

脊椎動物の歯の起源と感覚性外骨格の進化

Haridy Y, Norris SCP, Fabbri M, Nanglu K, Sharma N, Miller JF, Rivers M, La Riviere P, Vargas P, Ortega-Hernández J and Shubin NH (2025) The origin of vertebrate teeth and evolution of sensory exoskeletons. *Nature* 642, 119–124
<https://doi.org/10.1038/s41586-025-08944-w>

象牙質と odontode (歯状突起) の最も古いと推定される起源は、カンブリア紀後期からオルドビス紀前期の堆積層から発見された *Anatolepis heintzi* として知られる断片的なリン酸塩を持つ化石に遡ることができる。*Anatolepis heintzi* の外骨格は、特徴的な象牙質の管状構造を有しており、odontode (歯状突起) は歯の最初の先行組織であると解釈されるようになった。しかし、*Anatolepis heintzi* が正当な脊椎動物であるかどうかについては、比較可能な外骨格組織の欠如により、まだ議論が続いている。本論文では、この論争を解決し、歯組織の起源を解明するために、絶滅した脊椎動物と現生脊椎動物、無脊椎動物の多様な外骨格をシンクロトロン放射光で調査した。現生および絶滅した脊椎動物および無脊椎動物の外骨格の多様な形態を解析し、カンブリア紀およびオルドビス紀の分類群における象牙質の起源と分布を解析している。現生軟骨魚類および硬骨魚類の外歯類の組織透明化法および免疫蛍光染色法による解析と併せて、本研究の知見は象牙質の奥深い進化的起源と、最古の歯類の機能を明らかにしている。

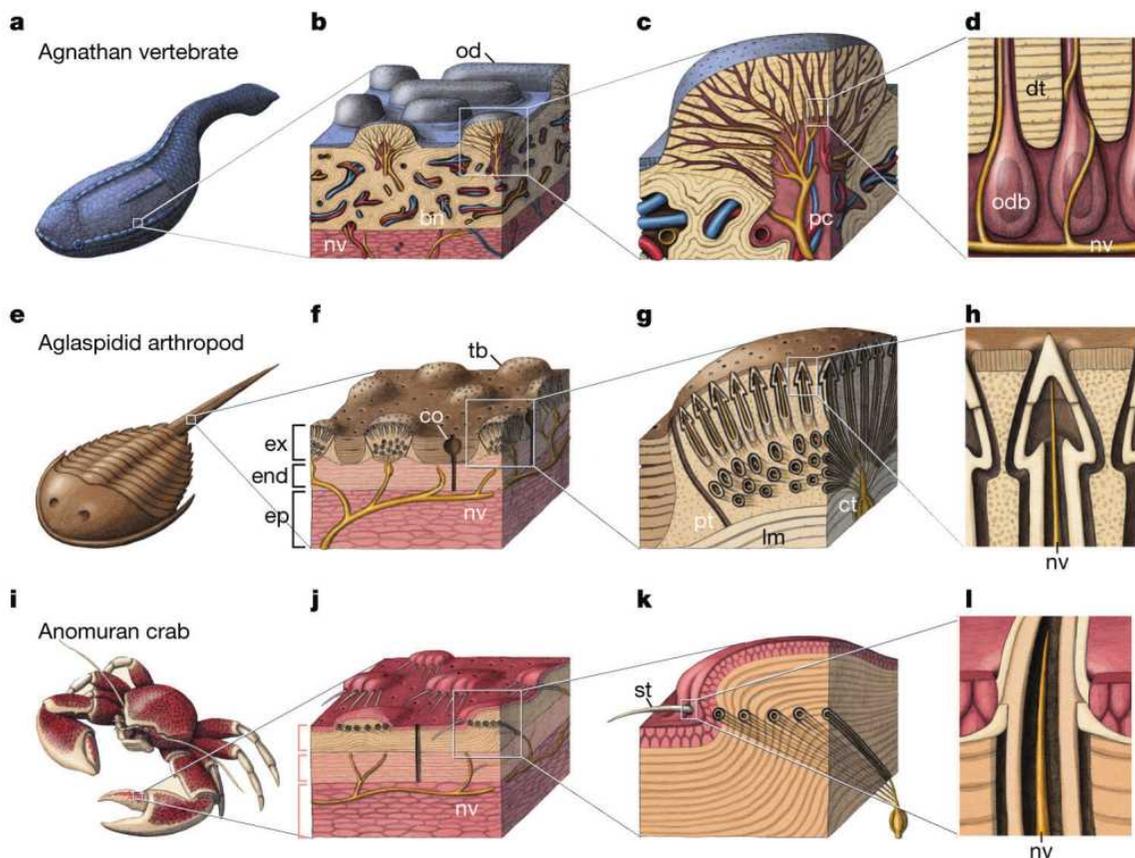
本論文に使用した化石種や現生種では13種であり、またそれ以外に本研究で参考にした試料は35種である。その主なものとして、化石種では、*Anatolepis* sp. (石灰化初期脊椎動物であるオルドビス紀の無顎類)、Aglaspidid 属 (古生代に生息した節足動物・光楯類、リン酸塩質で石灰化組織を持つ)、*Aglaspis? franconensis* (古生代に生息した節足動物)、*Astraspis* sp. (魚類、翼甲類)、*Eriptychius* sp. (魚類、翼甲類) である。現生動物では、無脊椎動物のカニ類、巻貝や昆虫類などの *Polites* sp., *Petrolisthes galathius*,

Limulus polyphemus, *Callinectes sapidus*, *Eupatorus gracilicornis*, *Megabalanus tintinnabulum* である。また脊椎動物として魚類のヨロイナマズ類 *Ancistrus* sp., カジカ類 *Leucoraja erinacea*, サメ類 *Scyliorhinus retifer* である。研究方法として、高解像度シンクロトロン μ CT 法、 μ CT 法、蛍光免疫組織学を用いた共焦点顕微鏡解析などを用いている。

Anatolepis heintzi の小管は Aglaspid 科節足動物の感覚器と同様の器官であることが判明した。シンクロトロンスキャンにより、歯状突起と感覚器構造の間には、超微細構造の類似性が見られることが明らかになった。オルドビス紀の脊椎動物 *Eriptychius* の外歯状突起は、無脊椎動物の感覚器と形態的に収斂する大きな象牙細管を特徴としている。免疫蛍光分析により、現生の軟骨魚類および硬骨魚類の外歯状突起には、歯に類似した感覚機能を示唆する広範な神経支配を保持していることが示された。これらの収斂と神経支配のパターンは、象牙質が初期脊椎動物の外骨格において感覚組織として進化し、その機能が現代の脊椎動物の歯にも保持されていることを示している。中期オルドビス紀の化石は現在知られている最古の脊椎動物の歯の証拠を表している。

現代の脊椎動物には感覚器官である外歯突起を持つものが数多く報告されている。盲目のナマズは、感覚機能を持つとされる特殊化した皮骨性 odontode (歯状突起) を有している。イッカクなど、いくつかの哺乳類は、感覚機能を果たす特殊化した歯列を有している。象牙芽細胞自体も感覚細胞であることが広く知られている。このような進化論的な視点から見ると、口腔内の歯が極めて敏感であるという事実は、謎というよりは、むしろ初期脊椎動物の感覚器皮甲の中に進化の起源があることを反映している。*Anatolepis* が最古の石灰化した顎口類を代表するという結論は、脊椎動物の石灰化の初期進化、特に歯の進化に深く関わっている。*Anatolepis* が最古の odontode (歯状突起) を代表するとすれば、象牙質と無細胞骨が脊椎動物の最初の組織であり、エナメルイドとエナメル質は後期に進化したことを意味する。

(三島弘幸)



Haridy et al. (2025) の図 5. 脊椎動物の歯突起と節足動物の感覚器官構造の超微細構造の類似性。

a: 石灰化初期脊椎動物の代表としてのオルドビス紀の無顎類 *Astraspis* sp. の復元。b: 無顎類 *Eriptychius* sp. の細長い歯状突起系の模式図。c: 口径の広い象牙細管と歯髄腔を示す *Eriptychius* sp. の単一の歯状突起の拡大図。d: 歯髄 - 象牙質境界域における歯内神経支配の拡大図。神経支配は象牙芽細胞に沿って象牙細管にまで入る可能性がある。e: カンブリア紀の節足動物 *Aglaspis* sp. の復元。f: aglaspidid 光楯類の石灰化した外骨格（クチクラの組織構造と結節を示す）の模式図。g: aglaspidid の結節の 1 つの拡大。放射状の管状配列、石灰化した管状被覆、周縁の管状構造、そして矢印状の管状終末を示している。h: aglaspidid の結節表面付近における管状終末の拡大。i: 現生異尾類 *Neopetrolisthes* sp. の模式図。j: クチクラ上の *Neopetrolisthes* sp. の感覚器の模式図。k: 剛毛に向かって背側方に伸びる管状構造を持つ単一の感覚器官のクローズアップ。l: *Neopetrolisthes* sp. の管状構造の末端が 1 本の剛毛に分かれている拡大。

od (歯肉), bn (骨), nv (神経), pc (歯髄腔), dt (象牙細管), odb (象牙芽細胞), ex (外クチクラ), end (内クチクラ), ep (表皮), tb (細管), co (クチクラ器官), pt (末梢細管系), lm (層状組織), ct (中心小管), st (剛毛)。