

令和 6 年 6 月 16 日現在

機関番号：82617

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K01009

研究課題名（和文）応用を目的とする硬骨魚類における棘条固定メカニズムの解明と多様性

研究課題名（英文）Clarification of spine locking mechanisms and their diversity in bony fishes for applications

研究代表者

篠原 現人（SHINOHARA, Gento）

独立行政法人国立科学博物館・動物研究部・研究主幹

研究者番号：10280520

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：魚類の棘は鰭の構成要素だけでなく、捕食者からの防御、遊泳、定位に関係している。棘を起立させた状態で維持する魚類もいるが、魚類の中での多様性は不明であった。

棘は刺傷性という点から人間に対して危険であり、魚類をとり扱う際には仕組みの解明が必須であった。固定装置を工学へ応用することについても考察した。

日本産魚類を対象に魚類標本から固定装置を探索し、軟X線、マイクロCT、解剖およびSEMを用いて、固定装置の仕組みを明らかにした。日本産魚類の20科で固定装置を確認した。この中には装置の存在だけが知られていたもの（マツカサウオ科）や装置そのものが新発見の魚類（インダイ科、フサカサゴ科）が含まれる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本産の種を対象に棘条固定装置の多様性と仕組みの確認ができ、この結果は本邦以外に分布する種の棘条固定装置の探索にも利用可能である。本研究で明らかになった固定装置は少ない部品で錠前や鎖錠のような装置を開発するヒントになる。生物学を工学に結びつける異分野連携を推進する。

これまでは接触する骨どうしの摩擦だけが注目されたが、骨を結びつける腱も固定に重要で、腱を操作することで、ゴンズイなどの棘条の固定状態を解除可能であることが判明した。ヒトに役立つ工業製品のヒントは魚類液浸標本のような資料に求めることができることが示され、生物学以外の研究者だけでなく社会一般の生物学や水産学への関心の向上に寄与する。

研究成果の概要（英文）：Spiny rays, integral components of the fins in bony fishes, serve multifaceted functions ranging from defense against predators to aiding in swimming and localization. Despite their significance, the diversity and mechanisms underlying spine locking among bony fishes have remained largely obscure. Here, I present findings elucidating the mechanisms of spine locking in Japanese fishes through a comprehensive investigation employing radiographs, micro-CT, dissection and SEM. My study encompassed 20 families, revealing a spectrum of spine locking apparatuses. Notably, I shed light on the mechanism of Pinecone fishes, previously known only for the presence of the apparatus, and unveiled novel apparatuses in Knifejaws and a subset of Scorpionfishes. Furthermore, I discuss the potential application of these mechanisms in engineering contexts. Understanding the intricacies of spine locking mechanisms is crucial, particularly in the context of human safety during fish handling activities.

研究分野：系統分類学

キーワード：関節 固定装置 棘条 担鰭骨

1. 研究開始当初の背景

(1) 魚類の利用方法は多岐にわたり、特に水産資源に関する研究は長年にわたり活発である。その一方、魚類の構造を詳しく調査し、優れた機能を発見し、着想を得て、人間社会に役立つ工学的視点を取り入れようとする比較的新しいバイオメティクス研究はほとんど進んでいない。一般に魚類のバイオメティクス研究は付着や抵抗を軽減する仕組みの利用方法に集中し、体表面の形状や分泌される粘液が研究されているに過ぎない。皮膚や外部形態だけでなく、魚体の内部にも興味深い構造や仕組みが備わっていることは、一部の魚類学者や水産学者を除きほとんど知られていない。

(2) 硬骨魚類が他の脊椎動物から大きく異なっている点は、棘条・軟条と膜から構成される鰭をもつことである。鰭は遊泳推進装置であるが、特に棘条が発達する種では方向転換や停止にも鰭が利用されることが生態観察からわかっている。さらに棘条は水中および水底での姿勢保持や捕食者からの防御にも使われる。特に沿岸性魚類の中には棘条を起立させ、岩の隙間に体を強力に固定するものがある、このような事例は研究者よりも漁業者等によく知られている。

(3) 一部の魚類に棘条の基部（棘条と近位担鰭骨の関節部）に固定装置が存在することは18世紀から知られていたが、解剖学的に調べられ、そのメカニズムが詳しく報告されていたのはニザダイ科等の一部の魚類に限られていた。この先行研究のうちニザダイ科については、背鰭第1棘条・臀鰭第1棘条の基部と関節する近位担鰭骨の一部が歯車状構造に変化し、大きくなった棘条基部の内側との摩擦によって固定状態になることが報告されていた (Tyler, 1970)。スミソニアン協会国立自然史博物館の著名な研究者である James C. Tyler 博士は、この論文の中で、最前方にある第1棘条を支える近位担鰭骨の歯車状構造が固定装置であることを示した。しかし、ニザダイ科の分類に重要であることを指摘したのみで、機能形態学や工学への応用には一切言及しなかった。

(4) ニザダイ科以外の魚類ではナマズ目、マトウダイ目、マツカサウオ科、ヒイラギ科、トゲウオ科、カワハギ科、モンガラカワハギ科で棘条の固定装置が報告され、簡単な記載もなされていた。その他については、ほとんど不明であった。

2. 研究の目的

(1) 棘条固定装置と呼ばれる系統的に多岐にわたる分類群に見られる相似形質（平行進化の証拠）の探査・収集を行い、その多様性を調べる。相同形質を追求してきた従来の分類学や系統学研究とは方向性が大きく異なり、その成果が工学者に注目され、利用されることを目的としている。

(2) 少ない部品の組み合わせで強固な固定能力を有する関節をつくることができれば、資源の無駄を抑え、産業と技術革新の基盤を提供することになる。

3. 研究の方法

(1) 鰭を支える棘条の固定装置のメカニズムを明らかにするため骨格系、筋肉系、腱を詳細に調べ、装置を構成する要素間の関係を調査し、棘条固定の仕組みや解除の方法を探った。観察には解剖学手法の他に、軟 X 線撮影、X 線 CT 撮影、電子顕微鏡撮影を用いた。解剖学的手法においては、透明二重染色法で硬骨と軟骨を区別して観察することに加え、二重染色の過程で破壊されてしまう骨要素を確認するため、骨を熱湯で煮出す方法も利用した。固定装置の切断面の観察にはマイクロフォーカス X 線 CT 装置 (inspeXio SMX TM-225CT FPD HR, 島津製作所) を利用し、専用のソフトウェア (VGStudio, ボリュームグラフィックス社) で三次元画像構築した。X 線 CT による筋肉の観察にはヨウ素染色を用いた。

(2) 申請者の研究機関と日本国内にある魚類液浸標本の調査を行い、棘条固定装置の多様性を探索し、平行して類型化を行った。標本は国立科学博物館、北海道大学総合博物館、神奈川県立生命の星・地球博物館、滋賀県立琵琶湖博物館、京都大学舞鶴水産実験所、高知大学、鹿児島大学総合研究博物館および水産研究・教育機構 (長崎庁舎) に保管されているものを観察した。棘条周辺の皮膚が硬化して、外見上は固定装置があるかのような状態になることがあるため、一部の種については東京海洋大学、京都大学および高知大学の協力を得て、生鮮状態の個体を入手し、ホルマリン固定前に個体の観察を行った。これらの個体は国立科学博物館に登録・保管した。

4. 研究成果

(1) 日本産魚類では 7 目 (ナマズ目、トゲウオ目、マトウダイ目、キンメダイ目、スズキ目、カサゴ目およびフグ目) に含まれる 20 科で棘条固定装置が確認された。

ギギ科、アカザ科、ナマズ科、ゴンズイ科およびハマギギ科を含むナマズ目では背鰭に大きな棘条があり、起立した状態で固定され、危険である。背鰭の棘条は、大きな棘条 (第 2 棘条) の直前に小さい棘条 (第 1 棘条) があり、両者は強い腱で結ばれている。第 1 棘条は爪状で、第 1 担鰭骨の背面に開いたスリット状の穴に挟まれてアンカーとなる。基本的な仕組みは 1960 年代に発表されたサカサナマズ科の研究 (Lamorai and Millard, 1967) で先に紹介されていたが、第 1 棘条と第 2 棘条の間の腱の役割、第 1 棘条とそれが収納されるスリット状の穴の中に摩擦抵抗を高める微細構造があることが明らかになった。また起立状態の解除には第 1 棘と第 2 棘を結ぶ腱を持ち上げるか切断する方法が有効であると考えられる。小さい第 1 棘条と大きい第 2 棘条が関係し、第 1 棘条が担鰭骨の間隙に挟まり、腱で強く結ばれた第 2 棘条を動かなくするという類似点により、ニザダイ科 (スズキ目) と同じ型の固定装置と考えることができる。

ヒイラギ科 (スズキ目) の背鰭と臀鰭にみられる棘条固定装置は棘条の前縁と後縁に鋸歯が発達し、それぞれの棘条と担鰭骨の関節が互いに近接することで固定が起こる仕組みで (Seigel, 1982)、装置としては最も単純なものである。この仕組みを背鰭や臀鰭で平行的に進化させた魚類は、マトウダイ科、ベニマトウダイ科、ソコマトウダイ科、オオメマトウダイ科、ヒシマトウダイ科を含むマトウダイ目 (Tyler et al. 2003) とマツカサウオ科 (キンメダイ目) であった。

モンガラカワハギ科、カワハギ科、ギマ科およびベニカワムキ科を含むフグ目では大きな第 1

棘条の直後に小さい棘条がある。この小さい第2棘条が第1棘条の倒れる位置に詰まる仕組みで固定される。この型はフグ目の中だけでみられる (Smith and Heemstra, 1986 等)。

この3つの型以外にはトゲウオ科 (トゲウオ目) にみられる型があるが、この科に特有で、板状の1本の棘条が1個の担鰭骨や腰骨の上で自立する (Reimchen, 1983)。

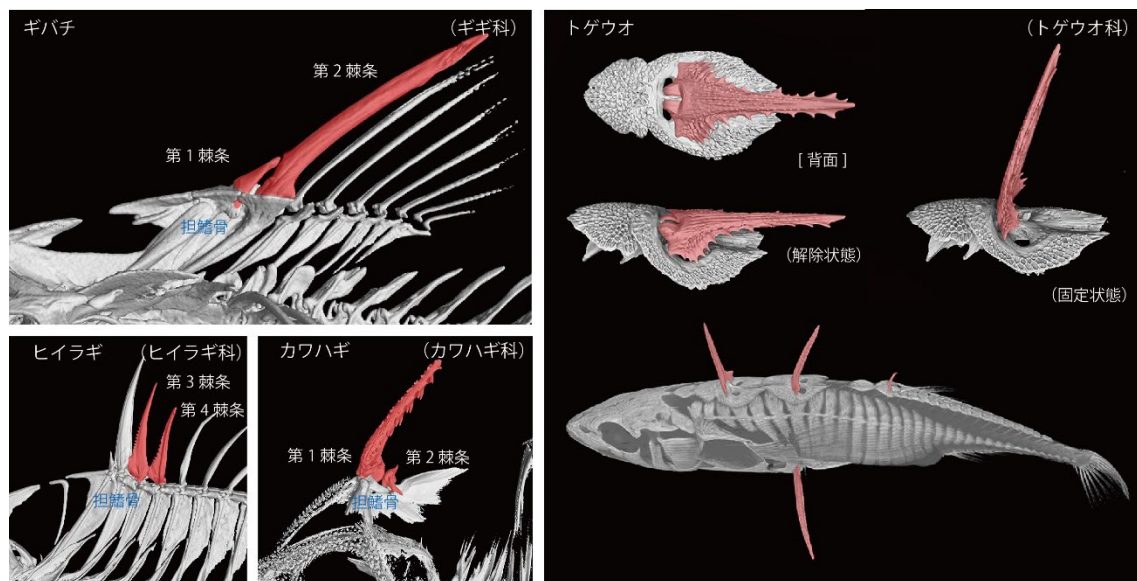


図1 棘条固定装置 (マイクロフォーカス X 線 CT 画像)

(2) イシダイ科 (スズキ目) はこれまで棘条固定装置の報告がなかった分類群である。背鰭の第1棘条が前方に倒れると、その基部が第2棘条の基部前面を押し、両方の棘条が同時に固定される。また第1棘条と第2棘条が接する部分は互いに粗面となる。が第1棘条基部の関節断面と担鰭骨の楕円形になった間隙の形状、周囲の筋肉と腱の発達、固定状態を維持するのを助長している。フサカサゴ科 (カサゴ目) のハオコゼ類の背鰭にも同様の仕組みで第1棘条と第2棘条が同時に固定されるような仕組みがあり、イシダイ科と同様に初めての報告と考えられる。

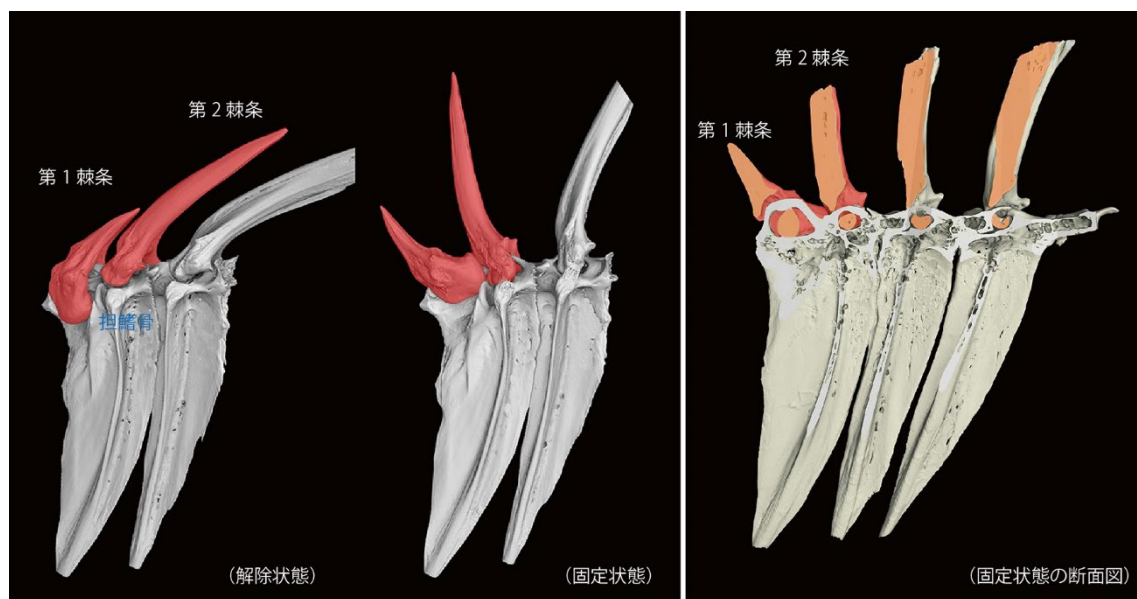


図2 イシダイ科の背鰭にある棘条固定装置 (マイクロフォーカス X 線 CT 画像)

(3) マツカサウオ科の腹鰭棘条は棘の根元にソケット状の構造があり、それが腰骨の前方にある小突起にかぶさることで固定が起こることが判明した。さらに棘の基部に発達する円盤状

突起が腰骨の側方の溝に挟まれるが、突起と溝の表面が粗面になることで棘条の回転や動きを制御していることが明らかになった。棘条の根元にあるソケット状構造はこれまで注目されてこなかった部位である。

腹鰭に棘条固定装置があると報告されていたのは、ギマ科 (Tyler, 1962)、トゲウオ科 (Reimchen, 1983)、ソコマトウダイ科 (Tyler et al. 2003) 等であるが、マツカサウオ科の腹鰭にある固定装置の仕組みはいずれのものにも一致しない。

(4) 研究開始当初棘条固定装置は浅海性魚類と一部の淡水魚で進化していると考えていたが、深海性魚類でも進化していることがわかった (篠原, 2022)。国際学会、国内研究集会等で固定装置が淡水魚から深海魚まで発見されることに加え、その仕組みと多様性について発表を行った。また一部の工学者と応用について議論をし、摩擦が関係する部位については、表面構造の精査とその摩擦力の測定を行うべき等の助言を受けた。

(5) 当初計画では棘条固定装置を有する魚種のデータベースを作成する予定であったが、ほとんどが科レベルで共通していたので、種レベルで準備する必要がないと判断した。しかし最終年度終盤に発見したフサカサゴ科については、科内の全種が固定装置を有しているわけではない。属や種のレベルで装置の有無を追加調査する必要がある。またサギフエ科 (トゲウオ目) を含むいくつかの魚類は固定装置のようなものをもつ可能性があるので今後精査する必要がある。

<引用文献>

- Lamoral, B.H. and N.A.H. Millard, 1967. Contributions to the functional morphology of fishes. Part IV. The locking mechanism of the dorsal spine of the catfish *Synodontus zambesensis* Peters. *Zoologica Africana*, 3(1): 87-94.
- Reimchen, T. E., 1983. Structural relationships between spines and lateral plates in threespine stickleback (*Gasterosteus aculeatus*). *Evolution*, 37(5): 931-946.
- Seigel, J. A., 1982. Median fin-spine locking in the Ponyfishes (Perciformes: Leiognathidae). *Copeia*, 1982(1): 202-205.
- 篠原現人, 2022. 深海魚コレクション エックス線 CT で探る不思議な姿. オーム社, 東京. 176 pp.
- Smith, M. M. and P. C. Heemstra (eds), 1986. Smith's sea fishes. Macmillan South Africa, Johannesburg. 1047 pp.
- Tyler, J. C., 1962. The pelvis and pelvic fin of plectognath fishes: A study in reduction. *Proc. Acad. Nat. Sci. Philadelphia*, 114: 207-250.
- Tyler, J. C., 1970. The dorsal and anal spine-locking apparatus of sturgeon fishes (Acanthuridae). *Proc. California Acad. Sci.*, 38(21): 391-410.
- Tyler, J. C., B. O'Toole, and R. Winterbottom, 2003. Phylogeny of the genera and families of zeiform fishes, with comments on their relationships with Tetraodontiforms and caproids. *Smithson. Contr. Zool.*, (618): 1-110.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 篠原現人
2. 発表標題 イシダイの背鰭にある棘条固定装置
3. 学会等名 2022年度日本魚類学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 篠原現人
2. 発表標題 日本産硬骨魚類の棘条固定装置
3. 学会等名 2023年度日魚類学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Gento Shinohara
2. 発表標題 Spine locking apparatus in vertical and paired fins of fishes from Japan
3. 学会等名 The 11th Indo-Pacific Fish Conference, Auckland (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 篠原現人	4. 発行年 2022年
2. 出版社 株式会社オーム社	5. 総ページ数 176
3. 書名 深海魚コレクション エックス線CTで探る不思議な姿	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------