

アクアバイオメカニズム研究の海洋工学への応用

加藤 直三 東海大学海洋学部

Application of Study on Aqua Bio-Mechanisms to Ocean Engineering

KATO, Naomi Tokai University

nkato@scc.u-tokai.ac.jp

Abstract

This paper discusses the application of the researches on aqua bio-mechanisms to ocean engineering from the viewpoints of underwater robot, sensor technology, amusement and marine leisure. The study of aqua bio-mechanisms, aims not only to unveil the locomotion mechanisms of the aquatic animals analyzing the external flows and the autonomous systems having various behavior forms, but also to develop machines that are tender towards their environments with locomotion function and autonomous control system making reference to the aqua bio-mechanisms. In relation to underwater robot, researches on mechanical aquatic animals are reviewed emphasizing the characteristics of aquatic animals to be realized, and the applications of motion of pectoral fins to the precise maneuvering of underwater robots in hovering and stabilization of attitudes of working-type underwater robot are explained in details. In relation to sensor technology, biosonar system of dolphin and its application to biomimetic sonar, MEMS antennae for lobster robot, olfactory sensor of salmon and electric sensor of sharks are discussed. In relation to amusement, several goods mimicking aquatic animals are introduced. In relation to marine leisure, swimming suits mimicking the shark skin to reduce the frictional drag and oscillating fin attached at the aft of a boat to reduce accidents of divers caught by screw-type propellers are referred.

1. はじめに

地球には海、川、湖沼の中で生きる数万種におよぶ動物たちの世界がある。かれらは、種々の環境に巧みに適応できる独自の自律運動システムを進化させてきたと考えられる。アクアバイオメカニズムの研究とは、バイオエンジニアリングの視点からこれらの水棲動物の運動と推進に関わる生体外部流れと推進原理や感覚機構を解明するとともに、水棲動物の運動機構と機能および行動形態を規範とした水上・水中移動機械などについての研究開発を行うことを指す。生物の運動と自律制御システムに関する研究は、行動生物学、流体力学、計測制御工学、ロボット工学、材料工学などの学際的領域である。

2000年8月に、アメリカ・ハワイにて、第1回アクアバイオメカニズム国際シンポジウムが開催された¹⁾。そこでは、水棲動物(微生物から魚類、大型ほ乳類まで)の推進・運動機構、水棲動物の感覚と制御、機械生物、アクチュエータについての論文が発表された。本論は、それらのアクアバイオメカニズムの研究の現状から海洋工学への展開について、(i)水中ロボット、(ii)センサー技術、(iii)アミューズメント、(iv)マリンレジャーの分野の応用の面から考察する。

2. アクアバイオメカニズム研究の水中ロボットへの応用

2.1 機械生物の研究の流れ

ドイツのベルリン工科大学のヘルテルは1963年に生物学と工学両分野を含んだ著書を出した²⁾。この中で振動板上に下流へ伝播する進行波運動によって進む振動板推進実験船「TUB-TUB-1」について述べている。これが世界で最初の魚の運動の機械への応用ではないかと思われる。

日本では、1970年代から琉球大学の永井による尾ひれ運動を行う自動機械魚の精力的な研究がある³⁾。東京工業大学の

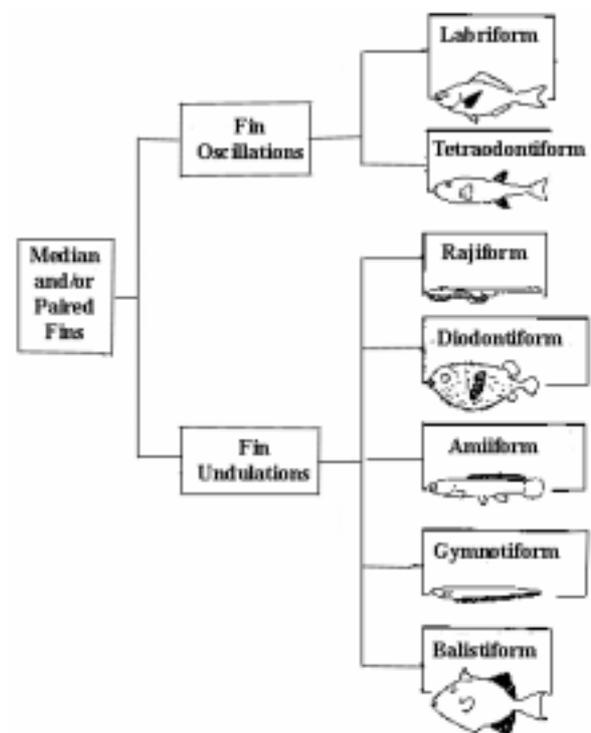


Fig.1 Classification of MPF swimming modes

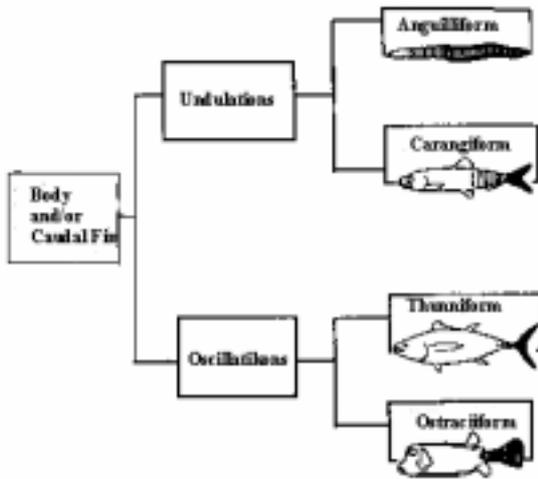


Fig.2 Classification of BCF swimming modes

一色と信州大学の森川⁴⁾は機構的に上下運動と縦揺れ運動を二次元振動翼に与える振動翼推進船の開発を行った。

Lindsey⁵⁾は1978年に推進器官として働く魚体の部位とその可動部の広さによって、中央ひれ型、魚体尾ひれ型に分け、さらにそれぞれ屈曲型と振動型に分類した(Figs. 1, 2)。

これまで、水棲動物の遊泳法を模倣した色々な機械生物が研究されているが、そのほとんどが魚体尾ひれ型振動式についてである。永井ら⁶⁾は尾柄の扇ぎ運動によって尾ひれにヒーピングとピッチング運動が与えられる魚体尾ひれ型振動の機構を利用して尾柄と尾ひれを振動板と振動翼に置き換えた実験船(全長4.17 m、全幅0.85 m、総重力100kg)を製作し、バネの復元力と振動周波数が推進速度、翼運動、推定推力などに及ぼす影響を調べた。

森川ら⁷⁾は高速魚であるマグロの尾ひれ骨格構造を模倣した推進用振動翼(二個の空気圧ゴム人工筋をアクチュエータとして用いた拮抗駆動型)を製作し、三日月型尾ひれの運動に伴う三次元的変形に着目し、尾ひれの骨格構造と機構に由来する変形挙動が推進力発生に及ぼす影響について調べた。

Bandyopadhyayら⁸⁾は軸対称物体の推進と操縦装置として用いる船尾に取り付ける一対の振動翼について、それらを取り付けた実験機(長さ1 m、直径7.6 cm)のまわりの流れの可視化や流体力計測を行った。

魚体尾ひれ型波状運動式についてはTriantafyllouら⁹⁾が6個のモータとワイヤー駆動装置により関節の運動が制御され魚体の波状運動が実現される水槽実験用水中ロボット"RoboTuna"と無索式の水中ロボット"RoboPike"を製作し、水中ロボットまわりの流体力学的解析や運動制御の研究を行った。

平田ら¹⁰⁾は2関節型の魚体尾ひれ型魚ロボットを用いて、尾ひれの運動パターンが旋回性能に及ぼす影響について調べた。

小林¹¹⁾はヘビやウナギといった体全体を屈曲させて推進する生物に着目し、その屈曲運動を多リンク機構で再現した屈曲型水中推進機構に関して研究を行った。同機構はモータ部を水上に、ヒレの部分水中に位置するように支持されており、リンク数は16で多自由度な機構である。1個のモータにつき1個のコントローラを接続した分散制御を採用し、拡張性やロバスト性を向上させた。

中島¹²⁾は2関節流線形胴体・尾ひれモデル(全長1.89 m)を用いて、推進速度・推進効率の実験解析を行った。最大速度1.9 m/sを得、最大効率が0.65を得た。

中央ひれ型ひれ振動式に関して、著者らは作業型水中ロボット的位置・姿勢制御を目的として、ブラックバスの胸ひれの観察をもとに胸ひれ運動装置を取り付けた魚型水中ロボットを開発し、流体力学的特性や位置制御の研究を行った。これについては、後節で詳述する。

中央ひれ型ひれ波状振動式に関して Sfakiotakisら¹³⁾はフレキシブルパイプ3本を1セットにして各々の内部圧を空気圧で制御するアクチュエータを開発し、その8セットを用いて中央ひれ型ひれ波状振動式の駆動部に適用して、推力、横力、鉛直力の測定を行った。水中ロボットのグリップ用として、フレキシブルパイプ3本を1セットにして各々の内部圧を制御するelephant's trunk(象の鼻)アクチュエータを開発したものを、魚体尾ひれ型振動式や尾ひれ中央ひれ型ひれ波状振動式の駆動部に適用しようとするものである。

Kashiwadaniら¹⁴⁾は中央ひれ型ひれ波状振動式を行うマンタを対象として、リニアアクチュエータ群を用いた機械システムとその運動メカニズムの提案を行った。

多足歩行式に関して、Ayers^{15), 16)}はLobsterを対象にして、CCCPG(command, coordinating, central pattern generator)モデルを用いた反射型の歩行ロボットの開発の研究を行っている。それぞれの脚の運動を6個のパターンに分け、前進、後進、横移動、回転などの行動と神経回路振動子による6個のパターンの組み合わせの関係を実験的に求めた。次に、ひげを潮流の強さや方向、障害物の存在を知るセンサーとして持ち、その情報をフィードバックして、行動計画に従って中央パターン生成部が8本の脚の運動を統合する神経回路システムの構築を行った。

Flanniganら¹⁷⁾は8本の脚を持つかに型ロボットのコントローラを開発を行った。それぞれの脚は大腿部とけい部からなり、各々モーターで駆動される。上述のコントローラと異なる点は、中央パターン生成部が各々の脚のセンサー(ポテンショメータ)情報から各々の脚が極端な運動を行わないようにチューニングされることである。障害物越えや粗面越えの機能も有している。

ぜん動運動式に関して、Vaidyanathanら¹⁸⁾は長さ16 cmで3つのセグメントからなるぜん動運動で進行する水中ロボットを開発した。各々のセグメントは2枚の円板の間に4つの形状記憶合金スプリングで結合された構造をしている。

その他、水上・水中航走体の表面摩擦抵抗軽減の観点から、1983年にサメ肌と同様に表面にマイクロ単位の微小な縦溝がつけられているリブレットフィルムが開発され、ヨットや航空機に適用された。また弾性皮膜や粘液(高分子ポリマー)による乱流摩擦抵抗の軽減の研究も長く行われている。その他、微小な気泡を境界層内に吹き込むマイクロバブルは船舶への適用に適していると考えられ、多くの研究がある。最近では、1辺1 mm程度の微小なフラップ型アクチュエータ群を表面に配置して制御する研究がなされるようになってきた¹⁹⁾。

2.2 機械生物の水中ロボットへの応用

これまでの水棲動物の推進・運動機能の遊泳式水中ロボットへの適用の研究を見ると、琉球大、MIT、信州大、東工大に見られるように、魚体尾ひれ型についての推進性能を重視したもののや、Bandyopadhyayらや著者らの中央ひれ型についての運動性能を重視した研究に大別できる。前者については、従来のプロペラ型スラスターとの競合になるが、それほど推進効率の向上がみられないことや、MITのように機体本体の後半部が柔軟性を持つ魚体尾ひれ型波状運動式になると、内部部品の配置やセンサーの性能からみて不利であることが欠点となる。一方長所としては、推進機構を魚類の筋肉システムに近づけることで、放射雑音レベルが低く、しかもその特性が自然界のものに近くな

ることや海草などの巻き込みがなくなることが挙げられる。したがって、魚体尾ひれ型の水中ロボットへの利用法としては、放射雑音のレベルの低減化と低周波数化

が一つの方向と思われる。これが実現化することによって、海洋牧場や生態観察において魚の監視水中ロボットが可能となる。

一方、中央ひれ型についてはこれまでほとんど研究がなされてこなかった。水中ロボットが潮流中を浮遊状態である場所にとどまって海底などの観察を行ったりする場合、姿勢を安定化させる必要がある。また腕で物をサンプリングする場合は腕の動きによる反作用で体が動いてしまい姿勢制御がさらにむづかしくなる。従来はスクリー式推進機を幾つも水中ロボットに付けて位置や姿勢の制御を行っていた。しかし、水中ロボットが停止状態で位置や姿勢の制御を行う場合、スクリー式推進機には正負の推力を迅速に発生するのが難しいという欠点があり、この制御がうまくいかないのが現状である。さんご礁や岩礁地帯での魚の遊泳を見ると、波浪や潮流の外乱の中でも、非常に高い操縦性能を示している。中央ひれ型の水中ロボットへの利用法としては、

静止状態における高い操縦性能

が注目すべき一つの方向と思われる。これが実現化することによって、干潟などの浅海域における波浪や潮流の外乱の中での環境調査や、マニピュレータとロボット本体の運動干渉が起きる浮遊状態での作業型水中ロボットの作業精度の向上や作業領域の拡大が可能となる。

海底歩行式水中ロボットへの適用については、Ayers らの研究に見られるように、

障害物越え能力や波浪や潮流の外乱化での歩行能力が重要な方向と思われる。

2.3 胸鰭運動装置付き水中ロボット

2.3.1 三次元胸鰭運動

抗力型の胸鰭の三次元運動について、Lauder²⁰⁾はバスを用いてその胸鰭の周囲にマーカーを取り付けてその動きの可視化を行った。その結果、抗力型の胸鰭の三次元運動は複雑で、単純に前後運動とひねりだけではないこと、前方方向への移動時においても推力を出している可能性があることを明らかにした。著者²¹⁾は、Lauder らと同じくバスを用いて胸鰭の動きの可視化を行い、さらにそのデータからオイラー角を求めて、胸鰭の動きを表現した。その結果、抗力型の胸鰭の三次元運動においても、前後運動（リード・ラグ）、ひねり（フェザリング）、上下運動（フラッピング）を行っていること、さらに伸縮運動も加わっていることを明らかにした。

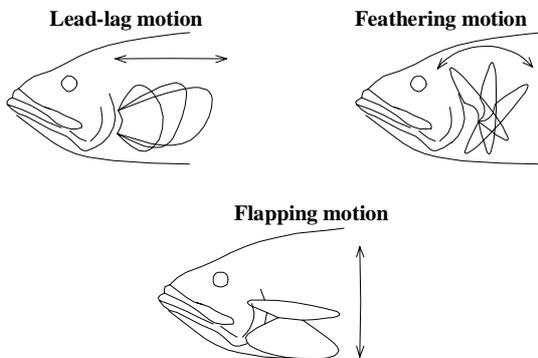


Fig.3 Illustrations of lead-lag motion, feathering motion and flapping motion of a pectoral fin

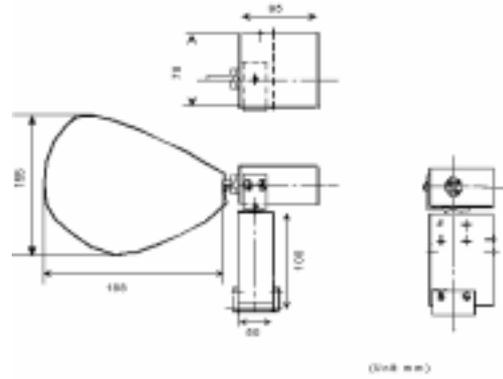


Fig.4 Two-Motor-Driven Mechanical Pectoral Fin

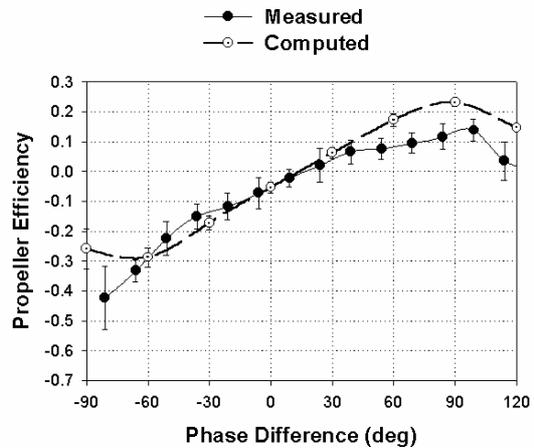


Fig.5 Comparison between a numerical simulation and the experimental results for the propeller efficiency

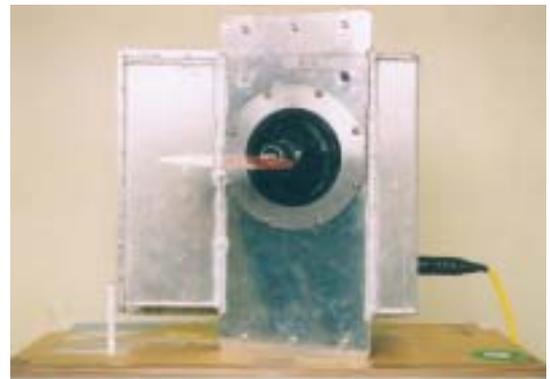


Fig.6 Three-motor-driven mechanical pectoral fin

2.3.2 胸鰭まわりの流れ

Drucker ら²²⁾は PIV (Particle Image Velocimetry) 法を用いて、クロマスの胸鰭後方の流れの渦構造を解析した。低速では、渦が振り下げ時に両側の胸鰭から放出され、振り下げからひねりが入って振り上げに移る時点で、左右一対の渦輪が形成されることを明らかにし、高速遊泳時には、さらに振り上げ時に、渦が放出され、振り下げ時に形成された渦輪に結合することを明らかにした。また、渦循環の計算から、胸鰭が発生する流体力を推定し、横力が推力の 1.25 倍にも達することを示した。

Wilga ら²³⁾は水平状態で遊泳中、胸鰭を揚力面として用いるチョウザメを対象として、胸鰭の役割を PIV 法による流れの三

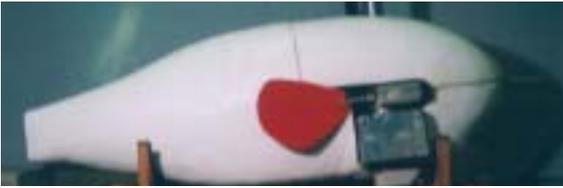


Fig. 7 Fish Robot "BASS-II"

- Measured Course
- Prearranged Course
- Measured Point at every 10 (sec)

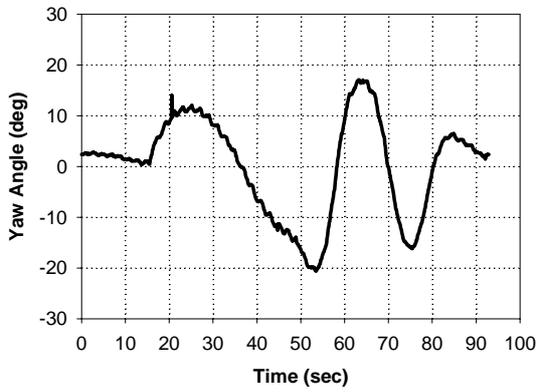
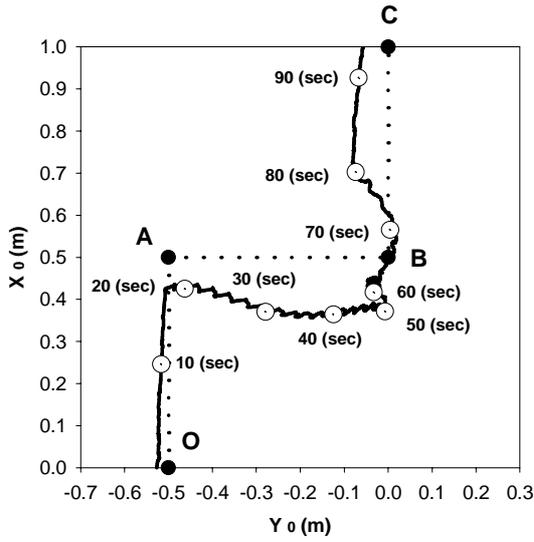


Fig.9 Loci and yaw angle of the fish robot in water current of 0.05 (m/sec)

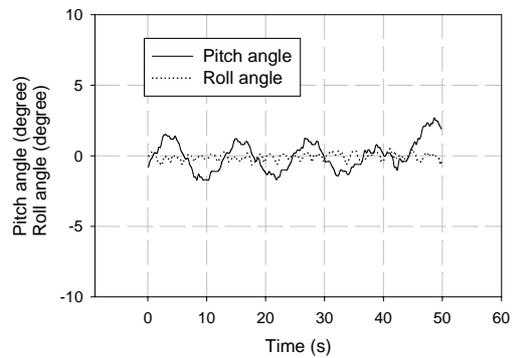
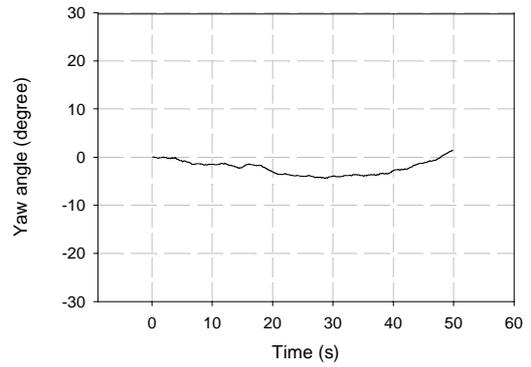
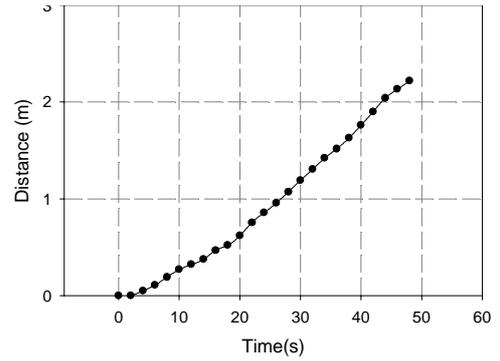
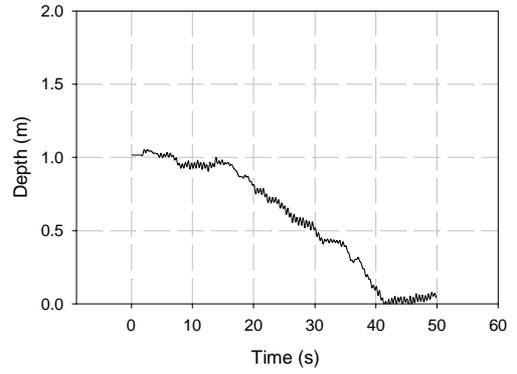


Fig.10 Fish Robot "BASS-III"

Fig.11 Ascending in forward swimming condition

次元解析と筋電図計測によって調べた。その結果、チョウザメが水平状態で遊泳中、胸鰭は負の迎角をもった姿勢を保っているが、大きな揚力は発生させていないこと、胸鰭の後半部がフラップとして動き、頭や胴体の上げ下げを起こして上昇・下降運動を誘起していることを明らかにした。

2.3.3 魚の操縦性と安定性

Webb²⁴⁾は、生物学の立場から、潜水艇における操縦性と安定性はトレード・オフの関係にあるのに対して、魚においては環境に応じて胴体と鰭を用いて操縦性と安定性を巧みに変化させていることを述べた。

Gordon ら²⁵⁾は断面形状の違う4種類のハコフグ科(全長の2/3 から 4/4 を硬い箱上の胴体がしめている)の魚を対象にして、PIV法を用いて鰭まわりの流れを測定し、渦構造から動的安定性について考察した。

2.3.4 胸鰭運動の流体力学

Walker ら²⁶⁾は揚力線理論を用いて、胸鰭の上下振動による揚力型と、前後振動による抗力型の流体力学的特性の差異を論じ、揚力型のほうが低速から高速の遊泳速度にわたって、効率がよいことや、抗力型は低速においてパワーストローク時に揚力型より大きな推力を発生することを明らかにして、抗力型は加速、旋回、操縦時に使われると考察した。

著者²⁷⁾は、前後方向とひねり運動を独立に作る二軸駆動胸鰭運動装置(Fig.4)を製作し、平板の胸鰭模型を用いて、流体力計測を行い、効率を求めた。また、粘性を考慮した非定常渦格

格子法を用いて、流体力と効率の推定を行った(Fig.4)。さらに、著者²⁸⁾は上下方向の運動を加えた三軸胸鰭運動装置を製作し、平板の胸鰭模型を用いて、流体力計測と数値解析を行った。

Sandberg ら²⁹⁾は自動適合格子付非構造格子 NS ソルバーを用いて、胸鰭を含むペラの周りの準定常流れの計算を行い、定常状態と準定常状態の推力と揚力の特性比較を行った。

2.3.5 魚型水中ロボットの遊泳性能

著者³⁰⁾は Fig. 4 の二軸胸鰭運動装置を左右一対取り付け付けた魚型ロボット”BASS-II”を開発した(Fig.7)。試作したロボットは全長1m、幅18cm、高さが35cmの魚型の本体の左右に、厚さ0.6mmのステンレス板で作った胸鰭を付けた。一対の胸鰭を合計4台のモーターを駆動して動かす。水平面内の運動を計測する台車に胸鰭運動装置を組み込んだ魚型ロボットを取り付けその運動を計測したところ、前後運動とひねり運動を組み合わせることによって、魚型ロボットは前進、後退、旋回ができるばかりでなく、横移動も行いうことができたが明らかにした。次に、海中・海底ステーションへの水中ロボットのランデブー・ドッキング模擬実験として、この魚型ロボットを用いて潮流中での平面内での水中ポスト(直径8cm)へのドッキングの誘導制御実験を行った(Figs.8,9)魚型ロボットの運動が数式で表現することが出来ず、また制御入力に関してその応答が非線形であるため、制御則にはそれらの問題に対応できるファジィ制御を用いている。その結果、潮流中においてもドリフト量の少ない横移動を行い、一対の胸ひれ運動装置を用いるだけでこれまでにない誘導制御を可能としている。具体的には、点0から点Aまでと点Bから点Cまでは設定路からのずれと方位角を制御して直進する直進制御を、点Aから点Bまでは同じく設定路からのずれと方位角を制御して横移動を行う横移動制御を行い、点Aと点B近傍では目標地点との距離を制御して減速する減速制御を行っている。点Aから点Bに向かう間、下流へのドリフトが見られるが、点Cでのドッキングに成功している。この間、

方位角の変化は少ない。これは点Aから点Bの間に方位角の変化の少ない横移動制御を用いていることによる。

著者²⁸⁾はさらに、三軸胸鰭運動装置を左右一対取り付け付けた魚型自律水中ロボット”BAS-III”(全長2.0m、質量104.1Kg)(Fig.10)を製作し、遊泳試験を行い、前進、後進、左右移動、平面内旋回、鉛直移動ができることを示した。Fig.11に前進上昇における深度、スタート地点からの移動距離、ヨー角、ピッチ角、ロール角の時間変化を示す。水中ロボットは、少ない姿勢変化で前進上昇することがわかる。この場合、経路角は約38°に達する。

2.3.6 胸鰭装置による浮遊状態のマニピュレータ付き作業型水中ロボットの協調制御

浮遊状態の水中ロボット本体と複数のマニピュレータの間に作用する力は非定常、非線形かつ多くの自由度を持った多変数の動力学システムで、マニピュレータの制御は非常に困難なものとなっている。しかし、この自由度は使い方によって高精度の運動制御を可能とする。例えば、一つの腕がある作業を行なう場合、他の腕は、ロボット本体に加わる反作用力を動的に補償するために、構造物にくっついたり、動かすことによって、ロボット本体を安定化しようとする。このように、自由度の冗長性はロボット本体の制御に用いることが可能である。

これまで、水中マニピュレータの多くの研究は、水中ロボットが海底に接地した状態か構造物にくっついた状態に限られていた³¹⁾。一方、いくつかの研究は浮遊状態の水中マニピュレータの問題を扱っている^{32, 33, 34, 35, 36)}。

著者³⁷⁾は浮遊状態における水中ロボットの複数マニピュレータの協調制御の解析を行なった。制御目的は一つの腕の手先のオープンループ位置制御を行なうことであった。まず、一般外力下での運動の自由度の冗長性を持った複数マニピュレータを有した水中ロボットの逆運動力学の定式化を行った。次に、これを、一本の6自由度を持つ作業用腕と左右一対の2自由度を持つパドル型の安定腕を持つ浮遊状態の水中ロボットに適用した。

ここでは、パドル型の安定腕の代わりに一対の2軸胸鰭運動装置を用いて、水平面において作業腕と水中ロボット本体の運動干渉の低減化を行なった実験結果を示す。Fig.12に実験に用いた作業腕付き水中ロボット模型を示す。模型の大きさは、長さ×幅×高さ=0.9m×0.6m×0.5mであった。質量は25.95Kgであった。マニピュレータは3つのDCモーターが搭載された3リンクから成り立っている。その大きさは、長さ×幅×高さ=0.651m×0.040m×0.0.095mで、質量は2.55(kg)であった。一対の2軸胸鰭運動装置はマニピュレータの根元から0.34m後方に取り付けられた。

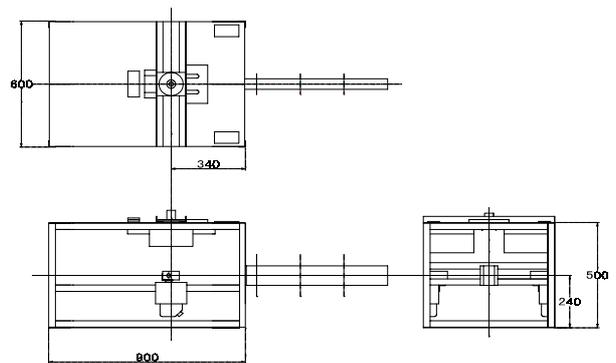


Fig.12 Model of underwater robot with a manipulator

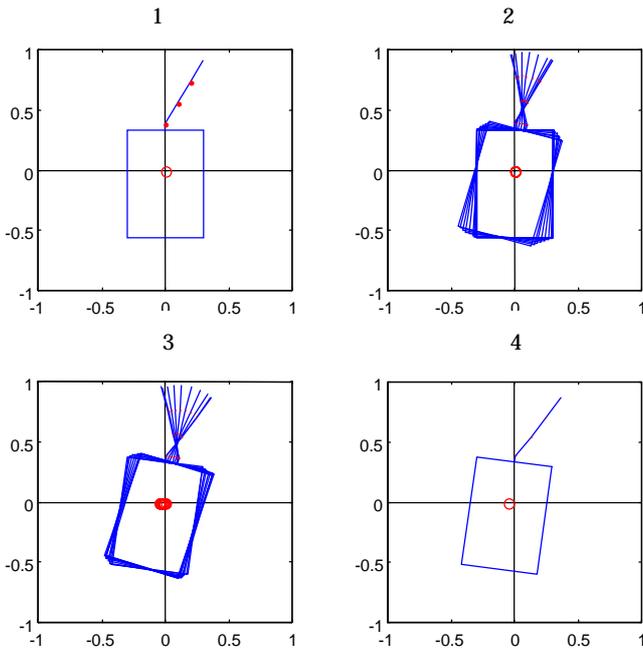


Fig.13 Motion of model of an underwater robot induced by an oscillatory motion of a manipulator

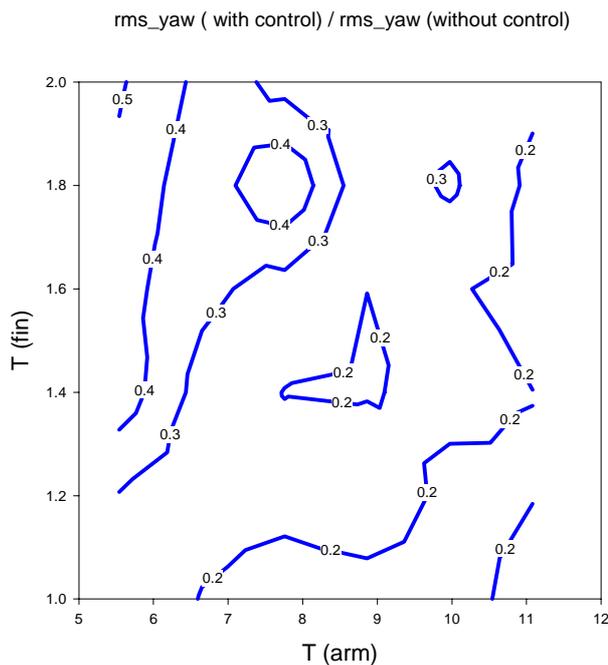


Fig.14 Ratio of yaw motion of model under control to that without control

水中ロボット模型は水平面内の運動を計測する装置に剛に接続棒で結び水中に沈めた。接続棒は、2軸胸鰭運動装置と同じくマニピュレータの根元から0.34 m 後方に取り付けた。制御入力を水中ロボットのヨー角、制御出力を左右の2軸胸鰭運動装置のリード・ラグ角とフェザリング角の位相差として、ファジィ制御を用いた。リード・ラグ角とフェザリング角の振幅は一定とした。

Fig.13 は、マニピュレータが周期 11.1 秒の周期運動を行なっ

た時の水中ロボットのヨー角の時間変化を示す。マニピュレータの運動と水中ロボットの運動の間に強い運動干渉が起きることがわかる。

Fig.14 は、胸鰭運動装置の周期 (1.0 s ~ 2.0 s) とマニピュレータの周期 (5.5 s ~ 11 s) に対して、制御なしの場合と制御ありの場合のマニピュレータの5周期間のヨー角の rms の比を示す。これから、マニピュレータの周期が遅いほど制御性能がよいこと、鰭の周期は制御性能にあまり影響を与えないが、マニピュレータの周期が速い場合は鰭の周期が速いほうが制御性能はよいことがわかる。

3. アクアバイオメカニズム研究のセンサー技術への応用

水棲動物は、環境に適応して視覚、聴覚、臭覚、触覚、電気定位など独特なセンサーを有している。これらの機構を解明することで、新しいセンサーの開発が可能となる。これまで、開発事例は少ないが、今後の方向であると思われる。

聴覚に関して、Nachtigall³⁸⁾ はいるかを用いて泥の中にある識別実験を行い、その識別能力が非常に高いことを示し、さらにいるかのソナーを模倣したソナーと信号処理を用いて、いるかより高い識別能力があることを示した。

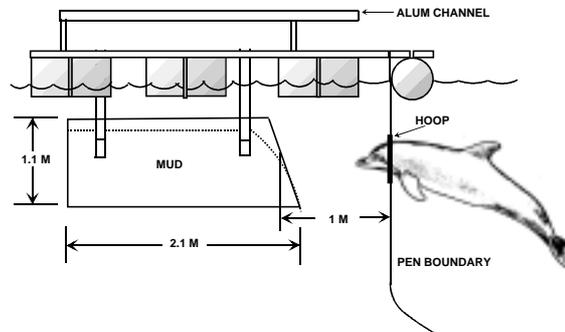


Fig. 15. Diagram of floating mudbox and animal echolocating through the opening while stationing within the hoop (from Nachtigall³⁸⁾)

Ayers ら^{16) 39)} は障害物探知と流れの検出機能を有する lobster のひげを対象にして、マイクロ-エレクトロ-メカニカル-システム (MEMS) を用いたセンサーを開発し、lobster robot に実装することに成功している。

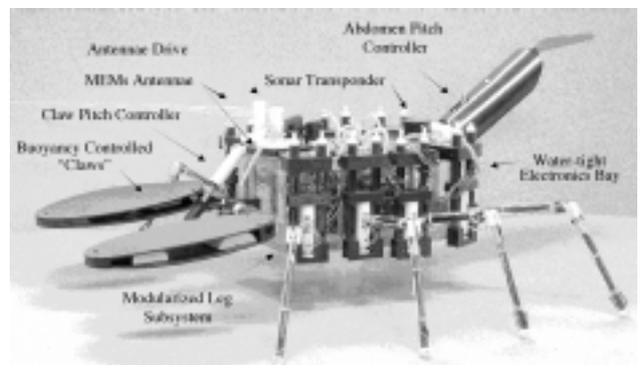


Fig. 16. Lobster Robot Prototype (from Ayers³⁸⁾)

サケの母川回帰について、佐藤⁴⁰⁾ はヒメマスを対象として河川水識別能力をテストし、神経生理学的に臭覚記憶過程を明らかにした。サケが持つ、生まれ育った水の匂いを記憶して、その匂いを辿って川を遡る臭覚行動は、Hasler ら⁴¹⁾ によって最初

に明らかにされた。

サメやエイ、ナマズなどは外界の電気を検出する鋭い電気感覚(受動的電気定位)を持っている。サメは、50nV/cm という微弱な電場をも検出でき、これによって砂中に潜む魚などを捕食する(Kalmijin(42))。さらに、磁場が外洋における動物の定位と遊泳に関係があることに着目して、Kalmijin(43) は地磁気中をサメやエイが移動するときに遊泳方向に応じて電場を発することを発見した。発生した電圧勾配は上記の電気感覚で感知することができるので、定位を行なえることになる。

上記の2例のように、水棲動物はこれまでの人工物にはない感覚機構を持っている。これらの研究開発が望まれる。

4. アクアバイオメカニズム研究のアミューズメントへの応用

水棲動物が泳ぎ方を模倣して泳ぐ模型は、アミューズメントツールとして、用いることができる。

東海大学海洋博物館⁴⁴⁾では機械生物部門で、海の生き物の行動や機能を分析し、そのデータを基にして作り出された多くの機械生物が展示されている。

三菱重工^{45, 46)}は、古代魚シーラカンスや鯛をまねた魚ロボットを開発し、市販を行なっている。シーラカンスは体長70cm、重さが12kgで、体内にバッテリーを内蔵、水中無線情報通信を使ったコンピュータ制御で動く。

KWK⁴⁷⁾は水の流れて泳ぐ特殊シリコンで作った人工クリオネを開発し、市販している。

玩具メーカーのタカラ⁴⁸⁾は魚、クラゲ、カメ、アンモナイトの水中で泳ぐ玩具を販売している。これらは、本体上部のソーラーパネルと内蔵されたモーターによって、光りのエネルギーを動力に変換して泳ぐ。

5. アクアバイオメカニズム研究のマリンレジャーへの応用

速く泳ぐサメでは皮膚表面に間隔が35~100ミクロンの微小な縦溝が形成され、皮膚の抵抗を最小化して遊泳効率を上げている⁴⁹⁾。ミズノ⁵⁰⁾はサメの皮膚構造を模し、高密度の素材に幅の小さな渦を発生させて水の乱流を抑制することで抵抗減少に効果を発揮させ、さらに、素材表面の約75%にうろこ状の撥水プリント加工を施し、プリント部との水流差から生じるタテ渦と、素材の溝の中で発生する小さな渦との相乗効果により表面摩擦抵抗3%減少(従来比)に成功した。

マリンレジャーでは、モーターボートのスクリューへのダイバーの巻き込み事故が多発しているが、スクリューの代わりに魚体尾ひれ型振動機構を取り入れた推進装置を用いることによって、それらの事故を防ぐことができる。また、そのような推進装置を用いれば、浅瀬において藻にからまったりすることを防ぐことができる。

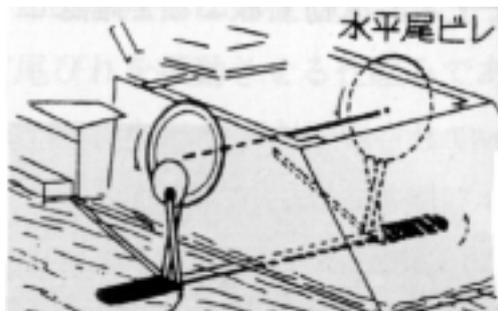


Fig.17 二次元剛体翼水平振動翼推進船機構図(森川³⁾)

あとがき

ここで示したように、アクアバイオメカニズム研究の海洋工学への応用は多方面にわたる。今後、さらに基礎研究と応用研究の両面から研究が進み、生物の持つ多様な機能を利用できるようになることを期待したい。

参考文献

- 1) <http://mdesign.os.u-tokai.ac.jp/aquabio/aqua-isabmec2000.html>
- 2) Hertel, H.: Structure-Form-Movement, Reinhold Publishing Corporation, N.Y., (1966), pp.166-168
- 3) 田中一郎、永井実: 抵抗と推進の流体力学 水棲動物の高速遊泳能力に学ぶ、シブ・アンド・オーシャン財団、(1996)
- 4) 一色尚次、森川裕久: 日本造船学会誌、第642号、(1982) pp.2-9
- 5) Lindsey, C.C.: Form, Function and Locomotory Habits in Fish, In "Fish Physiology VII Locomotion", edited by W.S.Hoar and D.J.Randall, Academic Press, pp.239-313 (1978)
- 6) Nagai, M., Teruya, I., Harada, Y. and Makiya, J.: Investigation of the Aqua-Animal's Oscillating Wing Propulsion Mechanism, Proc. of ASME FEDSM98 (1998)
- 7) 森川裕久、中尾誠太郎、小林俊一: 高速魚の尾ひれ型振動機構における翼挙動制御、第1回ロボットシンポジウム、pp.327-330、(1996)
- 8) Bandyopadhyay, P.R., Castano, J.M., Rice, J.Q., Philips, R.B., Nedderman, W.H. and Macy, W.K.: Low Speed Maneuvering Hydrodynamics of Fish and Small Underwater Vehicles, J. Fluids Eng.(ASME), Vol.119, pp.136-144(1997)
- 9) Triantafyllou, M., Yue, D.K.P. and Grosenbaugh, M.: Fluid Mechanics and Robotics of Fish-Like Locomotion, Proc. of the Special Session on Bio-Engineering Research Related to Autonomous Underwater Vehicles, pp.11-26(1997)
- 10) Hirata, K., Takimoto T. and Tamura, K.: Study on Turning Performance of a Fish Robot, Proc. Of 1st Int. Sym. On Aqua Bio-Mechanisms, pp.287-292(2000)
- 11) 小林俊一、関塚亮、森川裕久: 屈曲型水中推進機構の分散制御、第10回バイオエンジニアリング講演会論文集、pp.631-632(1998)
- 12) Nakashima, M., Kaminaga, K. and Ono, K.: Experimental Study of Two-Joint Dolphin Robot (Propulsive Characteristics of 2nd Large Model), Proc. Of 1st Int. Sym. On Aqua Bio-Mechanisms, pp.311-314 (2000)
- 13) Sfakiotakis, M., Lane, D.M. and Davies, B.C.: Development of a "Fin Actuator for the Investigation of Undulating Fin Propulsion, Proc. Of 1st Int. Sym. On Aqua Bio-Mechanisms, pp.265-270 (2000)
- 14) Kashiwadani, T. and Yokoyama, N.: A Basic Mechanism Model of a Ray-wing Type Propulsor for Underwater Vehicles and Its Kinematic Study, Proc. Of 1st Int. Sym. On Aqua Bio-Mechanisms, pp.305-310 (2000)
- 15) Ayers, J. and Crisman, J.: Lobster Walking as a Model for an Omnidirectional Robotic Ambulation Architecture, in "Biological Neural Networks in Invertebrate Neuroethology and Robotics" edited by R.D. Beer, R.E. Ritzman and T.McKenna, pp.287-316(1992)
- 16) Ayers, J., Witting, J., Olcott, C., McGruer, N. and Masa, D.: Lobster Robots, Proc. Of 1st Int. Sym. On Aqua Bio-Mechanisms, pp.277-286 (2000)
- 17) Flannigan, W.C., Nelson, G.M. and Quinn, R.D.: Locomotion Controller for a Crab-like Robot, Proc. of 1998 IEEE International

- Conference on Robotics and Automation, pp.152-156 (1998)
- 18) Vaidyanathan, R.: Hydrostatic Robot for Marine Applications, Video Proc. of 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (1998)
 - 19) 鈴木雄二、笠本伸英:乱流の知的能動制御、造船研究、Vol.30, No.2, pp.12-18 (1998)
 - 20) Lauder, G.V., Pectoral Fin Locomotion in Fishes: Testing Drag-based Models Using Three-dimensional Kinematics, Amer. Zool. 36:567-581(1996)
 - 21) Kato, N., Three-Motor-Driven Mechanical Pectoral Fin, 11th International Symposium on Unmanned, Untethered Submersible Technology, (1999)
 - 22) Drucker,E.G. and Lauder, G.V., Locomotor Forces on a Swimming Fish: Three-Dimensional Vortex Wake Dynamics Quantified Using Digital Particle Image Velocimetry, J. Exp. Biol., 202, 2393-2412(1999)
 - 23) Wilga, C.D. and Lauder, G.V., Locomotion in Structure: Function of the Pectoral Fins, , J. Exp. Biol., 202, 2413-2432(1999)
 - 24) Webb,P.W., Maneuverability versus stability? Do fish perform well in both?, 1st International Symposium on Aqua Bio-Mechanism, pp.21-29, (2000)
 - 25) Gordon, M.S. and Bartol, I.K., Dynamic Stability of Swimming in Boxfishes (Teleostei: Ostraciidae), 1st International Symposium on Aqua Bio-Mechanism, pp.51-56, (2000)
 - 26) Walker, J.A. and Westneat, M.W., Mechanical performance of aquatic rowing and ‘ying Proc. R. Soc. Lond. B 267, 1875-1881(2000)
 - 27) Kato,N., Hydrodynamic Characteristics of a Mechanical Pectoral Fin, Trans. of ASME, J. of Fluids Engineering, Vol.121, No.3,pp.605-613 (1999)
 - 28) 加藤直三、ブギ ウィック W、鈴木佳広、三軸胸鰭運動装置の流力特性と自律型水中ロボットへの応用、日本造船学会論文集、第 188 号, pp.365-375(2000)
 - 29) Sandberg, W.C. , Ramamurti, R., Westneat, M.M. and Walker, J.A., 3-D Computations of Flapping Aquatic Flight, 1st International Symposium on Aqua Bio-Mechanism, (2000)
 - 30) Kato,N., Control Performance in Horizontal Plane of a Fish Robot of Fish Robot with Mechanical Pectoral Fins, IEEE J. of Oceanic Engineering, Vol.25, No.1,pp.121-129(2000)
 - 31) Ioi.K. and K.Itoh,1990,”Modelling and Simulation of an Underwater Manipulator,”Advanced Robotics, Vol.4,No.4, pp.303-317
 - 32) H. Mahesh, J.Yuh and R.Kakshimi, 1991,”A Coordinated Control of an Underwater Vehicle and Robotic Manipulator,” J. Robotic Systems, Vol.8,No.3, pp.339-370
 - 33) S.McMillan, D.E.Orin and R.B.McGhee,”DynaMechs,1995,”An Object Oriented Software Package for Efficient Dynamic Simulation of URVs,”Underwater Robotic Vehicles Design and Control (Editor: J. Yuh), pp.73-98
 - 34) Leabourne,K.N. and S.M.Rock,1998,”Model Development of An Underwater Manipulator For Coordinated Arm-Vehicle Control,” OCEANS’98(IEEE)
 - 35) Lapierre, L., P. Fraisse and N.K. M’Sirdi, 1998,”Hybrid Position/Force Control of a ROV with a Manipulator,” OCEANS’98(IEEE)
 - 36) Diaz,E.O., C.C.d.,Wit and M. Perrier, 1998, “A Comparative Study of Neglected Dynamics on an Underwater Vehicle/Manipulator System under Nonlinear Robust Control,” OCEANS’98(IEEE)
 - 37) Kato, N. and D.M. Lane, 1996, ”Co-ordinated Control of Multiple Manipulators in Underwater Robots,” *Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.2505-2510, Minneapolis, MN, April 22-28
 - 38) Nachtigall, P. E., Au, W.W. W. L., Roiblat, H. L. and Pawloski, J. L., Dolphin Biosonar: A Model for Biomimetic Sonars, Proc. Of 1st Int. Sym. On Aqua Bio-Mechanisms, pp.115-120 (2000)
 - 39) <http://www.dac.neu.edu/msc/burp.html>
 - 40) 佐藤真彦, 2001,”サケの母川回帰と臭覚記憶,” 第 8 回アクアバイオメカニズム研究会講演会前刷集、 p.2
 - 41) Hasler, A.D. and W. J. Wisby, 1950,”Use of fish for the olfactory assay of pollutants (phenols) in water,” *Trans. Am. Fisheries Soc.* 79, pp. 64-70
 - 42) Kalmijin, A.J., 1978,” Electric and magnetic sensory world of sharks, skates, and rays, “ In E.S. Hogdson and R.F. Mathewson eds.,” *Sensory Biology of Sharks, Skates, and Rays*,” Office of Naval Research, pp.507-528
 - 43) Kalmijin,A.J., 1974,” The detection of electric fields from inanimate and animate sources other than electric organs,” In A. Fassrad ed., “*Handbook of Sensory Physiology*,” Vol.III/A, Springer-Verlag, pp.147-200
 - 44) http://www.scc.u-tokai.ac.jp/sectu/kaihaku/mechqua/mequ_gen.html
 - 45) <http://www.mhi.co.jp/news/sec1/001225.html>
 - 46) <http://www.mhibuild.com/koukyou2/animalsys/anima.html>
 - 47) <http://www.d4.dion.ne.jp/~kwkotoshi/>
 - 48) <http://www.intervogue.co.jp/aqua/item.html>
 - 49) Raschi, W. and C. Tabit, 1992, “Functional aspects of placoid scales: a review and update,” *Aust. I. Mar. Freshwater Res.*, Vol.43, pp.123-147
 - 50) <http://www.mizuno.co.jp/catalog/swimming/>