

サメの歯の古生物学的研究^{*}

— 問題提起と基礎的研究 —

後 藤 仁 敏^{**}

1. まえがき

1. 問題提起

1954年に、ABELSON がデボン紀の魚の外骨格などの化石から数種類のアミノ酸を検出し、化石の有機物を生化学の手法で研究する古生化学(Paleobiochemistry)の分野がきりひられて以来、生物の進化を分子レベルで解明しようとする方向が、現代の古生物学の主流となってきた。

一方、日本では、井尻正二がすでに1936年から、デスモステルスなどの哺乳類の歯の化石の研究を、生物学や歯学の方法をつかってはじめていた。このなかで、井尻は、1) 硬組織の化石、なかでもとくに歯の化石を材料にすれば、化石となった古生物を現生生物と同じ手法で研究できること、2) 古生物学の研究方法は、生物学的方法と地質学的方法を後者の方法によって統一したものであること、3) 生物学の研究は、マクロからミクロへ、形態から機能へという順序で進むのが正しいこと、4) 古生物学の研究では、個体発生・個体変異・比較解剖の三つの軸からなり、その原点をヒトにおいて「古生物の座標軸」において、古生物の生物学的な位置づけをおこなった上で、研究を進めることが必要であること、5) 古生物学には、実験的方法を導入することが重要であること、を主張している。

こうして、硬組織の化石を対象に、組織学や生化学の手法を用いて、微細構造や有機物を明らかにし、硬組織と石灰化現象の起源と進化を、組織・細胞・分子のレベルで解明しようとする研究が、新しい古生物学の主要なテーマとなった。それは、硬組織の進化を、マクロとミクロを統一して研究し、さらに実験的方法を導入することによって、硬組織だけでなく、化石になりにくい軟組織も

* 1970年8月24日受理。第32回化石研究会例会(1969年5月)および日本地質学会第76年会(1969年10月)にて一部を講演。Masatoshi Goto, Paleontological Studies on the Shark Teeth

** 東京教育大学理学部地質学鉱物学教室

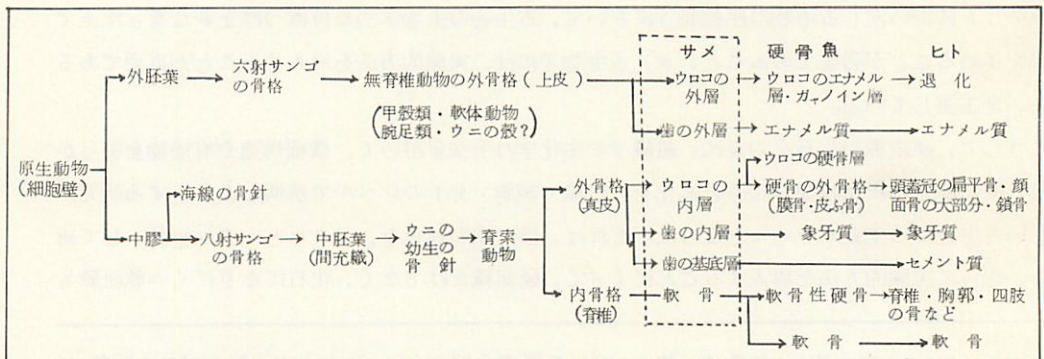
含めた、生物体全体の進化を、あきらかにしようというものである。

そのなかで、とくに、脊椎動物にあっては、歯の起源と進化という問題が、古くからとりくまれてきており、最近の組織学や生化学の成果からしても、新しく注目すべき問題となっている。

歯は、古生物学の資料としては、古生代のシルリア紀の板皮類に最初にあらわれる。また、比較解剖学的には、歯をもつもっとも下等な動物は軟骨魚類——サメの仲間である。このサメの歯は、サメの全身を被うサメのうろこ——楯鱗または皮歯と同じ構造をしており、発生学的に、これらは相同の器官といわれ、HERTWIG(1874)は、歯はサメの楯鱗から進化したものと考えた。

軟骨魚類は、古生代の中頃にあらわれ、今日にいたるまで、クラドセラケ類から現代型のサメ類へと、他の高等な水生脊椎動物との激しい生存競争にうち勝ち、環境によく適応する一方、さまざまな特殊化をおこないながら、隆盛に大洋のなかで生き続け、進化してきた。サメは、1) 内骨格が、軟骨性である。2) 外骨格として、楯鱗をもつ。3) 体内受精をおこない、そのため雄は、腹鰭に軟骨で支えられた交尾器をもつ。4) 卵生または卵胎生で、卵が大きく、卵生のばあいには、卵は卵殻に包まれて産出される。5) 肺や鰓をもっていない。6) 鋭い嗅覚をもつ、などの他の魚類にみられない特徴をもっている。

軟骨から硬骨が分化したというGOODRICH(1913)の考えにしたがって、サメは原始的な魚類とされてきた。ところが、最近では、無顎類の甲皮の化石から骨組織に似たものが発見された(TARLO, 1963)ことから、硬骨は軟骨より系統発生的に先にできた組織であり、軟骨は胎生期の環境の適応によって二次的につくられたもので、サメの軟骨も無顎類や板皮類の硬骨が二次的に退化したものである、という考えが有力になっている。しかし、1) 比較解剖学的には、軟骨に似た組織は腔腸動物(クラゲのある種)からみられること。2) 発生学的には、胎児期の脊椎や長骨は、軟骨ができたのちそれが硬骨におきかわる、という軟骨性化骨をおこなうこと。3) 硬組織の進化からみると、脊椎動物の外骨格は、真皮の骨化によってできたものであるのたいし、内骨



第1表 硬組織の系統発生についての一仮説

格は、同じ中胚葉起源でも、脊索のまわりや各鰭（四肢）の真皮でない結合組織が骨化したもので、両者は脊椎動物の骨格の二つの系統となっている（第1表）こと。4）古生物学的には、無顎類や板皮類は、その多くが、甲皮（外骨格）は硬骨に似たものだが、脊椎などの内骨格は化石になりにくい脊索または軟骨であったと考えられること^{*} から、脊椎動物の内骨格の系統発生では、軟骨が硬骨に先行し、脊椎の個体発生もその系統発生をくり返す脊索→軟骨→硬骨の順であるといえる。したがって、サメは、そのあらゆる特殊化にもかかわらず、なによりも内骨格が軟骨であるという点で、原始的な魚類、あるいは、魚類の祖先型に近いものであるということができ、** 脊椎動物の進化の研究にあって、他のレリックと同様に、注目すべき存在となっている。そして、サメの化石としては、歯がもっともおおく知られており、骨格や軟組織の化石はほんのわずかししか発見されていない。

こうして、サメの歯は、1）化石としてもっともおおく発見され、2）かつ保存がよいため、化石でも現生と同じ手法で研究できる、という消極的な理由だけでなく、3）消化器官としての機能をもつため、食性や生態と密接な関係にあり、4）歯としてもっとも原始的な性格をもつうえ、外骨格である楯鱗と相同関係にあり、5）脊椎動物における硬組織の進化でもっとも重要な位置にあると考えられる（第1表）、という理由から、脊椎動物の進化、なかでも歯の起源と進化をあきらかにするために、古生物学の研究対象として、もっとも興味深いものといえよう。

そして、その研究を、層位学などの地質学的方法と、マクロからミクロへ、形態から機能へと向う、分類・解剖・組織・生化学・発生などの生物学的方法を、前者の歴史科学の方法で統一した古生物学の方法で進めゆくのが、正しい方向であると考ええる。そのさい、歯をつくる無機物と有機物の関係、とくに石灰化における有機物の主導的役割に注目し、歯の進化を組織・細胞・分子のレベルで解明し、マクロとミクロを統一してとらえることが、進化の過程だけでなく、その要因にまで迫る道ではないか、と考える。

2. 研究の方法と課題

以上のような問題提起にもとづいて、この研究の方法と課題をつぎの7点に要約する。

(1) 日本におけるサメ化石の種類・分布・産出層準・産状などを明らかにするために、分類学的

* また、硬骨魚類の進化においても、軟骨類→全骨類→真骨類というように、内骨格に脊索がのこり軟骨性のものから、硬骨のものへとという方向がみられる。

** サメでは、内骨格がすべて軟骨であるという原始性が、同時に、サメの活発な遊泳力を保障し、硬骨をもつようになった無顎類や板皮類とちがって、大洋中に繁栄できたという適応性となっている。しかし、そのために、軟骨魚類になったサメは、その特殊化のために、サメ以上の高等な脊椎動物に進化できなかったし、その必要もなくなったのである。

および生物層位学的研究をおこない、世界のなかで位置づける。

(2) 現生と化石のいろいろなサメの歯について、その形態的な特徴を明らかにするために、比較解剖学的研究をおこなう。

(3) 歯の硬組織の微細構造を明らかにするために、組織学的研究をおこなう。

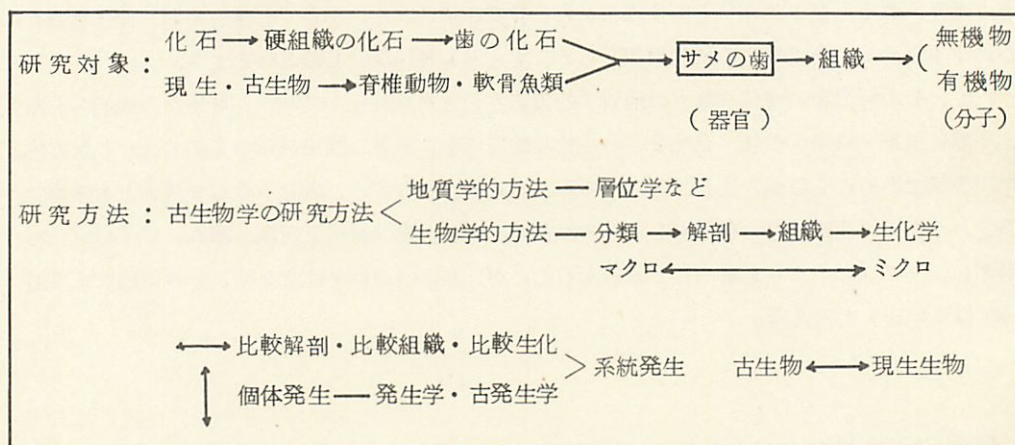
(4) 歯の有機成分について、その種類・含有量・代謝過程などを明らかにするために、生化学的研究をおこなう。そのさい、コラーゲンやケラチンなどの有機物に主眼をおいて、研究を進める。

(5) 歯の無機成分について、その種類・含有量などを明らかにし、その主体であるアパタイトについて、結晶学的および化学的研究をおこなう。

(6) 歯の発生を組織・細胞・分子レベルで明らかにするために、発生学的研究をおこなう。

(7) 以上の研究を、井尻のいう「古生物の座標軸」という考えにしたがって、ヒトの歯を原点にとり、比較解剖・個体発生・個体変異の三つの軸において、材料にしたサメの歯の生物学的な位置づけをおこないつつ、当面は比較解剖と個体発生、現生と化石を結ぶ系統発生の軸にそって進めてゆく。

以上のようなサメの歯の古生物学的研究を模式的に示すと第1図のようになる。



第1図 サメの歯の古生物学的研究の模式図

このうち、本論文では、おもに現生アオザメと化石のサメの歯を対象にして、1) 歯の形態の比較解剖学的研究、2) 歯の微細構造の組織学的研究、3) 歯に含まれる有機物とくにタンパク質についての生化学的研究をおこなった結果を報告し、それを今後の研究を進めるための基礎的研究とする。

なお、日本における化石軟骨魚類の時代分布・地理分布についての研究結果は、別に公表する予定である。

3. 謝 辞

この研究を進めるのにあたって、井尻正二会員・東京教育大学理学部地質学教室の大森昌衛会員、佐藤敏彦会員、秋山雅彦会員から、研究の指導と、御教示をたまわり、化石研究会の方々には、討論をしていただいた。

また、野村松光・上妻晴男の両氏と磯貝文男会員には、試料の収集あたってお世話になった。貝原久会員と国立科学博物館の長谷川善和会員からは、貴重な文献を提供していただいた。化石サメの歯についてのアンケートには、31の博物館と44名の方々の御回答をたまわった。

また、東京医科歯科大学歯学部生化学教室の佐々木哲教授、久保木芳徳博士には、材料の準備とガスクロマトグラフの使用にあたって、助言と助力をいただいた。日本電子株式会社には、アミノ酸自動分析機の使用にあたって、協力をえた。

以上の方々に對し、紙面をかりて深謝の意を表する。

II. サメの歯の形態

1. 歯の一般的特徴

軟骨魚類の歯は、よく発達していて、その形態・配列様式には、かなりの多様性がみられる。歯の数は、他の脊椎動物と比べていちじるしくおおく、また、化石として歯がもっともおおく知られていることから、AGASSIZ(1833-1845)の研究以来、比較解剖学的にも、発生学的にも、歯の起源と進化のうえでも、注目されてきた。

サメの歯は、個々の大きさ*は異なるがほぼ同じような形をした**同形歯性**で、頬側から舌側にむかって、ふつう数列、おおいものでは10列以上ならび、ふつう数十から数百の歯をもつ。**また、一生の間に何回はえかわる**多生歯性**で、生活状況によって萌出回数が一定せず、歯数も個体差が大きい。ふつう個体の発育にともなって、漸次、萌出する歯の大きさも数も増す。*** 歯の交換は、もっとも頬側の機能歯が、つかい古されて抜けおちると、舌側の歯が、順次顎骨の縁をエスカレー

* サメの歯で知られている最大のものは、第三紀の化石種 *Carcharodon megalodon* の歯で、歯の高さは、4 cm から13.3 cmに達し、口を開くと2 m程になった、と推定されている。

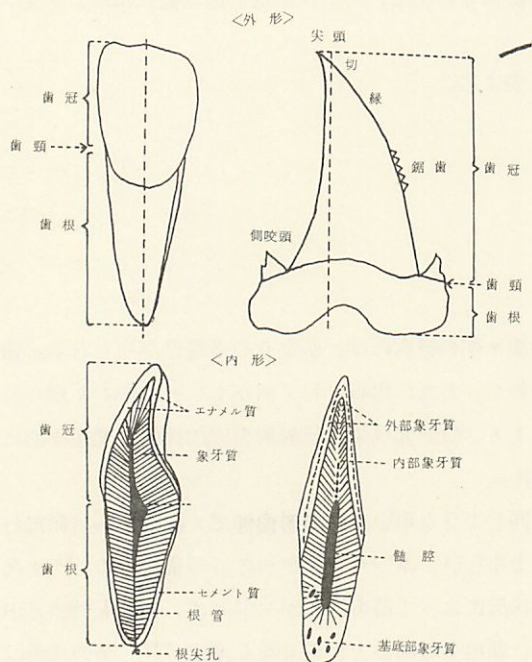
** 現生でもっともおおいは、ジンベエザメ *Rhincodon typus* で、ひとつの顎に約3,600本の歯をもつ。もっともすくないのは、*Aetobus* で、上・下顎にそれぞれ12本の歯が、一列にならぶだけである。

*** 10年間にトラザメが、約2万4,000本の三角形の歯を生じ、使用した上で脱落した例が知られている。

ターにのせられたように回転しながらでてくる、**車輪交換**とよばれる独特の形式をとる。歯は、数列ならび、もっとも舌側の列の歯の下側の表皮中には、つねに新しい歯胚が、数列も用意されている。歯と顎との結合様式は、歯足骨がなく、結合組織線維（膠原線維）によって支えられて軟骨上に植立する**線維性結合**というもっとも原始的なものである。歯は、発生学的にみれば、**楯鱗**と同じで、その構造もよく似ている。

こうした特徴をもつサメの歯は、脊椎動物の歯のなかで、もっとも原始的なものといえることができる。

＜歯の形態＞（第2図）



第2図 ヒトの歯（左）とサメの歯（右）の外形と内形（藤田，1957；長谷川ら，1967；伊法，1960より）

サメの歯は、ヒトの歯と同様に、外形的には**歯冠**と**歯根**の二部に区別される。歯冠とは外部象牙質で被われた部分で、口腔内に露出し直接機能に参加しており、一般に三角形をしめす。歯根とは、基底部象牙質で包まれた部分で、表皮中に遊離している。歯冠と歯根の移行部分を、**歯頸**という。歯冠の形は剣の先のようで、その刃に相当するところを、**切縁**という。歯冠の先は三角錐状の**尖頭**（**咬頭**）となって突出しているため、切縁は二部に分かれている。切縁には、**鋸歯**という小突起のあるものがある。また、咬頭が二個またはそれ以上ある**多咬頭性**のものがあり、**主咬頭**の両側にあるものを、**側咬頭**（**副咬頭**）という。

歯を縦断してその内形をみると、まず歯の内部に、ヒトの歯の歯髄腔に相当する**髓腔**が認められる。この髓腔が分岐して樹枝状をなすものもある。その髓腔をとりかこんで、**内部象牙質**と

いう硬い組織がある。内部象牙質の外層には、歯冠の表面を被う、**外部象牙質**がある。歯根の部分は、**基底部象牙質**からなっている。これら三種の硬組織は、それぞれの目的に従って、歯の構成要素として重要なものである。なお、サメの歯の硬組織を、内部象牙質・外部象牙質・基底部象牙質の三部に分けたのは、伊法（1960）により、象牙質はすべての脊椎動物の歯に存在する、という基本的な考えと、象牙小管・基質線維・髓腔などの構造的な特徴にもとづくものである。歯の組

織については、あとで詳しくのべる。

2. 歯の形態の進化

軟骨魚類は、その進化を通して、歯の形態も、いろいろ変化させてきた。その様相を追ってみると、およそつぎのようになる。

(1) 最古のサメの仲間である古生代の *Cladoseleache* 類は、原始的な両接型*の顎をもち、その歯は、高い中心咬頭とその両側の低い側咬頭からなる、原始的ないわゆる *cladodont* 型をしている。この仲間から進化して、淡水に入っていた *Xenacanthus* 類は、離ればなれになった二つの高い咬頭と、その中間にある一つの小咬頭からなる歯をもっていた。

(2) *Cladoseleache* 類から進化して、中生代に栄えた、*Hybodus* 類のおおくは、*Cladoseleache* 類に似た、高い中心咬頭からなって、両側に各二〜四個の側咬頭をもつ、山なみ型の歯をもっていた。しかし、この仲間には、すでにかなり特殊化した歯をもつものがある。古生代の *Edestus* や、それから進化した渦巻状の歯をもつ *Helicoprion*、咬頭面が臼状に平らになった歯をもつ *Asteracanthus*、海底の貝殻をエサとするためにアカエイと似た板状の形をした歯をもつ *Ptychodus*、などがその例である。なお、この仲間の生き残りと考えられるサメに、ネコザメ・カグラザメ・ラブカという現生種があり、いずれも両接型の顎をもち、三つあるいはそれ以上の咬頭からなる多咬頭歯をもっている。

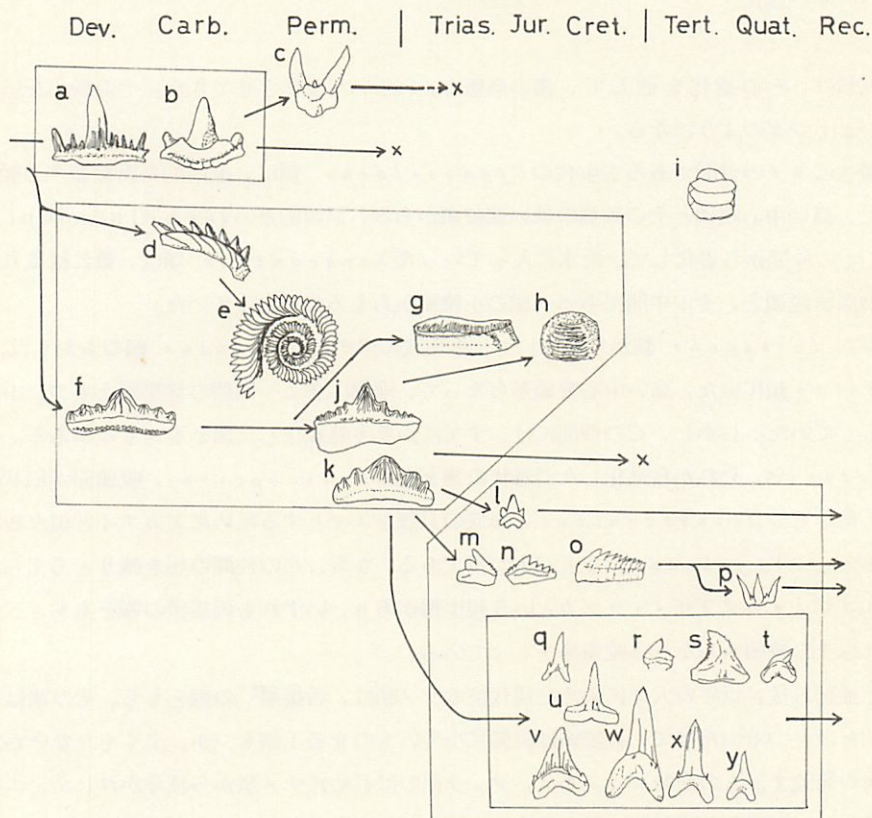
(3) 白亜紀以後、世界の大洋に栄えた現代型のサメ類は、舌接型**の顎をもち、その歯は、高い中心咬頭をひとつもつだけで、側咬頭は両側に小さいものを各1個もつが、全くもたないか、切縁に鋸歯の発達するものもおおい。また、ジュラ紀のはじめにサメ類から枝分かれした、エイ類は、底生生活をし、海底の軟体動物の殻を砕くのに適した、大きなひき臼のような形の歯をもっている。

以上を模式的に示すと第3図のようになる。

なお、最近ソ連では、軟骨魚綱を、その歯の組織に注目して、内部象牙質が真性象牙質である *Orthodonta* 下綱と、骨様象牙質である *Osteodonta* 下綱に大きく二分する新しい分類を主張している。それによると、系統発生的に、前者・後者ともに古生代にあらわれたが、中生代にはいると *osteodonts* が優勢になり、新生代にはそれにかわって *orthodonts* が優勢になり、現生では *osteodonts* は、わずかなもの (*Lamnoid shark*) だけが生きのこっている。

* サメの顎弧は、上顎を支える口蓋方軟骨と、下顎の軸となる下顎軟骨によって構成されるが原始的なサメでは、口蓋方軟骨は眼窩下部またはその後部と、舌顎軟骨を介して耳殻域との二箇所頭蓋骨と関節する、両接型の顎をもつ。

** 口蓋方軟骨も、下顎軟骨も、ともに舌顎軟骨を介してのみ頭蓋骨の耳殻と関節する方式のこと。



第3図 サメの歯の形態の進化 (ROMERなどより)

枠は、左上から *Cladoseleache* 類, *Hybodus* 類, 現生のサメ類をしめす。

a, b, "*Cladodus*"; c, *Xenacanthus*; d, *Edestus*; e, *Helicoprion*; f, *Protacrodus*; g, *Asteracanthus*; h, *Ptychodus*; i, *Myliobatis*; j, *Hybodus*; k, *Acrodus*; l, *Heterodontus*; m, n, o, *Hexanchus*; p, *Chlamydoseleache*; q, *Carcharias*; r, *Squalus*; s, *Hemipristis*; t, *Galeocerdo*; u, *Carcharhinus*; v, *Carcharodon*; w, x, y, *Isurus*.

る、という軟骨魚類の進化についての新しい考えがだされ (GLIKMAN, 1964), 注目されている。

3. 化石サメの歯の形態に関する問題

サメは、軟骨魚類であるため、全骨格の化石が発見されることは、例外的であり、化石としては歯がもっともおおく知られている。これは、1) 歯の数がいちじるしくおおく、しかもそれらが無限といっていいほど何度もはえかわり、一生のあいだに無数の歯が脱落すること、2) その歯冠の表面が、ヒトの歯のエナメル質に似た硬い外部象牙質で被われていること、* といった化石化条件がそなわっているためと考えられる。

したがって、古生物学では、軟骨魚類の研究のなかで、サメの歯の化石は、もっともよく研究されてきた。なかでも、生物層位学的研究や、分類・形態学的研究によるものがおおい。おもな研究をあげると、地域的なものでは、FOWLER (1911) による北米のニュージャージー層群の白亜紀・始新世・中新世の化石魚の研究、WHITE (1931) によるイギリスの始新世の脊椎動物群の研究、CASSER (1966) によるアンチル諸島バルバドスの漸新～中新世の魚類化石動物群の研究、などがあり、総括的なものでは、GLIKMAN (1964) の古第三紀のサメとその層位学的意義についての研究がある。また、日本では、ISHIWARA (1921) の新第三紀のサメの歯の研究、長谷川ら (1967) の富草層群のサメの歯の研究などがある。

これらの研究のなかで、おおくの化石サメの歯について、形態学的な研究がおこなわれ、分類と記載がおこなわれている。しかし、現生のサメをみても、1) 顎骨上の位置によって歯の形も大きさもかなりの差異があること、2) 近縁種、とくに同じ科や属のサメでは、歯の形が似ていてほとんど区別できないことが指摘される。したがって、単離された歯の化石を、形態的な特徴だけによって、種を同定することは、ひじょうに困難であり、現生種の比較解剖学的研究や、古生物における種の問題についての説明が必要とされる。

つぎに、その一例としてアオザメの歯で、その形態的な特徴を、現生種と化石種で比較検討してみる。

4. アオザメの歯の比較解剖学的研究

(1) 現生アオザメの歯

* 後でのべるように、歯根部は骨様構造をした基底部象牙質でつくられているために、歯冠部に比べて化石になりやすく、まわりの岩石で置換されたり、欠如することもおおい。

町のハンペン屋から手にいれた日本近海で獲れたアオザメ (*Isurus glaucus*) を、断頭して 10% 中性ホルマリンで固定したものを材料として、その歯を比較解剖学的に観察した (第 1 図版・写真 1)。

歯は、放物線に近い形をした顎骨の上に、2~3 列の歯列をなして並び、上顎では一歯列に 25 本の歯が、下顎では一歯列に 26 本の歯が萌出し、さらに表皮中には、3~9 本のさまざまな発生段階の歯胚がみられた。萌出している歯の総数は、上顎 53、下顎 64 で、合計すると 117 であった。また、上顎の右側 (第 1 図版・写真 2) をとりだして、その萌出している歯を単離してなると、第 1 図版の写真 3 のようになる。

歯冠は、ほぼ三角形をしめし、咬頭は一つで、切縁に鋸歯がなく、頬側面はほぼ平面をしめし、舌側面は凸面となって、半円形に近く隆起する。前歯部の上・下各 4 本の歯は、大型で、細長く高いが、顎の後方の歯では、低くて正三角形に近い。上・下顎の歯は、ともに不对称で遠心側 (いわゆる後方) に傾斜するが、下顎では傾きが上顎より小さく、前歯部の歯では、尖頭が頬側にまがる傾向をもつ。歯冠の色は、白色でエナメル光沢をしめす。

歯根は、前歯部では中央部が舌側に高く、下部は、左右の二部に分岐するが、それより顎の後方にある歯では弱まり、四角ばった形をする。色は、白色で光沢なく、骨に似る。

上顎の左側のもっとも頬側の列の歯の各部位 (第 4 図) を計測した結果を第 2 表にしめす。番号番号は、近心側から 1, 2, ……とした。これをみると、歯の大きさは、1 と 2 が最大でとくに大

きく、3 は急に小さくなって、4, 5, 6 としだいにわずかず大きくなり、6 からは順に 12 までしだいにわずかず小さくなっていく。歯の最大高/最大幅をみると、前歯部の 2 本は細長く、それより遠心側の歯は、その値が 1 に近いことがわかる。

(2) 化石アオザメの歯

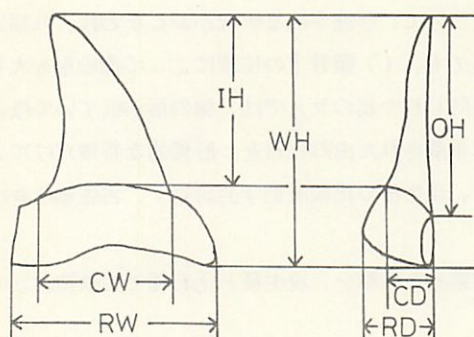
日本産および北米産の *Isurus hastalis* に同定される、化石サメの歯の形態について、そのかんたんな記載をおこなう。

① *Isurus hastalis* (第 1 図版・写真 abc)

産地：福島県東白川郡瑠町西河内、藤田貝
化石鉱山

層準：東棚倉層群久保田層の下部、中新世
中期

岩相：石英などの中礫と海緑石を含む凝灰
質の砂



第 4 図 サメの歯の測定部位 (長谷川ら、1967 を一部改正)

OH=頬側面の歯冠高、IH=舌側面の歯冠高、WH=歯牙最大高、CW=歯冠最大幅、RW=歯根最大幅、CD=歯冠最大厚、RD=歯根最大厚

第2表 アオザメの上顎左側の最外列の歯の各部位の計測値 (単位mm)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
OH	16.9	15.4	7.2	10.9	12.9	10.3	10.9	8.0	6.2	5.0	3.0	2.5
IH	15.5	14.8	6.3	9.5	10.8	11.9	9.2	6.7	5.0	3.8	2.7	1.8
WH	17.9	21.7	10.4	14.0	16.6	16.8	14.9	12.0	8.9	7.8	5.4	3.5
CW	10.3	10.9	7.5	14.6	9.2	10.4	9.4	7.5	6.9	5.4	4.1	3.3
RW	13.2	11.2	8.5	9.0	14.8	4.2	12.7	10.4	8.5	6.7	4.9	4.3
CD	5.1	3.7	2.5	3.6	3.4	3.2	3.8	3.3	2.4	2.1	1.5	1.0
RD	5.1	4.8	3.0	3.6	4.0	4.2	3.8	3.5	2.9	2.4	1.8	1.5
WH/RW	1.4	1.9	1.2	1.6	1.1	1.2	1.2	1.2	1.0	1.2	1.1	0.8

歯冠は、ほぼ三角形で、切縁に鋸歯なく、頬側面は平面だが、舌側面は凸面となる。頬側面で、わずかに左(遠心側)に傾き、尖頭は頬側にまがる。歯冠は、青黒色で、縦に小溝が発達する。歯根は、四角ばった形で、灰色を呈する。

② *Isurus* sp. (第1図版・写真5ab)

産地：三重県安芸郡安濃町南長野

層準：一志層群大井累層三ヶ野頁岩砂岩層、中新世中期

岩相：泥質砂岩

歯根は、欠如する。歯冠は、三角形であるが、頬側面で右(遠心側)に傾斜する。切縁に鋸歯なく、頬側面は平面で、舌側面は凸面となる。表面の色は青灰色で、ところどころ赤褐色のさびが付着している。

③ *Isurus hastalis* (第1図版・写真6ab, 7ab, 8ab, 9ab, 10ab)

産地：アメリカ合衆国フロリダ州*

層準：中新世～鮮新世

岩相：燐鉱石(グアノ)中に産する。

歯冠は、三角形で、細長く高い。切縁に鋸歯なく、頬側面は平面で、舌側面は凸面となる。歯冠は、まっすぐで傾斜しないが、10は頬側面でやや左に傾く。歯冠の舌側面には、中心に一本の縦溝が発達する。歯根は、比較的丸味をおび、7と9では中央部が、舌側に高まる。歯冠の色は、クリーム色、青灰色、淡青色など。歯根の色は、薄茶色をおびた灰色、青黒色、黒色である。

以上の4から10までの7個の化石の歯について、現生種と同様に第4図に示した各部位の計

* この化石サメの歯の一部は、筆者が高校一年の4月に、東海高校地学部で化石採集会において、野村松光先生の引率で、名古屋市東区中川区の日東肥料KKの、フロリダから輸入した燐鉱石中より、採集したものである(野村松光, 1962)。

第3表 化石アオザメ *Isurus hastalis* の歯の各部位の計測値 (単位mm)
歯の番号は、図版の写真番号。

	4	5	6	7	8	9	10
OH	34.0	15.5	16.7	16.9	14.0	15.5	16.4
IH	30.9		12.4	11.8	10.3	11.0	12.5
WH	45.3	—	21.5	22.0	18.2	19.8	22.1
CW	26.8	14.0	6.8	6.9	6.5	5.7	8.0
RW	29.0	—	18.7	19.3	19.8	17.0	20.2
CD	7.7	5.5	4.7	4.5	3.6	4.5	4.7
RD	8.7	—	5.6	6.1	4.7	7.4	5.7
WH/RW	1.6	—	1.1	1.2	0.9	1.2	1.1

測値を第3表にまとめる。

(3) 現生種と化石種の比較

アオザメの歯についての、以上の観察と計測の結果にもとづき、その形態的な特徴を、現生種と化石種で比較し、化石種についてその顎骨上の位置を推定すると、第4表のようになる。

このように、サメの歯についても、現生種の比較解剖学的研究をおこない、* それと化石種を比較し、化石化作用において二次的に起こった要素を化石種の形態的特徴から除けば、古生物としての化石種の復元を、マクロのレベルでおこなうことが、ある程度は可能であるといえることができる。

しかし、アオザメの例でもあきらかなように、顎骨上の位置によって、歯の大きさも形も、かなりの違いがみられ、現生種でも化石種でも、*Isurus* 属のサメのなかで歯によって種をきめることは困難であるし、さらに、近縁の *Lamna* 属や、*Odontaspis* 属のサメの歯とも、その形態がいちじるしく似ていることがある。したがって、前にものべたように、歯の外見上の特徴だけから、化石サメの歯の同定をおこなうことは、ひじょうに困難で、問題がおおいといえる。

* 現生をみないで、単離された化石の歯の形態だけをみてみると、かつて JORDAN がおこなった、*Isurus hastalis* というひとつの種のサメの歯について、歯冠が強く傾く上顎遠心側の歯、歯冠の傾きの弱い下顎遠心側の歯、細長い形の前歯部の歯をそれぞれ、*I. planus*, *I. tumulus*, *I. smithi* という三つの種に同定する (JORDAN, 1907, 1913) といったような誤りをおかすことがある。

第 4 表 現生種と化石種のアオザメの歯の形態的特徴の比較

		現生アオザメ <i>Isurus glaucus</i>	化石アオザメ <i>I. hastalis</i> , <i>I. sp.</i>
冠	歯形	三角形で、頬側面は平面だが、舌側面は凸面である。前歯部では細長く高いが、それより遠心側の歯では低くて正三角形に近い。鋸歯はない。	三角形で、頬側面は平面だが、舌側面は凸面である。鋸歯はない。6-10は、歯冠が細長い点では、前歯部に似るが、WH/RWの値は、むしろ遠心側の歯に近い。5は、遠心側の歯に似る。4は、中間的だが、WH/RWの値は、前歯部に近い。
	傾斜	上顎でも下顎でも、歯冠は遠心側に傾くが、下顎では傾きが小さい。 前歯部でも、傾きが弱い。	4と10は、頬側面でやや左に傾くため、下顎の右側の歯であると推定される。 反対に、5は、右に大きく傾くため、上顎の右側の歯であると推定される。6-9は、まっすぐで傾斜しないため、前歯部または下顎の後方の歯と似ている。
	尖頭	前歯部では、尖頭が頬側にまがる。	4などでは、尖頭がやや頬側にまがる。
	色	白色でエナメル光沢あり。	青色、青灰色、クリーム色などで、エナメル光沢あり。なお、歯冠の表面に縦溝が発達する。
根	歯形	前歯部では、中央が舌側に高く、二部に分岐するが、遠心側では、弱まり、四角ばった形をする。	4は、四角ばった形をする。 6-10では、比較的丸味をおびる。7と9は中央部が舌側に高まり、前歯部に似る。
	色	白色で光沢なく、骨に似る。	灰色で白味があったものから、青色～黒色などを呈するものあり。 なお、歯根は保存が悪く、欠如することがある。

Ⅲ. サメの歯の組織

1. 材料と方法

サメの歯の比較組織学的研究の基礎として、まず、アオザメの歯の微細構造を明らかにし、また、サメの歯の組織に関する問題点をあきらかにすることを研究の目的とする。

(1) 観察材料

アメリカ合衆国フロリダ州産の中新世～鮮新世の化石アオザメ *Isurus hastalis* に同定

されるサメの歯を材料とした。また、比較のために、現生アオザメ *I. glaucus* の歯も試料とした。現生アオザメは、比較解剖学的研究で用いたものと同じである。

(2) 観察方法

歯をリゴブラックで樹脂包埋したのち、その研磨切片を作成して、これを光学顕微鏡と偏光顕微鏡で観察した。化石種については、縦断研磨標本だけでなく、三つの横断研磨標本を作成して、上から歯冠部の横断面をみるための第一横断研磨標本、歯根部の横断面をみるための第二横断研磨標本・第三横断研磨標本とした(第5図)。

2. 観察結果

(1) 化石のサメの歯

① 縦断面(第2図版・写真1, 2, 3, 4, 5)

一見して、歯の硬組織が、三部に分かれるのが認められる。すなわち、歯冠の表面を被う写真で黒くうつっている外部象牙質、歯の中央部全体をしめ、歯の硬組織の主体となっている内部象牙質、および歯根部を包む基底部象牙質である(写真1)。

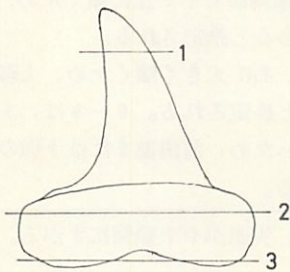
外部象牙質は、全体に不透明で青色を呈し、続成作用により物質の変質あるいは置換がおこったものと思われる。しかし、その強拡大像をみると、尖頭部近くでは、外側と内側に象牙小管とみられる線様構造物が走る層があり、その中間には不透明で構造が不明で均質にみえる部分があり、二層または三層からなっているようにみえる。象牙小管は、内部象牙質から続くもので、内層では網目状をなすが、外層では歯表に直交する方向に平行して走る。外部象牙質の幅は、尖頭部で 0.36mm である(写真2)。

内部象牙質の中心に、縦に一本の歯髄腔に相当する髄腔が発達しており、そのなかには部分的に不透明な物質を含む。内部象牙質では、象牙小管が中心の髄腔から歯表に直交する方向に規則正しく走っており、ヒトの歯の象牙質に似た組織像をしめす(写真3, 4)。

基底部象牙質は、細長い髄腔が左右に網目状にのび、骨様構造をなすが骨小体のようなものはない(写真5)。基底部象牙質の厚さは、最大 1mm 前後。

② 第一横断面(第3図版・写真1, 2, 3)

歯冠部の横断面で、髄腔・内部象牙質・外部象牙質からなっている。中心にタ円形の髄腔の横断面がみられ、それを中心として放射状に象牙小管が走るが、とくに近心・遠心の方向には、太い象牙小管が走る。象牙小管は、内部象牙質では疎であるが、外部象牙質にはいと複雑になる。外部象牙質は、象牙小管が密で束状をなす内層と、比較的疎で平行にならんで走る外層の二層に分けられ



第5図 化石サメの歯の横断研磨標本

- 1: 第一横断研磨標本,
- 2: 第二横断研磨標本,
- 3: 第三横断研磨標本

る。内部象牙質には、二次的にできたと思われる中心の髓腔に同心円状の構造がみられる。この横断面では、髓腔の長径 0.25mm 、短径 0.11mm 、内部象牙質の厚さ $0.31\sim 0.61\text{mm}$ 、外部象牙質の厚さ $0.17\sim 0.36\text{mm}$ である。

③ 第二横断面（第3図版・写真4, 5）

歯根をつくる基底部象牙質の横断面である。髓腔が、近心・遠心の方向に長い不規則な形をして発達している。ヒトの歯のセメント質や骨組織に似た組織像を示すが、セメント小体や骨小体に相当するものはみあたらない。

④ 第三横断面（第3図版・写真6, 7, 8）

第二横断面と同じ歯根をつくる基底部象牙質の横断面で、近心側と遠心側の二つの部分に分かれる。骨様構造をしめし、十字ニコル下ではさらに詳しい構造がみられる（写真7）。基底象牙質は、ヒトの歯のセメント象牙質と同じように、発生の最後の段階で生じるため、軟組織がなかにとりこまれて、黒色の髓腔の部分と、石灰化した部分とに分かれた構造をしめすものと考えられる。

(2) 現生アオザメの歯

縦断研磨標本を作成して、光学顕微鏡で観察した結果、つぎのような組織像がみられた。

（第4図版・写真1, 2, 3, 4, 5, 6）

歯の硬組織は、一見して、外部象牙質・内部象牙質・基底部象牙質の三つの部分に分けられる（写真1）。

外部象牙質は、歯冠の表面を被う部分で、内・外二層に分けることができ、外層では歯表に平行して成長線の方に走る基質線維と、歯表に直行して走る基質線維（象牙小管？）が比較的整然と交錯しているが、内層では歯表に直交する方向に走る象牙小管（基質線維？）がはっきり観察され、それと直交して走る基質線維がみられる。しかし、外層のように整然と交錯していない（写真3）。また、尖頭部では、これらとは別の第三の線様構造物が、分岐しつつ歯冠の上方に走るのがみられる（写真2）。

内部象牙質は、中心の髓腔が細い樹枝状の分岐をもった状態で存在しており、象牙小管の発達が悪く、走る方向も不規則で、ヒトの歯の象牙質よりも骨組織に近い組織像をしめす（写真4）。また、基底部象牙質との境に近い部分では、比較的象牙小管がよく発達しており、骨小体やセメント小体に似た多数の突起を出す細胞様のものが多数みられた*（写真5）。

基底部象牙質との境界は不明瞭で、樹枝状の髓腔が増え、髓腔のおおむね骨様構造（写真6）に移行してゆく。

(3) 現生種と化石種の比較

以上の観察結果にもとづき、アオザメの歯の組織について、現生種と化石種を比較すると第5表

* 現生サメの歯の組織学的研究には、伊法（1960）、北村（1960）、沢田（1960）、桐野（1969）があるが、このような細胞様のものの報告はなく、外部象牙質の問題とともに、今後の大きな問題となると考えられる。

第 5 表 現生種と化石種のアオサメの歯の組織の比較

	現 生 ア オ サ メ <i>Isurus glaucus</i>	化 石 ア オ サ メ <i>I. hastalis</i>
外 部 象 牙 質	内・外二層にわかれる。 外層：横走する基質線維と縦走する象牙小管?が、整然と交錯する。 内層：象牙小管がはっきり見え、基質線維とは不規則に交わる。 尖頭部：第三の線様構造物が、分岐しつつ縦走する。	青色不透明で、内・外二層にわかれる。 外層：歯表に直交する方向に象牙小管が、規則正しく走る。 内層：象牙小管が、網目状または束状に走る。
内 部 象 牙 質	髓腔が樹枝状に分岐する。 象牙小管の発達悪い。 下部に、骨小体に似た細胞様のものあり。 象牙質よりも骨組織に似る。	中心の髓腔から、象牙小管が放射状に規則正しく走る。 二次的にできたと思われる構造あり。 ヒトの歯の象牙質に似る。
基底部象牙質	内部象牙質との境界は不明瞭。 髓腔のおおい骨様構造をしめす。	髓腔のおおい骨様構造をしめす。 骨小体のようなものなし。

のようにまとめられる。

このことから、つぎのことが指摘される。

① 内部象牙質の構造が全くちがうことから、ここで化石アオサメ *Isurus hastalis* に同定したものは、アオサメ属のものでない別属のサメの歯である。

② まえにのべた GLICKMAN (1964) の軟骨魚類を *Orthodonta* 下綱と *Osteodonta* 下綱に二分する分類にしがえば、この化石サメの歯は、*Isurus* 属や、それと歯の形態が似る *Odontaspis* 属 (APPLEGATE, 1967) や *Lamna* 属などの *Osteodonta* 下綱でなく、*Orthodonta* 下綱に属するものであり、* 現生アオサメとは、系統的にまったく別のものであるといえる。

③ したがって、化石サメの歯の分類上の位置を決定するときには、その形態的な特徴だけでなく、歯の組織をみることが、必要であり、また有効であるといえる。

* TOMBS は、*Carcharias* が fine-tubed dentine をもつと述べていることから、材料にした化石サメの歯は *Carcharias* 属のものとも考えられるが、GLICKMAN は、*Carcharias* 属を *Osteodonta* 下綱に分類していて、矛盾しておりよくわからない。

4. サメの歯の組織に関する問題

サメの歯の組織についての研究は、ひじょうにおおい。しかも、研究者によってかなりちがった見解がとられていて、未解決の問題がおおい。そのなかで、もっとも大きな問題は、その外層（外部象牙質）がエナメル質か、象牙質か、という問題で、OWEN（1845）以来おおくの研究者により問題とされてきた。

そのなかで、サメの歯の外層（外部象牙質）は、1）変形した象牙質の一種 *Vitrodentine* である。2）象牙質と同じ性質をもつもので中胚葉起源である。3）エナメル質である。4）もっとも原始的なエナメル質 *PlacoinSchmelz* である。5）外表には、エナメル表皮があるだけでエナメル質はない。6）エナメル質であるが中胚葉性産物で真性エナメル質ではない。^{*} 7）エナメル小柱らしいものが見える。8）歯の先端にエナメル質があり、小管の間にエナメル小柱がある。真性エナメル質である、とするが、象牙小管の突起と歯の表面からはいつている二系統の細管が貫いている。10）中胚葉性エナメル質 *enameloid* である、などさまざまな見解がある。

要するに、外部象牙質がエナメル質か、象牙質かの問題は、その微細構造がエナメル質に似るか、すなわち1）光顕的には象牙小管や基質線維はどのような特徴をもつか、また、2）電顕的には基質線維はどのような構造をしたものか、エナメル小柱があるか。3）その基質線維はどのような有機物であるか、コラーゲンかケラチンか。4）発生的にはエナメル芽細胞によってつくられたものか、また逆に、エナメル芽細胞は硬組織をつくるか、の四点にまとめられる。

これらの点に関して、北村（1960）はアオザメの歯について、沢田（1960）はテンジクザメの歯について、興味ある結果をえている。すなわち、アオザメでもテンジクザメでも、外部象牙質は、光顕的に内外二層に分けられ、電顕的に内層にはコラーゲン様の基質線維がみられるのにたいし、外層にはケラチン様の膜に包まれた柱状物（その柱状物の内容は細長い結晶のような柱状物の充填）が歯表に平行する方向に束状をなして横走している、とのべている。また、沢田はテンジクザメの歯の発生を観察して、その硬組織はすべて中胚葉性のものである、と結論している。

また、桐野（1966）は、脊椎動物の歯の比較発生についての研究のなかで、サメの上皮性歯胚は、エナメル質の形成にあたり、エナメル芽細胞が内エナメル上皮から分化して背丈を伸長する、とし、おおくの組織化学的所見からエナメル芽細胞の機能が旺盛になることを観察し、また象牙質

* TOMES（1898）は、真性エナメル質と異なる点として、①エナメル質のなかに象牙質質がいつている。②带状構造がエナメル質の表面にむかって走っている。③小空隙がある、の三点をあげ、真性象牙質に似る点として、①硬さと光沢、②光の屈折性と偏光性、③脱灰後に残る有機質が少い、④化石では象牙質の部分が褐色をしているが、この部分は色がいつてない、⑤磷酸塩が多く含まれている、の五点をあげている。

すなわち、物理化学的にはエナメル質に似ているが、組織学的にはむしろエナメル質に似ていない、としている。

との構造および石灰含有度のちがいから、フグ・タイの歯とともに、サメの歯の外層をエナメル質としている。しかし、後には、Poole (1967) の提唱にしたがって、魚類一般にみられるような中胚葉性要素が大きく関与してつくりあげられるエナメル質をエナメロイドとし、サメのエナメル質もタイ・フグとともにエナメロイドとしている (桐野, 1969)。

また、Moss ら (1964) は、サメの歯のエナメル質と硬骨魚のウロコの *ichthylepedin* (魚鱗中の硬タンパク質) のアミノ酸分析をおこない、そのアミノ酸組成を脊椎動物一般のコラーゲンと比較して、それが外胚葉性の無脊椎動物のコラーゲンのアミノ酸組成に似ており、この二つのコラーゲンが外胚葉性であると結論している。

このように、サメの歯の外部象牙質をめぐる問題はいまなお未解決であり、内部象牙質の二つのタイプ、すなわち、骨様象牙質と真性象牙質の問題、あるいはそのなかに骨小体やセメント小体のようなものがあるかないか、という問題とともに、今後の研究によるところが大きい。

IV. サメの歯の有機物

1. 分析材料

ヒトの歯の象牙質は、約 20% の有機物を含み、18% のコラーゲンとよばれる線維性の硬タンパク質がその主体である。セメント質も、約 23% の有機物を含み、その大部分がコラーゲンである。エナメル質は、約 1% の有機物を含み、0.15% のケラチン、0.09% のコラーゲンを含んでおり、その主体は *eukeratin* であるといわれる。このほか、歯の硬組織中に含まれる有機質には、クエン酸・脂質・ムコ多糖類などがある。

コラーゲンは、脊椎動物の結合組織などのなかにひろく分布し、アミノ酸組成からみて、グリシンがもっともおおく、プロリン・ヒドロキシプロリンがおおい特徴をしめし、とくにヒドロキシプロリンは、ヒドロキシリジンとともに、コラーゲン特有のアミノ酸であるといわれる。また、電顕的には 640 Å の周期構造を示すというのが定説である。

エナメルタンパクは、アミノ酸組成からみて、ケラチンといわれるが、かなり特異的なタンパク質である。すなわち、一般のケラチンと同様に特有のヒスチジン：リジン：アルギニンの含有比 (1:4:12) を示すのに、システインの含有量がひじょうにすくなく、ほとんど検出されない。また、コラーゲンに特有なヒドロキシプロリンや、アラニンおよびグリシンを多量に含むことから、コラーゲンの存在も示唆される。

このほか、歯の発生にもなって、アミノ酸総量が、15.9% から 0.63% に急激に減少し、アミノ酸組成もプロリンとヒスチジンが減少してグリシンが増大し、ヒドロキシプロリンもかなり含まれるようになる、という大きな変化をおこすことが知られている (BURGESS, 1965)。エナメルタンパクは、まだどのようなタンパク質であるかその実体があきらかにされておらず、ケラチンについてさえ二種類以上のタンパク質の複合体であると考えられている。

サメの歯の有機物については、前にのべたように、電顕的にアオザメとテンジクザメの外部象牙質の内層から約 $600 \sim 700 \text{ \AA}$ の周期構造をもつコラーゲン様タンパク質の基質線維が、外層から約 $130 \sim 180 \sim 220 \text{ \AA}$ の周期をもつケラチン様タンパク質の存在がはっきりとされている(北村, 1960; 沢田, 1960)。また、内部象牙質と外部象牙質のアミノ酸組成もはっきりとされ、内部象牙質については中胚葉性のコラーゲンであり、外部象牙質については外胚葉性のコラーゲンで無脊椎動物のコラーゲンに似ることが指摘されている(Mossら, 1964)。このほか、化石のサメの歯から少量のクエン酸が検出されている(Zipkinら, 1963)が、現生種については分析値がない。

ここでは、サメの歯のなかの有機物に注目して、その含有量を明らかにし、とくにその有機基質であるコラーゲンなどのタンパク質のアミノ酸組成を明らかにし、各硬組織の比較、現生種と化石種の比較をおこない、サメの歯の比較生化学的・古生化学的研究の基礎とすることを、研究の目的とした。

材料としては、現生種としてアオザメ *Isurus glaucus* の歯を、化石種として北米フロリダ産中新世～鮮新世の *Isurus* sp. に同定したサメの歯を用いた。なお、現生アオザメの歯は、町のはんぺん屋から手にいれたものを、10%中性ホルマリンで固定して保存したものである。

2. 分析方法

(1) 分離

サメの歯の三つの硬組織を分離するために、つぎのような方法を用いた。

現生種については、基底部象牙質は肉眼で区別がつくので、解剖学的方法により、他の部分と切断した。つぎに、外部象牙質と内部象牙質を分離するために、その比重の差を利用して、両者をもとにステンレス乳鉢で粉砕してえた粉末を、純粋のプロモホルム中で、特殊な内管をもつ遠心管を用いて、 2000 rpm で10分間、遠心分離をおこなって分離する方法(浮遊法という)を用いた*(Bekhoussら, 1935; 佐々木, 1967)。

化石種については、外部象牙質が青色またはオレンジ色を呈し、白色がかった内部象牙質と肉眼で容易に区別がつくので、すべて解剖学的方法で分離した。

(2) タンパク質の分画法

内部象牙質と基底部象牙質については、その有機基質がコラーゲンであると考えられるので、脱灰ののち、Fitchら(1955)の方法によって、0.3 M熱TCA水溶液をつかって、コラーゲンの抽出をおこなった。この方法でえられた四つの分画のうち、コラーゲン分画をアミノ酸分析の材料とした。

* 分離した試料の純度を検査するために、屈折率のちがいを顕微鏡でみる方法がとられる。

外部象牙質については、コラーゲンだけでなく、ケラチンなどの存在も予想されるため、4℃の1N塩酸中で、2日間脱灰をおこなったのち、セルロース・チューブ（孔径24Å）のなかにいれ、水に透析をおこない、ペプチド・遊離アミノ酸の分画と、タンパク質の分画にわけた。タンパク質分画は、つぎのアミノ酸分析の材料とした。

(3) 有機物の定量法

タンパク質の含有量を知るために、ケルダールの窒素定量法（KJELDAL, 1883；田崎, 1967）を用いた。

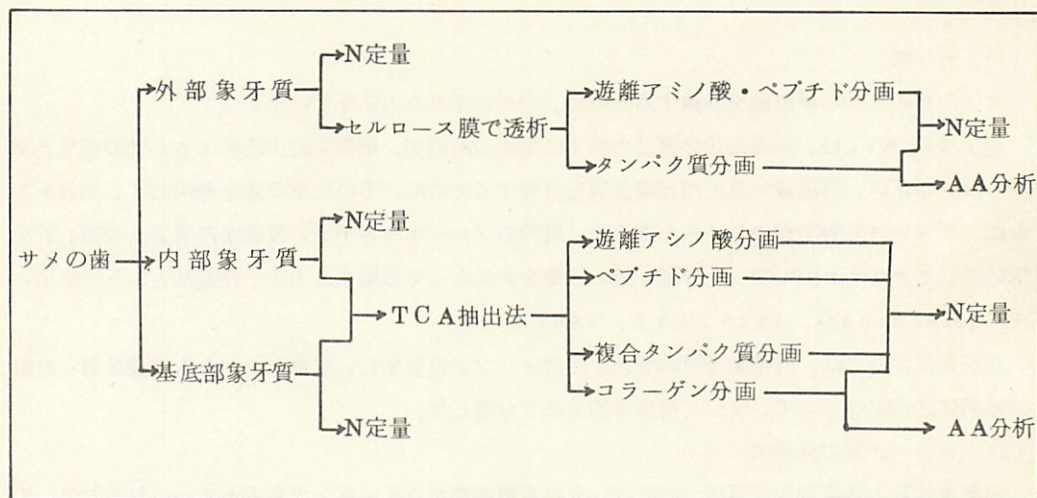
(4) タンパク質のアミノ酸分析

アミノ酸分析の前処理として、減圧、ドライアイス・アルコールで凍結しながら、ガラス管中に封管し、蒸留水の0.57N塩酸で110℃、20時間加水分解をおこなった。

アミノ酸分析は、現生種については、GERHKE, (1966)の方法にしたがって、ガスクロマトグラフィーを用いた。^{*} 機種は、東京医科歯科大学歯学部生化学教室の島津GC-1Cを用いた。化石種については、予備実験として、ペーパークロマトグラフィー（藤原・井尻, 1959；秋山, 1964）をおこない、本実験では、日本電子KKのJLC-3BC型アミノ酸自動分析機を用いた。

以上のサメの歯の生化学的研究を要約すると、第6表のようになる。

第6表 サメの歯の生化学的研究



* ガスクロマトグラフィーによるアミノ酸分析法については、筆者の「化石の研究法」（共立出版、近刊）のガスクロマトグラフィーの項を参照されたい。

3. 結果と考察

(1) タンパク質含有量

現生アオザメと化石のサメの歯の三つの硬組織について、その粉末を脱灰して、マイクロ・ケルダール法で分析し、つぎに現生種について、内部象牙質と基底部象牙質のTCA抽出法による四つの分画を同様に分析し、コラーゲンの窒素量を18.4%として、タンパク質量を算出した結果を第7表にしめす。

第7表 マイクロ・ケルダール法による現生および化石サメの歯の三つの硬組織中のタンパク質含有量(%) (計算値)

A. 全量分析

Species	Part	Organic nitrogen	Calculated protein content*
<i>Isurus</i>	outer-dentine	0.084	0.46
<i>glaucus</i>	inner-dentine	5.25	28.5
(Recent)	basal-dentine	4.69	25.5
<i>Isurus</i>	outer-dentine	0.064	0.35
<i>SR</i>	inner-dentine	0.056	0.30
(Miocene)	basal-dentine	0.056	0.30

B 各分画についての分析

Species: *Isurus glaucus* (Recent)

Part	Frac. 1	Frac. 2	Frac. 3	Frac. 4**
inner-dentine	0.27	0.11	3.8	0.17
basal-dentine	0.17	0.12	10.1	1.52

*無機およびタンパク質以外の有機物に含まれる窒素は、存在しないものと仮定して計算した。

**分画1は遊離アミノ酸、分画2はペプチド、分画3はコラーゲン、分画4は複合タンパク質(秋山, 1968)。

この結果から、つぎの四点が指摘される。

- ① 現生アオザメの歯におけるタンパク質含有量は、外部象牙質で0.46%であり、内部象牙質の28.5%、基底部象牙質の25.5%と比べて、いちじるしくすくない。これは、ヒトの歯のエナメル質の0.24%(コラーゲン+ケラチン)と、象牙質の18%の比率に似る。
- ② 化石のサメの歯では、外部象牙質・内部象牙質・基底部象牙質とも、ほぼ同じような含有量

0.30～0.35%をしめす。

③ 内部と基底部象牙質については、化石のサメの歯は、現生のおよそ1.1%に減少しているが、外部象牙質ではほとんど減っていない。これは、続成作用の過程での有機物の消失が、外部象牙質では、内部と基底部象牙質よりも、はるかにすくなく、保存がいちじるしくよいことをしめしている。

④ 現生アオザメの内部と基底部象牙質のTCA抽出法による四つの分画それぞれについての有機物量は、ともにコラーゲンとされる分画3が他の分画のおよそ10～100倍となっており、内部と基底部象牙質の基質線維が、コラーゲンであることを裏づけている。

(2) タンパク質のアミノ酸組成

① 現生アオザメの歯の中のタンパク質

現生アオザメの歯について、内部と基底部象牙質のTCA抽出法によるコラーゲン分画と、外部象牙質のセルロース・チューブで透析して得られたタンパク質分画を、ガスクロマトグラフィーで、アミノ酸分析をおこなった結果を第8表と第9表にしめす。

第8表 現生アオザメの歯の各硬組織中に含まれるタンパク質
のアミノ酸組成・I (EGAカラムによる)

Amino acid	inner-dentine		basal-dentine		outer-dentine	
	$\mu\text{M/g}$	AA/1000	$\mu\text{M/g}$	AA/1000	$\mu\text{M/g}$	AA/1000
Hyp	3.2	92	2.8	88	0.45	126
Asp	5.6	160	2.8	88	0.74	208
Thr	1.1	32	1.2	37	0.07	18
Pro+Ser	5.1	148	6.1	191	0.27	78
Glu	3.9	113	3.4	108	0.47	131
Gly+Leu	5.9	168	6.0	189	0.37	150
Ala	5.2	148	5.3	108	0.36	101
Val	1.2	35	1.4	44	0.19	53
Met	0.0	0	0.0	0	0.01	21
Ileu	1.0	27	0.9	28	0.15	41
Phe	2.0	57	1.7	54	0.45	127
His	0.7	20	0.4	11	0.04	12
Total ($\mu\text{M/g}$)	34.9		31.8		3.57	

また、ガスクロマトグラフの例として、比較に用いたアミノ酸標準試料の分析例と分析条件を、第6図と第7図にしめしておく。

なお、分析法として、おもに中・酸性のアミノ酸の分析のためにポリエステル系のEGAを、アルギニン・ヒスチジン・リジン・システインなどを分析するためにDC550を液相として用いる、

第9表 現生アオサメの歯の各硬組織中に含まれるタンパク質
のアミノ酸組成・Ⅱ (DC550カラムによる)

Amino acid	inner-dentine		basal-dentine		outer-dentine	
	$\mu\text{M/g}$	AA/1000	$\mu\text{M/g}$	AA/1000	$\mu\text{M/g}$	AA/1000
Hypro	4.2	50	1.13	26	0.05	9*
Asp	11.2	134	4.41	100	1.79	320
Gly+Val+Thr	18.1	217	10.44	238	0.54	91
Ser	4.2	50	0.97	22	0.19	34
Glu	8.0	96	4.57	104	0.53	94
Pro	11.2	134	5.97	135	0.33	59
Ala	12.8	153	7.91	179	0.31	55
Met	0.0	0	0.0	0	0.01	1.7
Ileu	2.5	29	1.34	31	0.13	23
Leu	1.9	23	1.18	27	0.15	27
Tyr	1.1	13	1.34	30	0.19	34
Phe	2.0	24	1.24	28	0.20	36
Lys+Arg	2.3	28	1.34	30	0.01	2.6
Try+Cys	4.3	51	2.26	51	1.19	212
Total ($\mu\text{M/g}$)	83.8		44.10		5.62	

*外対象牙質のハイドロキシプロリンが、EGAカラムによるばあいと比べて、めだって減少しているのは、実験上のミスで誘導体の分解がおこったことによる。

二カラム方式を用いた。また、定量分析のため、内部標準試料として、ステアリン酸のn-Butylエステルを用いた。

第10表 化石サメの歯からペーパークロマトグラフィーにより検出されたアミノ酸 ($\mu\text{g}/100\text{mg}$)

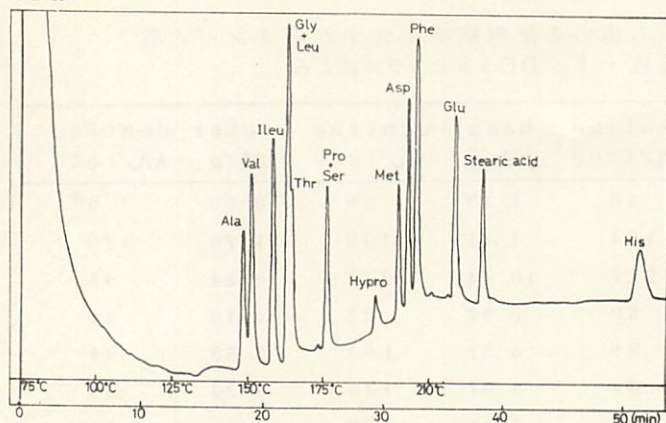
Asp	+
Thr	+
Ser	1.5
Glu	+
Gly	2.9
Ala	0.5
Val	+
Leu	1.6
Tyr	+
Lys	+
Cys	+

② 化石のサメの歯の中のタンパク質

化石のサメの歯については、最初に予備実験として、そのなかにアミノ酸やタンパク質が残存していることを確認するために、その全体を粉末化し、脱灰、加水分解およびイオン交換樹脂による脱塩とアミノ酸の抽出 (藤原・井尻, 1959) をおこなったのち、ペーパークロマトグラフィーによりアミノ酸分析をおこなった。その結果えられたクロマトグラムを第8図に、検出されたアミノ酸を第10表に示す。

さらに、その有機基質であるコラーゲンなどのタンパク質について、詳しいアミノ酸組成を知るために、現生種と同様に、内部と基底象牙質につ

STD EGA



第6図 アミノ酸標準試料のn-Butyl-N-TFA エステルのガスクロマトグラム・I

分析条件

カラム: Ethylenglycol adipate 0.325% on 60~80 mesh Chromosorb G (1.875m×4mm)

温度: 75°C→210°C (4°C/min)

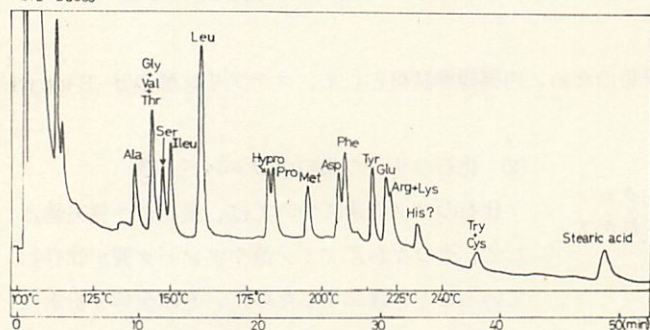
キャリアガス: N₂ (70ml/min)

検出器: FID

試料の量: 7μl (試料: ステアリン酸=5:2)

装置: 島津 GC-1C

STD DC550



第7図 アミノ酸標準試料のn-Butyl-N-TFAエステルのガスクロマトグラム・II

分析条件

カラム: Silicone DC 550 5% on 60~80 mesh Chromosorb W (1.875m×4mm)

温度: 100°C→240°C (4°C/min)

キャリアガス: N₂ (70ml/min)

検出器: FID

試料の量: 7μl (試料: ステアリン酸=5:2)

装置: 島津 GC-1C

いてはそのコラーゲン分画を、外部象牙質についてはタンパク質分画を、アミノ酸自動分析機を用いて分析した。その結果を第11表に示す。

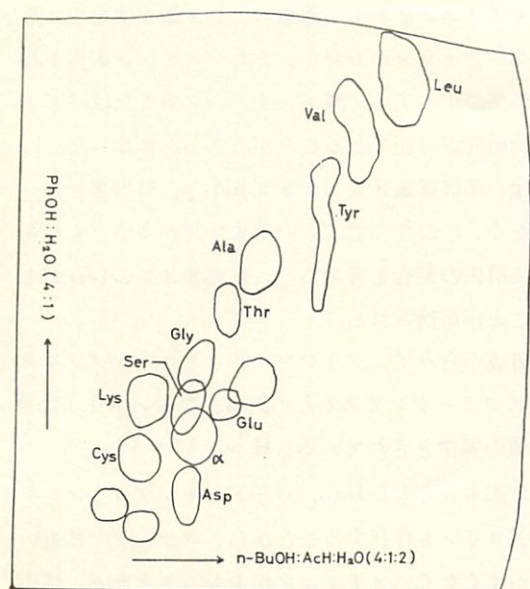
③ 考察

A. 現生アオザメの歯

1) 現生アオザメの歯に含まれるタンパク質のアミノ酸総量は、内部象牙質で34.9 μM/gと83.8 μM/g、基底象牙質ではそれよりわずかにすくない31.8 μM/gと44.1 μM/g、外部象牙質ではその約¹/₁₀の3.57 μM/gと5.62 μM/gであった。

2) 内部象牙質と基底象牙質のアミノ酸組成は、よく類似しており、ともにグリシン・プロリン・ハイドロキシプロリン・アラニンが多く、システインがないことから、その分画3は、コラーゲンであると結論できる。また、アスパラギン酸とグルタミン酸のおおいことが特徴である。

3) 外部象牙質では、内部および基底象牙質といちじるしくちがったアミノ酸組成をしており、アスパラギン酸・グリシン・システイン・グルタミン酸などのおおいことが特徴的である。これは、セルロース膜による不透析分画を分析



第 8 図 化石サメの歯から抽出されたアミノ酸の二次元ペーパークロマトグラム

したものであるから、コラーゲン以外のタンパク質も含まれていると考えられる。このようにみると、ハイドロキシプロリン・プロリン・グリシンのおおいことから、コラーゲンが存在していることがいえるとともに、システイン・グルタミン酸・アスパラギン酸がおおいことから、硬ケラチンの存在の可能性が考えられる。

4) 筆者の分析値は、Moss ら (1964) の結果と、とくに外部象牙質において、かなりちがっている。その原因として、Moss らが試料を脱灰後、タンパク質の抽出をおこなわないで、そのままその全体をアミノ酸分析しているのに対し、筆者はコラーゲンおよび外部象牙質のタンパク質の抽出をおこなって、それを試料としてアミノ酸分析をおこなった、という実験上の問題が考えられる。

B. 化石のサメの歯

1) 化石のサメの歯の脱灰物から、ペーパー

第 11 表 化石サメの歯の各硬織中に含まれるタンパク質のアミノ酸組成

Amino acid	inner-dentine		basal-dentine		outer-dentine	
	$\mu\text{M/g}$	AA/1000	$\mu\text{M/g}$	AA/1000	$\mu\text{M/g}$	AA/1000
Hyp	1.039	250	0.093	81	0.0	0.0
Asp	0.150	36	0.083	72	0.102	91
Thr	0.091	22	0.027	23	0.055	49
Ser	0.149	36	0.103	90	0.132	118
Glu	0.229	55	0.086	75	0.145	130
Pro	0.475	114	0.052	45	0.045	40
Gly	1.125	270	0.252	219	0.196	175
Ala	0.362	80	0.093	81	0.072	64
Val	0.126	30	0.082	71	0.081	72
Met	0.020	4.8	0.055	48	0.024	21
Ileu	0.059	14	0.039	34	0.042	38
Leu	0.078	19	0.045	39	0.075	67
Tyr	0.0	0.0	0.015	13	0.0	0.0
Phe	0.049	12	0.033	29	0.039	35
Hyls	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Lys	0.048	12	0.041	36	0.057	51
His	0.012	2.9	0.016	14	0.029	26
Arg	0.100	24	0.025	22	0.026	23
Cys(half)	0.055	13	0.012	10	0.0	0.0
Total ($\mu\text{M/g}$)	4.167		1.152		1.120	

クロマトグラフィーにより、グリシン・ロイシン・アラニンなど12種類のアミノ酸が検出された。これは、グリシンがもっともおおく、ついでロイシンとセリンがおおく、またシステインが含まれるのが特徴的である。このことから、化石のサメの歯の中にアミノ酸が、タンパク質またはペプチドとして存在することが確認され、その古生化学的研究が可能であることがあきらかになった。

2) アミノ酸総量は、内部象牙質 $4.167 \mu\text{M/g}$ 、基底部象牙質 $1.152 \mu\text{M/g}$ 、外部象牙質 $1.120 \mu\text{M/g}$ で、現生にくらべてかなりすくなく、このうちでは、内部象牙質がもっともおおく、他の3倍近くの総量をもつが、現生と比較して消失の割合を考えると、外部象牙質の保存がもっともよく、基底部象牙質の保存がもっとも悪いことが指摘される。

3) 内部象牙質のコラーゲン分画は、アミノ酸組成からみて、グリシン・ハイドロキシプロリン・プロリンの含有量がおおいことから、あきらかにコラーゲンであるといえる。なお、現生と比較してとくにグリシンがおおいは、化石タンパク質の特徴とされている(Ho, 1965)。

4) 基底部象牙質のコラーゲン分画は、グリシンがもっともおおく、ハイドロキシプロリンもセリン・アラニン・グルタミン酸とともにおおく、プロリンも存在することから、コラーゲンに近いアミノ酸組成をもつといえる。しかし、プロリンがすくなく、メチオニンがおおいことなど、現生および内部象牙質とは、かなりのちがひがあり、種および部位のちがいとともに、保存条件が大きな原因と考えられる。また、これは、内部象牙質とつぎにのべる外部象牙質の中間的なアミノ酸組成をもつともいえる。

5) 外部象牙質のタンパク質分画は、グリシンがもっともおおく、ついでグルタミン酸・セリンなどがおおく、基底部象牙質と似たアミノ酸組成をしめす。アスパラギン酸・グリシン・グルタミン酸がおおいは、現生と一致しているが、ハイドロキシプロリンが含まれていないなど、かなりのちがひがあるのは、続成作用が大きな原因と考えられる。

6) アミノ酸組成からみると、基底部と外部象牙質は、絶対量が少ないので、各アミノ酸含有量が平均化していることがわかる。そのため、分析値には相当な誤差があると考えられ、化石のサメの歯のタンパク質の詳しいアミノ酸組成については、再検討が必要で現生との比較もその上でおこなわなければならない。

V. 結論と今後の課題

1. 結 論

現生および化石サメの歯について、その比較解剖学的、比較組織学的および比較生化学的研究をおこなった。材料としては、おもに現生のアオザメの歯と、化石のサメの歯をあつかった。

(1) 比較解剖学的研究としては、現生種 (*Isurus glaucus*) と化石種 (中新世の *I. hastalis*) のアオザメの歯の形態的特徴の比較をおこなった。

① 現生アオザメの歯は、放物線に近い形の顎骨上に、2～3列の歯列となっており、上顎では一歯列25本、計53本、下顎では一歯列26本、計64本、合計117の歯が崩出しているのがみられた。

② 歯冠の形は、三角形で、頬側面は平面だが、舌側面は凸面となり、前歯部の上下各4本の歯は大型で細長く、高い歯冠をもつが、3番の歯は急に小さく、遠心側の歯では高さが低くてその形は正三角形に近い。切縁に鋸歯はなく、歯冠は遠心方向に傾斜し、上顎では傾斜が強いが下顎では弱い。また、前歯部でも弱い。歯根の形は、前歯部では中央が舌側に高く、二部に分岐するが、それより顎の後方の歯では弱まり四角ばった形をする。歯冠の色は白でエナメル光沢があるが、歯根の色は白だが光沢がない。

③ 化石アオザメの歯では、歯冠は三角形で、頬側面は平面だが、舌側面は凸面をなし、切縁に鋸歯がないのだが、現生種と共通する特徴である。歯冠の色が、青色やクリーム色を呈し、表面に縦溝が発達することや、歯根の色が灰色や青～黒色を呈し、欠如することがあることが、現生と異なる点で、続成作用によるものと考えられる。

④ 単離された化石サメの歯を、現生と比較することによって、その顎骨上の位置の推定がある程度まで可能である。すなわち、歯冠が細長く高く、その傾きが弱くてまっすぐで、歯根が中央が舌側に高い特徴をしめす歯は、前歯部の歯と推定される。また、歯冠が正三角形に近く、歯根が四角ばった形をする歯は、遠心側の歯で、頬側面で左に強く傾けば下顎の右側の歯、右に強く傾けば下顎の左側の歯、左に強く傾けば上顎左側の歯、右に強く傾けば上顎右側の歯と推定される。

⑤ しかし、サメの歯は、顎骨上の位置でその形も大きさもかなりちがひ、近縁種ではその形態がひじょうに似ていて区別をすることがほとんどできないことから、歯の外見上の特徴だけから、単離された化石のサメの歯の同定をおこなうことは、ひじょうに困難で、問題がおおい。

(2) 比較組織学的研究としては、同じ現生と化石のアオザメの歯を材料として、研磨切片を作成して、光学顕微鏡と偏光顕微鏡で観察し、各硬組織の特徴を現生と化石で比較した。

① 現生アオザメの歯の組織：一見して、外部象牙質・内部象牙質・基底部象牙質の三つの硬組織からなることがわかる。

外部象牙質は、内外二層に区別でき、外層では、横走する基質線維と象牙小管？が整然と交錯するが、内層では、象牙小管がはっきり見え、基質線維とは不規則に交わる。また、尖頭部には、分岐して縦走する第三の線様構造物がみられた。

内部象牙質は、髓腔が樹枝状に分岐し、象牙小管の発達が悪く、象牙質よりも骨組織に似た組織像をしめす。また、下部に骨小体に似た細胞様のものが多数みられた。

基底部象牙質は、内部象牙質との境が不明瞭で、髓腔がおおくなって、骨様構造をしめす。

② 化石アオザメの歯の組織：現生と同じく、外部象牙質・内部象牙質・基底部象牙質の三硬組織からなる。

外部象牙質は、青色不透明で、内外二層に区別される。外層では、歯表に直交して象牙小管が規則正しく走るが、内層では、象牙小管が網目状または束状をなして走る。

内部象牙質は、中心の髄腔から象牙小管が放射状に規則正しく走り、ヒトの歯の象牙質に似た組織像をしめす。また、続成作用で二次的にできたとされる構造もみられた。

基底部象牙質は、髄腔の多い骨様構造をなすが、骨小体のようなものはみられなかった。

③ 歯の組織を比較すると、とくに内部象牙質が、現生では骨様象牙質であるのにたいし、化石では真性象牙質に似ており、まったくちがっている。このことから、ここで *Isurus hastalis* に同定した化石サメの歯は、*Osteodonta* に属するアオザメ属でも、歯の形態の似た *Odontaspis* 属や *Lamna* 属でもない、*Orthodonta* に属する、系統的にまったく別のものであるといえる。

(3) 比較生化学的研究としては、同じく現生と化石のアオザメの歯を材料として、マイクロ・ケルダール法による窒素定量、ペーパークロマトグラフィー・ガスクロマトグラフィー・アミノ酸自動分析機によるアミノ酸分析をおこない、アオザメの歯のタンパク質含有量、タンパク質のアミノ酸組成と総量をあきらかにし、各硬組織によるちがいと、現生と化石でのちがいを検討した。

① 現生アオザメの歯のタンパク質含有量は、外部象牙質では内部と基底部象牙質にくらべていちじるしく少なく、その比率はヒトの歯のエナメル質と、象牙質・セメント質の比率と似ている。化石のサメの歯では、三硬組織ともほぼ同じタンパク質含有量をしめす。

② 現生種の内部象牙質と基底部象牙質の TCA 抽出法によるコラーゲン分画は、他の分画の約 10 ～ 100 倍の有機物含有量をしめし、その有機基質がコラーゲンであることを裏づけている。

③ 現生種の内部象牙質と基底部象牙質中に含まれるタンパク質は、そのアミノ酸組成から、コラーゲン様タンパク質であるといえる。外部象牙質には、コラーゲン様タンパク質と、硬ケラチン様タンパク質の存在が推定される。

④ 化石のサメの歯の内部象牙質と基底部象牙質中に含まれるタンパク質は、そのアミノ酸組成から、コラーゲン様タンパク質であるといえる。外部象牙質のなかに含まれるタンパク質については、基底部象牙質に似たアミノ酸組成を示すが、その絶対量がすくないので、詳しいことは論じられない。

⑤ タンパク質含有量とアミノ酸総量を比較すると、続成作用での有機物の消失の割合は、外部象牙質においてもっともすくなく、内部象牙質がこれにつぎ、基底部象牙質において最大である。したがって、化石の保存は、外部象牙質・内部象牙質・基底部象牙質の順に悪くなっていることが指摘できる。

2. 今後の課題

最初にのべたように、本論文での課題は、サメの歯の古生物学的研究をはじめるにあたっての問題提起をおこない、それにもとづいて、サメの歯の形態・組織・有機物についての基礎的な研究をおこなうことであった。

そして、その結果は、ここにみるように、先学の研究を断片的に追ったにすぎないものとなった。すなわち、問題提起については、井尻の1936年以来的研究に負うところが大きく、基礎的研究についても、AGASSIZ (1833-45) 以来のおおくの研究を自分なりに反復したにすぎないものであった。

しかし、そのなかでいくつか、今後のサメの歯の古生物学的研究についてあたらしい研究課題と研究方法があきらかにされた。

その第一は、分類・形態学的な課題として、単離された化石のサメの歯を、現生のものと比較することによって、その顎骨上の位置を推定し、ひいては、歯のほかに化石を残さなかった化石のサメを復元することである。しかし、同時に、歯の形態だけによる化石サメの分類はきわめて問題がおおく、それをおきなうものとして、歯の組織をみる必要があると有効である、という見通しをえたことである。

第二には、歯の組織に関する問題として、系統分類と大きな関係のある、内部象牙質の二つのタイプ、すなわち、骨様象牙質と真性象牙質について、さらにおおくのサメの歯について比較組織的に検討することである。また、その骨様象牙質や、基底象牙質中に、骨小体やセメント小体に相当するものがあるかないかをあきらかにすることもある。

第三に、歯の組織についての最大の課題は、外部象牙質がエナメル質か象牙質かをあきらかにすることである。このため、電顕的にその微細構造を追跡し、とくに有機基質とエナメル小柱様構造をあきらかにするとともに、生化学的にそのなかに含まれるタンパク質がどのようなものかをあきらかにすることが重要である。

第四に、外部象牙質がエナメル質であることを確証するためにもっとも決定的なことは、歯の発生を、組織学的・生化学的方法で研究することである。そして、エナメル芽細胞や象牙芽細胞の動きに注目して、サメの歯における硬組織の形成について研究することである。

第五に、以上の研究を比較解剖の軸にそって進めることである。それは、現生のサメのなかで、ラプカのような原始的な特徴のものと、高等なサメとを比較するとともに、脊椎動物の歯全体のなかで、とくにヒトの歯との比較において、サメの歯を位置づけることである。

第六に、以上の研究を現生と化石の比較において進めることである。そして、化石から続成作用の影響を除いた古生物を復元し、現生と古生物を結ぶ系統発生の軸にそって、研究を進めることである。それは、第一表にしめした、脊椎動物の硬組織、エナメル質・象牙質・セメント質・軟骨・硬骨の起源は、サメの歯とウロコの外層と内層、内骨格の軟骨にもとめられるという観点から、歯の起源と進化の問題を、サメの歯を古生物学的に研究することによってあきらかにしようというものである。

- ABELSON, P. H. (1954), *Annual Rep. Carnegie Inst., Wash. Yearbook*,
53, 97-101.
- AGASSIZ, L. (1833-1845), *Neuchatel. vol. 3, viii+390p. Atlas*,
34p., 83p1.
- 秋山雅彦 (1964), *地質雑*, 70(828), 503-516.
- APPLEGATE, S. P. (1967), in *Sharks, Skates, and Rays*, John
Hopkins, Baltimore, 37-67.
- BEKHOUS & ARMSTRONG (1935), *Jour. Dent. Res.*, 15-23.
- BURGESS, R. C. & MACLAREN, C. M. (1965), in *Tooth Enamel*,
John Wright, Bristol, 74-82.
- CAISER, E. (1966), *Eclogae geol. Helv.*, 56, 493-521.
- FITCH, S. M., M. L. R. HARKNESS & R. D. HARKNESS (1955),
Nature, 176, 4473, 163.
- FOWLER, H. W. (1911), *Bull. Geol. Surv., New Jersey*, 4, 22-191.
- 藤田恒太郎 (1957), *歯の組織学*, 医歯薬出版, 東京.
- (1965), *歯の話*, 岩波書店, 東京.
- 藤原隆代・井尻正二 (1959), *地球科学*, 41, 20-31.
- GEHRKE, C. W. & F. SHAHROKHI (1966), *Anal. Biochem.*,
15, 97-108.
- GLIKMAN, L. S. (1964), *The Paleogene Selachians and Their Strati-*
graphical Importance, Akad. Nauk, Moscow (in Russian).
- GOODRICH, E. S. (1913), *Proc. zool. Soc. Lond.*, pp. 80-85.
- 長谷川善和・上野輝弥 (1967), *阿南町の化石*, 112-117.
- HERTWIG, O. (1874), *Jena. Z. Naturw.*, 8, 331-404.
- HO, T. (1965), *Proc. Acad. Sci.*, 54, 1, 26-31.
- 伊法正雄 (1960), *三重医学*, 4-6 (1), 1981-2002.
- 井尻正二 (1954a), *科学論*, 理論社, 東京.
- (1954b), *地球科学*, 17, 7-12.
- (1956), *古生物学*, 理論社, 東京.
- (1968a), *化石*, 岩波書店, 東京.
- (1968b), *人体の矛盾*, 築地書館, 東京.
- JORDAN, D. S. (1907), *Unv. Calif. Pub., Bull. Departm. Geol.*,
vol. V, 107.

- JORDAN, & BEAL (1919), *ibid.*, vol. VII, 250.
- 桐野忠大 (1966), 硬組織シンポジウム, 箱根, 1966. 9. 8-11.
- (1969), 硬組織研究, 医歯薬出版, 東京, 361-381.
- 北村正和 (1960), 三重医学, 4-6 (2), 2198-2208.
- 松原喜代松 (1963), 動物系統分類学, 第9卷(上), 中山書店, 東京.
- MILES, A. E. W. & D. F. G. POOLE (1967), in *Structural and Chemical Organization of teeth*, Acad. Press, New York, 3-44.
- MOSS, M. L., S. J. JONES & K. A. PIEZ (1964), *Science*, 145, 940-942.
- MUMMERY, J. H. (1919), *The Microscopic & General Anatomy of the Teeth, Human and Comparative*, Oxf. Univ. Press, Humphrey.
- 野村松光 (1962), 東海地学, 5, 11, 28-36.
- ØRVIG, T. (1967), in *Structural and Chemical Organization of Teeth*, *idem*, 45-110.
- OWEN, R. (1845), *Odontography*, 2 vols, Hippolyte, Baillière, London.
- PEYER, B. (1968), *Comparative Odontology*, Univ. Chicago Press, Chicago.
- POOLE, D. F. G. (1967), in *Structural and Chemical Organization of Teeth*, *idem*, 111-149.
- ROMER, A. S. (1967), *Vertebrate Paleontology*, Third Edition, Univ. Chicago Press, Chicago.
- 佐々木哲・須田立雄・鈴木龍太・荒谷真平ら (1966), 歯学生化学, 医歯薬出版, 東京.
- 沢田節生 (1960), 三重医学, 4-6 (2), 2375-2888.
- SCHMIDT, W. J. (1958), *Die gesunden Zahngewebe des Menschen und der Wirbeltiere im Polarisationsmikroskop*, Carl Hanser, München.
- TARLO, L. B. H. (1963), *Nature*, 199, 46-48.
- 田崎和江 (1967), 地球科学, 21-1, 21-24.
- TOMES, Ch. S. (1898), *Eden da*, Ser. B, 190-443.
- WHITE, E. I. (1931), *The Vertebrate Faunas of the English Eocene*, vol. I. Brit. Mus. (Nat. Hist.).
- ZIPKIN, I. & R. S. GOLD (1963), *Proc. Soc. Exptl. Biol. Med.* 113, 580.

象の団研グループ (1968), 化石研究会会誌, 1, 35-75.

第1 図版 現生アオザメと化石サメの歯の形態

写真 1 アオザメ *Isurus glaucus* の頭部前面

写真 2 同、上顎右側（舌側）スケールは 5cm

写真 3 同、上顎右側の歯列（舌側面）

写真 4 a, b, c 化石アオザメ *Isurus hastalis* の歯、舌側面、側面（遠心側）、
頬側面、× 1.0。

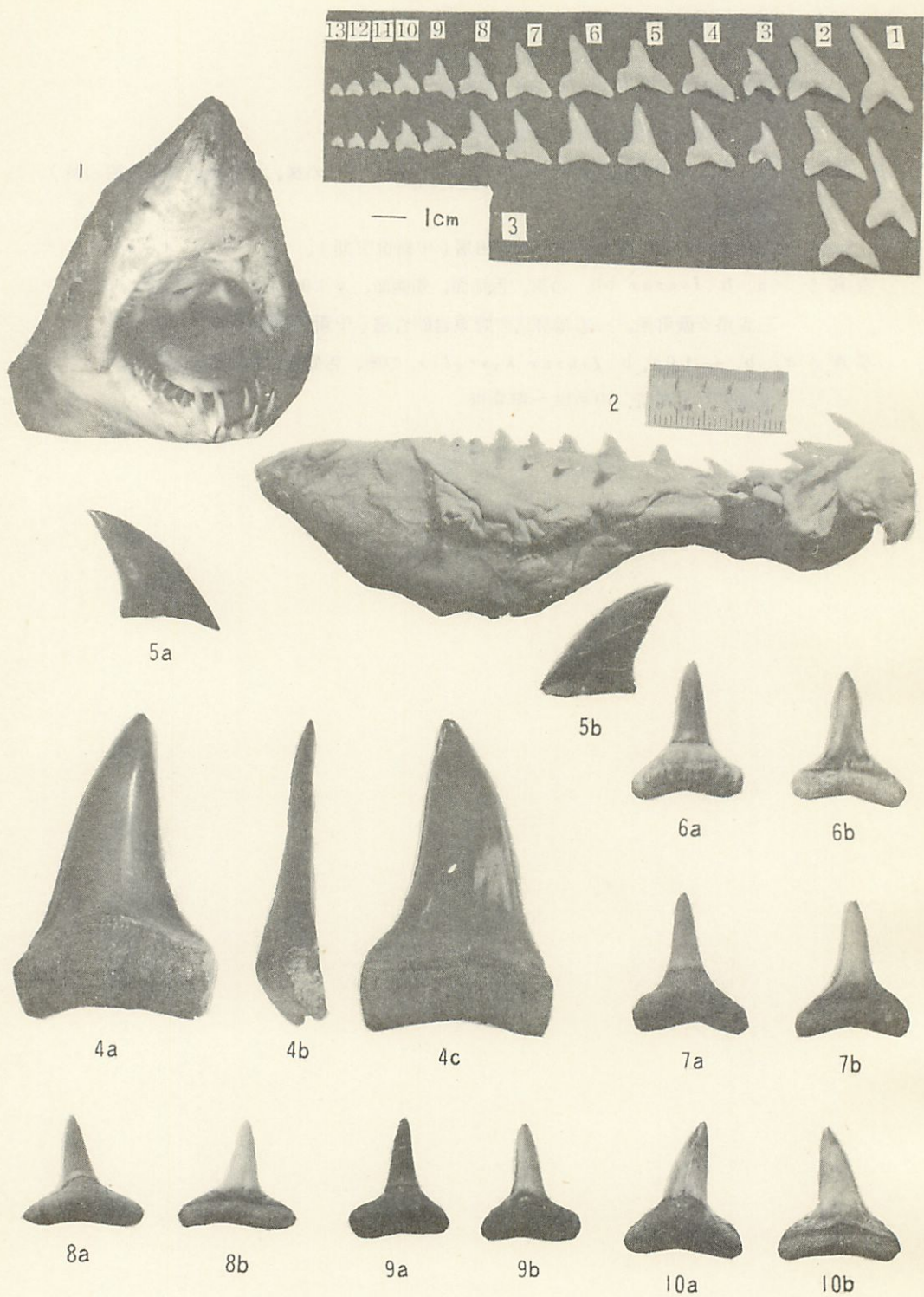
福島県塙町産、東棚倉層群久保田層（中新世中期）、

写真 5 a, b *Isurus* sp. の歯、舌側面、頬側面、× 1.0。

三重県安濃町産、一志層群三ヶ野頁岩砂岩層（中新世中期）

写真 6 a, b — 10a, b *Isurus hastalis* の歯、舌側面、頬側面、× 0.9。

北米フロリダ産、中新世～鮮新世



第2図版 化石サメの歯の組織・I

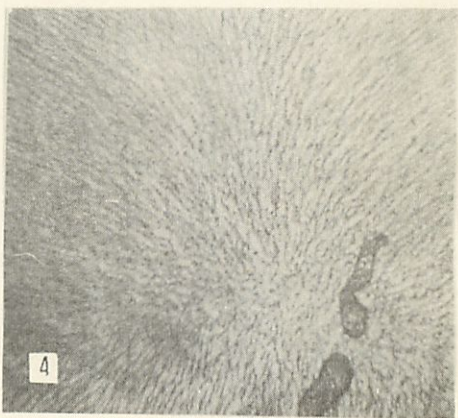
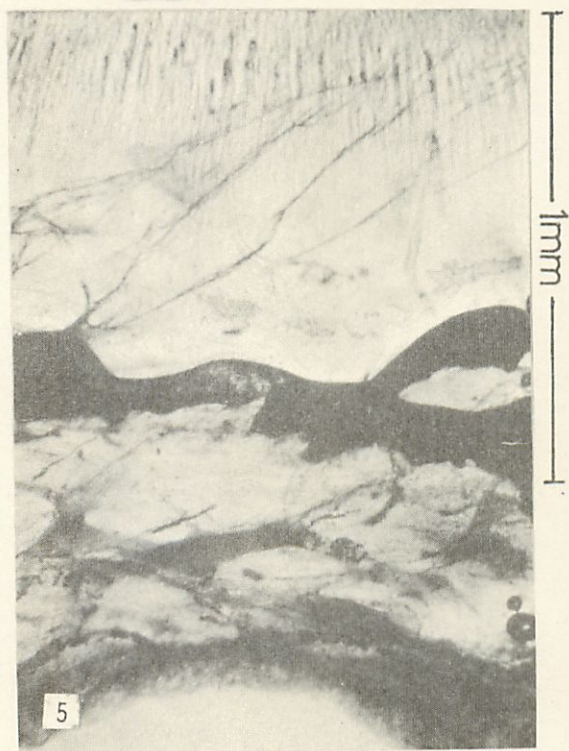
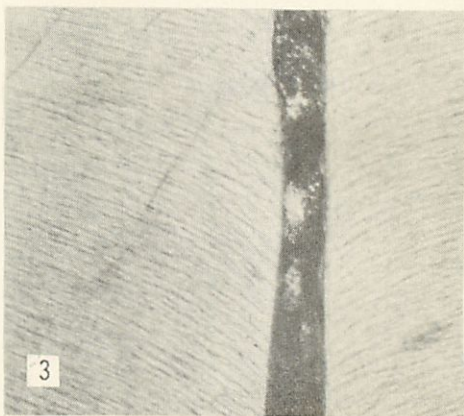
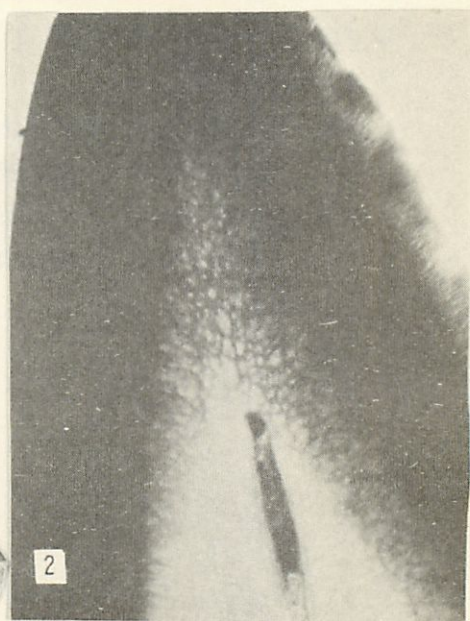
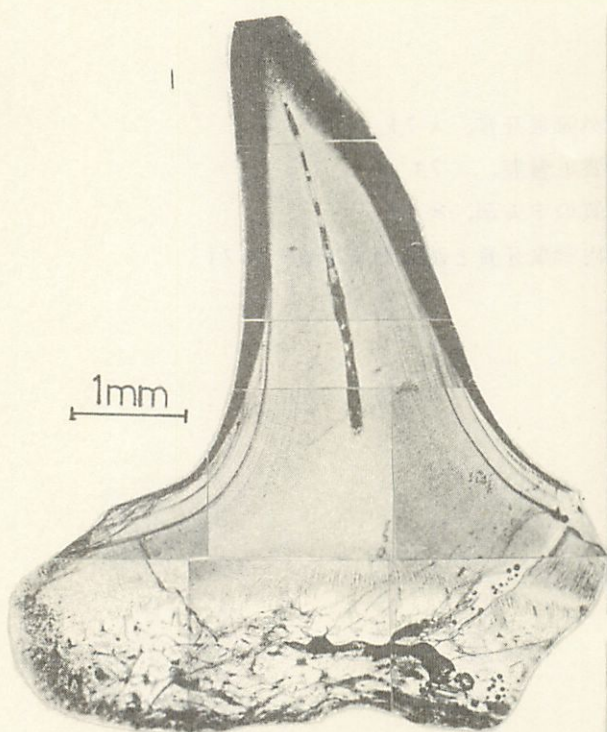
写真1 縦断面、 $\times 14$

写真2 同 拡大、尖頭部の外部象牙質、 $\times 71$

写真3 同 拡大、内部象牙質と髓腔、 $\times 71$

写真4 同 拡大、内部象牙質の中央部、 $\times 71$

写真5 同 拡大、歯根部の内部象牙質と基底部象牙質、 $\times 71$



第 3 図版 化石サメの歯の組織・Ⅱ

写真 1 第一横断面、歯冠部の外部象牙質・内部象牙質・髓腔、 $\times 36$

写真 2 同、十字ニコル下、 $\times 36$

写真 3 同、拡大、 $\times 90$

写真 4 第二横断面、歯根部の基底部象牙質、 $\times 16$

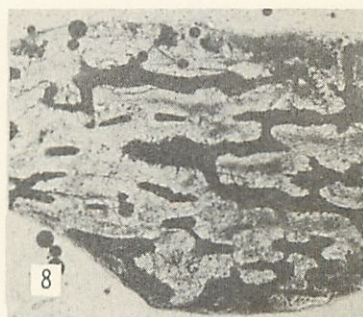
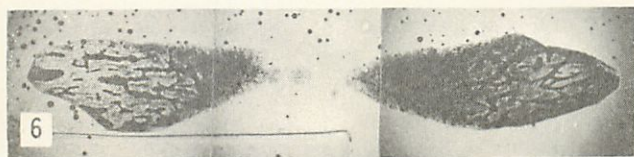
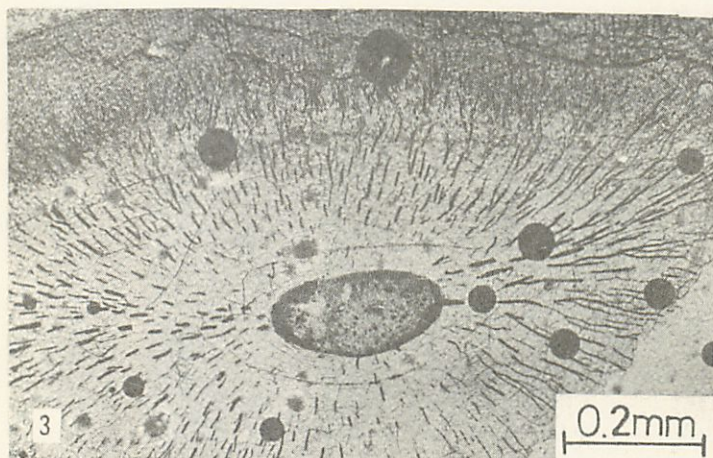
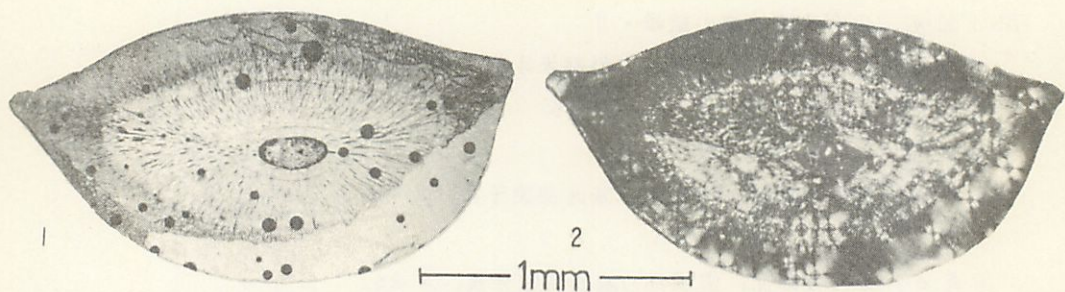
写真 5 同、拡大、 $\times 48$

写真 6 第三横断面、歯根部の基底部象牙質、 $\times 9.6$

写真 7 同、十字ニコル下

写真 8 同、拡大、 $\times 34$

(写真中の黒丸・白丸は、研磨切片の作成中に混入した泡で、サメの歯の組織とは関係がない。)



5mm

1mm

第 4 図版 現生アオザメの歯の組織

写真 1 縦断面、 $\times 5.4$

写真 2 唇舌的正中縦断面、尖頭部の外部象牙質、 $\times 31.5$

写真 3 同、拡大、外部象牙質の外層と内層、 $\times 128$

写真 4 同、拡大、内部象牙質と髓腔、 $\times 128$

写真 5 同、拡大、内部象牙質の下部、細胞様のもの、 $\times 128$

写真 6 同、拡大、基底部象牙質、 $\times 128$

(写真 1 の全体，写真 2 の右端，写真 3 の左下にある黒丸は，研磨切片の作成中に混入した泡で，サメの歯の組織とは関係がない。)

