

## 魚類下顎歯における歯 - 骨のジオメトリーと線維性支持について

湯口 眞紀<sup>1,2</sup> 山崎 洋介<sup>1,2</sup> 本 淨 敏<sup>1,3</sup>  
玉木 理一郎<sup>1,3</sup> 磯川 桂太郎<sup>1,2</sup><sup>1</sup> 日本大学歯学部 解剖学第II講座<sup>2</sup> 日本大学歯学部 総合歯学研究所 機能形態部門<sup>3</sup> 日本大学大学院歯学研究科 口腔構造機能学分野

## 要旨

【目的】 歯の支持様式が示す進化的な背景についての理解を深めるために、真骨魚類4種において、対合する歯と骨のジオメトリーを検討するとともに、両者を結ぶ線維性連結部の組織学的な観察を行った。

【方法】 供試魚種は、*Muraenesox cinereus*, *Pseudopleuronectes yokohamae*, *Epinephelus awoara* および *Sebastiscus marmoratus* の4魚種とし、歯骨上に並ぶ下顎歯について、micro-computed tomography による解析と、組織切片の精査を行った。後者は通法の染色標本に加え、オキシタラン線維染色を施した切片についても行った。

【結果】 供試の4魚種すべてで、歯とその歯足骨 (pedicel) とを連結する線維性組織の存在が確認された。Direct fibrous attachment を示す *M. cinereus* と pedicellate attachment を示す *P. yokohamae* では密な fibrous zone が存在し、蝶番歯を有する *E. awoara* と *S. marmoratus* では強靱な前方 ligament と後方 ligament が存在していた。これらの4種の線維性組織にオキシタラン線維は見いだされなかったが、*E. awoara* の下顎歯基底部とこれに対合する pedicel の上部のそれぞれ前端部に、オキシタラン線維が分布していることが明らかになった。

【結論】 支持様式が適応的進化を示す歯では、新たな機能的役割に適った三次元的な微細構造が生じ、蝶番歯でみられた canopy はそうした事例のひとつであると考えられる。本研究で部位特異的な分布が示されたオキシタラン線維は、ひとつのユニットをなす歯の基底部と pedicel の形態的変化の制御に関わっている可能性が示唆された。

キーワード：真骨魚類、顎歯、歯の支持様式、蝶番歯、オキシタラン線維

## Tooth-bone geometry and the fibrous attachment in lower teeth of the fish

Maki Yuguchi<sup>1,2</sup>, Yosuke Yamazaki<sup>1,2</sup>, Bin Honjo<sup>1,3</sup>, Riichiro Tamaki<sup>1,3</sup>, Keitaro Isokawa<sup>1,2</sup><sup>1</sup> Department of Anatomy, Nihon University School of Dentistry<sup>2</sup> Division of Functional Morphology, Dental Research Center, Nihon University School of Dentistry<sup>3</sup> Division of Oral Structural and Functional Biology, Nihon University Graduate School of Dentistry

## Abstract

【Purpose】 To have a better understanding of the evolutionary aspects of tooth attachment modes, geometry of the interface between tooth and bone and the histology of their fibrous connections were investigated in four teleostean species.

【Methods】 Lower teeth on the dentary in *Muraenesox cinereus*, *Pseudopleuronectes yokohamae*, *Epinephelus awoara*, and *Sebastiscus marmoratus* were examined with micro-computed tomography and tissue sections stained conventionally or for oxytalan fibers.

【Results】 The lower teeth of all four species had fibrous connection between the tooth and bone: dense fibrous zone for direct fibrous attachment in *M. cinereus* and for pedicellate attachment in *P. yokohamae*; robust anterior and posterior ligaments for hinged-type teeth in *E. awoara* and *S. marmoratus*. No oxytalan fibers were found in these fibrous tissues, but the fibers were revealed within anterior parts of the lower tooth base and the upper end of its pedicel in *E. awoara*.

【Conclusion】 The teeth with the more evolved attachment modes have been furnished with the modified microstructures devised to its new functionality. The canopy observed in the hinged-type teeth in this study is one of such examples. Localized distribution of oxytalan fibers might imply its involvement in a guided modification of the morphology of tooth and pedicel complex.

Keywords: teleost, mandibular teeth, attachment mode, hinged tooth, oxytalan fibers

(受付：令和5年3月22日)

責任著者連絡先：湯口眞紀

日本大学歯学部解剖学第II講座

〒101-8310 東京都千代田区神田駿河台1-8-13

TEL : 03-3219-8121

FAX : 03-3219-8319

E-mail : yuguchi.maki@nihon-u.ac.jp

## 緒 言

ヒトを含む哺乳類の歯の支持様式は釘植型 gomphosis であり、歯周靭帯 periodontal ligament の線維群が、歯根表面を覆うセメント質と歯槽の窩壁骨面とを強固に結びつけている<sup>1)</sup>。歯周靭帯を構成する主要な線維はコラーゲン線維であるが、弾性系線維 elastic system fiber が分布することも知られ<sup>2,3)</sup>、とくに elastin の沈着をみないオキシタラン線維は歯周靭帯でその存在が初めて見いだされた<sup>4)</sup>。しかし、コラーゲン線維と直交方向に走行するオキシタラン線維<sup>5,7)</sup>の構造的役割や意義、系統進化的位置づけについては未だ不明である<sup>8-10)</sup>。これを解く端緒を求めようと、哺乳類以外の脊椎動物に目を向けたとき、多様な歯の支持様式と直面することになる。

魚類歯の支持様式の分類については、Owen<sup>11)</sup>を始めとする初期の研究者の見解概要を本研究の著者らがまとめている<sup>12)</sup>。また、近年の見解は、Fink<sup>13)</sup>とShellis<sup>14)</sup>によって支持様式と進化系統との関連性、同一魚種での複数様式の存在、顎歯と咽頭歯とでの様式差異などが示されたことに基づいている。これをBerkovitzとShellis<sup>15)</sup>は、ankylosis (骨性)、direct fibrous attachment (線維性)、pedicellate attachment (歯足骨性)、hinged teeth (蝶番性)およびthecodont attachment (槽生性)などに分類している(括弧内は本論文著者らが付記)。しかし、歯の分布部位や成育にともなう変化、また、同一歯であっても複数分類にオーバーラップする特徴を併せ持つ事例など、関心魚種の歯の支持様式判定や遺漏のない記載には困難をおぼえることが少なくない。Bertinら<sup>16)</sup>は、こうした複雑性や困惑の低減・解消のために、tooth-bone interfaceのgeometricな関係すなわち“implantation”と、このinterfaceにおける“attachment”の組織学的特徴に関して、それぞれに適する手法を用いて解析に臨む必要性を説いている。

以上を踏まえて、本研究では、細胞外線維で支持される顎歯を有する4魚種について、1) computed tomography (CT)を用いた非侵襲的形態解析によって下顎歯のimplantation状況の詳細な把握、2)切片法およびSEMを用いた組織学的解析によって顎歯支持に関わる線維系の分布、走行、性状の解析とオキシタラン線維の有無検証、という異なる2つのアプローチを組み合わせた検討を行った。

## 材料および方法

### 1. 試料の選定

当講座所蔵の魚類頭部試料(約120種)についてのmicro-computed tomography (CT)による予備的なスクリーニング結果を踏まえて、ハモ *Muraenesox cinereus*、マコガレイ *Pseudopleuronectes yokohamae*、アオハタ

*Epinephelus awoara*、カサゴ *Sebastiscus marmoratus* の4魚種を本研究に供した。順に、個体数は4, 3, 3および1で計11尾; 全長は約75 cm, 約35 cm, 約39 cm, 30 cm; 各魚種のCT volume data setは18, 10, 12および8で計48件である。これら試料魚は、2017年4月から2019年5月の期間に東京都中央卸売市場(築地; 2018年10月6日以降は豊洲)を介して入手した食材用鮮魚であり、本学部の実験動物委員会による承認を要する動物試料には該当しない。

### 2. CT スキャニングとデータ解析

鮮魚試料は、入手後直ちに10%中性緩衝 formalin 溶液に数日間浸漬固定し、phosphate buffered saline で洗浄後に、同溶液中で保管もしくは実験動物用3D マイクロ X 線 CT (R\_mCT, リガク, 東京)を用いてスキャニングした。一部の試料については、CCD カメラ (DS-5Mc, ニコン, 東京)を備えた実体顕微鏡 (MZFL III, Leica, Germany)を用いて撮影を行った。CT スキャニングは、4.0, 6.7あるいは10.0倍で行い、条件は著者らの先行研究<sup>12, 17, 18)</sup>を踏まえて80~90 kV, 100~200  $\mu$ A, 2分間とした。得られた volume data は i-VIEW software (ver. 1.74, モリタ, 大阪)で再スライスし、DICOM 形式でエクスポートした。スクリーニングに使用した DICOM ビューワーは、RadiAnt (ver. 4.6.9 & 5.5.0; Medixant, Poland)である。本研究で示した断層 (slice) 像、volume rendering (VR) 像および関連所見の取得には、3D Slicer (ver. 5.2.1; www.slicer.org)<sup>19)</sup>を用いた。

解析対象は、4魚種いずれについても下顎部をなす歯骨 (dentary) に存在する歯であり、本稿では以降これらを下顎歯と記載する。これら下顎歯は基本的に同形歯性であるが、dentary 上の部位差、すなわち近遠心的 (anterior-posterior) あるいは唇舌的 (outer-inner) な位置によって歯の外形やサイズなどには差異がみられたが、本稿ではその詳細には言及しない。

### 3. 組織学的解析

CT スキャニング後、試料の一部は10% EDTA 溶液にて脱灰し、通法に従ってパラフィン切片 (7  $\mu$ m 厚) を作製して、hematoxylin-eosin (HE) 染色もしくは resorcin fuchsin (RF; 前田変法レゾルシンフクシン液, 武藤化学, 東京) 染色を施した。後者でオキシタラン線維 (elastin 沈着を欠く microfibrils 束) を検出するために、切片を10% Oxone (Sigma-Aldrich, MO, USA) 水溶液に30分間浸漬して酸化処理を行い<sup>20, 21)</sup>、その後に RF 染色を施した (Ox-RF 染色)。酸化処理なしで RF 染色を施した切片は対照群とした。染色、封入後に CCD カメラ (DS-Fi, ニコンあるいは C-2500L, オリンパス, 東京) を備えた顕微鏡 (ECLIPSE LV100 POL, ニコンあるいは VANOX AH2, オリンパス) を用いて観察および撮影を行った。

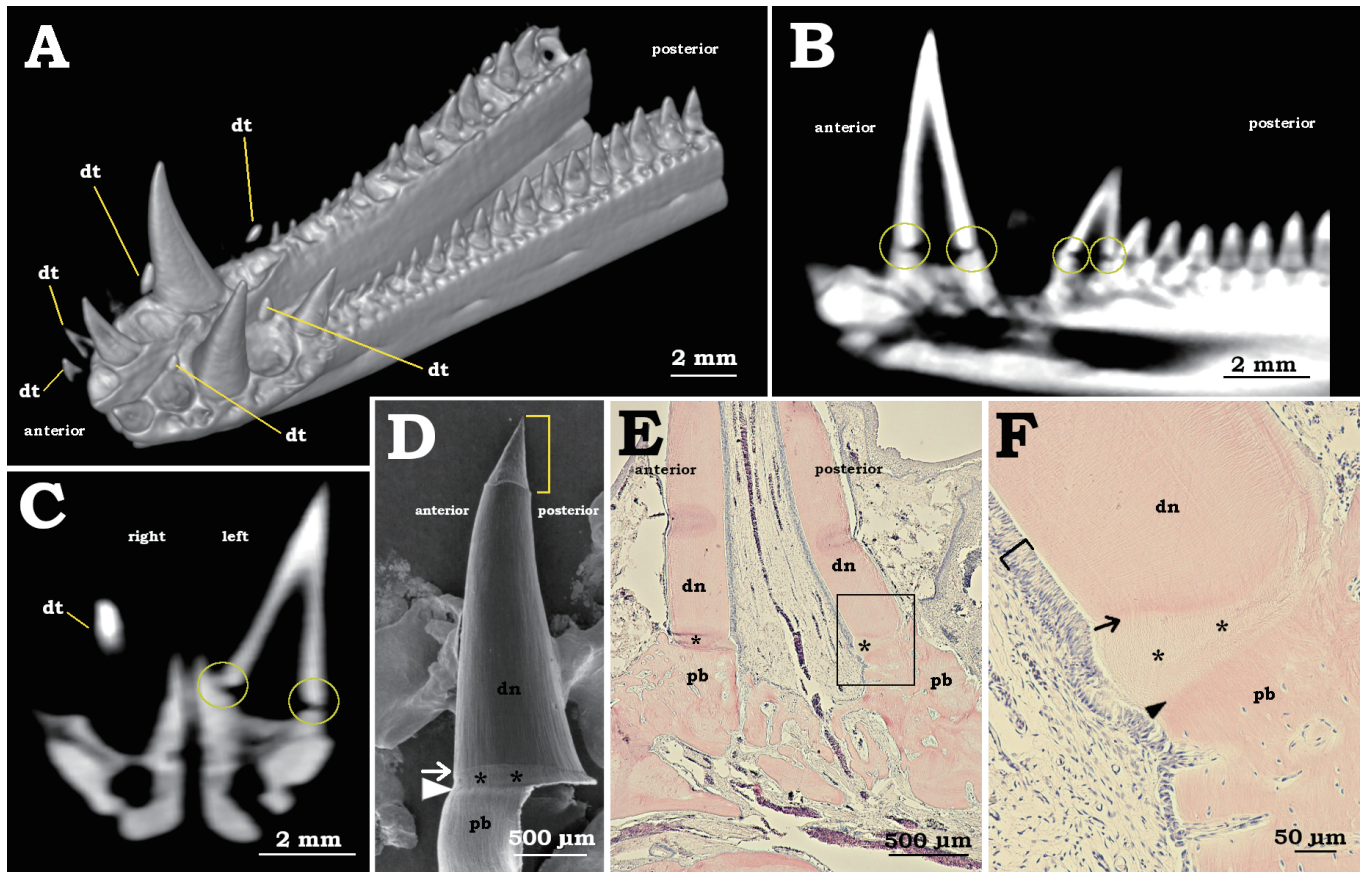


図1 ハモ科 *M. cinereus* における下顎（後端部を除く）のVR像（A）とその左側歯列の sagittal slice 像（B）、下顎前方部での axial slice 像（C）、脱灰後の下顎歯から pedicel までの collagenous template SEM 像（D）、下顎歯と pedicel の線維性連結部の組織切片 HE 染色像（E）とその拡大像（F）を示す。Abbreviations: dn, dentin; dt, developing tooth; pb, pedicel (bone). Arrows: a boundary between tooth and fibrous zone. Arrowheads: a boundary between fibrous zone and pedicel. Asterisks: fibrous zone. Brackets: a distal tip without enameloid in D, a continuous cell layer facing dentin, fibrous zone and pedicel in F. Circles: radiotransparency of dividing zone. Rectangle: enlarged in F.

#### 4. 走査電子顕微鏡（SEM）による観察

固定、脱灰後に dentary から摘出した *M. cinereus* の下顎歯を1% オスミウム酸に2時間浸漬し、酢酸イソアミル置換処理、臨界点乾燥処理を経た後に、オスミウムコーター（HPC-1S, 真空デバイス, 水戸）中で、コーティングを20秒間行った。その後、電界放射型走査電子顕微鏡（S-4300型, 日立ハイテック, 東京）を用いて、加速電圧15 kV の条件で観察、撮影した。

### 結 果

*M. cinereus* の下顎歯は、頂部が尖頭状の円錐形で後方に彎曲し、これらは dentary の幅径中央部に前後方向に並んで歯列を構成していた（図1 A）。歯のサイズは、顎前方部では中間部や後方に比べて大きく、既存歯列の歯間あるいはその外側に形成中の歯もみられた。下顎歯の底部下端と歯足骨（pedicel）とは互いに近接するものの、両者の間にはエックス線透過性領域（dividing zone）が認められた（図1 B, C）。この部位は、SEM および組織切片での所見から、密性線維性組織が存在する fibrous zone であると確認された（図1 D-F）。脱灰によって現れた

collagenous template の SEM 観察では、象牙質から fibrous zone、さらに pedicel へとコラーゲン線維が歯軸方向に途切れなく連なっていることが明らかになった（図1 D）。組織切片では、歯髓の象牙芽細胞層が fibrous zone 表面、さらには pedicel 表面の細胞層へと連なっている像も観察された。（図1 F）。なお、象牙質と pedicel 間の fibrous zone には、Ox-RF 陽性の線維系は検出されなかった（図示せず）。

*P. yokohamae* は、表面（有眼側）と裏面（非眼側）の別がある底生魚だが、“左ヒラメに右カレイ”との表現<sup>22, 23)</sup> どおりに右が表面・有眼側の魚種である。顎歯は主に、左側・非眼側に存在する<sup>24)</sup>。図示した供試個体の右側・有眼側の歯は、下顎前端に2歯のみであった（図2 A）。一方、左側では上下顎とも歯列がみられ、下顎歯の形態は、歯の上部約2/3が丸みを帯びた切歯様で、やや窄まったその下端から pedicel に向かう下部1/3では径が漸増していた（図2 A-C）。図2A-D において ti1 あるいは ti2 で示した歯はそれぞれ同一歯であり、また、st1 と st2 は、それぞれ ti1 と ti2 の後継歯（胚）である。これら後継歯（胚）は、dentary 上に直立している機能歯の内側方向90度（反時計

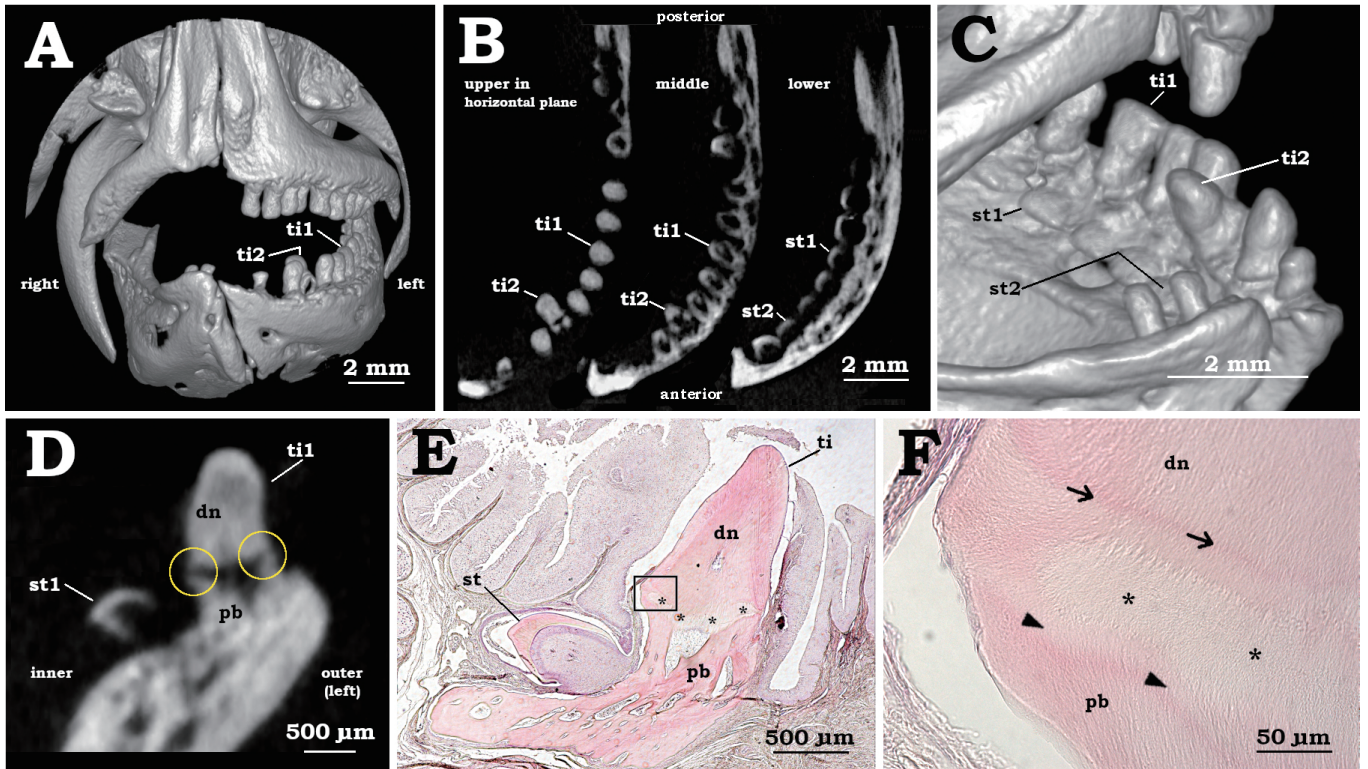


図2 カレイ科 *P. yokohamae* の吻側端正面からのVR像 (A), 左側下顎歯列のhorizontal slice像 (B), 左側下顎歯列内側面のVR像 (C), 左側下顎歯とその後継歯のaxial slice像 (D) およびそれに相当する組織切片のHE染色像 (E) とその拡大像 (F) を示す。Abbreviations: dn, dentin; pb, pedicel (bone); st, successional tooth; ti, tooth of interest. Teeth labeled as ti1 are identical to each other, likewise in ti2. st1 and 2 are successional teeth for ti1 and 2, respectively. Arrows: a boundary between tooth and fibrous zone. Arrowheads: a boundary between fibrous zone and pedicel. Asterisks: fibrous zone. Circles: radiotransparency of dividing zone. Rectangle: enlarged in F.

回り) の位置に存在し (図2C, D), 形成中であることが確認された (図2D, E)。図示例では内側への傾斜を示したti2は, pedicelをともなって傾斜していると考えられた (図2B, C)。本種の下顎歯底部下端とpedicelとは互いに近接し, 両者の間にはエックス線透過性のfibrous zoneが認められ, 組織学的には密性線維性組織であった (図2D-F)。また, このfibrous zoneにOx-RF陽性の線維系は検出されなかった (図示せず)。

*E. awoara* の下顎歯 (図3) は, 円錐形で一方に彎曲を示す点において, その外形は *M. cinereus* の下顎歯 (図1) と類似していた。しかし, *E. awoara* の下顎歯の彎曲方向は顎の後方ではなく後内側方向で, 歯の底部前縁には丸みがあるが, 底部の後縁外形は直線状であった (図3A)。また, *E. awoara* の下顎歯の底部とpedicelの対合関係も, 前述の2魚種とは大きく異なっていた。*E. awoara* においては, 歯とpedicelの近接部は歯の前方から側方までの底部下端のみでみられ, 歯の後半部下端とpedicelとの間は近接せず大きく離開していることがCT slice像で示された (図3B, C)。組織切片を精査した結果, 1) 大きく離開している歯の後半部下端とpedicelとは, 密性線維性組織のligamentで結ばれていること, 2) 歯の前方から側方までの底部下端とpedicelとの近接部ではこれら

を結ぶ線維系が欠如していること, 3) 代わってligamentが歯の前半部には存在していることが判明した (図3D)。この前方ligamentの起点は, 歯の前半部後縁から歯髓方向へ象牙質が庇状に張り出した部分 (canopy of dentin; cp) であり, 終点は前方部pedicelの上面でなく後面であった (図3C, D)。下顎歯を支持しているこれらのligamentにはOx-RF陽性の線維系は検出されなかったが, 歯とpedicelの近接がみられた歯の前端底部の石灰化歯質 (図3E, F) とこれに対向する石灰化したpedicel内 (図3G) にOx-RF陽性線維系の存在が確認された。

*S. marmoratus* で検討対象とした下顎歯は絨毛状とも表現できる密生小歯であるが (図4A), その外形は前述の *E. awoara* 下顎歯に類似していた (図4B, C)。歯の底部後端とpedicelとの距離は比較的近いが水平方向的に一致せず, 歯の底部後端と対向するpedicel上部は歯の後端よりもさらに後方に位置していた (図4D)。歯とpedicel間の線維性結合もやはりfibrous zoneではなくligamentと呼ぶべき特徴があり, とくに, *E. awoara* の場合と同様に, 前方ligamentの起点としてcanopy of dentinが存在し, ligament終点も前方部pedicelの上面ではなく後面にあった (図4E)。一方, *S. marmoratus* の下顎歯では, 下顎歯前端部の石灰化した歯質とpedicel中にOx-RF陽性線

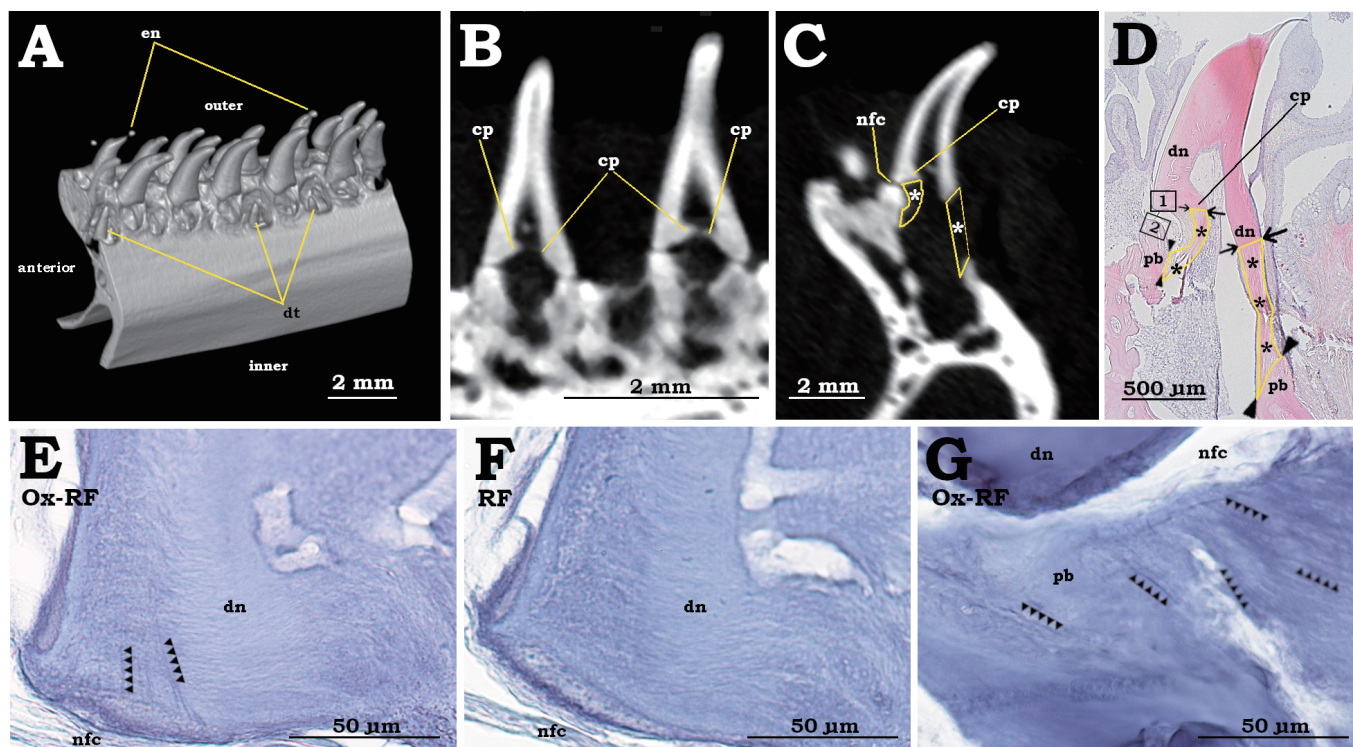


図3 ハタ科 *E. awoara* の右側下顎中間部のVR像 (A), 円錐状の下顎歯の(後内側への彎曲方向と直交する) axial slice 像 (B), 下顎歯の(彎曲方向と一致する) sagittal slice 像 (C) およびそれに相当する組織切片の HE 染色像 (D), 下顎歯の前方部下端における Ox-RF 染色像 (E) と RF 染色像 (F), pedicel 前方部上端における Ox-RF 染色像 (G) を示す。Abbreviations: cp, canopy of dentin; dn, dentin; dt, developing tooth; en, enameloid (distorted artifactually); nfc, no fibrous connection; pb, pedicel (bone). Array of triangles: oxitalan fibers. Arrows: a boundary between tooth and ligament. Arrowheads: a boundary between ligament and pedicel. Perimeter traced & asterisks: ligament. Rectangle 1: enlarged in E and F. Rectangle 2: enlarged in G.

維系は検出されなかった (図 4F, G)。

### 考 察

線維性の支持を受ける下顎歯をもつと推測した4魚種のうち、*M. cinereus* と *P. yokohamae* の下顎歯は、その外形形態は大きく異なるものの、基部はいずれもほぼ円形で、pedicel との間にはエックス線透過性の dividing zone がみられた。この部分を占めていた密な線維性組織は歯の基部象牙質と pedicel とを結びつけており、*M. cinereus* では、象牙質内部から fibrous zone を経て pedicel 中に進入する一連のコラーゲン線維であることも確認された。この連続性は、象牙質内のコラーゲン線維が、fibrous zone, pedicel という順で形成、伸長する可能性を示唆するが、そうであれば fibrous zone のみで石灰化を抑制する仕組みがあるのだろうか。脱灰後の collagenous template を取り扱ったときの印象では、図 1D から窺い知ることができるように、一連のコラーゲン線維は fibrous zone と pedicel の境界で裂け易かった。つまり、歯と fibrous zone の境界部では、その連続性がより高く強靱であると推測できる。

*P. yokohamae* では、内側傾斜を示す ti2 とした歯 (図 2A-C) が観察されたが、この傾斜歯は形成の進行とともに歯列に加わろうとしているのか、外力等によって内側へ

押し倒されたものなのかは不明である。しかし、歯と pedicel とが一体として内側傾斜していることは、fibrous zone の線維による両者の結合が強固であることを示している。加えて、もしこの傾斜が歯列に加わる途中像であるならば、両者が1つのユニットとして形成されつつ、外側方向に回転ながら萌出し、歯列に加わる前後になって pedicel と dentary との骨性結合が成立すると考えられる。歯と pedicel とがこうした1つのユニットをなすのは、ヒト歯胚の歯小囊細胞が歯の形成の進行と相俟って固有歯槽骨などの歯周組織形成を進めること<sup>25)</sup> とよく似ており、こうした見解の妥当性は、ゼブラフィッシュの歯と pedicel の形成過程の報告<sup>26)</sup> でも支持されるといえる。

*E. awoara* と *S. marmoratus* の下顎歯においては、dividing zone と類似のエックス線透過性領域が、歯の前端部下端 (およびその側方外縁) のみに認められたが、この領域では歯と pedicel 間に線維性組織は存在していなかった。一方、歯の前半部では、歯髄側の象牙質が庇状に張り出した canopy がみられ、その canopy 下端からのコラーゲン線維が成す ligament が伸長し、下方に位置する pedicel 前方部の内側面に至っていた。また、歯の後方部では、象牙質下端から伸長した ligament が、後下方に位置する pedicel 後方部の上面に至っていた。このような歯と

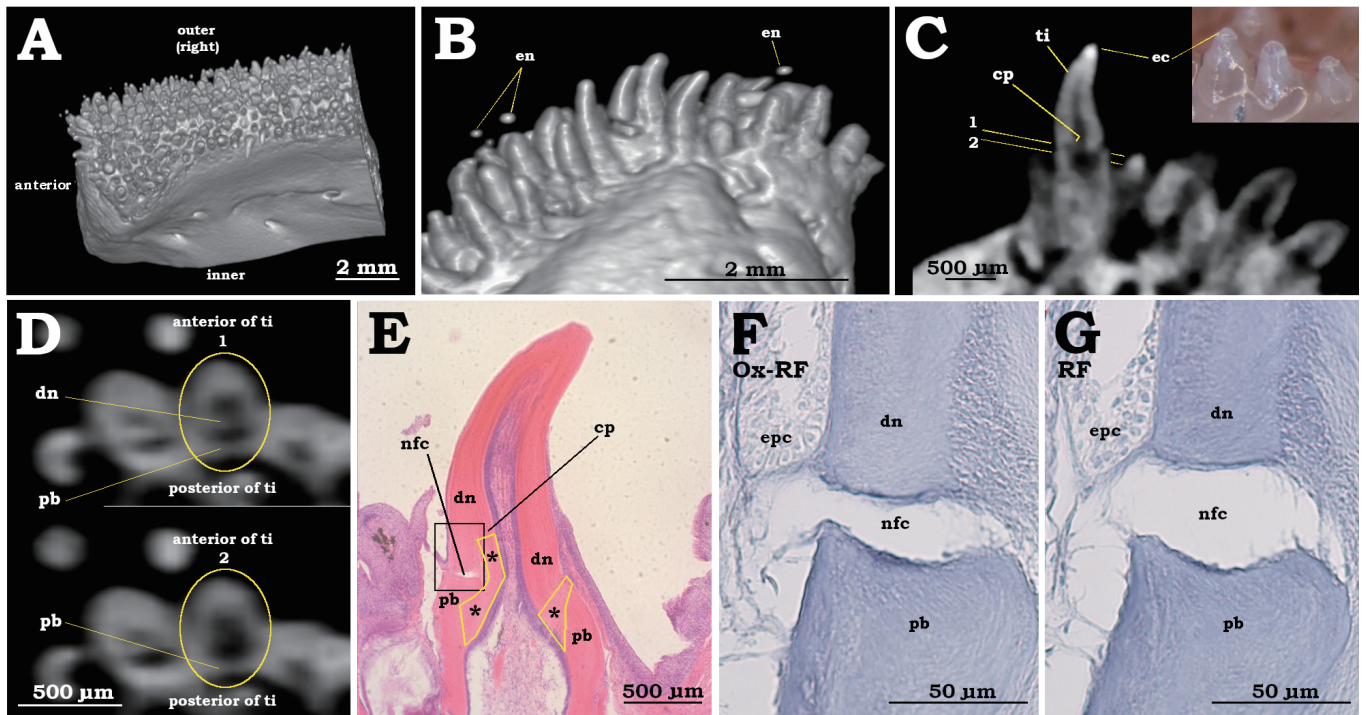


図4 フサカサゴ科 *S. marmoratus* における右側下顎前部部のVR像 (A), 右側下顎の吻側端を正面からみたVR像 (B), 下顎歯の彎曲方向での slice 像 (C) と horizontal slice 像 (D), C の slice 像に相当する組織切片の HE 染色像 (E), 下顎歯の前方部下端と pedicel の前方部上端における Ox-RF (F) および RF 染色像 (G) を示す。Abbreviations: cp, canopy of dentin; dn, dentin; ec, enameloid cap (less distorted as shown in the inset macroscopic image in C); en, enameloid (distorted artifactually); epc, epithelial cells; nfc, no fibrous connection; pb, pedicel (bone); ti, tooth of interest. 1 & 2 in C: slice planes shown in D1 and D2, respectively. Circles: tooth identical to the one labeled ti in C. Perimeter traced & asterisks: ligament. Rectangle: enlarged in F and G.

pedicel の geometric な関係に加えて、コラーゲン性 ligament の走行とその付着部の位置は、蝶番型の可動性を示す歯の特徴といえる<sup>12, 14, 15</sup>)。 *E. awoara* で明瞭であった丸みを帯びた歯の基底前縁および直線状の後縁という所見も、この下顎歯が後方への可動性・可倒性をもつことを裏付ける形態の特徴といえる。 *S. marmoratus* の下顎歯でも、 *E. awoara* の場合と同様な特徴がみられたが、後方 ligament の長さは短く、また、基底前縁が丸く後縁が直線状という特徴は *E. awoara* ほどは顕著ではなかった。このことは、 *S. marmoratus* の下顎歯 (図 4 A) は、そのサイズが *E. awoara* 下顎歯 (図 3 A) の 1/2 以下であること、また、これらの歯が dentary 上で密生状態にあるために許容される可動範囲がかなり小さいことなどが関係している可能性がある。

Fibrous zone がみられた *M. cinereus* と *P. yokohamae*, 前方および後方 ligament がみられた *E. awoara* と *S. marmoratus* のいずれにおいても、これらの線維性組織には弾性線維はもとより、Ox-RF で検出されるオキシタラン線維もみられなかった。蝶番型の可動性、言い換えれば後方への可倒性と深く関わる *E. awoara* や *S. marmoratus* の下顎歯 ligament では、弾性線維の有無が殊に関心事であったが、動いた歯の復帰は ligament 構成主体のコラーゲン線維によって果たされているのであろう。一方、

*E. awoara* の下顎歯前端部の石灰化歯質中と pedicel 中にオキシタラン線維が見いだされた。本研究の著者ら<sup>27)</sup> は、キアコウ *Lophius litulon* の可倒歯においても同様な部位でのオキシタラン線維の存在を報告している。今回、それとは異なる魚種において、この特異的ともいべき分布が確認されたことは、同部のオキシタラン線維の役割や意義の解明に寄与する可能性があるものと考ええる。歯周靭帯で初めて見いだされたオキシタラン線維は、超微構造的には fibrillin microfibril 束だが<sup>28)</sup>、こうした線維系は眼球<sup>29)</sup>、真皮<sup>30, 31)</sup> あるいは骨膜<sup>32)</sup> などや、円口類<sup>33)</sup> および非脊椎動物<sup>34, 35)</sup> にも分布している。さらに、哺乳類の歯の発生において、オキシタラン線維は歯小囊にまず出現すること<sup>36)</sup>、また、microfibril の構成分子 fibrillin が細胞外のマトリック代謝を制御する TGF- $\beta$  の活性に関わっている<sup>37-39)</sup>。これらを考え合わせると、歯周靭帯を備える釘植型の哺乳類歯と共通する進化的起源をもちながら、異なる進化過程を経て多様化した魚類歯や pedicel で特異な局在を示したオキシタラン線維は、歯と支持組織の系統進化や発生に関連した役割を有していると考えられる。

本研究に供した魚類試料の入手にあたっては、本学名誉教授の越川憲明先生および薬理学講座、歯科麻酔学講座の皆様にご理解とご協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

本研究の一部は令和2, 3, 4年度の日本大学歯学部佐藤研究費および総合歯学研究所研究費(B)の助成によって行われた。

本論文に関して、開示すべき利益相反はない。

## 文 献

- Ungar PS (2010) Mammal Teeth: Origin, Evolution, and Diversity. Johns Hopkins University Press, Baltimore, 73-82.
- Cotta-Pereira G, Rodrigo FG, David-Ferreira JF (1977) The elastic system fibers. *Adv Exp Med Biol* 79, 19-30.
- 磯川桂太郎, 稲井哲一朗, 中村雅典, 山本 仁, 渡邊弘樹 (2014) 組織学・口腔組織学, 第4版, わかば出版, 東京, 59-72.
- Fullmer HM, Lillie RD (1958) The oxytalan fiber: A previously undescribed connective tissue fiber. *J Histochem Cytochem* 6, 425-430.
- Fullmer HM (1959) The peracetic-orcein-Halmi stain: A stain for connective tissues. *Stain Technol* 34, 81-84.
- Fullmer HM (1960) A comparative histochemical study of elastic, pre-elastic and oxytalan connective tissue fibers. *J Histochem Cytochem* 8, 290-295.
- Fullmer HM, Sheetz JH, Narkates AJ (1974) Oxytalan connective tissue fibers: A review. *J Oral Pathol* 3, 291-316.
- Isokawa K, Sejima H, Shimizu O, Yamazaki Y, Yamamoto K, Toda Y (2004) Subcutaneous microfibrillar bundles are organized into a distinct parallel array in the developing chick limb bud. *Anat Rec* 279A, 708-719.
- 磯川桂太郎, 山崎洋介, 瀬島仁美 (2008) 弾性線維とマイクロフィブリル—先人の軌跡を顧み、新たな展開に臨む—. *日大歯学* 82, 79-89.
- Oka K (2022) Fibrillin protein, a candidate for creating a suitable scaffold in PDL regeneration while avoiding ankylosis. *Genesis* 60, e23486.
- Owen R (1840) *Odontography; or, a treatise on the comparative anatomy of the teeth; their physiological relations, mode of development, and microscopic structure, in the vertebrate animals, Volume I.* Hippolyte Baillière Publisher, London, 6-8.
- 磯川桂太郎, 湯口眞紀, 甲斐由紀子, 山崎洋介, 新井嘉則, 本田和也 (2010) 魚類の蝶番性可倒歯研究のトラックバックと今後の端緒. エナメル質比較発生学懇話会記録 11, 17-24.
- Fink WL (1981) Ontogeny and phylogeny of tooth attachment modes in actinopterygian fishes. *J Morphol* 167, 167-184.
- Shellis RP (1982) Comparative anatomy of tooth attachment. In *The periodontal ligament in health and disease*. Berkovitz BKB, Moxham BJ, Newman HN eds, Pergamon, Oxford, 3-24.
- Berkovitz B, Shellis P (2017) The teeth of non-mammalian vertebrates. Elsevier, London, 98-102.
- Bertin TJC, Thivichon-Prince B, LeBlanc ARH, Caldwell MW, Viriot L (2018) Current perspectives on tooth implantation, attachment, and replacement in Amniota. *Front Physiol* 9, 1630.
- Kanazawa H, Yuguchi M, Yamazaki Y, Isokawa K (2020) The teeth and dentition of the filefish (*Stephanolepis cirrhifer*) revisited tomographically. *J Oral Sci* 62, 360-364.
- 湯口眞紀, 山崎洋介, 金沢紘史, 玉木理一郎, 磯川桂太郎 (2020) トラフグ *Takifugu rubripes* 嘴状歯の構造と歯切りの影響. *日大歯学* 94, 11-20.
- Fedorov A, Beichel R, Kalpathy-Cramer J, Finet J, Fillion-Robin JC, Pujol S, Bauer C, Jennings D, Fennessy F, Sonka M, Buatti J, Aylward S, Miller JV, Pieper S, Kikinis R (2012) 3D slicer as an image computing platform for the quantitative imaging network. *Magn Reson Imaging* 30, 1323-1341.
- Takagi M, Kazama T, Shimada K, Hosokawa Y, Hishikawa H (1989) Differential distribution and ultrastructural staining of oxytalan and elastic fibers in the periodontal ligament of *Alligator mississippiensis*. *Anat Rec* 225, 279-287.
- Isokawa K (1990) Cytochemical detection of disulfide and sulfhydryl groups in lamprey aortic microfibrils. *J Nihon Univ Sch Dent* 32, 81-92.
- 木村 重 (1983) 魚紳士録. 上巻, 緑書房, 東京, 301-312.
- 青海忠久 (1998) ヒラメの表と裏はどうして決まる?. *化と生* 36, 646-648.
- 有瀧真人 (2008) 異体類における形態異常の発現機序解明とその防除技術の開発. *日水会誌* 74, 772-775.
- Diep L, Matalova E, Mitsiadis TA, Tucker AS (2009) Contribution of the tooth bud mesenchyme to alveolar bone. *J Exp Zool B Mol Dev Evol* 312B, 510-517.
- Rosa JT, Witten PE, Huysseune A (2021) Cells at the edge: The dentin-bone interface in Zebrafish teeth. *Front Physiol* 12, 723210.
- Isokawa K, Yuguchi M, Nagai H (2008) Oxytalan fibers in the teleostean tooth and pedestal bone. *Matrix Biol* 27, 22. (Abstract)
- Carmichael GG, Fullmer HM (1966) The fine structure of the oxytalan fiber. *J Cell Biol* 28, 33-36.
- Raviola G (1971) The fine structure of the ciliary zonule and ciliary epithelium. With special regard to the organization and insertion of the zonular fibrils. *Invest Ophthalmol* 10, 851-869.
- Yamazaki Y, Sejima H, Yuguchi M, Namba Y, Isokawa K (2007) Late deposition of elastin to vertical microfibrillar fibers in the presumptive dermis of the chick embryonic tarsometatarsus. *Anat Rec* 290, 1300-1308.
- Shinozuka K, Yamazaki Y, Yuguchi M, Toriumi T, Suzuki R, Tsuruga E, Isokawa K (2013) Progressive bundling of fibrillin microfibrils into oxytalan fibers in the chick presumptive dermis. *Anat Rec* 296, 71-78.
- Namba Y, Yamazaki Y, Yuguchi M, Kameoka S, Usami S, Honda K, Isokawa K (2010) Development of the tarsometatarsal skeleton by the lateral fusion of three cylindrical periosteal bones in the chick embryo (*Gallus gallus*). *Anat Rec* 293, 1527-1535.
- Isokawa K, Takagi M, Toda Y (1989) Ultrastructural cytochemistry of aortic microfibrils in the Arctic lamprey, *Lampetra japonica*. *Anat Rec* 223, 158-164.
- Reber-Müller S, Spissinger T, Schuchert P, Spring J, Schmid V (1995) An extracellular matrix protein of jellyfish homologous to mammalian fibrillins forms different fibrils depending on the life stage of the animal. *Dev Biol* 169, 662-672.
- Piha-Gossack A, Sossin W, Reinhardt DP (2012) The evolution of extracellular fibrillins and their functional domains. *PLoS One* 7, e33560.
- Inoue K, Hara Y, Sato T (2012) Development of the oxytalan fiber system in the rat molar periodontal ligament evaluated by light-and electron-microscopic analyses. *Ann Anat* 194,

- 482-488.
- 37) Nistala H, Lee-Arteaga S, Smaldone S, Siciliano G, Carta L, Ono RN, Sengle G, Arteaga-Solis E, Levasseur R, Ducy P, Sakai LY, Karsenty G, Ramirez, F (2010) Fibrillin-1 and-2 differentially modulate endogenous TGF- $\beta$  and BMP bioavailability during bone formation. *J Cell Biol* 190, 1107-1121.
- 38) Ramirez F, Sakai L (2010) Biogenesis and function of fibrillin assemblies. *Cell Tissue Res* 339, 71-82.
- 39) Robertson IB, Horiguchi M, Zilberberg L, Dabovic B, Hadjiolova K, Rifkin DB (2015) Latent TGF- $\beta$ -binding proteins. *Matrix Biol* 47, 44-53.