

創成

SOSEI

42
2023

GRADUATE SCHOOL OF FRONTIER SCIENCES
THE UNIVERSITY OF TOKYO

INDEX

FRONTIER SCIENCES

“人類永続”のための
エネルギーを手に入れたい/
分子と生態を横断し、
生物多様性の謎を解き明かす/
生物多様性と社会との共存に
科学的知見を取り入れる

GSFS FRONTRUNNERS

留学生の窓

ON CAMPUS×OFF CAMPUS

EVENTS & TOPICS

Awards

INFORMATION

Relay Essay

特集

「進化研究」の 最前線から 見えてくるもの

「進化研究」の最前線から 見えてくるもの

2022年のノーベル医学・生理学賞は古代ゲノム学を確立したマックス・プランク進化人類学研究所（ドイツ）のスヴァンテ・ペーボ教授

が受賞した大きな話題となった。生物の進化研究は手法や技術の革新とともに範囲が大きく広がり、いまや生命科学系の研究はそのほとんどが進化に関わるといっても過言ではない。さらに地球規模の気候変動や絶滅危惧種の増加、未知の感染症リスクといった社会課題に取り組む上でも進化研究が多くの示唆をもたらしている。今回の特集は、新領域創成科学研究科（新領域）における進化研究の最前線とそこから見えてくるものを探る。

（取材編集執筆：古井一匡）

そもそも生物の進化とは何か？

現在、地球上には人類が知るだけでも約175万種の生物がいる。未知の生物も含めてこれらはすべて約38億年前に生まれた共通祖先から進化したものだ。

進化とは、現在の生物が過去の生物の子孫であり、生物の性状が世代を重ねるうちに集団レベルで変化する現象のことである。日本進化学会会長を務めたこともある河村正二教授（先端生命科学専攻）はそのプロセスを次のように説明する。

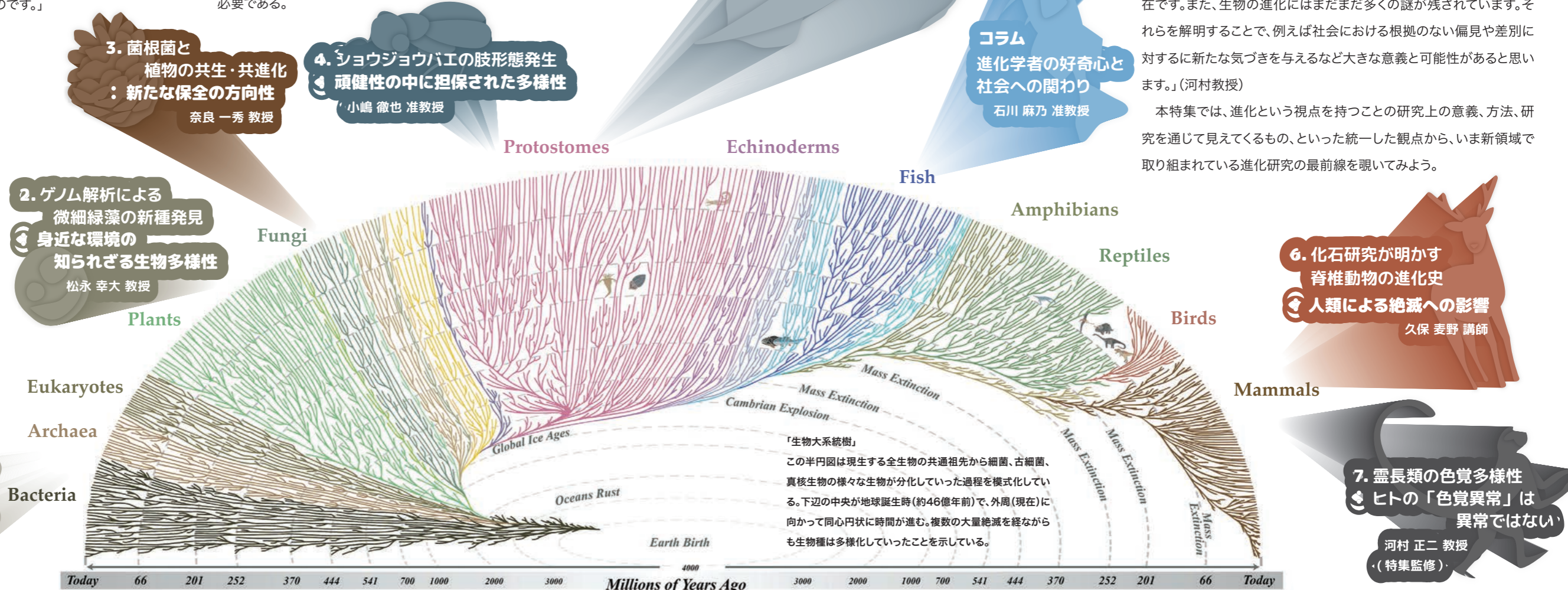
「きっかけは不規則に絶え間なく起こっている個体レベルでのゲノムの突然変異^{※1}です。さらに、集団レベルでの遺伝的浮動^{※2}、自然選択^{※3}、性選択^{※4}、移住、隔離、混合などが加わって、長い年月をかけながら生物種の性質が変化していくのです。」

進化により生物は次第に分化し、ゲノムや種の多様性がもたらされ、多種多様な生物が相互に関係しあう生態系が成立してきた。多様性は生物進化の本質といえる。

生物進化という概念を初めて論理的に説明したのはイギリスのチャールズ・ダーウィンだ。1859年に発表した『種の起源』により進化を近代科学の有力分野として確立するとともに、社会に対しても大きな影響を与えた。

進化という概念はいまや生物だけでなく社会や宇宙のあり方、さらにはアニメなど様々な場面でごく普通に使われる。その一方、単純化や誤解などによって「自然選択」を優劣の価値判断や絶対的なものを取り違えたり、「進化」と「進歩」を混同したりするケースも見られ、注意が必要である。

※1 **ゲノムの突然変異**: DNA(デオキシリボ核酸)鎖の複製・修復のミス为主要因とした塩基の置換や挿入・欠失、様々な長さの重複、転移、組み換えなどが起こること。 ※2 **遺伝的浮動**: 偶然の効果によって、様々な遺伝子アリル(ひとつの遺伝子座の異なるタイプ: (例) ABO血液型遺伝子座のA、B、Oアリル)の集団中の頻度が変動し、あるアリルが集団レベルで消失したり固定したりすること。 ※3 **自然選択**: 遺伝子型(ひとつの個体の2つのアリルの組み合わせ: (例) 血液型のAA、AB、AO、BB、BO、OO型)の間に生存・繁殖に対して有利・不利の差があるとき、より有利な遺伝子型をもつ個体の子孫がより増えることで、あるアリルが集団レベルで消失したり固定したり平衡状態を保ったりすること。 ※4 **性選択**: オス間の競争やメスの好みなどを通じて、繁殖に有利となる形質を持つ個体が多くなる子孫を残すことによって、あるアリルの出現頻度分布が変化すること。



進化研究はどのように展開してきたのか？

生物進化に関する研究はダーウィンから始まり、その後、多くの研究者の尽力によって発展してきた。

1930年頃には集団遺伝学^{※5}の発展により、突然変異、遺伝的浮動、自然選択等との関係について理論的な理解が進展した。1960年代終盤以降に登場した木村資生の中立説により、遺伝子塩基配列の進化に対する遺伝的浮動の偶然の効果の重要性に対する理解が進んだ。

1970年代から80年代にはDNAシーケンス技術^{※6}、組み換えDNA技術^{※7}、PCR法^{※8}などの分子生物学ツールが開発され進化研究は大きく加速した。

※5 **集団遺伝学**: 生物集団のアリル頻度変化を支配する法則などを研究する学問。確率論や統計学などを用いて理論的に研究するとともに、ショウジョウバエなどを用いた実験的アプローチも行われている。 ※6 **DNAシーケンス技術**: DNAを構成するアデニン、グアニン、シトシン、チミンという4つの塩基の配列を決定する技術。 ※7 **組み換えDNA技術**: 解析対象のDNA断片をベクター(運搬体)と呼ばれるDNAに組み込み、この組み換えDNA分子を大腸菌等に入れて大量に複製させたり発現させたりする技術。 ※8 **PCR法**: ポリメラーゼ連鎖反応(polymerase chain reaction)の略称。特定のDNA断片の両側に二重鎖の一方の相補配列となる「プライマー」を設計し、熱による二重鎖解離とプライマーからの塩基伸長

さらに2000年代に入って普及した次世代シーケンサー^{※9}が進化研究の強力な武器となっている。2022年のノーベル医学・生理学賞を受賞したペーボ博士の古代ゲノム学^{※10}も次世代シーケンサーによりネアンデルタール人の骨の化石からDNAを解読し、現生人類(ホモサピエンス)とネアンデルタール人が交配していた可能性を示したものだ。

古代ゲノム学は最近の目立った展開の一例だが、環境DNA分析、分光解析、ライブイメージング、安定同位体質量分析、モデル生物利用、偏光・共焦点・超高分像度などの先端顕微解析、微量元素分析など、様々なアプローチにより分子、細胞、個体、集団、生態系など様々なレベルで、形態、生理、行動、生活史などの多様な側面で生物進化研究が花開いている。

反応を繰り返すことで、比較的短時間で目的のDNA断片を大量に増幅する手法。 ※9 **次世代シーケンサー**: ハイスループットな大規模並列塩基配列決定装置。開発当初、「次世代」シーケンサーと呼ばれ今もその呼称がよく使われる。大量のDNA塩基配列を短時間で解読できる。 ※10 **古代ゲノム学**: 骨や歯などの太古の生物遺物からDNAを抽出し、塩基配列等を解析する学問。ペーボ博士の研究では現代人の多くでDNAの1~4%がネアンデルタール人から受け継がれていることが判明し、また最近ではネアンデルタール人由来の遺伝子の中に新型コロナウイルスに感染したときの重症化のしやすさに関わるものがあることも分かった。

進化研究の意義と可能性

進化生物学をはじめ進化研究が扱う生物は大型動植物から単細胞微生物、さらにはウイルスまできわめて幅広い。

「一見まとまりがないように見えるかもしれませんが、進化生物学はいまや生命科学系全般を支える基礎学問として、なくてはならない存在です。また、生物の進化にはまだまだ多くの謎が残されています。それらを解明することで、例えば社会における根拠のない偏見や差別に対する新たな気づきを与えるなど大きな意義と可能性があると思います。」(河村教授)

本特集では、進化という視点を持つことの研究上の意義、方法、研究を通じて見えてくるもの、といった統一した観点から、いま新領域で取り組まれている進化研究の最前線を覗いてみよう。

新領域における進化研究の最前線

1. 微生物型ロドプシン：未知のエネルギーフロー

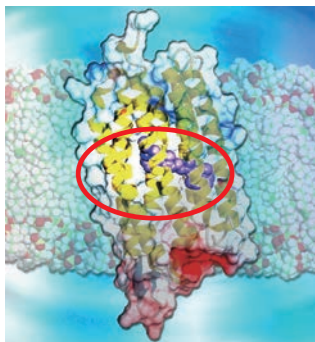
吉澤 晋 准教授 YOSHIZAWA Susumu 大気海洋研究所/自然環境学専攻

太陽から光エネルギーを受け取り、活用している生物は光合成生物だけと思われがちだが、光合成とは異なる方法で光エネルギーを使う生物がいる。それがレチナル色素と結合した光受容タンパク質(微生物型ロドプシン^{※11})を用いて太陽光を化学エネルギーに変換する微生物だ。ロドプシンを持つ微生物は多様な水圏環境から見ついているが、海洋表層に生息する微生物の約半数がロドプシンを持つと考えられている。

ノイド色素も結合するロドプシンを持つ海洋微生物を発見した。様々な微生物型ロドプシンとそれを持つ微生物は新環境への進出、環境変化への適応などを繰り返し30数億年をかけた進化の現在の姿である。進化という視点をとることで、これらは「原始的」ではなく鍛え抜かれた多様性を反映していることがわかる。

「そもそも、生物の進化において光エネルギーの活用が光合成だけだったとは思えません。これだけ可視光に恵まれた地球では、海中で様々な生物(バクテリア)が光エネルギーの取り合いをしていたはず。その中から一部の生物が光合成を始め、植物になって陸上に進出したのでしょう。それに対し、海洋には未知の光受容体を使う生物がまだまだ存在すると考えています。」

吉澤 晋 准教授のグループは次世代シーケンサーや分光解析を用いてこの微生物型ロドプシンの研究を進めている。海水から自ら採取した微生物を培養することで、モデル微生物の実験系だけで



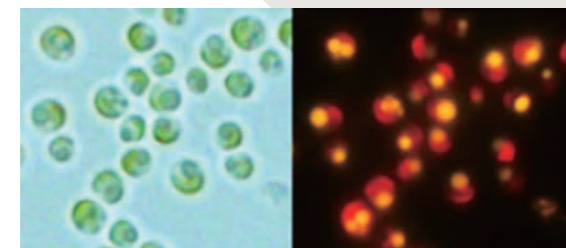
▲微生物型ロドプシンは微生物の細胞膜を7回貫通する構造を持ち、○印の部分にレチナル色素(発色団)を結合させている。

2. ゲノム解析による微細緑藻の新種発見：身近な環境の知られざる生物多様性

松永 幸大 教授 MATSUNAGA Sachihito 先端生命科学専攻

松永教授は真核細胞を対象とした分子細胞生物学を専門としている。光合成を行う単純な藻類を探索していたところ、わずか直径が1ミクロンの微細緑藻がゲノム解析によって新種であることを発見し、国際機関に「メダカモ」として命名登録した。

「金魚やメダカの水槽では日が経つと藻類が発生して緑色に濁ってきます。この緑色の水の中にいた藻類のゲノムを2年以上かけて解析したところ、これまでは火口や深海、極地など厳しい環境にしか生息していないと考えられてきた極めて単純な細胞内構造を持つ微細緑藻を発見しました。」



▲メダカモの明視野顕微鏡写真(左)と蛍光顕微鏡写真(右)。右の黄色はオイルボディ、赤色は光合成を行う葉緑体を示す。

※12 オイルボディ：細胞内においてオイルを蓄積するための小器官。この小器官をもつ微細藻類を大量培養することでカーボンニュートラルなオイルを生産することができる。

メダカモの遺伝子数は現存する淡水性緑藻の中で最少の7629個しかなく、光合成に関する遺伝子群はスリム化していた。バイオ燃料生産につながるオイルボディ^{※12}を持つことも、蛍光イメージングによって明らかにした。他の緑藻との分岐年代は緑藻類の共通祖先にまで遡ることも判明した。

進化という視点で見ると、この遺伝子の最少化は、太古の昔から様々な環境条件や他の生物との相互作用の変化に適応してきた結果と見ることができる。

外見は変わらないように見える場合でもゲノムレベルでは進化は絶えず起こっており、調べ尽くされたと思われる身近な環境の中にも膨大な生物多様性がある。この知られざる多様性は生態系の一部でもある。身近な環境を改変することは、未知の多様性を破壊することに繋がる可能性があり、想定外の結果を招きうることを自覚する必要があるのではないか。

見えてくるもの 微生物型ロドプシンは海洋資源や遺伝子資源としての重要な一画となる可能性がある。海中には光合成を経由しない今まで気づかれなかったエネルギーフローがあり、それによって巨大なバイオマスの安定性や豊かな生態系が育まれてきたことが示唆される。ヒトもそれと無縁ではないだろう。

※11 微生物型ロドプシン：ロドプシンは光受容タンパク質の一種で、動物の眼にも多く存在する。光受容タンパク質はそれ自体では光を吸収せず、レチナル色素などの発色団と結合することで光エネルギーを利用する(動物は視覚に利用)。近年、このロドプシンとレチナル色素を使って光エネルギーを利用している微生物が次々に発見されており、動物型と区別する意味で微生物型ロドプシンと呼ばれる。なお、植物ではフィトクロムなどの光受容タンパク質にクロロフィル(葉緑素)が結合して光合成を行っている。



3. 菌根菌と植物の共生・共進化：新たな保全の方向性

奈良 一秀 教授 NARA Kazuhide 自然環境学専攻

奈良教授は植物と菌根菌(きんこんきん)の共進化を長年、研究している。菌根菌とは地下で植物の根と「菌根」と呼ばれる複合体を形成している真菌(真核生物)で、マツタケやトリュフも菌根菌の一種だ。

植物が約4.5億年前、水中から陸上に進出したとき根はまだなかった。そこで植物は土の中にある菌根菌と共生し、水や養分を受け取っていたと考えられる。多様な菌根菌のうち特定の種と共生しないと生きていけない植物もあり、両者は強い相互依存関係にある。植物界で最大の種数を持つラン科などには、自らの光合成だけでなく共生する菌根菌から炭水化物を獲得している種も多いことが安定同位体質量分析^{※13}によってわかった。共生により暗い林床環境に適応しているのだ。進化という視点を取ることで、植物と菌根菌の共生の起源に遡り、両者が互いに影響を及ぼしあいながら、現在のような多様な

キャンパス内の温室で希少なマツ類の苗木を育成中▶



見えてくるもの 生態系の保全において、植物については一般に植物本体のみが注目され、植物が依存している菌根菌は忘れられがちで知見も乏しい。生態系を保全するには、絶滅に瀕している生物種だけでなく、それと共生・共進化の関係にある生物種も含めてトータルに捉える視点が欠かせない。

※13 安定同位体質量分析：同一の原子番号を持ち中性子数が異なる同位体原子のうち、放射性崩壊により他の核種に変化することのない安定同位体の存在比を測定する装置。生物の中の炭素や窒素などの安定同位体比は、その生物が育った環境や食物の同位体比を反映する。

4. ショウジョウバエの肢形態発生：頑健性の中に担保された多様性

小嶋 徹也 准教授 KOJIMA Tetsuya 先端生命科学専攻

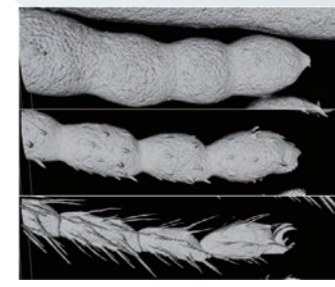
生物はその姿や形を多様に進化させ、周りの環境に適応してきた。特に昆虫は100万種以上の種数を誇り、その「形」の多様性は群を抜いている。

小嶋研究室ではショウジョウバエを対象に、どのようにして生物の「形」ができあがるのか、どのようにして「形」の違いが生まれるのか、どのようにして「形」が進化するのかを理解する研究を進めている。

ショウジョウバエは100年以上前から進化研究における代表的なモデル生物として扱われており、特定の細胞で特定の時期に特定の遺伝子の発現をコントロールできる。それとともに近年、生きた細胞や組織の内部構造を断面画像として撮像できる共焦点レーザー走査顕微鏡^{※14}、あるいは数十ナノメートルの解像度で観察できる超解像顕微鏡^{※15}などの研究ツールも普及してきた。

「つい最近、これらを用いた独自のライブ・イメージング技術を駆使してショウジョウバエの成虫肢の「形」ができあがる様子を数十時間、連続的に観察することに成功しました。」

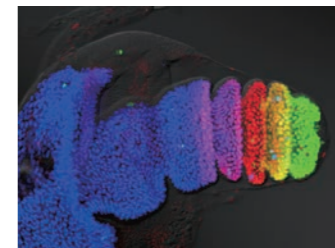
進化という視点に立つと、生物は遺伝子発現における構成要素やタイミング等を微妙に変化させることで、体の基本的な構造や仕組みを保ちつつ、環境に柔軟に適応して形態の多様性を生み出してきたことが見えてくる。



見えてくるもの 体の基本的な構造を保ちつつ、柔軟に多様性を担保する仕組みにより、「変わらないもの」と「変わるもの」の絶妙なバランスが生まれる。ヒトも例外ではないはずで、様々な人が同じヒトという生き物であると同時に多様な特徴を示すことは生き物として当然の能力ともいえるのではないかと。

※14 共焦点レーザー走査顕微鏡：レーザーを光源に用い、組織を物理的に切ることなく、組織の表面から内部までの連続した断面像を取得できる顕微鏡。取得した断面像を使って組織の立体像を構築することができる。

※15 超解像顕微鏡：従来の光学顕微鏡では不可能だった電子顕微鏡レベルに迫る解像度を持ち、細胞構造の詳細な分析が可能な顕微鏡。



▲ショウジョウバエの成虫肢の「形」ができる様子と各分節での遺伝子の働きの可視化



5. ヤリイカの性内二型：逆境に負けたくましさ

岩田 容子 准教授 IWATA Yoko 大気海洋研究所/先端生命科学専攻

生物の多様性という種間や種内のゲノムや形態の違いが注目されがちだ。しかし、生物の多様性には生活史(生れてから死ぬまでの生活パターン)の違いもある。

岩田准教授はこの生活史の多様性に着目し、特に頭足類(イカやタコ)の繁殖生態に関する研究を行っている。頭足類は環境条件によって成長や成熟といった生活史が大きく変化する。

「例えば、ヤリイカにはオスとメスで姿形の異なる性的二型だけでなく、オス内にもメスより大型とメスより小型の性内二型があります。大型オスは交配をめぐる大型オス間で闘争し、勝った方がメスと“つがい”になる(ペアリング)一方、小型オスはペアに割り込んで大型オスの交配部位とは異なる部位に精子を渡す繁殖行動(スニーキング)を行います。精子の大きさも異なることがわかりました。精子二型は他に類例のない新発見です。」

イカ体内には年輪のような日齢痕が見られる平衡石という硬組織

6. 化石研究が明かす脊椎動物の進化史：人類による絶滅への影響

久保 麦野 講師 KUBO Mugino 自然環境学専攻

久保講師の研究グループは哺乳類、恐竜などの化石を対象に歯・骨の微細形状を調べている。恐竜化石の研究で発展したボーンヒストロジー^{※16}という手法を用いて約2万年前に絶滅したリュウキュウジカを含む全国各地の二ホンジカの生活史を調べ、捕食者がいない島に長期間隔離されるほど成熟するまでの期間が長く、また長寿になることを明らかにした。

「別の研究の成果と併せ、島で隔離された大型哺乳類は“遅いライフスタイル”を進化させ、そのため子を産ませるまでに時間がかかり、人為的影響により個体数が減るとなかなか回復できず、絶滅の恐れが高まるのではないかと考えています。」

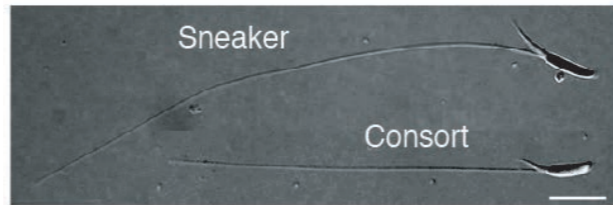
久保講師はさらに、島に隔離されて大型化

した小型動物についても“遅いライフスタイル”の獲得が見られるか研究を進めている。久保講師はまた、材料工学の分野で発達した物体表面のギザギザ・つるつるといった「粗さ」を非破壊的かつ精密に計測する共焦点レーザー顕微鏡を導入して、脊椎動物の歯の表面の微細な傷のパターンから、その動物が食べていた物(食性)についても調べている。

古生物学は地質学の一部として位置付けられることもあり、化石の研究が必ずしも生物の進化現象とその要因にフォーカスしている訳ではない。しかし、進化という視点を取ることで初めて、長時間軸で見るという視座が得られるとともに、現代では想像できないような劇的な環境変化に生物がどのように応答したのかについても明らかにできる。

※16 ボーンヒストロジー: 現生動物の骨や化石骨を数十ミクロンの厚さに薄片化し、偏光顕微鏡によって年輪状の成長痕を計測することでその個体が生まれてから死ぬまでの時間当たりの成長量の変化を明らかにする手法。

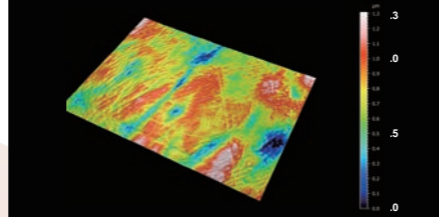
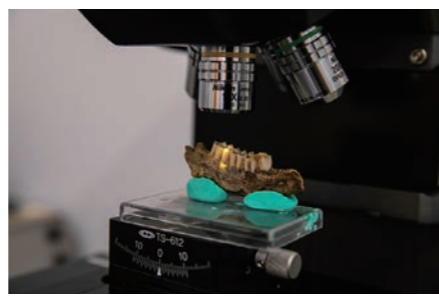
▼ヤリイカの小型オスの精子(上)と大型オスの精子(下)



があり、そのストロンチウム/カルシウム元素含有比を微量元素分析することで、その個体が過去に経験してきた水温変化を知ることができる。形態や生活史に見られる性内二型は、生まれた時や生育過程での季節、海域、水深などによる水温などの違いに大きな影響を受けていると考えられる。

性内二型は昆虫や魚類にも広く見られるが様々なパターンが異なる。進化という視点を取ることで、どのような環境条件や自然選択の違いが生活史の多様性をもたらすのかという課題設定が可能になる。

見えてくるもの ヤリイカのオスは大きく成長するには不利な条件で生まれ育った場合は小型で成熟し、成長に有利な条件で生まれ育った大型とは別のやり方で子孫を残している。生き方はひとつではない。



▲共焦点レーザー顕微鏡(写真上)とそれから得られた歯の微細表面の3Dモデル(写真下)。100μm×140μmの微小領域の起伏が色で表現されている。右の高さの単位はμm。

見えてくるもの 化石研究から、ある生物の絶滅後には新たな生態系が発達し、生物の世界は基本的にレジリエントであることがわかっている。しかし、人類が様々な陸域に進出して以降、人類が原因となる絶滅が進んでおり、孤立した生態系になりがちな島嶼^{どうしょ}では特に顕著である。化石研究から人類が原因となる絶滅の傾向を知ることは、現在進行中の絶滅を防ぐ対策に繋がる。

7. 霊長類の色覚多様性：ヒトの「色覚異常」は異常ではない

特集監修：河村 正二 教授 KAWAMURA Shoji 先端生命科学専攻

河村教授は長年、脊椎動物の感覚系遺伝子、特に霊長類の色覚の進化を研究してきた。脊椎動物の網膜には色覚センサー細胞(錐体視細胞)があり、そこでは光センサー分子である色覚オプシンが働いている。脊椎動物は基本的に4タイプの色覚オプシンによる4色型という高度な色覚型が原型となっている。哺乳類はそこから2種類を失い、残された2種類の色覚オプシン(SオプシンとLオプシン)による2色型の色覚型が基本となっており、恐竜時代の夜行性への適応と考えられている。しかし、哺乳類の中で霊長類はLオプシンから



Mオプシンを分化させ、L、M、Sオプシンによる3色型の色覚型を獲得した。

霊長類の3色型色覚は恐竜絶滅後の新生代で森林の樹上にニッチを獲得するに伴った適応と考えられてきたが、一方で中南米のサル類に代表されるように、2色型と3色型の大きな多様性も存在する。河村教授はコスタリカでフィールドワークを行い、実験室でサルの糞から色覚オプシン遺伝子を分析した。その結果、熟すと緑から赤や黄色になる果実の採食に3色型は有利だが、背景にカモフラージュした昆虫を採食する効率性は2色型の方が高いことを示した。

「2色型と3色型の双方に備わっている輪郭視と3色型に特有のL-M色覚情報とは網膜の同じ神経回路を使うため、昆虫採食のように輪郭視が重要な場面では3色型に不利に働くのです。」

これらのサルと仕組みは異なるが、ヒトにも色覚の多様性があることが知られている。上記のサルの2色型色覚はヒトでは「色覚異常」に相当する。「色覚異常」は男性の約20人に



▲3色型色覚と2色型色覚の見え方の一例

一人といった稀とはいえない頻度で民族や生業形態によらず広く見られる。進化という視点で見ると、「色覚異常」の起源はホモサピエンスの出アフリカ拡散よりも古いことがわかる。そして、当時の人類の生活環境(サバンナなど)や生業形態(狩猟採集)を考慮すると、輪郭視の重要性と3色型色覚とのトレードオフ関係にその成因を求めることが可能と気づく。

見えてくるもの 進化的背景を考えれば「異常」を「多様性」としてとらえ直すことができる事例は他にもあるだろう。色覚多様性の例は、ヒトの遺伝的多様性を「正常」と「異常」という単純な二分法で分けようとすることや、「少数派」を差別したり排除しようとする事の危うさを示している。

コラム

進化学者の好奇心と社会への関わり

石川 麻乃 准教授 ISHIKAWA Asano 先端生命科学専攻

私が明確に「進化」が面白いと思ったのは小学5年生の頃です。いまでは双子の姉とともに進化研究に携わっています。

進化生物学は、生物とはどこから来て、何者で、どこへ行くのかを明らかにしようとする学問であり、進化学者の多くはこれらの謎に対する強い好奇心に駆られて研究に取り組んでいます。

とはいえ、人類はいま様々な課題に直面しており、基礎科学である進化研究が備える射程の長い時間的視野や人間を相対化する視点は、社会に対して新たな気づきや示唆を提供できるのではないのでしょうか。

私自身、最近子どもが生まれたこともあり、面白いと思うことを素直に知りたいという欲求が大事にされる社会、多様な好奇心の芽が育つ社会をつくるため、研究における経験や想いを広く伝えていきたいと思っています。

⇒石川准教授の研究については本号のFRONTIER SCIENCES(P10-11)を参照。



▲石川准教授は進化学に関する古書にも関心があり、明治時代に刊行された解説書などを集めている。



進化研究からの刺激と学び

今回、紹介した研究はそれぞれ「進化」という観点を外しても成り立つだろう。しかし、進化の観点を取り入れることで、また他の研究同様、先端技術や新たな方法論が次々に導入されることで、これまでとは違った風景が広がっていく。

進化研究は多くの人の知的好奇心を刺激するとともに、改めて「進化」「多様性」「共生」「生態系」といった概念の本質を考えるきっかけになるはずだ。

“人類永続”のためのエネルギーを手に入れたい

核融合発電は人類に持続的な幸せをもたらすポテンシャルがあります。実現に向け、プラズマ^[1]という複雑な多体系の現象を解きほぐし、核融合炉の運転に必要な本質的な物理機構の抽出に取り組んでいます。

近年、私たち人類はエネルギー価格高騰、食料価格高騰、地球温暖化、資源を求めた紛争、高齢化による労働力不足など、様々な問題にさらされています。これらの問題を解決することは“人類の夢”といえるでしょう。これらの問題解決には機械化やAI処理が多大な貢献を果たすと期待されていますが、当然ながらそれらにも動力となるエネルギーは不可欠です。つまり原理的には、豊富なエネルギー源の獲得こそが“人類の夢”を実現する手段だと言えます。

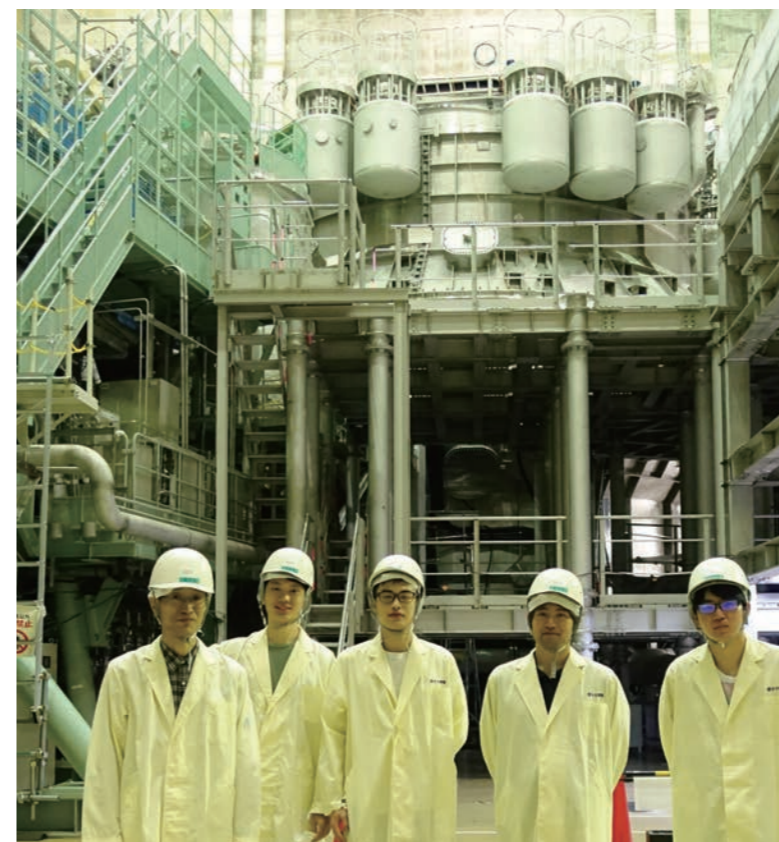
そして、核融合発電が実現すると、その豊富なエネルギー源の獲得につながります。核融合発電の燃料である水素は宇宙に豊富に存在し、“人類の夢”を永続的に実現してくれるでしょう。

これまで日本は核融合研究に大きな貢献をしてきました。そして今も重要な役割を果たしています。茨城県の量子科学技術研究開発機構(QST)にあったJT-60U装置では、核融合出力と核融合プラズマ維持に必要なエネルギーが同じとなるエネルギー利得 $Q=1$ を達成しました。この知見をもとに、核融合炉実現($Q\sim 20$)を目指し、ITER^[2]とJT-60Uの後継装置JT-60SA(図1)が建設され、まもなく実験が開始されます。

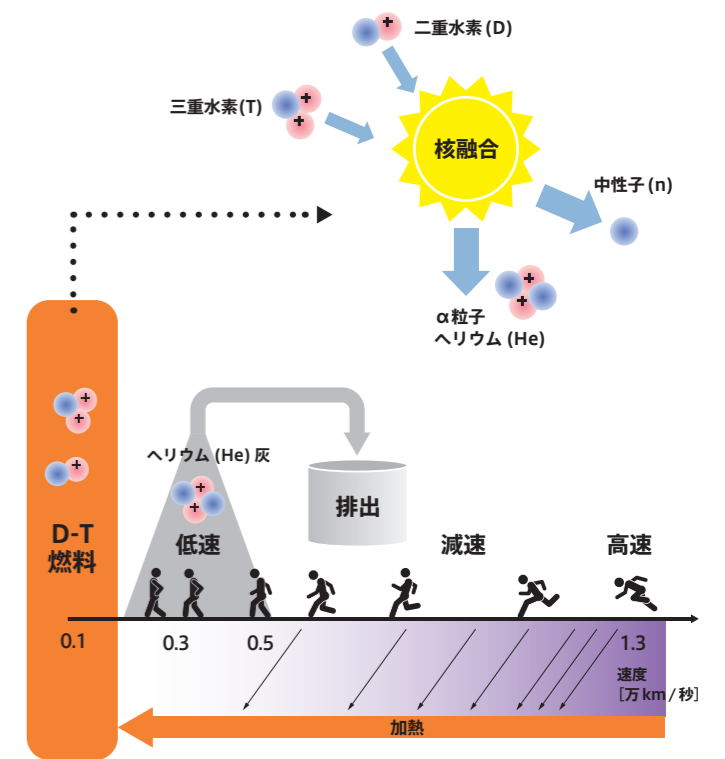
私は、2020年までQSTにてJT-60SAやITERの建設や実験のための検討を行ってきました。私の専門は、高温プラズマ実現に重要な高速イオン挙動とその計測の研究です。

最近の成果^[3]として、核融合炉の運転シナリオ設計手法の開発についてご紹介します。

核融合では燃料となる水素イオンを融合させ、 α 粒子と中性子を



▲図1 JT-60SAと研究室の学生(一番左が著者)



▲図2 α 粒子(高速Heイオン)とHe灰(低速Heイオン)についての模式図

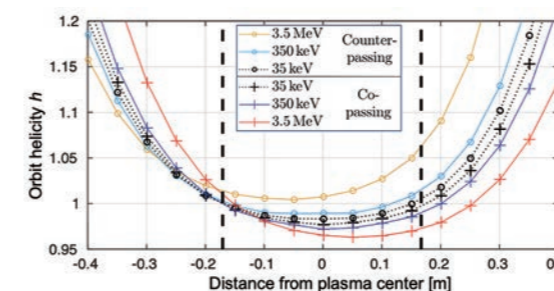
発生させます。 α 粒子は高速Heイオンであるため、磁場利用の閉じ込め装置に閉じ込め、燃料イオンの加熱に利用します。一方、エネルギーを燃料イオンに渡した後に残る低速のHeイオンは燃料を希釈するゴミ(He灰)となり、閉じ込め装置外に排出しなくてはなりません(図2)。すなわち、高速Heイオンは排出せず低速Heイオンは排出するというエネルギー選択性のある排出が必要です。これまで、低速Heイオンの排出には、比較的穏やかに発生する「鋸歯状振動」という擾乱の利用が提案されていましたが、エネルギー選択性をもつ擾乱を“設計”する効果的な手段を持ち合わせていませんでした。

そこで、我々は大規模な数値計算を行い、そこから設計手法を見出すことに成功しました。

鍵となったのは「擾乱構造とイオン運動の共鳴相互作用」と「相互

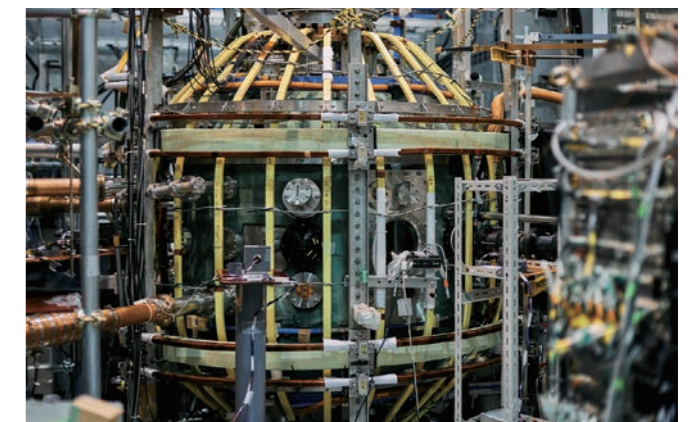
作用の時間スケール」で、特に前者が重要でした。別の研究^[4]で、共鳴条件を図3のような軌道ヘリシティ[Orbit helicity(h)]を用いて判定することを提案していましたが、このOrbit helicityが運転シナリオの設計にも有効であることがわかったのです。鋸歯状振動は縦の点線で記された場所で発生します。この擾乱の共鳴は $h=1$ で起きます。3.5MeVの α 粒子は縦の点線位置で $h=1$ を取っていません。一方、35keVのHe灰は点線位置で $h=1$ となっています。これがエネルギー選択性に対応し α 粒子は擾乱の影響を受けません。

ここで開発した設計手法により、大規模な数値計算なしに適切な運転シナリオの設計ができるようになりました。今後も核融合炉の実現に向けて、鍵となる物理機構の抽出に取り組んでいきます。



▲図3 共鳴条件の判定に使用するイオン軌道のヘリシティ-Orbit helicity(h)の空間分布^[3]

▶小型核融合炉実現への知見獲得を目指して柏キャンパスに設置されたTST-2球状トカマク装置。



[1] 核融合には高温状態が必要なため、水素は電離している。核融合は荷電粒子の集合を高密度で閉じ込めることで実現する。この荷電粒子の集合をプラズマという。
 [2] α 粒子で核融合プラズマを維持する“燃焼プラズマ” $Q>5$ を実証する大型国際プロジェクト。
 [3] A. Bierwage, K. Shinohara et al., Nature Communications (2022) 13:3941
 [4] K. Shinohara, A. Bierwage, et al., Nuclear Fusion (2018) 082026; Nuclear Fusion (2020) 096032

基盤科学研究系
Division of Transdisciplinary Sciences

篠原 孝司 教授

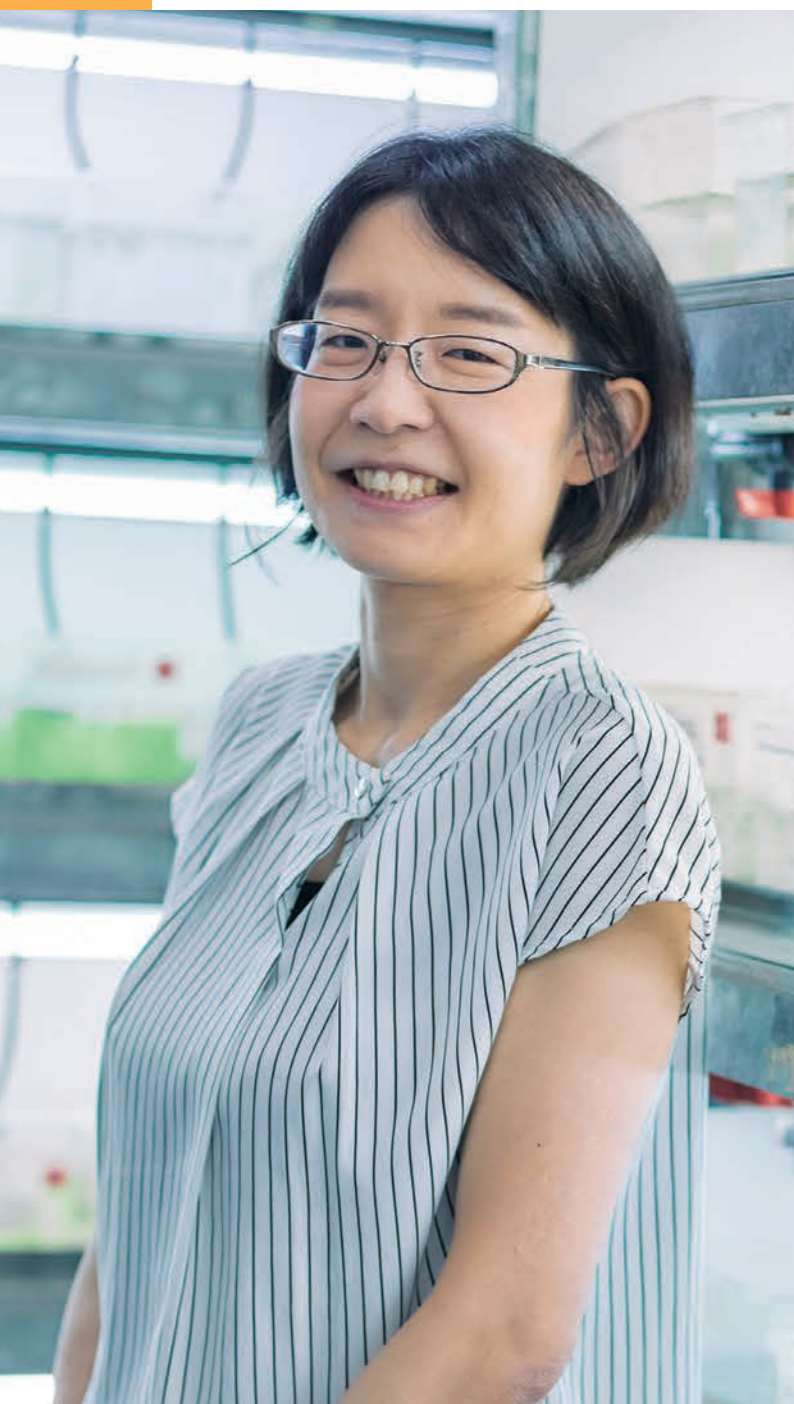
SHINOHARA Kouji

複雑理工学専攻 複雑系実験講座

<https://pp4nf.edu.k.u-tokyo.ac.jp/>



分子と生態を横断し、生物多様化の謎を解き明かす

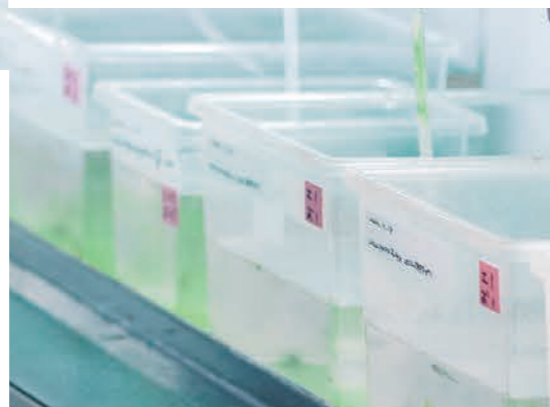


私たちを取り巻く自然環境は、複雑で変動しています。生物はその生息環境に合うかのように、多様な形、行動、生活史を示します。生物の多様化は、どんな発生・生理・神経機構の改変によってもたらされたのでしょうか。それは、いくつかの、どんな遺伝的変異によって生じたのでしょうか。それらに共通する分子的な特徴はあるのでしょうか。このような問いを解くことで、生物の進化や多様化がどこまで自由で、どこまで制限されているのかが分かるかもしれません。

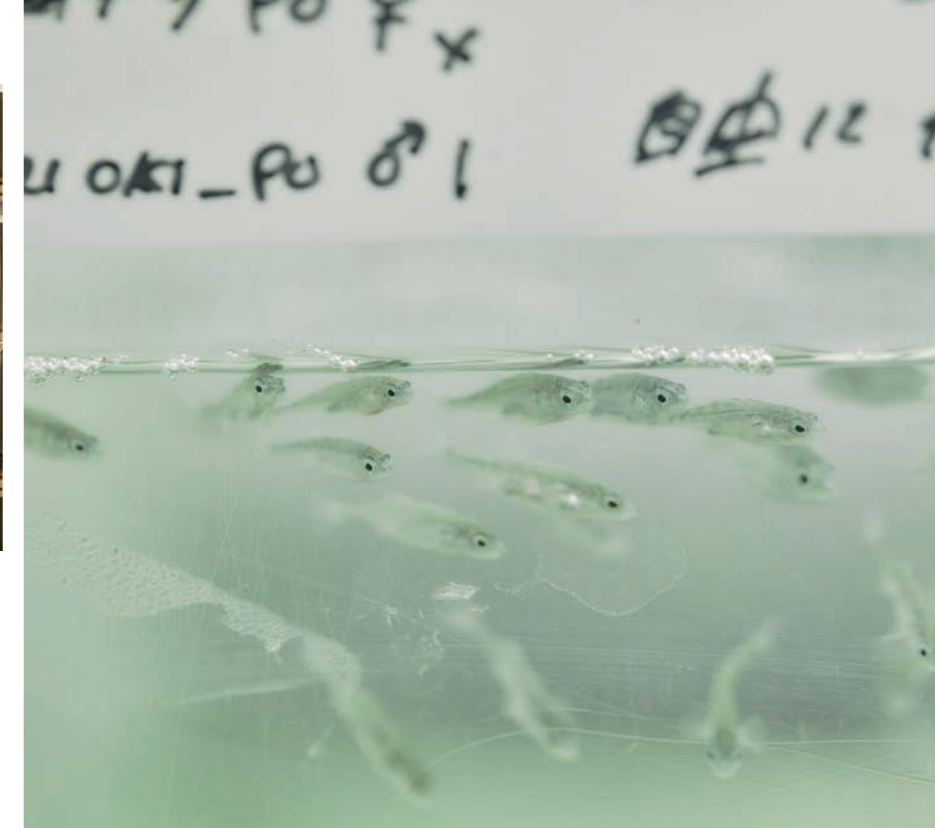
進化や多様化をもたらした遺伝的変異が生態系内でどんな振る舞いをするのかを解析することも重要です。近年、生物の多様化を引き起こす遺伝的変異が少しずつ同定されつつあるものの、これらが生態系内でどのように生まれ、広がっていくのか、その多くが分かっていません。また遺伝的変異が、種間相互作用などを介して生態系自体に影響を与える可能性も指摘されています。これは自然界で、ある変異が生まれ、維持される機構を理解するためには、進化を引き起こした遺伝的変異の個体・分子レベルの機能と共に、生態系内での動態や生態系への影響、そのフィードバックをも理解する必要があることを示しています。

そこで私は、ミクロ生物学からマクロ生物学まで幅広い分野の解析手法を導入することで、生物の多様化を引き起こす適応進化機構を、分子・生態の両面から明らかにしたいと考えました。

この問いに答えうるモデルの一つが、トゲウオ科魚類イトヨ *Gasterosteus aculeatus* とその近縁種です。イトヨは北半球に生息する小型の魚で、氷河期以降に北半球各地の淡水域に進出し、様々な形態、行動、生活史を持つ集団へと急速に多様化しています。これらの集団は交配が可能であるため、その違いを生むゲノム中の領域や遺伝子、遺伝的変異を探し出すことができます。また、遺伝子組み換え技術やゲノム編集技術を利用して注目した遺伝子や遺伝的変異



▲イトヨ稚魚の飼育システム。世界各地のイトヨを人工授精させて生まれた稚魚が飼育されています。
▶ヒトに慣れたイトヨたちは、ときに餌を求めて近づいてきます。

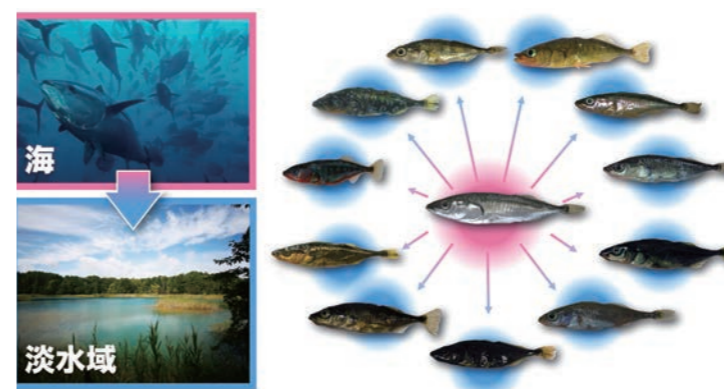


を改変し、それらの機能を目の前で確かめたり、生存や繁殖にどの程度有利なのかを検証したりすることができます。これらを用いて、自然界で多様化を生む原因となる遺伝子やその変異の候補を見つけ出し、その分子的機能、適応度への効果、進化的起源、生態系への影響を解明し、その一般性を導き出すことで、生物の適応進化を駆動/制約する分子・生態機構の解明を目指します。

現在、具体的には以下の研究テーマに取り組んでいます。

(1) 生活史の多様化を生む分子遺伝機構

生物は、季節などの環境変化に合わせて、誕生し、成長し、移動し、繁殖します。この生活史の進化は、適応度を直接左右し、さらなる多様化をも生み出します。そこでこの多様化の原因遺伝子、遺伝的変異を同定し、分子的機能、適応度への効果、進化的起源、生態系への影響を解明します。



▲トゲウオ科イトヨの淡水進出と多様化。
▶小さなインキュベーター内でも飼育することができるため、インキュベーター内の環境条件を変え、様々な飼育実験を行うことができます。

(2) 新規環境への進出能力を決める分子遺伝機構

生物の中には、新規環境に何度も進出し多様化する種がいる一方、全く進出しない種もいます。そこでこの違いを生む鍵遺伝子を同定します。

(3) 遺伝子の発現応答、クロマチン構造*の違いを生む遺伝機構と、その適応進化における役割

遺伝子の発現応答やクロマチン構造の違いを生む遺伝機構と適応進化における役割を解析します。



生命科学研究所
Division of Biosciences

石川 麻乃 准教授

ISHIKAWA Asano

先端生命科学専攻 分子生態遺伝学分野

<https://sites.google.com/view/asanoishikawa/home?authuser=0>



*クロマチン構造の役割 クロマチン構造は、ゲノムDNAを物理的に保護するだけでなく、DNAのどの部分をどのタイミングで読み出すか(転写)を指定する重要な機能も担う。

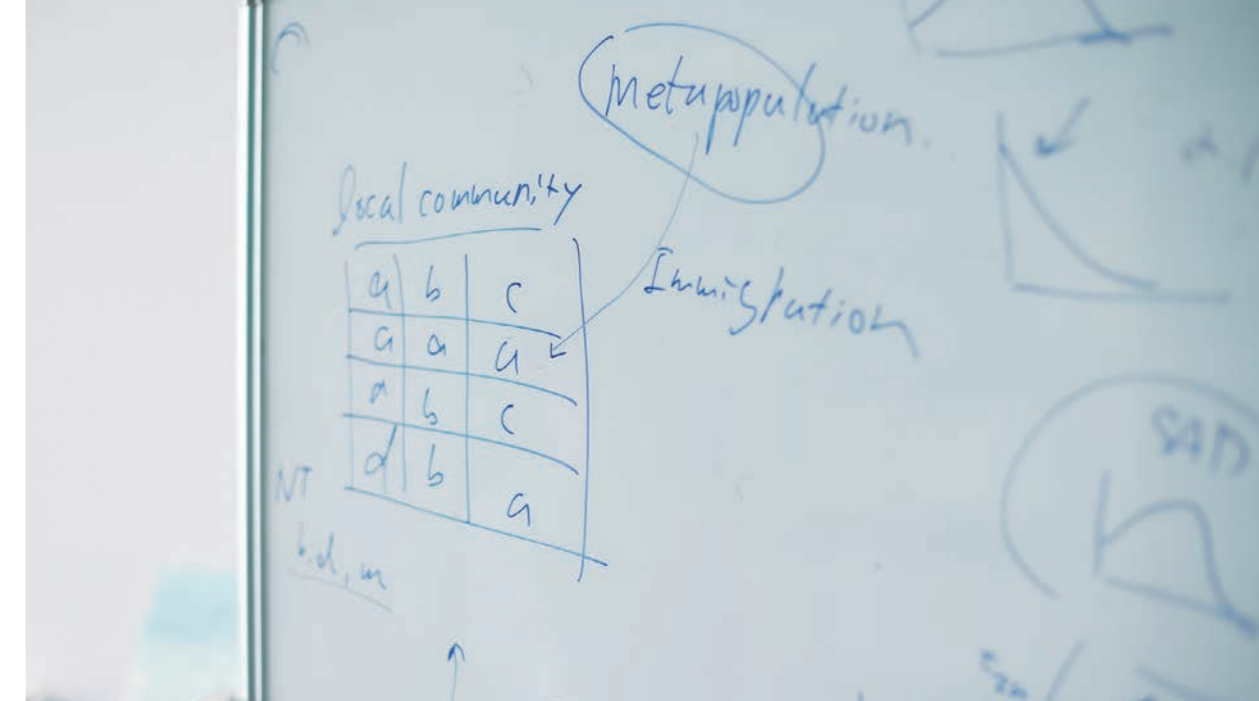
生物多様性と社会との共存に科学的知見を取り入れる

世界的に生息地破壊が進み生物多様性が減少しています。どのように生物多様性を保全すべきか、または社会との共存を図っていくか、これらの問題を考える際の指針となるような科学的知見を深める研究を進めています。

2022年12月に新たな生物多様性に関する世界目標である「昆明・モントリオール生物多様性枠組」が採択されるなど、世界的に生態系保全がますます重要になってきています。環境保全は漠然と良いことであるというイメージを持つ方も多いのではないのでしょうか。一方で環境に配慮しつつ開発を進め、社会の発展を優先するべきという意見にも一理あるように思います。環境保全と開発にはトレードオフの関係があり、「あちら立てればこちらが立たぬ」ということが往々にして起こります。これが多くの地球環境問題解決を困難にする主要因であると考えられます。

生態系保全は時に多大な社会経済的なコストを要求するため、ただ闇雲に保全策を講じるのではなく、それがどのような効果をもたらすか、あるいは何もしなければ生態系への影響はどの程度かを明らかにすることが重要です。数理モデルを用いてこれらを明らかにしよう、というのが私の研究目標の一つです。

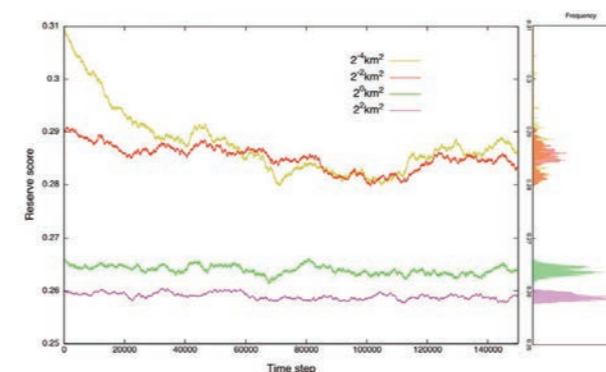
最近の研究を二つ紹介します。一つ目は保護区を設置することにより得られる保全効果(保護区効果)の時間的変動を議論したものです。図1は異なる解像度の空間分布データを用い、ある一時点において、理想的な保護区域を選んで設置した際の保護区効果の時間的変動を表しています。高解像度データを用い保護区を設置すると、初期には高い効果をもたらしますが、その効果は次第に低減し、時間的変動も大きくなります。一方、データ解像度を少し粗くして同様の議論をすると、保護区効果は前述の場合ほど高くありませんが、時間的変動が抑えられ安定的な効果が期待できます。うまくデータ解像度を選べば、両者の効果のある程度は両立させることもできそうです。



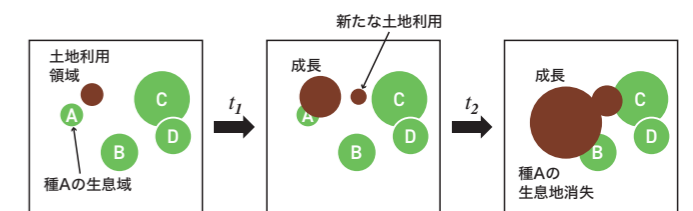
近年、高解像度データを駆使して詳細に区分けされた保護区を導入しようという議論がありますが、その様な主張に一石を投じる結果ではないかと考えています。

二つ目は土地利用が種の絶滅リスクに与える影響を評価した研究です。生態学的知見に基づき生態系の空間的パターンを記述し、図2の模式図のように土地開発の進行と共に生息地が消滅していく様子を数値計算で評価しました。図3は対象領域内の相対的な土地開発領域と失われた生息地数(種の絶滅)の関係性を表しており、土地開発が進行するにつれ単位面積当たりの消失生息地数が増加することを表しています。

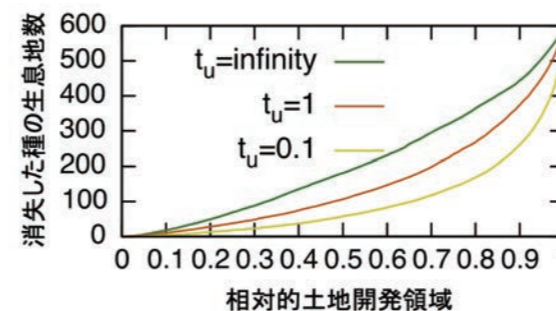
先述のとおり環境に配慮しつつ発展を目指すというのは、保全と開発の折衷案であると言えますが、保全策や開発の影響を評価できれば、このような状況において科学的知見に基づく意思決定を支援できるようにすると期待しています。生態系保全には生態学的な議論が欠かせませんが、人間社会の多様な側面を議論に含めることも肝要です。これは環境と社会の両者に焦点を当てる「社会生態系システム」の枠組みで議論されます。このような研究は分野融合的な視点が必要で、環境政策や経済学の専門家とも協力して研究に取り組んでいます。



▲図1 異なる空間解像度で選定した保護区域がもたらす保全効果の時間的変動。



▲図2 土地利用と生息地破壊を表すモデルの模式図。



▲図3 土地開発面積と消失生息地の関係。



▲群馬県みなかみ町で行った生物圏保存地域(ユネスコエコパーク)登録の社会経済的効果に関する聞き取り調査の様子(奥の左側が著者)。今年度からユネスコエコパークに関するプロジェクトにも参加しています。
<https://www.town.minakami.gunma.jp/minakamibr/>

環境学研究系
Division of Environmental Studies

高科直 助教

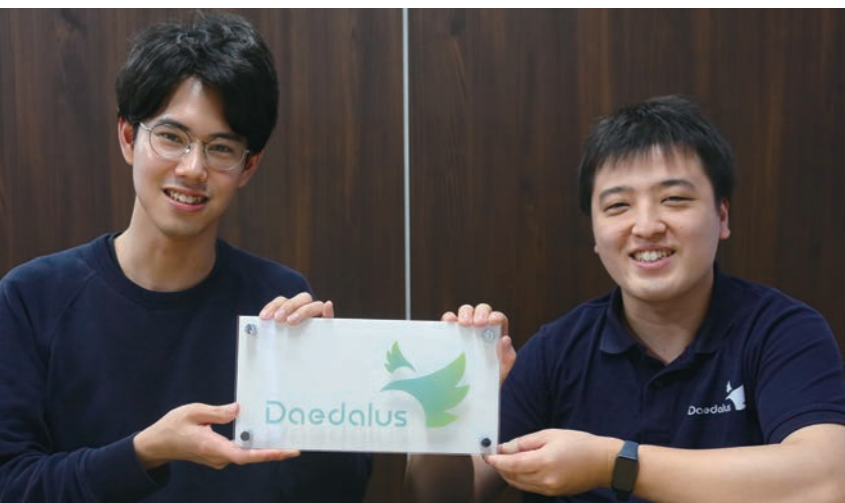
TAKASHINA Nao

国際協力学専攻 制度設計講座

<https://www.nao-takashina.net/>



「AI 技術を社会に浸透させたい」



共同経営者の服部さん(左)と代表の河崎さん(右)

近年ChatGPTをはじめAI技術の開発が急速に進んでいます。最新のAI技術はあらゆる分野で活用され、企業に多大な恩恵をもたらすはずですが、実際にビジネスに活かしている企業はそう多くはありません。本研究科修了生の河崎太郎さんは、AI技術の構想から実装・運用まで、多様な顧客のニーズに合わせた解決策を提案して新たな価値体験を提供したいという想いから、大学院の同級生である服部さんとともにDaedalus株式会社を設立。「鉄道インフラ設備点検AIの共同研究」など、企業が抱える課題解決に取り組んでいます。

学部時代には新たな航空宇宙機設計で役に立つ「衝撃波検知」の研究をしていたという河崎さん。その後、配属された研究室でCGやAIの知見を得たことから、その両方を組み合わせた研究をしたいと思うようになりました。大学院に進学すると、どんな分野にも応用が利く「深層学習」の技術こそ社会に必要だと感じたそうです。企業に勤めながら副業として現在の事業を開始すると、その思いは一層

河崎 太郎 KAWASAKI Taro

Daedalus 株式会社 代表取締役
https://daedalus.co.jp/

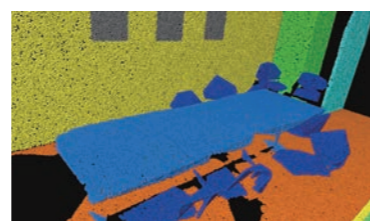
PROFILE

- 2018年3月 横浜国立大学理工学部機械工学・材料系学科機械工学 EP 卒業
- 2020年3月 東京大学新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻 修士課程修了 / 鈴木宏二郎研究室
- 2020年4月 ソフトバンク株式会社 入社 (その間、副業としてAI事業を開始)
- 2020年8月 Daedalus 株式会社 設立

強まりました。事業の運営に際しては、大学院生時代に他分野の新知識に触れる機会が多かったことや、寮生活での交流で培った留学生らとのコミュニケーションが生きていると語ります。

顧客との関わりで大切にしているのは、「カスタマーインサイト」の精神。「研究は精度アップが重要だが、ビジネスでは安価で簡単に使えることも大事」だと言います。さらに「多くの企業は最新の技術を実装するに至っていない、そのニーズをキャッチアップし、様々なAI技術を社会実装することで、SFアニメみたいな超便利な社会を作りたい」と目を輝かせました。

(取材執筆:高田陽子)



3Dセグメンテーションの例

「知見を広める - Connecting The Dots -」

起業して思ったことは、これまで気に留めていなかった情報や知見が役立つことがあるということ。専門分野の知識を深めるのはもちろんですが、たまには興味の赴くままに、少しでも面白いと思った分野について調べてみてください。ちょっとした知識があることで、この先、出会う情報の見方が変わるはず。きっと自分の大切な財産になると思います。



業務の合間に卓球でリフレッシュ



学位記授与式の日、鈴木先生(中央)と

クメール料理の魂 「プラホック」



ブン スレイ ピッチ
POEUNG Srey Pich
環境システム学専攻 修士課程2年

みなさん、和食の特徴は何だと思いますか。醤油や味噌、みりん等の発酵調味料はその一つでしょう。私の母国カンボジアの料理にも特別な発酵調味料があります。それは「プラホック」(ប្រហុក)と呼ばれる魚を発酵させた調味料です。そもそもなぜ魚を発酵させるのかというと、冷蔵庫のない時代には食品を長く保存できるように世界中の人々が様々な発酵食品を作ってきました。カンボジアでは漁獲時期に獲れた淡水魚を塩漬けにして発酵させ、一年中料理に使う習慣が今も残っています。

特に乾季においては、タンパク質や鉄分が豊富なプラホックは、カンボジア人にとって重要な栄養源であり、食料を安全に保つ役目もありました。食品の加工・保存の技術が向上し、輸入食品など他のタンパク質源が手に入りやすくなった今でも、プラホックはカンボジア人の食生活には欠かせない、クメール料理の魂であるとも言われます。

プラホックは味も匂いも強いため、料理の出汁にしたり、ミンチ肉とまぜたりすると少量でも独特な味がします。プラホックがなければ、クメール料理は成立しないと言えるほど、カンボジアの食文化に重要な繋がりがあり、多くの伝統料理に使用されています。しかしながら、この強い匂いと味のせいで、カ



淡水魚でつくる発酵調味料「プラホック」



ンボジアのすべての人が好んで食べるわけではありません。

日本にはカンボジア料理のお店が非常に少ないのですが、もし、みなさんがカンボジア料理を食べる機会があったら、ぜひプラホック料理に挑戦してみてください。味が濃いのでいろんな野菜に付けて食べるのがおすすめです。

私は、プラホック料理を食べる度に母国に帰ったような気分が味わえます。



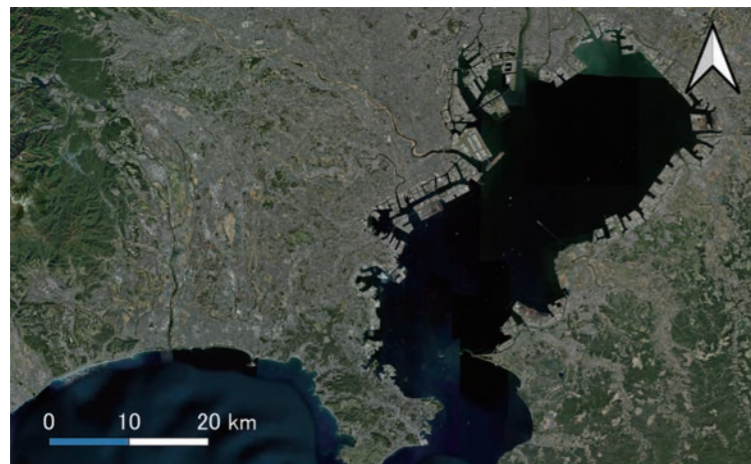
ノムバンジョック・ソムロックメール (プラホックベースの麺料理)



焼肉にプラホックソースを付けて食べます

弱教師付き機械学習を用いた地すべりアセスメントと防災

<https://geo.csis.u-tokyo.ac.jp>



高度に都市化された東京都とその周辺地域 (ESRI, 2023)

平地が狭い日本では、山地のすぐそばまで多くの人が住んでおり、土砂災害で大きな被害が出る一つの原因となっています。近年、「集中豪雨」や「局地的大雨」が増えたことにより、地すべりや土石流など多くの土砂災害が発生しています。

自然環境学専攻の叶さんは、2018年の西日本豪雨で自然災害の予測の難しさを痛感し、新たな防災対策を提案するプロジェクトをスタートさせました。それは「弱教師付き機械学習」を利用して地すべりリスクを正確に予測する方法です。通常、土砂災害予測にはディープラーニングなどの機械学習技術が利用されますが、高い精度を持つ一方、膨大なデータが必要で多くの時間やコストがかかります。さらに地すべりの要因は多岐にわたるため、これまでの観測データが必ずしも正確であるとは限りません。

そこで叶さんは、データの収集や前処理が不完全でも、予測モデルの訓練が可能な「弱教師付き機械学習」を用いることを考案。従来よりも幅広い情報を扱うことで、より精度の高い予測を実現することを目指します。「自然災害リスクを予測し、管理するための方法を提供することで、人々の命と財産を守り、社会全体が自然災害に強いものになることを願っています」と話す叶さん。将来の夢について問われると「科学技術が社会全体の福祉に貢献し、自然災害からの防護という重要な課題に対して効果的な解決策を提供できる世界を実現したい」と力強く語ってくれました。

～研究科が進める「学生創成プロジェクト」が一部活動資金を支援しています～

(取材執筆：蘭真由子)

叶 宸佐
Chenzuo YE

自然環境学専攻
博士課程1年



柏キャンパスサイエンスキャンプ (KSC)

<https://ksc.edu.k.u-tokyo.ac.jp/>

8回目の開催となる2022年度は、本研究科と附置研究所の合計36研究室で開講。本学教養学部前期課程から135名を迎え、4日間の対面実習を行いました。受講生からは「視野が広がり、研究や大学院生活への解像度が上がった」「進んでいきたい方向性がはっきりした」などの前向きな感想が多く寄せられ、教員からは「有意義な実習だと思う」「理科と文科を一緒に受け入れたが、学生が意欲的であった」などの意見がありました。



「世界最強のゲルをつくる」プログラム実習の様子



今年度立ち上げたJazz研究会によるセッション

創域会学生部 サークル紹介

<https://souiki-kai.net/>

創域会学生部によるサークル紹介イベントが3年ぶりに対面で行われ、個性豊かな8つのサークルが参加しました。今年度はマスクを外す機会が増え、このような対面でのイベントや交流が活発になりつつあります。学生部でも定期的にイベントを企画しているとのこと、今後の活動が楽しみです。柏キャンパスで活動中の団体、サークルは創域会のウェブサイトをご覧ください。

令和5年度 研究科長からのご挨拶

「新領域を創成する科学」を志向して創設された本研究科は、今年度設立25周年を迎えました。真理の探究は科学の重要な活動の一つである一方、現代社会には、既存の領域を深めるだけでは解くことが困難な課題が山積しています。人類が抱える深刻な課題を解決し、豊かな社会を創造するためには、領域を超える発想と領域を超えた協働が重要です。本研究科は、社会の現実と深い関わりを持つ教育研究活動の実践等により、既存の学問領域を超えた視点を持ち、「知の冒険」を力強く実践する場として発展しています。私共が進める、未来に貢献する研究教育活動への応援をお願いいたします。

東京大学大学院新領域創成科学研究科長
徳永 朋祥 TOKUNAGA Tomochika



研究科ウェブサイトではご挨拶動画をご覧いただけます。
<https://www.k.u-tokyo.ac.jp/gsf/greeting/>



東大新領域「サステイナブル・ファイナンス・スクール」が開校

<https://susfinance-school.k.u-tokyo.ac.jp/>

地球環境や人権等の地球規模課題は近年深刻化し、企業リスクとなっています。そして、企業自ら、これらの課題に自発的に取り組むことが、究極的には企業活動の継続にとって必須条件と考えられるようになりました。東京大学大学院新領域創成科学研究科は、サステイナブルな社会構築の一助を担いつつ、新しいビジネスにつなげられる人材の育成に貢献したいと考え、サステイナブル・ファイナンス・スクールを開校しました。2023年6～8月の集中講義では、第1期生として16名の方が参加されました。本スクールから人脈の輪が広がることを期待しています。

サステイナブル・ファイナンス・スクール長 亀山 康子 KAMEYAMA Yasuko



夏季インターンシッププログラム(UTSIP Kashiwa)

第11回目となるUTSIPが5月から8月にかけての7週間、2つのグループに分かれ対面で実施されました。2023年度は18の研究室で総勢22名を受け入れ、個々に決めたテーマを基に丁寧な指導を受けながら研究活動を行いました。最終日には成果発表会が行われ、最先端の科学や技術を経験した参加者からは「自国の大学では経験できないような、有意義な時間を過ごすことができた」「研究だけでなく、日本の伝統文化も体験できた」などの声が寄せられました。



上：テーマに分かれてディスカッション
下：プログラム初日は柏キャンパスを散策

Relay Essay

リレーエッセイ

春の愉しみ

日本海側に広がる山形県の庄内平野は稲作が盛んな地域で、5月の連休のころに生まれ育った酒田に帰れば、水が張られた田んぼと残雪を頂く鳥海山(ちょうかいさん)や月山が目まぶしい。

山に分け入れば、新緑、山桜の淡いピンク、鶯や山鳩の鳴き声、土の感触と雪解け水、清々しい匂いと、鈍った五感が呼び戻される心地がします。このころは山菜のシーズンでもあります。雪に覆われ長い冬を越した植物たちの新芽や若草は柔らかくかつ香り高い。

たらの芽、こしあぶら、山うどは天ぷらによく、ふき、こごみ、えごぎ、しどけ、わらびはお浸しやみそ汁にします。天然のわさびも取れ、茎は甘酢漬けに、見事な根がついていれば刺身に使うことがあります。

山菜採りのコツにはいろいろとあるのですが、祖母から教わったコツは、前年に育ったあとを見つけることでした。

山うどの殻には節があるんだとか、赤い「ほどろ」があればわらびがあるんだとか。

山菜をおいしくいただくにも、手間のかかる処理が必要です。ぜんまいはワタを取ってゆでてから日干しにしますが、何度かもみほぐしながらからからに乾かします。食べるためには、数日間水に浸して戻す必要があります。わらびは重曹であくぬき、しばらく水に浸してから食します。

さて、今年はぜんまいのゆで汁がとてもきれいな紫色をしていたので、シャツを染めてみました。とても淡い品のよい色に仕上がったものの、濃い色に上げるのは難しいと分かりました。藍が自然の染料として優れている理由が分かった気がしました。



ぜんまい



干したぜんまい



ぜんまいのゆで汁と、ぜんまいのゆで汁で染めたシャツ

村山 英晶 教授
MURAYAMA Hideaki
海洋技術環境学専攻

