The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	トビウオの魚体と飛翔に関する基礎研究 I : 魚体の特性と性質に関する基礎実験と考察
Author(s)	吉野, 勝美; 牧野, 正知; 塩村, 隆信 他
Citation	電気材料技術雑誌. 2015, 24(1), p. 41-50
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/76098
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

トビウオの魚体と飛翔に関する基礎研究Ⅰ

－魚体の特性と性質に関する基礎実験と考察－

吉野勝美[1]、牧野正知[1]、塩村隆信[1]、瀧山直之[1]、小松原聡[1]、福田健一[1]、
河村　進[1]、高橋哲也[2]

[1]島根県産業技術センター　690-0816 島根県松江市北陵町 1
[2]島根大学教育学部　690-8504 島根県松江市西川津町 1060

要旨　トビウオのヒレと骨、ヒレ膜などの構造と性質、特徴を調べ、さらにシミュレーション計算結果を基に飛翔性能に対する基礎的考察を行う。

キーワード：　トビウオ、アゴ、ヒレ、ヒレ膜、骨、飛翔、強度

Science of flying fish I

－Preliminary research on structure and properties of fin of flying fish , Tobiuo, and a consideration on flying mechanism－

Katsumi YOSHINO[1], Masatomo MAKINO[1], Takanobu SHIOMURA[1], Naoyuki TAKIYAMA[1], Satoshi KOMATSUBARA[1], Kenichi FUKUDA[1], Susumu KAWAMURA[1] and Tetsuya TAKAHASHI[2]

[1] Shimane Institute for Industrial Technology
1 Hokuryo-cho, Matsue, Shimane 690-0816 Japan
[2] Faculty of Education, Shimane University
1060 Nishikawatsu, Matsue, Shimane 690-8504 Japan

Abstract

Structure, properties and characteristics of fin of fling fish are investigated. Based on these data and simulation of a fin in wind, fundamental consideration of flying phenomena and mechanism are discussed.

Key wards : Flying fish, Tobiuo, Ago, Fin, Film of Fin, Flying process

１．はじめに

島根県は水産資源が豊かな県であるが、中でもこの地方でアゴとも呼ばれるトビウオは非常に美味で刺身にしておいしいし、アゴから作るかまぼこの一種、“のやき”は出雲地方に住む者にとって最も好きな食べ物のひとつである。著者の一人吉野が子供の頃、時々日本海を船で移動するとき小さな船に沿って飛ぶトビウオの飛ぶ距離が百メートルも超えそうであることを見て感動と不思議を感じたものである。あらためて高校、大学を経て科学、技術にかかわる仕事をするようになるとトビウオの飛ぶ姿が凄いものであることに感銘を覚えたものである。実際、友人の日本海に面した島根半島の漁師さんに聞いたトビウオのとり方と全く同じ話を長崎壱岐の漁師さんに聞いたことがある。船で火を焚くと（明かりをともすと）トビ

ウオがそれをめがけて飛んでくるので、たもを使って空中ですくうと云う話である。

きっかけは５月の末頃、著者の一人吉野が夕飯にトビウオの刺身をいただいた時である。持ち前のなんにでも関心を持つ悪い癖が頭をもたげた、と云うより子供の頃からの疑問があらめて強く意識にのぼったのである。早速、取り除かれたトビウオのヒレとトビウオ一匹をもらい、島根県産業技術センターの研究者のアンダーテーブルの研究対象として取り上げたのである。ここから素晴らしい発見、凄い新たな技術展開の芽が得られるのではないかと云う強い直感が働いているのである。

このようにトビウオの不思議な飛翔と云う行動、その飛翔の詳細な原理、メカニズムについては現在研究中であり、近々論文として発表する予定である。

このトビウオがなぜ飛べるのか、どのようにして飛び上がるか等の決め手となる魚体の素材、構造、メカニズムを明らかにすることができれば産業応用にその成果が展開でき、材料技術と云う観点からも極めて重要なものであると考えている。本論文ではトビウオの魚体の特徴を予備的に測定した結果とその性質、羽根の材料としての特徴、骨の基本構造の測定結果について簡単に記述し、また飛翔方法に関して予備的に考察した結果を述べる。それぞれの詳細な構造、特徴、性質に関しては次報以降で詳しく述べることとする。

２．トビウオ魚体と実験方法

島根半島沖で捕獲されたトビウオを用いてその構造、羽根の特徴、性質などを調べた。

図１は資料として用いたトビウオの側面からの写真である。大きな胸ビレと腹ビレがあることが明らかである。また尾ビレも特徴的であり、尾ビレは上部と下部に分かれ、特に上部に対し下部の尾ビレが著しく大きいことが分かる。

図２は前面（頭部側）上部から撮った写真であり、胸ビレを拡げた状態である。

このトビウオを用いて光学顕微鏡観察、電子顕微鏡観察、エックス線撮影、蛋白質分析などを行った。

図１　トビウオの側面からの写真
Fig.1　Side photograph of a flying fish

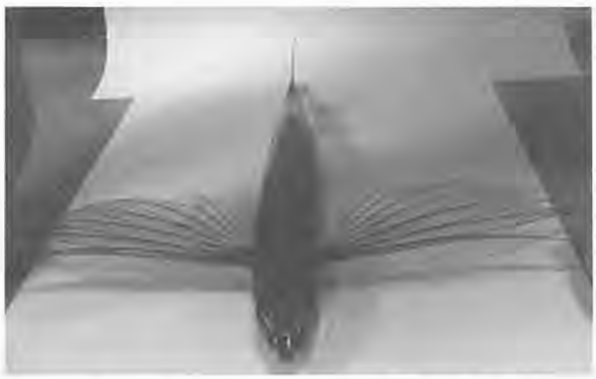

図２　トビウオの頭部側上部からの写真、胸ビレを広げた状態
Fig.2　Photograph from top upper side of a flying fish. Pectoral fin is open.

３．トビウオの飛翔に関する基本的観測とヒレ及びヒレ膜の構造、性質

図１のトビウオの側面からの写真、図２のヒレを広げた状態で頭部の方からとった写真からも、非常にスマートな体形をしており、また見事なヒレであることが分かる。

このトビウオの飛ぶ姿を観察すると、空中ではグライダーのように滑空していると考えられ、空中で鳥が羽根を羽ばたくようにヒレを羽ばたくようには観測できない。と云うことは最大の飛翔のポイントは飛び上がる過程である。

どうやら海中、海表面近くで尾ビレを激しく左右に振ることでスピードを上げその勢いで空中に飛び上がっているように思える。しかも二つに割れた尾ビレの上部に比べて下部が著しく大きいと云うことは、海面近くて極めて激しく左右に振る過程で自然に魚体に上向きの力が発生することを意味し、しかも尾ビレは極めて強靭で筋肉も強いはずであり、尾ビレとトビウオの胴体との継ぎ部

分も強い構造となっているはずである。

図３はトビウオの尾ビレの付け根あたりのX線写真であるが、このような激しい動きを生み出し支える強靭な構造をしていることが理解される。また、尾ビレの下半分が上半分と比較して発達していると云えるように思えるが、さらに検証が必要である。

この測定には、マイクロ X 線 CT システム TOSCANER-30900 μC^3（東芝 IT コントロールシステム株式会社）を用いた。

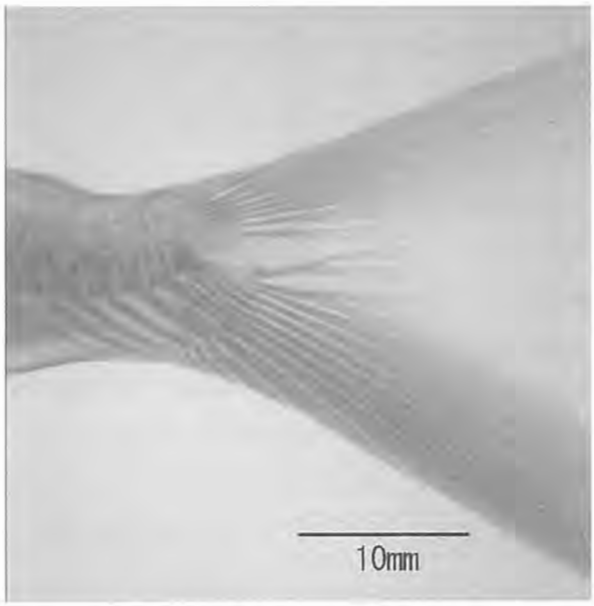

図３　トビウオの尾ビレ付け根あたりのX線透視像
Fig.3　X-ray photograph of the base of the caudal fin of a flying fish

トビウオの飛翔を可能にしている最も重要なのはヒレであり、広げたり閉じたりすることができる。図４は広げた状態の写真であるが、透明であることが明らかである。これは胸ビレであるが腹ビレも大きさは小さいがほぼ同じ外観である。

図４　広げたトビウオの胸ビレの写真
指が完全に透けて見える
Fig.4　Photograph of the pectral fin of flying fish in open state

ヒレは膜とそれを支える梁の役をする細長い何本もの骨からなっていることが明らかである。実際には膜を骨が下から支える形となっている。ヒレ膜は 30 ミクロン程度の厚みであるが、透明で透けて見えることが分かる。水中、水面で飛び上がる前はこの骨は互いに接するほどに接近しており、飛翔する時にはヒレを開きその時骨の間隔は数ミリ以上になっていることが分かる。逆に着水するときはこの骨間隔は小さくなってヒレが閉じる。すなわち飛翔のために飛び上がる際、飛翔している間この膜が重要な役を果たしており、トビウオが繰り返し頻繁に飛翔してもこの膜が破れないと云うことはかなり強度の強いものと考えられる。

このヒレを骨にほぼ直角方向に切断したものの写真を図５に示す。骨は適切な間隔をもってならんでいるが、全体としては飛行機の翼のような外部構造となっており空気との相互作用を有利なものとしていることが分かる。

図６は胸ヒレの写真であるが膜を骨が下から支えていることが分かる。

図５　X-ray CT photograph of flying fish's pectral fin in open state.
Fig.5　広げた状態のトビウオの胸びれの CT 像

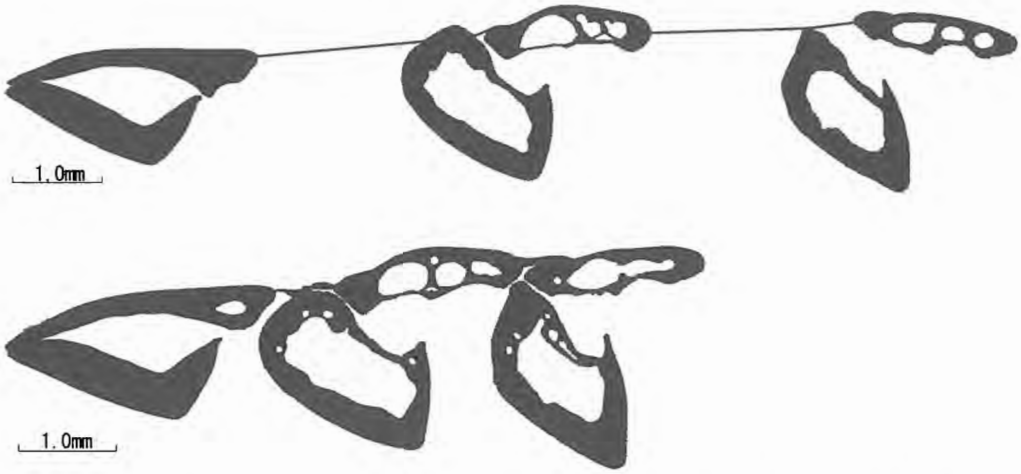

図６　トビウオの胸ヒレの広がった状態（上）と閉じた状態（下）のＸ線 CT 像
横からの像であるためヒレの膜が糸状に見えている。
Fig.6　X-ray CT figure of the pectoral fin of flying fish (upper open state, lower closed state)

上がヒレが広がった状態、下が閉じた状態で、骨がうまく収まっていることが分かる。

また空中で長距離グライダーのように滑空できると云うことはトビウオの魚体が他の魚に比べて軽量であると考えられる。骨の構造も軽量化に適するようになっている可能性がある。実際、図６のＸ線 CT 像からわかるように硬い骨の内部には空洞に近く軽量の有機材料から成っていることから、軽量の骨が実現されていることが分かる。さらに、ヒレの骨の間に張っている膜状のものは強度的にかなり強いものと想定できる。飛び上がるまでは羽根は閉じており、飛び上がってから広がり滑空を可能にしているものと考えられる。当然着水する時点では羽根は閉じている。

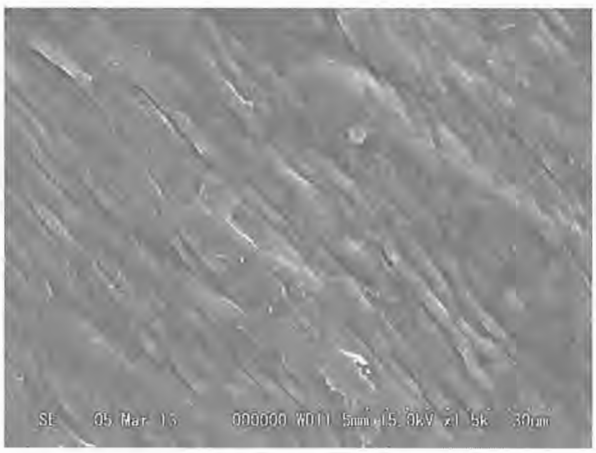

図７　トビウオの胸ビレ膜の電子顕微鏡写真
Fig.7　Electron microscope figure of the fin film of flying fish

この透明なヒレ膜の電子顕微鏡写真を図７に示す。トビウオの胸ビレだけに特徴的な構造であるかどうかはこの写真だけでは判断できないものの、全面に幅２μｍ程度の筋状の構造が骨格に沿って観察される。これらの筋状の構造は、サメ肌にも見られるように水抵抗や空気抵抗が小さくなるものと考えられる。最新の水着においても、サメ肌加工による水中でのスピードの向上が認められている。

飛び上がる前､海面付近を高速で泳いでいる時、この骨は互いに接するほどに接近し膜は閉じており、飛翔する時にはヒレを開き骨の感覚は数ミリ以上になっている。逆に着水するときはヒレ膜は閉じこの骨間隔は重なるほど接近し浮力を失うことになる。すなわち飛翔のための浮き上がる際にはこの膜が重要な役を果たしており、トビウオが繰り返し頻繁に飛翔してもこの膜が破れないと云うことはかなり強度の強いものと考えられる。

そこでまずヒレ膜の強度を調べた。あくまでも予備的な測定である。具体的には機械的引張強度試験を行った。装置は小型引張試験機である。引張試験機:　TENSION/UTM-ⅢL

結果を図８に示す。これから次のような値が評価される。

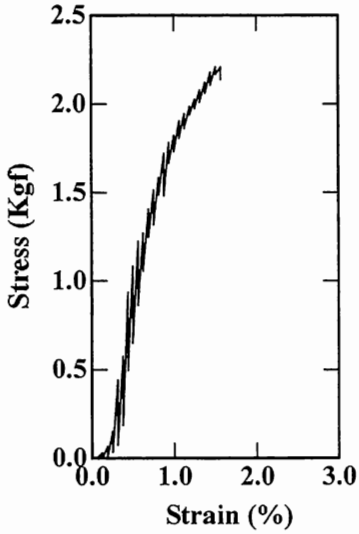

図８　トビウオヒレ膜の引っ張り試験結果　応力―歪
特チャック間：20mm、引張速度：100%／min
Fig.8　Stress-Strain characteristics of the fin film of skying fish

チャック間隔２㎜での引張試験で得た図８の歪―応力特性から評価したトビウオヒレ膜の５点平均値は、破断強さが 2.43kgf、破断伸びは 1.7%であった。これを単位面積当たりの強度に直すと、約 11.2kgf/mm^2 となる。一般に、繊維の強度（単位面積当たり）は CN/dtex（センチニュートン/デシテックス）で表記することが多い。ここで、デシテックスとは、糸 10,000m の重さ（g）のことを指す。つまり、繊維の比重が計算に加わってくる。トビウオの胸ヒレの部分の比重をいくつとするかで変わってくる。

引張試験をしたトビウオの胸ヒレの部分は乾燥して非常に軽い印象があるので比重を 0.5 と仮定すると、大まかな計算であるが 4.8cN/dtex となる。この値は破断伸びが 1.7%であることを考えると、植物繊維で云えば「亜麻」に近い。天然繊維と比較すると、比較的伸びにくい構造であることがわかる。これは、グライダーなどの主翼に用いられている繊維強化プラスチック（ＦＲＰ）が比較的低伸度であることに対応している。但し、あくまで仮定の多い概略な計算ですあるので、参考程度の話と考える必要がある。

先にも述べたようにこのヒレ膜を光学顕微鏡、電子顕微鏡で見ても数ミクロン、数十ナノ程度まで顕著な特徴的な微細構造かどうかは判断できないので、さらに構造については詳細な調べをする必要がある。

しかしともかく云えることは比較的スムーズな滑らかな表面であると云うことである。これは空気中を飛翔するためには都合の良いことの筈である。飛翔には胸ビレと腹ビレの両方が寄与していると考えられるが、大きさなどから胸ビレが主たる役割を果たしていると考えられる。

胸ビレが何からできているかについて予備的な観察、計測をしてみると、タンパク質であることが分かる。すなわち、DNA が観測されるので、トビウオのヒレ膜は細胞によって構成された有機物、恐らく細胞骨格やコラーゲンなどのたんぱく質が含まれているものと思われる。また、膜はかなり強靭であり、いったん乾燥すると相当長期間保存できる。と云うことはこの膜は工学的な利用の可能性を秘めていることが分かる。

さらにヒレを半開きの状態で切断しその断面を観測した図６から分かるように、骨とも筋とも見える扇子に例えれば骨にあたるものには空洞があることが分かる。これは先にも述べたように飛翔するため少しでも軽量化するに寄与していると考えられる。

さらに興味深いのは骨と骨の間の膜が上にあり、下に骨がある構造であることが分かる。これは飛行機の羽の構造との類似性を感じさせるものである。すなわち、これが飛翔した時、膜の上の空気の流れがスムーズであるのに対して、膜の下の骨のある側を通る空気の流れは乱れもあり、遅くなると思われ、これは上部の動圧を下げることになるので、上向きの力を発生させることになると判断される。すなわちこの構造があるからこそトビウオは比較的高く長距離空中を飛ぶことができることになるのである。さらに、このヒレが開き加減の時と少し閉じた場合の写真を図７に示したが、この図を比較してわかることは、この開け閉めが上向きの力を調整するとともに左右の方向転換をも可能にしていると解釈できる。

さらに尾の近くにある腹ビレも見事な膜を持っていることが分かる。

骨の元素をＸ線測定から調べてみると Ca、P などが多量にあることが分かるが、これはリン酸カルシウムなどが主成分であるということを示すものである。

次にトビウオのヒレ膜に存在する蛋白質がどのようなものであるかを明らかにするため、予備的な測定を行ってみた。

４．トビウオヒレ膜の蛋白質に関する予備的評価

トビウオは最初に述べたように島根県の特産の魚の一つであり、通称「あご」と呼ばれている。夏を告げる魚として、県内沿岸で広く漁獲されており、なじみが深い魚である。トビウオは翼のような大きな胸ビレを持ち、水面から飛び上がって滑空することが大きな特徴であるため、ヒレには滑空を可能にする特別な仕組みが存在すると想定されるが学術的な知見は少ない。そこでヒレ膜に含まれる蛋白質について有用なものがないか調査を行った。

ここでは一般的な蛋白質抽出方法に従った。すなわち試料を懸濁・破砕し、可溶性蛋白質を緩衝液中に遊離させ、陰イオン交換クロマトグラフィーにて粗分画を行い、評価を行った。

具体的な方法は以下の通りである。

１日目
人工海水中にてヒレ膜の採取
↓　緩衝液 A にてヒレ膜の洗浄
↓　テフロンホモジナイザーで破砕
↓　超音波処理
↓　超遠心で可溶性成分と不溶性成分を分離
↓　上清（可溶性成分）の回収
２日目
↓　サイズ排除カラムによる脱塩作業
(図９参照、緩衝液 B に置換)
↓　5000Da 以上の成分を回収
３日目
↓　強陰イオン交換カラムで分画
↓　脱塩作業並びにトリプシン消化
４日目
↓　LC-MS/MS による蛋白質同定

緩衝液 A：50 mM Tris-Cl pH 8.2, 630 mM NaCl
緩衝液 B：20 mM Hepes pH 8.2

粗精製と蛋白質同定結果は次の通りである。

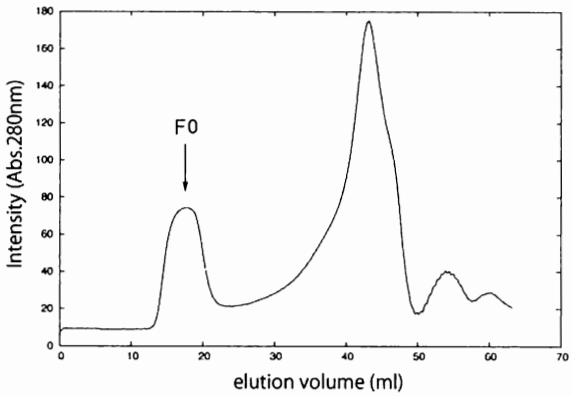

図９　トビウオ胸ビレから抽出した可溶性タンパク質のサイズ排除クロマトグラフィー溶出プロファイル
Fig.9　Size-exclusion chromatography elution profile of soluble proteins extracted from pectoral fins of Japanese flying fishes

サイズ排除カラムに可溶性成分を供したところ、図９の様に分離した。用いたサイズ排除カラムの性質上、前半のピークは分子量 5000Da 以上、後半のピークは分子量 5000Da 未満であると考えられる。5000Da 未満の成分に関しては、蛋白質、蛋白質が切断されたペプチド、その他の生体由来成分と考えられる。今回の予備的な実験では分子量 5000Da 以上のものを追いかけることにした。

次に得られた 5000Da 以上の成分を強陰イオン交換カラムに通すと、５つの成分に分離できることが分かった（図 10）。それぞれの成分を SDS-PAGE で分子量について評価したところ、図 11 のような泳動パターンとなった。

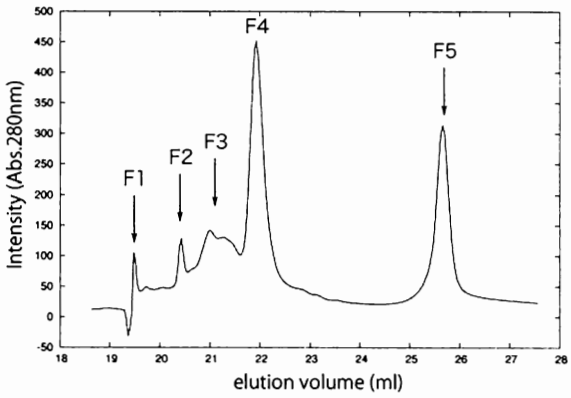

図 10　サイズ排除クロマトグラフィーF0 画分の陰イオン交換クトマトグラフィー溶出プロファイル
Fig.10　Anion exchange chromatography elution profile of the F0 fraction obtained by size-exclusion chromatography

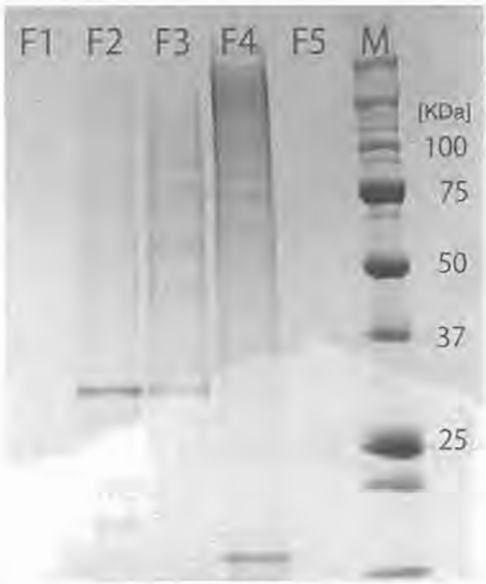

図 11　イオン交換クロマトグラフィー画分の SDS-PAGE 分析
Fig.11　SDS-PAGE analysis of fractions obtained from anion exchange chromatography

SDS-PAGE の結果(図 11)より、トビウオのヒレには様々な大きさの蛋白質が含まれていることが分かる。更に F2、F3 では 30 kDa 付近に、F4 では 15 kDa 付近に強いバンドが見られるので、何らか特定の蛋白質が強く発現していることが推測される。そこで、これらの蛋白質の正体を探るべく、F1~F5 に含まれる全蛋白質をトリプシンで消化し蛋白質同定を行った。

蛋白質同定の方法は質量分析法による一般に用いられる方法である。結果を表 1 に示す。

蛋白質同定では、LC-MS/MS 分析で得られるペプチド断片のシーケンス情報をデータベース検索し、同定へ至る。しかし表 1 の通り、トビウオの蛋白質は 1 つも同定出来なかった（理由については後述)。一方、他の魚類の蛋白質の筋肉蛋白質やコラーゲン、ケラチンなどがヒットしたことから、トビウオのヒレでもこれらと相同性のある蛋白質が発現しているものと考えられる。

次に各分画の同定状況を確認すると、F2、F3 では Annexin A5 が、また F4 では myosin light chain が同定されている。それぞれ分子量が 35 kDa と 16 kDa であり、トビウオにおいてもその程度の分子量と想定されることから、SDS-PAGE で確認された強いバンド(図 3)がこれらに相当する可能性がある。従ってヒレ膜から特定の蛋白質を獲得しようとする場合、Annexin A5 や myosin などが候補になると考えられる。Annexin A5 については別紙 1 に日本血栓止血学会の解説を引用するが、フォスファチジルセリン（PS）のような陰性荷電を持つリン脂質に結合する特徴があり、細胞死のマーカーとして市販されているようである。

トビウオの蛋白質が同定できなかった理由は既知の遺伝情報がほとんどないと云うためである。

表 1　溶液内消化法と LC-MS 分析を用いて同定できたタンパク質の一覧
Table 1　Proteins identified using the in-solution method coupled with LC-MS/MS

Protein Name
PREDICTED: annexin A5 [*Oreochromis niloticus*]
unnamed protein product [*Tetraodon nigroviridis*]
annexin a5 [*Perca flavescens*]
Annexin A5 [*Anoplopoma fimbria*]
PREDICTED: collagen alpha-1(XII) chain [*Oreochromis niloticus*]
Annexin A5 [*Osmerus mordax*]
PREDICTED: collagen alpha-1(XII) chain-like [*Danio rerio*]
PREDICTED: hypothetical protein LOC100708082 [*Oreochromis niloticus*]
unnamed protein product [*Tetraodon nigroviridis*]
PREDICTED: collagen alpha-1(XII) chain [*Oreochromis niloticus*]
PREDICTED: collagen alpha-1(XII) chain-like [*Danio rerio*]
keratin-like protein [*Ctenopharyngodon idella*]
beta-actin, partial [*Morone saxatilis*]
myosin light chain alkali [*Ictalurus punctatus*]
PREDICTED: zinc finger CCCH domain-containing protein 6-like [*Oreochromis niloticus*]

表２　UniProtKB において利用可能なトビウオのタンパク質一覧
Table 2　All of protein entries of Japanese flying fish available at UniProtKB database

Entry	Entry name	Protein names	Gene names
Q402H2	Q402H2_CYPHI	Cytochrome b	
Q402I2	Q402I2_CYPHI	Cytochrome c oxidase subunit 1 (EC 1.9.3.1)	
Q402H5	Q402H5_CYPHI	NADH-ubiquinone oxidoreductase chain 4 (EC 1.6.5.3)	
Q402H8	Q402H8_CYPHI	Cytochrome c oxidase subunit 3	
Q402H9	Q402H9_CYPHI	ATP synthase subunit a	
Q402H4	Q402H4_CYPHI	NADH-ubiquinone oxidoreductase chain 5 (EC 1.6.5.3)	
Q402I4	Q402I4_CYPHI	NADH-ubiquinone oxidoreductase chain 1 (EC 1.6.5.3)	
Q402I1	Q402I1_CYPHI	Cytochrome c oxidase subunit 2	
Q402I3	Q402I3_CYPHI	NADH-ubiquinone oxidoreductase chain 2 (EC 1.6.5.3)	
Q9IB28	Q9IB28_9TELE	Myosin light chain 2	mlc2
Q9IB29	Q9IB29_9TELE	Myosin light chain 3	mlc3
Q9IB30	Q9IB30_9TELE	Myosin light chain 1	mlc1
Q402H3	Q402H3_CYPHI	NADH-ubiquinone oxidoreductase chain 6 (EC 1.6.5.3)	
Q402H7	Q402H7_CYPHI	NADH-ubiquinone oxidoreductase chain 3 (EC 1.6.5.3)	
Q402H6	Q402H6_CYPHI	NADH-ubiquinone oxidoreductase chain 4L (EC 1.6.5.3)	
Q402I0	Q402I0_CYPHI	ATP synthase protein 8	

すなわち検索に用いるデータベースを調査したところ、トビウオの蛋白質が 16 件しか登録されていないことが分かった（表２）。このことからトビウオに関しては遺伝情報が解読されていないこと、即ち分子生物学的な研究が進んでいないことが伺える。

ここで行った予備的なトビウオのヒレ膜に含まれる蛋白質についての調査結果は次のようにまとめることができる。

トビウオのヒレ膜に含まれる可溶性蛋白質について予備的な調査を行った。粗分画を行い、分子量 5000Da 以上のものについて蛋白質同定を行ったところ、筋肉蛋白質やコラーゲン、ケラチンといった蛋白質が含まれることが示唆された。またヒレ膜には Annexin A5 や myosin などが比較的多く発現していると思われる。ただしトビウオの遺伝情報や蛋白質情報はデータベースに存在しないため、今回蛋白質同定にヒットしたトビウオ以外の魚類に由来する蛋白質と相同性のある蛋白質がトビウオに含まれているとの仮定に基づいていることに注意しなければならない。従ってトビウオのヒレ膜に含まれる蛋白質研究を進めるためには、遺伝情報から導出されるアミノ酸配列情報を得るために、まず遺伝情報を解読する必要がある。

５．飛翔に関する予備的考察とシミュレーション

トビウオの飛ぶ姿を観察すると、空中ではグライダーのように滑空していると考えられ、空中で羽根を羽ばたくようには観測できない。と云うことは最大の飛翔のポイントは先にも述べたように飛び上がる過程である。

どうやら海中、海表面近くで尾を激しく左右に振ることでスピードを上げその勢いで空中に飛び上がっているように思える。

また空中で長距離グライダーのように滑空できると云うことは魚体が他の魚に比べて軽量であると考えられる。骨の構造も軽量化に適するようになっている可能性がある。さらに、羽根の骨の間に張っている膜状のものは強度的にかなり強いものと想定できる。飛び上がるまでは羽根は閉じており、飛び上がってから広がり滑空を可能にしているものと考えられる。当然着水する時点では羽根は閉じている。

以上がこれまでの観測、測定結果の要点である。

トビウオの飛翔に関する考察を進めるため、上記観測、測定で得られたヒレを翼と見立てて流体解析を行ってみた。解析に使用したソフトウエアは Ansys Fluent R14 である。

トビウオが強力な尾部の力によって水面から空

中に飛び出したときを想定して前面から強い空気の流れがあった時浮力が働くかどうかの計算シミュレーションである。

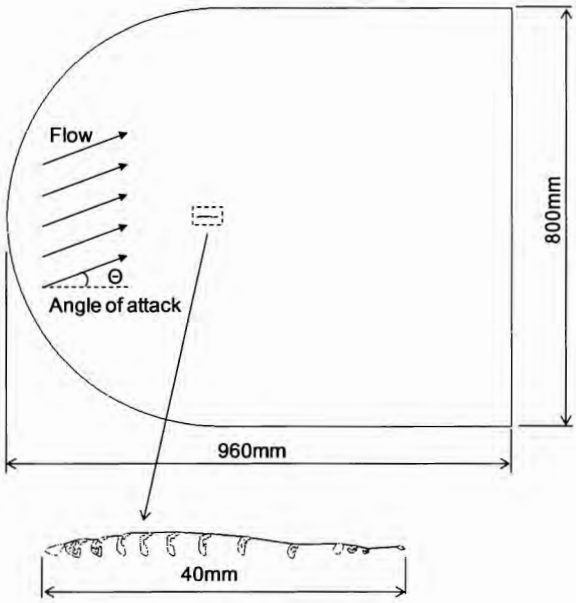

図 12　解析領域
Fig.12　Computational domain

図 12 のような配置での計算であり、実際にはトビウオの動きによって風と翼であるヒレの角度は変化するが、ここでの計算ではヒレを固定して風の流入角度（迎え角）Θを変えた場合の計算で行った。計算は流入風速を 60km/h として行った。ヒレの周りの計算メッシュは図 13 に示す。

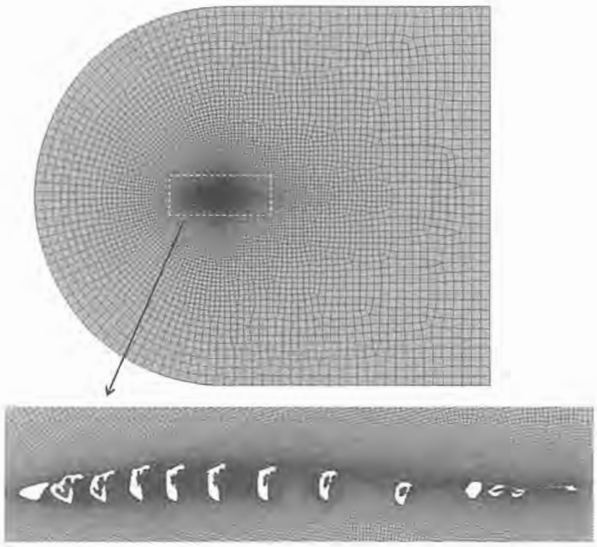

図 13　ヒレ周りの計算メッシュ
Fig.13　Computational mesh around the wing

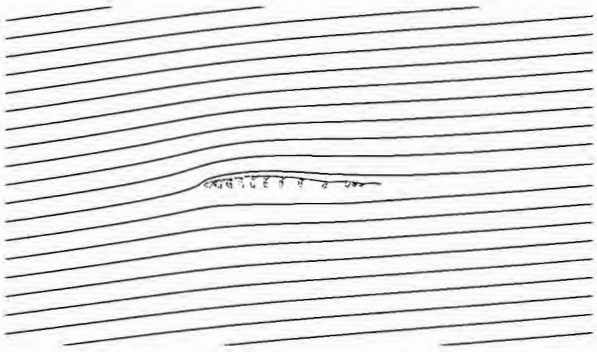

図 14　ヒレ周りの空気の流線(流入角度：6°)
Fig.14　Streamline around the wing (Angle of attack:6°)

流入角度 6 度の場合のヒレ周りの空気の流線を図 14 に示す。

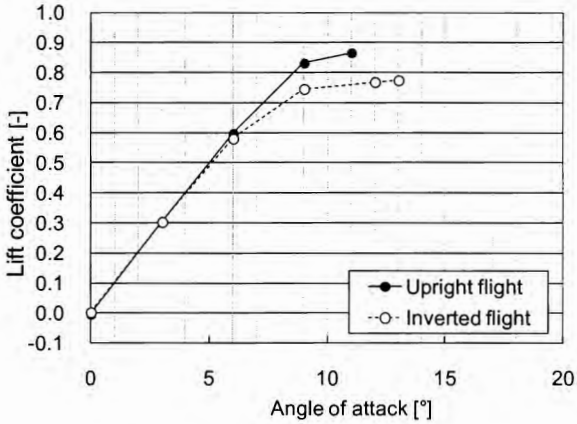

図 15　揚力係数の流入角度依存性
Fig.15　Angle of attack effects on Lift coefficient

揚力係数の流入角度依存性を図 15 に示す。図中実線は平たいヒレの膜がある側が上、すなわち骨部分が下にあるとした場合であり、これが実際の観測したものと一致する。

一方、平たいヒレの膜が下にあり、上側に骨が出ているとした場合を点線で示している。

この結果範囲において揚力係数は角度と共に大きくなり 10 度あたりで飽和する傾向があることが分かるが、ヒレ膜が上にある方が揚力係数は大きくなることが分かる。実際トビウオのヒレはそのように揚力が大きく飛翔に適した構造となっていることが分かる。

これは飛行機の羽の構造との類似性を感じさせるものである。すなわち、飛翔した時、膜の下の骨のある側を通る空気の流れに比べて、膜の上の

空気の流れがスムーズであり高速になると思われ、これは上部の動圧を下げることになるので、上向きの力を発生させることになると判断される。すなわちこの構造があるからこそトビウオは比較的高く長距離空中を飛ぶことができることになるのである。

６．おわりに

本論文ではトビウオの不思議な飛翔と云う行動を理解するために行った基礎的観測と魚体の基礎的計測、測定、魚体構成材料の物性、蛋白質解析、飛翔に関する考察、シミュレーションなど予備的な研究結果を述べた。これらはいずれもさらに研究、解析する必要があり、現在遂行中である。それぞれの事項について詳細な研究結果が得られ、飛翔のメカニズムの理解が進み次第、個々の課題について逐次論文として発表する予定である。

そもそもなぜトビウオは飛翔するかについては、おそらくトビウオを捕食する他種の魚類、動物から逃れるため、あるいは空中飛翔中に魚体に着いた不要物、虫などを落とすため、さらには異性との出会いの機会を大きくするなど子孫を残す確率を高めるためなどいろいろ考えられるであろうが、それにしても今回のトビウオに対しての予備的な研究を通じて、生物の不思議で神秘的とも云える多様な進化に対してあらためて感動と驚きを覚えるものである。このトビウオに対する研究結果からもある程度考えることもできるが、さらに研究を進めることで必ずや産業応用に繋がる道が見出せるものと確信している。

（2015年10月27日受理）