



第 66 回東京大学農学部

公開セミナー

「 海と農学 」

講演要旨集

~~~~~ プログラム ~~~~~

#### 【 開会の挨拶 】

挨拶 研究科長 中嶋 康博

13:35 ~ 14:15

#### ゲノムと水産と予測

附属水産実験所

教授 菊池 潔

14:15 ~ 14:55

#### 魚の鮮度の価値と可能性に迫る

農学国際専攻

准教授 阪井 裕太郎

#### 【 休憩（15分） 】

15:10 ~ 15:50

#### 400年生きる魚と1年で死ぬ魚:水の生き物から探る老化と寿命の不思議

水圏生物科学専攻

准教授 木下 滋晴

15:50 ~ 16:30

#### 海と川で繰り広げられる魚たちの多様な旅

情報学環／農学生命科学研究科

准教授 黒木 真理

#### 【 閉会の挨拶 】

司会 准教授 中西 もも

日時 2024年6月8日（土） 13:30 ~ 16:35

場所 ハイブリッド開催（現地：弥生講堂一条ホール）

主催 東京大学大学院農学生命科学研究科・農学部

共催 （公財）農学会

# ゲノムと水産と予測

附属水産実験所 教授 菊池 潔

「もはや日本は水産後進国」と言ったのは、2015年の農林水産大臣でした。これが本当かどうかはともかく、今、日本が「養殖先進国」とみなされることは残念ながら少ないかとも思います。本講演では、まず、世界の養殖産業・研究の現状を俯瞰してみたいとおもいます。あくまで水産遺伝学者の目に映った現状ですので、専門が別の方の認識は少し異なるかもしれません。そこはご容赦いただければとおもいます。次に、養殖研究に大きなインパクトを与えた技術革新のひとつである、ゲノム解読技術の急速な進展について、自分たちの研究例を交えながら解説します。最後に、養殖研究に大きなインパクトを与えたもうひとつの技術革新であるゲノム予測について、欧州養殖先進国の例や自分たちの研究を例にとって解説します。

## 1. 養殖は日本以外では成長産業

水産業は、漁業（漁獲漁業）と養殖業のふたつに大きく分けられます。世界レベルで見ると、このふたつの水産業のうち、漁獲漁業は停滞していますが、養殖業が急成長しています。養殖の成長地域は世界に複数ありますが、欧州を中心とする圏域の興隆が、我々の参考になりそうです。生物系・環境系・工学系・情報系の研究者たちが、その産業発展に大きく貢献しているように見えるからです。これらの研究の一部については、3つめの話題のところで触れる予定です。

## 2. ゲノム配列解読と単純な予測

次世代シーケンシング技術は、2010年代になってから急速に広まった技術で、生物学の様々な分野に革命をもたらしています。これにより、特定種を代表する1個体のゲノム配列をすばやく高精度に決定することができるようになり、さらに、個体間にみられるゲノム配列の差を迅速に検出することもできるようになりました。

私たちは2000年代初頭から水産生物の性決定を研究していたという背景があったので、この技術を性決定遺伝子の同定に利用してきました。水産生物の多くは雌雄で利用価値が異なりますが、その外見から雌雄を判別することが困難なことが多く、なんとかして性を判別したいという生産者側の要望があるのです。特に、生殖腺が未発達の若齢期に、その個体が、将来、卵巣をもつのか精巣をもつのかを知っておきたい（予測したい）という要望が顕著です。我々の研究成果は、その応用的な価値はいうまでもないのですが、魚とほ乳類の性決定機構の違いを浮き彫りにするなど、基礎生物学的にも興味深いものでした。

### 3. 複雑な予測

ある個体の性の表現型（つまりメスになるかオスになるか）の予測や、それらの子どもたちの性比の予測は、性決定遺伝子（多型）を見つけてしまえば、あとは簡単にできます。ところが、ひとつの遺伝子（多型）が表現型の個体差を強く支配しているような生命現象はごくまれで、多くの表現型は多数の遺伝子の影響をうけています。ある個体の遺伝的能力（例えば成長が良いなど、ヒトにとって好ましい能力）を予測するためには、ゲノム配列上にある膨大な個体差と表現型の個体差を結びつけることが必要になってきます。この予測学を、ゲノムが読めるようになるはるか前の時代から主導してきたのが、育種学者たちです。

そして、ゲノム上の膨大な個体差をすばやく検出できるようになった今、「ゲノム情報を利用した予測学」が注目を集めています。これは「進化を予測する学問」と言いかえてもよいかもしれません。例えば、ゲノム情報を利用して「少ない餌で早く育つ集団」を人工的に進化させることができれば、その成果は産業の発展にも環境負荷の低減にも寄与します。また、この考え方を天然の集団に適用すれば、温暖化が進んだときに絶滅しやすい地域集団はどれか？といった問いにも答えられるようになるかもしれません。このゲノム予測学の理論的基盤をつくったのが欧州・豪州の研究者たちで、これを養殖研究にいち早く導入したのが欧州の研究者たちでした。

われわれ水産実験所も、細谷先生や平瀬先生を中心に、この「ゲノム情報を利用した予測学」に取りくんでいます。まずは欧州の研究成果を謙虚に学び、さらには、それを超えることはできないかなと考えながら研究をおこなっているところです。

注) 本稿では「予測」という用語を、厳密には定義しないで使っています。

# 魚の鮮度の価値と可能性に迫る

農学国際専攻 准教授 阪井 裕太郎

## 1. 鮮度と情報の非対称性

日本人の食生活において、水産物は古来より重要な地位を占めてきた。しかし、近年では魚食離れが進行しており、それに伴う国民の健康水準や日本の食文化の継承への影響が懸念されている。従来の研究では、この原因として食の洋風化や住環境の変化など様々な説明がなされているが、いずれも解決策を提示するには至っていない。これに対し、私が提唱している新しい仮説は、魚食離れの原因の一つは「情報の非対称性」であるというものだ。

「情報の非対称性」とは、売手（小売店）の方が買手（消費者）よりも商品の品質に関する正確な情報を有している状況を指す。水産物の品質は肉類に比べて消費者に分かりにくく、ここに「情報の非対称性」が存在する。この状況下では、価格が商品に見合うかどうか買手が判断できず、結果としてその市場が縮小してしまう（＝魚食離れ）ことが経済理論で示されている。一方、「情報の非対称性」を解消することで市場の拡大や品質の向上を実現することも可能である。

歴史を振り返ると、魚食離れと消費者の魚の購入場所の変化（個人商店→スーパー）は同時並行で起きてきたことが分かる。個人商店では店主とのコミュニケーションを通じて水産物の品質情報が伝達されやすいが、スーパーにおける品質情報伝達は極めて限定的である。すなわち、魚食離れの原因の一端が情報の非対称性の悪化であるという仮説は歴史的な経緯と整合性がある。

それでは生鮮水産食品の購入に際して消費者が重視しているけれども判別できないものは何か。鮮度である。鮮度を測定し、店頭で商品に表示してやれば、消費者が生鮮水産物を買う際に直面する不確実性を減らすことができる。これによって魚食離れを緩和・解消することができるのではないだろうか。

## 2. Fish Analyzer™ Pro

鮮度の測定法には様々なものがある。だが、店頭における鮮度表示を最終的な着地点と想定する場合、安価であること、その場ですぐに測定できることや、サンプルを傷つけないことなどが重要な条件となる。この条件を満たす鮮度測定装置が近年開発された。それが大和製衡

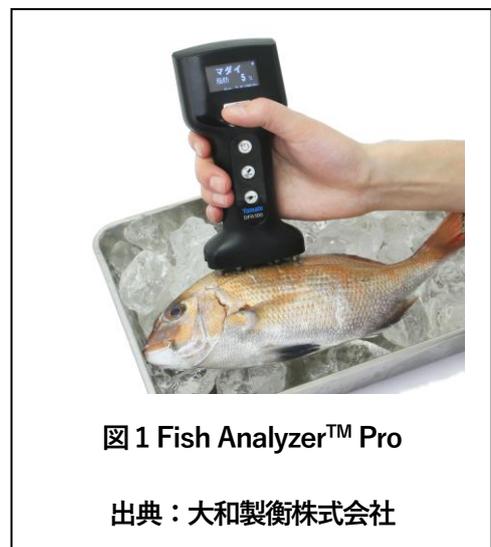


図1 Fish Analyzer™ Pro

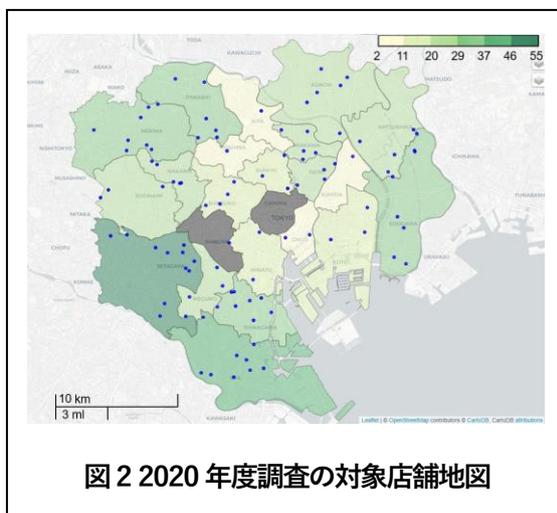
出典：大和製衡株式会社

株式会社の Fish AnalyzerTM Pro である。この機器は電気抵抗から鮮度を推定するもので、約 4 秒で非破壊で測定できる点が革新的である。鮮度は A-D の 4 段階で表示され、A-B が主に生食用、C-D が主に加熱用と判断される。この機器が開発されたことで、鮮度表示というアイデアが実際に検証可能になったのである。

### 3. 鮮度に価値はあるか？

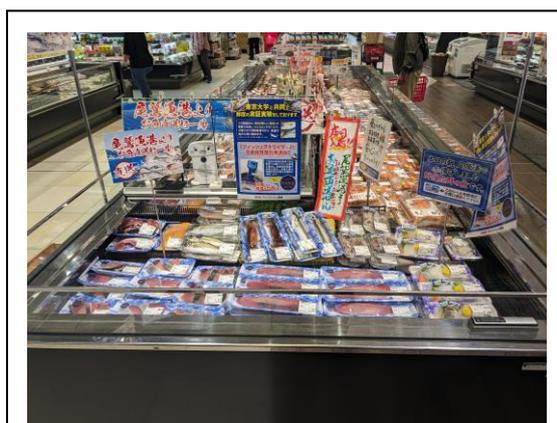
そもそも鮮度に価値はあるのだろうか？

我々は電話帳より都内の鮮魚販売店を 100 店舗ランダムサンプリングし、2020 年 7 月-9 月にかけて丸のマアジとマイワシを 3 尾ずつ購入した。Fish analyzer によって鮮度を測るとともに、価格、体長、産地等の属性を記録した。ヘドニック価格分析により、鮮度の市場価値を分析した。その結果、マアジでは鮮度値が (0-1 に分布) が 0.1 上がるごとに価格が 2 割程度上昇する一方で、マイワシでは鮮度値と価格に有意な関係はないことが分かった。マアジでは実際に鮮度に付加価値がついて市場流通していることが分かったのである。



では鮮度が全ての消費者に見えるように表示することでさらに付加価値が付くのではないだろうか。この仮説を検証するために、我々は 2022 年に学内で販売実験を行った。鮮度の異なるマダイの刺身パックを用意し、調査会社から派遣してもらった一般の消費者に購入してもらったのである。参加者は実際に支払をすることから、商品を真剣に選ぶことが期待される。実験の結果、鮮度がよい商品は、鮮度表示をした方がより高く売れることがわかった。

実際の店舗でも同様の結果が得られるだろうか？これを検証するために、マックスバリュ東海株式会社の四日市泊店と津北店において、現在鮮度表示実証実験を実施中である。結果はまだまとまっていないものの、民間企業が興味を持ってくれること自体に鮮度表示というアイデアの可能性を感じている。



# 400年生きる魚と1年で死ぬ魚： 水の生き物から探る老化と寿命の不思議

水圏生物科学専攻 准教授 木下 滋晴

## 1. はじめに：なぜ魚が老化や寿命の研究対象に？

脊椎動物の老化や寿命は種によって大きく異なる。哺乳類の寿命は数年から数十年であり、ヒトの場合その最大寿命は120年程度である。早く死ぬ種と長く生きる種の違いは何なのだろうか。その鍵が魚から得られるのではと期待している。成長が止まり、組織の可塑性や機能が失われていくことは老化の特徴だが、魚は死ぬまで成長を続ける、いわゆる‘終生成長’をする。例えば、筋肉は動物の体の大部を占める組織だが、魚では筋線維の数が死ぬまで増え続け、成長に限界がない。また、成体でも心臓が再生するなど、様々な組織の再生能力も高く保たれる。脊椎動物の最長命種は392歳のニシオンデンザメだが、その他にも205歳のロックフィッシュ等、ヒトの最大寿命を軽く超える超長寿命の魚が多く知られる。一方、脊椎動物で最も短命なものも魚で、サンゴ礁に生息するハゼの仲間は寿命がわずか59日しかない。また、生涯に一回だけ産卵し繁殖後急激に死に至るアユのような魚もいる。魚の示すこうした老化・寿命の多様性は、脊椎動物の老化や寿命がどのように決まるかを検討する上で魅力的だが、魚自身の老化や寿命特性に着目した研究はまだ少ない。魚を調べることで、なぜわれわれは老い死ぬのかに関する新しい知識が得られるかもしれない。あるいは、魚にはわれわれとは異なる新しい老化・寿命の制御メカニズムが隠されているのかもしれない。本講演では、魚を対象に脊椎動物の老化と寿命の多様性を探るわれわれの取り組みについて紹介する。

## 2. ゼブラフィッシュを用いた魚の筋肉の抗老化特性についての検討

ゼブラフィッシュは体長5cm程度の小型熱帯魚である。年中産卵し、卵が透明で発生過程が観察しやすいため、脊椎動物の発生モデルとして用いられている。老化や寿命研究の対象としてみた場合、寿命は3年程度と長くはないものの、終生的成長や心臓の再生など、魚類特有の抗老化特性は維持されている。われわれは魚類の筋肉の終生成長に特に着目してきた。筋肉は筋線維の数の増加と個々の筋線維の太さの増大で成長するが、哺乳類では出生後の筋線維数はほぼ一定で、加齢によって筋線維数は減少し筋力が低下してしまう（加齢性筋萎縮）。対して、魚は出生後も生涯にわたって筋線維数が増え続け、加齢性筋萎縮が起き難い。われわれは、魚で新たに増えた筋線維で特異的に働く遺伝子を見出し、哺乳類では筋肉の再生時に働く経路が魚では恒常的に働くことで筋線維が作られる続ける可能性を示した。また、加齢過程での遺伝子発現変化や様々な遺伝子改変魚の解析から、動物に共通する老化・寿命制御機構が魚の筋肉でも働く一方で、加齢に伴うそれらの変化が哺乳類とは異なることが明らかになりつつある。

### 3. 超長命魚のゲノム解析

ニシオンデンザメは、極地域の深海に生息する大型のサメだが、非常に成長が遅く、性成熟に100年以上かかる。これまでに実に392歳という個体が報告され、脊椎動物はもちろん、動物全般でも最長命クラスの生物であることが判明した。われわれはニシオンデンザメのゲノム解析を進めており、深海に生息する本種が、目で働く遺伝子に特徴的な進化をしていること、また、寿命と関連して腫瘍形成などの遺伝子群に特徴的な進化の跡がみられることが解ってきている。



写真. 海を泳ぐ脊椎動物最長命種のニシオンデンザメ (撮影: NRK/Armin)

### 4. 短命魚の寿命特性についての検討

われわれは短命魚としてアユに注目している。アユでは秋に川で孵化した稚魚が海に降り、翌年の初夏に再び川に戻ってきて成熟、産卵するが、その後雌雄ともに一斉かつ急激に衰弱し死んでいき、性成熟と繁殖が‘寿命のスイッチ’をオンにしたような印象を受ける。われわれの解析から、繁殖後のアユでは、筋肉の萎縮、血中のNADレベルの低下、老化細胞の蓄積など、哺乳類の老化と類似した変化が起きていることがわかった。アユでは成熟や繁殖をきっかけに、急激な老化が進行するのかもしれない。その場合、アユは寿命を制御できる新しい寿命解析モデルとして有用かもしれない。

### 5. おわりに

私の興味は、‘種によって大きく異なる老化と寿命はどのような遺伝的基盤で成り立っているのか’である。この問いは、‘なぜわれわれは老いて死ぬのか?’という素朴な疑問を出発点にしており、魚を対象とすることで、この問いに関する、新たな切り口を提供したい。また、老化や寿命は成長や繁殖と密接に関連する。水産分野の研究者として、老化制御による魚の成長促進や繁殖制御など、水産養殖にも貢献することも目指している。脊椎動物以外にも目を向けると、老化しないヒドラ、若返るベニクラゲなど、水圏にはさらに多様な老化・寿命特性がみつかる。多くの人々がこうした水圏生物の不思議に興味を持ち、研究が発展すること期待する。

# 海と川で繰り広げられる魚たちの多様な旅

情報学環/農学生命科学研究科 水圏生物学専攻 准教授 黒木 真理

動物は生涯のうちに多かれ少なかれ、移動しながら生きていく。生活史のある時期に異なる生息場所へと移動し、再びもとの生息場所に戻ってくるとき、空を移動する鳥類では「渡り」、水中を移動する魚類や海産哺乳類などでは「回遊」という。このなかで、生涯のなかで海と川というまったく異質な環境を行き来する魚類は通し回遊魚と呼ばれ、そのダイナミックな回遊現象は科学者の知的好奇心を刺激してきた。

よく知られるのは、川で生まれた稚魚が大海原で大きく成長し、繁殖のために生まれた母なる川に戻ってくるサケ科魚類にみられる回遊であろう。この回遊は、遡河回遊という。これとは逆に、海で生まれて川に遡上して成長し、繁殖のために再び海に戻ってくる回遊は、降河回遊という。この回遊を行う魚類のひとつが、ウナギ属魚類（以下、ウナギ）である。

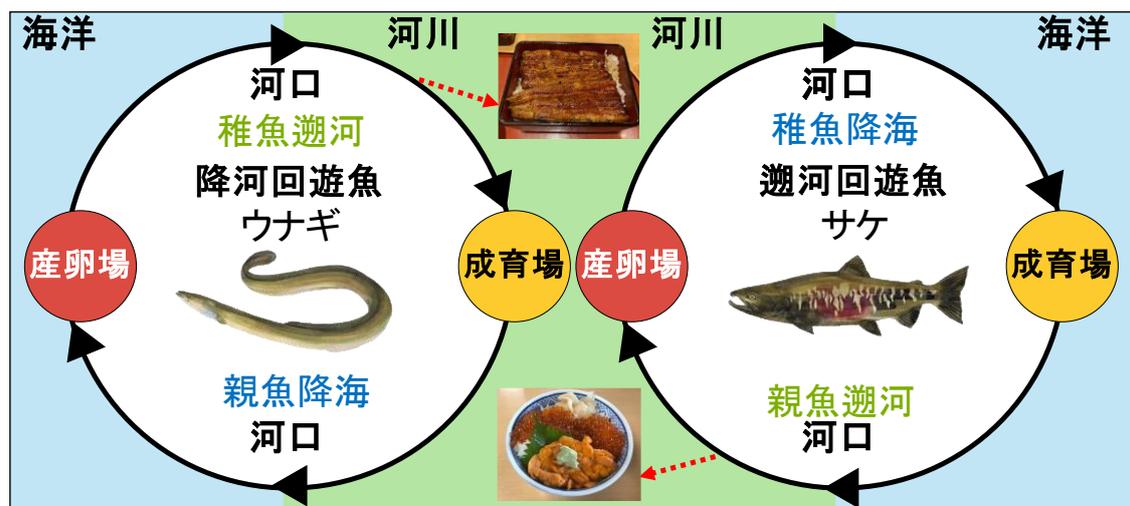


図1 ウナギとサケの回遊

川や湖でよく見かけるウナギは古くから食資源として親しまれており、私たちにとって身近な魚である。しかし、生まれたばかりの子も、卵をもった親も見つからなかったことから、ウナギの繁殖生態は大きな謎とされてきた。東京大学では、40年以上前からニホンウナギの産卵生態の謎に取り組んできた。学術調査船を用いた大規模な海洋観測によって産卵場を突き止めようとする調査が続けられ、直径約 1.6 mm の天然の卵が発見されたのは、2009 年のことであった。その後も、有人潜水艇や深海カメラを用いたニホンウナギの繁殖生態に関する調査や、まだ産卵場がわかっていないインド-太平洋の他のウナギに関する調査が続けられている。

このような通し回遊を行うウナギやサケは、古くから水産業の対象とされてきたが、近年は資源量の減少が喫緊の課題となっている。気候変動によって、通し回遊魚を含む魚類の分布域が変化しつつあることも報告されている。そこで、日本の分布北限域に生息するウナギの生態や環境適応を明らかにすることで、将来の気候変動への対策に活かそうとする研究を進めている。

川で生まれて海で大きく成長するアメマスや、海で生まれて川に遡上するスズキなど、様々な通し回遊魚を対象とした研究によって、新たな知見も得られつつある。耳石微量元素分析により、アメマスの回遊パターンはこれまで想定されていたよりも多様性が高いこと、幼魚の時に川に遡上したスズキは翌年以降も川に遡上するという発生的制約が存在すること等が明らかとなりつつある。通し回遊現象の全貌を紐解き、普遍的な真理を解明していきたい。



図2 ニホンウナギの分布北限域である北海道で採集されたシラスウナギ稚魚

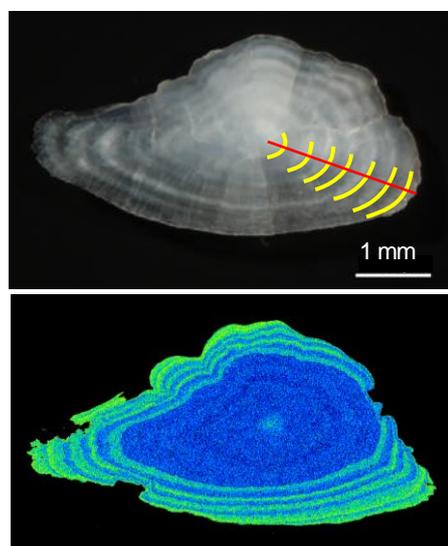


図3 魚類の内耳にある耳石。耳石から年齢を調べたり（上図）、蓄積されている微量元素組成（下図）によって海と川を移動した履歴がわかる

# 講演者プロフィール

さくち きよし  
菊池 潔

附属水産実験所

## 主な研究活動

水産魚介類を研究しています。これまで長らく、全ゲノム配列解析法を駆使して、性が決まる仕組みを研究してきました。また、細谷将先生や平瀬祥太郎先生といった実験所の若手スタッフといっしょに、ゲノム情報を利用した品種改良法の開発や、地域集団の保全遺伝学的研究もおこなってきました。最近では、ゲノム情報を活用した予測学に力をいれています。

さかい ゆうたろう  
阪井 裕太郎

農学国際専攻 国際水産開発学研究室

## 主な研究活動

日本の水産業を復興させるために、経済学のツールを使って様々な研究活動を展開しています。漁業管理から消費者の購買行動に至るまで、水産業の課題は人の行動を理解しなければ解決できません。経済理論を用いて現象の背後にある人の行動を分析し、得られた仮説をデータで検証することを通して、政策提言を行っています。

きのした しげはる  
木下 滋晴

水圏生物科学専攻 水圏生物工学研究室

## 主な研究活動

水圏の生物のゲノムを解読し、それを利用するというスタンスで研究を行っています。動物の寿命の多様性の遺伝的基盤に興味を持っており、多様な寿命や老化特性を示す水圏生物の遺伝子解析から、その謎に迫りたいと研究に取り組んでいます。また、アコヤガイの真珠形成にも興味を持っており、真珠の品質に関わる遺伝子の探索をしています。

くろき まり  
黒木 真理

情報学環/農学生命科学研究科 水圏生物科学専攻

## 主な研究活動

海と川を移動して一生を送るウナギやサクラマスなどの回遊魚の保全生態に関する研究を行っています。子どもたちに生き物の魅力を伝えたり、自然環境への関心を深めてもらうために、科学コミュニケーション活動にも取り組んでいます。