影響を与えていると考えられる。この地面距離の影響をより調査した  $h/c=0.16$ , および  $0.46$  の下流方向への速度変化を Fig. 5 に示す。図に示すように翼型から遠く離れた  $x/c=2.0$  の位置での速度は流入流速の 8 割程度に収束していることがわかる。一般的に自由空間に設置された翼型下部では、翼上部の前縁部で流れが剥離するため、周囲に比べ速度が減少する。やがて、翼型から離れた下流になると周囲と同程度の速度まで上昇する。このような傾向は  $h/c=0.46$  の場合に確認することができる。しかし、 $h/c=0.16$  の場合では、翼型の極下流である  $x/c=1.0$  付近での速度が最も速く、下流に行くに従い徐々に遅くなっていることがわかる。これは、翼型と地面との距離が短いために、翼型の下部に流入する流速が増加したためである。また、Fig. 5 に示す下流方向の速度変化は両者の傾向だけでなく、速度差も大きいことがわかる。これは、翼下部( $x/c=1.0$ )と翼下流( $x/c=2.0$ )での相対的な圧力差が生じているためであると考えられる。ここで、実際のトビウオの胸鰭と腹鰭の位置関係について着目してみると、胸鰭の後方に位置する腹鰭は  $x/c=1.4$  から  $2.2$  の区間に位置している。このことから、実際のトビウオは地面効果を利用し滑空する際に、胸鰭と腹鰭の両者を使うことで、その能力を向上させていることが考えられる。

### 3.2 2次元翼型

**(a) 2次元翼周りの速度場** 本研究では、3次元翼型からある程度離れた下流において、地面効果の影響が確認された。実際のトビウオでは胸鰭後方に腹鰭が位置していることから、両者の相互作用が流動状況に大きな影響を与えていると考えられる。そこで、本研究では 1/2 サイズにスケールダウンした胸鰭と腹鰭のアクリル製 2次元タンデム翼を作製し、その翼型を用いて PIV 試験を行った。

Figure 6 に 2次元平板翼周りの時間平均速度分布を示す。この際の翼弦長( $c=44.5\text{mm}$ )を代表寸法とするレイノルズ数は  $Re=6.4\times 10^4$  である。ここで、翼型の仰角は胸鰭が  $\alpha=10^\circ$ 、腹鰭は  $\alpha=0^\circ$  であり、可視化断面は翼型の中央部である。図に示すように、どちらの地面距離でも、胸鰭と腹鰭の各翼型の前縁部で流れが剥離しており、胸鰭の後縁部で速度が最も遅くなっている。その後、剥離した流れはその後方に設置された腹鰭の上部で、下部から剥離してきた流れと合流していることがわかる。また、地面距離が短い  $h/c=0.3$  での速度分布(Fig. 6 (a))では、 $h/c=0.6$  の場合(Fig. 6 (b))に比べ、腹鰭での剥離量が多く、その角度も大きくなっていることがわかる。これは、 $h/c=0.3$  の場合では、腹鰭と地面の距離が極めて接近しているため、腹鰭

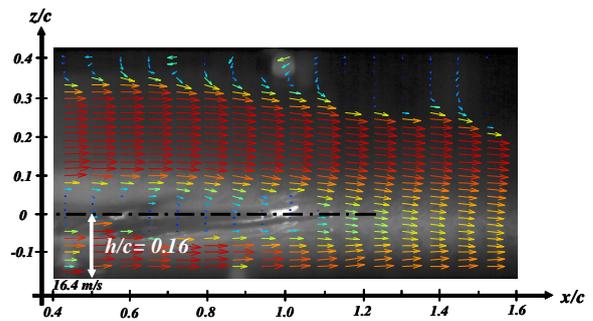


Fig. 3 Time-averaged velocity field around the three-dimensional airfoil model

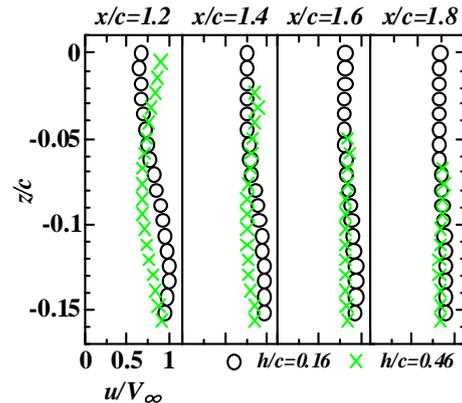


Fig. 4 Comparison of time-averaged velocity profiles

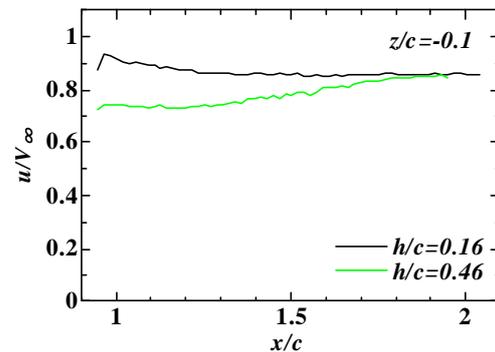


Fig. 5 Variation to the downstream location of time-averaged velocity

の下部に流入する流体が少なく、腹鰭の前縁部で流れがせき止められているためである。一方、 $h/c=0.6$  の場合では、腹鰭は下部に十分広い領域があるため、腹鰭上下での剥離量および剥離角は同程度である。また、腹鰭の上部では、胸鰭の影響で一度減速した流れが流入するため、腹鰭下部に比べ速度が小さくなっていることがわかる。

**(b) 地面効果が翼型に与える影響** 3次元翼を用いた実験では、 $h/c=0.16$  で地面効果による影響が確認されたが、胸鰭後方に腹鰭を設置することで、地面距離が長くなった  $h/c=0.3$  でも地面距離の影響が確認された。本研究では、速度という一つの物理量を用いて、胸鰭および腹鰭まわりの流れ場を評価してきた。流れ場を定量的に評価する際、この局所速度を用いることで流れ場の流動状況を把握することができるが、翼型に作用する力や実際の滑空性能に

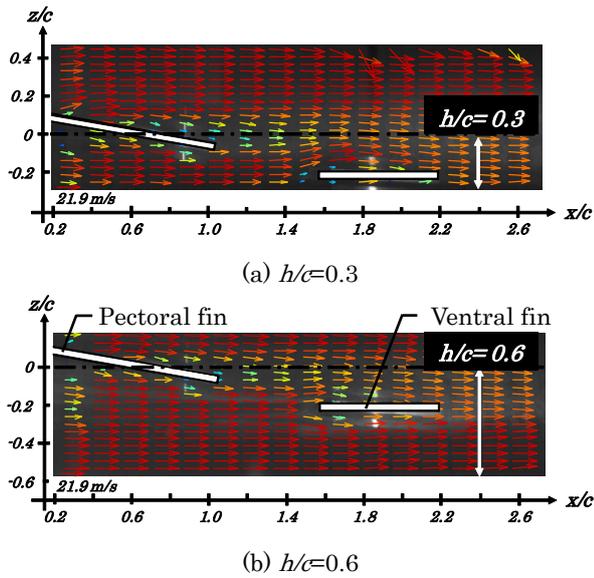


Fig. 6 Time-averaged velocity field around the pectoral and ventral fin model

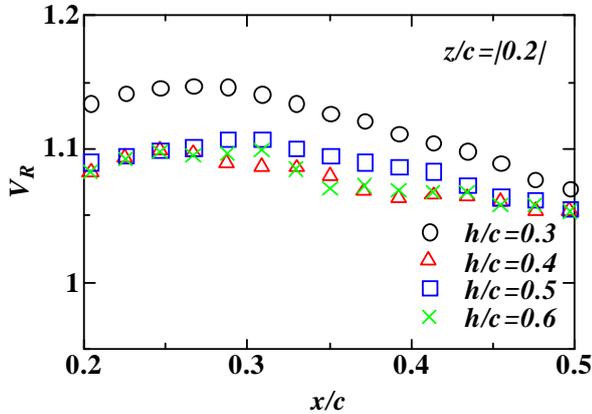


Fig. 7 Variation of velocity ratio at the several heights

ついて考察を行うこと難しい。そこで、地面効果が両翼型に与える影響について調査するために、PIV計測で得られた速度  $V$  の無次元数  $V_R$  を用いた考察を行った。Figure 7 はそれらの結果を示している。ここで、 $V_R$  は翼型中心から等間隔に離れた位置での速度の比であり、翼型中心を基準にし、上部 ( $z/c=0.2$ ) の速度を下部 ( $z/c=-0.2$ ) の速度で割った値である。図に示すように、どの地面距離でも、胸鰭翼型の上下で速度差が生じており、上部の速度が速くなっていることがわかる。すなわち、翼型の上下において速度差が生じているため、相対的な圧力は翼の下部が高くなっている。そのため、翼型には下から上方向に力が作用している。この力が翼全体に作用すると揚力となり物体を鉛直方向に浮上させる力となる。また、ここで地面距離に着目すると、地面から翼型までの距離が最も短い  $h/c=0.3$  の場合に、この速度差は最も大きくなっていることがわかる。また、この距離よりも長い  $h/c=0.4$  以上でも同様に速度差は確認されているが、 $h/c=0.3$  と比べると、その差は顕著ではない。すなわち、地面距離が翼型の揚力向上に寄与しており、本研究の範囲では、 $h/c=0.3$  の場合にその影響が顕著に表れている。これは、地面距離が短くなることで、

腹鰭下部への流体の流入が遮られ、腹鰭上部で剥離量が増加し、腹鰭上部の速度が増加する。この速度増加が上部に影響を与え、胸鰭上下での速度差が大きくなると考えられる。

以上のことから、腹鰭の役割は直接的に揚力を発生させることではなく、地面近傍で腹鰭周りの流動状況を変化させることにより、胸鰭で発生する揚力を向上させているのではないかと考えられる。

## 結論

本研究では、海面近傍を滑空することで、優れた滑空能力を発揮するトビウオの胸鰭および腹鰭周りの流れ構造を調査するために、地面効果を考慮した高速風洞装置、およびトビウオと同じアスペクト比を持った翼型を作製し、流れ場に高速 PIV システムを適用することで流れ場の定量的な評価を行った。

その結果、上記の地面効果を考慮した翼型周囲の流れ場について以下のことを確認した。

1. 翼型近傍の上流部における流れ場の傾向はどの地面距離においても同様であるが、翼型下流では、地面効果の影響が上流部に比べ顕著に確認された。特に、翼の極近傍においては3次元翼のもつ格子間の凹凸面の影響により流動状況が複雑になる。
2. 実際のトビウオは地面効果を利用して滑空する際に、胸鰭と腹鰭の両者を使うことで、その能力を向上させている。
3. 胸鰭の後方に位置している腹鰭の役割は直接的に揚力を発生させることではなく、地面近傍で腹鰭周りの流動状況を変化させることにより、胸鰭で発生する揚力を向上させている。

## 文献

- 1) J. Davenport, How and why do flying fish fly?, *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, **4** (1994) pp.184-214.
- 2) J. Davenport, Wingloading, stability and morphometric relationships in flying fish (Exocoetidae) from the north-eastern Atlantic, *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, **70** (1992) pp. 25-39.
- 3) K. V. Rozhdestvensky, Wing-in-ground effect vehicles, *Progress in Aerospace Science*, **42** (2006) pp. 211-283.
- 4) K. Burgin, P. C. Adey, and J. P. Beatham, Wind tunnel tests on road vehicle models using a moving belt simulation of ground effect, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **22** (1986) pp. 227-236.
- 5) K. Kawachi, Y. Inada, and A. Azuma, Optical flight path of flying fish, *Journal of Theoretical Biology*, **163** (1993), pp. 145-159.