

## 2021 年市民講座 報告

大隅基礎科学創成財団 理事  
大谷 清

大隅基礎科学創成財団は 2021 年 8 月 28 日、「生命の不思議 — 地球上の生命の多様性を支える仕組み」をテーマに、オンライン (webinar) で市民講座を開きました。講座には全国から 324 人が参加登録、うち 220 人が参加、大隅良典財団理事長のあいさつの後、國枝武和氏 (東京大学理学系研究科准教授) が「クマムシ」、本郷裕一氏 (東京工業大学生命理工学院教授) が「シロアリ」をそれぞれテーマに講演、財団評議員の木村宏 (東京工業大学教授) の司会でチャットによる活発な質疑も行われ、盛況のうちに閉会しました。以下にその要旨を報告します。

### 大隅理事長の挨拶

日本の基礎科学研究の現状に強い危惧を抱いている。国際的にも日本研究力の低下が明らかになり、もはや国に支援をお願いするだけでは足りず、企業を含めた民間の力で支えていかなければならない。新型コロナウイルスに有効なワクチンとして開発、接種されている mRNA ワクチンも、10 年以上の基礎研究から生まれたものだ。

当財団は科学を大切に思う企業、個人や多くの研究者の支援、協力を得て新しい社会実験に取り組んでいる。必ずしも研究費に恵まれない研究者に研究費を助成し、企業と大学との関係を互いに研究力を高められるものに再構築し、小中高生と先端研究者のふれあいの場を設けるなどがそれで、活動はこの 8 月で 5 年目に入った。

市民講座は多くの人に科学の面白さ、基礎科学の大切さを知っていただくのが目的だ。お二人の講師のお話から「生命の不思議」を存分に味わっていただきたい。

### 講演 1 クマムシはどうやって極限環境に耐えるのか？

國枝 武和  
東京大学理学系研究科 准教授

クマムシは「最強の生物」と言われている。乾燥すると生命活動を止める。これを「乾眠」と呼ぶ。が、水をかけると 10~20 分で生き返る。「乾眠」のように、生命活動が停止しても死んだわけではない「生」でも「死」でもない状態を「潜在生命」と呼ぶ。

動画 <https://youtu.be/TCUaEgSG5H8>



「乾眠」するクマムシの最大の特徴が極限環境下でも生きられることだ。温度でいえば最高 100°C から最低 -273°C のほぼ絶対零度まで、気圧では 7.5 GPa (ギガパスカル)、水深に直すと 750km、マリアナ海溝の 75 倍もの深さの水圧から、30  $\mu$ pa (マイクロパスカル)、高度に直すと 400km、国際宇宙ステーションの高さの真空にも耐えられる。放射線もヒトの致死量の 1000 倍、5000 Gy (グレイ) を浴びても死なない。

2007 年に乾眠状態のクマムシを穴の開いた箱に入れて高度 258~281km の宇宙ステーションに打ち上げ、10 日間宇宙空間に直接曝露したが、水をかけると生き返った。ただし紫外線を浴

びたものは死んだ。2019年にイスラエルが数千匹のクマムシを月面探査機に載せて打ち上げたが、月面着陸時に探査機の制御を失い秒速140mで月面に衝突した。最近、クマムシは秒速728mでの衝突に耐えうるということが判明したことから、今も月面で生きている可能性がある。

一体、クマムシがこのような極限に耐える仕組みは何なのか、「乾眠」がなぜ可能なのか。

クマムシは体が1ミリぐらいの小さな生き物で分類学上「緩歩動物部門」に分類される。エビなどの節足動物と線虫などの線形動物の中間に位置する。小さいながらも脳と神経系を持ち、筋肉系で活動する。肺やエラ等の呼吸器系や循環器系はなく、消化管と筋肉が主要な体内器官である。

極限環境下で生きる能力を備えているのが陸に住む陸生クマムシで、クロレラなどの藻類を食べたり、ワムシなどを捕食して生きている。「乾眠」状態では数カ月は保存できる。冷凍すると30年生きたというデータがある。酸化が抑えられるためといわれていて、これが月面生存説の一つの根拠になっている。ただ紫外線に弱い理由はクマムシのDNAが直接、紫外線(UV)を吸収するためではないかといわれている。

演者はもともとクマムシが好きでこの研究を始めたわけではない。大学院生時代に「生命の再構築」をやりたいと思ったものの、やり方が思いつかないまま数年経ち、たまたま早川いくおさんの「へんないきもの」(新潮文庫)という本を読んで「乾眠」に興味を持ったのがきっかけだ。「乾眠」という停止した生命状態であれば「生命の再構築」に近づけると思ってクマムシの分子的な研究を始めた。

そもそも生き物は干からびるとなぜ死ぬのか? ヒトを含め地球上の生き物の体の60%~80%は水だ。水があることで膜は形を作り、タンパク質は一定の秩序、構造(立体)に折りたたまれて機能を発揮する。水がないと膜もタンパク質も形が壊れて死ぬ。

乾燥から動物を守るものとして砂糖の一種のトレハロースが注目されている。トレハロースは水の代わりに膜やタンパク質の形を維持し、水がなくなると固体に変化して機能する。これをガラス化と呼ぶ。アフリカの半乾燥地帯に生きるネムリユスリカなどではトレハロースが重要な役割を果たしていることが知られている。

ところがクマムシにはこのトレハロースの蓄積がほとんどない。となるとクマムシの乾眠には別の物が働いているはず。

そこでクマムシの中でも最も耐性の強いヨコゾナクマムシの全遺伝子情報(ゲノム)を解読してみた。すると全体の50%強は他の動物の遺伝子と類似していたが、残りの40%にクマムシ固有の新規遺伝子を含むことが分かった。その特徴は①ストレス耐性遺伝子が増えている②ストレス障害を発生させる遺伝子を失っている③耐性に強い遺伝子を別の生物から横取りしている(水平伝播)——ことなどだった。一方で、研究が進むにつれクマムシ固有の遺伝子が重要であることが徐々に明らかになってきた。

通常タンパク質は乾燥させると形がおかしくなるが、クマムシにはいわば「ふにゃふにゃ」したタンパク質で乾燥しても固まらず、逆に水になじみやすく、沸騰させても固まらないものが大量に存在し、これが乾燥からの保護に効いていることが分かってきた。

また乾燥や放射線は生き物のDNAを切断し、破壊するが、クマムシはこれらに対抗するための特有のタンパク質を持っていることも発見した。我々はこれをDsup(Damage suppressor)と名付けた。Dsupタンパク質をヒト細胞に入れると放射線によるDNAの切断を抑制し、増殖能力を喪失させるほどの放射線量を与えても一部の細胞が増殖能力を維持することが分かつ

た。植物に入れても放射線耐性が向上することが分かっている。人類の宇宙進出にも役立つのではないかと考えている。

クマムシのゲノムには未知の耐性遺伝子がまだまだ眠っており、将来的には哺乳類などの動物の耐性能力を強化する新技術の開拓にもつながることが期待されている。

以上

## 講演2 シロアリはなぜ木だけ食べて生きられるのか？

本郷 裕一

東京工業大学生命理工学院 教授

シロアリは木造家屋を食い荒らす大害虫として、日本では関東以西で築30年以上の木造建物には必ず存在し、年間1000億円、世界では3兆円の被害をもたらす害虫として知られている。しかしシロアリは木材、枯草、枯葉を分解する生物の一つとして、彼らなしでは地球の生態系が崩壊するとまでいわれる重要な存在だ。

しかもこの15年来、材木を粉碎、溶解したバイオマスからセルロースを分離し、酵素を用いて糖分に分解、さらに微生物によってアルコールに変換する材木由来のバイオエタノールを作り出す研究が進んでいて、シロアリの存在が改めて注目されている。



シロアリはアリ、つまりクロアリの仲間と思われるかもしれないが、じつはゴキブリの仲間、タイやオーストラリアなどでは巨大な塚がたくさんあり、地球上でも最も繁栄した動物群の一つだ。肉食せず、植物枯死体のみを食料にしている。中には自らの糞を菌床にしてキノコを栽培するシロアリもあり、そのキノコは琉球王朝では宮廷料理の材料にもなっていて、首里城の周りにだけ今でも生息している。

ではなぜ木だけ食べて生きられるのか？木質はセルロースやリグニンからなる複合体で、しかも窒素を含まないので食物には不向きだ。しかも基本的に動物は消化する酵素を持たない。

じつは1匹のシロアリの腸内には数万の原生生物と1000万のバクテリア(細菌)という微生物がびっしり住み着いている。また1種類のシロアリには数百種類の細菌が共生している。彼らは1億5000万年も前からシロアリとともに生きてきた。彼らこそ、木を細胞の中に取り込んでセルロース分解している張本人だ。

では彼ら微生物はシロアリにどう貢献しているのか？

シロアリが木片を食べると腸内の微生物がそれを発酵させて水素、CO<sub>2</sub>と酢酸を作り出す。この酢酸がシロアリの栄養になる。空中の窒素(N<sub>2</sub>)を固定してアミノ酸に変える細菌もいる。

これらの腸内微生物を培養して研究してみたいが、納豆菌などごく一部の例外を除いて地球上の微生物の99%は培養できない。幸い、分子生物学の技術が発展し、DNAサンプルの特定の領域を数百万~数十億倍に増幅できるPCR(ポリメラーゼ・チェーン・リアクション)が登場した。まず、多様な60種類のシロアリを世界各地から採集し、その腸内細菌群集から特定の遺伝子配列をPCR法で増幅して系統解析したところ、数千種類の新種細菌が存在することを発

見した。次は細菌の形態とシロアリ腸内での居場所の研究だ。驚いたことにシロアリ腸内の原生生物は、その細胞表面や細胞内、さらに核の中にまで特定の種類の細菌を住まわせていた。これらの細菌の機能を調べたいが、培養ができない。そこで微生物のゲノムを解析すればわかるのではないかと考えた。ゲノムとは親から子へ伝わる遺伝子情報のすべてだ。これが分かれば生物の設計図が分かる。しかしゲノムを解析するには 10 億個の細胞がいる。

そこで我々は少数の細胞から全ゲノム DNA を増幅し、個々の細胞種のゲノムを決定するシングルセル・ゲノミクスという手法を 4 年かけて確立し、シロアリの腸内細菌のゲノム解読に成功した。培養できない微生物の少数の細胞からゲノムの完全長塩基配列を取得したのは世界でも初めてだ。

原生生物の細胞内や細胞表面に共生する細菌のゲノムを解読したところ、空中窒素固定の能力を持ち、 $N_2$  をアミノ酸に変換する能力を持っていたり、水素を食べて原生生物の木質発酵を促進する機能を持つなどしていた。

大気の 8 割を占める窒素 ( $N_2$ ) を動物は直接利用できないが、シロアリは腸内共生細菌のおかげで利用できている。だからこそシロアリは窒素分の乏しい木材だけを食べて生きていけるし、共生細菌が水素を消費するおかげで、効率良い木質の分解が可能となっている。さらには、別の原生生物の表面に共生する細菌がセルロース分解酵素を分泌し、木片消化を助けていることも分かった。おそらく、共生細菌の酵素と原生生物の酵素が相乗効果で木片を効率的に分解しているのだろう。

このように、シロアリと原生生物の共生はこれまでも知られていたが、我々は原生生物とバクテリアが密接に共生していることを発見した。

シロアリ腸内の原生生物を取り除くとシロアリは栄養失調で死んでしまう。原生生物もシロアリの腸の外では生きられない。シロアリは 1 億 5000 万年以上かけて多様な微生物と精巧な共生関係を進化させ、木だけを食べて繁栄できるようになった、と我々は考えている。

以上