

JST news

未来をひらく科学技術

11

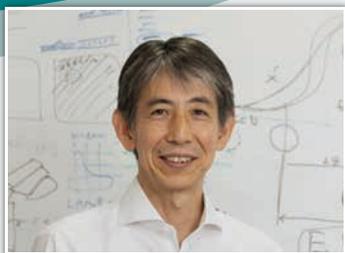
2023
November



細胞内の物質を分解し栄養をリサイクル
オートファジーの役割や仕組みを探る

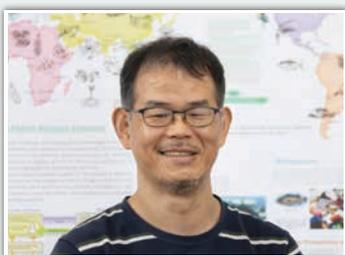


「在来知」と「科学知」の協働を通して
住民主体の野生動物の持続的管理に挑む



03 特集1

細胞内の物質を分解し栄養をリサイクル
オートファジーの役割や仕組みを探る



08 特集2

「在来知」と「科学知」の協働を通して
住民主体の野生動物の持続的管理に挑む

12 〈連載〉イノベ見て歩き

— 第6回 —

小型衛星の「ラストマイル輸送」実現へ
ハイブリッドロケット再点火装置を開発



14 NEWS & TOPICS

▶ ソフトカプセル廃材から高性能生分解性プラ
▶ 「樹状」の海洋細菌が石油を素早く分解

ほか

16 さきがける科学人

食品の食べ頃や賞味期限が簡単にわかる
測定技術の開発を目指して

東京農業大学 応用生物科学部
食品安全健康学科 教授

飯嶋 益巳



JSTは、シンクタンク機能、研究開発、産学連携、次世代人材育成、科学と社会との対話など、多岐にわたる事業を通じて、持続可能な開発目標(SDGs)の達成に積極的に貢献していきます。



▶ P.3, 14下



▶ P.3, 12, 14上, 14下



▶ P.3, 8, 14上



▶ P.8



▶ P.8, 14上

- 編集長
安孫子 満広
科学技術振興機構(JST)広報課
- 制作
株式会社エフビーアイ・コミュニケーションズ
- 印刷・製本
株式会社丸井工文社

水島 昇 *Mizushima Noboru*

東京大学 大学院医学系研究科 教授
2017年よりERATO水島細胞内分解ダイナミクスプロジェクト
研究総括

特集

OVERVIEW

細胞内の物質を分解し栄養をリサイクル オートファジーの役割や仕組みを探る

細胞の恒常性は、細胞内のたんぱく質やオルガネラが合成と分解を繰り返すことで維持されている。細胞内のたんぱく質などを分解して栄養を再利用する「オートファジー」は、多くの真核生物で普遍的に起こる現象だが、その役割や仕組みについてはわからない部分が多い。東京大学大学院医学系研究科の水島昇教授は、哺乳類におけるオートファジーの役割や仕組みについて体系的および定量的に理解するための研究に取り組んでいる。

生物共通の細胞自食作用 臨床医から研究者の道へ

人間の体は数十兆個の細胞からできており、細胞の一つ一つが正しく機能することで健康が保たれている。細胞内には、ミトコンドリアや小胞体などのオルガネラと呼ばれる細胞小器官やたんぱく質がぎっしりと詰まっており、細胞の恒常性を維持するために、常に分解と合成が行われている。この分解経路の1つに「オートファジー」と呼ばれる仕組みがある(図1)。

オートファジーは、たんぱく質やオルガネラを「オートファゴソーム」という袋状の膜構造で取り込み、そこに分解酵素を含むリソソームが融合して、オートファゴソームの中身を分解する細胞の自食作用だ。分解によりできたアミノ酸は、たんぱく質の合成などに再利用される。オートファジーの現象は1960年代に海外の研究者によって発見されたが、生命にとってどのような役割があるのか、どのような仕組みで起こるのかについては長い間、謎だった。

東京工業大学の 大隅良典 栄誉教授

が、90年代に酵母でもオートファジーが起こること、オートファゴソームがオートファジー遺伝子の働きによって形成されることを発見し、これら一連の研究成果によって、2016年にノーベル生理学・医学賞を受賞した。このオートファジーを起こす仕組みは哺乳類でもほぼ同様であることがわかり、その後オートファジーに関連する遺伝子も哺乳類で次々と発見された。

「オートファジーは多くの生物に共通する普遍的な現象です。また、体内のどこか特定の場所でのみ起こるわけではなく、全身の細胞で起きています。この2点に惹かれて臨床医から研究者の道へ進みました」と話すのは、97年より大隅研究室に入り、哺乳類のオートファジー研究を牽引する東京大学大学院医学系研究科の水島昇教授である。

垣根を越えた専門分野の融合 メンバーは半年ごとに席替え

オートファジーの主な役割は、栄養のリサイクルと細胞内の老廃物除去などの品質管理の2つと考えられ

ている。水島さんは、これまでにオートファジーの①哺乳類における役割の解明②仕組みの解明③定量的な測定方法の開発④病気とのつながりの解明⑤オートファジーを活用した治療法の開発の5つの柱を設定し、①と②を中心に研究を進めてきた。しかしながら、これらの研究には生物学だけでなく物理学や進化学など垣根を越えた専門分野の融合が求められる。

そこで水島さんは、さまざまな研究者に呼びかけ、JSTのERATO「水島細胞内分解ダイナミクスプロジェクト」を立ち上げた(図2)。プロジェクトは、オルガネラの定量的な解析法の開発を目指す「オルガネラ動態解析」、主に遺伝学を用いて脊椎動物での細胞内分解の意義を包括的に理解する「生理機能解析」、数理・物理学的手法を用いたオートファジー過程のモデル化を行う「数理モデリング」、分子進化的視点に基づいたデータ解析からオートファジー機構の理解を目指す「分子・進化」の4グループで構成されている。さらに、これらの4グループは、お互いに連携しながら異分野融合研究を推進している。

プロジェクトメンバーは全て同じ部屋にあり、席はグループ単位ではなく、ばらばらに配置されている。半年に1回席替えを行い、異分野の研究者同士が話しやすい環境を作っている。「最初は研究者の使う専門用語の理解さえ困難でしたが、会話を通じてお互いの言葉を理解するようになり、違う視点に触れることで研究のアイデアも生まれるようになりました」と水島さんは語る。

オートファゴソームの膜形成 数理モデルを構築して実証

異分野融合研究の成果の1つが、数理モデリンググループ主導の「オートファゴソーム形成の膜変形ダイナミクスの数理モデル構築とその妥当性の実証」である。オートファゴ

図1 オートファジーの仕組み

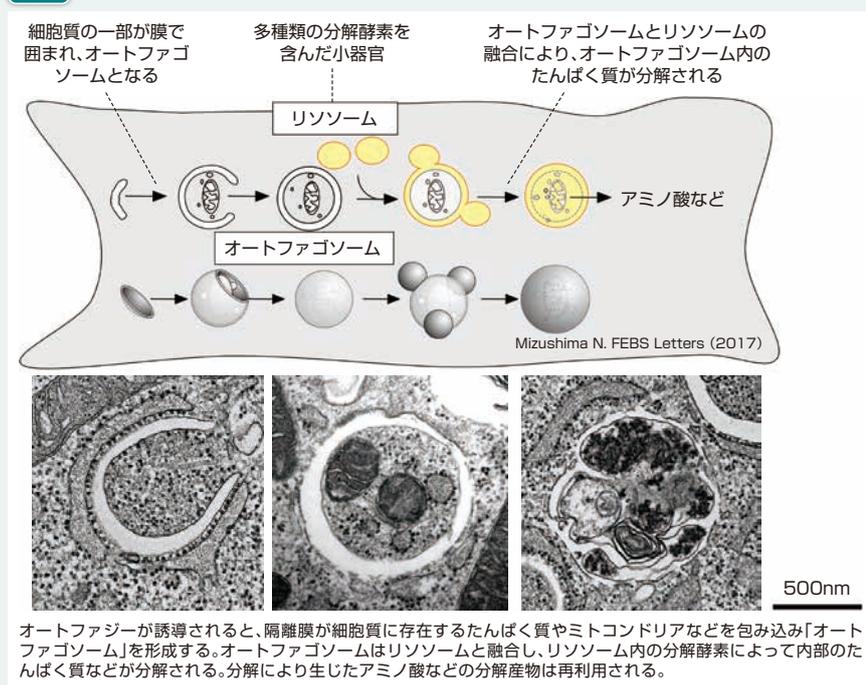
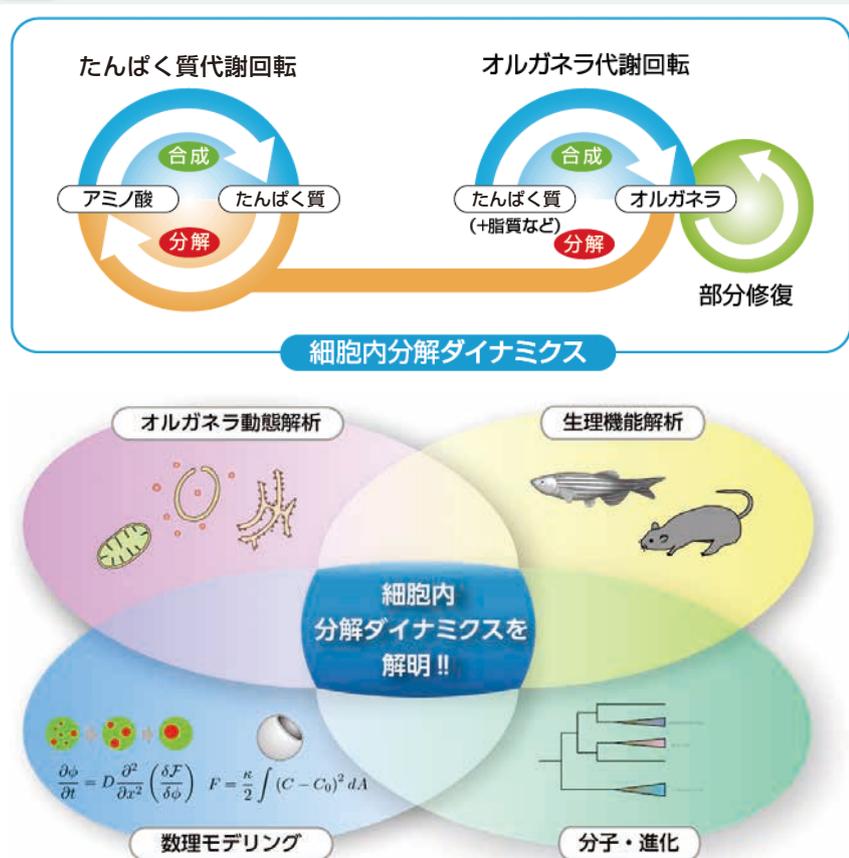


図2 プロジェクト概要



さまざまな学術的視点・手法による技術開発や解析は、細胞生物学、細胞生理学を中心とした幅広い基礎研究分野への波及効果と、細胞内代謝回転に関連する疾患の理解や治療戦略への展開が期待されている。

ソームが形成される過程は、まず隔離膜と呼ばれる平らなディスク状の小胞が、カップ状にわん曲して、最後にカップの口が閉じて球状のオートファゴソームを形成するというものだ。隔離膜を変形させてオートファゴソームを形成するためには、膜を曲げて安定化させる曲率因子が関与していると考えられてきたが、どのような物理機構で形成過程が制御されているかは不明だった。

そこで、曲率因子が隔離膜の形成変化をどのように制御するのか、数理モデルを構築した(図3、4)。この数理モデルの妥当性を確認するためには、実際の細胞内の変化を観察する必要がある。それを可能にしたのは、オルガネラ動態解析グループが主導した「広域3次元光-電子相関顕微鏡法」を用いた細胞小器官の定量解析だ。蛍光顕微鏡画像と電子顕微

鏡画像を同視野で取得する光-電子相関顕微鏡法にアレイトモグラフィと呼ばれる細胞切片から3次元再構成を行う手法を取り入れた。

具体的には、試料の3次元蛍光顕微

鏡画像を撮影した後に、試料を樹脂処理し25ナノ(10億分の1)メートル厚の連続超薄切片を作製、切片をシリコンウエハーに乗せて、走査型電子顕微鏡で撮影した。蛍光顕微鏡と電子顕微鏡の2つの画像を重ね、数個の細胞を含む広い範囲でオートファジーに関連する構造を細胞の上から下まで超解像で観察することに成功した(図5)。

この測定方法を用いて、直径1マイクロ(100万分の1)メートル以下のオートファゴソームの隔離膜の形状も容易に観察でき、前述の数値モデルの妥当性も実証された。水島さんは「オルガネラ動態解析グループの解析によって、数理モデリンググループが構築した数理モデルの妥当性を確認しました。1つのグループだけでは成し得なかった進展でしょう」と総括している。

水晶体の透明化機構の解明 新たな細胞内分解システム

水島さんたちは、オートファジー研究から、オートファジーとは異なる新たな細胞内分解の仕組みを発見した。生理機能解析グループが主導した「目の水晶体で起こる透明化の仕組みの解明」である。脊椎動物の目の水晶体の細胞は、元々は小胞体や

図3 曲率因子による隔離膜形態変化の数理モデル

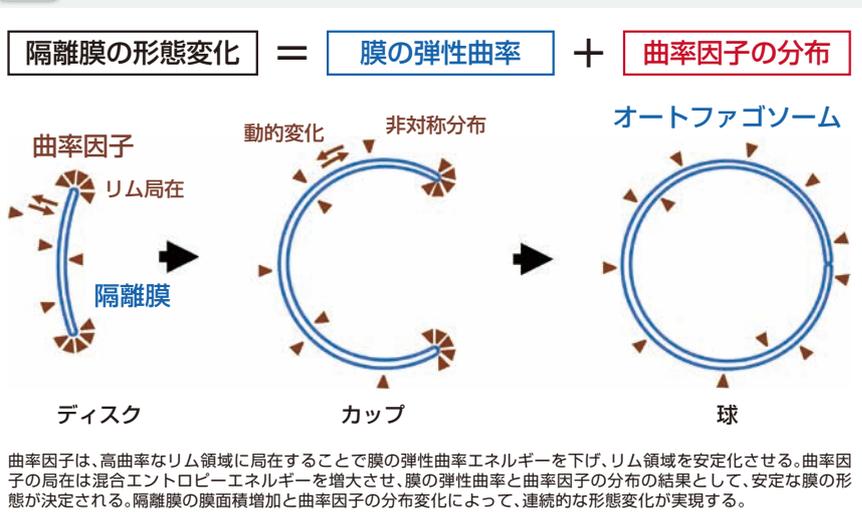
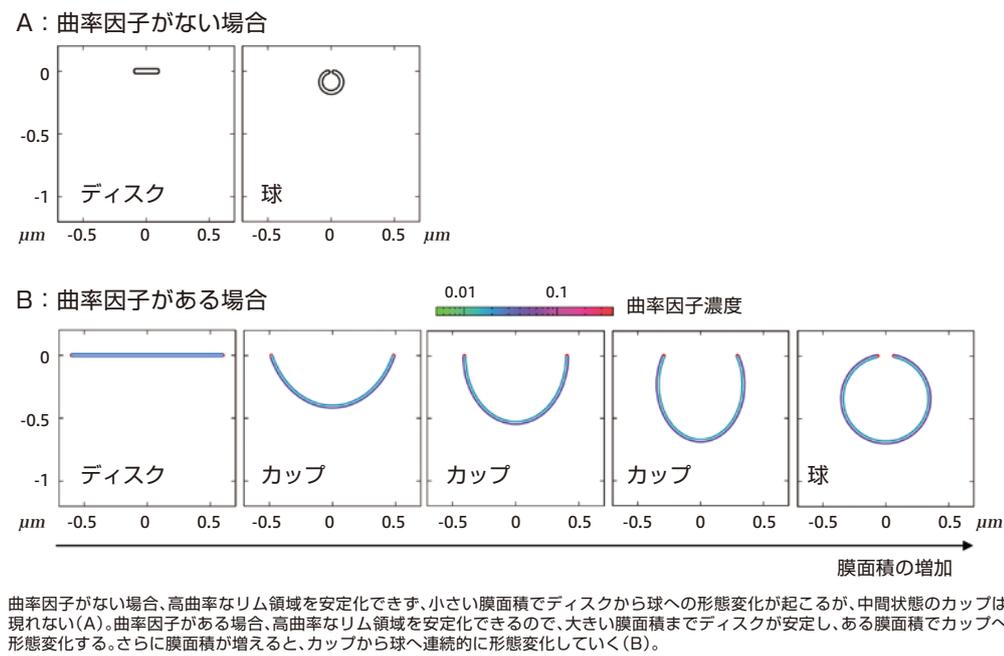


図4 膜形態変化の数理モデル解析結果



ミトコンドリアなどのオルガネラが詰まっている。しかし、水晶体ができる過程で、核を含めた細胞小器官が全てなくなってしまう。この現象自体は100年以上前から指摘されており、オートファジーの発見以降は、オートファジーによるものではないかと予想されていた。

一方、水島さんは20年前から、オートファジーを起こせないマウスでも水晶体の細胞小器官が分解され

ることを確認しており、水晶体で起こっている細胞内分解はオートファジーによるものではないと考えていた。しかし、そのメカニズムは長年不明だったという。ブレイクスルーのきっかけは、遺伝子を改変しやすく、生きた状態で細胞や組織を観察しやすいゼブラフィッシュをモデル動物として用いたことだ(図6)。

受精後2~3日目のゼブラフィッシュの水晶体を観察したところ、ミ

トコンドリアや小胞体がある場所で破けて周囲に散らばっており、やはりオートファジーの分解機構と異なることを確認した。水晶体で多く発現している遺伝子などを60種類ほど選び、それぞれの遺伝子を欠損させた魚を作って調べたところ、1つだけ、欠損によってオルガネラを分解できなくなる遺伝子が見つかった。この発見により、水晶体の細胞内分解は「PLAAT」という脂質分解酵素が関与していることが明らかになった(図7)。

オートファジーや特定のたんぱく質を選択的に分解するユビキチン・プロテアソーム系とは異なる新たな分解システムの発見である。「オートファジーの研究をしていなかったら得られなかった成果で、なおかつ生理機能解析グループがゼブラフィッシュの水晶体を観察しなければブレイクスルーも起こらなかったでしょう」と水島さんは話す。

他にも、分子・進化グループは、オートファジー遺伝子が進化の過程で変化していることを解明した。オートファゴソームが作られる時には、構成するたんぱく質の強力な共有結合が必須条件と考えられていたが、弱い非共有結合でも膜形成を始める生物もいることがわかった。「オートファジー遺伝子は進

図5 広域3次元光-電子相関顕微鏡法の開発

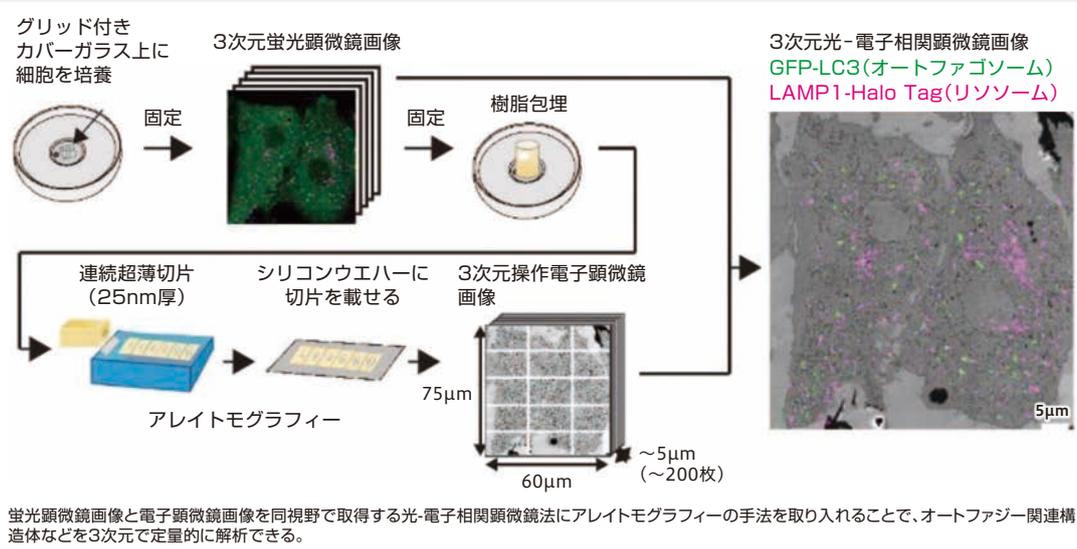


図6 ゼブラフィッシュ



体長3~4センチメートルほどの小型魚で、体表に紺色の縦縞がある。1週間に1回200個程度の卵を産み、遺伝学の研究に適したさまざまな特徴を持つ。水島研究室では5000匹近くのゼブラフィッシュを飼育している。

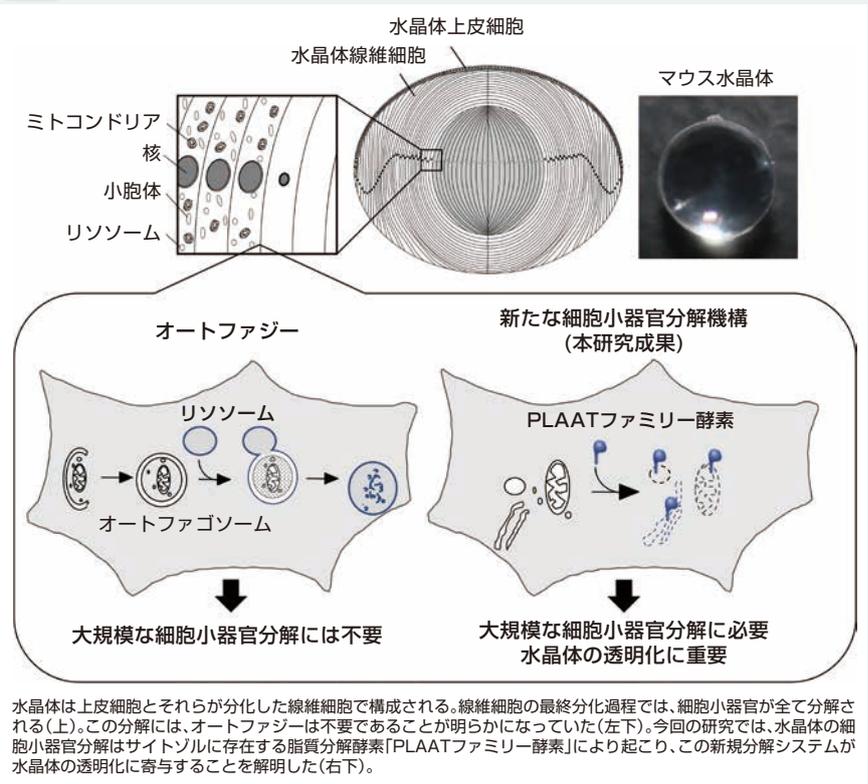
化の過程で大きく変化しており、各生物で働きを単純化しているところがあります」と水島さん。分子系の研究ではオートファジーを細胞レベルで正確に測定できるハロタグアクセス法の開発などの成果も発表している。

膜を中心に基礎研究を推進 オートファジーを超える発見へ

ERATOでの基礎研究は、病気や老化の解明や薬の効き目の測定などにも役立つ重要なものだ。今後について、水島さんはさらに基礎的な研究を進めていきたいと話す。その1つが「オートファジーの最後の段階はどうなっているのか」を明らかにすることだ。オートファゴソームに食べられたものは消えてなくなるように思えるが、たんぱく質は分解できても、膜成分は分解されにくく、残ってしまうことが多い。その後、膜成分がどうなるのかはまだよくわかっていない。

また、リソソームの分解酵素は、オートファゴソームの2枚の膜の間に入るが、消化酵素によって分解されるのは内側の膜だけで、外側の膜は溶けない。これらの膜は元々つながっていた同じ膜であるにも関わらず、溶けやすさに違いがある。この謎に対し「今後は膜にもフォーカスを

図7 水晶体における大規模な細胞小器官分解の模式図

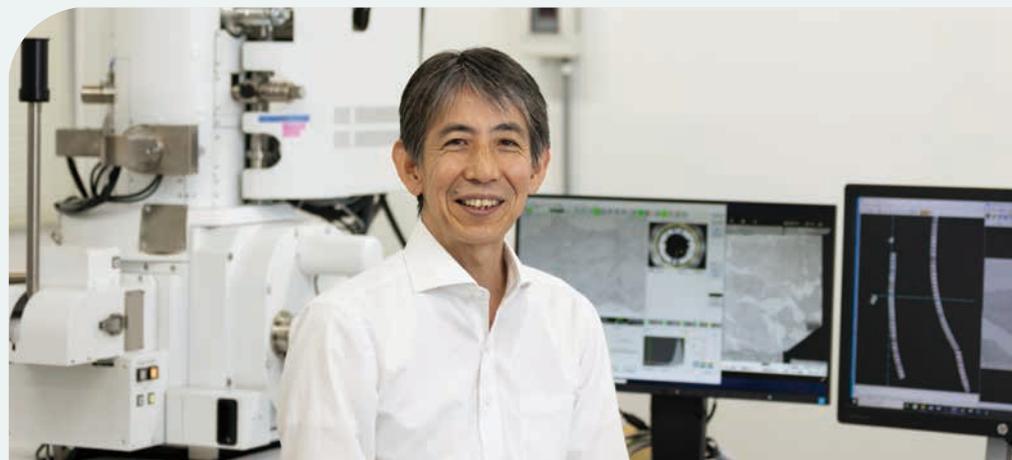


当てた基礎研究に取り組みたいと思っています」と水島さん。

ERATOでさまざまな研究成果を発表できたことについて、水島さんは4つのグループが分野横断的に融合することでブレイクスルーが起き、成果につながったと分析している。現在、プロジェクトに参画した多

くの研究者が日本各地の大学や研究機関で活躍していることも大きい。「4グループのメンバーと共に、今後もオートファジーにとどまらない細胞内分解研究を続け、オートファジーを超える発見もしていきたいです」と水島さんは語っている。

(TEXT:伊藤左知子, PHOTO:石原秀樹)



ERATO研究を通じて、分野を超えた人のつながりを作ることができました。皆さん、自分で思っている以上に他の分野に詳しくなっているはずなので、ぜひ分野横断的な研究を継続してほしいです。

安岡 宏和 *Yasuoka Hirokazu*

京都大学 アフリカ地域研究資料センター 准教授
2017年よりSATREPS研究代表者

カメルーン共和国の東南部をはじめとした中部アフリカの熱帯雨林では、野生動物の過剰な狩猟が大きな問題となっている。この地域に暮らす人々にとって、野生動物から得る食肉「ブッシュミート」は貴重なたんぱく源だが、際限なく狩猟や密猟が続けば彼ら自身の食料もなくなってしまう。京都大学アフリカ地域研究資料センターの安岡宏和准教授は「在来知」と「科学知」の協働を通して、住民の手による野生動物の持続的な管理と経済活動のモデル作りに取り組んでいる。

特集

OVERVIEW

「在来知」と「科学知」の協働を通して 住民主体の野生動物の持続的管理に挑む

野生動物から得る食肉の危機 森林資源マネジメントを研究

中部アフリカのカメルーン共和国、ガボン共和国、コンゴ共和国など7カ国にまたがるコンゴ盆地の熱帯雨林では、木材伐採を目的とした道路建設などがきっかけとなって、野生動物を求めてやって来るハンターや商人が増え、過剰な狩猟による「ブッシュミート危機」に直面している。「野生動物の減少は、生物多様性を脅かすだけでなく野生動物をたんぱく源としてきた地域住民の生活維持の面からも深刻な問題です」と語るのは、京都大学アフリカ地域研究

資料センターの安岡宏和准教授だ。

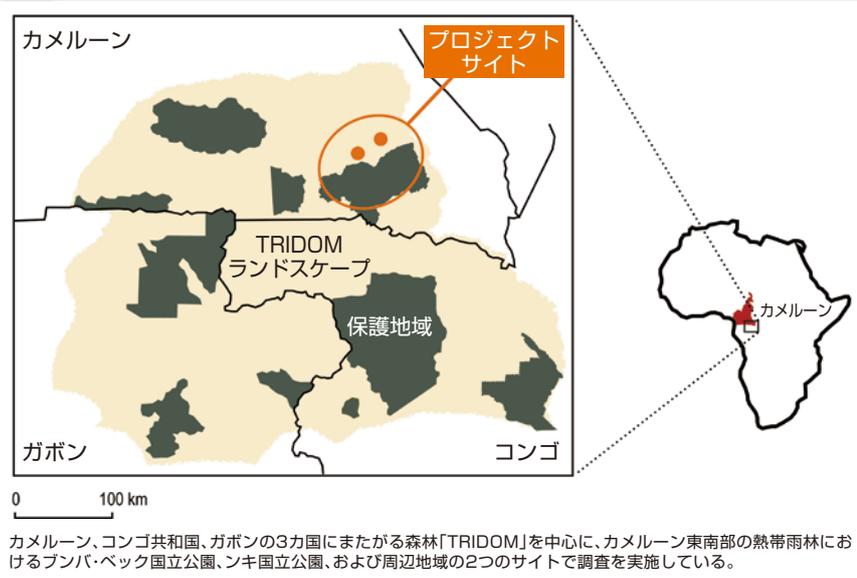
京都大学理学部で生態人類学を専攻した安岡さんは、博士課程にあった2001年から03年にかけて、延べ23カ月間にわたりカメルーンの熱帯雨林でフィールドワークを行った。「首都ヤウンデから東に600キロメートルの道なき道を進み訪れたのは、学校も病院も電気もない村でした。その村のさらに森の奥で暮らすバカ・ピグミーという民族の集落に滞在し、彼らと同じものを食べ、植物や動物の名前を覚え、森で生きる知恵などを学びながら生態調査を続けました」と振り返る。

ところが、フィールドワーク中

に、村の近くまで道路が整備されたため、希少な野生動物を求めてハンターや商人、象牙の密猟者などがやって来るようになった。一方で05年には、カメルーンの森林・動物省が一部を国立公園に指定して狩猟の取り締まりを強化した。外来のハンターだけでなく昔から狩猟をしてきた住民も取り締まり対象となり、保全当局と住民との間でトラブルが生じるようになっていった。

自給目的の住民の狩猟は「生業」として尊重されるべきだが、これまでのように住民任せにして狩猟を続けていけば、野生動物は減少してしまうと保全当局は考えており、両者

図1 SATREPSのプロジェクトサイト



の間には溝がある。「問題解決には、保全当局と地域住民が信頼関係を築き、協働して保全活動を推進することが欠かせません。それだけでなく、住民が過剰な狩猟を行わなくても済むように新たな収入源を考えることも重要です」と安岡さんは語る。しかし、家畜が病気になりやすく、下草の生えない熱帯雨林での畜産は難しい上に、観光化は一部の人が利益を得るだけの結果になりがちで、エコツーリズムのような観光資源開発にも限界がある。

安岡さんは、10年に京都大学アフリカ地域研究資料センターの荒木茂教授が研究代表を務めるJSTのSATREPS「カメルーン熱帯雨林とその周辺地域における持続的生業戦略の確立と自然資源管理：地球規模課題と地域住民ニーズとの結合」に参画し、非木材の森林資源を利用しながら住民が生活可能な未来について検証してきた。そうした研究を通じて、森との共生の中で住民が培ってきた「在来知」に、生態学に基づく「科学知」を統合し、住民による住民のための革新的な森林資源マネジメントを構築することが新たな研究テーマとなった。

その具体的な取り組みとして、安岡さんはSATREPSに応募し、今回

のプロジェクト「在来知と生態学的手法の統合による革新的な森林資源マネジメントの共創」が採択を受けた。プロジェクトでは、カメルーン国立農業開発研究所をカウンターパートとし、京都大学アフリカ地域研究資料センターを中心に生態学や文化人類学を含む幅広い学問分野の研究者を集めて、研究成果の社会実装を目指している(図1)。

狩猟の影響による生息数推定 野生動物の利用モデルを確立

プロジェクトの目標は、野生動物を持続的に利用するモデルと非木材森林製品の生産・加工モデルが組み込まれた、地域住民の主体的参画に基づく森林資源マネジメントの導入プロセスをカメルーンの保全関係機関に提案し、熱帯雨林地域に実装する道筋を示すことである。具体的な研究テーマとして、①在来知と科学知を統合した「持続的野生動物利用モデルの考案」②ブッシュミートの代替現金収入源となる「森林製品生産の確立」③マネジメントの「主体となる住民の育成と実装プロセスの策定」を掲げている。

「持続的野生動物利用モデル」を確立するには、大前提として地域に生

息する狩猟対象動物のバイオマスを正確に把握する必要がある。また、地域住民が主体的にマネジメントに参画するためには、彼らが日常生活の中で得られる情報に基づく簡便な指標でなければならない。安岡さんは長年にわたるカメルーンの森での生態人類学研究を通じて、そのような条件を満たす指標を考えていた。それが、住民の主な狩猟対象である偶蹄類のダイカー類の種構成だ。

カメルーン東南部には中型のレッドダイカー4種と小型のブルーダイカー1種が生息している。罾には中型のレッドダイカーがかかりやすく、小型のブルーダイカーは繁殖力が強い。したがって、狩猟圧が強まると、よりレッドダイカーが速く減り、ブルーダイカーが相対的に多くなると考えられる。つまり、罾で捕獲する中型と小型のダイカー類の比率が、狩猟資源バイオマスの指標になるのではないかという発想であった。同じように、ダイカー類とより小型の齧歯類の比率も指標になる可能性がある。

そこで、京都大学アフリカ地域研究資料センターの本郷峻特定助教をはじめとする研究チームは、安岡さんの提案した指標の有用性を検証するために、カメルーンの熱帯雨林にある2つの国立公園とその周辺地域でカメラトラップ調査を行った(図2)。4キロメートル四方のグリッドごとに自動撮影カメラを設置し、得られた映像データから単位面積当たりの生息頭数、つまり生息密度を推定するものだ。その推定原理である「RESTモデル」はプロジェクトメンバーである日本大学の中島啓裕准教授が考案したもので、本郷さんが現地の環境に合わせて細部をチューンナップした。

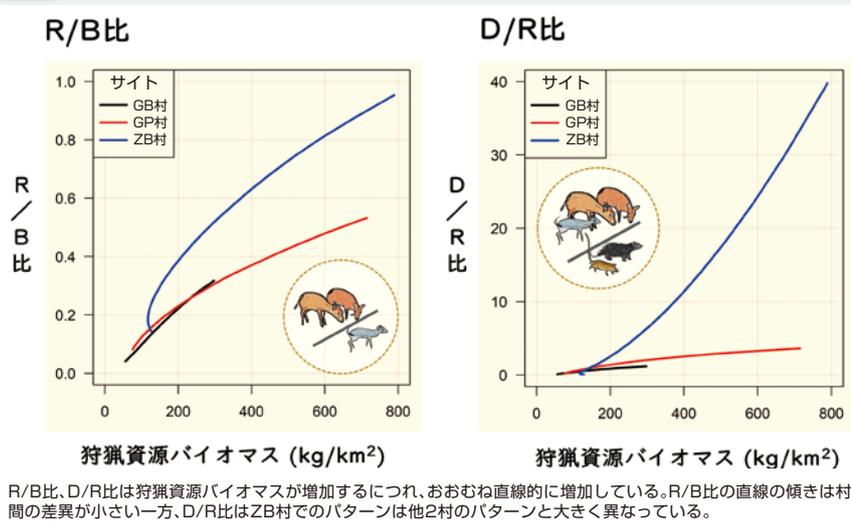
何万カットもの膨大な映像データから動物を同定し、画面を見ながらカメラ前に設置した区画内での滞在時間を計測した上で、RESTモデルで推定した結果、レッドダイカー類とブルーダイカー類の撮影頭数比で計算される指標(R/B比)が、狩猟資

図2 カメラトラップ調査



(Photo:左 Timothée Kamgaing, 右 Projet Coméca)
 地域住民と協力してカメラトラップを設置する様子(左)。カメラトラップで撮影された中型のレッドダイカー(右上)と小型のブルーダイカー(右下)。

図3 ダイカー類の推定生息密度の比と狩猟資源バイオマスとの関係



出典:Hongo et al. (2022) doi.org/10.1111/1365-2664.14257

源バイオマスに対して直線に近い正の相関を示した(図3)。加えて、3つのサイトで得たデータそれぞれが相関性を持つこともわかった。また、ダイカー類と齧歯類の撮影頭数比で計算される指標(D/R比)も、狩猟資源バイオマスと直線的な正相関を示した。これにより、2つの指標が狩猟資源バイオマスの推定に有効であることを証明した。この成果は英国の国際学術誌に掲載された。

コロナ禍も現地がデータ収集モニタリング法の実証にめど

カメラトラップ法によるモニタリングは、カメラの設置や電池交換・メ

ンテナンスだけではなく、映像データの回収・解析も行ふ必要がある。それらを住民が主体的かつ継続的に行うことは困難である。そこで研究チームは次のステップとして、住民の狩猟によって捕獲された獲物から算出したR/B比やD/R比が狩猟資源バイオマスを正確に推測できるかどうかを実証することにした。

研究チームは、20年からカメラトラップ法で得た狩猟資源バイオマスと、罠の捕獲頭数比から算出された狩猟資源バイオマスが正の相関関係を示すかを検証し、住民に比較的受け入れられやすい野生動物モニタリング法の実証に向けて研究を進めようとしていた。ところが、20年に

入って新型コロナウイルス感染症が世界的に拡大し、現地活動の中断を余儀なくされた。現地に滞在していた研究者も、感染防止のためにヤウンデにとどまったままでサイトに入れなくなったという。

「サイトではインターネットがなんとか使えたので、カウンターパートであるカメルーンの研究者や地域住民のご協力により自動撮影カメラの管理やデータ収集など、最低限の活動を続けることができました」と安岡さん。22年末になり、コロナ禍が沈静化したことで現地との行き来が再開した。住民の協力により罠での捕獲数を記録し、同時に同じ地域でカメラトラップ法を使って狩猟資源バイオマスを推定することで、罠の捕獲頭数比と狩猟資源バイオマスが正の相関関係を示すことを実証するめどが立ってきた。

森林産品生産モデル目指す説明責任を担う人材育成も

「森林産品生産の確立」のプロジェクトの目標には、住民の狩猟の抑制に伴う減収を補うとともに、野生動物のモニタリング活動の運営に必要な現金収入確保の提案も含まれている。そのために、市場優位性を持ちうる非木材森林産品を選定し、住民の活動を考慮しながら生産・加工、品質管理法を標準化することで、持続的な商品供給を可能とする森林産品生産モデルの構築を目指している。

森林産品で有望なものとして、アフリカマンゴー(Irvingia gabolensis)の実やジャンサン(Ricinodendron heudelotii)などのナッツ類が挙げられる。これらのナッツはカメルーン国内だけでなく隣国のナイジェリアでも人気が高いが、固い殻を割ってナッツを取り出す作業が面倒で手間がかかる。そこでアフリカ地域研究資料センターのひらいまさあき平井將公特定助教は、殻割り機械を導入して効率化を図っている。しか

し市販の機械ではうまく殻が割れないことが多く、非常に効率が悪いため、どのような下処理をすれば殻が割れやすいかを解明するために、住民と共に試行錯誤を続けている(図4)。

図4 アフリカマンゴーの実を乾燥させている少女たち



サイトにおいて最も重要な非木材森林産品アフリカマンゴーの実の乾燥は、現状全てが手作業で行われている。

さらに、プロジェクトが考案した「持続的野生動物利用モデル」と「森林産品生産モデル」を組み入れた「森林資源マネジメント」を定着させるため、地域住民の中から人材を育成する取り組みも急いでいる。安岡さんは23年5月、9月とカメルーンに渡航し、カウンターパートとの連携強化を図るとともに、2カ所のサイトに在来知と科学知をそれぞれ担う人々が協働する研究拠点となるステーション作りを進めてきた。

同時に、住民の主体的参画に基づく森林資源マネジメントを定着させるため、在来知と科学知の媒介者として持続的資源利用の推進を担う住民の育成も行っている(図5)。「彼らを交えた試行を通して地域の状況に合わせてモデルを調整した上で、実装プロセスに落とし込んでいます。このプロセスは有識者の評価を得た

図5 森林資源マネジメントの理解のための地域住民とのミーティング



野生動物のモニタリング方法やこれからの利用、集落内外での暮らしや経済活動について、住民が主役となるミーティングが展開されている。

上でカメルーンの保全関係機関に提言し、カメルーンの2つの国立公園の管理計画に組み込まれることを目指しています」と安岡さんはプロジェクトの仕上げに向けた取り組みを語る。

生物保全と生活向上両立へ 若手研究者の事業参画促す

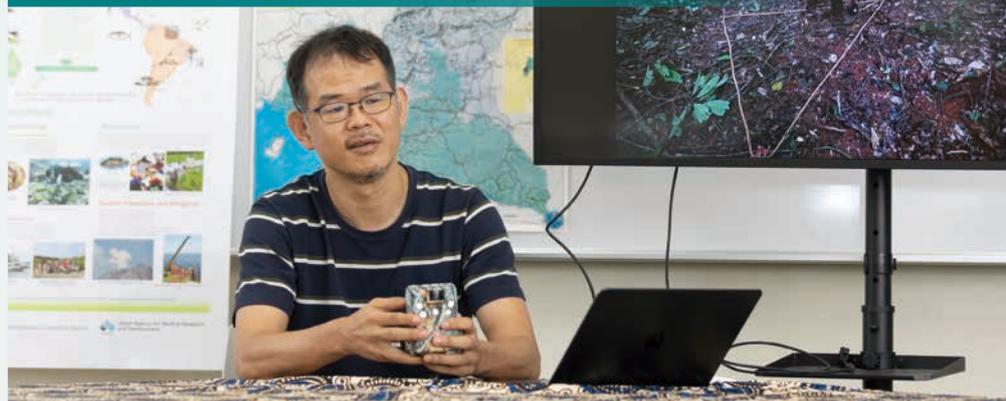
プロジェクト終了後5~10年内の目標では、カメルーンを含む7カ国に広がるコンゴ盆地の熱帯雨林で、生物多様性の保全と住民生活の向上が両立できる地域住民主体の森林資源マネジメントとしての展開を目指している。しかし、現状では紛争といった政情不安などで立ち入りできない国もあり、安岡さんはまずは隣接国

のガボン共和国での実践を模索しているという。

さらに、今回確立した「野生動物の種構成比を資源量の予測に用いる方法」は、アフリカにとどまらずアジアや南米の熱帯雨林地域にも適用できる可能性がある。「そうした取り組みは10年、20年単位の息の長い活動が必要ですから、次世代を担う若手研究者の育成にも力を入れていきたいですね。今回のプロジェクトでは日本およびカメルーンからも10人を超える学生が参加して大きな役割を果たしました。プロジェクトの成果を広く発信することで、さらなる若手研究者の参画を促していきたいと思っています」と安岡さんは今後の抱負と期待を述べた。

(TEXT: 森部信次, PHOTO: 石原秀樹)

研究者、専門家、学生と共に、現地の住民や行政と協力しながら調査を進めることができました。カメルーン発の森林資源マネジメントを、同じ課題に悩む各国へも広げていきたいです。



公式ウェブサイト
<https://www.jst.go.jp/global/index.html>

地球規模課題対応国際科学技術協力プログラム SATREPSは、JSTとJICAが連携の下、地球規模課題を解決すべく日本と開発途上国の研究者が共同で研究を行うプログラムです。



Twitter
<https://twitter.com/SATREPS>



Facebook
<https://www.facebook.com/Friends.of.SATREPS>

イノベ 見て歩き

連載：第6回



小型衛星の「ラストマイル輸送」実現へ ハイブリッドロケット再点火装置を開発

右 **ケンプス ランドン** Kamps Landon 北海道大学 宇宙環境システム工学研究室 招聘教員 / Letara 共同CEO 2020年～23年 A-STEP 研究責任者

左 **永田 晴紀** Nagata Harunori 北海道大学 大学院工学研究院 教授 / Letara CTO

中央 **平井 翔大** Hirai Shota 北海道大学 大学院工学研究院 博士後期課程 / Letara 共同CEO

社会実装につながる研究開発現場を訪ねる「イノベ見て歩き」。第6回は、北海道大学宇宙環境システム工学研究室のケンプス ランドン招聘教員らが設立した北海道大学発のスタートアップ企業を紹介する。宇宙空間で相乗りした小型人工衛星を所定の軌道に導く「ラストマイル輸送」の実現を目指し、ハイブリッドロケット推進システムを開発している。

荒野で実感した宇宙インフラ 北海道でスタートアップ設立

宇宙を人や物が自由に行き来する一。そんな夢のような社会を模索しているのが、北海道大学宇宙環境システム工学研究室のケンプス ランドン招聘教員だ。ケンプスさんはかつて米国陸軍に所属し、アフガニスタンでの任務に従事した。「周りに何も無い荒野でも、人工衛星のおかげでインターネットが使えました。人工衛星の素晴らしさを実感するとともに、この宇宙インフラを全ての人が活用でき

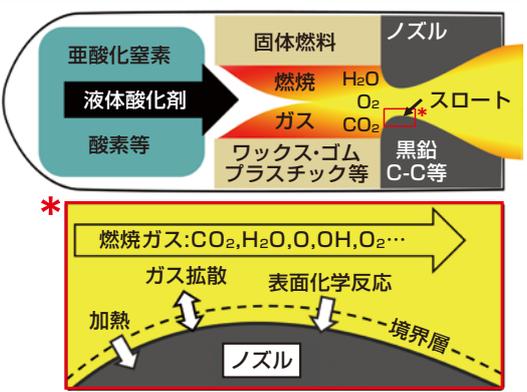
るようにしたいと考えたのが、研究の道に進んだきっかけです」と話す。

その後、ハイブリッドロケットの開発に取り組む北海道大学大学院工学研究院の永田晴紀教授の下で学ばべく来日した。ハイブリッドロケットは、プラスチック性の固体燃料と液化させた酸化剤ガスを推進剤としたロケットで、燃料は固体燃料ロケットの、酸化剤は液体燃料ロケットの、それぞれの利点を備えている。シンプルな構造で制御しやすく、爆発の危険性がない上、燃料も安価という優れた特徴を持つ(図1)。

ケンプスさんが永田さんと出会った2015年、研究室には当時修士1年だった平井翔大さんが所属していた。「研究室で猛勉強していたケンプスさんの姿を今も覚えています。毎日顔を合わせる中で意気投合し、博士前期課程修了後にいったん民間企業へ就職してからも頻りに連絡を取り合っていました」と平井さんは振り返る。充実した年月を経て、ケンプスさんらはハイブリッドロケットでの宇宙輸送の事業化を模索し始める。市場調査を進める中で見えてきたのは、小型の人工衛星などを目的地に送る「ラストマイル輸送」へのニーズだった。

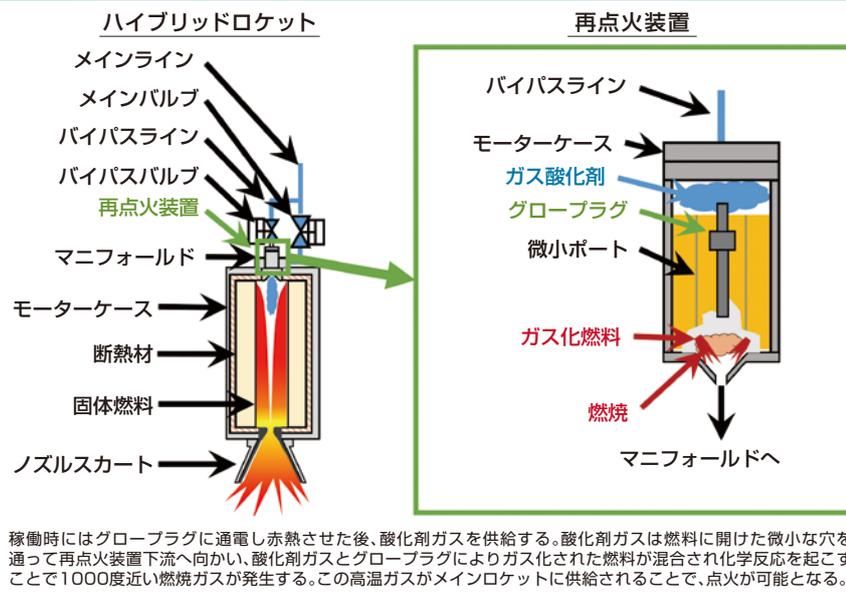
現在、人工衛星の打ち上げは順番待ちの状況が続いている。「そのため、複数の小型人工衛星を1つのロケットへ搭載する『相乗り』が増え、それぞれの人工衛星が目的の軌道にたどり着くための移動手段が必要となっています。私たちが開発するハイブリッドロケットで、この課題を解決しようと考えました」。こうした経緯のもと、20年にケンプスさんと平井さんが共同CEO、永田さんがCTOを務める「Letara(北海道札幌市)」を設立した。小型衛星用のハイ

図1 ハイブリッドロケットの構造



液化された酸化剤ガスは気化された後、タンクから配管を通り燃焼室に注入されることで、燃料を激しく燃やし、ノズルから燃焼ガスが噴出される。燃料が安価で製造、貯蔵、輸送時における爆発の危険性がなく、推力の制御もしやすいという利点を持つ。

図2 ハイブリッドキックモーターの再点火装置の概要



ブリッド推進系の事業化を目指すスタートアップ企業の誕生である。

打ち上げ後の軌道変換に向け 低電圧・低電力の装置を提案

Letara設立と前後して、ケンプスさんは「宇宙推進機用ハイブリッドロケット再点火装置の開発」に関する計画を提案書にまとめ、JSTのA-STEP産学共同(育成型)へ応募した。「研究開発と事業化を支援するA-STEPは、大学発スタートアップ企業を立ち上げた私たちにとって願ってもない機会でした。北海道大学でも産学連携のスタートアップ支援が始まり、開発に向けた最高の環境を準備していただきました」。A-STEPの採択を経て、ケンプス

さんは小型衛星に積む軌道変換用推進システム(キックモーター)にハイブリッドロケットを用いる「ハイブリッドキックモーター」の開発に着手した。

ラストマイル輸送において、交点を持たない軌道への軌道変換や他天体周回軌道への投入には、キックモーターの再点火が不可欠だ。そこで、ケンプスさんはハイブリッドロケットの固体燃料に予熱プラグを挿入した簡素な構造、かつ低電圧・低電力の再点火装置を提案した(図2)。開発には平井さん、永田さんをはじめ、研究室の学生も深く携わっている(図3)。「3Dプリンターを使った固体燃料のカスタマイズから組み立てまで、協力して進めています。点火実験はとても危険なため、実験室内は安

全そして『整理整頓』が第一です」とケンプスさんは笑顔で語る。

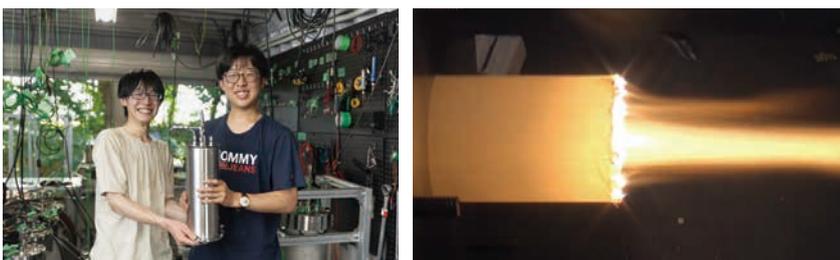
他にも、ハイブリッドロケットのノズルスロート壁面と燃焼ガスに含まれる酸化物質の化学反応や「ノズル侵食」の解明も進めている。ノズル侵食とは、固体燃料の破片が高速で衝突したノズルスロート部分が劣化したり削れたりしてしまう現象のことだ。独自のシミュレーションと実証実験を通じて現象を解明し、改良設計へ反映させることができた。

高推力・安全・安価を求めて 「真っ白」からのスタート

A-STEP終了後の現在は、ハイブリッドキックモーターによる軌道変換の実証などを計画し、Letaraでの事業化を加速していきたいというケンプスさん。現在は、ハイブリッドロケットの燃焼効率・燃料後退速度・推力の3つの課題全てを解決可能な端面燃焼式の実用化技術確立に向け、地元企業と共同で研究開発を進めている。「高推力・安全・安価なハイブリッドロケットを開発することで、今よりも宇宙が身近に感じられる未来世界の実現を目指し、これからも平井さん、永田先生をはじめ、多くの人と共に歩んでいきたいと思っています」。

Letaraは先住民アイヌの言葉で「真っ白」という意味を持つ。北海道札幌市を拠点とした冬の雪景色のイメージと、スタートアップとしての新しさ、そして将来的にどんな色にでもなれる可能性を秘めている、という意味を込めたという。今年、経済産業省のGo-Tech事業(成長型中小企業等研究開発支援事業)に採択され、1億円の資金調達にも成功したLetaraは、さまざまな人のノウハウを生かしながら研究開発を進めるスタートアップ企業として、どのような色を描いていくのか。多くの可能性を秘めたケンプスさんらの挑戦は始まったばかりだ。(TEXT:横井まなみ、PHOTO:石原秀樹)

図3 実験棟での開発・実験の様子



キャンパス内の実験棟では学生も参加し、ロケットの本体から推進系まで、さまざまな研究開発を行っている(左)。ハイブリッドロケットの推進力測定実験では、小型衛星の短時間での移動に必要な100ニュートンを上回る4万ニュートンの推進力を検証した(右)。

ソフトカプセル廃材から高性能生分解性プラスチックに熱可塑性付与、海洋ごみ削減に貢献

医薬品などで用いるソフトカプセルの製造過程では、被膜の残渣が年間数百トン規模で発生すると推定されています。この被膜廃材は不純物が少ないため、プラスチックとしての再生利用が期待できます。しかし、主成分のゼラチンはプラスチック製品の製造に必要な熱可塑性がなく、リサイクルが難しいことが問題でした。

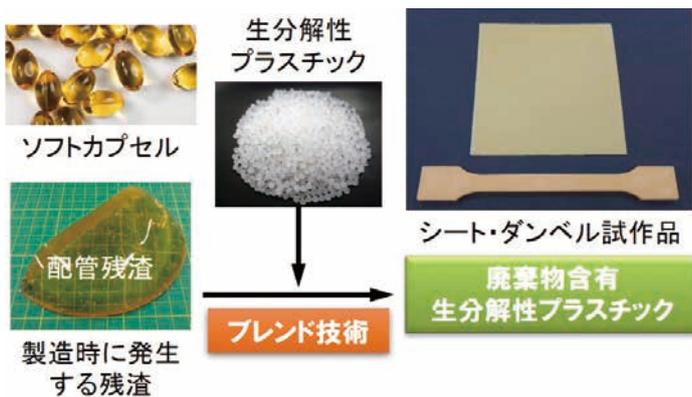
これに対し、大阪大学大学院工学研究科の宇山浩教授らの研究グループと健康補助食品・医薬品メーカーのアピ(岐阜市)は、被膜廃材を用いた高性能な生分解性プラスチックを開発することに成功しました。ソフトカプセルの被膜にはゼラチンを可塑化させるグリセリンが含まれ、被膜の性質に重要な役割を担っています。宇山教授らはこの特性に着目し、被膜廃材に含まれる水分を加熱処理により除去することでゼラチンとグリセリンの混合物にして、廃材を熱可塑性しました。熱による変形が可能になったことで、製品を作る際にさまざまな成形技術が適用できます。

さらに、熱可塑性ゼラチンをポリ乳酸などの生分

解性プラスチックとブレンドすることで、高性能な生分解性プラスチック試作品を開発しました。ゼラチンを含むプラスチック上にバイオフィルムが形成されることで、生分解性のさらなる向上が期待されます。

この成果によって、資源循環や海洋ごみ削減への貢献はもちろん、廃棄物の積極的なリサイクルに対する社会的要請に応える第一歩になると期待されます。今後は、産学連携による成形技術の開発と試作品製造への展開が計画されています。

ソフトカプセル皮膜廃材が組み込まれた高性能生分解性プラスチック



「量子メス」イオン入射器の原型機が完成 既存の1/40サイズ、2030年の実用化を目指す

炭素イオンを光速の約70パーセントにまで加速させ、がん細胞に照射する「重粒子線がん治療」は、患者の身体に与える負担が小さく、日帰りがん治療も可能なことから、近年大きな注目を集めています。しかし、大規模な加速装置や専用の建物が必要なのが普及の障害となっています。

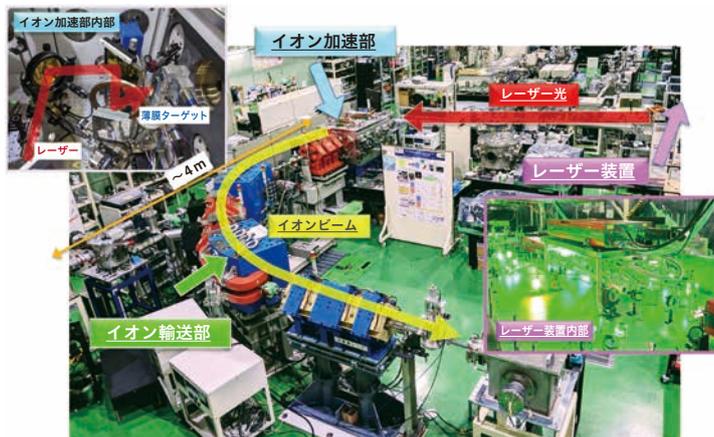
量子科学技術研究開発機構関西量子科学研究所の榊泰直 首席研究員らは、既存装置の面積比を40分の1程度に小型化した重粒子線がん治療装置「量子メス」の実現に不可欠なレーザー光によるイオン加速を利用したイオン入射器の原型機を世界で初めて完成させました。住友重機械工業、日立造船との共同研究です。

量子メスは、炭素イオンを発生させて予備的に加速させるイオン入射器と、生成した炭素イオンを体内のがん細胞に届けるために必要な速度に加速させるシンクロトロンとの2つの加速器から成ります。シンクロトロンはすでに実証機の製作段階にあります。

研究チームらはイオン入射器を構成する「レーザー光発生装置」と、レーザー光を標的に照射して

イオンを加速する「イオン加速部分」、発生したイオンビームを制御しながらシンクロトロンへ輸送する「イオン輸送部分」の装置を個別に開発してきましたが、今回これら3つの要素を組み上げて原型機とし、6月から統合試験を開始しました。今後3年間をめどに、実験データとシミュレーション結果の両面から、最終的な量子メスのデザインを確定する予定で、2030年の実用化を目指しています。

レーザー光を用いた量子メス用小型イオン入射器の原型機



「量子メス」開発プロジェクトでは、「イオン入射器」と「シンクロトロン」の2つの加速器に新しい技術を導入することで、装置の小型化と高度化を目指している。そのうち、今回は産学連携により写真のような「イオン入射器」の原型機を完成させた。

「樹状」の海洋細菌が石油を素早く分解 界面の表面積を広げ、接触しやすくなるメカニズム解明

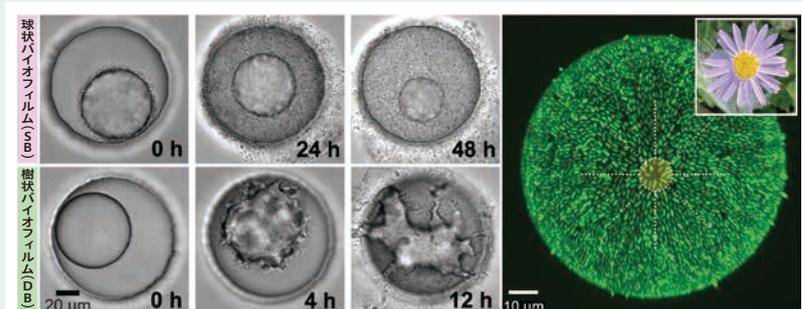
海洋に生息する多くの細菌は「バイオフィーム」と呼ばれる集団を形成しています。海洋への石油流出事故の際には、ある種の海洋細菌が油の周囲にバイオフィームを形成し、これを栄養源として生分解することが知られています。しかし、バイオフィームの形成と油分解との関連は解明されていませんでした。

筑波大学生命環境系のウタダ・アンドリュー准教授らの研究グループは、油分解性細菌と微小な油滴との相互作用を高い解像度で可視化し、細菌が油を素早く分解するメカニズムを解明しました。用いたのは「マイクロ流体デバイス」という装置です。大きさが0.1ミリメートル以下の油滴を保持し、細菌の挙動を1週間以上観察し続けることが可能です。この結果から、海洋細菌「*Alcanivorax borkumensis*」が油滴上に2つの異なるタイプのバイオフィームを形成することを確認し、球状バイオフィーム(SB)と樹状バイオフィーム(DB)と名付けました。

マイクロ流体デバイスで培養した油滴は人

工海水中で球状の構造を保ち、界面にSBが形成されても形は変わりません。しかし、界面にDBが形成されると、油滴の形は樹状に変わっていきました。これによって界面の面積が急激に拡大し、より多くの細菌が油に接触できるようになります。SBは油滴体積の90パーセント以上を約72時間で消費しましたが、DBは同等の消費を約20時間で達成しました。

この研究は、細菌が餌である油を効率よく利用していることを実証しました。このようなメカニズムは、類似した生物の研究にも応用可能であるとともに、微生物などで環境汚染物質を除去するバイオレメディエーションの効率化に貢献します。



球状バイオフィーム(SB)と樹状バイオフィーム(DB)の画像。SBは油滴が球状を保っているが、DBでは油滴が樹状突起のような形状に変化し、油がチューブ状に伸びている。細菌が野菊の花びらのように配置している様子(右)。

交通渋滞を正確に予測するAIを開発 警視庁データで学習、1時間先の誤差40メートル以下

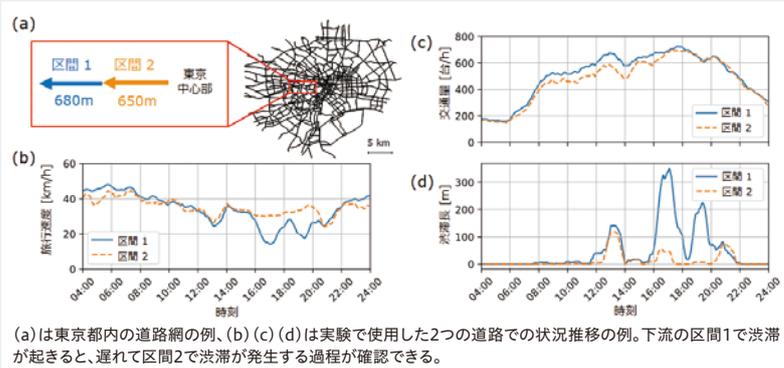
生活と密接に関わる交通渋滞は、私たちにストレスを与えるだけでなく、日本国内だけで年間約10兆円もの損出をもたらす。環境にも影響を及ぼす深刻な問題となっています。この問題を解決すべく、AIを用いて交通渋滞がいつ、どこで発生するかを予測できるシステムに世界中から注目が集まっています。

京都大学大学院情報学研究科の竹内孝講師らの研究グループは、交通工学の理論に基づき、ビッグデータを介して混雑の変化と道路網の関係を学習し、渋滞の場所と長さを予測する新たなAIを開発し「QTNN」(Queueing-Theory-based Neural Network)と名付けました。道路の混雑状況と道路網のデータから、深層学習によって交差点ごとの平均速度と交通量を予測し、さらに交通工学で利用される交通流モデルを補正しつつ渋滞長を予測する2段階方式で、より正確な渋滞予測を実現しました。

QTNN開発には警視庁から提供を受けた

データを用い、東京都内1098カ所の道路における「1時間先の渋滞長を2カ月間予測する実験」で、平均誤差40メートル以下という高精度な予測を達成しました。これは、現時点で最先端とされる深層学習手法より予測誤差を12.6パーセントも削減しています。

警視庁が取り組む交通管制システムとして検討が進んでおり、実環境における本格的な運用に向けた評価試験も予定されています。さらに信号制御や道路工事、事故発生などの情報を活用することで、円滑な都市交通の実現が期待されます。



(a)は東京都内の道路網の例、(b)(c)(d)は実験で使った2つの道路での状況推移の例。下流の区間1で渋滞が起きると、遅れて区間2で渋滞が発生する過程が確認できる。

飯嶋 益巳 Iijima Masumi

東京農業大学 応用生物科学部
食品安全健康学科 教授

Profile

千葉県出身。1998年東京農業大学大学院農学研究科醸造学専攻修士課程修了。2011年名古屋大学大学院生命農学研究科で博士(農学)取得。大阪大学産業科学研究所などを経て、23年より現職。22年より創発研究者。



たまにゴルフをします。

Q1. 研究者を志したきっかけは？

A1. 恩師と出会い、大きな可能性を感じ「バイオセンシング」の道へ

中学・高校生の頃に「バイオテクノロジー」が大きく注目されていて、そのワードがずっと頭の中にありました。それが次第に具体化し、遺伝子組み換え技術や、微生物を利用した伝統的な発酵食品などについて詳しく学びたいと思うようになり、東京農業大学の醸造学科に進学しました。とにかく実験が好きで、研究室での恩師との出会いもあり、修士課程まで進みました。

修了後もバイオテクノロジーに関連する研究を続け、その後所属した大阪大学産業科学研究所で「バイオセンシング技術」の研究に出会いました。バイオセンシングとは、生物が持つ分子認識能力を用いて、アレルギーやがんマーカーなどの特定の物質を検出する技術です。新たに出会った恩師と共に研究を進める中で、特に興味深く、大きな可能性があると感じた「バイオセンサーの高感度化」の研究を始めました。

Q2. 具体的な研究内容は？

A2. フード+ナノバイオサイエンスを使い「食べ頃」「賞味期限」を定義

近年、新しい機能をもつ食品の出現などにより、食品の安全に対する関心や不安が増えています。一方で、食べ頃や賞味期限などの品質管理の基準が定められていない食品があります。

その中で食品の検査法の1つとして注目されているのが、バイオセンサー

です。私はそのバイオセンサーを構築するための「ナノバイオサイエンス」と「フードサイエンス」を融合させた「フード+ナノバイオサイエンス」というカテゴリーを作り、食品の安全性や品質管理などについての研究を行っています。

いわゆる熟成肉は、一定期間低温で食肉を寝かせることでよりおいしくなりますが、人によって「最もおいしい」と感じる熟成期間はさまざまで、賞味期限も定まっていません。創発の研究では、この「食べ頃」や「賞味期限」の指標となる新しいマーカー分子を発見し、そのマーカーを高感度に検知するバイオセンサーの開発を目指しています。この技術ができることで、科学的な根拠に基づいた食べ頃や賞味期限が定義され、専門知識がなくても、容易に食品の品質を管理できると考え、研究を進めています。



熟成肉のサンプル採取の様子です。

Q3. これから研究者を目指す人に一言

A3. 人との出会いを大切に 海外で立ち位置を見直そう

まず初めに、人との出会いを大切にしてほしいです。私が今、母校で教育や研究に携わることができているのは、これまでに出会った恩師や先輩、友人のおかげです。さまざまな人との出会いは、必ず自分の知識や技術の糧になります。また、私は実験が好きで卒業後も研究職の道に進み、今に至ります。皆さんも好きだと思ふことはぜひ続けて、もしそれが研究であれば、将来的には「好き」という気持ちに加えて、社会に還元できる研究を目指してほしいです。

研究者として活動していくには、留学などの海外経験も大切だと思います。知識や見識が高まるのはもちろん、国際共同研究にもつながります。私も海外経験を通して、世界の中で自分がどんな位置にいるのか、学術や研究に対して自分がどう向き合うべきかを客観的に見直す

きっかけになりました。ぜひ、海外での経験を視野に入れて挑戦してください。

(TEXT:片柳和之)

食品の食べ頃や賞味期限が簡単にわかる 測定技術の開発を目指して

