TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

魚類骨格透明標本を用いた理科教育の例 ー顎の骨の変化を観察して魚と私たちとの関係を探ろうー

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2017-02-28 キーワード (Ja): キーワード (En): transparent specimen, evolution, bone observation, science education, ESD（ education for sustainable development） 作成者: 河野, 博, 植原, 望 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/1378

Journal of the Tokyo University of Marine Science and Technology, Vol. 13, pp. 16-35, 2017

魚類骨格透明標本を用いた理科教育の例
－顎の骨の変化を観察して魚と私たちとの関係を探ろう－

河野　博[*1・2]・植原　望[*2]

（Accepted October 25, 2016）

An Example of Fish Transparent Specimens for Science Education
: to Search for Interrelationships between Fish and Us through Jaw Arches

Hiroshi KOHNO[*1*2] and Nozomu UEHARA[*2]

Abstract: The fish transparent specimens were applied to a study of the evolution through the observation of jaw arches of the cartilaginous and bony fishes, and its effectiveness was investigated by the pre- and post-intervention questionnaire. The research examined 48 participants in the four learning interventions, the age ranging from 13 to 76 with a mean of 29.9 years old（*n*=47, because one participant did not describe the age）and the sex ratio being 27 females and 21 males. The program was composed of the followings: how to use the microscope; the basic knowledge of bones such as the kinds of bone, how to make specimens for bone observation, history and methods to make transparent specimens; main observation 1, jaw arches of cartilaginous and bony fishes; and main observation 2, relationships between fish jaws and our auditory ossicles, known as the Theory of Reichert. The participants were significantly more concerned about the evolution of fish jaws to our auditory ossicles after the intervention, indicating that the transparent specimens and observation objects related to the Theory of Reichert would be suitable for the study of evolution. The picturesque transparent specimens attracting the participants would be a good resource of science education.

Key words: transparent specimen, evolution, bone observation, science education, ESD（education for sustainable development）

第一章　研究の背景と目的

本研究の目的は、魚類の骨格二重染色透明標本（以下、透明標本とする）を、理科教育に活用できることを「例」として提示することである。とくに「相同」や「進化」といった視点から、軟骨魚類と硬骨魚類の顎を構成する骨格の比較、および魚類の顎周辺の骨格と私たちの中耳の骨格との関係を「例」として取り上げた。

１．透明標本

透明標本が海洋環境教育に有効であることは、前報[1)]で示した。そこでは、海の中の「食う･食われる」の関係を、生きたプランクトンを観察することと、透明標本の消化管内容物を観察・解剖することによって、直接的に体験・学習することができた。骨格系を観察するための透明標本の作製の歴史や、透明標本を利用した研究の例についても前報[1)]で述べた。透明標本の活用については、ここでは、「長い歴史を持つ透明骨格標本であるが、学校教育における教材としての活用はまだ試されている段階に過ぎず、今後発展する余地は大きいと考えられる。」[2)]という意見だけを紹介しておく。

２．観察・学習項目

1）軟骨魚類と硬骨魚類の顎

サメやエイの仲間である軟骨魚類の上顎が口蓋方軟骨（かつては「方形骨」と呼ばれたが、最近では「方骨」とされているので、ここでも口蓋方形軟骨ではなく口蓋方軟骨とする）から、下顎がメッケル軟骨（下顎軟骨ともよばれる）

*1　Department of Ocean Sciences, Tokyo University of Marine Science and Technology, 4-5-7 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan（東京海洋大学学術研究院海洋環境学部門）
*2　Laboratory of Ichthyology, Tokyo University of Marine Science and Technology, 4-5-7 Konan, Minato-ku, Tokyo 108-8477, Japan（東京海洋大学魚類学研究室）

からなっていることは、魚類学の教科書[3] にもでてくる。これらは、当然のことながら「軟骨」である。また、口蓋方軟骨とメッケル軟骨の顎関節は「一次顎関節」とよばれる[4]。

一方、いわゆる硬骨魚類の顎は、前上顎骨と主上顎骨、上主上顎骨（種類によっては欠く）からなる上顎と、歯骨と角骨、後関節骨からなる下顎とで構成される[3]。哺乳類の場合は、メッケル軟骨を取り巻くように出現する歯骨が頭蓋骨と直接的に関節し、「二次顎関節」と呼ばれる[4, 5]。硬骨魚類の場合は、歯骨と角骨がメッケル軟骨の周りに位置し、関節そのものはメッケル軟骨の後端が方骨と関節するため、厳密な意味では、二次顎関節ではなく、一次顎関節である。この様子は、発育段階の異なる硬骨魚類の仔稚魚の透明標本を観察することで、確かめることができる。

さて、ここで問題となるのが、軟骨魚類の口蓋方軟骨とメッケル軟骨が硬骨魚類ではどうなるのか、ということである。その名のとおり、口蓋方軟骨が口蓋骨や方骨に、またメッケル軟骨の後端が後関節骨になることは、解剖学の教科書などでよく知られている[4, 6]。これらの骨は軟骨性硬骨（置換骨ともよばれる）である。しかし魚類学の教科書[3] では、軟骨魚類と硬骨魚類の骨の名前が図とともに記されているだけで、口蓋骨や方骨の由来は説明されていない。こうした変化も、硬骨魚類の個体発生を透明標本で観察すれば、軟骨が硬骨になっていく様子を見ることができる。さらに、軟骨魚類の口蓋方軟骨が硬骨魚類の頰の下の骨格に変化していく様子や、硬骨魚類の仔魚期にはメッケル軟骨が下顎として機能していることも観察できる。なお、方骨の上後方に位置する後翼状骨が口蓋方軟骨から変化することはほとんどの教科書では触れられていない。

さらに後方では、舌顎軟骨が化骨して舌顎骨と接続骨に変化する様子が見られる。その下方にある舌弓も、やはり軟骨から化骨していく様子が観察できる。

2）軟骨・硬骨魚類と私たちとの関係

上述した魚類の顎を構成する骨、具体的には方骨と後関節骨、舌顎骨、および角骨が私たちの耳の中に入って耳小骨［鐙（アブミ）骨、砧（キヌタ）骨、槌（ツチ）骨］と鼓（コ）骨に変化したことは、200年ほど前に提唱されたライヘルト（あるいはライヒェルト）（Karl Reichert）説として知られている[4)~6)]。

こうした、魚類の顎骨と両生類～哺乳類の耳小骨との関係は、進化が設計図どおりに遂行されるのではなく思いもよらない失敗や勘違いの産物であることの好例とされている[6]。しかしその一方で、「合理的な到達点だけを見るような」最近の理科教育では進化がまっさきに排除され、耳小骨の形態や機能については教育されても、その来歴、進化についてはほとんど触れられていないのが現状である[6]。

実際に顎の骨と耳小骨の関係は、管見によれば、理科教育ではあまり取りあげられていない。池田[7] は高校理科教育として、耳小骨と魚類の関係を知るために、魚類の舌顎骨や方骨、接続骨の取り出し方を説明している。生物教材製作所[8] でも、高校生物の教材としての骨格標本で、耳小骨の起源としてマグロの舌顎骨と方骨、角骨（後関節骨と間違えている）を示している。また、石田[9] は蒲郡市の科学講座で「耳からわかる私たちの先祖、それは魚！」をおこなっている。さらに、複雑な変遷過程を示すために、学生用に「発生模型」を作成して説明している例[10] もある。

第二章　方法

1．対象としたイベント

本研究で対象としたのは、下の 4 つのイベントである。なお、イベントのタイトルはすべて『透明標本を使って魚と私たちの関係を知ろう』で、実施場所は1）の港区立高輪図書館セミナー室以外は東京海洋大学海洋科学部（品川キャンパス） 2 号館 4 階の学生実験室である。

1）大人の海洋講座2016@港区立高輪図書館（以下、高輪と略す）

中学生以上の12名を募集し、参加者は定員いっぱいの12名であった。実施日は2016年 6 月18日（土）。

2）博物館学Ⅳ（以下、大学生）

東京海洋大学海洋科学部の学部 2 年生あるいは 3 年生に対して開講している博物館学Ⅳ（博物館資料論）の一環として実施した。対象者は17名。実施日は2016年 6 月23日（木）。

3）平成28年度港区教員研修大学講座（以下、教員）

港区の幼稚園、小学校、中学校の教諭を対象とした講座で、13名が参加した。実施日は2016年 7 月26日（火）。

4）奈良学園特別演習（以下、高校生）

ここ数年実施している奈良学園の生徒を対象とした特別演習。参加者は 6 名。2016年 7 月31日（日）に実施した。

2．アンケート用紙

研究の対象にした 4 つのイベントで、事前と事後のアンケート調査をおこなった。アンケート用紙は 1 枚（両面印刷：附図 1 ）で、その内容は以下のとおりである。

1）基本的情報

基本的情報として、高輪では年齢と性別、さらに学生の場合には中学、高校の区別と学年を答えてもらった。大学生と高校生の場合には学年と年齢、性別を、また教員では年齢と性別に加えて各々幼稚園か小学校、中学校の別を記載してもらった。

さらに、研究のためにアンケートを使用してもよいかどうかについて、意思表示をしてもらった（結果的に、すべての参加者からデータを使用することに同意を得た）。

2）透明標本に関する質問

透明標本に関しては、事前の問3で「透明標本を知っていますか？」を質問し､「知っている」あるいは「少し知っている」と回答した人に対しては問 4 で「何で知ったのか」を複数回答で答えてもらった。さらに問 5 では「透明標本を使ってできること」をたずねたが、利用の仕方が分からない人のためにチェックボックスを設け、分からない場合はチェック☑をしてもらった。

透明標本についてはプログラムの中で利用するので、事後の質問として上述した質問をすることはできない。そこで事後の問12では､プログラムでおこなったこと以外に｢さらに透明標本を使ってできること」について記述式で答えてもらった。

3）事前と事後での同じ質問

まず基礎的質問として、問 1 と 2 および問 8 と 9 で「海が好きですか？」と｢魚が好きですか？｣に答えてもらった。この問は、主題に直接関係する質問でもアンケート調査の主目的でもない。しかし、まずは参加者にリラックスしてもらうことと、事前と事後とで「冷静に」回答してもらっているのかを判断するための質問として位置づけている。

本研究の主題である魚と私たちとの関係については、事前の問 6 で「共通点について知っていますか？」に答えてもらい、「知っている」あるいは「少し知っている」と回答した人に対しては問 7 で、その「知っていること」を記述してもらった。まったく同じ質問を事後の問10と問11でおこなった。

4）事後だけの質問

事後だけの問13と14では、「今日、最もおどろいたり、感じたりしたこと」および「質問や疑問」を記述式で答えてもらった。

5）回答の処理方法

アンケート用紙では、「好き」とか「知っている」という回答が低い数字になっているが、集計をする際には逆に「好き」とか「知っている」を 4 点として計算した。

3．プログラムの内容

プログラムの内容は 4 つのイベントでほぼ同じで、次のように進行した：事前のアンケート、顕微鏡の使い方、透明標本の基礎知識（骨の種類､骨格を観察するための方法、透明標本の作製方法と歴史)、主題の観察 1 （サメの顎と魚の顎)、主題の観察 2 （魚の顎の骨と私たちの中耳との関係)、事後のアンケート。時間的には、高輪が最も長く午後 2 時から 4 時過ぎの 2 時間強、次いで教員の午前10時から12時近くの 2 時間弱であった。大学生と高校生では、午後 2 時あるいは 2 時40分からおよそ 1 時間30分で実施した。

アンケートについてはすでに紹介したので、ここではそれ以外の項目について説明する。なお、各項目に費やした時間は、イベントごとに所要時間が異なるため、まったく一定ではない。しかし、参加者に提供する内容についてはほとんど差がなく、ほぼ同じ内容をほぼ同じパワーポイントで説明するように努めた（いくつかのパワーポイントは附図 2 に示す)。

1）使用した魚種

観察用の魚種は、ヒイラギ、ブルーギル、コノシロの 3 種である（附図 2 - ①)。とくに意図があってこれら 3 種を選択したわけではないが、結果的に対象とする骨格系の観察には向いていた。

これら 3 種を、比較しながら観察ができるように、一つのホール付きスライドグラスにのせ（Fig. 1)、各参加者に配った。

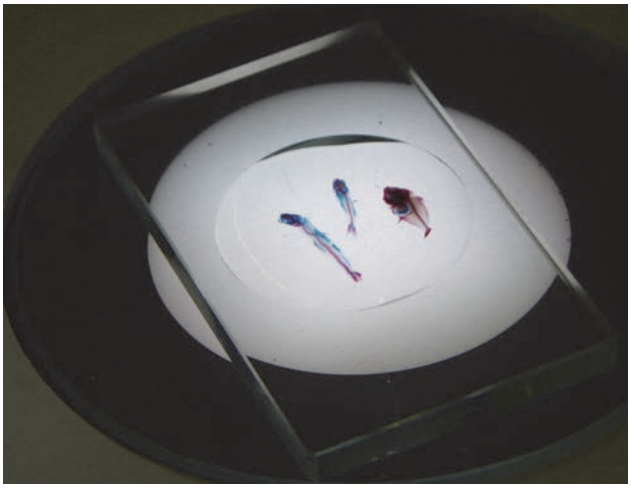


Fig.1. 観察用の透明標本.

2）骨の種類

骨の種類には大別して軟骨と硬骨があるが、後者は軟骨性硬骨と膜骨（膜性骨あるいは皮骨ともよばれる）からなる。透明標本では、軟骨を青く硬骨を赤く染めるため、これらの区別は簡単であり､それがまた観察には重要となる。

軟骨と硬骨は、その名称が冠されているとおり、サメやエイの仲間である軟骨魚類と硬骨魚類の骨格を構成する主な要素である。さらに軟骨性硬骨と膜骨は、とくに今回の主題でもある魚類から私たちへの変化でも、由来（相同）を考える場合に重要になる。

したがって本プログラムでは､透明標本を観察しながら、軟骨と軟骨性硬骨、膜骨の違いをしっかりと把握するようにした（附図 2 - ②)。

3）主題の観察その 1

主題の観察は、附図 2 - ③に示すように、二つの項目からなっている。ここでは、その 1 の「サメの顎と魚の顎」

の内容を示す。

導入として、私たちの顎を考え（附図2-④）、さらに魚類にはいろいろな顎の骨のあることを観察した（附図2-⑤）。

それをサメに展開するが、その前に附図2-⑤の系統図を使って、最近の系統の説明をした（系統は基本的にLiem et al.[11] にしたがった）。すなわち、共通祖先から派生した分類群をすべてふくむグループが単系統であること、サメやエイなどは軟骨魚類で、いわゆる魚類や私たちをふくめた四肢動物などが硬骨魚類であること、さらにその結果としてサメとイワシと私たちとでは単系統という意味ではイワシと私たちがグループを作ることなどである。そこでサメであるが、サメの場合は透明標本ではなく顎の骨格標本を使って、上顎が口蓋方軟骨から、下顎がメッケル軟骨からなることを説明した（附図2-⑥：附図のようなパワーポイントによる説明だけではなく、実際の顎の骨格標本も使った）。

まず上顎に注目し、岩井[12] にもとづいた硬骨魚類であるスズキの骨格系の図（附図2-⑦の写真）を紹介し、その中に口蓋骨と方骨のあることを見つけてもらい、自分たちの透明標本でこれらの骨を観察した。その結果、サメの顎の骨が硬骨魚類の頬の下の骨（軟骨性硬骨であることも理解できる）であることを確認できた（附図2-⑧）。では硬骨魚類の顎はどこから、という疑問に対しては、サメでは見られなかった膜骨からなる前上顎骨や主上顎骨を観察することで理解した（附図2-⑨）。

下顎については、メッケル軟骨とその後方が化骨してできる後関節骨（附図2-⑩）、さらにその周りに出現する膜骨である歯骨と角骨を直接観察した（附図2-⑪）。

ここまでのまとめが附図2-⑫で、さらに口蓋方軟骨とメッケル軟骨の後方の骨に注目し、とくに舌顎骨＋接続骨と舌骨を観察した（(附図2-⑬と⑭）。

この項のまとめをおこない、さらに導入で用いた私たちの顎の状態を確認した（附図2-⑮）。

4）主題の観察その2

主題の二つ目の観察は、附図2-③のとおり、魚類と私たちとの関係である。

しかし、ここで附図2-⑯に示したように、両生類や爬虫類、鳥類などの骨格を観察することはできないので、模式的に軟骨性硬骨の舌顎骨（附図2-⑬と⑭）が中耳の中に入って耳小骨（アブミ骨）という空気の振動を伝える機能をもつようになったことだけを示した。さらに、私たちヒトの属する哺乳類と比較すると3つの骨（軟骨性硬骨の方骨と後関節骨、および膜骨の角骨）があまっていることを確認した（附図2-⑰）。次いで、方骨と後関節骨（軟骨性硬骨）が中耳に入ってそれぞれキヌタ骨とツチ骨に、また角骨（膜骨）が鼓骨になったことを示した（附図2-⑱）。

結論として、系統図とともに、軟骨魚類あるいは硬骨魚類の顎が私たちの聴覚をつかさどる中耳を構成する骨になったことを示し（附図2-⑲）、附図2-⑳でまとめるとともに事後のアンケートをお願いした。

第三章　結果と考察

1．基本的情報

今回調査した4つのイベントすべての参加者は48名で、すべての方がアンケートのデータ使用に同意してくださった。平均年齢は29.9歳（高輪の1名は年齢を書いていなかったので、47名の平均）で最も若い参加者は13歳、最高齢者は76歳であった。男女比は21：27であった。

プログラム別の参加人数と平均年齢、男女比、および所属学校と学年については、以下のとおりである。

1）高輪

港区立高輪図書館で中学生以上という条件付きで一般募集した結果、12名が参加した。平均年齢は38.2歳（記載のなかった1名を除く）で13歳から76歳まで幅広かった。なお参加者は、5名の中学生と高校生（13歳から17歳）および40歳から76歳と、二つの年齢層に分かれていた。男女比は7：5である。

2）大学生

東京海洋大学海洋科学部の博物館学Ⅳの一環としておこなったため、17名の参加者は19歳から21歳で平均年齢が19.6歳と、年齢幅が狭いのが特徴である。男女比は10：7。

なお、本研究の第一著者は海洋科学部で「魚類学Ⅱ」という講義を開講し、学部二年生を中心に130名近くが受講している。その中で、鰓腸を支える骨格系として、本研究の内容に近いものを教授している。博物館学Ⅳは60名近くが受講しているが、本研究では、魚類学Ⅱを受講していない学生を対象とした。

3）教員

参加人数13名の平均年齢は38.6歳（24歳～59歳）であった。男性が2名に対して、女性が11名と多かった。所属している学校は小学校が最も多く10名で、次いで幼稚園の2名、中学校の1名であった。

4）高校生

参加者は高校生6名で、16歳か17歳、平均で16.3歳。男性2名と女性4名であった。

2．基礎的質問

事前でおこなった問1「海が好きですか？」と2「魚が好きですか？」および事後の問8と9は、いわば基礎的質問で、上述したように本研究の主題に直接関係する質問ではない。しかし、結果的には、事前と事後で下がることはなかった。

したがって、参加者は的確に回答し、本アンケートの情報は参加者の意見を反映していると判断された。

3．透明標本に関する質問

透明標本に関しては、事前の問 3 「透明標本を知っていますか？」および問 4 「何で知ったのか」、問 5 「透明標本を使ってできること」を答えてもらった。さらに事後には、問12で「さらに透明標本を使ってできること」を記述式でたずねた。

1）透明標本の認知度

問 3 の回答で「知っている」あるいは「少し知っている」と答えたのは48名中23名（47.9%）であった。イベント別では、大学生で平均値がもっとも高く 4 点満点の3.06点で、次いで高校生の2.50点、高輪の2.33点、教員の1.92点であった（Fig. 2）。ただし、高輪の12名のうち中高生の 5 名の平均値は3.0点と高かった。

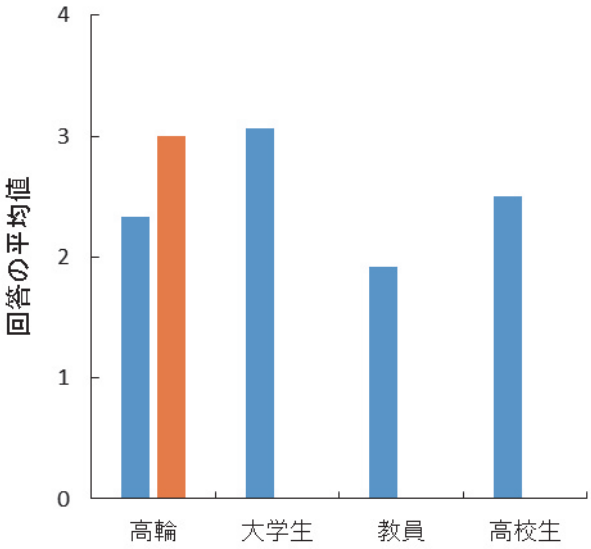


Fig.2. 問3の回答のイベント別平均点．高輪のオレンジの棒は中高生だけの平均点.

参加した中学生と高校生、大学生の28名（平均年齢18.0歳）のうち､透明標本について「あまり知らない」（ 9 名）、「知らない」（ 1 名）と答えたのは10名（35.7%）であった。それに対して、それ以外の参加者20名（ 1 名は年齢を書いていないので19名の平均年齢は44.6歳）のうち、「あまり知らない」（ 7 名）あるいは「知らない」（ 8 名）と答えたのは15名で75.0%を占めた。

以上のことから、透明標本の認知度は若い人ほど高いことが明らかになった。

2）透明標本の情報源と利用方法

透明標本を「知っている」あるいは「少し知っている」と答えた23名中､情報源として最も多かったのは｢インターネット」で､31回答中（複数回答のため）8 名（25.8%）だった。次いで「学校」の 7 名（22.6%）で、これらの結果は、透明標本の認知度が若い学生ほど高い、という前述の結果と関連していると考えられる。ついで､書籍の5名（16.1%）と友達からの 4 名（12.9%）が続いた。「その他」という回答は 4 名で、具体的には水族館、テレビ、雑誌、さらに「博物館で売っていた」という回答だった。

その一方で、問 5 の「透明標本を使ってできること」という問に対して、分からない（☑を入れた）と答えた参加者は23名中14名､ほぼ 6 割（60.9%）を占めた。記述式では、「骨の観察」（ 7 名）と「体の構造の観察」（ 2 名）に透明標本が使えるという回答であった。

3）透明標本のまとめ

今回の参加者のうち、透明標本を知らない人（25名）と知っていても利用方法が分からない人（14名）は48名中39名（81.3%）にのぼった（体の構造の観察という微妙な回答をした人もここに加えると41名［85.4%］になる）。したがって、透明標本は若い人にはかなり知られているものの、その利用方法についてはあまり知られていない、という結果が得られた。

4．魚と私たちとの関係

事前事後の問 6 と10では「あなたは魚と私たちの体に共通点があることを知っていますか？」と問いかけた。また、これらの問に「知っている」あるいは「少し知っている」と答えた人には、問 7 と11で「知っていること」を記述してもらった。これらの問が本研究の主題に関するアンケートであり、その結果によって透明標本を使った学習の効果を確かめることができると考えられる。

1）　学習の効果

問 6 と10では､各イベントで平均点が上昇した（Fig. 3）。ただし点数は、満点（ 4 点）の「知っている」だけではなく､3 点の「少し知っている」と答えた参加者も多いため、事後に満点になる（全員が「知っている」と答えた）、というのは高校生だけであった。

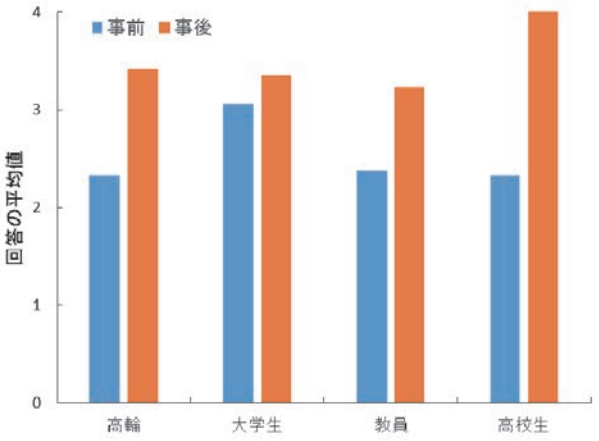


Fig.3. 魚と私たちの共通点をたずねた事前（問６）と事後（問10）の各イベントの平均点.

事後の問10で、すべての参加者48名が「知っている」か「少し知っている」と答えたわけではない。「あまり知らない」と答えたのは大学生の２名と高輪の１名であった。しかし、そのうちの大学生の１名は事前の問６では「少し知っている」と答えている。また、高輪の１名は事前も事後も「あまり知らない」と答えているが、問13の「今日、最もおどろいたり、感じたりしたこと」に「サメや魚の骨が人間の耳の中に入っていること」と回答している。したがって、大学生1名と高輪の１名の問10の回答は信頼性に少し欠けると考えられた。さらにもう１名の大学生も、問12の「さらに透明標本を使ってできること」や問13で「骨じゃない何も染まっていない部分を見ていて楽しかった」とか「とても新鮮に見えた。軟骨と硬骨で染まり方が違うことに驚いた」と記述していることから、透明標本そのものにはかなり興味を示していると考えられた。したがって、今回のイベントの主題であった透明標本を利用して相同や進化といった視点から魚類の顎と構成する骨格を観察するという目的はほぼ達成できたと判断された。

事前（2.33点）と事後（４点）とで最も点数が離れた（1.67点差）のは高校生であった。次いで高輪の2.33点から3.42点（1.09点差）、教員の2.38点から3.23点（0.85点差）が続いた。大学生はもともと高く（3.06点）、事後は3.35点（0.29点差）だった。

2）学習の効果の内容

事前の問６で魚と私たちの関係を「知っている」あるいは「少し知っている」と答えたのは24名であった。そのうち、問７の知っている内容を記述式で回答したのは、22名である。その内訳は、脊椎動物（あるいは背骨がある）が13名（59.1%）、体のつくりが似ている（臓器の位置が同じなど）7名（13.8%）、骨がある３名（13.6%）、獲得免疫をもつと体軸がそれぞれ1名（4.5%）で、ライヘルト説に関する回答は一つもなかった。なお、プログラムの中では、骨の種類を説明する際に、脊椎骨を代表的な膜骨として観察した。

それが事後の問11になると、魚類の顎と耳の中の骨の関係（ライヘルト説：45名中32名、71.1%）が最も多く、ついで（魚類が）進化の過程で私たちとつながっている（9名、20.0%）、軟骨と硬骨（６名、13.3%）、脊椎（5名、11.1%）、体のつくりが似ている（２名、4.4%）であった。プログラムでおこなったライヘルト説はほぼ7割の32名とやや少ないが、参加者はいろいろと考えながら標本を観察したことが読み取れる。なお、軟骨や硬骨とか脊椎といった回答は、この後の問13の回答などで明らかになるように、実は透明標本そのものに驚いた参加者が多いことを反映している。

５．その他の記述式の回答

その他の記述式の問として、問12「さらに透明標本を使ってできること」、問13「今日、最もおどろいたり、感じたりしたこと」および問14「質問や疑問」をたずねた。

1）「おどろいたこと」と透明標本

まず、「今日、最もおどろいたり、感じたりしたこと」では、透明標本のきれいさが26名（48名全員が回答していたので、54.2%）で、次いでライヘルト説をふくめた進化そのものの驚きが22名（45.8%）と、この二つの項目については、参加者の半数の人が驚いていた。さらに、系統（サメ - 魚 - ヒト）にびっくりした（６名、12.5%）、他の骨格（例えば肩：胸鰭）の面白さ（３名、6.3%）、透明標本以外の骨格標本の面白さ（お湯かけ法やカツオブシムシ法：２名、4.2%）などであった。

ライヘルト説よりも透明標本の美しさに参加者は関心を示していた。また、系統については、とくに教員の人たちが「今、子供たちに教えているのと異なる」ということで少しびっくりしていた。これについては、近年の系統分類学の手法や考え方によって「魚類」とか「爬虫類」とかの概念が変わっていることを補足説明した。

透明標本の利用法については問12で答えてもらった。その結果、やはり骨について学ぶというのが一番多く15名（31回答で48.4%）であった。次いで、透明標本展を開催する、あるいは装飾品として売却する、というのがそれぞれ4名（12.9%）であった。他には、分解する、進化の過程を学ぶ、作製過程を勉強する、などがあった。骨について学ぶというのは、透明標本の本来の用い方で、ごく妥当な結果である。ただ、やはり体が透明になって、そのうえ骨格が赤と青に染まることから、美しさを利用して標本展をしたり装飾品にしたりするというのも理解できる。また、3名の教員は「授業の導入に使える」という意見を記述していた。

2）感想と質問

最後の問14では、48名の参加者中11名（22.9%）が、質問や疑問よりも、「楽しかった」、「面白かった」と回答し

た。その理由については、「知らないことがたくさんあった」とか「よくわかった」、あるいは「実際に観察できたので」などであった。「興味がわいた」、「またやりたい」という意見も4名（8.3%）からあった。その一方で、4名が「難しかった」と回答したが、そのうちの3名は「面白かった」とも回答している。これらの結果から、問14ではとくに「感想」を求めたわけではなかったが、参加者の多くの方が楽しく学習できたことがうかがわれる。

疑問や質問は、透明標本に関することが多く、6名（12.5%）の参加者が「どうして透明になるのか」とか「透明標本はどうして触っても壊れないのか」あるいは「薬品は高いですよね」といった質問があった。そこで補足説明として、透明標本の作製方法やその原理については河野ほか[13]を、また作成手順については河野・茂木[14]を紹介した。さらに主題に関しては、「魚類の聴覚はどうなっているのか」とか「サメの歯の仕組み」についての質問もあった。

第四章　総合考察

本研究には二つの目的があった。ひとつは「魚類の透明標本を理科教育に活用すること」で、結果的には活用することはできると判断された。もう一つは、透明標本を使って「魚類の骨格、とくに顎を観察することによって相同あるいは進化の理解を深める」ことであるが、この目的もほぼ達成できたと考えられる。しかし、いくつかの問題点も明らかになったので、ここで論議しておきたい。

1．透明標本の有効性と問題点

透明標本そのものについては、本研究の事前のアンケートで、若い人ほど認知度が高いという結果が得られた。事後調査でも、参加者の半数以上が透明標本の美しさに驚いていた。また、ほとんどの参加者がこれまで透明標本を顕微鏡で観察したことはなかったようで、透明な体に赤と青に染まった骨格を顕微鏡で観察するというのはかなり衝撃的であったと推察できる。

透明標本の認知度が高いのは、美しい透明標本が写真集として出版されたり、瓶に入れて市販されたりしていること[2),15)]でも理解できる。今回の透明標本の利用方法に関するアンケートでも、透明標本展を開催したり装飾品として販売したりするという意見が、8名の参加者からあった。実際に、兵庫県立人と自然の博物館[16)]では「学んで魅せる標本展」という2015年のイベントで「透明化骨格標本」を展示している。また、東京海洋大学海洋科学部附属水産資料館（現在のマリンサイエンスミュージアム）でも2010年から11年にかけて「さかなの透明標本展」[17)]をおこなっている。

しかしその一方で、事前アンケートで透明標本を知っていると答えた人のほぼ6割、参加者全体ではほぼ8割の人が、透明標本の利用方法は分からないと答えた。

透明標本は、すでに100年以上の歴史があり研究者には骨格の観察に利用されてきた[1)]が、学校教育における教材としての活用はまだ試されている段階に過ぎない[2)]という意見もある。しかし、透明標本を教材として利用しようという試みは、散見される。たとえば山口県では、博物館学校地域連携教育支援事業の一環として透明標本の貸し出しをしている[18)]。京都大学では琵琶湖の外来魚駆除対策事業で捕獲されたブラックバスやブルーギルを理科教育教材や研究用の透明標本として博物館や水族館で低価格で販売するという試みをおこなっている[15)]。しかし販売された透明標本は、教材というよりも、やはり装飾品としての価値の方が高いのではないだろうか。本研究のアンケートでも透明標本の情報源に「博物館で売っていた」という回答があった。透明標本の普及には効果的ではあるが、教材として利用されるかどうかについては購入者次第である。そこで、パンフレットなどを使って、教材としての利用方法を説明するなどの配慮も必要であろう。

以上のことから、認知度の高い透明標本を教材として利用するためには、透明標本の特性を考慮した教育プログラムの策定が必要であると考えられる。たとえば前報[1)]では、本来であればホルマリンで固定されアルコールで保存されている液浸標本を解剖することで消化管を取り出してその内容物を確認するところを、透明標本を解剖することで消化管の内容物を観察した。これは、透明標本では消化管の中の餌生物も染色されるという特性をいかしたものである。また、液浸標本よりも透明標本の方が、解剖が楽である。骨格を観察するための透明標本の本来の使い方ではなく、またこうした消化管内容物の結果を科学論文にすることには無理があるが、「食う・食われるの関係を知る」といった教育プログラムの教材としては十分に適していた。

本研究のプログラムは、前報とは異なり、透明標本本来の目的である骨格の観察を取り入れたものである。次項で、その妥当性を検討する。

2．透明標本を利用して相同／進化を理解する

透明標本（あるいはそれをアクリル樹脂に包埋した「透明骨格標本プラスチック」）を「脊椎動物の特徴」や「進化での相同器官」の実験授業に活用しようという試みはある[19)]。しかしその観察項目は「脊椎骨」や「腕や翼での骨格の相同性」であり、具体的な観察項目は示されていない。その一方で、いわゆるライヘルト説を進化の教材として使おうという試み[7)~9)]はあったが、これらの研究では骨格を生鮮標本から取り出すというもので、透明標本を利用したものではない。

本研究では、透明標本を利用して、サメと硬骨魚類の顎の骨格の比較や、それらと私たちの聴覚をつかさどっている耳小骨との関係であるライヘルト説を紹介することで、進化や相同性について学習するというプログラムを提示した。

まず、事前アンケートの結果、参加者はライヘルト説そのものについてはまったく知らなかった。しかしプログラム終了後には、魚と私たちの共通点について、7割の参加者がライヘルト説をあげた。さらに、プログラムを終えて、最もおどろいたり感じたりしたことを聞いたところ、約半数の参加者がライヘルト説をふくめた進化をあげた。これらの結果から、本研究のプログラムは、相同や進化に関する理解を深めるという意味では、その目的は達成できたと考えられる。

しかし問題点もあった。両生類あるいは爬虫類、鳥類などの骨格を紹介できなかったことである。元々透明標本は小型脊椎動物用である[1)]ので、これらも透明標本を用いて観察できるとさらに理解が深まると期待できる。ただ、後述するように、透明標本の大きさには限界があることも問題である。

透明標本を使うことによって、予期しない効果も得られた。ひとつは骨格系に興味をもってもらえたことである。観察目標とした顎の周りの骨だけではなく、軟骨と硬骨の違いや脊椎骨、あるいは胸鰭を支えている骨などに興味をもったことを、事後の問11や13などで答えている。もう一つは系統である。とくにサメとイワシと私たちとではイワシと私たちが単系統を構成する、ということにはかなり驚いていた。

3．透明標本を活用するための今後の展開

今回のイベントでは、とくに感想などをもとめるアンケートは作成していなかったものの、最後の問14の「質問や疑問」の欄に、2 割強の参加者が「楽しかった」とか「面白かった」と答えた。しかも、その理由として「興味がわいた」とか「難しかった」あるいは「またやりたい」と記述していた。本研究の参加者は、年齢層は広いものの、好奇心のある方が多く、知的な刺激を求めていることがうかがえた。

こうした要求に答えるためにも、透明標本を活用することは有効である。まずは顕微鏡で観察することが重要である。たとえば市販されていたり博物館で展示されていたりする透明標本は、ただ眺めて、なんとなく綺麗だな、という感想で終わってしまう。透明な体に青と赤で染色された多様な形の骨格の細密部を顕微鏡で観察すると、かなり刺激的であることは、本研究でも実証された。

しかし課題はプログラムである。明確な目的をもって、科学的な根拠に裏打ちされた観察項目を提示しないと、単に「美しい透明標本」で終わってしまう。そのためにも周到な準備をしたプログラムの作成が必要である。本研究でも、ライヘルト説という、観察も考え方も少し難しい課題に取り組んだが、準備したプログラムによって、参加者は理解もし満足もしたと考えられる。

さらに、本プログラムと前報[1)]のプログラムとを統合することも可能である。つまり、魚類の顎の骨格を観察するとともに消化管の内容物も確認するのである。これは、同じ種類の魚類でも発育段階が異なれば顎の形も消化管の内容物も異なるからである。また種類が異なる場合も同様である。ただ問題は、透明標本は大きな個体には向かないということである。せいぜい数 cm、10cm くらいまでが限界であるが、逆に数 mm 程度のかなり小さな個体でも観察は可能である。

もうひとつの課題は、教育プログラムを学校で実施するのか、あるいは生涯学習の場で実施するのか、といった問題である。本研究では、この区別を考慮しないで実施した。適用する範囲を考慮に入れた「透明標本プログラム」の作成も今後の課題である。

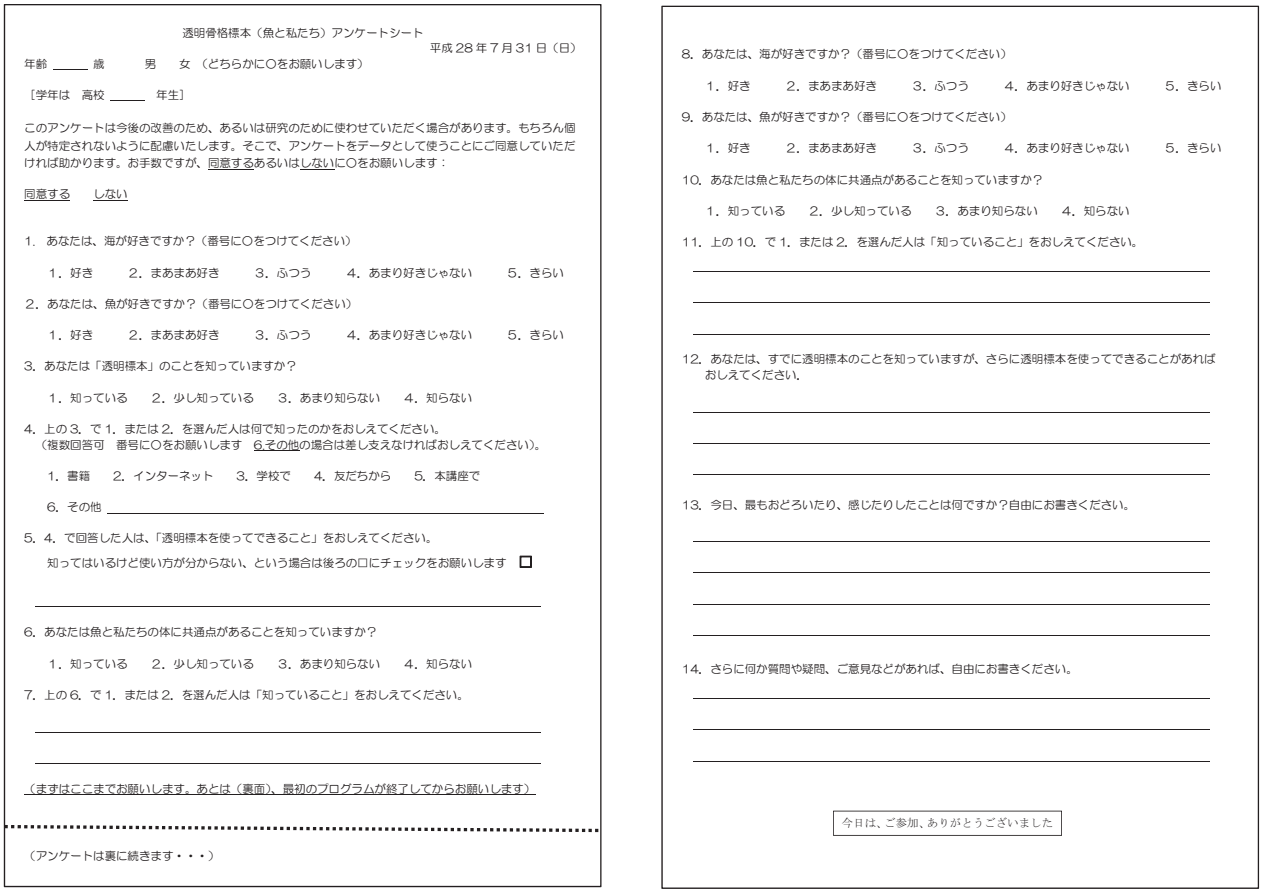
謝辞

本研究のアンケートに快く答えてくださった参加者の方々に感謝いたします。本研究をおこなうにあたっては多くの方々にご協力をいただきました。ここにお名前を記して感謝の意を表します：港区教育委員会および同区立図書館のみなさん；玉城守雄さんおよび図書流通センターのみなさん;澄川冬彦先生および奈良学園高等学校のみなさん;東京海洋大学魚類学研究室のみなさん。本研究は JSPS 科研費 15K00654の助成を受けて実施しました。

参考文献

1）河野　博，谷田部明子，加瀬喜弘，斉藤有希．魚類骨格透明標本は海洋環境教育～海の中の「食う・食われる」を覗いてみよう～に有効である．東京海洋大学研究報告，2016，(12)，p. 4 -11.
2）表　潤一，斉藤千映美．身近な動物個体を用いた透明骨格標本の作製．宮城教育大学環境教育研究紀要，2015，17，p. 31-38.
3）松原喜代松, 落合 明, 岩井 保. 新版魚類学(上). 恒星社厚生閣, 東京，1979，375 p.
4）ポルトマン，A．脊椎動物比較形態学．島崎三郎（訳），岩波書店，東京，1979，344 p.
5）倉谷 滋 . 動物進化形態学. 東京大学出版会, 東京, 2004, 611 p.
6）遠藤秀紀．人体 失敗の進化史．光文社新書258, 光文社, 東京, 2006，251 p.
7）池田博明．インターネット公開授業．池田博明のホームページ，http://hispider.la.coocan.jp/ikedahome.htm（accessed 2016-09-16）.
8）生物教材製作所．⑤耳小骨の起源．骨格標本，同製作所ホームページ，http://www.k4.dion.ne.jp/~soilshop/（accessed 2016-09-16）.
9）石田博幸．耳からわかる私たちの先祖，それは魚！．平成22年度蒲郡市生命の海科学館事業報告，2011，p. 27，http://www.city.gamagori.lg.jp/site/kagakukan/lecture2010.html（accessed 2016-09-16）.
10）有馬陽介，本田宏美，広瀬公美子，下江宰司，里田隆博．鰓弓軟骨発生模型の制作．形態・機能，2012，11，p. 10-16.
11）Liem, K. F., W. E. Bemis, W. F. Walker, Jr., L. Grande. Functional anatomy of the vertebrates An evolutionary perspective（third edition）. Harcourt College Publishers, 2001, 703 p.

12）岩井　保．魚学入門．恒星社厚生閣，東京，2005，219 p.
13）河野 博，鵜川 亮，星野宏勧．透明標本．東京湾の魚類，河野 博（監修），平凡社，2011，p. 325-330.
14）河野 博，茂木正人．コラム：魚類透明骨格標本の作り方．東京海洋大学海洋科学部附属水産資料館ホームページ，http://www.s.kaiyodai.ac.jp/museum/public_html/exhibitions/exhib_fishes_sub/column_fish_skeleton.htm（accessed 2016-09-16）.
15）京都大学．骨標本で外来魚を駆除．京都大学研究成果，2014，http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2014/141217_1.html（accessed 2016-09-16）.
16）兵庫県立人と自然の博物館．学んで魅せる標本展，同博物ホームページ，2015，http://www.hitohaku.jp/exhibition/planning/hilyouhon.html（accessed 2016-09-16）.
17）東京海洋大学海洋科学部付属水産資料館．さかなの透明標本展，同資料館ホームページ，2010-2011，http://www.s.kaiyodai.ac.jp/museum/public_html/Events/SpExhibition/kikaku10-11.html（accessed 2016-09-16）.
18）山口県立山口博物館．脊椎動物透明骨格標本．博物館学校地域連携教育支援事業．同博物館ホームページ，http://hakugaku.jp/kangai/kashidasi.html（accessed 2016-09-16）.
19）加藤陽一郎．透明骨格標本プラスチックの開発と授業での活用．早稲田大学高等学院研究誌，60，2016，p. 67-73．早稲田大学 DSpace，http://hdl.handle.net/2065/49050（accessed 2016-09-16）.



透明骨格標本（魚と私たち）アンケートシート

平成 28 年 7 月 31 日（日）

年齢 ＿＿＿ 歳　　男　女（どちらかに○をお願いします）

［学年は　高校 ＿＿＿ 年生］

このアンケートは今後の改善のため、あるいは研究のために使わせていただく場合があります。もちろん個人が特定されないように配慮いたします。そこで、アンケートをデータとして使うことにご同意していただければ助かります。お手数ですが、同意するあるいはしないに○をお願いします：

同意する　しない

1．あなたは、海が好きですか？（番号に○をつけてください）

1．好き　2．まあまあ好き　3．ふつう　4．あまり好きじゃない　5．きらい

2．あなたは、魚が好きですか？（番号に○をつけてください）

1．好き　2．まあまあ好き　3．ふつう　4．あまり好きじゃない　5．きらい

3．あなたは「透明標本」のことを知っていますか？

1．知っている　2．少し知っている　3．あまり知らない　4．知らない

4．上の 3．で 1．または 2．を選んだ人は何で知ったのかをおしえてください。
（複数回答可　番号に○をお願いします　6.その他の場合は差し支えなければおしえてください）。

1．書籍　2．インターネット　3．学校で　4．友だちから　5．本講座で

6．その他 ＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

5．4．で回答した人は、「透明標本を使ってできること」をおしえてください。
知ってはいるけど使い方が分からない、という場合は後ろの口にチェックをお願いします □

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

6．あなたは魚と私たちの体に共通点があることを知っていますか？

1．知っている　2．少し知っている　3．あまり知らない　4．知らない

7．上の 6．で 1．または 2．を選んだ人は「知っていること」をおしえてください。

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

（ますはここまでお願いします。あとは（裏面）、最初のプログラムが終了してからお願いします）

（アンケートは裏に続きます・・・）

8．あなたは、海が好きですか？（番号に○をつけてください）

1．好き　2．まあまあ好き　3．ふつう　4．あまり好きじゃない　5．きらい

9．あなたは、魚が好きですか？（番号に○をつけてください）

1．好き　2．まあまあ好き　3．ふつう　4．あまり好きじゃない　5．きらい

10．あなたは魚と私たちの体に共通点があることを知っていますか？

1．知っている　2．少し知っている　3．あまり知らない　4．知らない

11．上の 10．で 1．または 2．を選んだ人は「知っていること」をおしえてください。

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

12．あなたは、すでに透明標本のことを知っていますが、さらに透明標本を使ってできることがあればおしえてください．

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

13．今日、最もおどろいたり、感じたりしたことは何ですか？自由にお書きください。

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

14．さらに何か質問や疑問、ご意見などがあれば、自由にお書きください。

＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

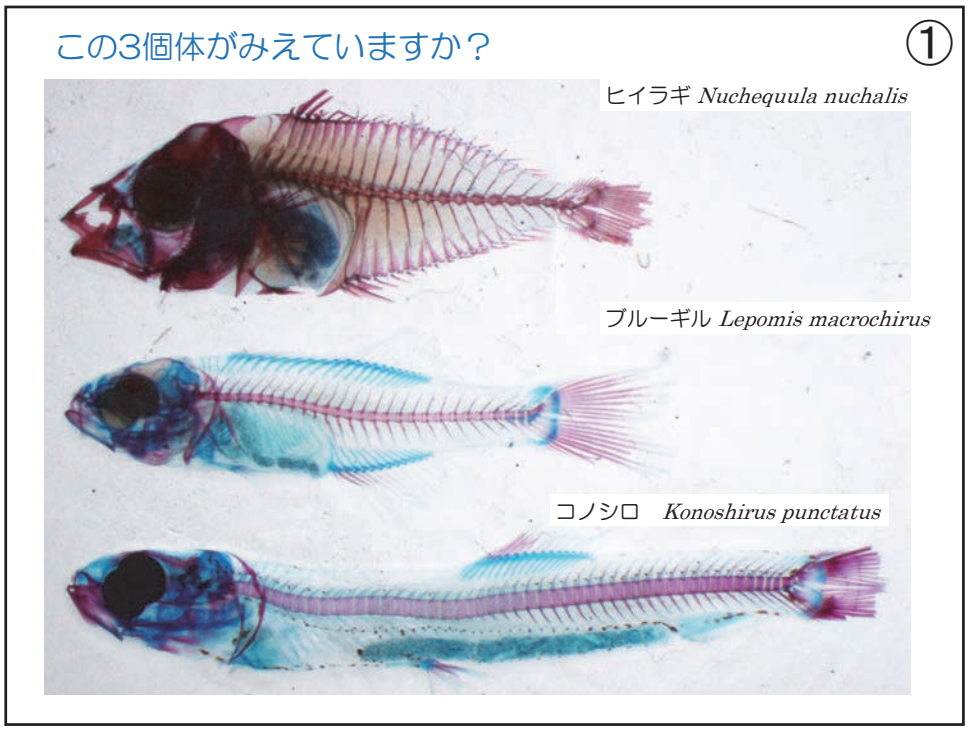
＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

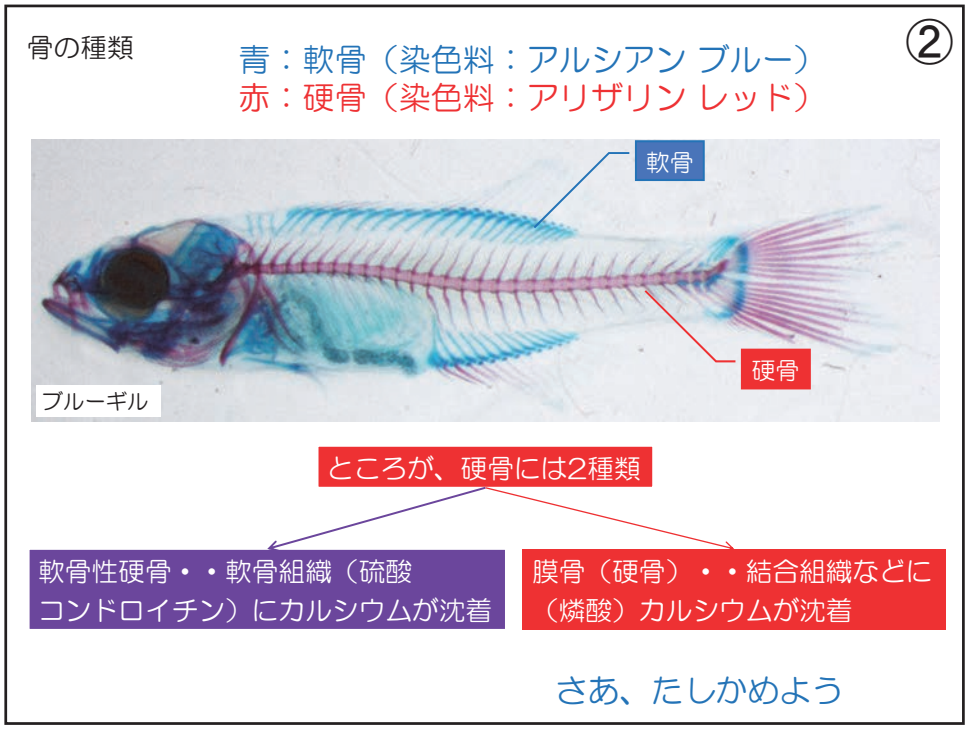
＿＿＿＿＿＿＿＿＿＿

今日は、ご参加、ありがとうございました

附図1．アンケート用紙（左は表面、右は裏面で、両面印刷を施した用紙を使用した）

附図２．イベントで使用したパワーポイントの一部





③

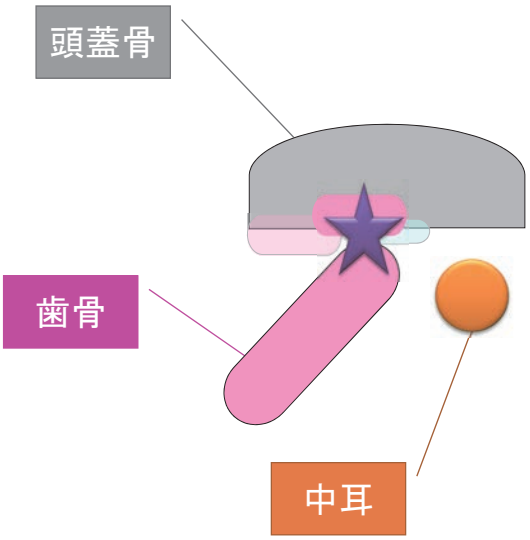
今日は２つ
・サメの顎と魚の顎
・私たちとの関係（原型をみる）
［変化の過程はみえません→透明標本から類推して
楽しんでください］
を記憶にとどめてください！

まず、変なことを聞きましょう。

みなさんの『顎と頭蓋骨』は
どのように接続していますか？

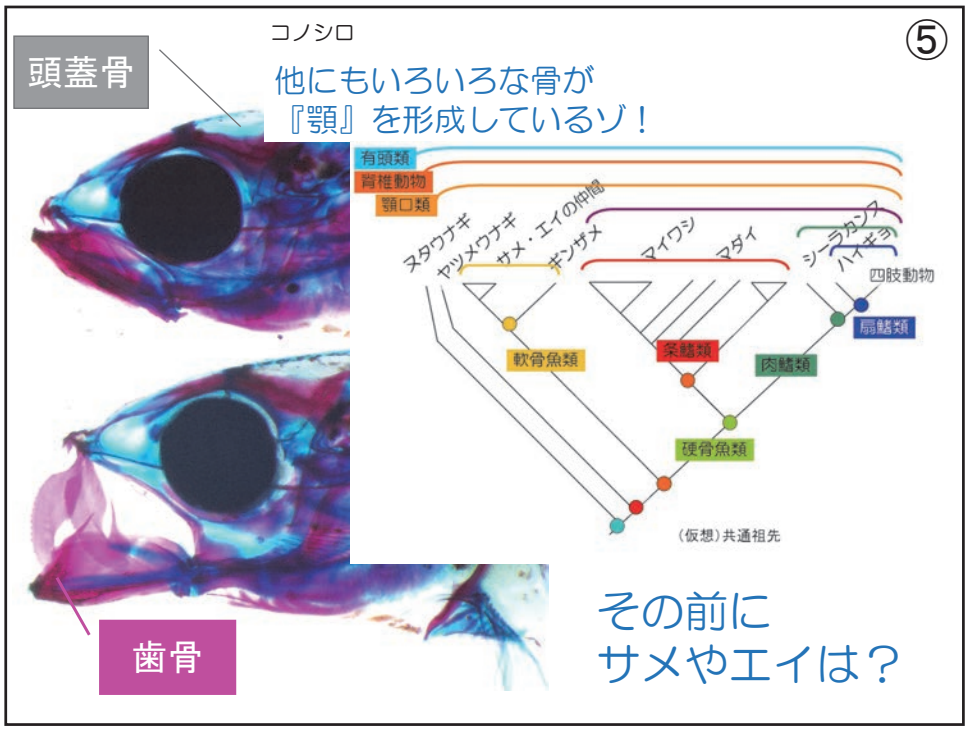
④

みなさんの
『顎と頭蓋骨』
の接続
・顎は歯骨だけ
・直接関節



あれ、魚は？

標本で確かめてみましょう


⑤
コノシロ
頭蓋骨
他にもいろいろな骨が
『顎』を形成しているゾ！
有頭類
脊椎動物
顎口類
ヌタウナギ
ヤツメウナギ
サメ・エイの仲間
ギンザメ
マイワシ
マダイ
シーラカンス
ハイギョ
四肢動物
扇鰭類
軟骨魚類
条鰭類
肉鰭類
硬骨魚類
（仮想）共通祖先
歯骨
その前に
サメやエイは？

⑥
上顎（口蓋方軟骨）
実物もあります
下顎（メッケル軟骨）
アオザメの顎
キケン
歯にさわらないでください！

スズキの骨格

⑦

はい、上顎にあります

↓

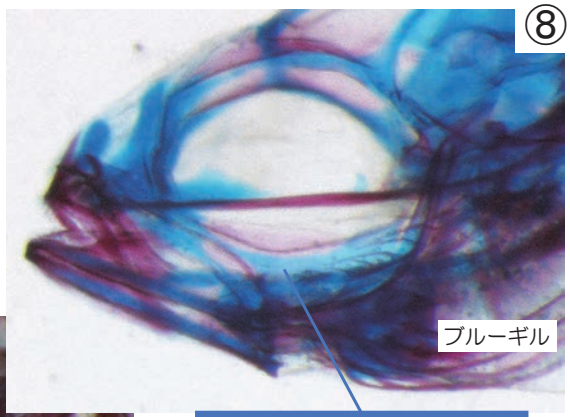
上顎（口蓋方軟骨）

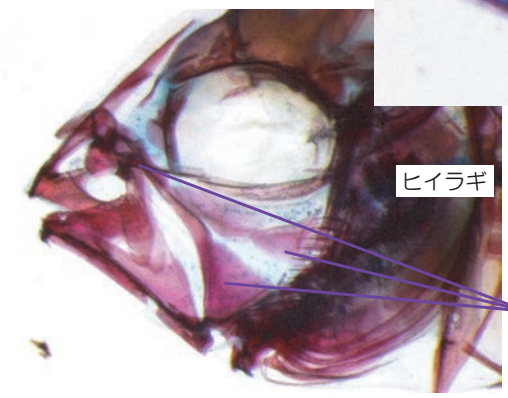
骨の名前［岩井（2005）から抜粋］
3前上顎骨　4主上顎骨　6歯骨　7角骨　8後関節骨　9口蓋骨
10外翼状骨　11内翼状骨　12後翼状骨　13方骨　14接続骨　15舌顎骨

みんなの標本で見てみよう

⑧

眼はとった方が見やすい





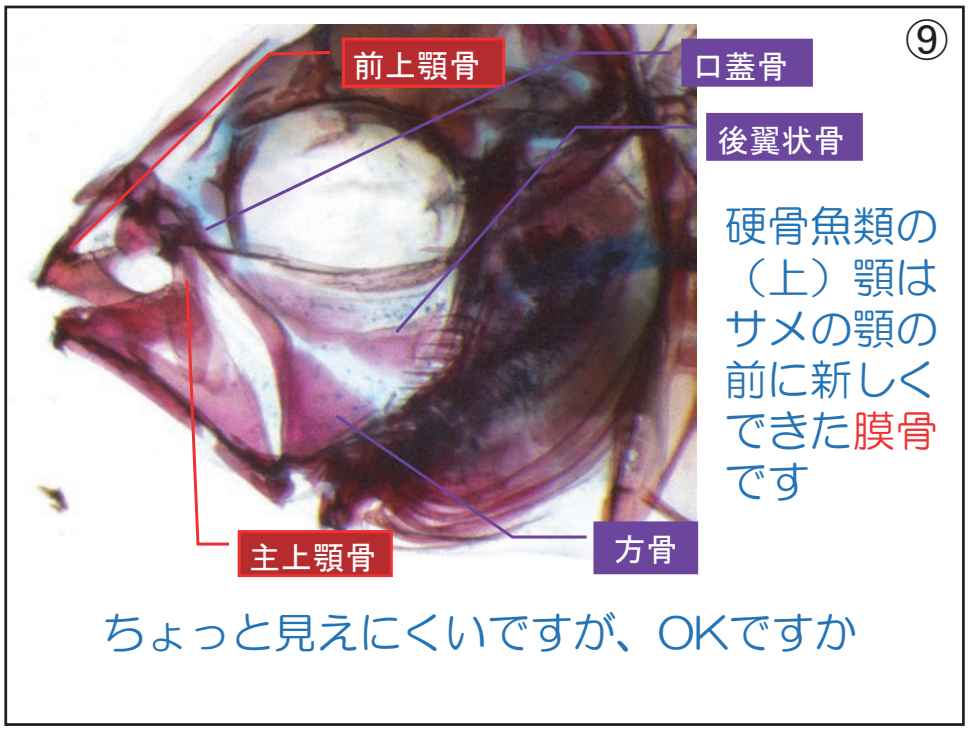
口蓋方軟骨（左右あり）
（＝サメの上顎ですよ）

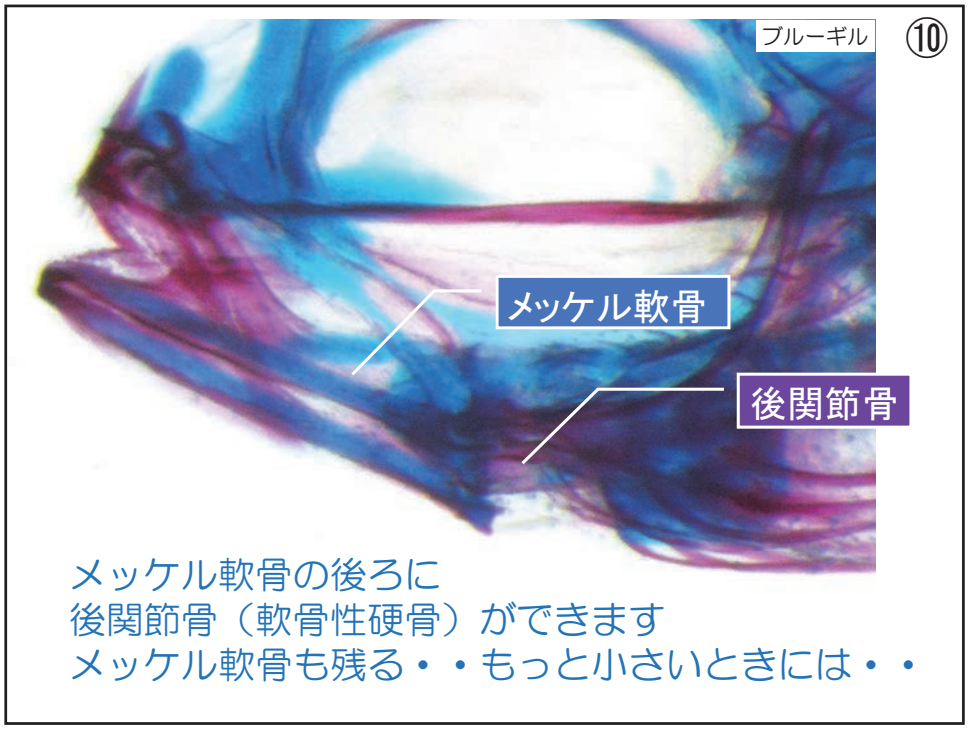
成長とともに

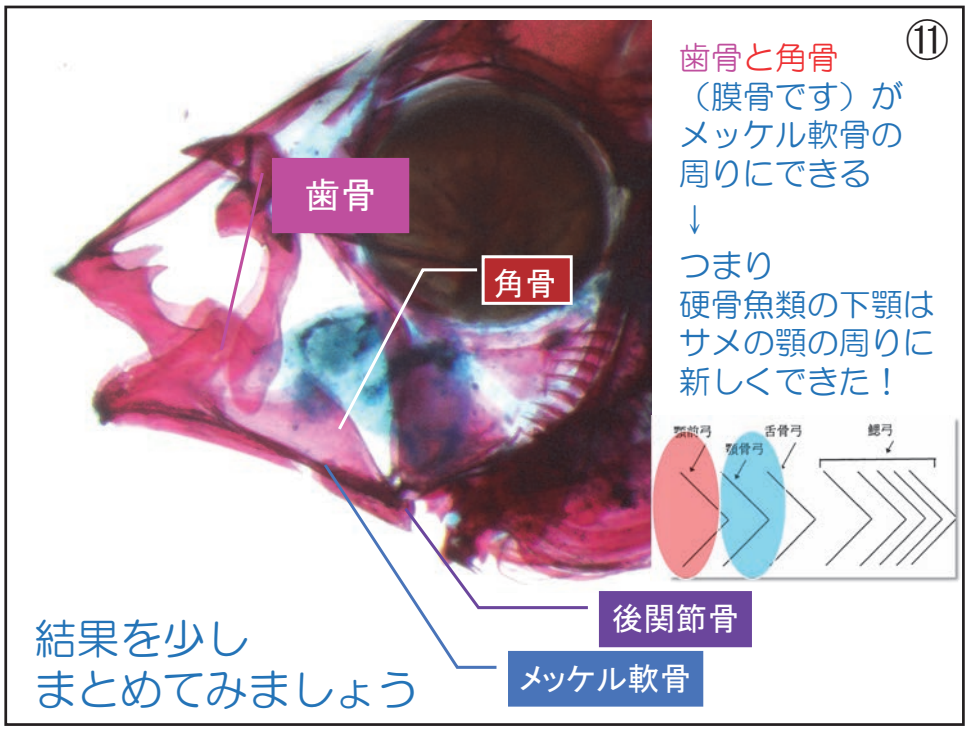
↓

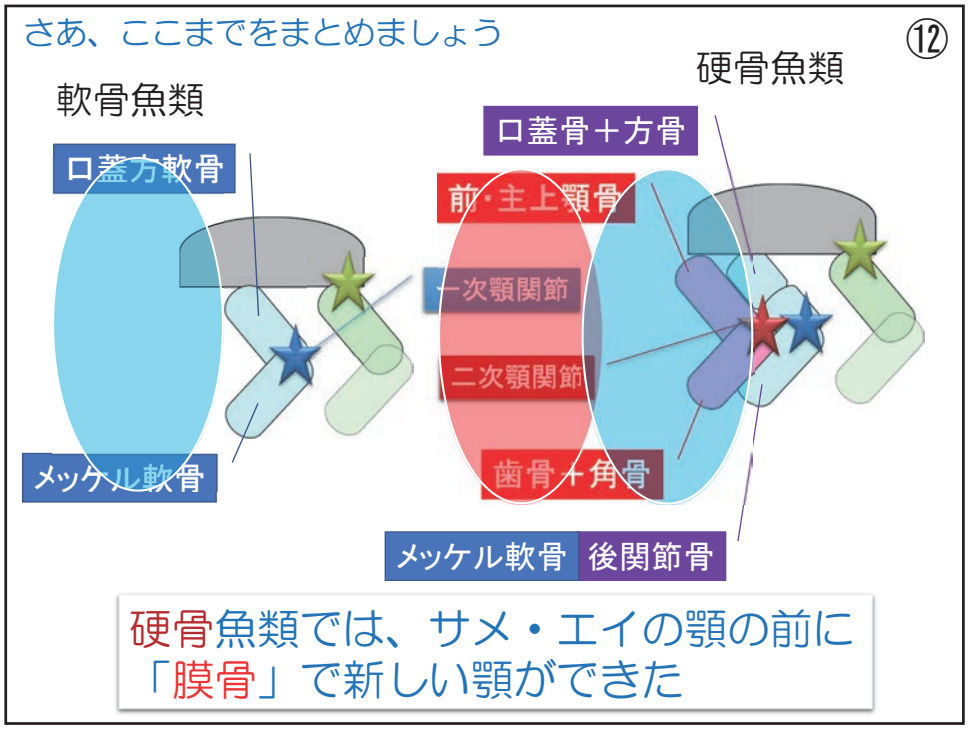
口蓋骨と方骨、後翼状骨になる
（軟骨性硬骨）

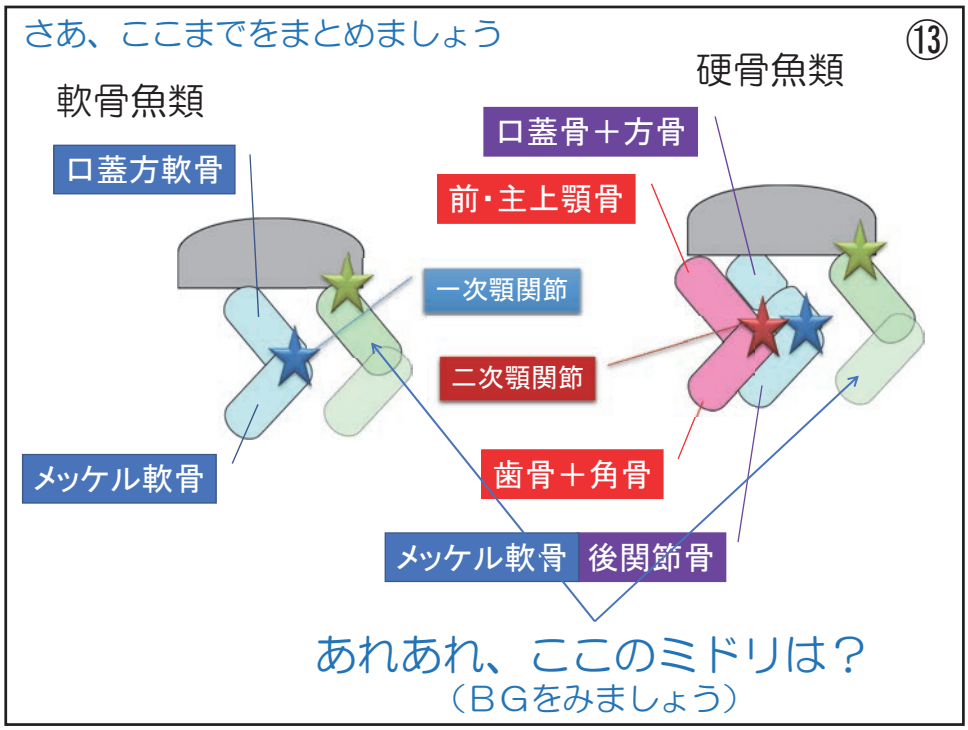
ブルーギルをみましょう

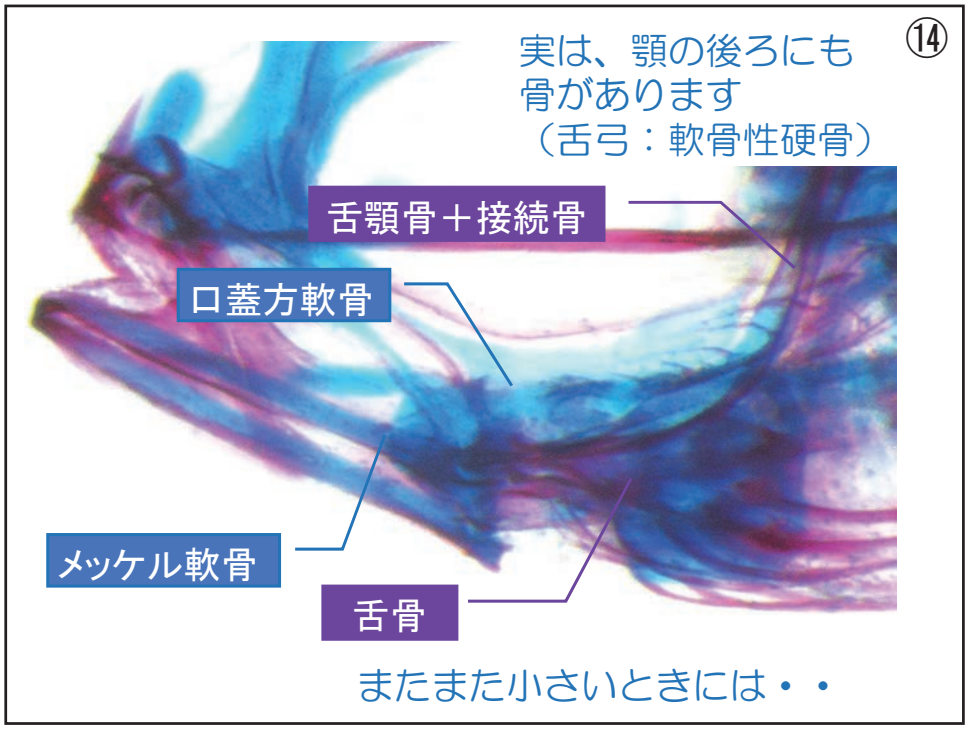

⑨
前上顎骨
口蓋骨
後翼状骨
硬骨魚類の（上）顎はサメの顎の前に新しくできた膜骨です
主上顎骨
方骨
ちょっと見えにくいですが、OKですか

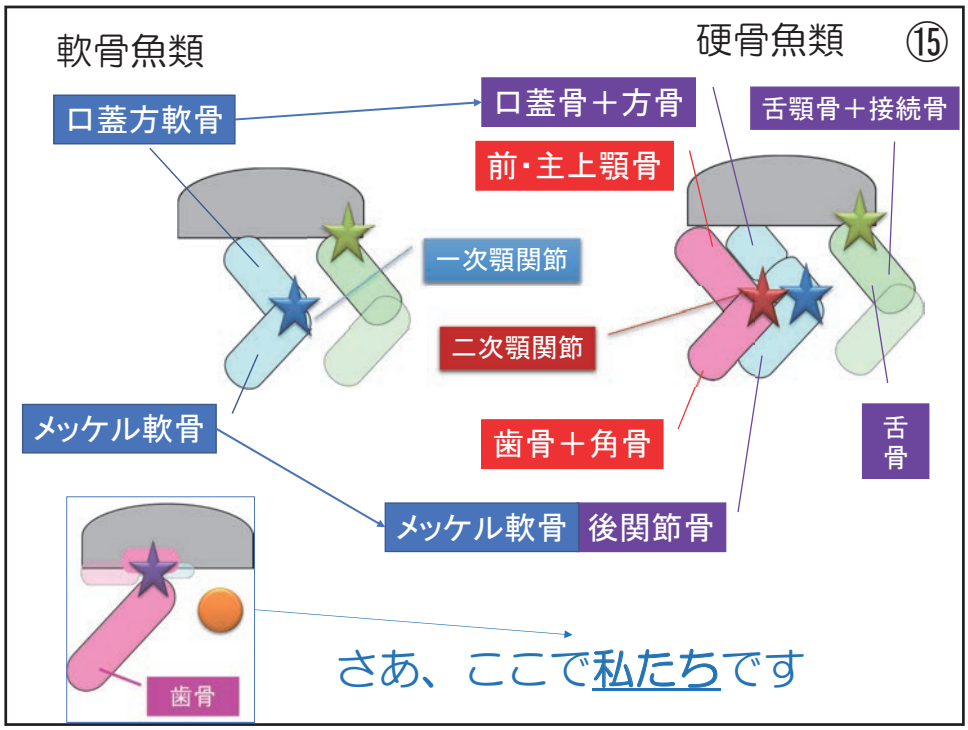

ブルーギル
⑩
メッケル軟骨
後関節骨
メッケル軟骨の後ろに
後関節骨（軟骨性硬骨）ができます
メッケル軟骨も残る・・もっと小さいときには・・

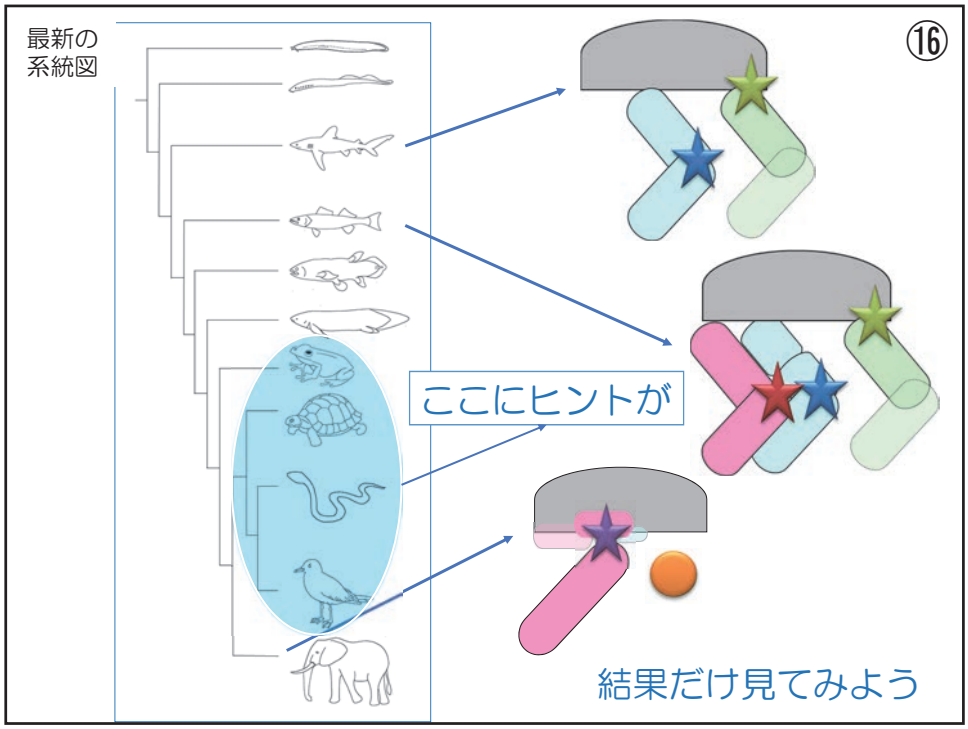

⑪
歯骨と角骨
（膜骨です）が
メッケル軟骨の
周りにできる
↓
つまり
硬骨魚類の下顎は
サメの顎の周りに
新しくできた！
歯骨
角骨
後関節骨
メッケル軟骨
舌骨弓
鰓弓
結果を少し
まとめてみましょう

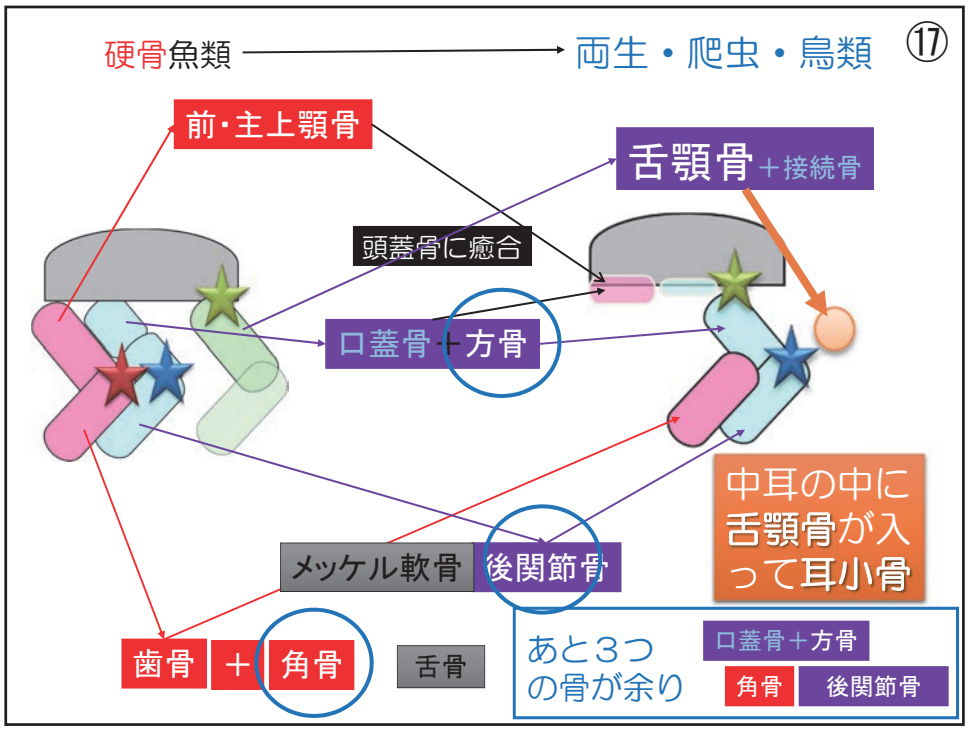

さあ、ここまでをまとめましょう
⑫
軟骨魚類
硬骨魚類
口蓋方軟骨
口蓋骨＋方骨
前・主上顎骨
一次顎関節
二次顎関節
歯骨＋角骨
メッケル軟骨
メッケル軟骨
後関節骨
硬骨魚類では、サメ・エイの顎の前に
「膜骨」で新しい顎ができた

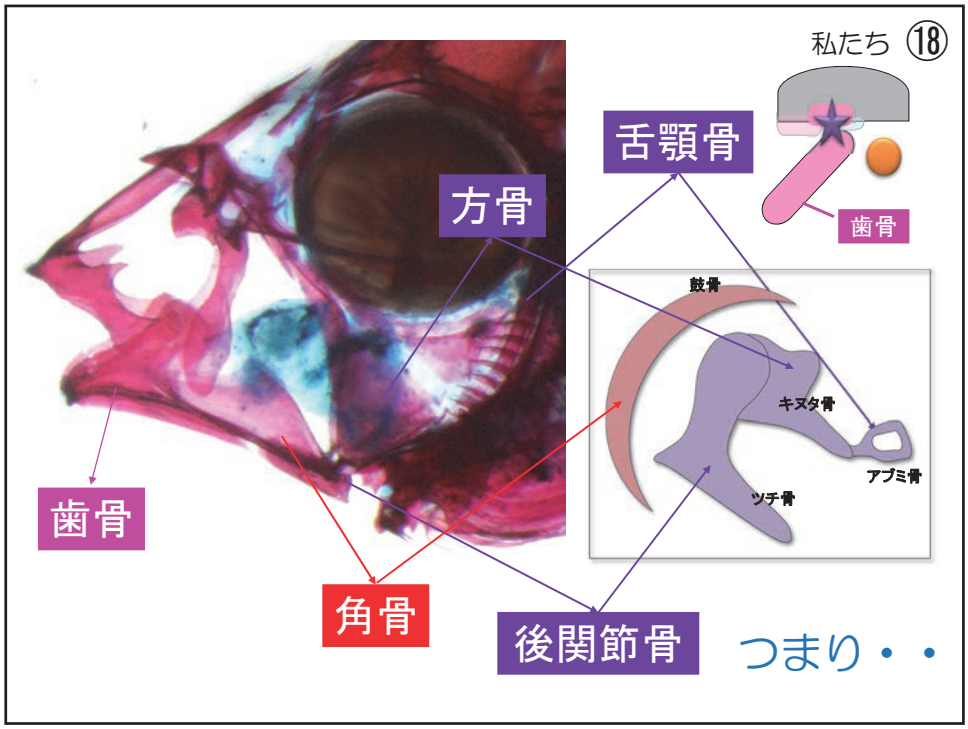

さあ、ここまでをまとめましょう
⑬
軟骨魚類
硬骨魚類
口蓋方軟骨
口蓋骨＋方骨
前・主上顎骨
一次顎関節
二次顎関節
メッケル軟骨
歯骨＋角骨
メッケル軟骨
後関節骨
あれあれ、ここのミドリは？
（BGをみましょう）

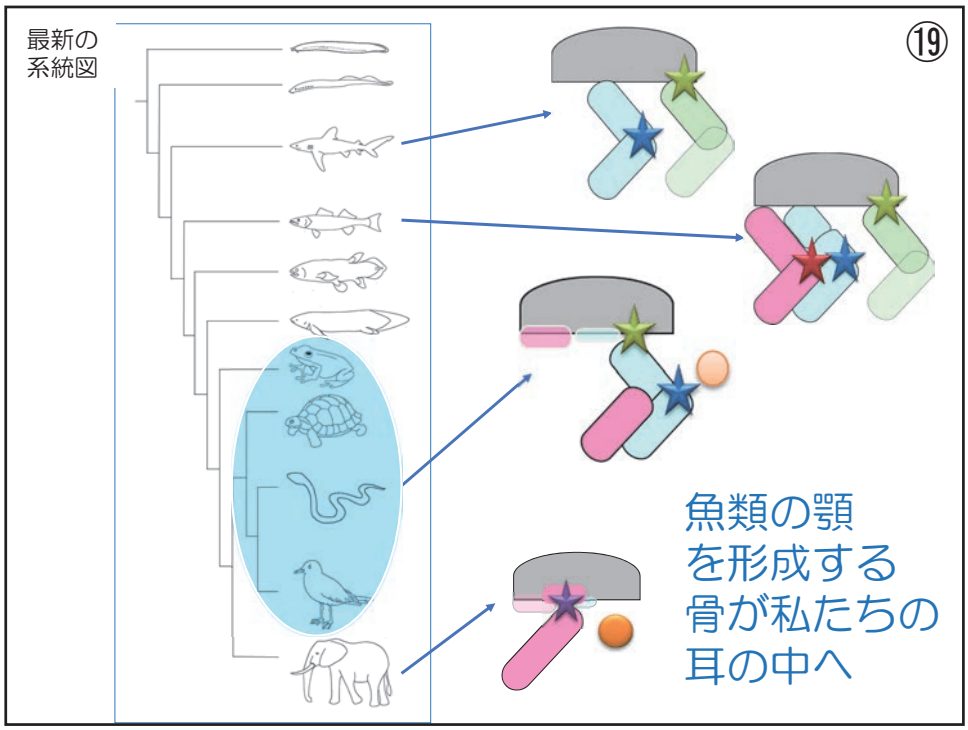

⑭
実は、顎の後ろにも
骨があります
（舌弓：軟骨性硬骨）
舌顎骨＋接続骨
口蓋方軟骨
メッケル軟骨
舌骨
またまた小さいときには・・


軟骨魚類
硬骨魚類
⑮
口蓋方軟骨
口蓋骨＋方骨
舌顎骨＋接続骨
前・主上顎骨
一次顎関節
二次顎関節
メッケル軟骨
歯骨＋角骨
舌骨
メッケル軟骨
後関節骨
歯骨
さあ、ここで私たちです


最新の
系統図
⑯
ここにヒントが
結果だけ見てみよう


硬骨魚類
両生・爬虫・鳥類
⑰
前・主上顎骨
舌顎骨＋接続骨
頭蓋骨に癒合
口蓋骨＋方骨
中耳の中に舌顎骨が入って耳小骨
メッケル軟骨
後関節骨
歯骨
＋
角骨
舌骨
あと3つの骨が余り
口蓋骨＋方骨
角骨
後関節骨


私たち
⑱
舌顎骨
歯骨
方骨
鼓骨
キヌタ骨
アブミ骨
ツチ骨
歯骨
角骨
後関節骨
つまり・・



⑳

今日は２つ

・サメの顎と魚の顎

・私たちとの関係（原型をみる）

［変化の過程はみえません→透明標本から類推して
楽しんでください］

何が・・何に・・は　ともかく
とにかく魚の骨が
私たちの耳の中に入り込んだ・・

もう一度　アンケートをお願いします。
途中の点線 -----から下です

魚類骨格透明標本を用いた理科教育の例
－顎の骨の変化を観察して魚と私たちとの関係を探ろう－

河野　博[*1・2]・植原　望[*2]

（[*1・2]東京海洋大学学術研究院海洋環境学部門
[*2]東京海洋大学魚類学研究室）

要旨：　透明骨格二重染色標本が、理科教育、とくに進化の理解を深めるための教材として有効かどうかを、事前と事後のアンケートにもとづいて調査した。対象としたのは、４つのイベントに参加した13歳から76歳の男性21名、女性27名、計48名である。プログラムは、顕微鏡の使い方と透明標本の基礎知識（骨の種類、骨格を観察するための方法、透明標本の作製方法と歴史）、および二つからなる主題の観察（サメの顎と魚の顎､および私たちとの関係［ライヘルト説］）の順に進めた。アンケートによって、ほぼ全員が、透明標本を観察することによって魚類の顎の骨格と私たちの中耳骨との関係であるライヘルト説を理解したことが判明した。さらに自由記述では、進化自体の驚きや魚と私たちの系統関係、さらには透明標本の美しさに興味津々であることがうかがえた。

キーワード：　透明骨格標本，進化，骨格観察，理科教育，ESD（education for sustainable development）