トビウオの滑空における地面効果の影響に関する研究*

染 矢 聡^{*1,*2}, 吉 田 智^{*3}
李 艶 栄^{*3}, 岡 本 孝 司^{*2}

Study on the Flow around a Flying Fish Fin in Ground Effect

Satoshi SOMEYA^{*4}, Satoshi YOSHIDA,
Yanrong LI and Koji OKAMOTO

^{*4} Energy Technology Research Institutes of AIST,
1-2-1 Namiki, Tsukuba-shi, Ibaraki, 305-8564 Japan,
Graduate School of Frontier Science, The University of Tokyo,
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa-shi, Chiba, 277-8563 Japan

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 enables the flying fish execute to flight for the maximum range and longest time. In this study, it was investigated a basic characteristic of the flow around the flying fish fin in ground effect, in order to understand the flying fish gliding performance quantitatively. The streamwise velocity profiles around the airfoil model were measured by a high time-resolved PIV (particle image velocimetry) in an open loop wind tunnel. A moving ground essential to generate the ground effect was supplied using a rotating disk. Two plates were put in tandem as the test wing model of a pectoral fin and a ventral fin of the flying fish. It was found that decreasing the height of the airfoil model caused a larger difference between the velocity in the suction surface side and that in the pressure surface side of the pectoral fin model.

Key Words: Flying Fish, Ground Effect, WIG, PIV, Wing Tunnel, Airfoil, Bio-Fluid Mechanics

1. 結 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捕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^{1,2)}。Davenport はこれまでにトビウオやその他の海面上を滑空する動物について、その滑空と地面効果の関連性について種々の研究を行ってきており、地面効果を利用することで、滑空飛距離は15%程度向上するという計算結果を報告している^{1,2)}。Kawachi ら³⁾は、本研究で取り上げているトビウオと同種のトビウオを用いて、その滑空飛距離についての考察を行った。翼幅は同じ大きさの鳥に比

べて、やや小さく、翼面積も質量に比べ小さめである。翼面荷重は約100N/m²であり、鳥よりは大きめであることから、滑空速度は鳥より速いと考えられる。また、胸鰭(主翼)のアスペクト比は約6で、これらの値は羽ばたき飛行する鳥と同等の値であり、滑空する鳥よりは小さい。

また、Nishino ら^{4,5)}は、一様流れ場に円柱を設置し、その円柱から地面(可動壁)までの距離を変化させ、円柱に作用する流体力、および円柱周りの渦構造についての地面効果特性について調査している。

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⁶⁾。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によって測定し、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。

* 原稿受付 2009年4月3日。

^{*1} 正員、(独)産業技術総合研究所(☎305-8564 つくば市並木1-2-1)。

^{*2} 正員、東京大学大学院新領域創成科学研究科(☎277-8563 柏市柏の葉5-1-5)。

^{*3} 東京大学大学院新領域創成科学研究科。

E-mail: some@some-ya.net

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 (最大 10W) をシリンドリカルレンズでシート光に整え、試験部に照射した。風洞は開放型であるため、風洞への流入口手前でオイルミストを含んだ空気を放出し、これを風洞内部に取り込んだ。オイルミストレーサは小型コンプレッサーとラスキンノズルで生成した。実験ではレーサ粒子からの反射光を高速度カメラ FASTCAM-APX(RS 250K/250KC) (Photron Co., Ltd) にて撮影した。また、高速度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ロ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、地面効果に関する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、流れと同じ速度で主流方向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⁷⁾があるが、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て地面効果特性を評価できる境界層除去装置として、高速で回転するステッピングモーターを利用した円盤装置を検討した。

実験装置内に回転円盤を設置した際の測定部の概観を図 1 に示す。図に示すように、回転円盤装置は円盤の

Fig. 1 Schematic of test section

中心線と吸い込みノズル下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。

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、流動状況が変化する可能性もある。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 方向への変化を図 2 に示す。ここで、図 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。また、図 2 では風洞吸い込み口の高さ $H=75\text{mm}$ 、流れ方向の風洞内流路長さ $L=315\text{mm}$ を用い、風洞吸い込み口中心を原点とした流れ方向距離 x 、高さ z を用いた。ここでは円盤は $z/H=-0.36$ の位置に設置してあり、風洞の流入流速 $V_\infty=17.5\text{m/s}$ 、ノズル奥行き方向の長さ 150mm を代表寸法としたレイノルズ数は 1.69×10^5 、円盤半径 $r=60(80)$ の位置で V_∞ と同じ周速度を持つために必要な回転数は $f=2802(2087)\text{rpm}$ である。なお、円盤を設置していない条件で、速度一様場とみなせる領域は $|z/H| \leq 0.4$ 、 $|y/B| \leq 0.4$ および $x/L \leq 0.45$ であった。 u は 1.2 秒間、瞬時ベクトル 3000 時刻分の時間平均であり、 $z/H=-0.24$ の位置で $r=60\text{mm}$ 、 $x/L=0.2$ の場合の RMS 値が 2.0%、その他の条件では 0.7% 以下であった。

Fig. 2 Velocity profiles at each downstream location

図に示すように、円盤が静止している場合 (図中実線)、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（図中破線），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。

(a) Pectoral and ventral fin size of flying fish

(b) Three dimensional pectoral fin model

(c) Pectoral and ventral fin model (1/2 scale)

Fig.3 Pictures of a flying fish and wing models

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(図3(a))を模擬した3次元翼型(図3(b))を作製した。3次元翼型の骨格構造には竹、骨格間の糊剤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、アクリル製、厚さ2mm)(図3(c))も試験に用いた。

3. 実験結果及び考察

3・1 3次元翼型

3・1・1 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、力トルクセンサ(JR3, Inc.)を使用し、翼型に作用する流れ方向の力と鉛直方向の力を測定した。測定で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0.4程度であった。Kawachi³⁾ら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、2対の胸鰭—腹鰭を含めた場合のトビウオ全体について測定した揚力係数は水平滑空時で0.8~1.4程度である。本実験で測定した値は胸鰭のみ1枚としたケースであり、今回作製した翼型は単体としては十分な揚力を発生させていると考えられる。

Fig.4 Schematic of the experimental setup

3・1・2 3次元翼周りの速度場 実験時の翼設置位置を図4に示した。測定断面は常に吸い込みノズル中央($y=0$)の位置とし、翼前縁部を吸い込み口から11mm下流に設置した。仰角は測定断面位置で 10° とした。翼は根もと部に35x21x43 mmの糊剤塊を溶着させ、これを光学ステージに固定して設置位置を定めた。この位置を原点として流れ方向の位置 x を定め、翼弦長 $c=89\text{mm}$ を用いて規格化した x/c で以後の議論を行う。また、高さ z は翼中心を原点とし、回転円盤から翼中心までの高さ、すな

わち翼の設置高さを h とする。風洞吸い込み口の底面から 10mm 上に回転円盤を設置した。

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図 5 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、図 5 は移動地面体となる回転円盤から翼型までの距離が $h/c=0.16$ および 0.36 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。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。

Fig.5 Time averaged velocity field around 1/scale model

地面距離の近い場合、図 5 上図に示すように、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。また、 $h/c=0.36$ 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。なお、本研究では胸鰭の仰角と流入流速条件を固定しており、また、カメラのワーキングディスタンスやレーザー強度不足などに起

因する空間解像度の問題から、翼前縁の剥離点近傍の流れについて、翼設置高さの影響による有意な差を検出できなかった。そこで翼前縁部よりむしろ翼後方の流れに着目して実験を行ったため図 5 には翼前縁部は含まれていない。また、以降の実験についても速度分布に差が見られた翼後流部に着目して行った。なお、3 次元翼の場合、特に翼の前縁部や測定断面より外側(翼の端部)では、ある程度の変形が生じていると考えられるが、仰角(設置角)と流入流速条件を固定した本研究の実験ではこれらの変形の影響について考慮していない。

Fig.6 Comparison of time-averaged velocity profiles

Fig.7 Normalized horizontal velocity at downstream

得られた速度分布を基に、胸鰭翼型の下流部である $x/c=1.2$ 以降の流れ状況について詳しく検討した。図 6 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 17.8mm) 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、 $z/c=0.1$ より下部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下部の流れ構造に影響を与えているといえる。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図7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。図7に示す下流方向の速度変化は、 $h/c=0.16$, 0.46 の場合で、翼と地面との距離が大きい場合には翼型下部 ($z/c=-0.1$) での速度が小さくなるのに対し、地面距離が小さい場合には翼型下部での流れが速くなっているという傾向の違いに加え、例えば $x/c=1$ での両者の速度の差は風洞流入流速の20%となり、地面距離によって速度の値も大きく変化した。図7は平均速度を示しているが、測定時における流れ方向の速度変動の分散は平均速度の0.4%程度であり、図7に示した地面距離による平均速度の差は乱れによる速度変動に比べて非常に大きい。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

3・2・1 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亚克力製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。

Fig.8 Time-averaged velocity field around the pectoral and ventral fin model

図8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。ここで翼型の配置は図3(c)のとおりであり、仰角は胸鰭が $\alpha=10^\circ$ 、腹鰭は $\alpha=0^\circ$ に固定し、可視化断面は翼型の中央部である。図に示すように、 $h/c=0.3$, 0.6 の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(図8(上))では、 $h/c=0.6$ の場合(図8(下))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。

3・2・2 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、胸鰭の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ついて考察を行うことは難しい。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。

Fig.9 Variation of velocity ratio at different heights

図9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、翼型中心を基準とし、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。この速度増加が上流部に影響を与え、胸鰭上下での速度差が大きくなると考えられる。

トビウオはその重心や仰角を変化させることで揚抗比を制御して滑空しているものと思われるが、速度や仰角

を固定した本研究の結果から、少なくとも腹鰭の役割の一つとして、地面効果によって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。

4. 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、高速風洞装置内に回転円盤を設置した小型の地面効果生成装置、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、流れ場を高速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) 翼型下流において、地面効果の影響が上流部に比べて顕著に確認された。
- 2) 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。
- 3) 胸鰭の後方に位置している腹鰭は、その役割の一つとして、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) Davenport, J., How and why do flying fish fly?, *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, Vol.4 (1994) pp.184-214.
- (2) Davenport, J., Wing-loading, stability and morphometric relationships in flying fish (Exocoetidae) from the north-eastern Atlantic, *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, Vol.72 (1992) pp. 25-39.
- (3) Kawachi, K., Inada, Y. and Azuma, A., Optimal flight path of flying fish, *Journal of Theoretical Biology*, Vol.163 (1993), pp. 145-159.
- (4) Nishino, T., Roberts, G.T. and Zhang, X., Vortex shedding from a circular cylinder near a moving ground, *Physics of Fluids*, Vol.19 (2007) pp.1-12.
- (5) Nishino, T., Roberts, G.T. and Zhang, X., Unsteady RANS and detached-eddy simulations of flow around a circular cylinder in ground effect, *Journal of Fluids and Structures*, Vol.24 (2008) pp.18-33.
- (6) Rozhdestvensky, K.V., Wing-in-ground effect vehicles, *Progress in Aerospace Science*, Vol.42 (2006) pp. 211-283.
- (7) Burgin, K., Adey, P.C. and Beatham, J.P., Wind tunnel tests on road vehicle models using a moving belt simulation of ground effect, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.22 (1986) pp. 227-236.