

所属機関：オーピーバイオフィクトリー株式会社
氏名：金本 昭彦
所属機関住所：〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎5-8
e-mail：akihiko.kanamoto@opbio.com
研究キーワード：海洋生物資源, 医薬品, 化粧品, 健康食品, 事業化



海洋生物資源を活用した事業展開

Unlocking the Potential of Marine Bio-Resources for Life Science Applications

2015年ノーベル医学生理学賞を受賞した大村智北里大学特別名誉教授は、ゴルフ場の土から化合物エバーメクチンにつながる微生物を発見、これが画期的な感染症特効薬の創造につながった。世界にはまだ数多く、生物資源由来の未知の有機物・化合物が眠っており、創薬や化粧品開発にイノベーションを起こす可能性がある。そうした期待感が高まる中で、生物資源のフロンティアとして注目される場所がある。それは地球総面積の約7割を占める海洋である。

実際、近年、製薬企業をはじめに食品、化粧品、化学などさまざまな分野の企業が、海洋生物資源の利活用に取り組み始めている。当社は、それら機関にシード探索機能を提供する日本で唯一の営利追求型海洋生物資源研究開発会社である。



私は鹿児島大学大学院でクラゲやサンゴの生態を研究し、修了後は海洋調査会社に入社、環境アセスメントに関する業務に携わる。自身で海に潜り、海洋生物をサンプリング・調査することもあり、その経験から海洋生物を活用した新ビジネスに取り組みたいと考え始めていた。陸上の生物資源を集める企業は存在したが、海洋生物を対象にした企業は世界でもほとんど例はなく、日本では皆無。一部大学が海洋生物資源のライブラリー化を進めていたが、企業の研究開発ニーズに柔軟かつスピード感を持って対応することには限界があることは明白で、そこにビジネスチャンスがあると感じていた。

日本は領海および排他的経済水域の面積で世界第6位の海洋国。世界の海に生息する既知種（微生物を含む）23万種のうち約15%が日本の海域に生息する。なかでも亜熱帯域に属する沖縄県は、海洋生物資源の宝庫で、未探索の生物・微生物が多いことは明らかである。

当時、私は沖縄の海洋調査会社・海洋プランニング株式会社に勤務しており、同社の社長の後押しもあって起業準備に入った。その際、ちょうど沖縄県がバイオベンチャー



の誘致・創業支援を行っており、そこにビジネスモデルを提案し、創業補助金の採択を受けることに成功した。そこから始まり、2016年2月で10歳を迎えるベンチャー企業である。

ただ、当時、海洋調査のノウハウを活かした生物のサンプリングには自信があったが、創薬・製薬に関しては全くの素人で、どうすれば事業に付加価値が出

せるのかわからない。そこで、大手製薬会社ホームページの問合せ欄から『海洋生物を研究開発に使えますか』とメールを片端に送りました。この場渡りの体当たり作戦が意外にも上手くいき、ビジネスに興味を持つ製薬会社が複数現れた。そこで顧客のニーズが実際にあることが把握できたことで、事業開発のスピードが加速した。

海洋生物資源のサンプリングでは、魚やサンゴなどのマクロ生物や、微生物を含む泥や海水を採集する。創業当初は沖縄のみでサンプリングをしていたが、現在は全国で採取に協力してくれる漁師とのネットワークを構築、北海道から沖縄まで海洋資源を採集できる体制を整えた。マクロ生物のエキスを、培養した微生物や微細藻類から、抽出物を作製してライブラリー化する。現在、微生物や微細藻類で2万、マクロ生物抽出物を含めると3万のライブラリーを構築している。

創業時はこのライブラリーに登録される抽出物を販売することが主力事業であったが、現在では、企業の目的や希望に応じて、ライブラリーの抽出物を用いてスクリーニングし、医薬品や機能性食品、化粧品の候補物質を選定する受託研究・共同研究が収益の9割を占めている。「製薬会社での創薬経験者など、高度なスクリーニングができる人材を確保した」ことで、新しい成長事業が立ち上がった。

抗生物質ペニシリンが青カビから発見されたように、生物資源は古くから創薬に活用

されてきた。やがて、アクセスのしやすい陸上生物は大方調査が終わり、製薬会社は合成化合物から医薬品を開発するようになった。しかし、人間がデザインした合成化合物には多様性に限界があり、革新的新薬は生まれにくいこともあり、海外の製薬会社を中心に生物資源への回帰が起こっており、順調に受託研究件数が増加している状況が現在である。



アメリカ・サンディエゴにも専属スタッフを配置し、製薬会社やヘルスケア系企業のニーズに対応している。

また、食品業界は健康・機能性食品や調味料の開発に、化粧品業界は美白・保湿・細胞活性化などの成分の探索に、海洋資源ライブラリーを活用している。化学メーカーもバイオベース製品の開発において海洋資源に注目している状況である。



受託研究に加えて、当社独自で新規活性化化合物を研究開発し、ライセンス提供する事業も展開している。2013年には、鹿児島県加計呂麻島の海底砂から採取した微生物から、抗真菌効果を示す新規化合物「カケロマイシン」を発見、現在はライセンス先にて臨床開発を目指して研究を進めている。

今後当社では、化合物など原料の量産や安定供給の支援にも事業領域を広げていく方針である。2015年2月には、化粧品・健康食品原材料メーカーの一丸ファルコス（岐阜県）と資本業務提携を結んだ。

我々の使命は海とお客さまの間を繋ぐことである。創薬や健康食品、化粧品開発の上流から下流まで対応するサービスを提供できるよう、体制を整えていく予定である。

所属機関：国立研究開発法人海洋研究開発機構
氏名：白山 義久
所属機関住所：〒237-0061 横須賀市夏島町2番地15
e-mail：yshira@jamstec.go.jp
研究キーワード：海洋生物学／自然史学／生物多様性／
機能形態学



海洋生物の自然史学に学ぶバイオミメティクス

Biomimetics Inspired by Natural History of Marine Life

1. 自然史学とバイオミメティクス

生物の「技術体系」は、進化・適応過程における機能の最適化の産物です。生物の進化・適応を促す駆動力は環境の変化に他なりません。つまり生物の「技術体系」を真に理解し、そこからヒントを得るには、単に生物だけを眺めるのではなく、その生息環境も含めた生物の「生き方」、すなわち「自然史」から学ぶことこそが重要だと思われます。その点で、地上とは全く異なる環境に生息する海洋生物の自然史には、陸上の生物には見られない独自の「技術体系」が存在していると考えられます。

2. 海洋生物の自然史とバイオミメティクス

海洋生物には、工学から見てきわめて興味深い構造や機能を見ることができます。陸上の生物は、重力に対抗することに体の作りが強く規定されているので、その体制の自由度は海洋生物よりもかなり制約されています。一方海洋生物は、水中に生活するという別の観点の制約を強く受けています。水中生活の特徴として、水という強い粘性抵抗のなかで生活すること、浮力を受けて3次元的な構造を作りやすいという2点が挙げられます。

前者に関しては、サメ肌のリブレット構造に学んだ流体抵抗の削減技術、ミナミハコフグの形状に学んだバイオニックカーなど、バイオミメティクスの代表例とも言うべき工学応用が生み出されています。後者については、例えば栄養が少ない深海で、最小のエネルギーで最大の力学的強度を得ようとする単体サンゴの骨格をあげることができます。この動物の骨格構造はなんとなく車の高級ホイールを想起させるものです。実際、メルセデスベンツの最新型が採用したホイールのデザインは、似ていると思いませんか？

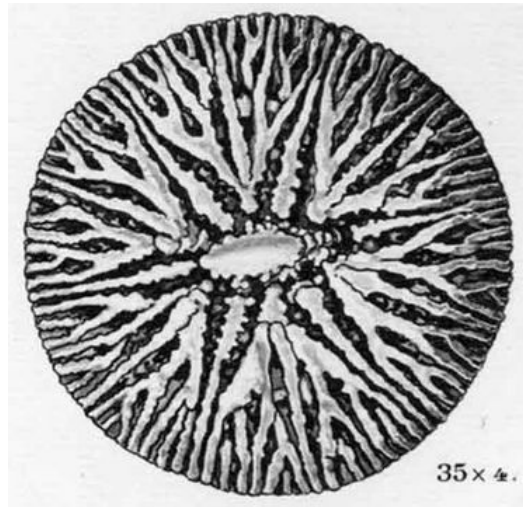


Fig. 1. Skeleton of *Stephanophyllia fungulus*. Taken from Encyclopedia of Life.



Fig.2. Wheel design of recent Mercedes S-class.(From Mercedes web site.)

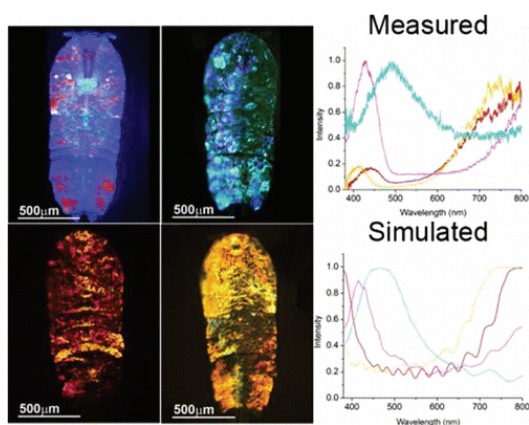


Fig. 3. Optical micrographs and reflectance spectra of *Sapphirina*.²⁾

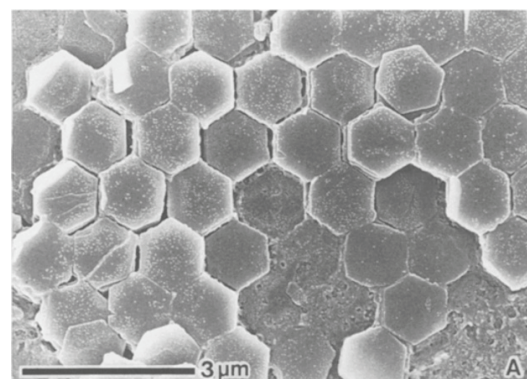


Fig. 4. SEM image of platelets from dorsal integument of *Sapphirina* spp., male.¹⁾

水中に生活するということに付随して、水が光（特に長波長側）を速やかに吸収するので、環境には赤が少なく青が多い、電磁波よりも圧力波（音波）の方が遠くまで届く、なども特徴としてあげられるでしょう。

表層付近では、それでも光はふんだんにあり、生物は光を重要な情報源として使っています。ほぼすべての魚類が、背中側の色が濃く、腹側の色が薄いのは、上から入射してくる太陽光に対して、カモフラージュすることが目的と考えられます。なかには、積極的に光を使うものもいて、構造色を呈する動物も少なくありません。代表的なのは、サフィリナと呼ばれるカイアシ類のなかまで、美しい構造色をしています¹⁾。この構造色はオスのみにみられるものです。土佐の漁師はこのフランクソンの生息している海域を「玉水」とよんで、カツオ漁場の指標に使っていました。サフィリナの構造色はグアニンの多重構造を皮膚の下に持つことで実現されています^{1, 2)}。

3. 自然史学とのさらなる連携に向けて

今年の1月、*Nature* 誌に掲載された「Bring biologists into biomimetics」と題した記事によると²⁾、直近3ヶ月に出版された300報のバイオミメティクス関連論文のうち、生物学者を著者に含むものはわずか8%に過ぎないとのこと。またそれらの論文で扱われている生物が、ヤモリ、クモ、チョウに極端に偏っていることも指摘されています。つまりこれまでに蓄積されてきた膨大な「自然史学」の知識のうち、バイオミメティクスでの利用が進んでいるのはごくごく一部に過ぎないということです。海洋生物の自然史となると、その割合はさらに低下するでしょう。

しかしながら逆の見方をすれば、自然史学との連携を深めることによって、バイオミメティクスが一層飛躍する余地が多分に残されていると言えます。そのためには、まず海洋生物の自然史を知識体系として構築することが何よりも重要だと思います。そのような試みの中には、長谷山先生の画像検索エンジンのような最先端の情報技術を活用して知識体系を工学者が使えるようにする努力も含まれます。加えて生物学にとってのバイオミメティクスの意義を認識することも重要だと思います。構造色や表面の濡れ性といった物理化学の原則に基づく生物機能は、遺伝子をいくら調べても決して解明できません。バイオミメティクスを通して得られる生物の「技術体系」に関する知見が、生物学にフィードバックされることにより、次世代の自然史学が生まれることにも期待しています。

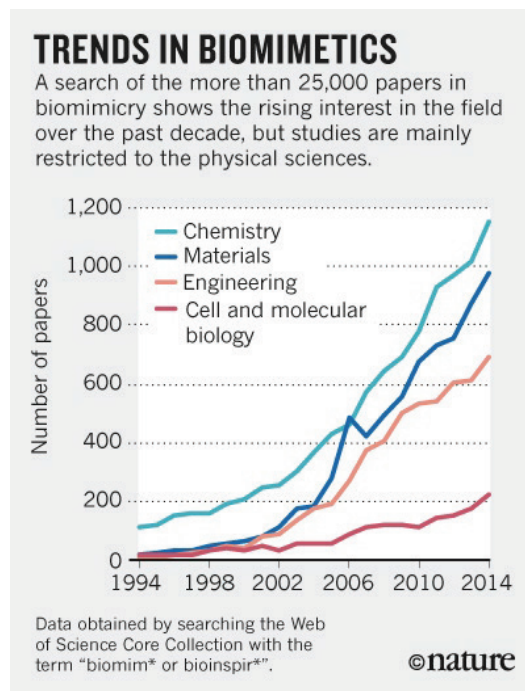


Fig. 5. Recent trends in publications related to biomimetics.³⁾

参考文献

- (1) Chae, J., Nishida, S. *Mar. Biol.* **1994**, *119*, 205–210.
- (2) Gur, D., Leshem, B., Pierantoni, M., Farstey, V., Oron, D., Weiner, S., Addadi L. *J. Am. Chem. Soc.* **2015**, *137*, 8408–8411.
- (3) Snell-Rood, E. *Nature* **2016**, *529*, 277–278.

所属班：A01班
所属機関：国立科学博物館
氏名：松浦 啓一
所属機関住所：〒305-0005 茨城県つくば市天久保4-1-1
e-mail：matsuura@kahaku.go.jp
研究キーワード：魚類，産卵巣，フグ類，新種，琉球列島



新種のフグが作る海底のミステリーサークル： 魚の「建築」技術を探る

Mystery Circles Constructed on Sea Floors by a New Pufferfish: How Fishes Build Their Nests

1. はじめに

多くの魚類は大量の卵を水中へ産卵する。産卵された卵や孵化した稚魚の大半は捕食者の餌食となってしまう。しかし、非常に多数の卵を産めば、少数の子孫が生き残ることができる。つまり、多くの魚類は運にまかせて次の世代を形成している。しかし、生き残る確率を高める戦略を採用した魚類もいる。親が産んだ卵を世話する魚たちである。たとえば、サンゴ礁に生息するスズメダイやクマノミの仲間たちは卵をサンゴや岩の表面に産みつけ、孵化するまで親が保護する。淡水にすむ多くのカワスズメ類やサンゴ礁に生息するモンガラカワハギ類やカワハギ類は砂地に浅い窪みを作り、その中に卵を産んで親が保護する。淡水魚のイトヨやトミヨの仲間は水中植物などを使って産卵巣を作り、その中に卵を産んで、親が保護する。しかし、魚類が作る「産卵巣」は親の体と同じ大きさか、やや大きい程度である。ところがフグ類の中に自分の体の17倍もある巨大な産卵巣を作る新種が発見された。しかも、新種のフグが作る産卵巣は複雑で奇妙な形をしているため、発見したスキューバダイバー達は「ミステリーサークル」と呼んでいる。今回の発表では新種のフグが作る「ミステリーサークル」の特徴とフグの産卵行動、そして、他の魚類の「産卵巣」や産卵習性も紹介する。

2. 新種のフグが作る巨大な産卵巣

奄美大島南岸で地元のダイバー達が20年前に不思議な造形を発見した。海底の砂地に直径2mもあるサークルが4月から8月にかけて毎年出現する。サークルの周縁部には土手のような盛り上がりがあり、多数の溝が中心部から放射状に走る。

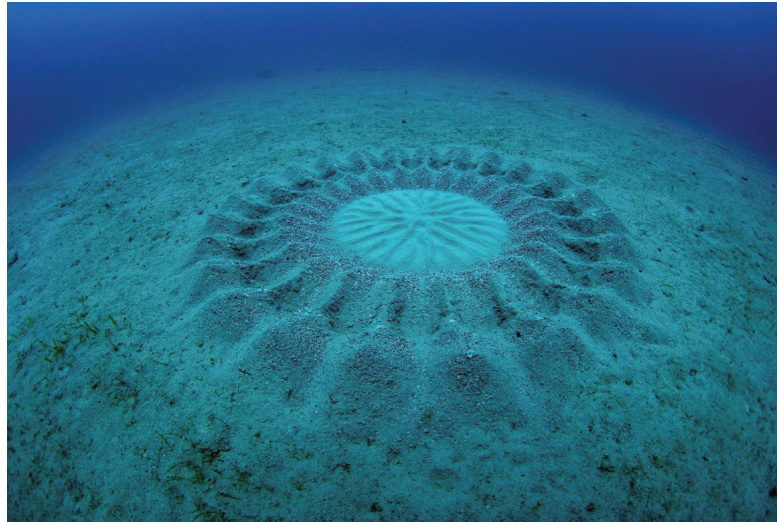


Fig. 1. Spawning site of a pufferfish, *Torquigener albomaculosus*. Photograph by Yoji Okata.

幾何学的な模様をもつ不思議なサークルを地元のダイバー達は「ミステリーサークル」と呼んでいる。しかし、「ミステリーサークル」がどのようにできるのか、あるいは何者が作るのかは長い間謎のままであった。この謎に終止符を打ったのは水中写真家の大方洋二氏であった。大方氏は小型のフグが「ミステリーサークル」を作る様子を観察したのである。このフグの水中写真を検討した結果、シッポウフグ属の新種であることが判明した。そして、演者を中心とする研究グループは新種のフグを2014年に採集することに成功した。標本を詳細に調べた結果、頭蓋骨の特徴や下顎の形態、体表面を走る側線の形状、そして体の色彩が既知のフグ科魚類とは異なることが明らかになった。演者はこの新種のフグに *Torquigener albomaculosus* という学名とアマミホシゾラフグという和名をつけて2014年に発表した⁽¹⁾。

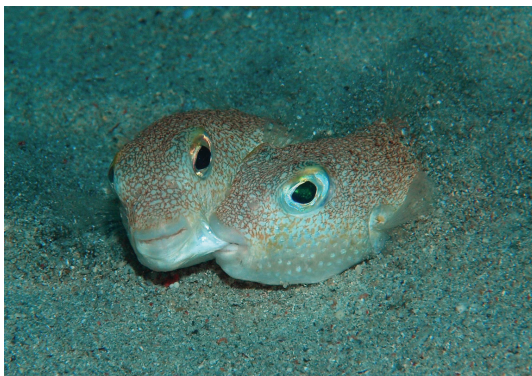


Fig. 2 *Torquigener albomaculosus*: photographed by Yoji Okata on the south coast of Amami-oshima Island, Ryukyu Islands.

アマミホシゾラフグの最大の特徴は巨大な産卵巣を作ることである。アマミホシゾラフグのオスは1週間かけて「ミステリーサークル」と呼ばれている産卵巣を作る。産卵

巢の直径はオスの全長の約 17 倍もある。人間にたとえると、32m の巨大なサークルということになる。メスは産卵巣を訪れ、中心部に産卵する。粘着性のある卵は砂の中に入り込む。メスが産卵するのは満月か新月の数日前で、卵は 2 日くらいで孵化する。産卵巣には 24 本から 30 本の放射状の溝があるため、海水が潮流によって中心部に流れ込む⁽²⁾。

このように複雑で巨大な産卵巣を作る魚類は他に存在しない。アマミホシゾラフグのオスが 1 週間もかけて、巨大な産卵巣を作る理由は未だに分かっていない。フグ目のモンガラカワハギ科やカワハギ科の魚たちは海底の砂地に窪んだ産卵巣を作る。しかし、その形態は単純な窪みであり、複雑な模様はない。また、これらの魚類が作る窪みの直径は親魚の全長の 2 倍程度である。アマミホシゾラフグが作る産卵巣には放射状の溝があるため、どの方向から潮流が流れてきても、新鮮な海水が中心部にある卵に供給される。また、海底の砂地は平坦な地形であるため、メスがオスを探す際に、巨大で複雑な模様のあるサークルは良い目印になると思われる。この推論を確認するためには行動生態学的な操作実験が必要である。しかし、産卵巣が水深 25m の海底にあるため、多数の産卵巣を観察したり、フグを多数観察して行動を比較したりすることは不可能である。

魚類全体を見渡すとトゲウオ科のイトヨやトミヨのように水中の植物の破片を利用して産卵巣を作るグループがいる。また、カワスズメ科やモンガラカワハギ科、カワハギ科のように水底に浅い窪みを掘って産卵する魚類もいる。しかし、魚類全体から見れば産卵巣を作る種類は非常に限られている。卵の生残率は産卵巣があれば高くなるが、親魚が産卵巣を作るためには一定の場所にとどまる必要があり、捕食者によって襲われる危険が増大する。産卵巣を作ることによるメリットがある一方でデメリットもあるわけである。アマミホシゾラフグの産卵巣はこれまでに報告された魚類の産卵巣と比べると、際だって大きく形状が複雑である。フグ目の中で何故このような産卵巣が出現したかを明らかにするためには、フグ科魚類をはじめとするフグ目全体の系統関係や行動生態に関する研究が必要である。

参考文献

- (1) Matsuura, K. *Ichthyol. Res.* **2014**, doi: 10.1007/s10228-014-0428-5
- (2) Kawase, H.; Okata, Y.; Ito, K. *Sci. Rep.* **2013**, 3 doi:10.1038/srep02106

謝辞

大方洋二氏はアマミホシゾラフグと産卵巣の水中写真を提供して下さった。伊藤公昭氏、大方洋二氏、片山英里氏、千葉悟氏、吉田朋弘氏は標本を採集して下さった。片山英里氏と千葉悟氏はタイプ標本の写真を撮影して下さった。これらの方々に謝意を表す。

氏名：西田 睦（琉球大学）
住所：〒903-0213 沖縄県西原町千原1番地 琉球大学役員室
e-mail：nishida@jim.u-ryukyu.ac.jp
研究キーワード：
進化生物学，魚類，水圏生物，分子系統，ゲノム進化



氏名：馬渡 駿介（北海道大学名誉教授）
e-mail：shunfm@sch.hokudai.ac.jp
研究キーワード：
分類学，無脊椎動物，自然史博物館，自然史標本，進化



国立自然史博物館はバイオミメティクスのメッカ！？

The National Museum of Natural History as a Mecca for Biomimetics Researches

1. はじめに

生物を規範として人類に役立つものを作り出す生物規範工学は生物を知らなくては成り立たない。自然史科学は自然を研究することで生物規範工学と自然の中の生物との間を取り持つ。ところが今日，その自然が破壊の危機にさらされている。自然が破壊されれば生物規範工学の飯の種である生物も失われてしまう。そうならないために，あるいはそうなる前に，自然史科学を振興し，自然史研究を加速し，自然を研究しつくさなければならない。学術会議は自然史科学研究のメッカとしての「国立自然史博物館の設立」に向けて活発な活動を展開してきた。その成果の一つとして，「学術会議提言」を社会へ向けて近々公表する。その内容は以下の通りである。

2. 提言「国立自然史博物館設立の必要性」作成の背景

日本学術会議は60年近く前から，自然史科学の振興と自然史博物館の充実をはかる声明，提言，報告を出してきた⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾。それをさらに実現に近づけるべく，動物科学分科会主催公開シンポジウム「分類学は旧くて新しいー国立自然史博物館の設立に向けてー」の開催準備を進めていた折，2011年3月11日に東日本大震災が起こった。東北地方の自然が大きく姿を変え，博物館等施設が被災し，収蔵自然史標本の多くが失われ，我が国の自然史科学研究体制の脆弱性が明らかとなった⁽⁷⁾。この非常事態を受け，動物科学分科会をはじめとする4分科会は，国立自然史博物館の設立を急務と認識して活動を始め，シンポジウムを開催し⁽⁸⁾⁻⁽¹³⁾，日本学術会議マスタープラン2014に応募・採択される⁽¹⁴⁾などの成果を得た。そして，合計9分科会+5組織による提言を以下のようにとりまとめた。

3. 現状と問題点

人類は長い間，地球環境と調和を保ちつつ，かつそれに依存して生きてきた。ところが，農耕牧畜の開始以来，地球環境は徐々に変貌していった。特に過去数十年間は，人

口爆発と工業化により地球環境は急速に悪化し、人類は存続の危機を迎えつつあると言えるだろう⁽¹⁵⁾。この人類自らがもたらした状況には、地球資源は有限であるにもかかわらず、無尽蔵であるとする誤った自然観が広く共有されてきた背景がある。地球環境の研究を刷新・加速し、地球環境と調和して生きる新しい自然観を提示し、早急に自らの手で地球環境破壊を阻止しなければ、人類存続の危機は深刻さを増すばかりである。地球環境の研究はこれまで、岩石・鉱物学、地質学、古生物学、人類学、分類学、系統学、生態学、生物地理学、進化学などの多様な分野を含む自然史科学が担ってきた。しかし、最近、地球環境破壊は急速に進行しており、その実態の把握と近未来に予想される事態への対応は、現在の自然史科学の研究体制ではおぼつかない。

4. 提言の内容

地球環境の人為的破壊が急速に進み、人類の存続が危ぶまれている今日、60年近く前からの学術会議の主張を引き継ぎ、地球環境を人為破壊から守り、人類の存続を図るという究極目的を果たすために取り得る重要手段として、国立自然史博物館を設立すべきである。国立自然史博物館は、地球環境の変遷を様々な時間・空間スケールで記録している自然史標本を核とし、生物を含む地球環境変遷の研究を担う自然史科学の研究体制を強化して研究を刷新・加速し、その研究成果から地球環境との調和を取り戻す自然観を新しく構築してその普及を図る。さらに、生命進化と環境変遷の証拠としての大量の自然史標本と自然史データを収集・整理・継承・活用し、様々な応用研究や政策に貢献するこれまで類のない新たな研究教育拠点である。設立地は、自然環境が南北で大きく異なる国土と、予想される東南海地震による標本喪失のバックアップを考慮し、南は沖縄、北は北海道か東北が望ましい。

学術的意義 国立自然史博物館では、最新の研究手法に基づき自然史研究を刷新・加速する。たとえば、先進国唯一の生物多様性ホットスポットである我が国の特色を生かして網羅的に自然史標本を収集・保存し、これらを、内部微細構造の非破壊的解析、元素分析、ゲノム解析などの最新の手法で研究する。さらに、既存の自然史系博物館や一般市民の持つ標本やデータから情報を抽出する。自然資源に恵まれながらその解明度が低い東アジア地域を中心に、国際協力によるフィールドステーションを設け、恒常的な自然観測を強化する。このようにして得られた多種類の大量データを、標本を担保した上で情報学を駆使して解析・統合することにより、“ビッグデータ自然史科学”とも言うべき研究を推進する。自然史研究の推進はいわば科学インフラの整備でもあり、その成果は、環境変動の解明、資源探査、工学的応用から地球環境政策の策定まで、さまざまに利用され、人類の持続可能性を高めることに貢献する。

人材育成 国立自然史博物館は、大学や大学院大学との連携の下、大学・大学院教育に参画し、大学生・大学院生に自然史科学を教育する。これにより自然史研究の後継者育成および自然史科学を理解する教員を養成し、自然史科学の普及をはかる。さらに、研究を補助する標本管理者や展示・教育・普及を担当する専門技術職員など多様な人材も育成する。このことは、自然史標本と自然史科学の社会的認知度を上げ、我が国を環境先進国として世界に認めさせるだけでなく、文化国家として一層発展させる基礎となる。

社会貢献 特に地球環境と人類の関わりの歴史と最近の人為的地球環境破壊の歴史に焦点を当て、それらを証拠立てる自然史標本を先端技術を駆使して展示する。これにより、地球環境と人類の危機に対する人々の理解を深め、地球環境との共生を素直に発想できるような教育普及を行い、自然と共に生きる新しい自然観を広める。遠隔地からでも展示内容にアクセスできるようにWEBサイト展示を展開し、人々から自然史標本や自然史情報の提供を受ける一方、自然史標本の同定依頼、あるいは教育現場での利用

相談に対応するなど、社会との双方向コミュニケーションを図る。

国際貢献 国立自然史博物館は研究によって世界へ貢献することはもちろん、特に東アジア諸国における自然史研究分野の研究能力向上と若手研究者の育成において国際貢献を果たす。生物多様性条約に起因する遺伝資源の利用から生じた利益の公正で衡平な配分（ABS 問題）に対処するため、対象生物原産国の若手人材育成を行う。同じく生物多様性条約が定めた世界分類学イニシアティブ（GTI）に準拠し、分類学分野の人材を育成する。さらに、地球規模生物多様性情報機構（GBIF）に自然史標本情報を提供するなど、自然史科学研究全般において国際協力の役割を果たす。

参考文献

- (1) 国立科学博物館編(1977)「国立科学博物館百年史」第一法規出版, 898 ページ。
- (2) 第 19 期日本学術会議動物科学研究連絡委員会・植物科学研究連絡委員会報告 (2005 年 8 月 29 日)「自然系博物館における標本の収集・継承体制の高度化」。
- (3) 第 20 期日本学術会議学術資料保全体制検討委員会声明 (2007 年 5 月 24 日)「博物館の危機をのりこえるために」
- (4) 第 20 期日本学術会議基礎生物委員会・応用生物学委員会・地球惑星科学委員会合同自然史・古生物学分科会対外報告 (2008 年 1 月 21 日)「文化の核となる自然系博物館の確立を目指して」。
- (5) 日本学術会議 (2010)「日本の展望－学術からの提言 2010」60 ページ。
- (6) 日本学術会議基礎生物学委員会 (2010)「報告 基礎生物学分野の展望」27 ページ。
- (7) 米山正寛 (2011)「救えなかった三陸の記録－生き物の記録「自然史標本」－」朝日新聞 11 月 3 日(木)朝刊科学欄。
- (8) (8)2011/06/06 「緊急集会：被災した自然史標本と博物館の復旧・復興にむけて－学術コミュニティは何をすべきか？」西日本自然史系博物館ネットワーク <<http://www.naturemuseum.net/blog/2011/05/20110606.html>>。
- (9) 馬渡駿介, 岸本健雄他 (2015)「特集 1 自然史標本の継承－人類の財産を失わないために今なすべきこと－」。学術の動向 20(5):9-51。
- (10) 馬渡駿介, 岸本健雄他 (2015)「特集 2 デング熱と蚊の分類と自然史標本」。学術の動向 20(7):87-104。
- (11) 西田治文他 (2011)「3. 被災した自然史標本と博物館の復旧・復興に向けて」 in 「特集 東日本大震災への対応－学術フォーラムの成果の概要－」学術の動向 16(11):34-59。
- (12) 馬渡駿介, 岸本健雄他 (2015) 特集 1 自然史標本の継承－人類の財産を失わないために今なすべきこと－。学術の動向 20(5):9-51。
- (13) 馬渡駿介 (2015)「未来へ残すべきモノのレジリエンス」 in 特集 1 災害に対するレジリエンスの向上に向けて。学術の動向 20(7):27-32。
- (14) 日本学術会議(2014)「マスタープラン 2014」 <www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-22-t188-1.pdf>
- (15) Rockström et al. (2009) A safe operating space for humanity. Nature 461(24), 472-475。

所属機関：（一財）沖縄美ら島財団総合研究センター
氏名：佐藤 圭一
所属機関住所：〒905-0206沖縄県国頭郡本部町字石川888
e-mail：k-sato@okichura.jp
研究キーワード：地域性，海洋生物，水族館，観光資源



沖縄美ら海水族館が創り出す多様な資源とその活用

Various resources created by Okinawa Churaumi Aquarium, and their utilization for science, education and local economy

1. はじめに

沖縄美ら海水族館を管理運営する沖縄美ら島財団は、南西諸島に分布する生物の採集飼育と同時に、学術標本の収集を行っている。沖縄美ら海水族館は、沖縄のサンゴ礁、外洋、深海の3つのゾーンにおいて、2万点以上の沖縄産魚類・無脊椎動物を飼育展示しているほか、無料エリアである美ら海プラザでは大型魚類や海生哺乳類など希少生物を標本展示する施設を運営している。また財団研究センターでは、魚類や海産哺乳類標本を中心として約6万点の液浸標本を維持管理し、研究に従事する専門職員が多様性研究や繁殖生理まで幅広い分野をカバーしている。

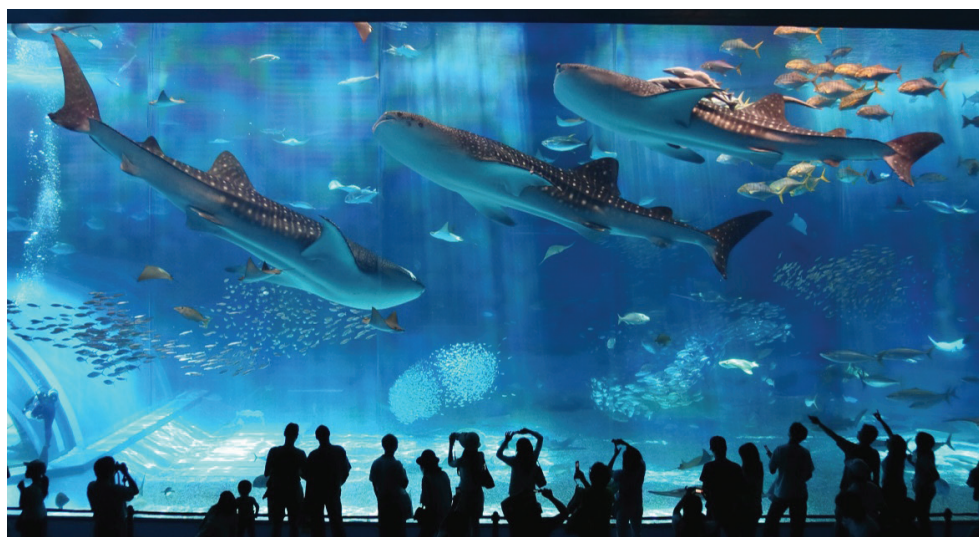


Fig.1. “Kuroshio” Tank in the Okinawa Churaumi Aquarium.

演者は、海洋生物のうち魚類(特にサメ・エイ類)を専門としており、現在は水族館における飼育下繁殖や、野外におけるサメ類の生態学的分野に焦点を当て、他の研究職員

や飼育部門と連携した研究活動を行っている。今回は、サメ・エイ類のほか、財団研究センターが行っている研究を中心として、沖縄が持つ研究フィールドとしての利点や、生物多様性がもたらす様々な波及効果について考えたい。



Fig. 2. “Tropical Fish” Tank (above), “Coral Reef” (below left), deep-sea ruby snapper (below right) in the Okinawa Churaumi Aquarium.

2. 沖縄美ら海水族館のコンセプトと特色

現在日本には、62 園館(JAZA 加盟園館として)の水族館があり、それぞれ展示のコンセプトを持っている。近年では、流通や情報通信の発達により、多くの園館が海外からの輸入や、動物商からの購入などにより、自家採集による展示生物の収集を行う園館が少なくなっている。また、マスコミ等で人気のある生物を積極的に導入することにより、各園館の個性が見出しづらくなっていることも多い。

沖縄美ら海水族館は、開館当初より「沖縄の海を切り取る」ことをコンセプトとし、地域性を前面に打ち出した展示が行われてきた。そのため、サンゴ礁・外洋・深海の展

示エリアに飼育するほとんどの生物を沖縄周辺から収集している。生物収集は、主に定置網や釣りなどの漁業者との共同作業、ROV や深海釣り採集など自家採集をのよるため、生息環境の把握や、死亡魚を採集データとともに標本として管理を行っている。

このように、地域性に特化した展示を行う水族館であるがゆえ、職員は地元の自然環境に熟知し、得られた生物を二次的に研究利用することができるため、様々な分野で相乗効果を生み出している。

3. 水族館がもたらす“観光資源”

沖縄美ら海水族館の前身である、国営沖縄記念公園水族館は 1975 年の沖縄国際海洋博の開催以来、沖縄近海に分布する大型の海生動物の飼育に取り組んできた。現在では多くの水族館で見られるジンベエザメは、1980 年代初頭に初めて当館で飼育に成功⁽¹⁾したものである。その技術を基礎として 2002 年にオープンした新水族館は、当初から注目を集め入館者が急増し、本島北部のみならず沖縄県全体の入域観光客の増加に寄与した。これは、もともと地域に存在し経済的価値が無いように思われた自然の一部が、水族館と言うフィルターを通して巨大な観光資源となった良き事例である。

4. 研究フィールドとしての水族館

沖縄美ら海水族館の成功は、経済面だけでなく学術面においても多大なメリットをもたらしている。特に、これまで不可能とされてきた海洋生物の飼育は、水族館が繁殖生理学的研究や、機能形態学的研究を行う場として、大きく貢献できる可能性を示した。特に、ジンベエザメやマンタの生理学的特性や繁殖周期を長期間モニタリングすることは、野外ではほぼ不可能である。また、大型のサメ類を長時間観察し、その行動を機能形態学的に解析するなど、野外では考えられない研究を行うことも可能である。その他、深海生物の長期飼育技術開発⁽²⁾、環境 DNA のメタバーコーディング⁽³⁾など熱帯・亜熱帯域の生物多様性研究の発展に当館が果たした役割は大きい。このように、野生下では不可能な研究の実験場として、沖縄美ら海水族館は様々な可能性を秘めている。

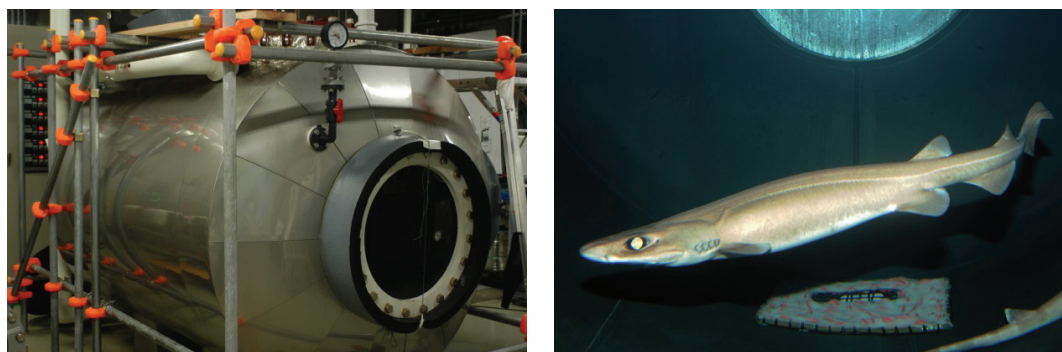


Fig.3. Recompression chamber (left) and deep-sea catshark kept in the chamber (right).

もちろん、このような研究活動を行うためには、専門性の高いスタッフの充実や、研究を主とする専門部署の設置等が必須である。水族館を管理する沖縄美ら島財団には、総合研究センターが設置されているほか、10名の学位保持者を有する国内屈指の体制で業務を推進している。

5. 教育素材としての水族館

水族館は実物教育の場であり、実際に生物を視覚、聴覚、触覚により観察することが出来る。沖縄美ら海水族館では通常の来館者のみならず、視覚障がい者に対するプログラムの充実を図るため、筑波大学附属視覚特別支援学校と連携した展示開発を行っている⁽⁴⁾。また、年間30回以上にのぼる福祉施設や離島への移動水族館等を実施することにより、多様な立場の県民に対して、広く沖縄の自然を紹介するよう努めている。



Fig.4. Plastination specimens (left) and examination of specimens by touch (right).

6. 参考文献

- (1) 内田 詮三, ジンベエザメの形態について; 海洋と生物.1983.5(2), 165-173.
- (2) Sato K.; A. Kaneko; M. Toda; *Using the SGPT Chamber for Field sampling and long-term captivity of deep demersal fishes from tropical waters: Proceedings of an International Symposium Into the Unknown, Researching Mysterious Deep-sea Animals 2007*, Okinawa, Japan, 2010.
- (3) Miya M.; Y. Sato; T. Fukunaga; T. Sado; J.Y. Poulsen; K. Sato; T. Minamoto; S. Yamamoto; H. Yamanaka; H. Araki; M. Kondoh; W. Iwasaki; *MiFish, a set of universal PCR primers for metabarcoding environmental DNA from fishes: Detection of >230 subtropical marine species. Royal Society Open Science*, DOI: 10.1098/rsos.150088. 2015.
- (4) 横山 季代子, 視覚障害のある人も楽しめる水族館をめざして; 視覚障害教育ブックレット 3 学期号, vol.21, 2012.

所属機関：九州大学大学院システム情報科学研究院
氏名：都甲 潔
所属機関住所：〒819-0395 福岡市西区元岡744
e-mail：toko@ed.kyushu-u.ac.jp
研究キーワード：味，匂い，バイオセンサ



生体模倣技術を用いた味と匂いを測るセンサ開発

Development of Biomimetic Sensors for Taste and Odor

1. はじめに

味覚と嗅覚は，化学物質を受け取って生じる感覚であり，五つの感覚（視覚，聴覚，触覚，味覚，嗅覚）の中でも，主観性が強い感覚とされている．おいしさを構成する要素を図1に描いている．味覚と嗅覚はもちろんのこと，視覚，聴覚，触覚に加え，そのときの体調や気分，そして生まれ育った食環境すらも，おいしさの判定にきいてくる．味や匂いは人がいて初めて意味をもつ．個々の化学物質が味や匂いをもつわけではない．人が味わって，嗅いで初めて味と匂いが認識されるのである．私たちが日常生活で「味」と言うとき，それには注意を有する．その「味」は，味覚はもちろんのこと，他の感覚である嗅覚，触覚，視覚，聴覚も含み統合した感覚のことである．心で思い，感じ，言葉にした瞬間に「味」は複合・融合感覚となっている．

他方，図2に示すとおり，「味蕾で感じる味」は客観性を持つ．味を呈する化学物質は，味細胞の集合からなる味蕾で受け取られる．味細胞を包む生体膜には受容体が存在し，膜電位が化学物質の受容で変わる．その電圧の変化は，味細胞にシナプスを介して接続した味神経へ伝わるが，多くの味細胞や味神経は1つの味質のみを受容し伝える．

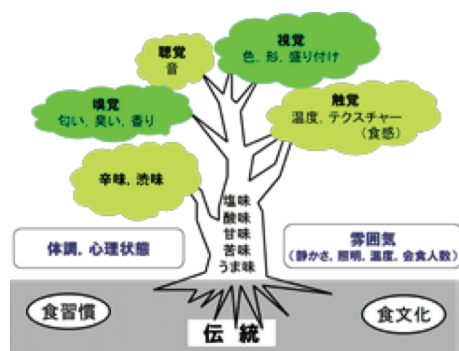


Fig.1 Elements that make up palatability

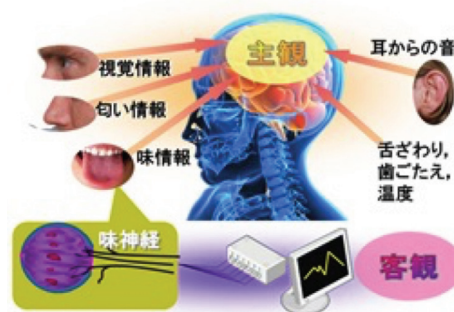


Fig.2 Subjectivity and objectivity

この事実から分かるとおり、舌の味神経に電極を刺し、電位を記録すると、その人がどういった味を感じているかを知ることができる。つまり、味を客観的に把握できる。「舌で感じる味」または「味神経を伝わる味情報」は客観的に捉えることが可能である。味覚センサは「舌で感じる味」を数値化する。



Fig.3 Taste sensing system TS-5000Z (Intelligent Sensor Technology, Inc.)

2. 味覚センサ

味覚センサは脂質と可塑剤、高分子をブレンドした膜（脂質/高分子膜）を味物質の受容部分とし、この複数の受容膜からなる応答電位出力から味を数値化（デジタル化）する。味覚の世界に初めて「味の物差し」（scale of taste）が提供されたのである¹⁻⁴⁾。インテリジェントセンサーテクノロジー社から味認識装置 TS-5000Z が開発・販売されており、これまでに 400 台以上の味認識装置（図 3：TS-5000Z）が世界各国で利活用されている。その用途は新食品開発ならびに食品の品質確保であることは当然であるが、マーケティングにも威力を発揮している。

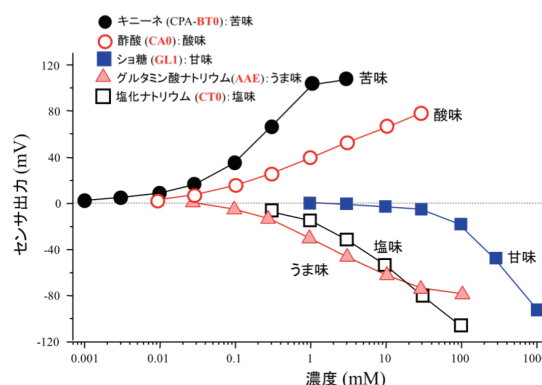


Fig.4 Concentration dependence of five kinds of electrodes on five basic tastes^{3,4)}

図 4 に味覚センサの五基本味応答を示す^{3,4)}。特徴はその応答閾値がヒトと近いこと、また濃度の対数 (log) に線形で応答する領域があることであり、これは生体系でよく知られた Weber-Fechner の法則（感覚強度が刺激の対数に比例して変化）と合致する。

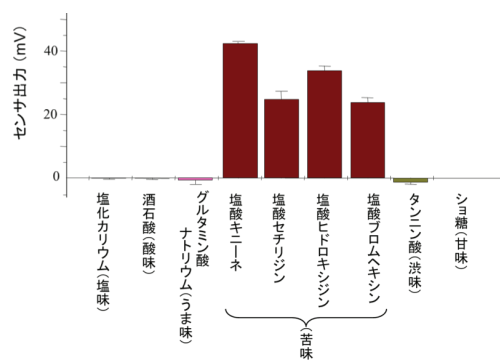


Fig.5 Responses of bitterness electrode (BT0) to six taste qualities⁴⁾

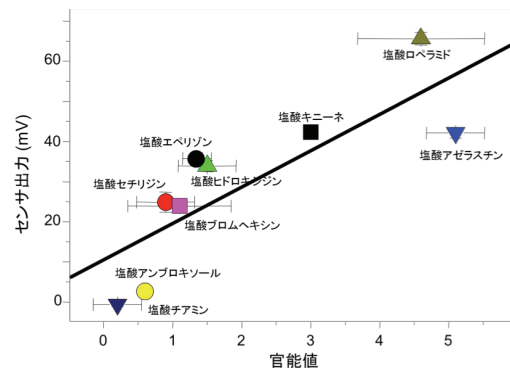


Fig.6 Relationship between taste sensor and human sensory scores⁴⁾

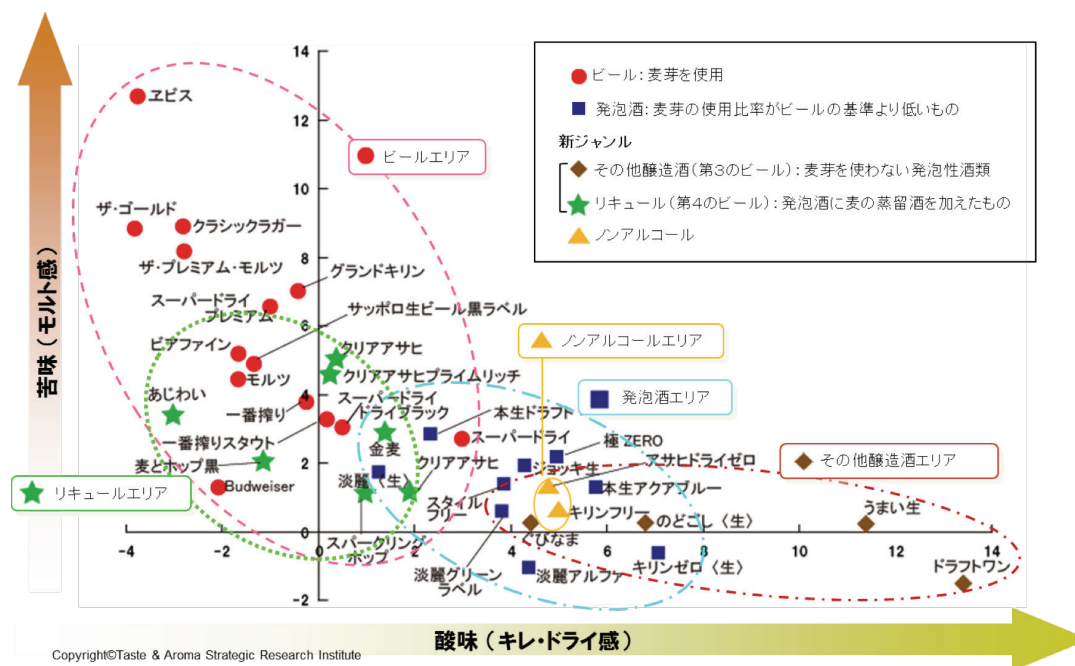


Fig.7 Beer, liquor, and other fermented beverages taste map (Taste & Aroma Strategic Research Institute Co., Ltd.)

図5に苦味用の味覚センサの五基本味と渋味への応答を示す⁴⁾。この苦味用センサは甘味、酸味、塩味、うま味、渋味にはほとんど応答せず、苦味を呈する物質に大きく応答している。また図6に示すとおり、センサは人による官能検査結果と一致する出力を示す⁴⁾。人の苦味を定量化できるのである。他の味質に関するセンサも同様に、味質に高い選択性を有し、人の官能値とも高い相関を示す。味覚センサは種々の食品へ適用され、その味の定量化に成功している。

図7にビール、発泡酒、新ジャンル、ノンアルコールビールの味を苦味（モルト感）と酸味（キレ・ドライ感）の軸で示す。図を見ると、昔からあるエビスビールのようなオールモルトタイプは、苦味が強いことがわかる。それが、1987年のアサヒスーパードライの登場により、キレとドライ感をもたせた辛口ビールが増えてきた。

3. 超高感度匂いセンサ

超高感度匂いセンサは、表面プラズモン共鳴（SPR: Surface Plasmon Resonance）と抗原抗体反応の合わせ技を使っている。SPR センサでは、非特異吸着と特異的結合の区別がつかない。つまり、抗体が金薄膜表面の抗原類似物質に特異・選択的に結合すること（特異的結合）が望ましいわけであるが、現実には、それ以外の部位であるむき出しの金薄膜表面に結合するといった非特異吸着も起こり、どちらも屈折率変化を引き起こすので、測定誤差の原因となる。そこで、正荷電と負荷電のポリマーで中性化し非

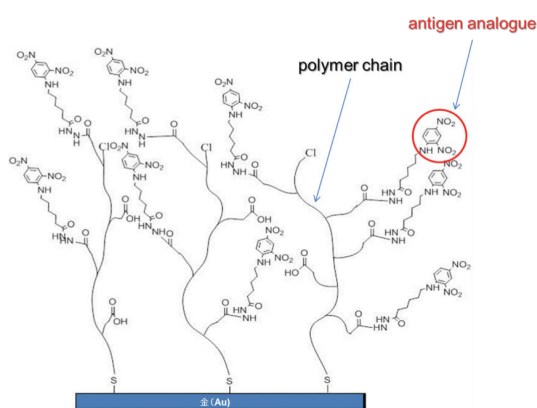


Fig.8 Polymer surface for SPR⁵⁾

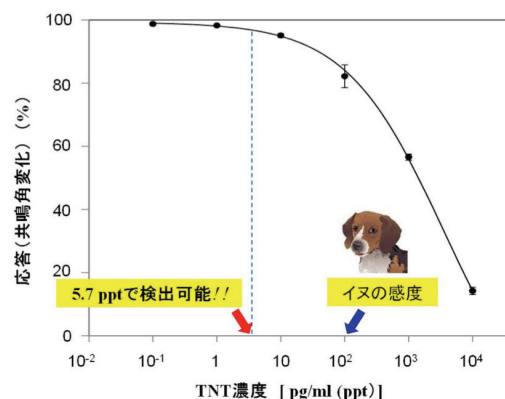


Fig.9 Result of measurement of TNT⁵⁾

特異吸着を防ぎ、爆薬分子への高い感度を得るため、表面開始原子移動ラジカル重合によりポリマー鎖長も調整したポリマー表面を有する機能膜を作製した (図8)⁵⁾。

トリニトロトルエン (TNT) 測定結果を図9に示す⁵⁾。検出感度 5.7 ppt を有することがわかる。イヌの TNT 検出感度が約 100 ppt であるから、イヌより高い感度を有する electronic dog nose⁶⁾である。

製品化された超高感度匂いセンサを図10に示す。対象として爆薬や不正薬物、そして食中毒細菌、ウイルス、食品製造ラインにおける着香 (移り香) 物質等の検出にも適用可能である。こういった超高感度匂いセンサを用いることで、がれきの下に埋もれた人を探し出すことも将来的には可能となるだろう。

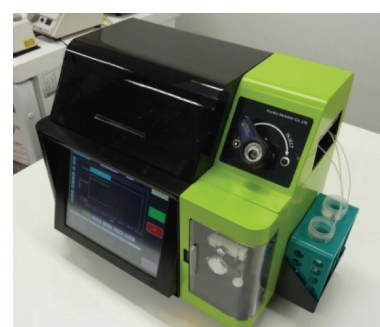


Fig.10 Commercialized ultra-high sensitive odor-biosensor (Kyushu Keisokki Co., Ltd.)

参考文献

- (1) Toko, K. ed., Biochemical Sensors-Mimicking Gustatory and Olfactory Senses, Pan Stanford Publishing, Singapore, 2013.
- (2) 都甲 潔, 飯山 悟, 「トコトン追求 食品・料理・味覚の科学」, 講談社, 東京, 2011.
- (3) Tahara, Y.; Toko, K. *IEEE Sensors Journal*, **2013**, *13*, 3001-3011.
- (4) Kobayashi, Y.; Habara, M.; Ikezaki, H.; Chen, R.; Naito, Y.; Toko, K. *Sensors*, **2010**, *10*, 3411-3443.
- (5) Yatabe, R.; Onodera, T.; Toko, K. *Sensors*, **2013**, *13*, 9294-9300.
- (6) Onodera, T.; Toko, K. *Sensors*, **2014**, *14*, 16586-16616.

所属班：B01-4 生物環境応答・制御システム班

所属機関：国立大学法人神戸大学

氏名：尾崎 まみこ

所属機関住所：〒657 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1

e-mail：mamiko@port.kobe-u.ac.jp

研究キーワード：アリ 嗅覚センサ 多重成分差分分析
SBF-SEM



匂いで良い加減を知る？アリの巣仲間センシング

Olfactory senseing for appropriate decision making in nestmate-recognition of ant

1. はじめに

生物は周囲の環境を的確に知って安心・安全な生き方を選択する。攻撃もまた不安材料となるよそ者、敵対者を除いたのちに安心・安全を取り戻す行動とみることができる。社会性生物であるアリにとっては巣仲間と非巣仲間を区別し、非巣仲間に対して素早く攻撃を決断することが重要である（Fig.1）。アリはその判断を嗅覚に拠っており、相手の体臭を嗅ぎ取って自



Fig.1 Aggressive behavior of Japanese Carpenter ants

分や仲間の体臭との違いを知覚している。ここで、異変を感知する環境化学センサの規範として取り上げるクロオアリ働きアリの体臭は18種類の体表の炭化水素（CHC）が巣毎に特徴ある比率で混合されてできている^(1,4)。

2. 多成分混合臭センサユニット

私達が明らかにしたところでは、クロオアリでは巣仲間識別を司る特有の感覚子で働く嗅覚受容体は全400種のうち100種類余りと推定された。この小さなセンサユニット（長さ約20mm 直径4mmの錘状感覚子）の中で100個以上の受容神経が、共同して多成分混合臭を感じ、自分の匂いと比べながら相手の匂いを監視している^(1,3)。

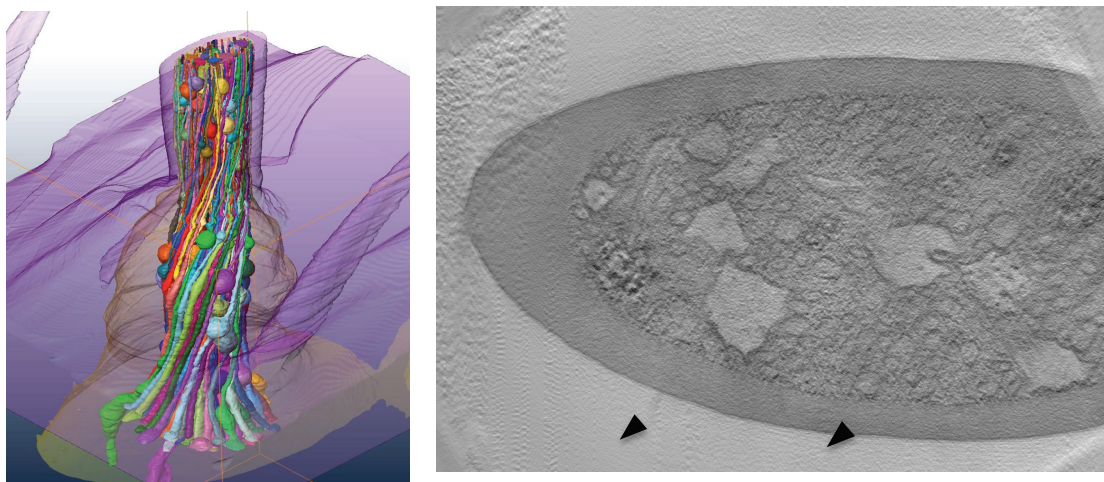


Fig.2 Sensory unit of the CHC sensillum of ant. Left: Structural model based on SBF-SEM data. Right: A tomographic image of cross section of the CHC sensillum by UHV-EM.

感覚子の中で100個の受容神経突起が分岐せず所々で瘤を作って伸びている（Fig.2 Left）。瘤のところで隣接する受容神経どうしが入り組んだ形で絡み合っている像が多くみられた（Fig.2 Right arrowheads）。この受容神経間の相互作用を示唆する構造が匂いで良い加減を知るアリの巣仲間センシング⁽¹⁻³⁾に重要な意味を持つと考えている。

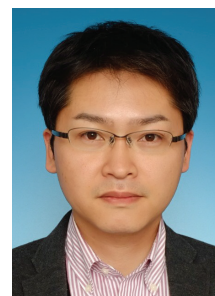
参考文献

- (1) Ant nestmate and non-nestmate discrimination by a chemosensory sensillum. M. Ozaki, A. Wada-Katsumata, K. Fujikawa, M. Iwasaki, F. Yokohari, Y. Satoji, T. Nisimura and R. Yamaoka *Science*, 309, 311-314, **2005**
- (2) Chemical Discrimination and Aggressiveness via Cuticular Hydrocarbons in a Supercolony-Forming ant. Midori Kidokoro-Kobayashi, Misako Iwakura, Nao Fujiwara-Tsujii, Shingo Fujiwara, Midori Sakura, Hironori Sakamoto, Seigo Higashi, Abraham Hefetz, Mamiko Ozaki, *PloSONE.*, 7(10): e46840, **2012**
- (3) M.Ozaki, Hefetz A. Neural Mechanisms and Information Processing in Recognition Systems. *Insects*. 5(4):722-741, **2014**
- (4) 尾崎まみこ 小林碧 特許 5853703 号 **2015**

謝辞

試料固定は川崎医療短期大学の泰山浩司教授に、SBF-SEM は生理学研究所の村田和義教授と宮崎直幸助手に、UHV-EM は大阪大学超高压電子顕微鏡センターの井上加奈子博士に師事し竹市裕介学士が行った。受容神経間連絡の役割は北海道大学の久保英夫教授、電気通信大学の栗原聡教授と理論研究を進めている。科研費課題番号 24120006。

所属班：公募
所属機関：旭川医科大学医学部化学教室
氏名：室崎 喬之
所属機関住所：〒078-8510 北海道旭川市緑が丘
東2条1丁目1-1
e-mail：murosaki@asahikawa-med.ac.jp
研究キーワード：表面微細構造、高分子、付着生物、抗付着材料



フジツボの抗付着に適した「良い加減」な表面微細構造

Antifouling microstructured surfaces against barnacles

フジツボに代表される付着生物は、人工の水中構造物に付着し汚損する、汚損生物としても知られている。船底に付着し船の燃費に悪影響を及ぼす、漁網の目を詰まらせ養殖魚を窒息死させる。発電所に冷却水を取り込む取水口を詰まらせる等、付着生物による汚損被害は我々の生活に直結する大きな問題である。近年、生物表面の幾何的性質に着想を得た微細構造表面加工による防汚技術が研究・開発されてきており、バクテリアや藻類に対し抗付着効果を示す事が明らかとなってきた¹⁾。しかし既存のエッチングやフォトリソグラフィ等によるトップダウン型の表面微細加工技術はコストが高く、また複雑な作製プロセスを必要とする。

近年、下村らは水滴を鋳型とした自己組織化ハニカムフィルムの作製に成功した²⁾。これは溶媒蒸発時の結露で生じた微小水滴が自己組織化的に規則配列する現象を利用したものであり、規則配列した水滴を鋳型とすることで口径が数 μm ～数十 μm の細孔がハチの巣状に二次元に配置された構造をもつ多孔質のフィルムが得られる (Fig.1)。この多孔質体をベースにピラー構造など様々な構造を持つ表面の作製が可能となっている。本研究では、モデル海洋付着生物としてタテジマフジツボ

(*Amphibalanus amphitrite*) を用い、自己組織化表面微細構造のサイズと幾何的性質がフジツボ付着期幼生（キプリス幼生） (Fig.2) の着生に与える影響について調べてきた。

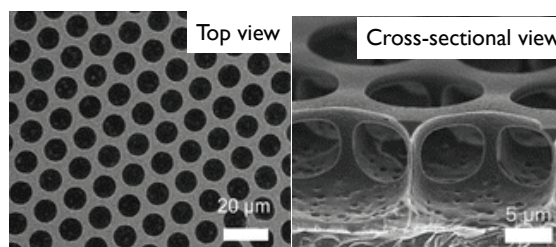


Fig.1 SEM image of self-assembled honeycomb-structured porous film

これまでの研究結果から、ハニカム構造上では他の微細構造に比べキプリス幼生の付着が少なく抗付着効果が認められた。またハニカム構造の孔径が増大するに従ってキプリス幼生の付着が減少する傾向が見られた。また、キプリス幼生が付着・変態の前段階に行う「探索行動」の動態追跡を解析した結果、ハニカム構造上における探索行動は他の基板に比べ少ない事が明らかとなり、キプリス幼生探索行動の“Walking”行動を阻害する事が抗付着効果に重要である事が示唆された。

さらに、ハニカム構造に特徴的な孔径・リム幅・深さといった幾何的パラメータに注目し、これら幾何的パラメータがフジツボの付着に与える影響について調べた (Fig.3)。その結果、深さが $5\mu\text{m}$ 程度の場合には、roughness factor (= 基板の真表面積 / 投影表面積) が増加するほど付着個体数が増加する傾向が見られた。これは roughness factor の大きい基板ほどフジツボ接着時の接地面積が増大することが影響しているのではないかと考えられる。一方深さが $15\mu\text{m}$ を超えるものの場合には、roughness factor との相関性は見られなかった。これらの結果よりハニカム構造の深さパラメータは抗付着効果に関し重要である事が示唆される。

参考文献

- [1] J. F. Schumacher et al., *Biofouling*, **2007**, 23, 1, 55-62.
- [2] N. Maruyama, et al., *Supramol. Sci.*, **1998**, 5, 331-336.

謝辞

本研究は B01-1 班、B01-5 班との共同研究により実施されており、ここに感謝致します。

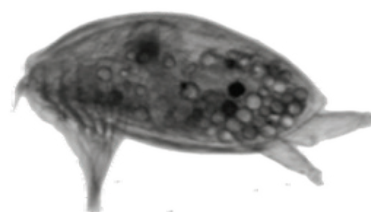


Fig.2 Barnacle's cyprid larva
Body size is about $500\mu\text{m}$

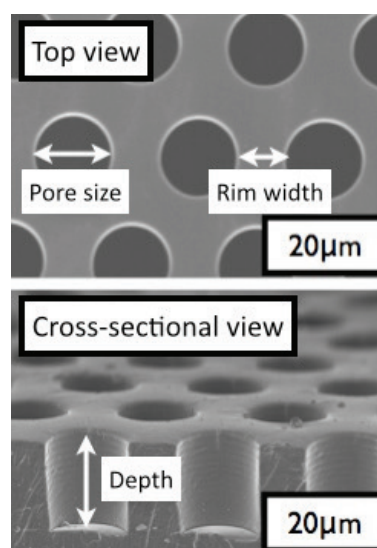


Fig.3 The SEM image of a honeycomb patterned microstructured surface.

所属班：B01-2班

所属機関：東京理科大学理工学部物理学科

氏名：吉岡伸也

所属機関住所：〒278-8510

e-mail：syoshi@rs.tus.ac.jp

研究キーワード：表面構造，規則性，不規則性，いい加減，ロバストネス



昆虫の表面構造における『いい加減さ』

Not perfect but moderate structures on the insect surface

1. はじめに

昆虫の表面構造は美しい。チョウの翅の上に並ぶ鱗粉は、ほとんど同じ大きさで、同じ方向に、しかも等間隔で配列している。その様子はミクロな屋根瓦のようである。昆虫の複眼には、あたかも計算機で描いたかのような正六角形の個眼が観察される。それらが湾曲した表面に配列し全体としてドーム型の複眼を形成している(図1)。しかし、10から100ミクロン程度の大きさを持つこれらの例よりもう一回り小さい構造、すなわち光学特性に重要なサブミクロンサイズの構造になると、話は複雑になる。例えば構造色を生み出すことで有名なモルフォチョウの鱗粉には、周期的な微細構造が含まれており、光の干渉を起こして鮮やかな青色を生み出している。しかし、微細構造は単に周期的なだけではなく、不規則な要素を併せ持つことがわかっている。同様なことはタ

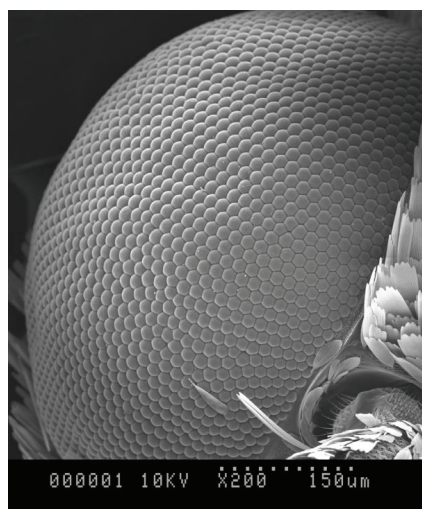


Fig.1 Compound eye of a moth.

マムシの構造色にもあてはまり、構造色を生み出す昆虫の構造は、規則的である一方である程度は欠陥や不規則性を含んでいるのである。一方、蛾の複眼の個眼の表面には、モスアイ構造とよばれる無数の突起が配列している。反射防止効果を発揮するその配列は、規則的な結晶状ではなくアモルファス状に乱れている。これらの例は、昆虫の表面構造が、乱れているにもかかわらず、構造色やモスアイ効果といった光学的な機能を持つことを示している。構造乱れは機能に影響を与えない

のだろうか、形成過程において乱れはどのように制御されているのだろうか、乱れにはどのような意義があるのか、あるいはないのか、といった様々な疑問が湧き上がる。

2. モスアイ構造の場合

B01-2 班ではこれまでモスアイ効果を一例として、微細構造の観察、配列乱れの解析、光学特性の測定、数値計算による光学特性の評価などを行ってきた。例えばクマゼミの翅には図2に示すような突起構造が観察される。この突起位置を母点としてボロノイ分割を用いた解析を行い、配列乱れの定量化を試みた。その結果、乱れの大きさは、突起位置座標の標準偏差として表現すると、平均間隔のおよそ10%程度であることが分かった。次に、乱れを含んだ突起の配列に対して反射特性の数値計算を行い、この程度の乱れは反射防止効果に大きな影響を与えないことが分かった。実際にセミの翅を対象として実験をすると、反射率は0.1%程度であり、突起構造がない場合の反射率（およそ8%）と比べて十分に低いことが確認された。すなわち、モスアイ効果は突起の配列乱れに対してロバストであり、そのことを知ってか知らずか、クマゼミの翅はアモルファス状に乱れているのである。

3. 乱れの意義

モルフォチョウの微細構造に含まれる不規則性は、反射光を幅広い方向に広げる効果を持つことが分かっている。その意味で、構造の不規則性は積極的な役割を果たしていると言えるだろう。また、仮に不規則さの度合いが大きすぎると、光の乱反射が起きるために、構造色の鮮やかさが減少する。すなわち、鱗粉の微細構造は“いい加減に（適切な度合いで）”乱れていると言える。一方、モスアイ構造に関しては、複数の昆虫で突起構造の観察を行った結果、異なる度合いの乱れが存在することが明らかになった。しかし、乱れ度合いは、いずれも反射防止効果に影響を与えるものではないことが、数値計算の結果からわかってきた。

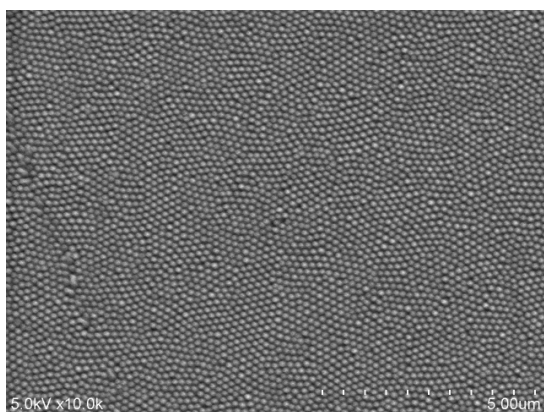


Fig.2 Moth eye structure of a cicada.

モスアイ構造は、反射防止だけでなく、撥水効果、滑落効果など多機能であることが分かっている。乱れの意義に関しては反射特性だけでなく、他の機能も含めて考える必要があるだろう。また、モスアイ効果がどうして乱れに対してロバストなのか、その理論的な解釈もなされていない。これらの課題に関して新しくわかったことを発表する。

所属機関：浜松医科大学医学部総合人間科学講座生物学

氏名：山濱 由美

所属機関住所：〒431-3192 浜松市東区半田山1-20-1

e-mail：hamahama@hama-med.ac.jp

研究キーワード：クチクラ，複眼，構造，自己組織化，電子顕微鏡観察



眼の構造における「良い加減さ」水棲生物の場合

Moderately suited structures of the compound eye around their environment - in the case of the aquatic Arthropod

1. はじめに

陸上に生息する節足動物の複眼には、昆虫類やガ類複眼の角膜クチクラ表面のように、無反射性の光学特性を備えたナノパイル構造（モスアイ構造）をもつものが知られている。一方、水中に生息するものでは、角膜クチクラの屈折率が水の屈折率 1.33 とほぼ同じであるため、ナノパイル構造などの特殊な構造を必要としないと考えられている。本研究では、水中あるいは水陸両方の環境に棲息する水棲昆虫および甲殻類などの節足動物に焦点を絞り、複眼の表面構造について比較・検討を行った。その構造の比較の結果、およびその研究過程で発見した海浜に生息する甲殻類端脚目 *Talitrus saltator* の複眼内部構造の、光学的損失を起こさせるような個眼の湾曲構造について報告する。

2. 水棲節足動物の複眼表面構造における良い加減さ

水中あるいは水面、水陸両方の環境に棲息する水棲昆虫には、トンボやユスリカのように幼虫期の一時期を水中で過ごすものと、生涯を通じて水中に棲息するものがある。半翅目のチビミズムシやミズムシは、陸上にあっては飛翔することができ、水面下にあっては翅の周囲に空気層をまとって長時間の潜水にも耐えることができる。このような水棲昆虫において、複眼表面には空気層は見られず、その表面構造においてもニップル構造のような構造は見られなかった。一方、

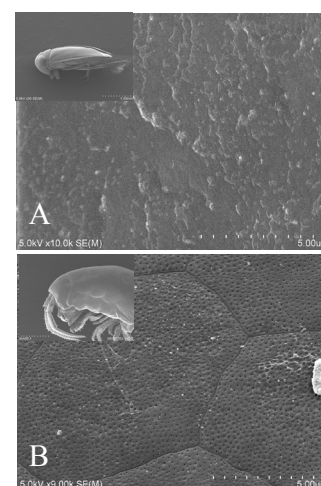


Fig.1 SEM images of compound eye surfaces.

A: Insect eye (*Micronecta sendula*), B: Crustacean eye (*Sinorchestia nipponensis*)

甲殻類はえら呼吸を行うために、生息域は水の環境と密接に関わっている。甲殻類の複眼においては、bristle が不規則に配置していたり、角膜表面に穴が開いていたり、表面に油性の分泌物を付着させている種も見られたが、表面構造に様々なものが含まれていても視覚機能に影響を与える光学特性はないことが示唆された。

3. 甲殻類端脚目の複眼内部構造における良い加減さ

地中海の砂浜の潮間帯に棲息する端脚目 *T. saltator* は、太陽や月、天空のグラデーションなど、視覚情報に依存して海と陸の間を直線的に定位することが知られている⁽¹⁻²⁾。*T. saltator* の複眼構造は正立像眼 (apposition eye) 型の個眼構造を持つ。正立像眼型の複眼では、複眼の構成単位である個眼ごとに結像系を持つが、その光学系構造である円錐晶体(crystalline cone)は、一般的に知られているような円錐形ではなく (Fig.2)、角状に曲がったレンズ構造を持ち、光受容部位であるラブドームも長軸方向に曲がっていることが発見された (Fig.3)。このように曲がった構造では、光学的には光受容能の損失が予想されるのにもかかわらず、視覚定位行動には影響しない。内部構造においても、良い加減さをもつことが示唆された。

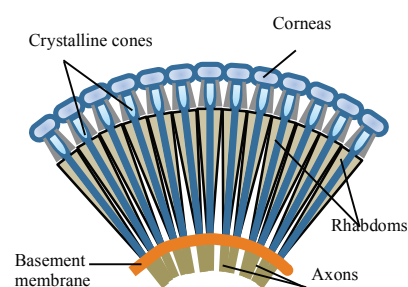


Fig.2 General Model of the apposition eye structure.

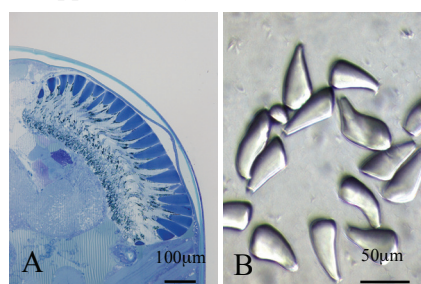


Fig.3 Compound eye structure in the sandhopper *Talitrus saltator*. A: dorso-ventral cross section of left compound eye, B: horn-shape crystalline cone dissected from the ommatidia.

参考文献

- (1) Ugolini, A.; Laffort, B.; Castellini, C.; Beugnon, G. *Ethol. Ecol. Evol.* **1993**, *5*, 489-499.
- (2) Ugolini, A.; Borgioli, G.; Galanti, G.; Mercatelli, L.; Hariyama, T. *Biol. Bull.* **2010**, *219*, 72-79.

謝辞

本発表の機会を作っていただきました下村政嗣先生, 研究のご指導いただきました針山孝彦先生をはじめ, 議論に加わってくださった B01-2 班の諸先生に感謝申し上げます。また, 電顕試料作製にご協力いただきました浜松医科大学光先端医学教育研究センター超微形態解析室の大田勲博士に感謝申し上げます。本報告の一部は, 浜松医科大学針山先生の研究グループと Firenze 大学の Ugolini 先生の研究グループとの国際研究協力により行われました。